



UNIVERSIDAD NACIONAL AUTÓNOMA DE MÉXICO
PROGRAMA DE MAESTRÍA Y DOCTORADO EN INGENIERÍA
INGENIERÍA ELÉCTRICA – PROCESAMIENTO DIGITAL DE SEÑALES

Percepción remota en la estimación de la trayectoria del iceberg A-68

TESIS
QUE PARA OPTAR POR EL GRADO DE:
MAESTRO EN INGENIERÍA

PRESENTA:
GARCÍA HERNÁNDEZ MARIO

TUTOR
Dr. MIGUEL MOCTEZUMA FLORES

COMITÉ TUTOR	ADSCRIPCIÓN
M. I. LARRY SALGUERO ESCOBAR.	FI
Dr. MIGUEL A. PADILLA CASTAÑEDA	ICAT
Dr. JESÚS SAVAGE CARMONA.	FI
Dr. PABLO ROBERTO PEREZ ALCÁZAR	FI

MÉXICO, Cd. Mx. Febrero 2023



Universidad Nacional
Autónoma de México



UNAM – Dirección General de Bibliotecas
Tesis Digitales
Restricciones de uso

DERECHOS RESERVADOS ©
PROHIBIDA SU REPRODUCCIÓN TOTAL O PARCIAL

Todo el material contenido en esta tesis esta protegido por la Ley Federal del Derecho de Autor (LFDA) de los Estados Unidos Mexicanos (México).

El uso de imágenes, fragmentos de videos, y demás material que sea objeto de protección de los derechos de autor, será exclusivamente para fines educativos e informativos y deberá citar la fuente donde la obtuvo mencionando el autor o autores. Cualquier uso distinto como el lucro, reproducción, edición o modificación, será perseguido y sancionado por el respectivo titular de los Derechos de Autor.

Percepción remota en la estimación de la trayectoria del iceberg A-68

A los que, como yo, nunca lograron sus sueños.

Si la muerte Quisiera (Fragmento)

“¿Sabes viajero? Tarde voy haciendo proyectos
De tentar nuevos rumbos desandando trayectos
Tengo sed tan salvaje que me quema la boca
Y ansío beber agua que brote de la roca”

Alfonsina Storni

Agradecimientos

A las personas cuyo placer es compartir.
Cuya misión de la vida es enseñar.
Especialmente a mi tutor, el Dr. Miguel Moctezuma,
por su paciencia y apoyo en la culminación de este trabajo

Dedicatoria.

A mi familia, una red grande donde relamerse las heridas.
Especialmente a mis padres, Esteban y Guadalupe
Por su esfuerzo y trabajo lograron darnos este regalo
Intangible de educación y resiliencia.

A mi esposa, Marthica.
A mi hija, Kiara Belen
Luces dispersoras de mi oscuridad

Declaración de autenticidad

Por la presente declaro que, salvo cuando se haga referencia específica al trabajo de otras personas, el contenido de esta tesis es original y no se ha presentado total o parcialmente para su consideración para cualquier otro título o grado en esta o cualquier otra universidad. Esta tesis es resultado de mi investigación personal. La información de fuentes externas se encuentra debidamente referenciada en el texto.

Ciudad de México, a 10 de octubre de 2023.

Resumen.

En este trabajo se muestra la obtención de la trayectoria seguida por el iceberg A-68, desde el momento de su desprendimiento, hasta transcurridos unos meses. Para ello se emplean herramientas clásicas del procesamiento digital de Imágenes. Mediante el uso de fotografías satelitales, adquiridas mediante un satélite dotado con dispositivo SAR (Radar de Apertura Sintética), estas fotos se tomaron en diferentes fechas. Como primer paso se reduce el nivel de ruido empleando el filtro de Perona and Malik debido a sus cualidades de preservar los bordes y su efectividad en la eliminación del ruido tipo “sal y pimienta”. Posteriormente se efectúa una segmentación basada en el algoritmo fuzzy c-means con el fin de aislar la región de hielo perteneciente exclusivamente al iceberg. La imagen segmentada contiene la región continental, el mar y el iceberg por lo cual, se separa la región de interés empleando operaciones morfológicas y una herramienta de selección de la región de interés. Finalmente se ha obtenido el iceberg sobre un fondo oscuro.

Con esta imagen se aplican operaciones de medición para medir el centro de masa y sus dimensiones. Finalmente uniendo los centros se traza finalmente la trayectoria que el iceberg ha seguido desde el momento de su desprendimiento.

Abstract.

This work shows how get the trajectory followed by the iceberg A-68, from the moment of its detachment until a few months later. For this, classic digital image processing tools are used. I use of satellite photographs, acquired through the device SAR (Synthetic Aperture Radar) method, these photos were taken on different dates. As a first step, the noise level is reduced using the Perona and Malik filter due to its edge-preserving qualities and its effectiveness in eliminating “salt and pepper” noise. Subsequently, a segmentation based on the fuzzy c-means algorithm is carried out to isolate the ice region belonging exclusively to the iceberg.

The segmented image contains the continental region, the sea, and the iceberg, so the region of interest is separated using morphological operations and a region of interest selection tool. Finally, the iceberg has been obtained on a dark background. With this image, measurement operations are applied to measure the center of mass and its dimensions. Finally, by joining the centers, the trajectory that the iceberg has followed since the moment of its calving is finally traced.

INDICE GENERAL

Glosario de abreviaturas y acrónimos.....	3
Relación de Imágenes:.....	4
Capítulo 1. Introducción	5
1.1 Motivación	5
1.2 Una leyenda del siglo XX.....	5
1.3 Descripción del proyecto.....	6
1.4 Organización del flujo de trabajo.....	8
Capítulo 2. Antecedentes, iceberg un blanco escollo.....	9
2.1 Peligro en los mares	9
2.2 ¿Qué es un Iceberg?.....	9
2.2.1 Clasificación de los Icebergs [5].....	10
2.3 El origen de los continentes de hielo.	11
2.4 Navegando a la deriva por los mares, el iceberg A-68.	12
2.5 Identificar un iceberg	16
Capítulo 3. Metodología.....	18
3.1 Obtención de imágenes aéreas.....	18
3.2 Imágenes SAR	18
3.3 Reducir el ruido en imágenes	19
3.4 Filtros en el Procesamiento de imágenes.....	20
3.4.1 Filtro Mediana	20
3.4.2 Filtro Gaussiano.....	21
3.5 Algoritmo de filtrado anisotrópico.....	25
3.6 Filtro de motas adaptativo SRAD.....	27
3.6.1 Filtro Lee.....	27
3.6.2 Filtro Frost.....	28
3.6.2 Filtro Kuan.....	28
3.7 Algoritmo de segmentado	31
3.7.1 Segmentación mediante Fuzzy C-medias.....	32
3.8 Operaciones morfológicas	33
3.9 Obtención de centroide	34
Capítulo 4. Pruebas y resultados	35
4.1 Resultado del filtrado.....	35
4.2 Resultado de segmentación.....	42
4.3 Membresía	44

4.4 Obtención de la gráfica de la trayectoria	45
4.5 Estimación de la trayectoria.....	48
4.5.1 Aproximación Polinomial.	48
4.5.2 Regresión Lineal.....	50
4.5.3 Aproximación empleando Filtro Kalman	51
4.6 Fin del viaje del Iceberg A-68.....	52
Capítulo 5. Conclusiones	54
5.1 Conclusiones	54
5.2 Trabajo futuro	54
Referencias	55
Apéndice.....	56

Glosario de abreviaturas y acrónimos.

FI	Facultad de Ingeniería
ICAT	Instituto de Ciencias Aplicadas y Tecnología
SAR	Radar de Apertura Sintética (Synthetic aperture radar)
SRAD	Reducción de motas por difusión anisotrópica (Speckle reducing anisotropic diffusion)
NSIDC	Organismo dedicado a la vigilancia de los icebergs (National Snow and Ice Data Center)
OMI	Organización Marítima Internacional
CCG	Seguridad marítima de Canadá (Canadian Coast Guard)
NIC	National Iceberg Center
DoG	Diferencia de Gauss (Differential of Gauss)
LoG	Laplaciano de Gauss (Laplacian of Gauss)
CEA	Mejora coherente anisotrópica (Coherence enhancing anisotropic)
CNN	Red Neuronal Convolutiva (Convolution Neural Network)
USNIC	Centro Nacional del Hielo de Estados Unidos (U.S. National Ice Center)
NASA	Entidad del Gobierno de Estados Unidos dedicada a la exploración espacial (National Aeronautics and Space Administration)
DOI	Identificador digital de un objeto (Digital Object Identifier)

Relación de Imágenes:

Figura 1.1 Fotografía del emblemático buque, Titanic [1]	6
Figura 1.2 Diagrama de flujo de trabajo propuesto	8
Figura 2.1 Representación de un iceberg [24].....	10
Figura 2.2 Lista de nombres de los icebergs catalogados en el océano Antártico el 1 de octubre del 2005 [5].....	12
Figura 2.3 Imagen del interferograma de la fractura [25].....	14
Figura 2.4 Imagen del espectrograma del crecimiento de la griete origen del iceberg A-68 [26]	15
Figura 2.5 Captura de pantalla del video 1708_001_AR_EN.mp4 [27].....	15
Figura 2.6 A partir de la gran fractura se forman otras y el desprendimiento del iceberg [28].....	16
Figura 3.1 Se muestra satélite de apertura sintética [29].....	18
Figura 3.2 Se muestra el espectro de un filtro de mediana.....	21
Figura 3.3 Se muestra el espectro de un filtro Gaussiano	22
Figura 3.4 Se muestra una ampliación de la imagen satelital.....	22
Figura 3.5 Ampliación de la imagen obtenida al aplicar un filtro Gaussiano.....	23
Figura 3.6 Ampliación de la imagen obtenida al aplicar un filtro de mediana	23
Figura 3.7 Imagen de la región ampliada de la imagen satelital 20170722.....	29
Figura 3.8 Región ampliada de la imagen obtenida al aplicar el filtro Lee	29
Figura 3.9 Imagen de la región ampliada al aplicar el filtro Kuan	30
Figura 3.10 Se muestra la región ampliada de la imagen obtenida al aplicar el filtro Frost	30
Figura 3.11 Se muestran las imágenes obtenidas al aplicar una segmentación K-means	32
Figura 4.1 Imagen del iceberg A-68, momentos posteriores a su formación.....	35
Figura 4.2 Fragmento de la imagen anterior ampliada al 200%.....	36
Figura 4.3 Muestra otra porción de la fotografía del iceberg A-68 en el año 2017	36
Figura 4.4 Imagen obtenida con $k=50$ y efectuando una sola iteración	37
Figura 4.5 Imagen obtenida con $k=50$ y efectuando cinco iteraciones	37
Figura 4.6 Imagen obtenida con $k=50$ y efectuando veinte iteraciones.....	38
Figura 4.7 Imagen obtenida con $k=20$ y efectuando veinte iteraciones.....	38
Figura 4.8 Imagen obtenida con $k=20$ y efectuando veinte iteraciones.....	39
Figura 4.9 Imagen de una zona ampliada, obtenida empleando el algoritmo de Perona y Malik.....	42
Figura 4.10 Se muestra la segmentación en dos regiones empleando un umbral de referencia	42
Figura 4.11 Esta imagen se obtuvo al emplear fuzzy c-means con dos regiones	43
Figura 4.12 Se muestra una ampliación al 200% de la imagen resultante	43
Figura 4.13 Se muestra el resultado de la segmentación difusa de 2 clases	44
Figura 4.14 Se muestra el resultado de aislar la región del iceberg, eliminando los demás objetos contenidos en la imagen satelital	45
Figura 4.15 Se aprecia el desplazamiento del bloque de hielo hacia la derecha y arriba, con un giro de casi 180° . Además, se aprecia el proceso de deshielo con la consecuente pérdida de volumen	46
Figura 4.16 Grafica de la predicción empleando un polinomio de grado uno (línea recta)	48
Figura 4.17 Grafica de la predicción empleando un polinomio de grados tres	49
Figura 4.18 Grafica de la predicción empleando un polinomio de grado 4.....	49
Figura 4.19 Se muestra la ruta obtenida mediante una regresión lineal	50
Figura 4.20 Se muestra la trayectoria estimada mediante un filtro de Kalman.....	51
Figura 4.21 Se muestra la trayectoria seguida por el iceberg A-68 [30].....	52
Figura 4.22 Se aprecia el fragmento más grande del iceberg.....	53

Capítulo 1. Introducción

1.1 Motivación

Nuestra actual forma de vivir, llena de confort y repleta de tecnologías enajenantes, nos está llevando a puntos peligrosos. Las mediciones de temperatura realizadas en el día a día nos hablan de un incremento. Este fenómeno se atribuye principalmente a la actividad humana, derivada de la quema de combustibles fósiles, como el carbón, el petróleo, el gas. Estas actividades provocan un aumento en el CO₂ y otros tipos de gases que provocan un efecto invernadero. Sumado a estas actividades la sobre-explotación de los bosques, debido a la tala desmedida, provoca la pérdida de sistemas balanceados y con el paso del tiempo se obtienen zonas áridas.

Los continentes de hielo se muestran como un testigo fiel de este calentamiento, de forma natural se presentan desprendimientos de bloques de hielo, los cuales se separan de la masa continental y se dirigen hacia mar abierto. En nuestros días se ve la aparición de enormes bloques de hielo formando icebergs.

Nuestro planeta, Tierra, pertenece al grupo de los planetas rocosos. Posee, en su centro, una gran masa de hierro líquido, cubierto por una capa sólida de magma y en su capa externa se encuentra los continentes rodeados por una gran cantidad de agua. Es un misterio el origen del agua, se piensa que se formó en los primeros tiempos durante la formación de nuestro universo. Por otro lado, es aceptada la teoría de que ahí se dieron los primeros organismos. Los cuales al paso de los años contribuyeron a la formación de la atmosfera. Nuestras condiciones actuales son un devenir de circunstancias climáticas con características cambiantes en el transcurso del tiempo.

Este globo gigantesco posee características peculiares, por ejemplo, la forma esférica favorece la aparición de zonas climáticas, más calidez en el centro donde los rayos solares inciden de forma perpendicular y menos cálidos en los extremos donde los rayos inciden en forma tangencial. En la parte central se encuentran los lugares con mayores temperaturas y al alejarse hacia los polos la temperatura desciende, así en los dos extremos se encuentran las regiones heladas,

Nuestro hogar, el planeta Tierra, está cubierta por una gran cantidad de agua. Antes de la era de la aviación eran los viajes por barco la forma de ir de un continente a otro. En la actualidad gran parte de las mercancías se mueven por mar, empleando grandes embarcaciones. Es el mar el sitio donde existen grandes peligros para la navegación, uno de ellos son los encuentros fortuitos con grandes masas de hielo flotando a la deriva.

Con este trabajo se pretende encontrar la ruta de un determinado Iceberg, empleando fotografías satelitales y un análisis probabilístico. Con los resultados obtenidos, mantener alerta a las naves cercanas a la masa de hielo para evitar alguna colisión. En este sentido la navegación depende en gran medida de los reportes meteorológicos, los reportes de las patrullas marítimas, y el uso de sus instrumentos de vigía, tanto instrumentales como humanos.

1.2 Una leyenda del siglo XX.

En el cielo oscuro de esa madrugada del 15 de abril de 1922, la faz de la luna se cubría con el manto negro de la penumbra, el mar estaba tranquilo y el viento se encontraba en calma, ningún indicio presagiaba la terrible tragedia a punto de ocurrir. Una enorme nave se balanceaba sobre las aguas del Atlántico, el portentoso navío inglés pesaba la asombrosa cantidad de 46,328 toneladas y media, 270 metros de largo (eslora) y 25 metros

de alto. Los motores eran de una potencia de 55,000 caballos de potencia. Su nombre era Titanic. [1]

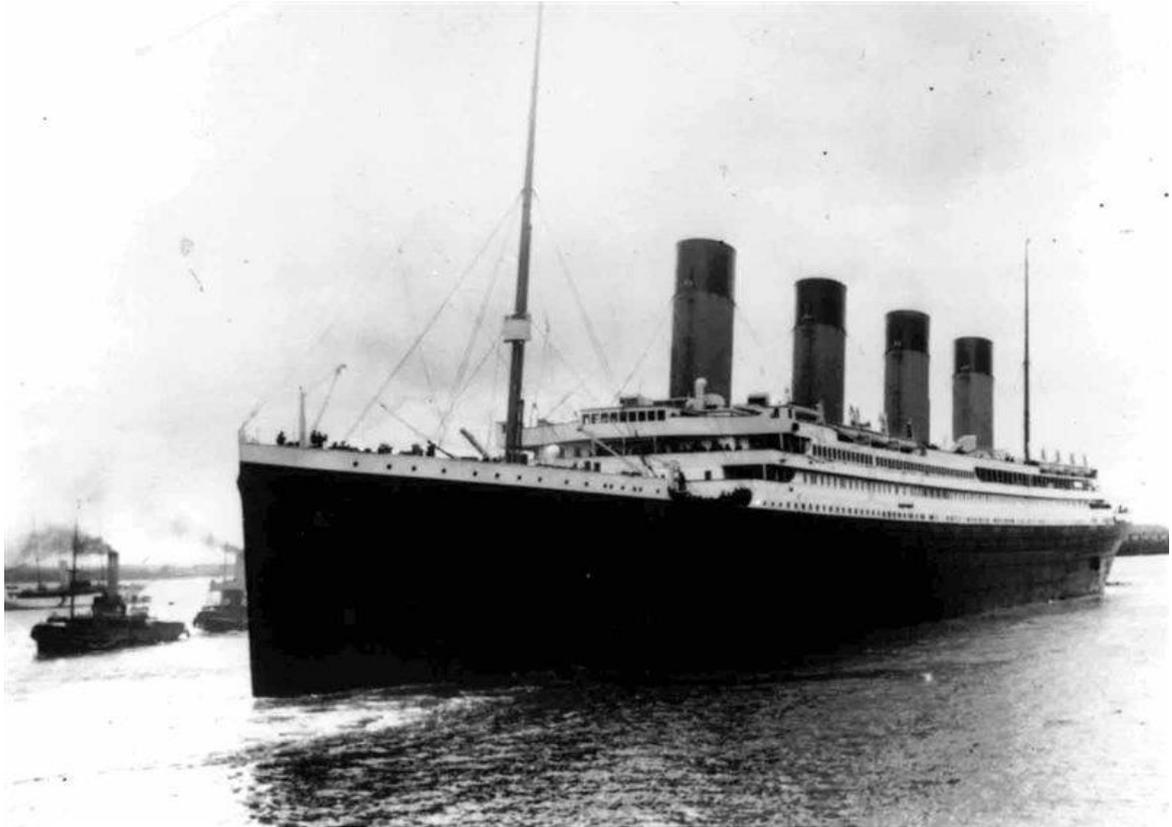


Figura 1.1 Fotografía del emblemático buque, Titanic [1]

El barco zarpó del puerto Southampton en Inglaterra con rumbo a Nueva York, siguiendo una ruta ubicada más hacia al sur de las rutas habituales para evitar la presencia de los peligrosos icebergs y por órdenes del capitán, en las noches, todas las aberturas en la parte delantera se cerraban para darle la mejor visión a los vigías. Era uno de los navíos construido y dotado con las mayores normas de seguridad de la época. Desde los resistentes materiales empleados en su construcción, hasta los protocolos de navegación, se pensaron para darle una fortaleza que lo enmarcaba como un barco indestructible. Poseía un casco con doble fondo dividido en dieciséis compartimientos, se aseguraba que podría navegar hasta con cuatro de estos inundados.

Esa trágica madrugada, al avisar el vigía de la presencia del obstáculo, el capitán dio la orden de apagar los motores y virar a babor (izquierda). Fue una decisión fatal, la nave golpeó contra el bloque de hielo por debajo de la línea de flotación, el resultado fue un enorme hueco y desgarramiento de ese costado, por donde el agua penetró en los compartimientos de flotación inundándolos. Es importante remarcar el hecho de que la naturaleza de los icebergs es mantener sumergida la mayor parte de su masa. Por ello es imposible conocer la magnitud y forma del hielo conllevando el peligro de golpear con una masa grande y densa al elegir la dirección del viraje al evitar una confrontación de frente. En un par de horas uno de los más grandes navíos de la época se fue al negro fondo del inmenso mar, convirtiéndose en una leyenda.

1.3 Descripción del proyecto

En este trabajo se emplean fotografías satelitales de uno de los icebergs más grandes del mundo, en su época. La base de este trabajo está en estas imágenes, por ello

se emplean los conocimientos relativos a la manipulación y modificación de las fotos. Estos procesos computacionales son muy empleados en las tecnologías digitales de nuestros días, como es el intercambio de información, la difusión de información, la medicina y el área del entretenimiento.

Las técnicas de procesamiento de señales son excelentes herramientas para manipular imágenes. Contamos con diferentes desarrollos y algoritmos para abordar los problemas involucrados en el procesamiento de señales. En ese caso mencionamos, a continuación, las empleadas en el presente trabajo.

- Filtrado digital.
- Segmentación
- Morfología
- Centro de masa.

En muchos procesos cotidianos aparece, por diversas circunstancias, una señal que se traslapa con la señal de estudio, la cual es importante reducir o eliminar en el mejor de los casos. Uno de los primeros pasos a seguir es identificar el origen de esta señal para suprimir estas fuentes de ser posible. En caso contrario, se pueden usar otras técnicas, como es el uso de filtros digitales. En este trabajo se hace uso del filtro anisotrópico, basado en el trabajo de Perona-Malik.

Eliminar o reducir el ruido de una imagen, obtener los bordes de imágenes y segmentación son técnicas muy estudiadas y en constante evolución. Al paso del tiempo, los investigadores han encontrado nuevos algoritmos para modificar en aras de mejorar la imagen de origen.

En este proyecto se emplearán como punto de partida las imágenes satelitales SAR, obtenidas por los satélites que vigilan los desprendimientos de los continentes polares, la Antártida (en el hemisferio Sur) y el Ártico (en el hemisferio Norte).

Una característica básica de las imágenes SAR es su “grano”, el cual, indica la presencia de un ruido aleatorio. Por ello se empleará un filtro para mejorar la nitidez de la imagen y sobre todo respetar los bordes para delimitar el área del iceberg y cuantificar sus dimensiones.

Estas imágenes presentan tres zonas importantes, a saber.

- La zona continental
- El iceberg
- El agua del océano colindante.

El paso siguiente es aislar la imagen del iceberg, eliminando la zona continental y el área del océano. Las regiones del iceberg y la zona continental presentan características de niveles de brillo muy semejantes, por esa razón el obtener la imagen del iceberg presenta un reto a vencer. Se empleó una segmentación mediante el algoritmo fuzzy C-means para llevar a cabo esta tarea. Aunque, en un primer intento me avoque en obtener un segmentado de dos regiones solamente, es notable el hecho de tener mejores resultados al segmentar en un número mayor de secciones, por ejemplo, cuatro regiones.

En las fotos iniciales, cuando se da la fractura del iceberg, el algoritmo de segmentado no logra separar los bloques de hielo en forma automática. La tarea de obtener dos regiones independientes en las zonas heladas, región continental e iceberg no es algo trivial.

Al romperse los grandes bloques de hielo se desprenden pequeñas porciones y flotan muy cercana del iceberg lo que dificulta obtener una óptima separación del iceberg, únicamente empleando el algoritmo de segmentación. En esta tarea, es necesario echar

mano de herramientas para eliminar pequeñas zonas de hielo que se encuentran fuera de la región de interés y no pertenecen al iceberg.

Posteriormente se procede a obtener el centro de masa del bloque mediante una técnica de segmentación. Empleando otras imágenes tomadas posteriormente es posible determinar la ruta seguida por el bloque de hielo, al continuar calculando los centros de las imágenes del iceberg en los siguientes días.

1.4 Organización del flujo de trabajo

El presente trabajo está organizado como se describe a continuación. En primer lugar, se da una breve Introducción donde se expone la motivación, se dedea tener una herramienta para seguir la trayectoria de los icebergs. En el capítulo siguiente se muestran los fundamentos teóricos y algoritmos empleados, la imagen satelital tiene gran cantidad de ruido por ello se emplea un filtro que elimine el ruido sin alterar la imagen. Después de segmenta la imagen con el objetivo de aislar el iceberg. Como siguiente acción se emplea operaciones morfológicas para eliminar objetos y delimitar la región de interés. Como acción final se aísla la zona del iceberg para aplicar operaciones que nos permiten calcular su centro y dimensiones. Con los datos obtenidos se procedió a obtener la trayectoria uniendo los centros geométricos obtenidos en el paso anterior. Esto se esquematiza en el siguiente diagrama de flujo.

Flujo de trabajo

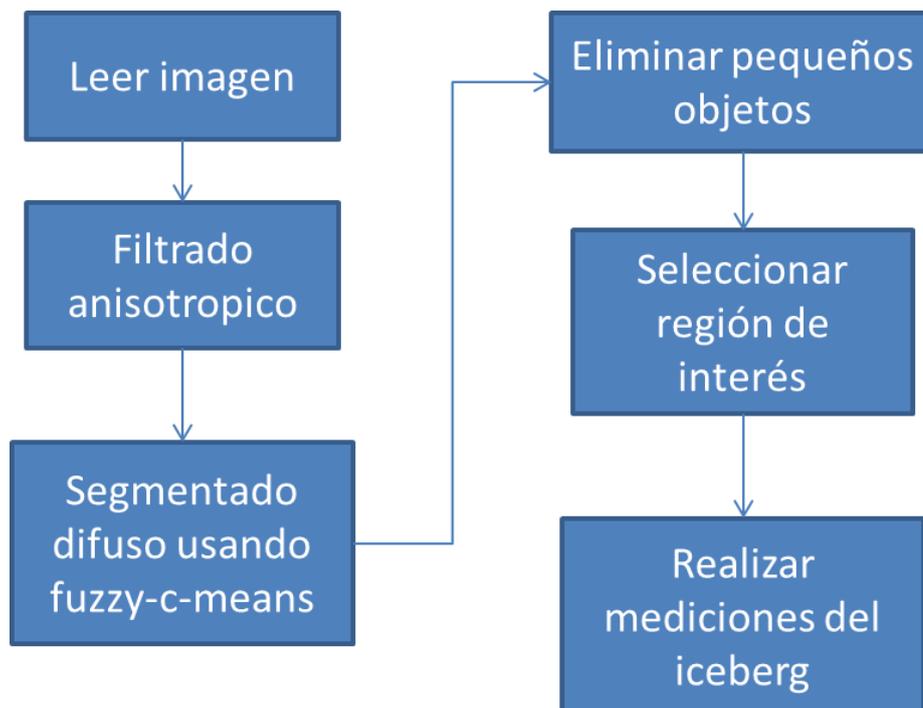


Figura 1.2 Diagrama de flujo de trabajo propuesto

Capítulo 2. Antecedentes, iceberg un blanco escollo.

2.1 Peligro en los mares

La tierra, lugar donde habitamos, está cubierta por una capa de agua salada la cual proporciona un medio de conexión entre todos los puntos del globo terráqueo. Desde tiempos remotos de la civilización, los viajes por mar se han realizado en todas las culturas humanas. Actualmente el intercambio comercial a través de la navegación constituye el 80%. Mega-buques se mueven por los mares del mundo transportando diversas mercancías. Es importante que los trayectos se realicen en los tiempos acordados, así como, la mercancía llegue a su destino en buen estado.

La Organización Marítima Internacional (OMI), creada el 17 de marzo de 1948, es un organismo de la ONU encargada de la seguridad y la protección del transporte por mar. Reporta la existencia de más de 50 000 buques mercantiles transportando todo tipo de mercancía y pertenecen a más de 150 diferentes naciones, proporcionando empleo a más de un millón de marineros.

Uno de los cuidados al conducir un buque es evitar los encuentros con obstáculos con características singulares con los cuales pudiera tener una colisión, de consecuencias fatales.

2.2 ¿Qué es un Iceberg?

La RAE define Iceberg [2] como una gran masa de hielo flotante, desgajada del polo, que sobresale en parte de la superficie del mar. La masa sumergida corresponde al 88% de la masa total. Un iceberg [3] es una masa de hielo flotante que se forma cuando una gran cantidad de nieve se acumula en un glaciar de la Tierra. Estas masas de hielo flotan libremente en el océano y suelen ser visibles desde tierra firme. Los icebergs también son conocidos por ser inestables, ya que pueden variar considerablemente en tamaño y forma. La mayoría de ellos contienen agua congelada de los océanos de todo el mundo.

En el Ártico se originan de los desprendimientos de las costas de Groenlandia. Se estima que en el hemisferio Norte se desprenden alrededor de 10000 [4] al año, aunque solo la mitad reúnen las características para permitir una deriva considerable. Para que un bloque de hielo sea considerado como iceberg y reciba un nombre debe cumplir ciertos requisitos.

- Originarse a partir de un glaciar.
- Sobresalir por lo menos 5 metros sobre el nivel del mar.
- Tener un espesor de al menos 30 metros
- El iceberg debe contar con una superficie mínima de 500 metros cuadrados.
- El avistamiento debe ocurrir dentro de los 30 días contados a partir del desprendimiento. Si se avista dentro de los 30 días del calendario se elimina de la carta semanal.
- Será monitoreado mientras siga al sur de los 60° S.

En el Sur se forman a partir de los desprendimientos de las plataformas del continente Antártico.

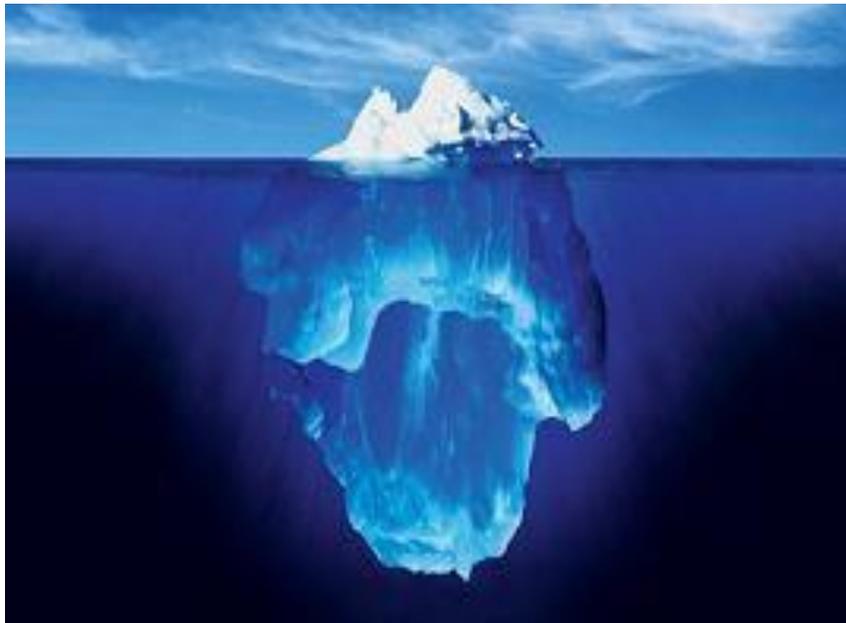


Figura 2.1 Representación de un iceberg [24]

2.2.1 Clasificación de los Icebergs [5]

Por su tamaño

1. *Growler*: menos de 1 metro de altura y menos de 5 metros de largo
2. *Bergy Bit*: 1 a 4 metros de altura y 5 a 14 metros de largo
3. *Small*: 5 a 15 metros de altura y 14 a 60 metros de largo
4. *Medium*: 16 a 45 metros de altura y 61 a 122 metros de largo
5. *Large*: 46 a 75 metros de altura y 123 a 213 metros de largo
6. *Very Large*: más de 75 metros de altura y más de 213 metros de largo

Por su forma

Básicamente existen dos tipos de icebergs: **los tabulares y los no tabulares**.

Los tabulares son **témpanos con forma de meseta**: laderas empinadas y cima plana; suelen ser muy grandes ya que su ratio altura/longitud es de al menos 5:1. Sobre la superficie lucen como una *tablet* gigante.

Los no tabulares son el resto de los icebergs y se encuentran en al menos cinco sub-tipos:

1. *Dome*: un iceberg con su extremo superior redondeado
2. *Pinnacle*: un iceberg con una o más puntas elevadas
3. *Wedge*: un iceberg similar a un tubular, pero con una ladera empinada y la otra sumergida
4. *Dry dock*: un iceberg erosionado en el que se ha formado un canal
5. *Blocky*: un iceberg muy alto con laderas empinadas y cima plana

Estas gigantescas moles de hielo constituyen un gran peligro para las embarcaciones, un choque con un gran bloque de hielo puede destruir parte de la estructura de la nave y conducirlos al naufragio. El curso de los icebergs se monitorea por la Autoridad de Seguridad Marítima de Canadá (CCG, por sus siglas en inglés). Esta agencia es

responsable de vigilar el curso de los icebergs y alertar a los buques de que eviten el tráfico con los icebergs. La CCG también asesora sobre cómo evitar un encuentro con un iceberg, al igual que los peligros que representa.

Los accidentes de naufragio de barcos pueden resultar aterradores, pero los impactos de buques contra icebergs son aún más devastadores. Estas colisiones son un evento relativamente común en las aguas frías del océano, particularmente en el Océano Ártico y la Antártida. Aunque los buques están equipados con tecnología de vanguardia para evitar estos accidentes, muchos buques siguen siendo víctimas de estos percances.

Existen varios icebergs que han sido vistos en el año 2022, entre ellos: el Iceberg A-68A, el Iceberg Larsen C, el Iceberg B-15J, el Iceberg B-47, el Iceberg P-20, el Iceberg B-32 y el Iceberg B-33. Estos icebergs se encuentran principalmente en la Antártida, pero algunos otros también se han visto en el Ártico.

La vida de un iceberg es impresionante, a la vez que misteriosa. Comenzando con su viaje desde las capas profundas de los océanos hacia la superficie, los icebergs son testigos de grandes aventuras a través de los diferentes ecosistemas marinos y continentales. Una vez en la superficie, los icebergs se descongelan y se abren paso a través del agua mientras lentamente se deslizan hacia el océano. Durante su corta vida, los icebergs experimentan diferentes condiciones atmosféricas, cambios de temperatura drásticos y una variedad de encuentros con otros cuerpos de agua. La silueta blanca de los icebergs, que contrasta con el azul claro del océano, brinda a los navegantes guías importantes cuando están navegando por áreas escondidas. La naturaleza única de los icebergs los hace difíciles de predecir y siempre llenan de maravilla a aquellos que tienen la oportunidad de verlos. Cuando el sol se pone, los icebergs se muestran como formaciones arquitectónicas únicas, con toda su belleza para deleite de los pocos afortunados que tienen la fortuna de presenciarlo. La vida de un iceberg termina cuando este se desvanece en el horizonte, dejando un recuerdo eterno de la majestuosidad de la madre naturaleza.

2.3 El origen de los continentes de hielo.

Las grandes porciones heladas no provienen del agua de mar ya que la presión de las aguas profundas evita la congelación del agua. Se acepta su origen debido a la solidificación del agua atmosférica, se forman por la acumulación de escarcha y se ha descartado la formación de nieve en esos lugares. Los icebergs que se encuentran en el Atlántico norte se desprenden de los más de cien glaciares del oeste de Groenlandia [6]. Se desplazan rumbo a las masas continentales, algunos alcanzan las costas de Canadá, otros alcanzan Alaska, Siberia y el mar de Barents (en Rusia). Se estima que de 150 a 300 icebergs alguna vez llega al océano Atlántico.

En el hemisferio Sur los icebergs no se originan en los grandes bloques de hielo sino en las grandes plataformas o barreras de hielo. Las principales son, al oeste: Getz, Abbot y Ross; al este: Larsen, Ronne, Filchner, Riser-Larsen, Fimbul y Amery.

Los icebergs antárticos reciben su nombre acorde a la nomenclatura internacional que secciona el continente en cuatro sectores: A, B, C y D. El nombre se forma al identificar la región desde donde se desprende, como primer paso se le da un nombre clave, posteriormente se le da un número consecutivo. Si es pequeño (menor de 19 km en su eje mayor) no se monitorea.

Cuadrante A	Cuadrante B	Cuadrante C	Cuadrante D
0-90 W	90W-180	180-90E	90E -0
Mar Bellinghausen / Weddel	Amundsen / Eastern Ross Sea	Mar Western Ross / Wilkesland	Amery / Mar Eastern Weddell

Cuando el iceberg se rompe la nueva división también se nombra, estos incluyen el nombre original “anfitrión” y un sufijo para identificarlo como producto del iceberg original. El iceberg de origen pasa a tener un sufijo revisado con la letra A o alfa.[8]

Los icebergs son monitoreados por varios organismos, destacan el Servicio de Hidrografía Naval, entidad del gobierno argentino y el Centro Nacional de Hielos (NSIDC) dependiente del gobierno de Estados Unidos. Como ejemplo se muestra la relación de masas heladas avistadas en octubre del 2005.

Antarctic Icebergs
CURRENT POSITIONS

<i>Iceberg</i>	<i>Date</i>	<i>Latitude</i>	<i>Longitude</i>	<i>Size (NM)</i>	<i>Image Source</i>	<i>Image</i>	<i>Date of Image</i>
A-22A	2005270	66.51S	54.54W	36x27	ENVISAT	A22A	2005043
A-23A	2005270	76.07S	41.40W	46x43	ENVISAT	A23A	2005108
A-27	2005270	76.14S	43.29W	10x08	ENVISAT	A27	2005108
A-43D	2005270	71.16S	58.33W	27X18	DMSP	A43D	2005215
A-43E	2005262	56.30S	31.51W	14x10	ENVISAT	A43E	2005038
A-43F	2005270	66.26S	59.36W	29x17	ENVISAT	A43F	2005088
A-52	2005262	61.51S	54.24W	21x10	ENVISAT	A52	2005106
A-53A	2005270	67.10S	60.01W	29x16	ENVISAT	A53A	2005088
A-53B	2005270	66.37S	59.08W	11x02	ENVISAT	A53B	2005088
B-09B	2005270	67.14S	148.33E	51x19	ENVISAT	B09B	2005096
B-15A	2005271	72.50S	171.07E	66x15	AVHRR	B15A	2005249
B-15B	2005270	64.54S	116.09E	39x20	ENVISAT	B15B	2005230
B-15D	2005270	69.33S	27.19E	29x08	ENVISAT	B15D	2005198
B-15F	2005272	65.33S	132.31E	21x08	ENVISAT	B15F	2005144
B-15G	2005272	64.40S	101.44E	26x12	ENVISAT	B15G	2005201
B-15I	2005270	66.59S	150.13E	11x02	ENVISAT	B15I	2005228
B-15J	2005271	77.09S	169.16E	30x22	AVHRR	B15J	2005249

Figura 2.2 Lista de nombres de los icebergs catalogados en el océano Antártico el 1 de octubre del 2005 [5]

2.4 Navegando a la deriva por los mares, el iceberg A-68.

Para localizar icebergs, al navegar por los océanos del mundo, se emplean radares y las gráficas de seguimiento emitidas por la Patrulla Internacional de Hielo (OMI). Además, se tienen vigías encargados de vigilar el horizonte. Existen varios sitios donde se pueden encontrar mapas de icebergs. En el sitio web de la Autoridad de Seguridad Marítima de Canadá (CCG) se pueden consultar los últimos informes sobre los icebergs y ver los mapas de su curso. También se puede visitar el sitio web de la National Ice Center (NIC) para ver

los últimos mapas y gráficos de los icebergs. Otra opción es el sitio web NSIDC's, que contiene una gran cantidad de datos sobre los icebergs.

En mar abierto, al encontrar un bloque de hielo es preferible evadirlo manteniendo una distancia de alrededor de 2.5 a 5 kilómetros de distancia. Los hielos viejos, de alta densidad y de agua dulce se pierde contra al fondo azul del mar. Los hielos de agua salada son más suaves y suelen ser de color blanco.

Los icebergs se trasladan en el mar principalmente a través de la acción de las corrientes oceánicas y los vientos. Esta acción empuja a los icebergs y les da forma, permitiéndoles moverse a través del océano. Además, debido al efecto de calor del sol sobre el hielo, los icebergs también se deshacen lentamente con el tiempo. Las corrientes oceánicas cambiantes, los vientos y el calor del sol juntos afectan el curso.

El iceberg A-68 es un enorme iceberg del tamaño de la Isla del Príncipe Eduardo y se desprendió del hielo Larsen C en el Océano Antártico en julio de 2017. Desde entonces, ha sido monitoreado por la Autoridad de Seguridad Marítima de Canadá para prevenir accidentes de navegación. Se estima que el iceberg A-68 mide aproximadamente 5.000 km² y tiene una profundidad de aproximadamente 600 metros. Se ha estimado que se moverá aproximadamente 120 kilómetros en total durante su viaje, dependiendo de los vientos y las corrientes oceánicas. La Autoridad de Seguridad Marítima de Canadá sigue monitoreando el curso del iceberg A-68 para prevenir accidentes de navegación. El iceberg A-68 se desprendió, de una región localizada al sur de la Península Antártica y se dirigió, lentamente, hacia el norte [18].

La formación y desplazamiento del iceberg A-68 es uno de los eventos naturales más notables de los últimos años. El iceberg se formó en agosto de 2017 como parte del hielo antártico, y desde entonces ha empezado un viaje largo y a la vez excitante. Después de formarse, el iceberg pasó por varios canales y bahías, navegando a través de costas africanas, al sur de la isla de Gough, hasta alcanzar su nuevo hogar en la Isla Marion, Sudáfrica. Durante su viaje, el tamaño de A-68 se redujo significativamente. Inicialmente medía 5,8 veces el tamaño de Manhattan (aproximadamente 6.000 km²), pero al llegar a su destino final había disminuido a una tercera parte el tamaño de Manhattan (aproximadamente 1.720 km²).

La lucha de A-68 para sobrevivir en el océano abierto fue una lección importante para marineros y científicos que estudian el comportamiento de los icebergs cuando se desplazan. La saga de A-68 demostró que, pese a su fragmentación, los icebergs son capaces de seguir navegando durante grandes distancias y tiempos debido a sus formas particulares que les permiten fluir con el movimiento del agua y evitar obstáculos. Esta hazaña del diagnóstico no solo brinda información importante para los investigadores, sino también una fuente de inspiración para los navegantes aventureros. Durante su viaje, el iceberg se ha ido desgastando y disminuido de tamaño. Finalmente, en 2020, el iceberg se disolvió y desapareció en el mar.

La Antártida se encuentra en el hemisferio sur, justo al sur de América del Sur. Es el lugar más frío del planeta, con temperaturas que pueden llegar hasta -90°C. Es un continente cubierto en su mayoría por hielo y nieve. Hay varias estaciones de investigación situadas en el continente, incluyendo la Estación Antártica argentina, la Estación Antártica británica, la Estación Antártica francesa y la Estación Antártica rusa. Estas estaciones están dedicadas a la investigación en todas las áreas relacionadas. En las fotos obtenidas por el satélite Copernicus Sentinel-I de la Antártida, específicamente de la plataforma de hielo

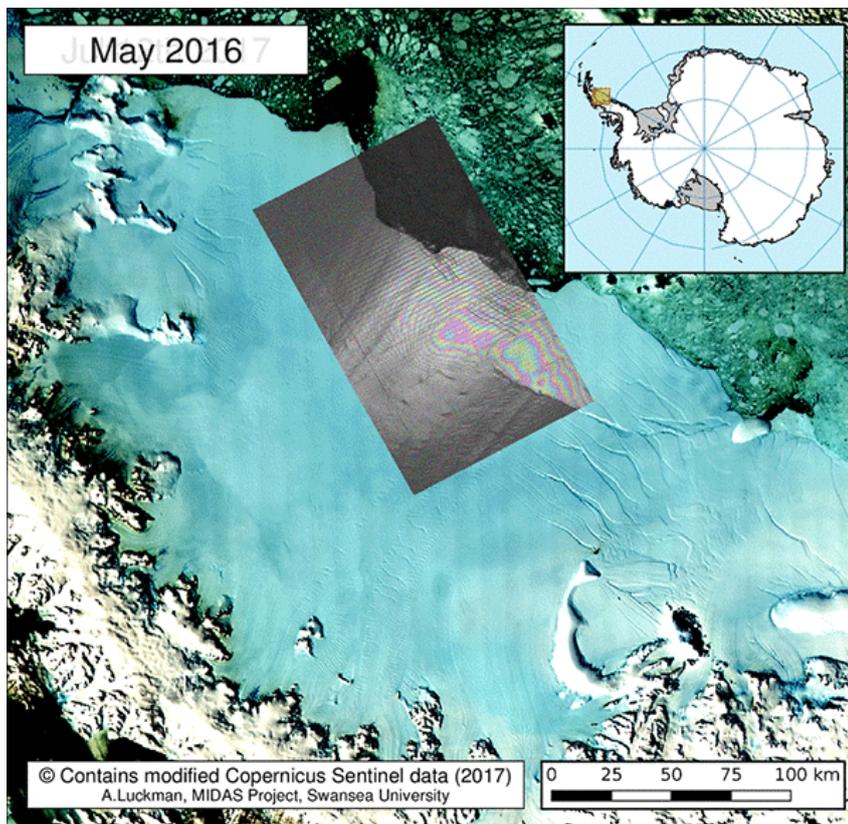


Figura 2.3 Imagen del interferograma de la fractura [25]

En la imagen se aprecia de color azul claro la zona continental, de color verde el mar y en el rectángulo gris el empleo del interferómetro para dar seguimiento al crecimiento de la enorme grieta.

Larsen C, se aprecia la aparición y posterior crecimiento de una grieta precursora de la fractura del hielo continental. Estas imágenes se emplearon para monitorear la forma y el crecimiento de la grieta hasta el desprendimiento del iceberg. Se emplearon varias imágenes para formar un interferograma ¹.

La científica polar Anna Hogg dijo: "Podemos medir la propagación de la grieta del iceberg con mucha más precisión cuando usamos la información precisa de deformación de la superficie de un interferograma como este, en lugar de la imagen de amplitud, o en blanco y negro, donde la grieta no siempre es visible."

¹ Imagen de radar que registra patrones de interferencia capturados por dos antenas separadas por una corta distancia

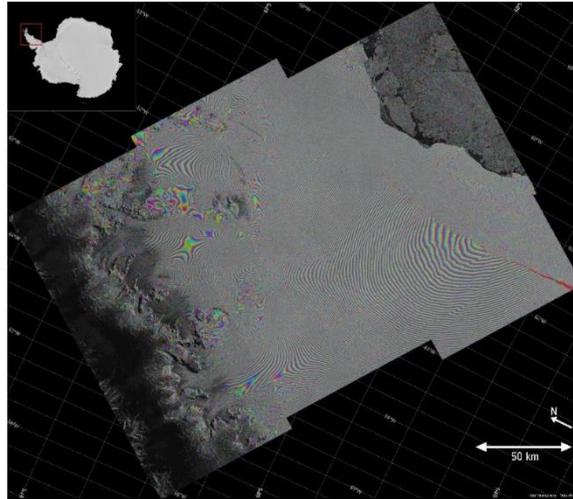


Figura 2.4 Imagen del espectrograma del crecimiento de la grieta origen del iceberg A-68 [26]

Desde la aparición de la grieta, ésta era estable, pero a partir de enero del 2016 empezó a alargarse. En enero del 2017 creció 20 km, para alcanzar una longitud de 175 km. A finales de mayo aumentó otros 16 km después de tener varias semanas de calma, al crecer se bifurcaba rumbo al mar de Weddell. Para el 12 de julio las imágenes evidenciaban el desprendimiento del enorme iceberg.

En la siguiente foto se aprecia el crecimiento al pasar el tiempo de esta grieta.

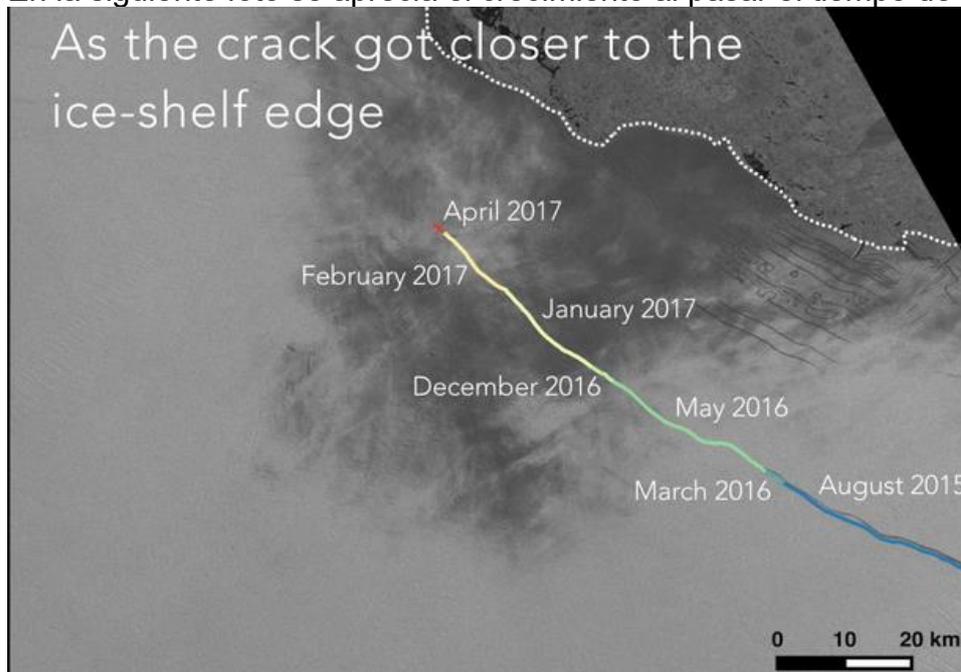


Figura 2.5 Captura de pantalla del video 1708_001_AR_EN.mp4 [27]

El crecimiento de la grieta se realizó durante varios meses, hasta el momento que se desvió hacia el mar, provocando el desprendimiento de una gran masa de hielo y la formación de algunas otras grietas hacia la parte continental con la consecuente producción de otros pequeños desprendimientos.

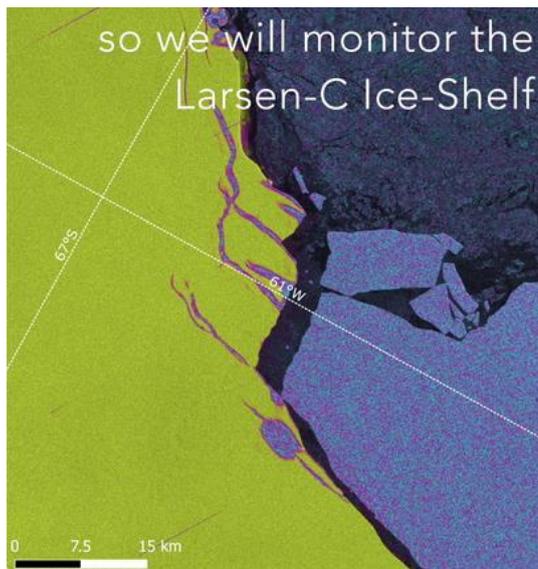


Figura 2.6 A partir de la gran fractura de forman otras y el desprendimiento del iceberg [28]

La misión CryoSat de la ESA midió la profundidad de la grieta. Con un altímetro de radar para medir la altura y el grosor de la superficie del hielo, la misión reveló que la grieta tenía varias decenas de metros de profundidad.

Desde julio del 2017, el gran iceberg tabular, conocido como A68, se alejó de la plataforma de hielo. Las imágenes de Sentinel-1 también muestran la formación un grupo de más de 11 icebergs más pequeños, el más grande de los cuales tiene más de 13 km de largo. Estos 'pedazos de bergy' han roto tanto el iceberg gigante como la plataforma de hielo restante.

Es relevante subrayar el papel de la constelación de dos satélites Copernicus Sentinel-1, son indispensables para descubrir y monitorear eventos como los desprendimientos de masas de hielo, porque entrega imágenes de radar cada seis días, incluso cuando la Antártida está envuelta en la oscuridad durante varios meses del año.

2.5 Identificar un iceberg

Al navegar en el mar, un navío emplea su sistema de radar para identificar los obstáculos situados en su ruta de navegación, y mediante un vigía si las condiciones lo permiten. Es un problema, aún en nuestros días, donde se presenta colisiones con masas de hielo. La única forma segura de detectar un iceberg es mediante el uso de satélites. Las grandes masas se identifican en las fotografías, pero los objetos más peligrosos son los growlers, ya que el radar difícilmente lo detecta y a simple vista pasan inadvertidos en los mares del Sur. Estos growlers son un indicio directo de la presencia de icebergs ya que se desprenden de ellos.

Para su identificación se emplean dos tecnologías, el análisis de imágenes y la altimetría. En el primero se emplean radares de gran barrido que toman fotos en cuadrados

de 400 x 400 km. Son fotos que presentaban características singulares por la naturaleza propia de la fuente.

La técnica del altímetro mide la altura del suelo o mar que abarca una zona de 5 km, lo cual no es práctico para cubrir grandes zonas. Presenta una ventaja sobre las imágenes, empleando un grupo de tres satélites es posible detectar objetos que sobresalen del mar unos cuantas decenas de centímetros, amenos, que el oleaje perturbe la medida. Estas técnicas tienen como principal inconveniente el costo del servicio.

En el año de 2017 el Centro de Ingeniería de Recursos del Océano Frío y la compañía energética noruega Statoil lanzaron una convocatoria abierta para encontrar un método de identificación de icebergs flotando en el mar abierto de Terranova. El premio para el ganador fue de \$50,000 dólares. La competencia se llevó a cabo en una compañía perteneciente a Google de nombre Kaggle, la competencia se denominó Iceberg Classifier Challenge. El reto consistió en analizar diferentes imágenes satelitales incluyendo icebergs, barcos y otros objetos y determinar cuál es cuál. El material empleado constaba de 5000 imágenes [7].

Capítulo 3. Metodología

3.1 Obtención de imágenes aéreas.

Con el uso de aviones como fuentes de reconocimiento se inició una nueva etapa en el conocimiento de nuestro planeta. En un principio se emplearon fotografías “convencionales” en las cuales se sobrevolaba y se toman fotos, las cuales se analizan posteriormente [8].

En nuestros días se emplean cámaras digitales y sensores en rangos del espectro electromagnético fuera del espectro visible.

Estas imágenes son, en el caso de imágenes satelitales, poco claras, las imágenes tienden a difuminarse. Es necesario realizar un procesamiento digital para mejorar su calidad y permitir su uso. Habitualmente los pasos a seguir son [9]:

- Suavizado de la imagen. - Homogeneizar los niveles de brillo entre píxeles vecinos.
- Eliminación del ruido. - Cambiar los cambios bruscos de intensidad entre píxeles.
- Realzar la imagen. - Incrementar los niveles de las partes más claras.
- Detección de bordes. Detectar las líneas donde existe un cambio abrupto de intensidad.

Existen diferentes fuentes de ruido, en los modelos matemáticos empleados para estos sistemas destacan:

- Ruido gaussiano. - Tiene una distribución tipo campana de Gauss, esta presenta en muchos de los sistemas formados por circuitos electrónicos. Se presenta en imágenes con poca iluminación.
- Ruido Uniforme. - Es un ruido cuya función de probabilidad es constante en un intervalo.
- Ruido impulsivo (sal y pimienta). - Se presenta en los procesos de conversión A/D durante el proceso de digitalización.

3.2 Imágenes SAR

Las imágenes de trabajo se obtienen mediante el uso de un radar de apertura sintética (SAR) [11].

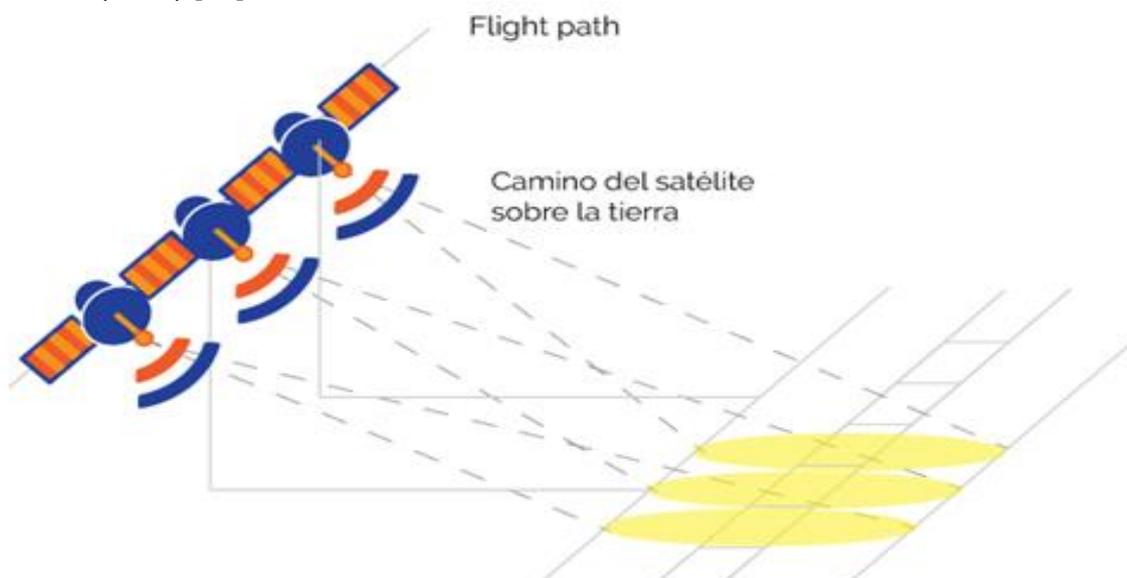


Figura 3.1 Se muestra un satélite de apertura sintética [29]

El radar emplea algoritmos de optimización para aumentar, de manera sintética, la resolución en la dirección azimutal, para ello aumenta los pulsos enviados al objetivo y por consecuencia la energía recibida de retorno es mayor.

En el presente trabajo emplearemos imágenes SAR. Los sensores del satélite emplean ondas electromagnéticas en el rango del infrarrojo, microondas o ultravioleta. El mismo satélite envía el impulso y recibe la onda reflejada, por ello no necesita otras fuentes de iluminación, logrando trabajar tanto de día como de noche. Cuando emplean rayos X la frecuencia de trabajo se elige de forma que las nubes y/o la lluvia se puede considerar como un medio transparente.

El origen de su nombre deriva de los arreglos de sus antenas las cuales son de menor tamaño que otros sistemas para la misma alta resolución. Un SAR está conformado por un transmisor, una antena, un receptor, un sistema de almacenamiento de datos y un sistema de procesamiento. El transmisor envía una sucesión de pulsos, midiendo el tiempo que le toma a la onda regresar al punto de emisión se emplea para calcular la distancia del objeto (tierra). La intensidad de la señal reflejada se interpreta para obtener una imagen del terreno, las zonas de mayor intensidad se colocan como puntos brillantes y las superficies más lisas devuelven menor intensidad y se identifican como zonas oscuras. [11]

3.3 Reducir el ruido en imágenes

Una fotografía digital se puede procesar considerándola como un arreglo de tres matrices, una por cada color fundamental (R, G, B). Cada una de ellas es una matriz de dos dimensiones. Como en otros procesos existen condiciones fuera del control del observador que influyen en los datos obtenidos, uno de ellos es el ruido. El cual es un parámetro indeseable y es conveniente reducirlo o eliminarlo de ser posible. Con este fin se han diseñado filtros cuyo objetivo es mejorar las características de una imagen.

El empleo de Filtros tiene los siguientes objetivos:

- Suavizar la imagen. Reduciendo las variaciones de nivel (intensidad) entre un píxel respecto a sus vecinos.
- Reducir ruido. Modificar el valor de intensidad de los píxeles cuyo valor sea muy diferente de los píxeles vecinos.
- Realzar la imagen. Incrementar las variaciones de nivel en aquellos puntos que se encuentren debajo de cierto valor definido.
- Detectar bordes. Procesar una imagen de tal manera de conservar los píxeles donde exista un cambio brusco de intensidad, correspondiendo a los bordes de la imagen. Existen distintos modelos de ruido, una de las clasificaciones aceptadas tiene como base la densidad de probabilidad de los niveles de la imagen.

De acuerdo con modelos matemáticos se definen las siguientes formas de ruido.

- Ruido Gaussiana. Su modelo fue definido por Gauss, de ahí el origen de su nombre. Se produce en los circuitos electrónicos principalmente en los transductores (sensores de imagen) por una iluminación deficiente y por incrementos en la temperatura.
- Ruido Uniforme. El nivel de ruido es el mismo en toda una zona de la imagen, aunque en algunos casos cubre el total del área.
- Ruido impulsivo (en la literatura de Procesamiento de imágenes se le denomina “sal y pimienta”). Se visualiza como puntos de mayor y menor intensidad en algunas zonas de la imagen. Una fuente de este tipo de ruido es el proceso de cuantificación cuando se efectúa el proceso de digitalización.

3.4 Filtros en el Procesamiento de imágenes

Las imágenes binarias son aquellas donde la cuantificación de sus elementos se ha realizado con dos valores posibles, indicados como 0 o 1 aunque para visualizarlas los valores reales de los píxeles se cambian a 0 y 255, representando el blanco para el valor 255 y el negro para el valor 0.

Como son imágenes binarias, son muy simples, la información contenida en ellas se ha reducido, trabajando con la silueta del objeto. Son muy empleadas en los campos de visión por computadora para reconocer objetos, orientación de objetos o reconociendo de texto.

La obtención de estas imágenes se basa en el criterio de umbralización, para el cual se elige un determinado valor. Si un píxel está por debajo del valor elegido se le asigna un cero en caso contrario se toma como uno. La determinación del valor de referencia está sujeta a interpretaciones del investigador. Muchas veces se emplea el enfoque el histograma, aunque no es infalible.

A una imagen binaria, muchas veces, se le emplea como una máscara para separar un objeto de la imagen original. Dos puntos de la imagen están conectados si es posible hallar un camino donde la función es constante, es necesario conocer la topología.

Se definen las topologías como.

1. Cuatro conectividad. - Solo los píxeles junto al borde son continuos. Verificando los píxeles vecinos, se toman grupos de 4 píxeles y se revisan los cambios de valor de nivel.
2. Ocho conectividad. - Las celdas adyacentes del borde y las esquinas son vecinas. Se analizan los píxeles en grupos de 8 y se comparan los valores para verificar si existen cambios.

Filtros ampliamente usados se apoyan en los píxeles vecinos para obtener un valor modificado (filtrado) de una imagen,

3.4.1 Filtro Mediana

El filtro de la media es un filtro espacial simple, de fácil implementación. Se toma el valor de cada píxel de la imagen y se modifica su valor por el valor medio de los píxeles vecinos, mediante el empleo de una convolución con un Kernel (una pequeña matriz).

Como inconveniente se puede mencionar: Es muy sensible a cambios de niveles bruscos por los valores de intensidad local, puede crear intensidades de grises no pertenecientes a la imagen original.

Ejemplo de Kernel (máscara) 3x3 para el filtro de la media.

1/9	1/9	1/9
1/9	1/9	1/9
1/9	1/9	1/9

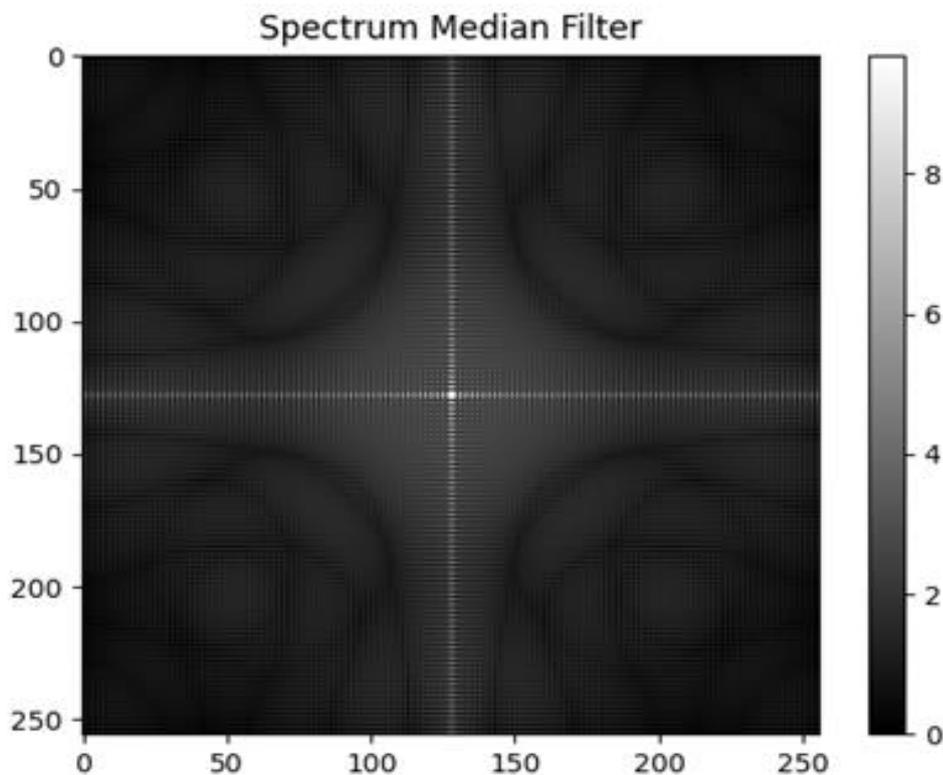


Figura 3.2 Se muestra el espectro de un filtro de mediana

3.4.2 Filtro Gaussiano

El filtro Gaussiano se emplea para difuminar las imágenes y disminuir el ruido. Es similar al anterior, en este caso se emplea una función gaussiana dada por:

Es separable, en lugar de hacer una convolución bidimensional se puede hacer una horizontal y posteriormente otra en sentido vertical. Produce un suavizado más uniforme que el filtro de media.

Por ejemplo, para un kernel de 5x5 con $\sigma=1.0$ se tiene los siguientes valores:

	1	4	7	4	1
	4	16	26	16	4
$\frac{1}{273}$	7	26	41	26	7
	4	16	26	16	4
	1	4	7	4	1

Este tipo de filtro suaviza los píxeles de la foto, disminuyendo el ruido contenido en ella, se aprecia una reducción de altas frecuencias.

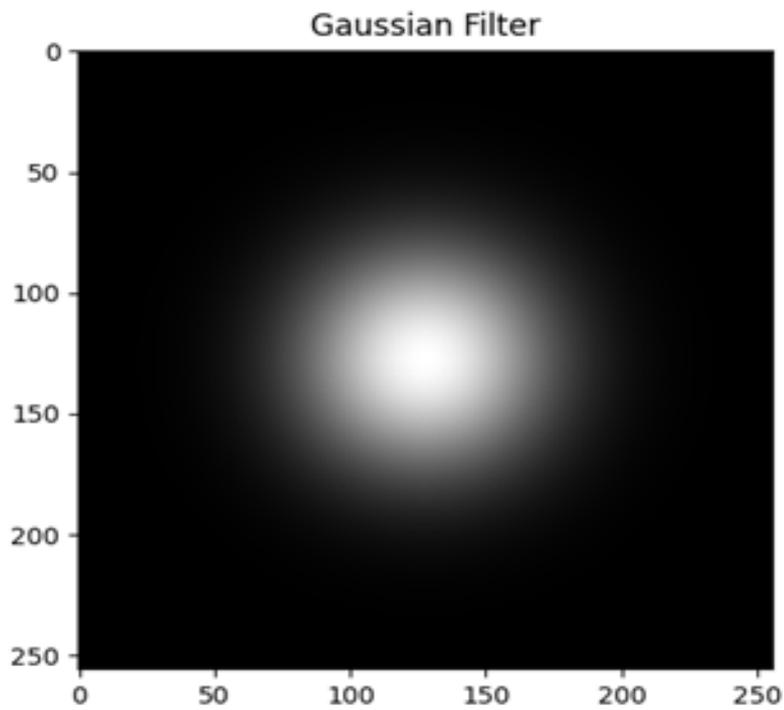


Figura 3.3 Se muestra el espectro de un filtro Gaussiano

Estas imágenes satelitales tienen como peculiaridad los pequeños puntos claros y oscuros en toda su área. Es necesario emplear un filtro adecuado para eliminar o suavizarlas preservando los bordes de las regiones visibles. A continuación, se muestra una ampliación de una de las fotos empleadas.

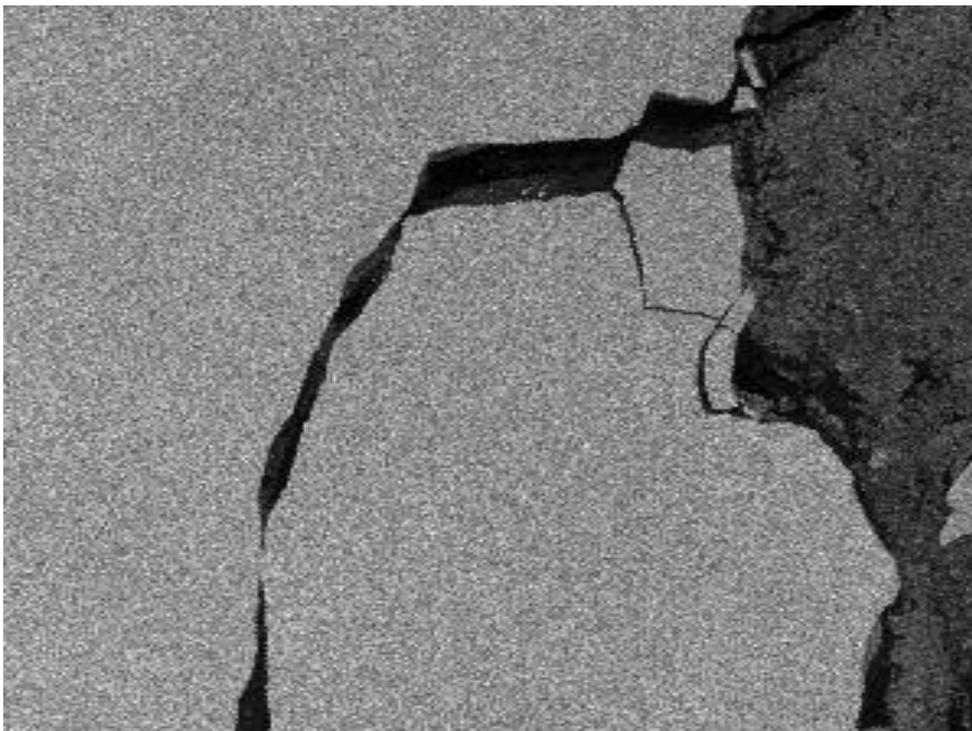


Figura 3.4 Se muestra una ampliación de la imagen satelital

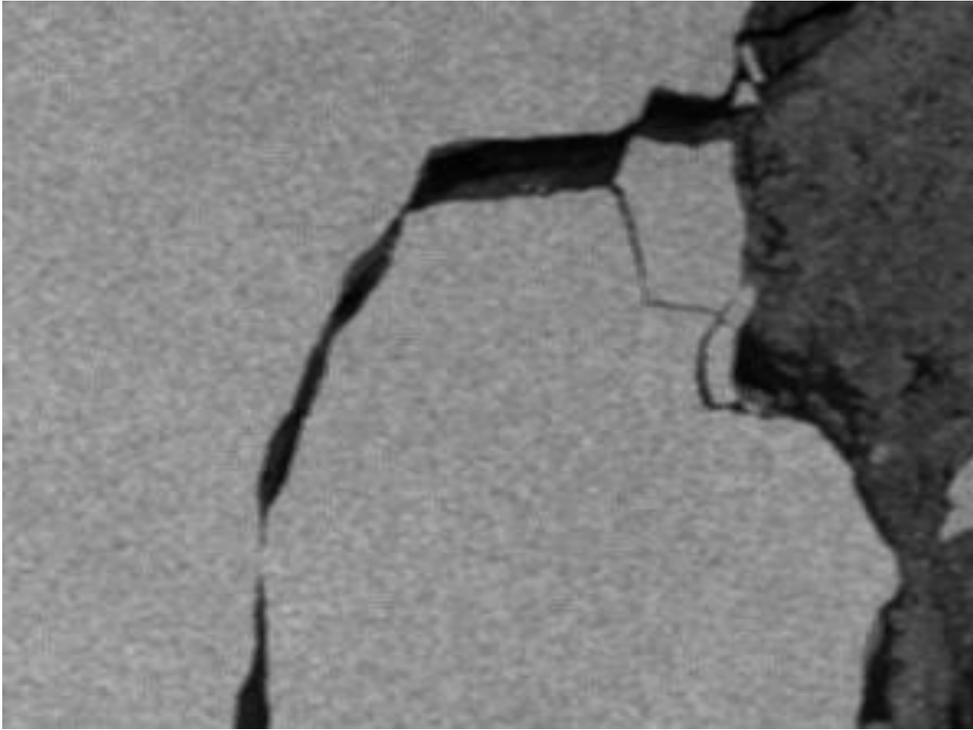


Figura 3.5 Ampliación de la imagen obtenida al aplicar un filtro Gaussiano

En ella se puede visualizar el suavizado de la imagen resultante y el ruido continua presente.

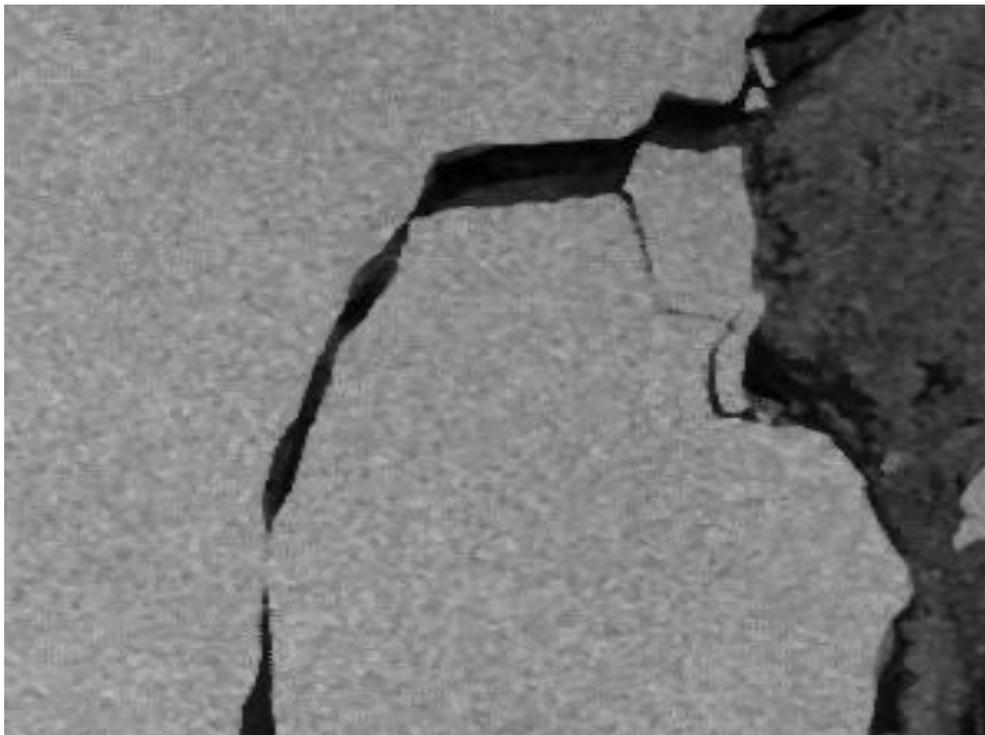


Figura 3.6 Ampliación de la imagen obtenida al aplicar un filtro de mediana

En ella se puede visualizar el suavizado de la imagen resultante.

Con estos filtros no se ha logrado eliminar el ruido. Aún se aprecian puntos claros y otros de un tono gris, cuando esperábamos obtener una superficie de un mismo tono de gris en las regiones heladas.

Filtros estadísticos de orden. Se basan en ordenar los valores de los píxeles en cierto punto de menor a mayor y obtener un valor estadístico. Los tipos en este bloque son:

- **Mínimo:** Seleccione el valor de intensidad más pequeño. Elimina el ruido del tipo “sal” (píxeles con altos valores, de aspecto claro). Uno de sus inconvenientes es oscurecer la imagen y además solamente funciona cuando el ruido es del tipo “sal”.
- **Máximo:** Se elige el valor de intensidad más alto. Elimina el ruido tipo “pimienta” (píxeles con niveles pequeños y de aspecto oscuro). Tiene como inconveniente el aclarar la imagen y funciona solamente cuando el ruido es del tipo pimienta.
- **Mediana:** Selecciona el valor en cierta posición intermedia (entre el máximo y el mínimo). En este caso se emplea la mediana de los valores vecinos y este valor se reemplaza el valor del píxel analizado. Ofrece muy buenos resultados para tratar el ruido tipo “sal y pimienta”. Como desventajas de puede mencionar que no es lineal. Para dos imágenes A y B se tiene: $\text{mediana}(A + B) \neq \text{mediana}(A) + \text{mediana}(B)$

Media Ponderada del entorno de Vecindad. En este caso, la imagen obtenida se genera en base a encontrar la mediana de un conjunto formado por cierto número de píxeles vecinos, en este punto (x, y) su valor se sustituye repitiendo tantas veces como se indique en el kernel, como ejemplo se anota uno muy frecuentemente usado:

1	2	1
2	4	2
1	2	1

Es importante hacer mención de los filtros adaptativos. Los cuales modifican su funcionamiento en base a las características locales de la imagen. Emplean como valor de referencia el valor del mínimo cuadrado para ajustar el valor del filtro. En caso de que la imagen no tenga ruido el filtro no la modifica. En algunas partes de la imagen donde no existan grandes cambios de intensidad, la varianza local será de un valor semejante a la varianza del ruido y el filtro usa la media para calcular la salida. En zonas donde la varianza de la imagen tiene un valor grande, la imagen permanece sin cambios. [9]

En esta categoría sobresalen dos tipos de filtros: el filtro de Wiener y el filtro de Kalman. Los cuales modifican sus parámetros iniciales de diseño en función de los cambios que experimenta la señal de entrada, por procedimientos estadísticos intenta predecir el comportamiento de la información a procesar.

3.5 Algoritmo de filtrado anisotrópico

La difusión es un proceso físico en el cual se da un equilibrio entre las diferencias de concentraciones sin destruir la masa. Este fenómeno se modela mediante la ley de Fick [15].

$$j = -D \nabla u \quad (3.1)$$

Donde el gradiente de concentración u provoca un flujo representado por j para compensar ese gradiente. Por el caso, en que los vectores j y u son paralelos se denomina difusión isotrópica. Generalmente cuando los vectores son paralelos se le denomina difusión anisotrópica.

En el fenómeno de difusión solo se transfiere masa sin realizar un cambio energético (crear o destruir) y se expresa con la expresión de continuidad

$$\partial_t u = -\text{div } j \quad (3.2)$$

Reemplazando la ley de Fick en la ecuación de la continuidad se obtiene la ecuación de la difusión.

$$\partial_t u = \text{div } (D \cdot \nabla u) \quad (3.3)$$

La ley de Fick se dio a conocer en la misma época en la que se descubrió la ley de Ohm (transporte de carga eléctrica), ley de Fourier (flujo de calor) y la ley de Darcy (flujo hidráulico).

En el procesamiento de imágenes aplicando ecuación de difusión y conociendo la concentración de gris en un determinado lugar se puede determinar al valor del tensor de difusión. Si este valor es constante se le llama difusión homogénea. Frecuentemente el tensor es función de la estructura diferencial de la imagen. La difusión que no depende de la evolución de la imagen se llama lineal.

En otras disciplinas, como es el caso de la visión artificial, el filtrado homogéneo se denomina isotrópico y el desenfoque no homogéneo se llama anisotrópico.

El proceso más simple e investigado en el caso de suavizado de imágenes, es aplicar un proceso de difusión lineal, mediante la convolución de una imagen con una gaussiana. En donde se obtiene una imagen "suavizada" en donde las fronteras entre regiones se desvanecen.

En el año de 1987 se publicó un trabajo en donde se emplea la difusión anisotrópica desarrollado por Perona y Malik [10], el presente trabajo emplea este modelo para implementar un filtro anisotrópico. La anisotropía hace referencia a las diferencias físicas de los materiales en función de la posición de un punto y la dirección donde se avance, también se le conoce como heterogeneidad. El filtro de Perona y Malik es un algoritmo de detección de bordes realizado por Jiaya Jia y Pietro Perona. Utiliza un proceso de dos etapas para extraer bordes, utilizando la diferencia de Gauss (DoG) y el cruce de cero de un filtro Laplacian-of-Gaussian (LoG) para detectar bordes.

La diferencia de Gauss (DoG) es usada para detectar y destacar los bordes en una imagen. Esta técnica utiliza una ventana de convolución de dos máscaras de Gauss, una con un radio más grande y otra con un radio más pequeño para calcular el valor de la primera derivada de la imagen. Esto le dice al algoritmo cuales son las secciones con un gran cambio en los niveles de intensidad, lo que indica un borde.

Actualmente, Pietro Perona se desempeña como profesor de ciencias de la computación en el Instituto Tecnológico de California (Caltech). Anteriormente fue profesor en la Corporación de Investigación Cornell (CISR) y director del departamento de ciencias de la computación en el Instituto Nacional de Tecnología Avanzada. Jiaya Jia es profesor

de Ciencias de la computación adscrito a la Universidad de Hong Kong en China. Es conocido por su investigación en los campos de visión por computadora, procesamiento de imágenes y multimedia.

Para una imagen significa que comparando un punto con los vecinos mediante la función gradiente se puede establecer aquellos puntos donde existen grandes cambios en cualesquiera de las cuatro posibles direcciones. Para puntos con gradiente parecido, indica la ausencia de cambios y se van seleccionando los píxeles donde el gradiente tenga un gran nivel, estos puntos corresponden a los bordes de los objetos representados en la imagen.

El proceso se inicia tomado como partida una imagen con información en escala de grises representada como una matriz $I(x, y)$ la ecuación de difusión anisotrópica [10] se puede representar como:

$$I = \text{div}(c(x, y, t) \nabla I) = c(x, y, t) \Delta I + \nabla c \nabla I \quad (3.4)$$

donde, div se refiere al operador divergencia y ∇ y Δ son el operador gradiente y laplaciano respectivamente, c es una constante arbitraria. I es la imagen por procesar.

La cual se puede escribir de la siguiente manera:

$$\frac{\partial I}{\partial t} = \text{div}(c(x, y, t) \nabla I) = \nabla c \nabla I + c(x, y, t) \Delta I \quad (3.5)$$

$$c(\|\nabla I\|) = e^{-(\|\nabla I\|/K)^2} \quad y \quad (3.6)$$

$$c(\|\nabla I\|) = \frac{1}{1 + (\frac{\|\nabla I\|^2}{K})} \quad (3.7)$$

El operador $\nabla c(x, y, t)$ va mostrando la velocidad de difusión. Es importante elegir este parámetro de forma conveniente con el fin de preservar los detalles de la imagen.

En esta técnica se considera a la imagen como un campo de calor, el flujo depende del valor del píxel actual y de los píxeles circundantes. Se define K como el coeficiente de conductividad térmica, empleado para controlar la sensibilidad del borde. En el caso de la imagen se representa como I , la fórmula de filtrado es:

$$I_{t+1} = I_t + \lambda(cN_{x,y} \nabla_N(I_t) + cS_{x,y} \nabla_S(I_t) + cE_{x,y} \nabla_E(I_t) + cW_{x,y} \nabla_W(I_t)) \quad (3.8)$$

El método de filtrado anisotrópico es muy usado en imágenes obtenidas mediante el uso de fuentes ultrasónicas y satelitales. Sin embargo, su rendimiento es muy sensible a la elección de dos parámetros: n (número de iteraciones) y k (factor de difusión) [10].

Es importante señalar el hecho del modelo propuesto por Cohen y Grossber [17] es similar al realizado por nuestra corteza visual primaria con procesos de inhibición similares a los propuestos por el modelo de Perona-Malik.

Existen otros filtros anisotrópicos. Como ejemplos se puede citar los siguientes:

- Filtro bilateral anisotropic. Es una técnica para suavizar las áreas homogéneas mientras destaca los bordes entre ellas. Esto se logra mediante la adaptación del filtro bilateral tradicional, combinando la función de filtrado con una matriz anisotrópica que agrega direccionalidad a los bordes. Esto permite al filtro separar los detalles de los objetos y eliminar el ruido sin afectar los bordes.
- Filtro de media ponderada anisotropic. Para implementar este filtro se emplea una matriz anisotrópica, la cual es una matriz de tamaño variable que se puede utilizar para asignar una dirección a los detalles de una imagen. Esta matriz se usa

comúnmente para destacar bordes entre diferentes áreas de la imagen, lo que mejora la calidad de la imagen final.

- Filtro Wavelets anisotropic. Es una técnica de procesamiento de imágenes que combina el filtro wavelet con una matriz anisotrópica para mejorar la calidad de las imágenes y destacar los bordes importantes. El uso de wavelets anisotrópicos permite al programa separar los detalles de los objetos en la imagen sin afectar los bordes, mejorando la calidad de la imagen final.
- Filtro Coherence-Enhancing anisotropic. Es una técnica usada para destacar los bordes entre áreas homogéneas. Esto se logra mediante un filtro anisotrópico junto con una función de coherencia para mejorar la calidad de la imagen, manteniendo los detalles de los objetos y eliminando el ruido. El filtro CEA reduce los efectos de difuminación causados por el filtro Gaussiano tradicional

Todos estos filtros se usan para mejorar la calidad de la imagen, destacando los bordes importantes y reduciendo el ruido.

3.6 Filtro de motas adaptativo SRAD

En las propuestas efectuadas para la eliminación de ruido en imágenes es necesario mencionar las implementaciones realizadas por los filtros: Lee, Frost, Kuan [14].

Los filtros Lee y Kuan se basan en procedimientos similares, aunque los supuestos del modelo y los resultados son diferentes. Forman una imagen calculando una combinación lineal del píxel central empleando una ventana con la intensidad media de la ventana. Logrando un balance entre el promedio directo en regiones homogéneas. El equilibrio depende del coeficiente de variación dentro de la ventana móvil.

El filtro de Frost logra un equilibrio entre el promedio y el filtro de paso total. Esto se logra al formar un núcleo del filtro de forma exponencial variando desde un filtro promedio básico. En este caso, también con un coeficiente de variación bajo el filtro es parecido a un promedio, en el caso de un coeficiente de variación alto el filtro intenta preservar las características nítidas al no promediar.

Los filtros son sensibles al tamaño y la forma de la ventana, con una ventana cuadrada (muy usada en estos casos) conduce al redondeo de las esquinas de las características rectangulares que están orientadas en rotaciones perfectas de 90°. Para una ventana de gran tamaño se producirá un suavizado excesivo y los bordes se difuminarán. Una ventana pequeña disminuirá la capacidad de suavizado y dejará “motas”.

3.6.1 Filtro Lee

El filtro Lee [12] está diseñado para eliminar las motas de ruido y conservar los bordes y las características puntuales. Se basa en el modelo de ruido de moteado lineal y el enfoque de diseño de error cuadrático medio. Produce los datos mejorados de acuerdo con:

$$\hat{I}_s = \bar{I}_s + k_s(I_s - \bar{I}_s) \quad (3.9)$$

donde I_s es el valor promedio de la intensidad dentro de la ventana del filtro y k_s es el coeficiente del filtro adaptativo, determinado por:

$$k_s = 1 - C_u^2/C_s^2 \quad (3.10)$$

3.6.2 Filtro Frost

Filtro Frost [22] consiste en una ventana deslizante, tiene como beneficio preservar los bordes y reducir el ruido de la señal. En este algoritmo el factor clave es la amortiguación, en este caso es de tipo exponencial y es un parámetro clave para ajustar la suavidad del filtro.

$$Y = \frac{\sum(x * W)}{\sum W} \quad (3.11)$$

Donde x es el valor del píxel en la ventana local, Y es el valor del píxel después del filtrado y W es el peso de cada píxel, el cual se calcula con la siguiente expresión.

$$W = \frac{\sigma^2}{(\sigma_k^2 - \sigma^2)} \quad (3.12)$$

En esta relación σ^2 es la varianza de la imagen de referencia y σ_k^2 es la varianza del píxel en el kernel o ventana de la imagen a procesar

3.6.2 Filtro Kuan

El filtro Kuan [23] realiza la transformación del modelo de ruido multiplicativo a un modelo de ruido aditivo, como primer paso. Posteriormente aplica una recurrencia, mediante el criterio de error cuadrático. Se aplica la siguiente relación para obtener la salida del filtro.

$$R = I_c * W + I_m * (1 - W) \quad (3.13)$$

Donde W se calcula con la relación:

$$W = \frac{(1 - Cu^2 / Ci^2)}{1 + Cu^2}$$

$$Y \text{ el término } Cu = \sqrt{\frac{1}{\text{Número miradas}}} \quad (3.14)$$

Donde $C_i = \delta / I_m$, I_c es el píxel central del kernel, I_m es el valor promedio del píxel dentro del kernel y δ es la desviación estándar.

El número de hace referencia al número de pulsos enviados hacia la superficie terrestre y los subsecuentes reflejos detectados por el sensor de imagen.

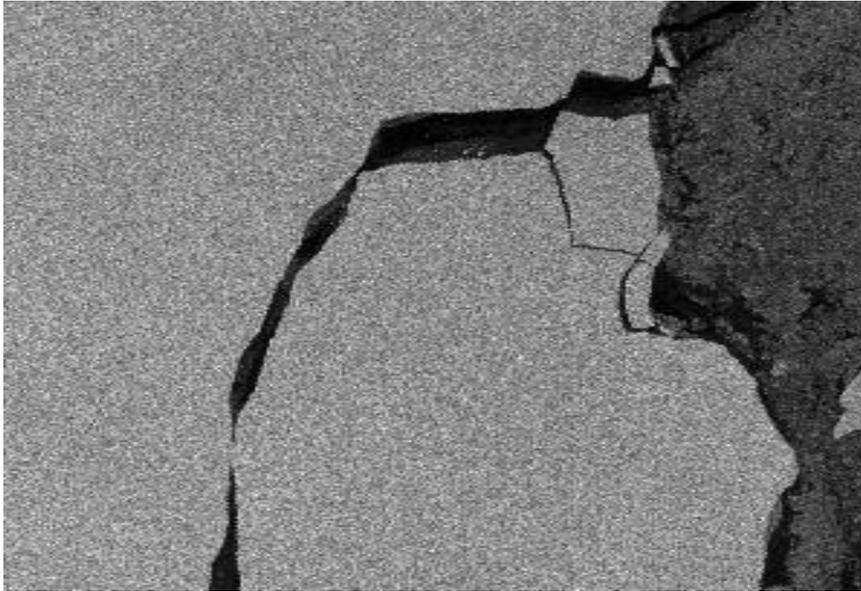


Figura 3.7 Imagen de la región amplificada de la imagen satelital 20170722

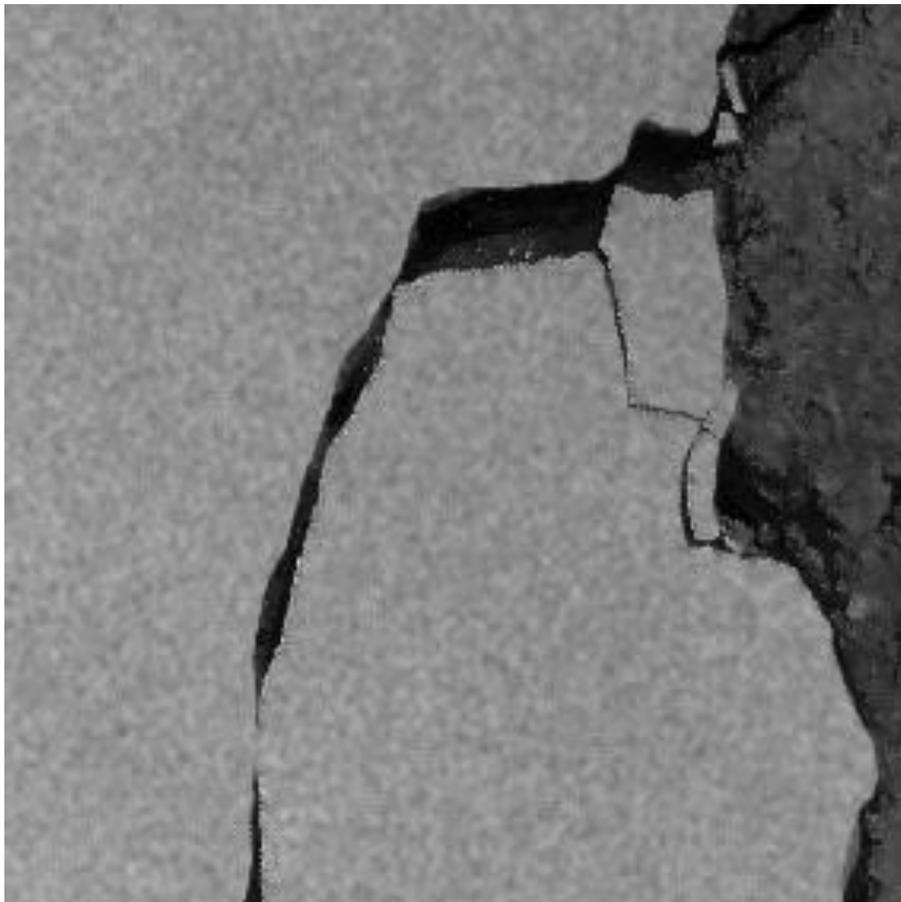


Figura 3.8 Región amplificada de la imagen obtenida al aplicar el filtro Lee

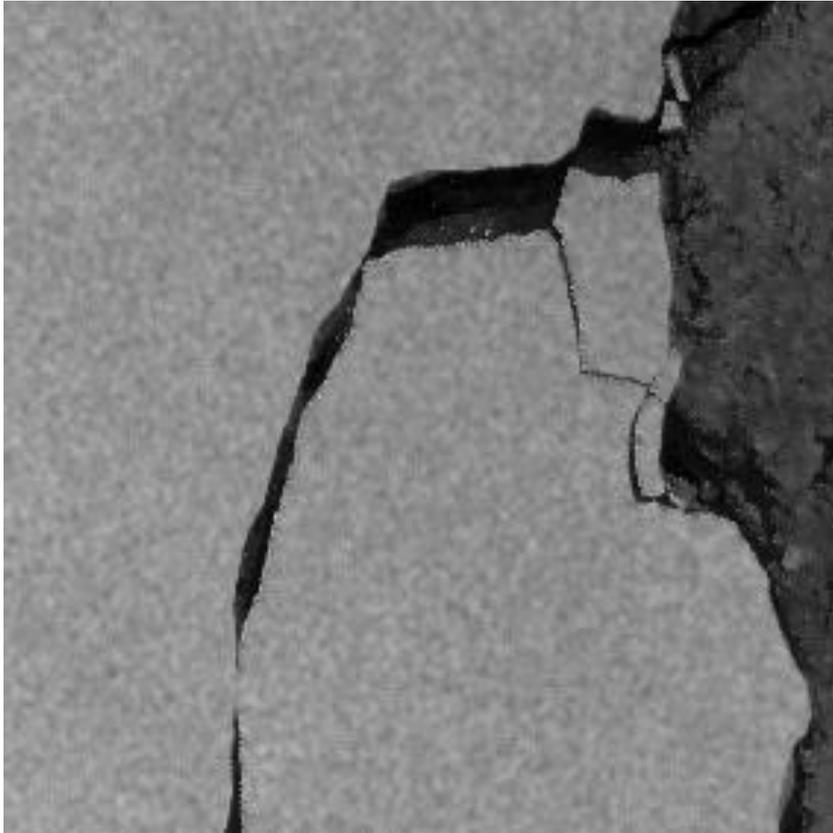


Figura 3.9 Imagen de la región amplificada al aplicar el filtro Kuan

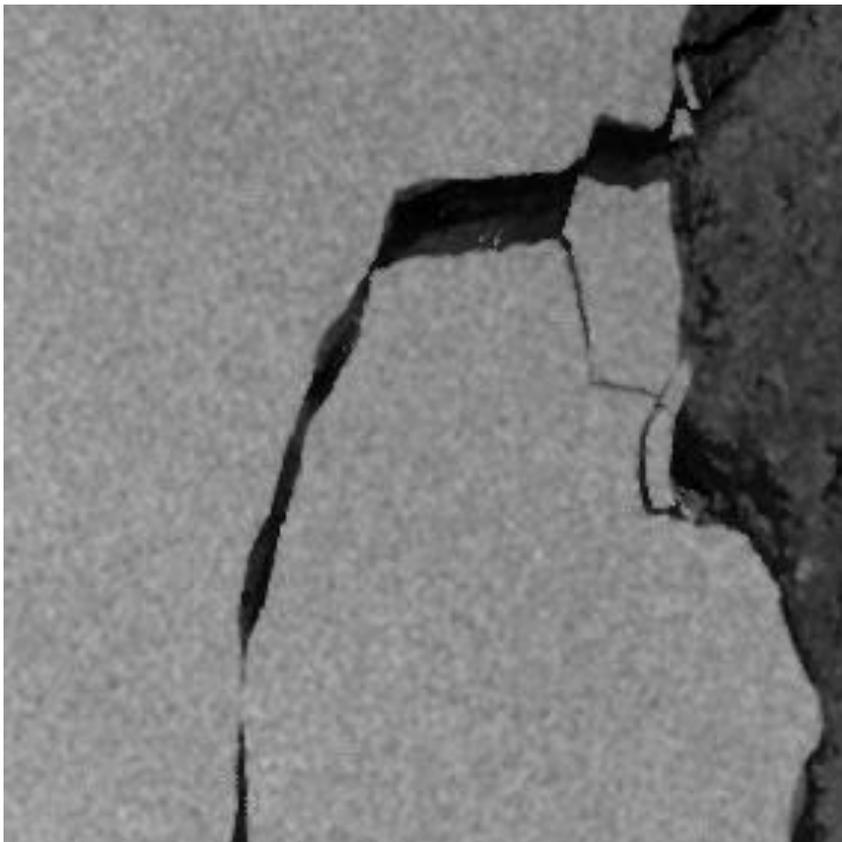


Figura 3.10 Se muestra la región amplificada de la imagen obtenida al aplicar el filtro Frost

Los scripts empleados para aplicar los filtros Lee, Kuan y Frost se obtuvieron de la librería PyRadar [15]. En las imágenes resultantes se observa la disminución de las motas de ruido. Sin embargo, no se logra eliminar totalmente.

3.7 Algoritmo de segmentado

Segmentar una imagen consiste en dividirla en varias regiones, denominados segmentos. Se tiene como objetivo simplificar o cambiar la representación de una imagen en otra de mayor significado y fácil de analizar. El proceso de clasificación por píxel se asigna una categoría a la imagen analizada, y obtiene conjuntos con valores de píxeles semejantes. Así tenemos diferentes maneras de clasificar estas regiones, obteniendo, por ejemplo:

- Segmentación por color.
- Segmentación por texturas.
- Segmentación por superpixel
- Segmentación semántica.

Los diferentes algoritmos de segmentación se basan en los siguientes principios:[19]

1. Discontinuidades del nivel de gris. Se segmenta en base a los grandes cambios en los niveles de cada píxel.
2. Similitud de nivel de gris. Contrario al punto anterior, se realizan agrupación de píxeles que poseen valores semejantes.

El caso más elemental se da con la técnica de umbralización, donde cada píxel se clasifica como claro u oscuro comparando su valor con un valor de referencia elegido previamente.

Como ejemplo de un segmentado de mayor complejidad se puede mencionar el Mask R-CNN con el cual se obtienen 90 categorías. Logrando reconocer persona, vehículos, calle, vereda, etc.

Segmentación binaria. Distingue solo dos categorías. Las que no son binarias se cómo segmentación múltiple. En este caso solo se tienen dos categorías, frecuentemente llamadas frente y fondo. Tiene como objetivo principal extraer un segmento del objeto buscado.

Segmentación asistida o semiautomática. Requiere anotaciones previas, señalando regiones a analizar o distinguir. Una persona hace anotaciones marcando zonas sobre la imagen. Se puede automatizar empleando algoritmos de visión artificial. Los ejemplos principales de este tipo de segmentación son el algoritmo Watershed y GrabCut.

- Para el algoritmo watershed, se asignan etiquetas a algunos píxeles, llamándolos semillas, el algoritmo inicia la búsqueda a partir de ellas, hasta encontrar los bordes entre segmentos.
- El algoritmo GrabCut, emplea un segmento binario intentando capturar el objeto dominante. Es necesario que el usuario recuadre el objeto, la zona fuera es la semilla de la región del fondo.
- Detección de bordes. Los límites de una región y los bordes están muy relacionados, en estos puntos hay un fuerte ajuste en la intensidad, se emplean en conjunción con otras técnicas de segmentación. Para obtener buenos resultados es importante que los bordes formen figuras cerradas.
- La segmentación semántica distingue categorías de alto nivel de significado, usualmente nombres de objetos. Emplean redes convolucionales, marca un antes y un después en el campo de investigación.

3.7.1 Segmentación mediante Fuzzy C-medias

El algoritmo de K-means [19] es una herramienta poderosa para efectuar el segmentado de una colección de datos. Se basa en la elección de un dato al que se denomina centroide a partir de esto se mide la distancia de cada punto y se separan acorde a los valores mínimos de esa distancia. En este caso la pertenencia de cada uno de ellos a cada sector es univoca, pertenece o no pertenece a la colección.

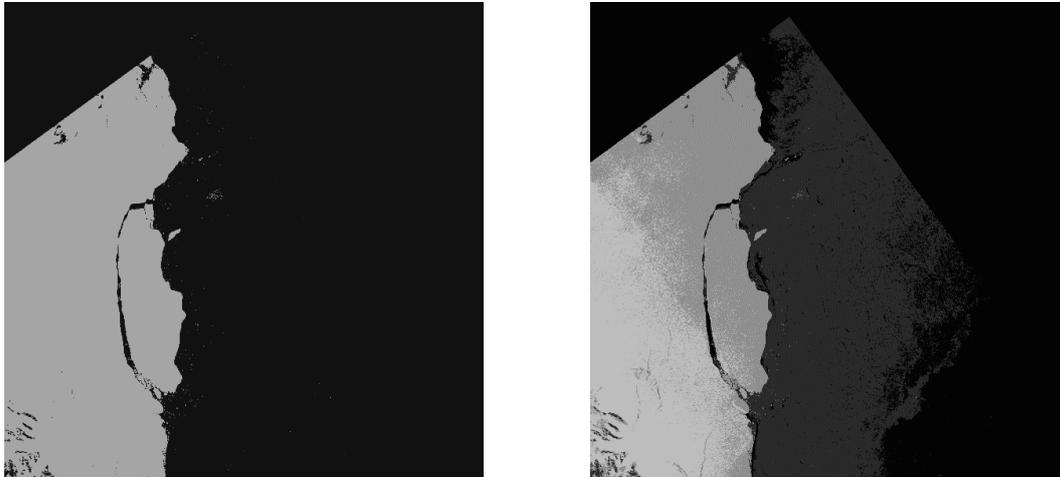


Figura 3.11 Se muestran las imágenes obtenidas al aplicar una segmentación K-means

Del lado izquierdo segmentando en 2 regiones y del lado derecho segmentando en 4 regiones. Como se aprecia en las imágenes no se logra aislar la región del iceberg en ninguna de los dos casos. Por ello se propone emplear otro tipo de segmentado.

El algoritmo de fuzzy c-means [20] tiene como característica principal, el hecho de intentar hacer el proceso de segmentación apegado a la realidad, en el cual un punto podría pertenecer a más de una clase. Fue el matemático Lofti A. Zadeh catedrático de la universidad de Berkeley, quien aportó este enfoque, que va más allá de la lógica booleana. En los años 70's esta herramienta se aplicó en los sistemas de control y su aplicación en los diferentes campos del análisis de datos ha ido aumentando.

El grado de pertenencia de cada elemento se cuantifica empleando como medida, la probabilidad. Los valores de pertenencia a cierta clase se almacenan en una tabla y posteriormente se elige la mayor probabilidad de ellos y los puntos se van agrupando en las diferentes clases, de esta forma se avanza en la segmentación de los datos.

Se inicia de forma similar a como ocurre en el algoritmo de k-means se elige un punto de forma aleatoria, a partir el cual se calculan las diferencias entre los demás puntos del conjunto general. Estas distancias se pueden cuantificar por diferentes métodos, entre los más usados destaca la distancia euclidiana. A continuación, se va eligiendo los puntos de menor distancia se agrupan para formar una clase. Se emplea la palabra membresía para describir la relación de pertenencia entre un dato y los datos de similares características, definidos como conjunto o clase.

Se define al conjunto de datos como un conjunto de puntos de membresía a cierta clase cuya distancia entre ellos es mínima.

$$J_m(U, v) = \sum_{k=1}^n \sum_{i=1}^c (u_{ik})^m d_{ik}^2 \quad (3.15)$$

El valor de J_m representa la pertenencia de cada punto a una determinada clase. Las distancias se expresan como un porcentaje (probabilidad) de pertenencia a las clases.

$$d_{ik}^2 = \|x_k - v_i\|_A^2 = (x_k - v_i)^T A(x_k - v_i) \quad (3.16)$$

El vector d_{ij}^2 calcula y almacena los valores de las distancias de cada punto a los centros de cada clase.

El algoritmo consta de los siguientes pasos.

1. Fijar el número de clases a emplear, Elegir una matriz inicial $U_{(0)} \in M_{fc}$.
2. Calcular los centros de los grupos mediante.

$$v_i = \frac{\sum_{k=1}^n (u_{ik})^m x_k}{\sum_{k=1}^n (u_{ik})^m}; 1 \leq i \leq c \quad (3.17)$$

3. Actualizar la matriz de la partición difusa $U = [u_{ik}]$ con

$$u_{ik} = \left(\sum_{j=1}^c \left(\frac{d_{ik}}{d_{jk}} \right)^{\frac{2}{m-1}} \right)^{-1}; 1 \leq k \leq n; 1 \leq i \leq c \quad (3.18)$$

4. Verificar el criterio de finalización establecido. De no haberlo alcanzado, continuar con los cálculos. Los criterios de finalización más empleados son: Establecer un máximo de iteraciones y que la variación de la matriz U sea muy pequeña.

3.8 Operaciones morfológicas

Al finalizar la segmentación se observa en las imágenes obtenidas la presencia de algunos pixeles pertenecientes al iceberg con características peculiares, por lo que se aplicaron operaciones morfológicas para cambiar sus valores y hacer modificaciones para integrarlos a los valores de los pixeles vecinos y definir con más realismo la región de interés.

Son dos las operaciones morfológicas básicas [21], la erosión y la dilatación. Estas operaciones se realizan para definir las partes que conforman una región de interés. Se efectúan al realizar una operación aritmética empleando un kernel elegido en función de lo buscado.

Para el caso de la erosión se puede elegir un Kernel de tamaño 3x3 del tipo.

$$\begin{pmatrix} 1 & 1 & 1 \\ 1 & 1 & 1 \\ 1 & 1 & 1 \end{pmatrix} \quad \begin{pmatrix} 0 & 1 & 0 \\ 1 & 1 & 1 \\ 0 & 1 & 0 \end{pmatrix} \quad \begin{pmatrix} 0 & 1 & 0 \\ 1 & 1 & 1 \\ 0 & 1 & 0 \end{pmatrix}$$

Eligiendo el kernel obtendremos el resultado más adecuado a la solución del problema. Para la dilatación el efecto obtenido es expandir o ampliar la región de interés. En el caso de la erosión el efecto es reducir el área de la zona de interés.

Existen otras operaciones morfológicas como son:

Gradiente se emplea para encontrar la silueta de una figura.

Apertura y cierre, simplifica la forma de la figura y se emplea para eliminar ruido.

3.9 Obtención de centroide

Para obtener el centro de región de interés se emplean el cálculo de los momentos de la imagen. En la señal bidimensional $f(x,y)$ el momento de orden $(p+q)$ se define para $p, q = 0, 1, 2, 3, 4, \dots$,

$$M_{pq} = \int_{-\infty}^{\infty} \int_{-\infty}^{\infty} x^p y^q f(x,y) dx dy \quad (3.19)$$

Las coordenadas x, y se expresan como números enteros y la $f(x,y)$ se refiere al valor del píxel en ese punto. Para el caso de una imagen la expresión anterior se modifica a:

$$M_{ij} = \sum_x \sum_y x^i y^j I(x,y) \quad (3.20)$$

Para el caso particular en donde las imágenes se han segmentado y son del tipo binaria, los valores de los niveles son cero o uno, entonces la expresión a emplear queda como [13]:

$$M_{ij} = \sum_x \sum_y x^i y^j \quad (3.21)$$

Con estos valores se puede calcular el área de una imagen binaria, la cual se expresa con el término M_{00}

El centroide se obtiene con la siguiente relación:

$$\{\bar{x}, \bar{y}\} = \left\{ \frac{M_{10}}{M_{00}}, \frac{M_{01}}{M_{00}} \right\} \quad (3.22)$$

donde M_{10} es el valor obtenido al sustituir $i=1$ y $j=0$ en la expresión del momento.

Capítulo 4. Pruebas y resultados

4.1 Resultado del filtrado

En este punto se desarrolló la implementación del método de mejoramiento de imágenes empleando un filtro de eliminación de motas, basado en el algoritmo expuesto en el artículo de Perona and Malik[10].

Se usó como entorno de desarrollo una laptop, con 8 GB en RAM, un procesador i5 (3210M) de 3ra generación y una GPU Intel Ivybridge Mobile integrada. Como sistema operativo se eligió la distribución de Linux Debian 10 (buster) con python 3.7.13 y usando sypider 4.1 con la aplicación de anaconda (1.9.0), además se empleó Matlab en su versión académica 2021.

Las imágenes empleadas, corresponden a un conjunto de fotografías satelitales de formato SAR, tomadas en el momento del surgimiento del iceberg y en el transcurso de algunos días posteriores a este hecho. Como muestra inicial, se tiene la foto correspondiente al desprendimiento del Iceberg A-68, la cual se muestra a continuación.

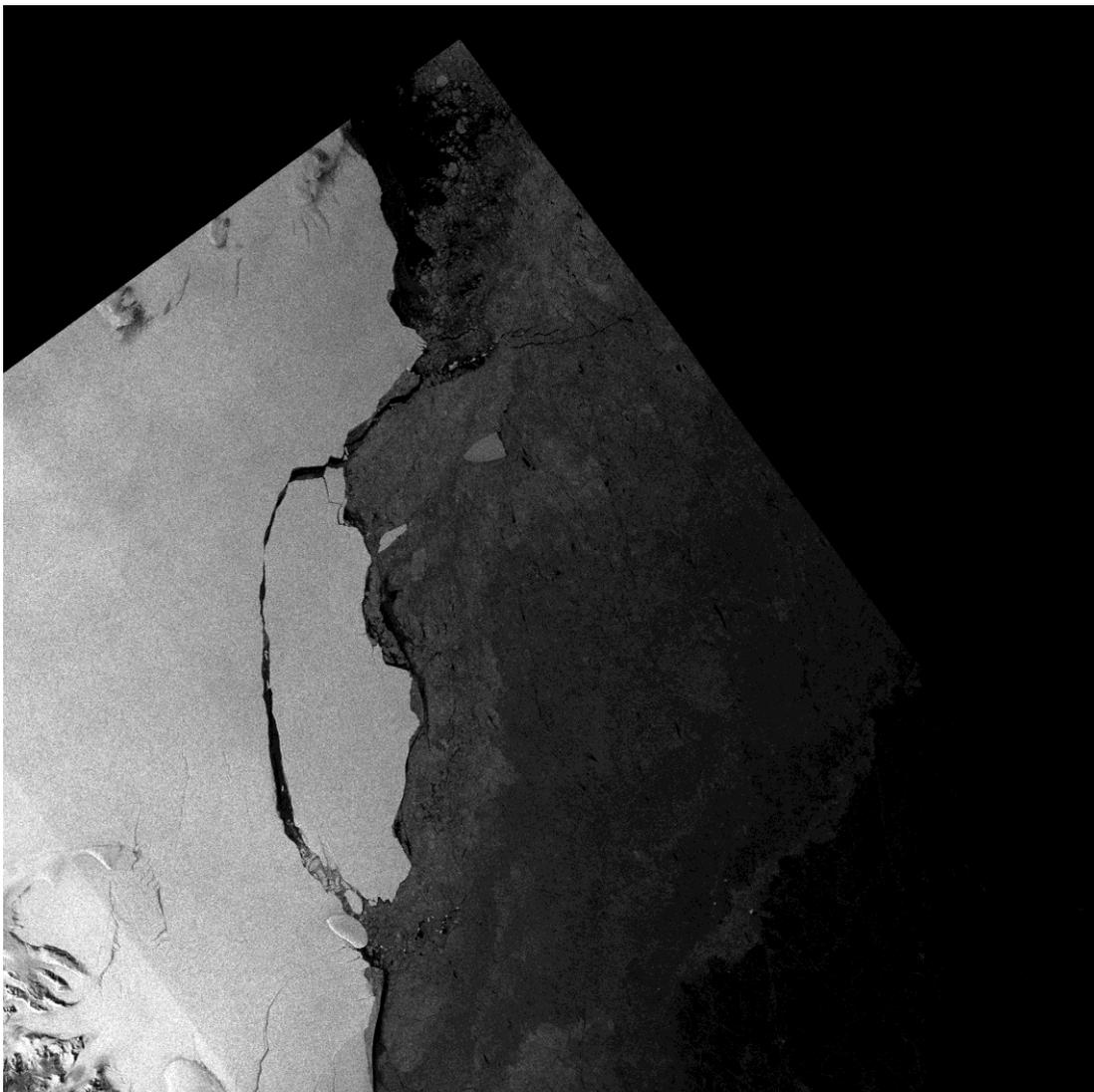


Figura 4.1 Imagen del iceberg A-68, momentos posteriores a su formación

Esta es una de las imágenes que se emplearon en este trabajo, realizando una ampliación de la zona del iceberg se aprecia con mayor detalle las pequeñas “imperfecciones” debidas a las condiciones y métodos empleados en su adquisición.

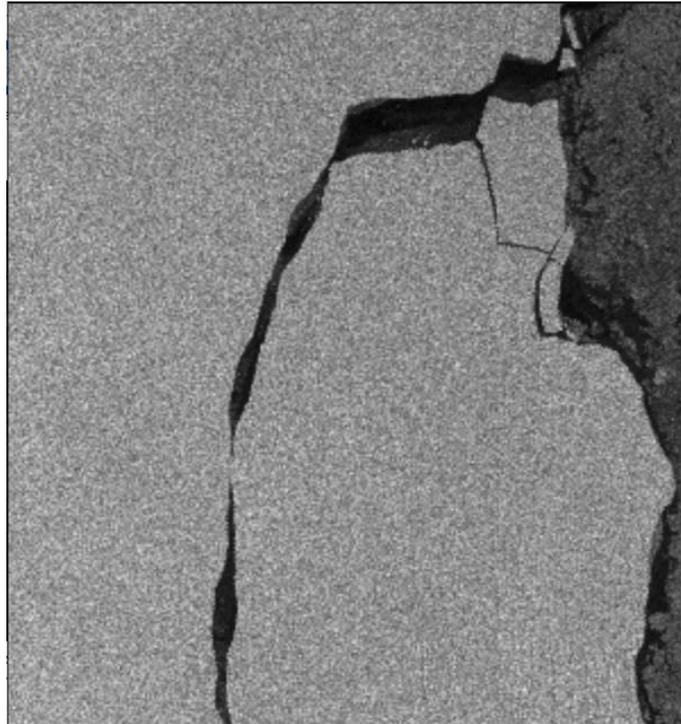


Figura 4.2 Fragmento de la imagen anterior ampliada al 200%

En la imagen anterior, ampliada al doble del tamaño original se aprecia la zona de hielo con múltiples manchas, lo que se denomina coloquialmente como motas, es un ruido que se debe minimizar o eliminar en el mejor de los casos.

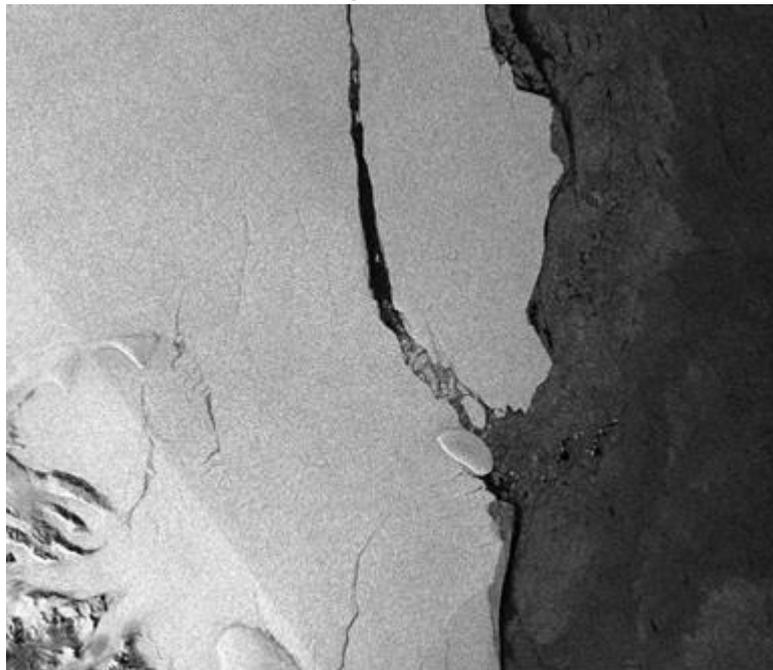


Figura 4.3 Muestra otra porción de la fotografía del iceberg A-68 en el año 2017

En la anterior fotografía se aprecia los puntos en las porciones heladas. La zona clara corresponde a la región de hielo, la zona oscura es el agua del océano.

Como primer paso implementé el algoritmo de difusión anisotrópica, de Perona and Malik. Al emplear el filtro obtuve las siguientes imágenes de salida. Las imágenes resultantes de ven afectadas por los parámetros n = número de iteraciones y k = factor de difusión.



Figura 4.4 Imagen obtenida con $k=50$ y efectuando una sola iteración



Figura 4.5 Imagen obtenida con $k=50$ y efectuando cinco iteraciones

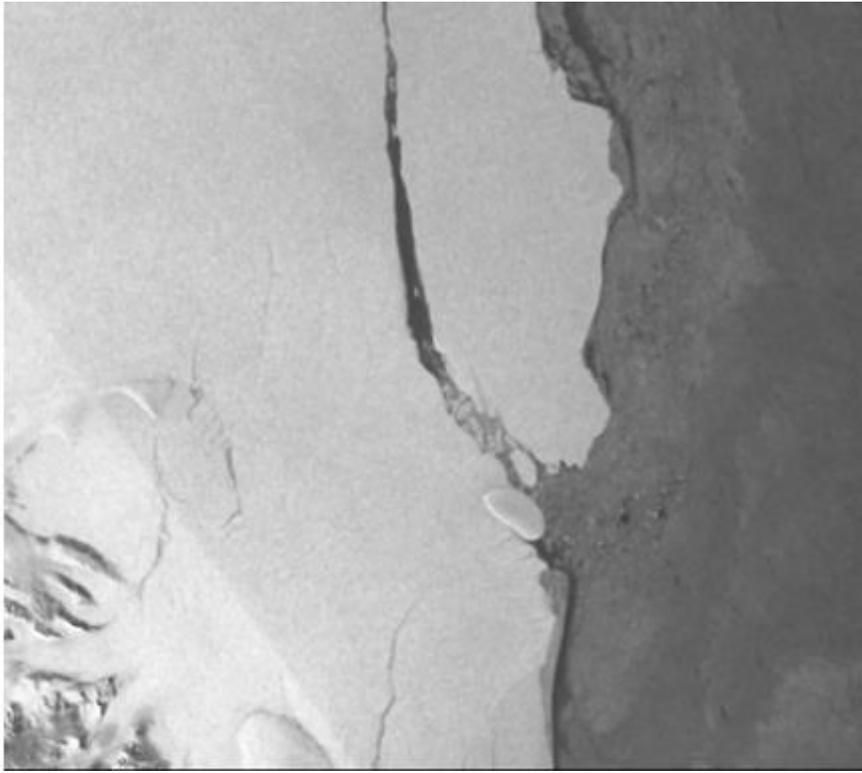


Figura 4.6 Imagen obtenida con $k=50$ y efectuando veinte iteraciones

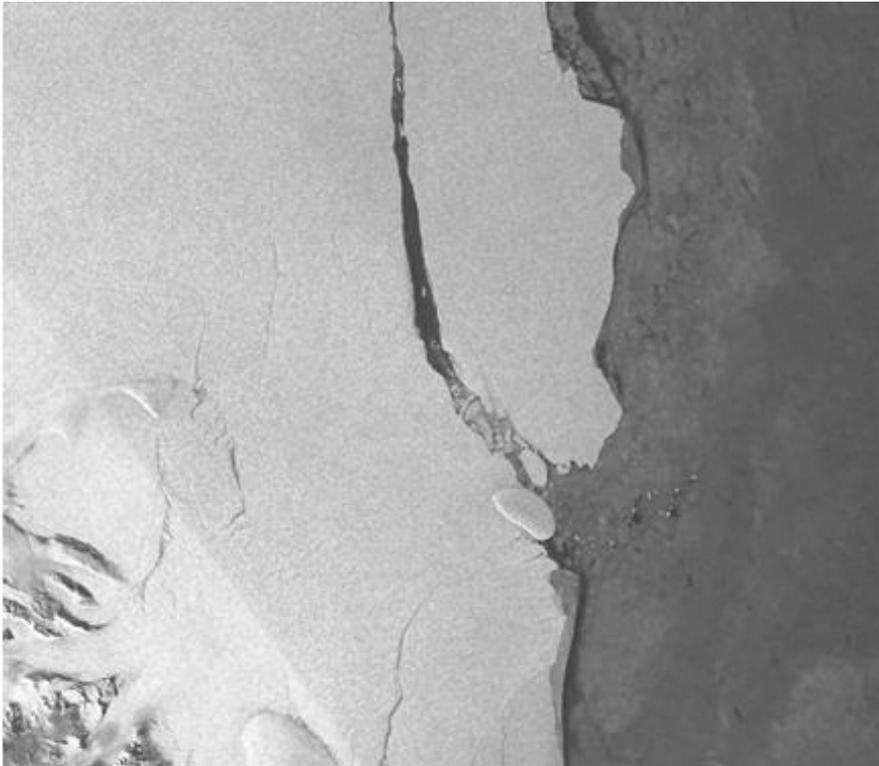


Figura 4.7 Imagen obtenida con $k=20$ y efectuando veinte iteraciones

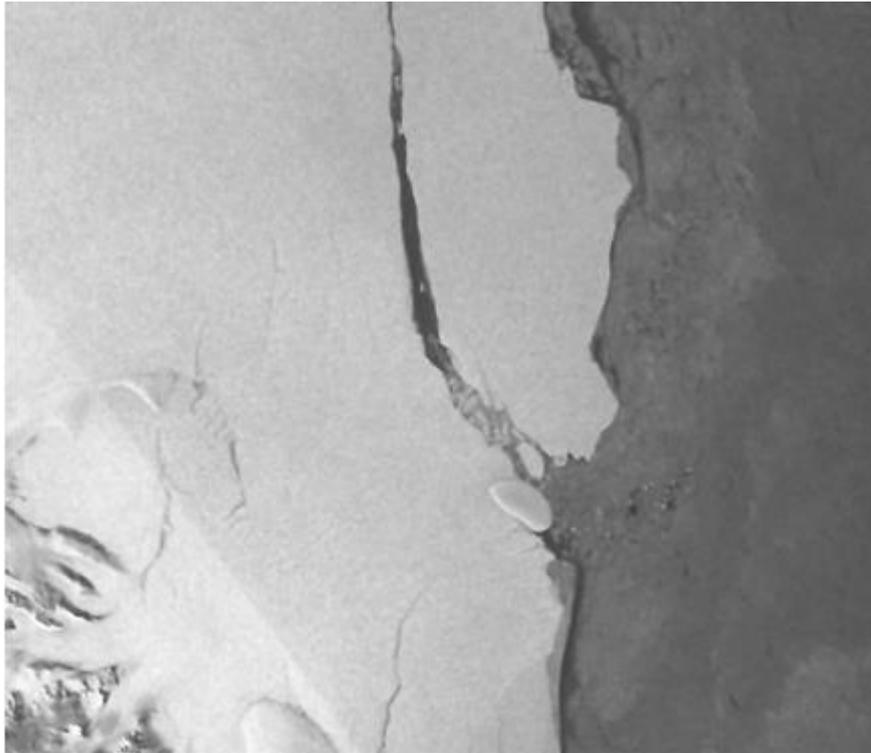
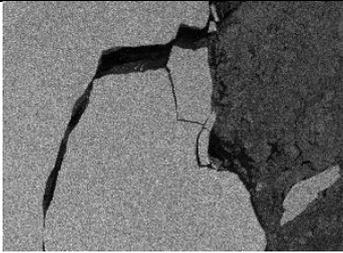
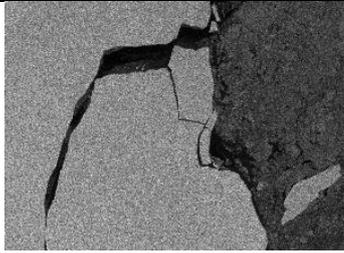
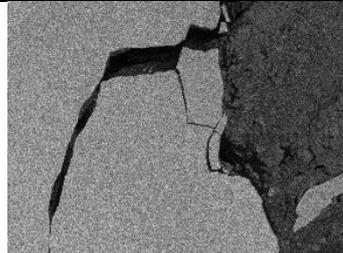
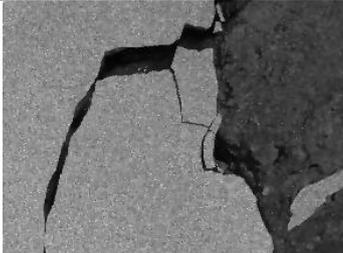
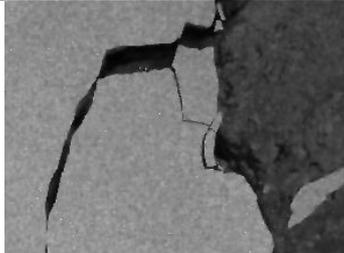
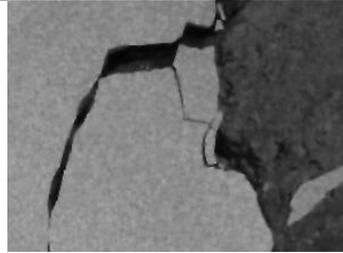


Figura 4.8 Imagen obtenida con $k=20$ y efectuando veinte iteraciones

Para elegir cuales son los mejores valores de la iteración y de K es conveniente comparar las imágenes de forma tal que nos permita establecer los valores idóneos para realizar este trabajo. A continuación, se muestra una tabla donde se muestran los resultados obtenidos con diferentes combinaciones de los parámetros mencionados anteriormente. Los renglones corresponden al n° de iteraciones y las columnas al factor k .

	$k = 30$	$k = 50$	$k = 75$
$n = 1$			
$n = 10$			

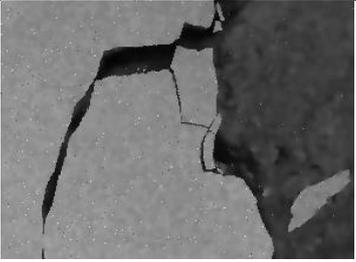
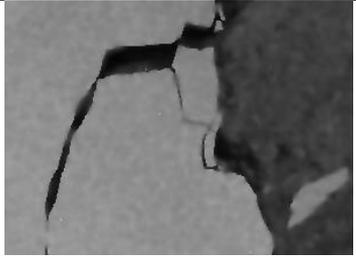
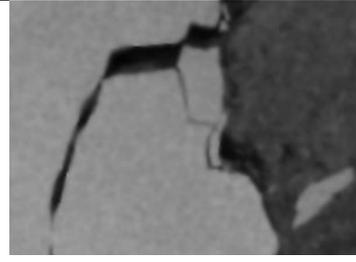
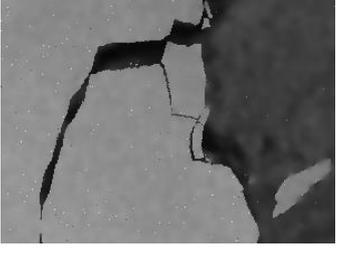
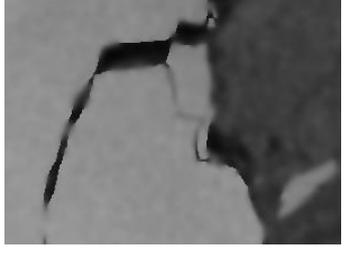
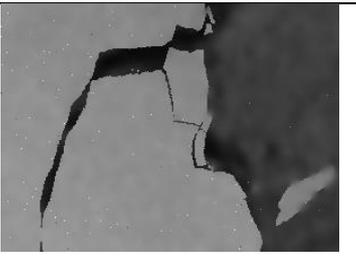
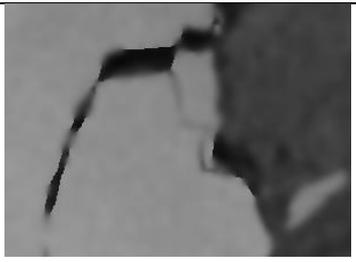
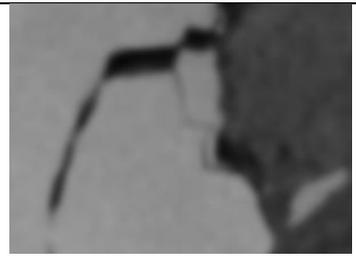
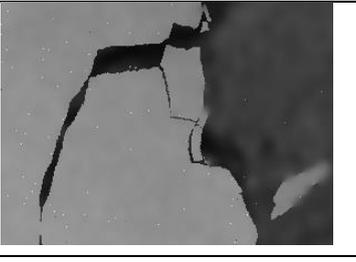
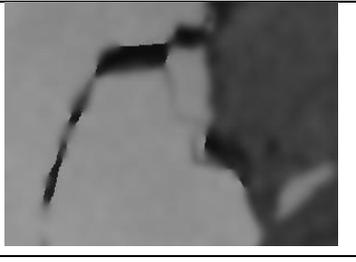
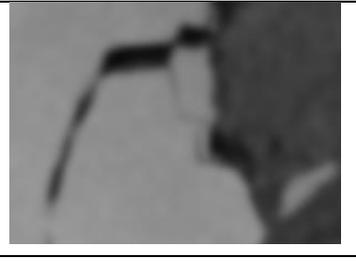
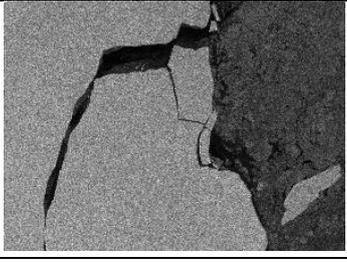
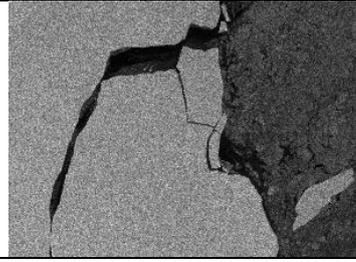
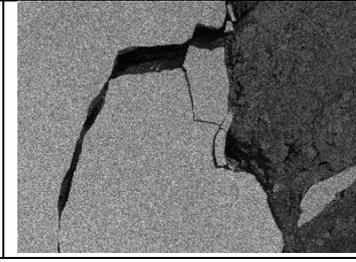
n=25			
n=50			
n=75			
n=100			

Tabla 4.1.- Permite comparar el efecto de la variable k y el número de iteraciones en la calidad del filtrado

	k=100	k=125	k=150
n=1			

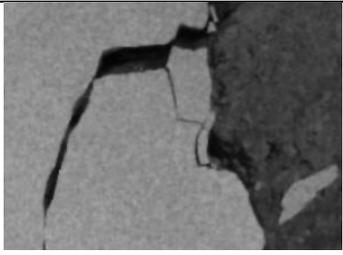
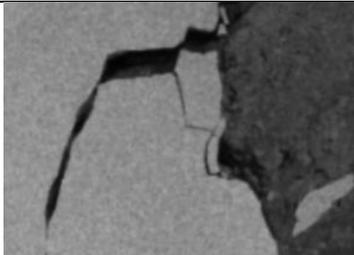
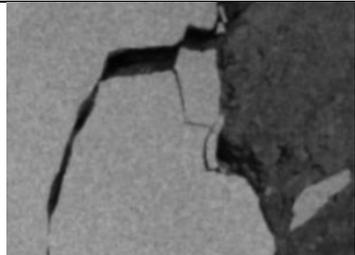
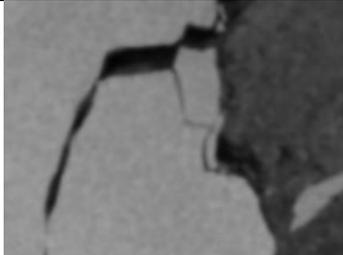
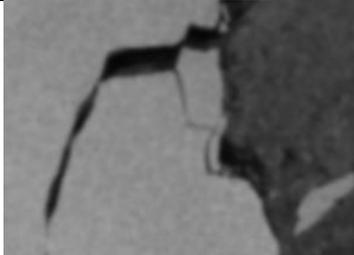
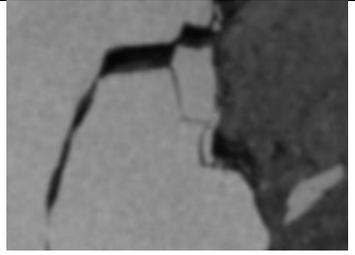
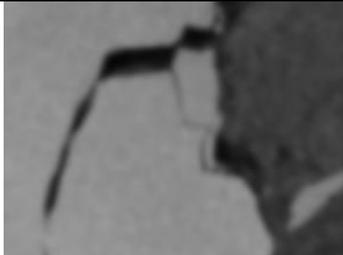
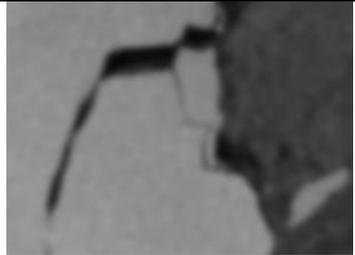
n=10			
n=25			
n=50			
n=75			
n=100			

Tabla 4.1_complemento. Se observa que, al aumentar el número de iteraciones, la imagen se torna borrosa y los bordes de la imagen se pierden, de igual forma al aumentar el factor k se pierden los bordes. Hay un compromiso para el cual se conservan los elementos contenidos en la imagen y el ruido se disminuye.

Para realizar el presente trabajo se eligieron el valor de $k=30$ y realizar 50 iteraciones, con estos valores se ha obtenen una imagen con las regiones heladas con menos ruido y se mantienen los bordes de los objetos.

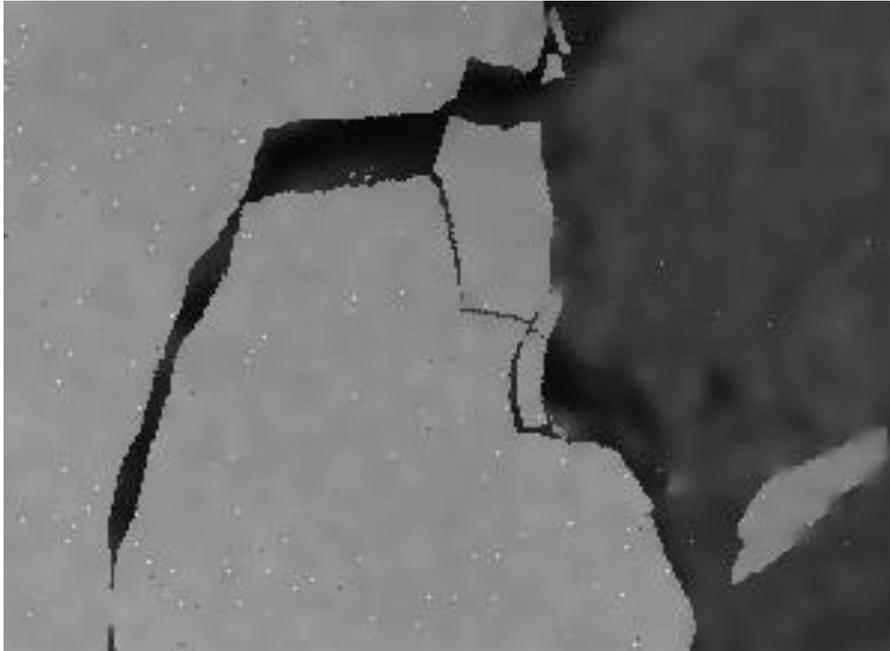


Figura 4.9 Imagen de una zona ampliada, obtenida empleando el algoritmo de Perona y Malik

Las motas en la imagen se han suavizado, aunque aún se pueden apreciar algunos puntos brillantes, los bordes se preservan muy bien.

4.2 Resultado de segmentación

En la siguiente imagen se aprecia la segmentación binaria efectuada sobre la imagen previamente filtrada. Las regiones no están totalmente limpias existen regiones en la parte del hielo donde se aprecia zonas oscuras que se interpretan, erróneamente, como pertenecientes a la región del océano.



Figura 4.10 Se muestra la segmentación en dos regiones empleando un umbral de referencia

En este trabajo se implementó el uso de la segmentación empleando el algoritmo de Fuzy C-means. Para dos y cuatro regiones.



Figura 4.11 Esta imagen se obtuvo al emplear fuzzy c-means con dos regiones

Se aprecian zonas en las cuales el algoritmo no fue capaz de separar completamente el iceberg, por lo que se usó un editor de imágenes para lograr aislarlo completamente de la región continental. Ambas partes, la continental y el iceberg poseen características similares en cuanto a contraste y brillo lo cual dificulta sobre manera la segmentación.



Figura 4.12 Se muestra una ampliación al 200% de la imagen resultante

En la imagen ampliada se aprecia el iceberg unido al continente en algunas zonas, sin embargo, la aproximación permite obtener mediante el uso de otras herramientas definir con más precisión la región de interés (el iceberg).

4.3 Membresía

Una vez segmentadas las imágenes, se le dio un único valor a cada píxel perteneciente a cada una de las regiones. Por ejemplo, para el segmentado de dos regiones se le otorgó el valor de cero a todos los píxeles pertenecientes a una de las regiones y 255 a todos los píxeles de la otra sección, de forma tal que la zona del iceberg ocupara la región más brillante.

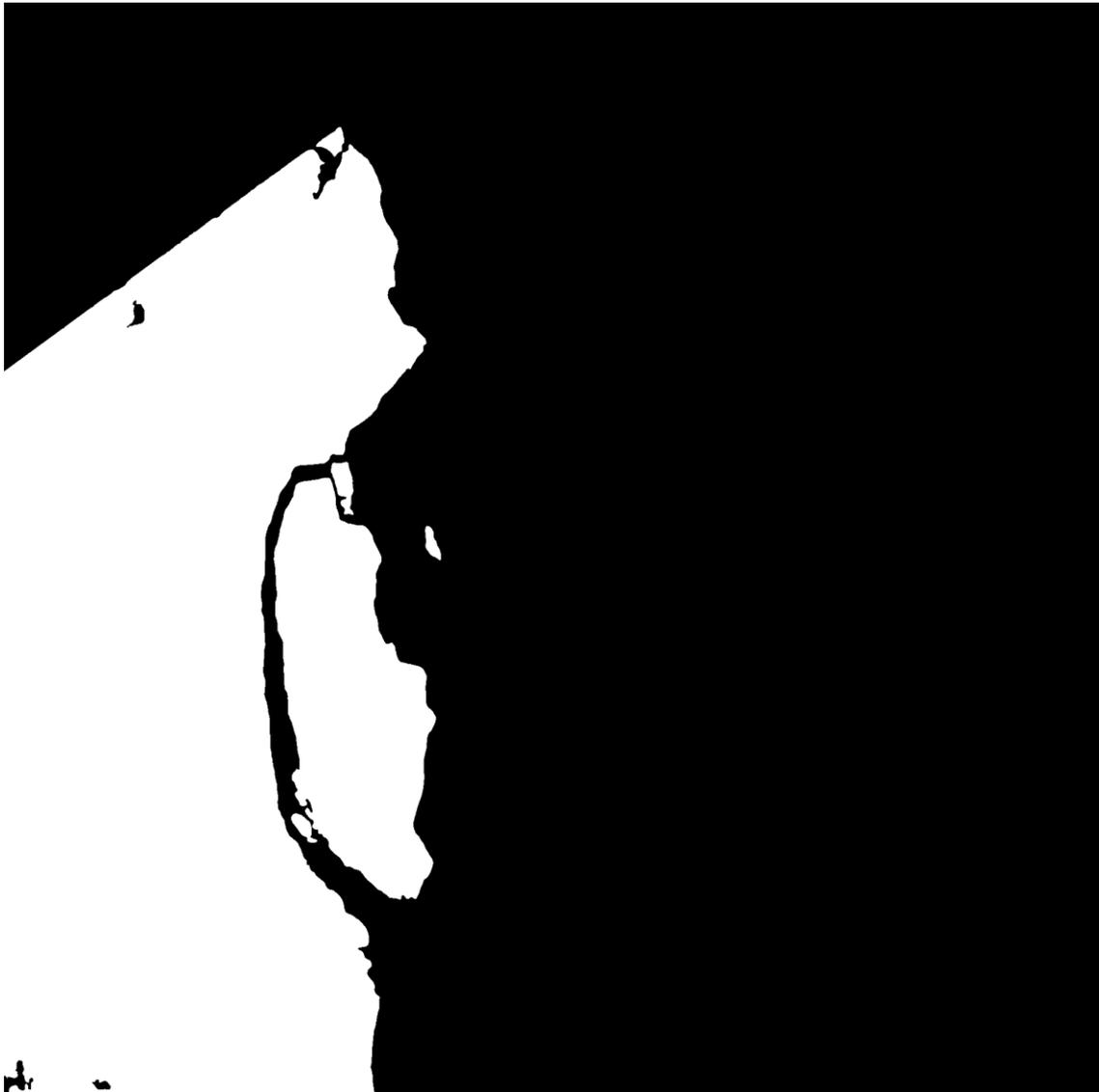


Figura 4.13 Se muestra el resultado de la segmentación difusa de 2 clases

Como aún existen algunas pequeñas porciones de hielo que no pertenecen a la región de interés y es necesario eliminar. Para ello se usó un script, empleando funciones morfológicas para eliminar esas pequeñas porciones.

Posteriormente se aplicó un script para seleccionar únicamente la región de interés, de esta forma se obtuvo la separación de los pixeles pertenecientes al iceberg, como se muestra a continuación.



Figura 4.14 Se muestra el resultado de aislar la región del iceberg, eliminando los demás objetos contenidos en la imagen satelital

4.4 Obtención de la gráfica de la trayectoria

Mediante este método se separaron la región correspondiente al iceberg para cada una de las fotos satelitales, se empleó un editor e imágenes para sobreponerlas, obteniéndose la siguiente imagen, en donde se muestra el desplazamiento del bloque de hielo. Para facilitar la identificación del proceso se coloreo la región de iceberg con un color en cada etapa para diferenciarlas, finalmente obtuve el resultado siguiente. Se señalan con

un pequeño cuadrado los centros de cada región y mediante una línea segmentada se señala la trayectoria seguida por el bloque de hielo.

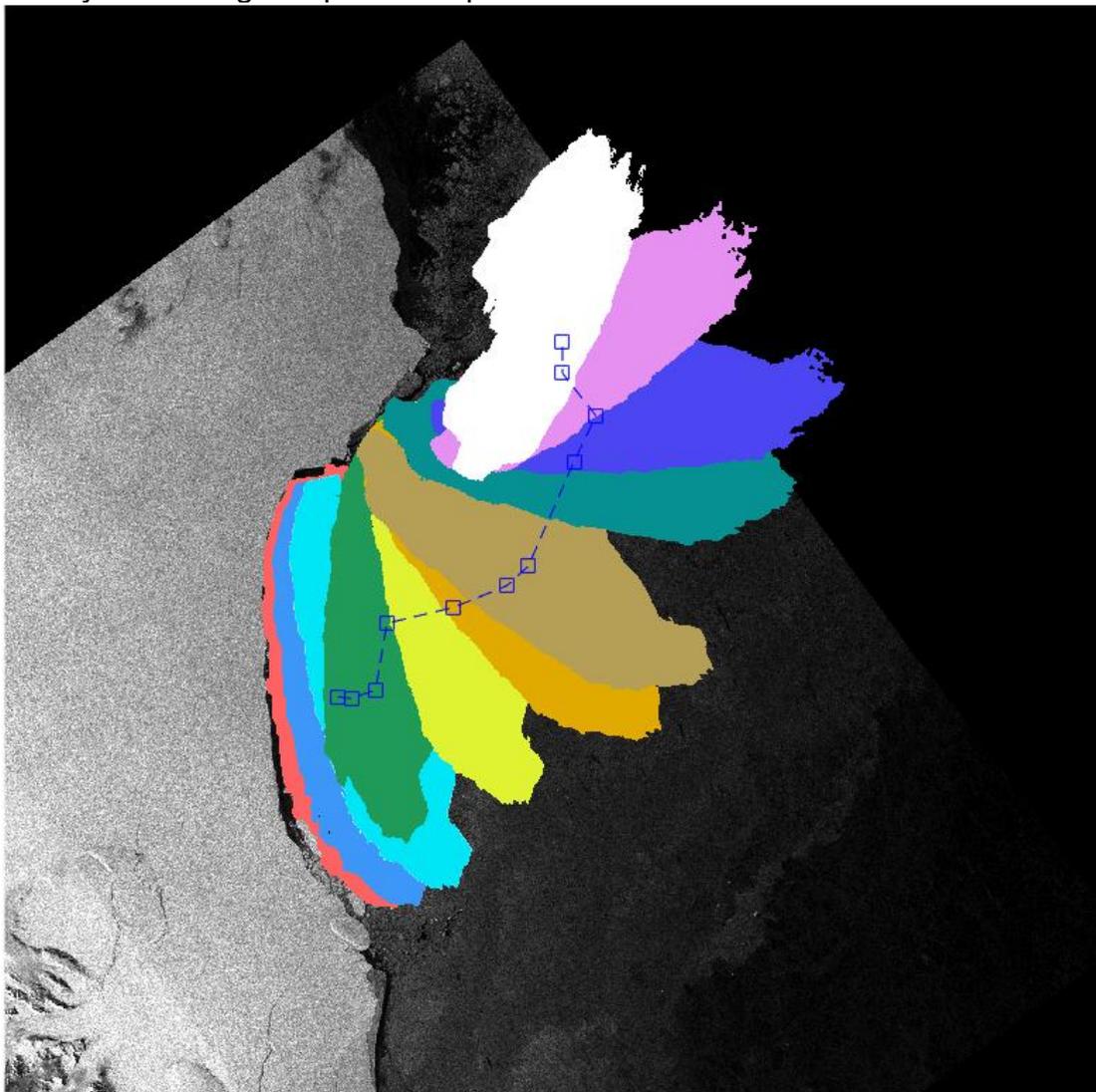


Figura 4.15 Se aprecia el desplazamiento del bloque de hielo hacia la derecha y arriba, con un giro de casi 180°. Además, se aprecia el proceso de deshielo con la consecuente pérdida de volumen

Obteniendo las mediciones de las dimensiones del iceberg, así como, de su centro geométrico se obtuvieron los resultados siguientes. El nombre de la imagen hace referencia a la fecha de adquisición.

Imagen de referencia	Abscisa del centro	Ordenada del centro	Largo en pixeles	Ancho en pixeles	Perímetro en km.	Área en km
20170722I	604.849	1265.592	819.349	236.715	489.899	5883.44
20170908I	629.733	1268.965	783.783	239.459	449.543	5687.52
20171002I	673.752	1253.564	783.555	239.207	469.066	5680.88
20180118I	694.462	1131.564	735.042	236.542	417.965	5254.48
20180612I	815.309	1102.375	758.144	239.104	397.203	5518.84
20180730I	911.959	1062.748	756.146	238.989	385.06	5503.36
20180811I	951.464	1026.519	754.838	238.568	382.298	5482.6
20180904I	1033.952	1131.378	702.948	239.168	425.549	5082.48
20180928I	1074.093	751.984	587.623	234.863	414.06	4051.68

20181127I	1013.117	673.612	538.418	236.405	471.477	3578.56
20190126I	946.656	616.478	520.385	239.958	325.393	3565.44

Tabla 4.2 Valores de las coordenadas de los centros del Iceberg y sus dimensiones. Se emplearon las imágenes obtenidas mediante un segmentado fuzzy-c-medias de 2 regiones.

En la tabla siguiente se reseñan los resultados obtenidos al emplear una segmentación difusa de 4 clases.

Imagen de referencia	Abscisa del centro	Ordenada del centro	Largo en pixeles	Ancho en pixeles	Perímetro en km.	Área en km
20170722I	605.474	1264.551	823.654	235.161	557.845	5829.48
20170908I	630.945	1262.999	781.118	234.242	465.277	5539
20171002I	673.827	1252.932	783.043	238.685	474.122	5665.52
20180118I	694.758	1142.596	769.530	235.304	406.388	5496.16
20180612I	815.352	1102.560	758.378	239.298	399.522	5524.88
20180730I	912.162	1062.766	756.072	239.327	392.698	5509.36
20180811I	952.138	1026.572	755.361	239.208	384.769	5500.96
20180904I	1056.854	837.178	753.426	239.441	390.238	5489.6
20180928I	1147.256	738.719	739.746	239.780	409.237	5396.44
20181127I	1074.575	618.351	702.366	240.247	430.429	5077.4
20190126I	963.034	579.638	605.946	249.355	502.729	4247.16

Tabla 4.3 Valores de las coordenadas del centro del iceberg y sus dimensiones

Con este tipo de segmentación se obtienen resultados más apegados a la realidad, en las condiciones de las últimas fotografías el método pierde algunos pixeles de valores menores pertenecientes a la región de interés.

A continuación, se visualiza una tabla donde se anotan los cálculos de la velocidad del iceberg estimada acorde al tiempo transcurrido al tomar cada foto empleada.

Imagen de referencia	Coordenada del centro	Ordenada del centro	Distancia recorrida entre fotos km.	Tiempo transcurrido entre fotos h.	Velocidad km/h
20170722I	605.474	1264.551	0	0	0
20170908I	630.945	1262.999	25.518	408	0.0625
20171002I	673.827	1252.932	44.047	1776	0.0248
20180118I	694.758	1142.596	112.303	2136	0.0525
20180612I	815.352	1102.560	127.066	3480	0.0365
20180730I	912.162	1062.766	104.669	1152	0.0908
20180811I	952.138	1026.572	53.926	288	0.1872
20180904I	1056.854	837.178	216.415	576	0.3757
20180928I	1147.256	738.719	133.666	576	0.2320
20181127I	1074.575	618.351	140.609	1440	0.0976
20190126I	963.034	579.638	118.068	1440	0.0819

Tabla 4.4 Valores de las velocidades del iceberg en cada etapa acorde a los registros fotográficos proporcionados.

La velocidad promedio obtenida de los datos calculados es de **0.1241 km/h.**

4.5 Estimación de la trayectoria.

La estimación de la trayectoria seguida por el iceberg se puede realizar mediante el uso de varios métodos, por ejemplo, empleando una función polinómica o realizando una regresión lineal.

4.5.1 Aproximación Polinomial.

Para el primer caso, se realizaron los cálculos mediante un script de Python, empleando la función polinómica de grado mayor de 1. Obteniendo los siguientes resultados:

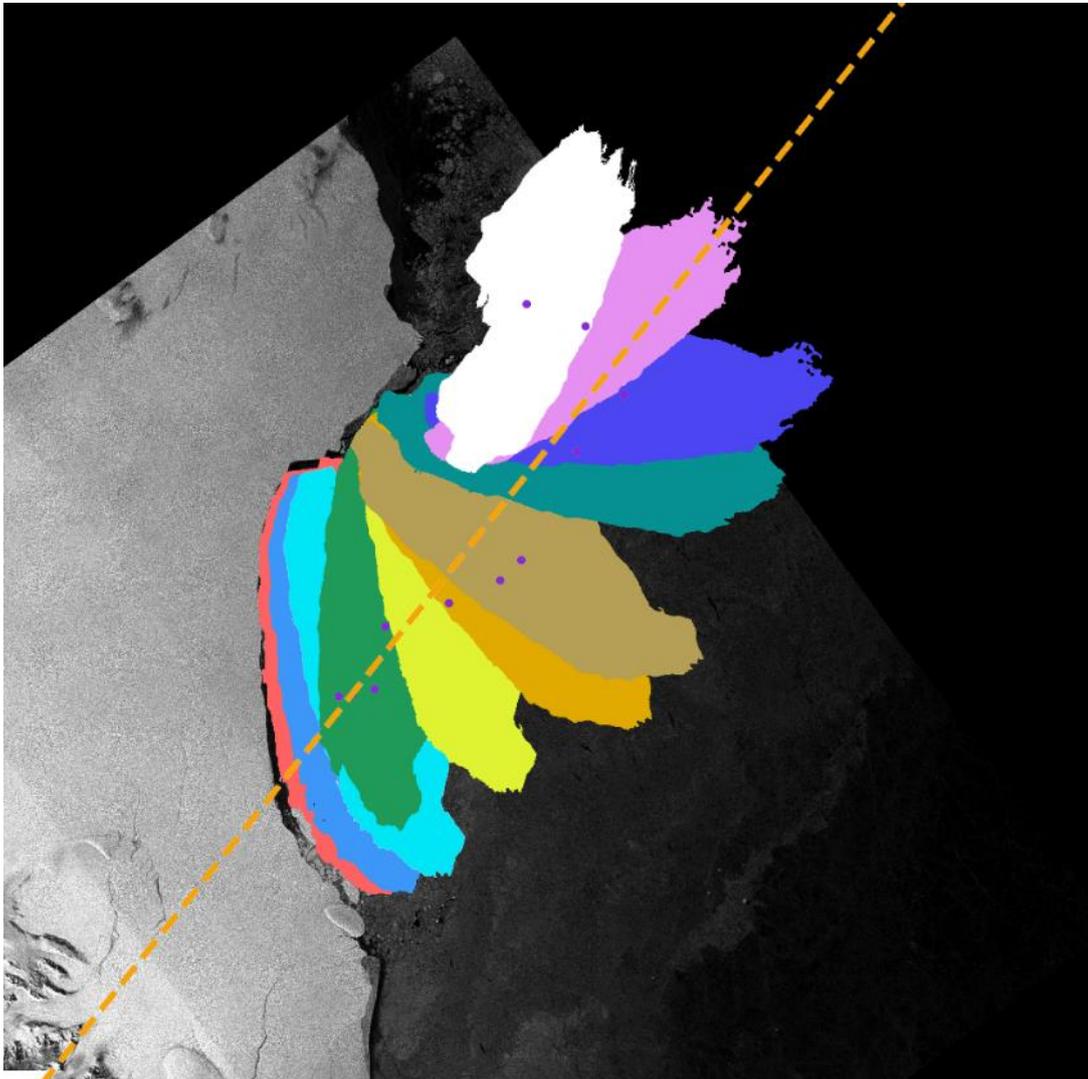


Figura 4.16 Grafica de la predicción empleando un polinomio de grado uno (línea recta)

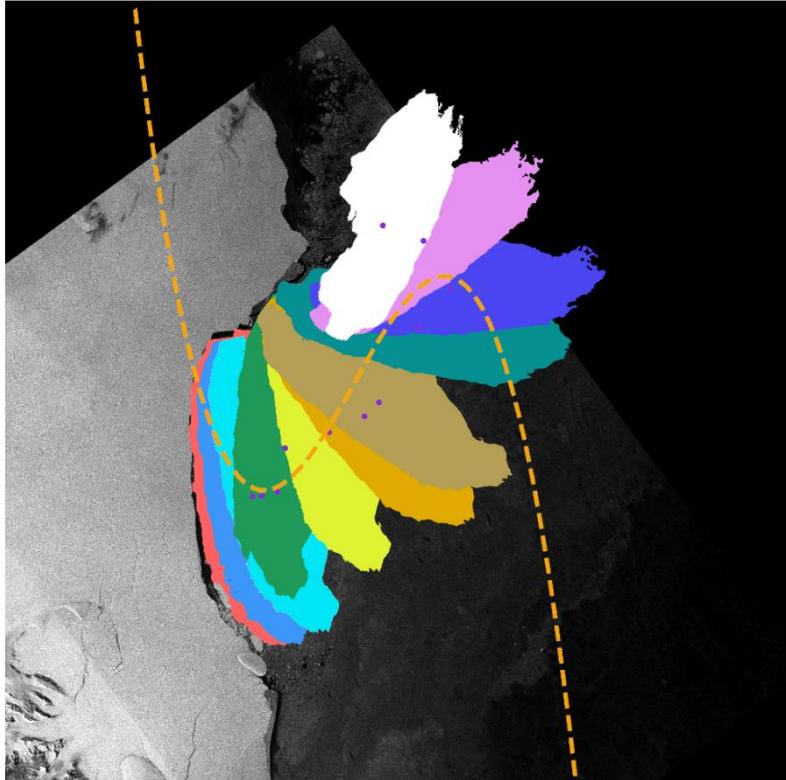


Figura 4.17 Grafica de la predicción empleando un polinomio de grados tres

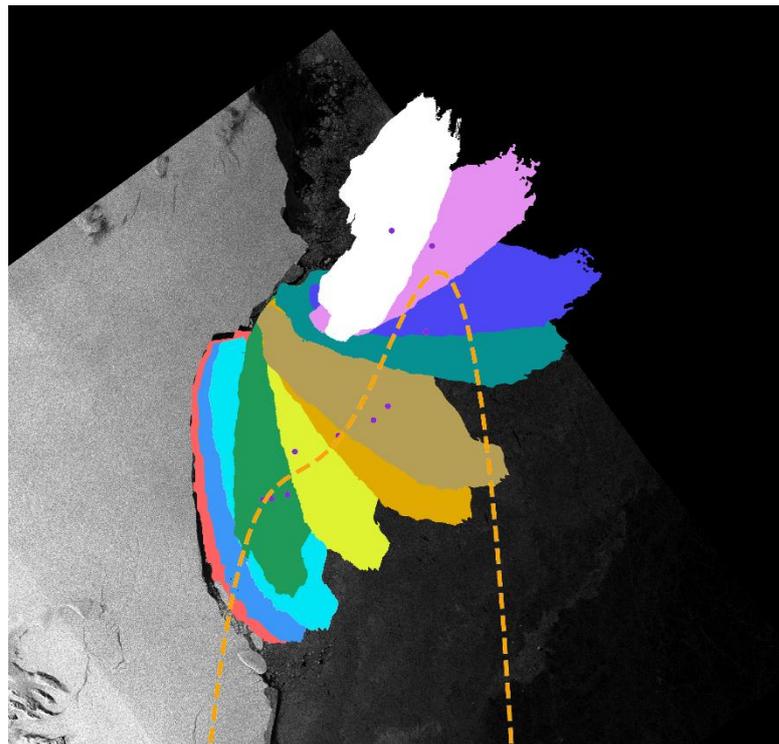


Figura 4.18 Grafica de la predicción empleando un polinomio de grado 4

La gráfica que más se acerca a los puntos es aquella donde los puntos de los centros geométricos calculados se corresponden con la línea del polinomio. En este caso ninguna aproximación se corresponde a ninguno de los centros de las figuras de los icebergs. Este tipo de aproximación no es apta para resolver este problema.

4.5.2 Regresión Lineal.

Empleando el otro método, donde se hace la predicción mediante una regresión lineal se obtiene como trayectoria la mostrada en la siguiente gráfica, generada empleando la función LinearRegression de la biblioteca sklearn.

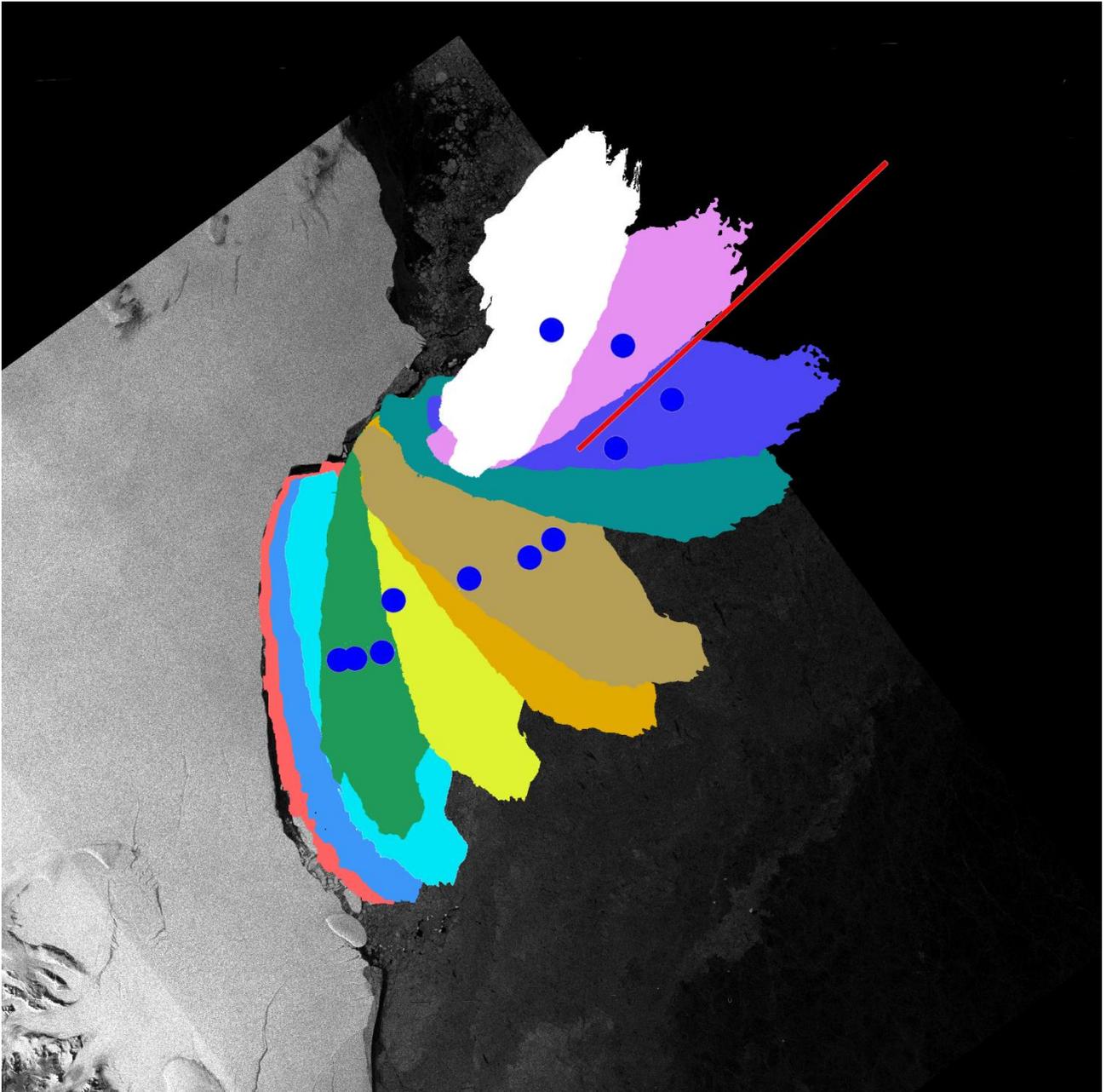


Figura 4.19 Se muestra la ruta obtenida mediante una regresión lineal

4.5.3 Aproximación empleando Filtro Kalman

Ninguno de los métodos anteriores proporciona una trayectoria que se ajuste a los datos originales. Por ello emplearé un tercer método, haciendo uso del Filtro Kalman, el cual se ajusta a los datos que se van obteniendo. Aplicando un script de Python se obtuvo la siguiente figura.

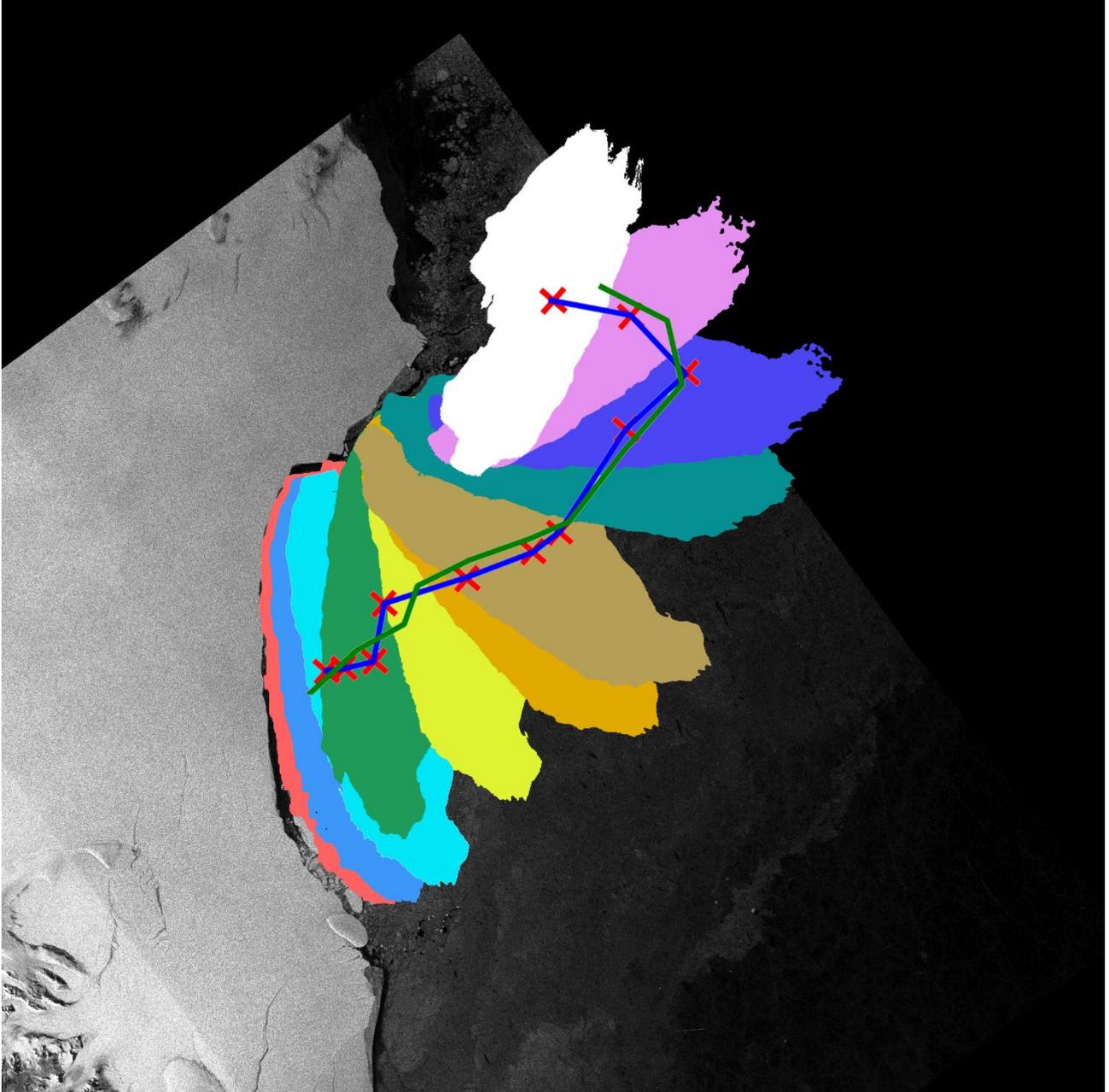


Figura 4.20 Se muestra la trayectoria estimada mediante un filtro de Kalman.

4.6 Fin del viaje del Iceberg A-68

El iceberg A-68 se fue fragmentando al moverse por las aguas oceánicas, desde su desprendimiento en la plataforma Larson C [30] en la Península Antártica, su movimiento se inició después de un año (aproximadamente) de su desprendimiento, incrementando su velocidad al paso del tiempo, llevado a la deriva por corrientes oceánicas tomado una ruta conocida por los estudiosos. Se dirigió a la Georgia del Sur

Journey of iceberg A68a

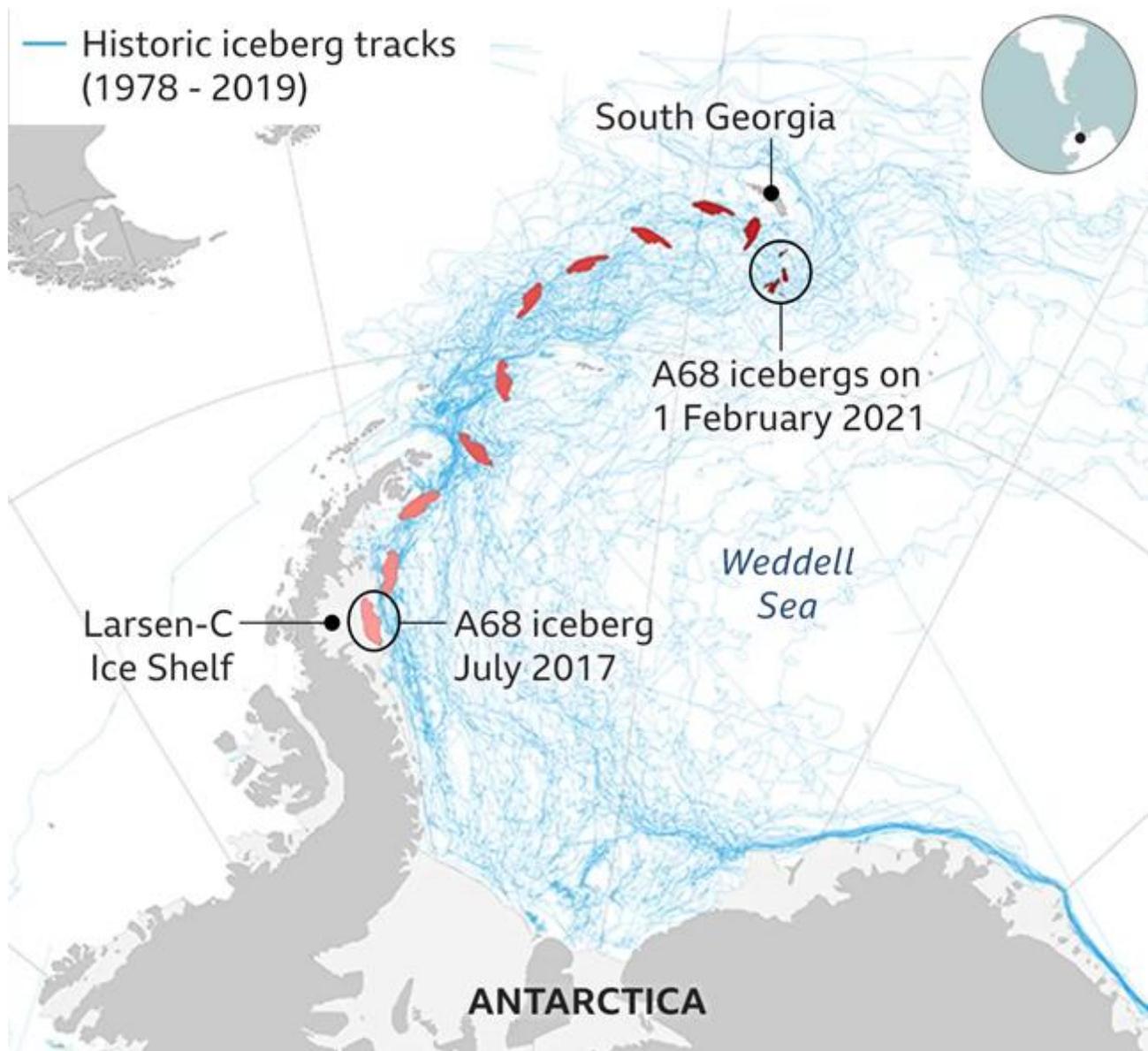


Figura 4.21 Se muestra la trayectoria seguida por el iceberg A-68 [30]

En abril del 2021 la USNIC (Organismo Internacional para nombrar los icebergs), determinó que dadas las dimensiones del fragmento mayor no requería seguir monitoreándolo.



Figura 4.22 Se aprecia el fragmento más grande del iceberg (marcado en rojo) llegando al borde de un cúmulo helado [30]

Capítulo 5. Conclusiones

5.1 Conclusiones

Empleando herramientas muy conocidas del área de procesamiento de imágenes fue posible realizar un tratamiento de las imágenes satelitales (SAR) del iceberg A-68 para determinar su trayectoria. Desde el momento de su desprendimiento, 22 de julio del 2017, hasta su posición pasado más de un año, 26 enero del 2019.

En este trabajo se expuso la implementación de un filtro anisotrópico para mejorar una imagen ruidosa del tipo sal y pimienta. Con el fin de obtener los bordes de las regiones u objetos que se encuentran en la imagen. La mejor definición de los elementos contenidos en la imagen es importante para poder segmentarla, la eliminación del ruido desde el origen de la adquisición permite mejorar la obtención de los objetos. Una etapa de preproceso en la cual se mejora el brillo y contraste, así como el uso de un filtro permite la posterior segmentación de la imagen.

La etapa de segmentación permite obtener la región de interés para la mayoría de las imágenes empleadas. Este proceso fue algo no trivial, dada el tipo de imágenes, la zona continental tiene características similares al área del iceberg, ambas tienen colores y/o niveles de brillo de igual magnitud. Fue necesario, emplear una selección manual de la región de interés, iceberg, señalándolo con el puntero al aplicarle un script para seleccionar objetos. Por ello, en algunas de ellas es conveniente realizar una búsqueda de mejores algoritmos para segmentar con mejor resultado. Es un campo fértil para el análisis y mejorar las herramientas existentes.

El seguimiento de la trayectoria se realizó al obtener los centros de masas del iceberg, estos procedimientos necesitan de una región donde el iceberg se encuentre bien definida. Todo el proceso realizado previamente es muy importante para obtener un resultado apegado a la realidad.

Para predecir la trayectoria del iceberg se emplearon tres métodos: Utilicé ecuaciones polinomiales, regresión lineal y filtro Kalman. El método que arrojó mejores resultados fue el último, el filtro de Kalman realiza un mejor seguimiento de la trayectoria.

Es importante mantener vigilados los mares del mundo, prestando atención a los continentes glaciares. Manteniendo satélites sobrevolando estos continentes se puede ver los momentos cuando se fractura y estos trozos de hielo resultantes se abalanzan sobre los mares.

5.2 Trabajo futuro

El segmentado empleando el algoritmo de fuzzy c-means no obtiene buenos resultados para algunas imágenes, por ello es una tarea para trabajos futuros, en donde por ejemplo se puedan reunir muchas imágenes de icebergs para emplear redes neuronales, con las cuales se pueda separar la región del iceberg. Otra alternativa es aumentar el preprocesamiento de las imágenes en aras de mejorar las zonas en donde las variaciones de los pixeles pertenecientes a la región de interés son grandes, teniendo el objetivo de balancear los niveles a una menor variación para posteriormente realizar una segmentación como la empleada en este trabajo.

Referencias

1. https://historia.nationalgeographic.com.es/a/historia-titanic-tragedia-barco-insumergible_16344
2. <https://dle.rae.es/iceberg>
3. <https://www.ecured.cu/lceberg>
4. <https://www.nytimes.com/2017/04/21/magazine/how-to-avoid-icebergs.html>
5. <https://www.tiempo.com/ram/2220/nombrando-a-los-icebergs/>
6. <https://www.pagina12.com.ar/diario/suplementos/futuro/13-55-2002-03-09.html>
7. <https://www.kaggle.com/c/statoil-iceberg-classifier-challenge>
8. https://www.esa.int/SPECIALS/Eduspace_ES/SEMZQYD3GXF_0.html
9. <http://alojamientos.us.es/gtocom/pid/tema3-1.pdf>
10. P. Perona and J. Malik, "Scale-space and edge detection using anisotropic diffusion," in *IEEE Transactions on Pattern Analysis and Machine Intelligence*, vol. 12, no. 7, pp. 629-639, July 1990, doi: 10.1109/34.56205.
11. https://www.inta.es/INTA/es/blogs/ceit/BlogEntry_1554121012176
12. Q. Sun, J. A. Hossack, J. Tang, and S. T. Acton, "Speckle reducing anisotropic diffusion for 3D ultrasound images," *Comput. Med. Imaging Graph.* 28, 461–470 (2004)
13. Yongjian Yu and S. T. Acton, "Speckle reducing anisotropic diffusion," in *IEEE Transactions on Image Processing*, vol. 11, no. 11, pp. 1260-1270, Nov. 2002, doi: 13.1109/TIP.2002.804276.
14. J. S. Lee, "Digital image enhancement and noise filtering by using local statistics," *IEEE Trans. Pattern Anal. Machine Intell.*, vol. PAM1-2, 1980.
15. Pyradar www.github.com/PyRadar/pyradar
16. Joachim Weickert "Anisotropic Diffusion in Image Processing". B.G. Teubner Stuttgart 1998
17. M.A. Cohen, S. Grossberg, Neural dynamics of brightness perception: Features, boundaries, diffusion and resonance, *Perception and Psychophysics*, Vol. 36, 428–456, 1984.
18. <https://www.nationalgeographic.es/medio-ambiente/2020/12/iceberg-mas-grande-del-mundo-se-dirige-hacia-georgia-del-sur>.
19. MacQueen, J. B. (1967). Some Methods for classification and Analysis of Multivariate Observations. *Proceedings of 5th Berkeley Symposium on Mathematical Statistics and Probability*. Vol. 1. University of California Press. pp. 281–297. MR 0214227. Zbl 0214.46201. Retrieved 2009-04-07.
20. Dunn, J. C. (1973-01-01). "A Fuzzy Relative of the ISODATA Process and Its Use in Detecting Compact Well-Separated Clusters". *Journal of Cybernetics*. 3 (3): 32–57. doi:10.1080/01969727308546046. ISSN 0022-0280.
21. *Mathematical Morphology and Its Applications to Image Processing*, J. Serra and P. Soille (Eds.), proceedings of the 2nd international symposium on mathematical morphology (ISMM'94), ISBN 0-7923-3093-5 (1994)
22. <https://www.imageprocessing.com/2018/06/frost-filter.html>
23. https://catalyst.earth/catalyst-system-files/help/concepts/orthoengine_c/Chapter_824.html
24. <https://definicion.de/iceberg/>
25. https://www.esa.int/Space_in_Member_States/Spain/Sentinel-1_captura_el_nacimiento_de_un_iceberg_gigante
26. <https://www.iagua.es/noticias/agencia-espacial-europea/17/06/07/como-cuantificar-efectos-cambio-climatico>
27. <https://bild-art.de/giant-iceberg-a68-after-three-years-drifting-in-the-south-atlantic>
28. <https://www.europapress.es/ciencia/cambio-climatico/noticia-barrera-hielo-larsen-antartida-sigue-agrietandose-20170802110136.html>
29. <https://atisoft.com.mx/capella-space-news/imagenes-radar-rar-y-sar/>
30. A68: Iceberg that became a social media star melts away - BBC News

Apéndice

Se muestra el script empleado para calcular el filtro de Perona y Malik, el cual es una modificación del mostrado en: <https://stackoverflow.com/questions/14715817/emgu-cv-anisotropic-diffusion/14717279#14717279>

```
import numpy as np
import scipy.ndimage.filters as flt
import warnings
import cv2 as cv

def anisodiff(niter=50,kappa=70,gamma=0.1,step=(1.,1.),sigma=0, option=1,ploton=False):
    global image
    img = cv.cvtColor(image, cv.COLOR_BGR2GRAY)
    if img.ndim == 3:
        warnings.warn("Only grayscale images allowed, converting to 2D matrix")
        img = img.mean(2)

    # initialize output array
    img = img.astype('float32')
    imgout = img.copy()

    # initialize some internal variables
    deltaS = np.zeros_like(imgout)
    deltaE = deltaS.copy()
    NS = deltaS.copy()
    EW = deltaS.copy()
    gS = np.ones_like(imgout)
    gE = gS.copy()

    # create the plot figure, if requested
    if ploton:
        import pylab as pl
        from time import sleep

        fig = pl.figure(figsize=(20,5.5),num="Anisotropic diffusion")
        ax1,ax2 = fig.add_subplot(1,2,1),fig.add_subplot(1,2,2)

        ax1.imshow(img,interpolation='nearest')
        ih = ax2.imshow(imgout,interpolation='nearest',animated=True)
        ax1.set_title("Original image")
        ax2.set_title("Iteration 0")

        fig.canvas.draw()

    for ii in np.arange(1,niter):

        # calculate the diffs
        deltaS[:-1,: ] = np.diff(imgout,axis=0)
        deltaE[:, :-1] = np.diff(imgout,axis=1)

        if 0<sigma:
```

```

    deltaSf=flt.gaussian_filter(deltaS,sigma);
    deltaEf=flt.gaussian_filter(deltaE,sigma);
else:
    deltaSf=deltaS;
    deltaEf=deltaE;

# conduction gradients (only need to compute one per dim!)
if option == 1:
    gS = np.exp(-(deltaSf/kappa)**2.)/step[0]
    gE = np.exp(-(deltaEf/kappa)**2.)/step[1]
elif option == 2:
    gS = 1./(1.+(deltaSf/kappa)**2.)/step[0]
    gE = 1./(1.+(deltaEf/kappa)**2.)/step[1]

# update matrices
E = gE*deltaE
S = gS*deltaS

# subtract a copy that has been shifted 'North/West' by one
# pixel. don't ask questions. just do it. trust me.
NS[:] = S
EW[:] = E
NS[1:,:] -= S[:-1,:]
EW[:,1:] -= E[:, :-1]

# update the image
imgout += gamma*(NS+EW)

if ploton:
    iterstring = "Iteration %i" %(ii+1)
    ih.set_data(imgout)
    ax2.set_title(iterstring)
    fig.canvas.draw()
    # sleep(0.01)

return imgout

```

Se muestra el script empleado para efectuar el segmentado de las imágenes en este trabajo, tiene como fuente el algoritmo fuzzy c-means. Es una adaptación del código fuente mostrado en la página.

https://github.com/rsharankumar/Learn_Data_Science_in_100Days/blob/master/Day70-71%20-%20Fuzzy%20C-Means/Image%20Quantization.ipynb

```
import numpy as np
from PIL import Image
from fcmeans import FCM

def segmentador (X, n):
    #Transformando la imagen en un arreglo matricial
    N, M = X.size
    X = (
        np.asarray(image)      #Convertir un formato PIL a un formato numpy
        .reshape((N*M, 1))    #Cambiar el formato de la imagen
    )

    #Creando y afinando el modelo
    fcm = FCM(n_clusters=n)    #Crear una instancia FCM
    fcm.fit(X)

    centros = fcm.centers
    print ("Los centros son : ", centros)
    #Etiquetas
    Etiqueta = fcm.predict(X)
    print("Las etiquetas = ", Etiqueta)
    #Cuantizar los pixeles
    labeld_X = fcm.predict(X)  #Obtener la etiqueta de cada punto
    transformed_X = fcm.centers[labeld_X] #Cuantizacion de un pixel hacia el centro

    #Convertir y guardar la imagen
    quatized_array = (
        transformed_X
        .astype('uint8')      #Convertir los puntos de datos en formato enteros
        .reshape((M, N))     #Reformar la imagen
    )

    quatized_image = Image.fromarray(np.asarray(quatized_array)) # Convertir el array en
una imagen PIL
    quatized_image.save('./Imagenes/4_Clusters/20170722l.bmp') # Guardar la image

    #Imagen final comprimida
    side_by_side = Image.fromarray(
        np.hstack([
            np.array(image),
            np.array(quatized_image)
        ])
    )
    side_by_side.show()
```