



BASQUE CENTRE
FOR CLIMATE CHANGE
Klima Aldaketa Ikergai

**Procesos visibles de la transición del hielo superficial
con burbujas a hielo profundo con clatratos en el
testigo EDML de Antártida**

Gonzalo Morcillo and Sérgio Henrique Faria

September 2021

BC3 WORKING PAPER SERIES

2021-02

The Basque Centre for Climate Change (BC3) is a Research Centre based in the Basque Country, which aims at contributing to long-term research on the causes and consequences of Climate Change in order to foster the creation of knowledge in this multidisciplinary science.

The BC3 promotes a highly-qualified team of researchers with the primary objective of achieving excellence in research, training and dissemination. The Scientific Plan of BC3 is led by the Scientific Director, Dr. María José Sanz Sánchez.

The BC3 Working Paper Series is available on the internet at
http://www.bc3research.org/lits_publications.html

Enquiries (Regarding the BC3 Working Paper Series):

Prof. Sérgio H. Faria

Email: sh.faria@bc3research.org

www.bc3research.org

The opinions expressed in this working paper do not necessarily reflect the position of Basque Centre for Climate Change (BC3) as a whole.

Note: If printed, please remember to print on both sides. Also, perhaps try two pages on one side.

Procesos visibles de la transición del hielo superficial con burbujas a hielo profundo con clatratos en el testigo EDML de Antártida

Gonzalo Morcillo^{a*} and Sergio Henrique Faria^{a,b}

Los estudios paleoclimáticos han cobrado un gran interés desde que la amenaza del cambio climático se empezó a convertir en una realidad. Este trabajo sirve de soporte a esos estudios, al investigar la física relacionada con la formación e integridad de los registros paleoclimáticos. Está enmarcado en el análisis de los datos obtenidos en el proyecto europeo de perforaciones en la Antártida, EPICA, de forma que utilizamos como base el archivo de imágenes digitales de las muestras de hielo EDML LS. Se trata del análisis de una región limitada y en cierto modo especial, ya que únicamente se puede encontrar en las grandes masas de hielo profundo; se trata de la región de transición del hielo con burbujas a hielo con clatratos. Para llevar a cabo el análisis hemos adecuado las características de las imágenes a la toma de datos manual, transformando las imágenes de escala de grises en imágenes de pseudocolor. De esta forma hemos abordado el análisis digital de las burbujas de forma independiente en las capas de precipitación cálida (“verano”) y las de la estación fría (“invierno”). Ambos tipos de precipitación se distinguen por su muy diferente turbidez. Las capas de precipitación cálida, originalmente más porosas, presentan mayores variaciones de la porosidad con el aumento de la presión hidrostática y hasta unos 1000 m de profundidad. Sin embargo, cuando todas las burbujas se han convertido en clatratos, se siguen viendo puntos blancos (“white dots”) en el hielo, aunque en mucha menor concentración. Estos puntos blancos son en su mayoría clatratos (además de alguna contribución de estructuras de relajación, como las PLIs) que ocupan posiciones muy cercanas a las que debieron ocupar las burbujas. Las capas turbias, inicialmente más porosas, muestran una mayor concentración de clatratos que las capas claras, tal como las burbujas debieron distribuirse en el momento de su formación. Esto significa que los clatratos de aire, lejos de ser molestos y aleatorios puntos blancos en las imágenes, siguen teniendo un papel de importancia en el estudio del hielo profundo.

Keywords: paleoclimate data, EDML, deep ice cores, visual analysis.

Cite as: Morcillo, G. and S.H. Faria (2021) Procesos visibles de la transición del hielo superficial con burbujas a hielo profundo con clatratos en el testigo EDML de Antártida. *BC3 Working Paper Series 2021-02*. Basque Centre for Climate Change (BC3). Leioa, Spain.

* Corresponding Author. Email: gvmorcillojuliani@telefonica.net

^a Basque Centre for Climate Change (BC3), 48940 Leioa, Spain

^b Ikerbasque – Basque Foundation for Science, 48009 Bilbao, Spain

1. Introducción

El análisis de imágenes en glaciología ha experimentado un gran avance desde que se comenzó a aplicar la tecnología digital. Los primeros trabajos utilizando equipos digitales automatizados tuvieron lugar durante la extracción del testigo NGRIP (Dahl-Jensen et al., 2002) y produjeron la primera estratigrafía visual completa de un testigo de hielo profundo (Svensson et al., 2005). Otros trabajos relevantes se centraron en la región de hielo con burbujas, hasta entonces poco conocido (Ueltzhöffer et al., 2010; Bendel et al., 2013), utilizando la nueva técnica de microscopía computarizada, conocida como *Micro-Structure Mapping* (μ SM; Kipfstuhl et al., 2006). Los resultados de estos trabajos han establecido varios principios fundamentales para el análisis visual del hielo profundo.

El análisis de la estratigrafía visual del testigo EDML (Antártida interior) fue realizado utilizando las mismas técnicas que Svensson et al. (2005) o Takata et al. (2004), pero incluyendo el análisis macroscópico de las burbujas basado en la binarización de las imágenes. En este estudio pudimos ratificar los hallazgos por microscopía de Ueltzhöffer et al. (2010) y Bendel et al. (2013). Sus investigaciones relacionaron la presencia de impurezas, en especial polvo atmosférico, con la concentración de burbujas y con el tamaño de los cristales, desde una escala microscópica. Estos hallazgos sirvieron para indagar si esta relación se daba también en escalas temporales mayores, encontrando que en cualquier escala se repetían las mismas relaciones.

Bajo estos principios hemos realizado el análisis del hielo con burbujas, con la diferencia de separar el análisis según la estación del año, invernal o estival. Además, hemos continuado el análisis hasta 1550 m de profundidad, trescientos metros por debajo del final de la región de burbuja, con objeto de buscar el punto de separación de los dos tipos de hielo.

En este hielo superficial podemos distinguir varias zonas: La primera zona es la región de solo burbujas (\approx 80–700 m), seguida de la región de transición burbuja/clatrato (700–1250 m), que incluye la zona de capas aisladas sin burbujas (“bubble-free bands”; 1000–1250 m), y finalmente la región de solo clatratos (1250–2774 m). Hay que tener en cuenta que en todas estas zonas la presión hidrostática aumenta progresivamente y la mayoría de los procesos tienen relación con ella.

A solo 450 m de profundidad las capas turbias (estivales) comienzan a presentar signos de compresión de las burbujas, que no se dan en las capas claras (invernales). Este efecto se ve al comparar sobre las muestras el perfil de turbidez del hielo (intensidad de gris) con el perfil de porosidad (“2D porosity”). La variabilidad de la porosidad en el hielo con burbujas ya fue mostrada por Ueltzhöffer et al. (2010) y Bendel et al. (2013). Ellos mostraron la relación inversa entre la concentración de burbujas y el tamaño de la burbuja. Esta relación terminaba, y se invertía, a unos 1000 m de profundidad.

En nuestro estudio veremos que tales variaciones de la porosidad se dan muchas veces a lo largo del tiempo. Se dan con mucha mayor intensidad en las capas turbias (“cloudy bands”, CB) y también cambian de sentido a unos 1000 m de profundidad. A partir de esa profundidad las capas turbias presentan una porosidad (2D) mayor que en las capas claras (“clear ice”, CI).

Por último, la región más profunda de este estudio (1250–1554 m) se caracteriza por la ausencia de burbujas, que han sido completamente sustituidas por clatratos. Los clatratos en esta región son visibles a ojo desnudo y están formados por la unión de varios otros (Kipfstuhl et al., 2001), por lo que presentan tamaños mucho mayores (hasta 2 mm) y notablemente menor concentración. Sin embargo, preservan la misma, o muy parecida, relación que mantenían las burbujas en el momento de su formación: las capas con mayor concentración de polvo atmosférico (las CB) presentan también mayor concentración de clatratos.

2. Métodos

2.1 Escáner digital automático

Las imágenes EDML fueron tomadas por medio de un dispositivo line-scanner automatizado diseñado especialmente para la filmación de muestras de hielo (Figura 1).

2.2 Procesado de las imágenes

2.2.1 Análisis de grises

Cuando se escanean imágenes transparentes o translúcidas, como el hielo, el valor de intensidad de gris es proporcional a la intensidad de la luz saliente después de atravesar la muestra (Figura 2). Esta es la medida de su turbidez. En muestras de hielo realizadas con un sistema de iluminación oblicuo en campo oscuro las zonas más turbias aparecen de tonos blanquecinos, más blancos cuanto mayor sea la turbidez. Como el hielo meteórico no es una masa uniforme, sino compuesta de una sucesión de capas los valores de intensidad de gris irán subiendo y bajando en función de la turbidez que encuentren formando un perfil que dibuja exactamente el grado de turbidez de la muestra.

Para poder llevar a cabo este trabajo hemos utilizado transparencias de los perfiles, superpuestas a la muestra real, después de haberlas modificado a pseudocolor. En todo lo demás, de la misma forma que hicieron Takata et al. (2004), Svensson et al. (2005) o Winstrup (2011).

2.3 Transformaciones de la imagen

2.3.1 Pseudocolor

El formato de escala de grises es un formato muy utilizado en análisis de imagen, pero el ojo humano distingue los colores mucho mejor que los tonos grises. Por lo tanto, en muchos trabajos en los cuales se utilizan técnicas de fotointerpretación, la imagen de grises es transformada a imagen de pseudocolor (Ferreira and Rasband, 2012). Esta transformación consiste en reemplazar ciertos intervalos del histograma gris con valores de color (Figura 3).

Los detalles del procedimiento, para el software ImageJ, se pueden encontrar en: <http://rsb.info.nih.gov/ij>.

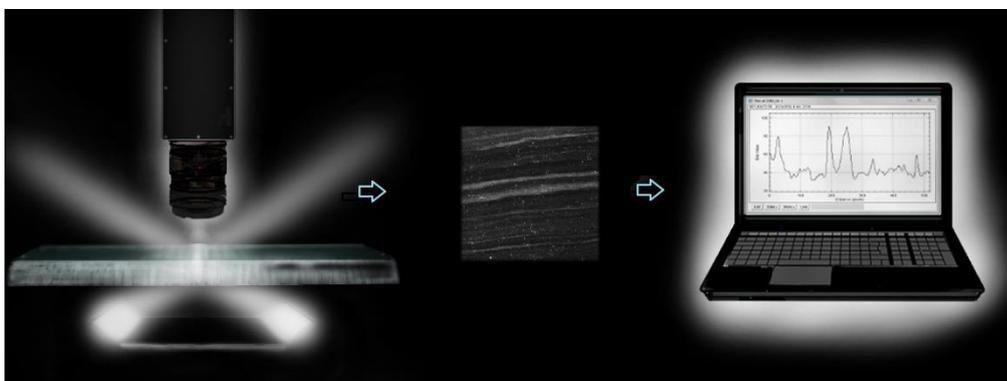


Figura 1: Una pieza clave del dispositivo es la fuente de iluminación oblicua en campo oscuro. Este tipo de dispositivos fueron diseñados originalmente para ser utilizados en microscopía de transmisión. Pero dan un excelente resultado en la filmación de muestras de hielo.

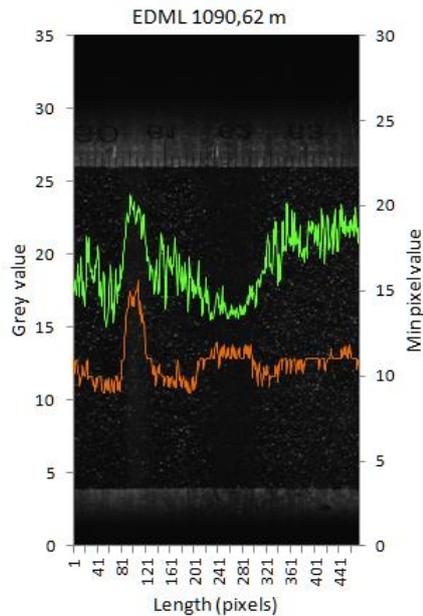


Figura 2: El valor de intensidad de gris se puede sustituir en ocasiones por el valor mínimo de pixel. En el centro de esta muestra hay una capa sin burbujas. El valor de intensidad de gris es el promedio de todos los valores de pixel en la muestra, por eso está muy influenciado por los altos valores de las burbujas (perfil verde). Sin embargo, el mínimo valor de pixel sólo toma el valor mínimo de los pixeles cada 1 mm. Al no tener en cuenta los valores altos de la muestra sólo indica el valor de la turbidez del hielo que, como vemos en el perfil naranja, descubre la presencia de la banda turbia. Por esta razón en ciertas ocasiones se puede utilizar el valor mínimo de pixel para desvelar la estratigrafía de la muestra.

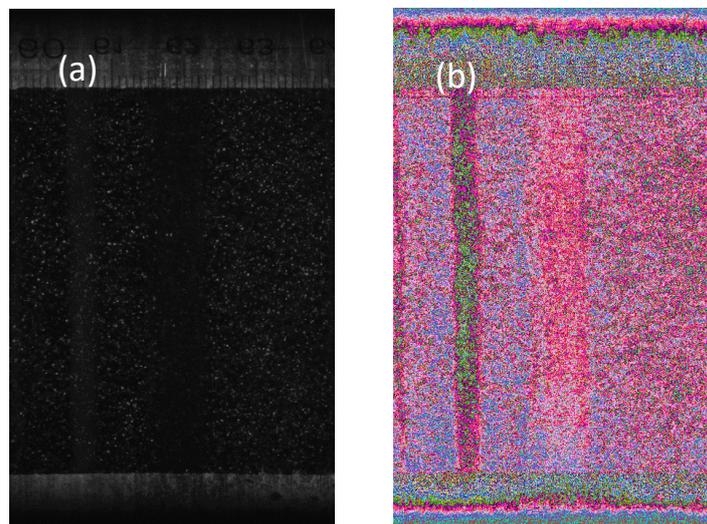


Figura 3: Transformación de imágenes en escala de grises a pseudocolor. Una pequeña selección a una profundidad de 1090,62 m (misma imagen que la Figura 2) nos muestra las diferencias entre una imagen en escala de grises (a) y la misma imagen transformada en pseudocolor (b). El proceso de transformación de una imagen gris en pseudocolor comienza creando nuevas capas transparentes, similares a las de una imagen en color RGB (rojo-verde-azul), para realizar una imagen compuesta. Esta operación se puede realizar directamente con un programa de análisis de imágenes aplicando una tabla de lookup (LUT) confeccionada, o también creando una específica para nuestro análisis.

2.3.2 Método analítico para burbujas y otras inclusiones: thresholding

El análisis digital de las burbujas no se puede realizar directamente a partir de una imagen en formato de grises, sino que requiere la discriminación de los objetos (la partícula) del fondo. La técnica adecuada para lograrlo se conoce como umbralización (“thresholding”; Ridler y Calvard, 1978; Ferreira y Rasband, 2012). Mediante esta técnica, se establece un límite o umbral que responde a un criterio preconcebido, y divide el histograma de la imagen en dos colores, en nuestro caso blanco para los objetos y negro para el fondo (Figura 4).

2.4 Porosidad en el hielo con burbujas

Según diferentes autores (Faria et al. 2010, 2018; Bendel et al., 2013) el aire atrapado en el hielo en el momento de “cerrar poro” es del orden del 10 %. A partir de ese momento, el aire de las vesículas se presuriza cada vez más, se transforman en burbujas esféricas hasta que, a cientos de metros de profundidad, comienzan a pasar a clatrato. Si observamos su resistencia estructural, el hielo poroso es menos resistente a la compresión que el hielo compacto. Por tanto, si tuviéramos dos capas juntas, con diferente porosidad, cuando se alcanzara la presión crítica, las burbujas de la capa más porosa estarían más comprimidas y pasarían antes al clatrato.

La diferente porosidad del hielo proviene de las diferentes condiciones ambientales en las que se produjeron las precipitaciones. Se puede hacer una buena aproximación de la porosidad del hielo calculando la porosidad 2D. A los efectos de este trabajo, el cálculo de la porosidad en dos dimensiones es suficiente y se obtiene directamente:

$$\text{Porosidad} = \Sigma A(i) / \text{Área total}$$

con $A(i)$ = área del white dot (para cada wdot (i)) y A = Área total (área de muestreo).

2.5 Impurezas en el testigo EDML

Intuitivamente relacionamos la turbidez con la presencia de impurezas, y la claridad como pureza y transparencia. Si esto es así, el hielo de la Antártida es uno de los más puros que se dan en la naturaleza. Pero encontramos que el hielo de los casquetes polares no es homogéneo, sino que está formado por una sucesión de capas turbias seguidas de capas claras, en una secuencia que se repite miles de veces, como las páginas de un libro.

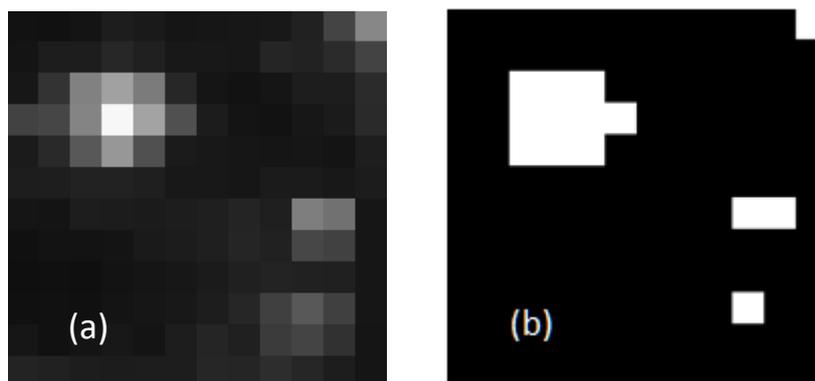


Figura 4: Transformación de escala de grises a imagen binaria. Cada imagen es una muestra de 1 mm² de área, que contiene burbujas en diferentes planos y tamaños. Después de la transformación, las burbujas aparecen como puntos blancos sobre un fondo negro. El tamaño y la forma de estos puntos no son iguales al gris, pero son proporcionales. De estos puntos podemos obtener diferentes datos de interés relacionados con las burbujas, como su tamaño o concentración, así como otros relacionados con su forma, posición espacial, etc. No obstante, para relacionar el tamaño de la partícula en una imagen binaria con su tamaño real, se debe realizar una calibración previa.

Actualmente, en los casquetes polares, las estaciones transcurren con una notable variación en la concentración de impurezas (Hogan et al., 1993; Sheridan et al., 2016), que puede ser entre diez y veinte veces mayor en verano que en invierno. La concentración de cada diferente impureza también varía mucho a lo largo del año, pero ninguna desaparece por completo, siempre hay trazas de todas ellas.

No obstante lo anterior, a través del análisis de bandas nubosas (Gow and Williamson, 1976; Kipfstuhl et al., 2006; Faria et al., 2010, 2014b), podemos saber que uno de los principales componentes de las bandas nubladas en la Antártida es el polvo mineral eólico.

2.6 Capas estacionales en el hielo poroso

Según los resultados publicados por Hogan et al. (1993) y Sheridan et al. (2016) se puede establecer una relación entre la turbidez de una capa y la estación del año en la que es más probable que ocurriera la precipitación. La estación de verano se caracteriza por que el Sol cenital está más cerca de la Antártida (≈ 7.500 km), mientras en el Sol cenital en invierno está a unos 12.500 km. Si pensamos que la mayoría del polvo atmosférico llega a la Antártida interior en las ascendencias generadas por el Sol cenital (hasta 18.000 m de altura) entenderemos enseguida la razón de la gran diferencia de turbidez.

Desde el punto de vista de la estratigrafía visual ambas estaciones se distinguen porque sus perfiles de intensidad de grises están precisamente en fase opuesta. Las capas claras tienen valores de intensidad muy bajos, de hecho, los más bajos y estables, mientras que las capas nubladas, o bandas nubladas, tienen valores de intensidad notablemente más altos y variables.

3. Resultados y discusión

3.1 Región de solo burbujas (80–700 m)

Si se diera una precipitación constante, perfectamente homogénea, que se comprimiese uniformemente, sus burbujas serían idénticas, se transformarían en clatratos iguales y a la misma profundidad.

Sin embargo, la región de transición de firn a hielo, zona “close-off”, es en realidad una franja que puede tener decenas de metros de espesor (Gow 1968; Zwally y Jun 2002; Hörhold et al., 2012; Faria et al., 2014a, 2018). En esta amplia frontera capas de distintos espesores y distinta porosidad van quedando atrapadas entre capas impermeables al aire. Este fenómeno es debido a su distinta velocidad de compactación (Hörhold et al., 2012). Por esta razón el proceso de compactación se dará a distinta presión/profundidad en cada capa.

En la Figura 5 podemos ver que los perfiles de porosidad (2D) en “CB” y “CI” son diferentes. Las bandas claras son más resistentes a la compresión (están formadas con mayor proporción de hielo sólido) y presentan un perfil en general más suave. Si nos fijamos bien veremos que las oscilaciones de las CB son habitualmente disminuciones de la porosidad. Estas son progresivamente mayores hasta ≈ 950 m de profundidad. Si tenemos en cuenta que las capas más porosas son también menos resistentes a la compresión, podemos pensar que las disminuciones de porosidad de las CB se deberán a su mayor porosidad.

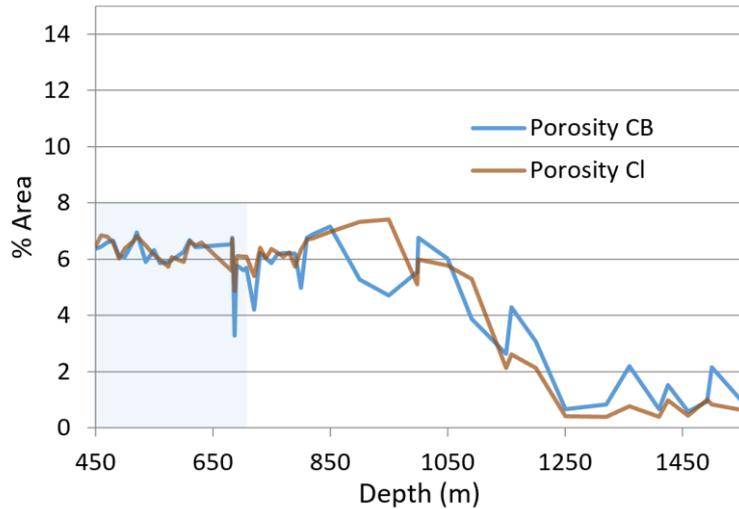


Figura 5: Perfiles de porosidad (2D) en “CB” y “CI”, correspondientes al tramo comprendido en la transparencia azul. Los perfiles de porosidad de las CB y CI discurren cercanamente paralelos desde la izquierda de la gráfica. Pero al aproximarse a los 700 m de profundidad comienzan a aparecer descensos apreciables de porosidad en las CB, mientras la porosidad de las CI solo sufre pequeñas oscilaciones. Este periodo es precisamente el Younger Dryas, el comienzo del Holoceno.

En la Figura 6 se ve una pequeña muestra entre 459,45 y 459,64 m (Bag 460). Varias cloudy bands tienen sobrepuestos los perfiles de intensidad de gris (azul claro) y porosidad bidimensional (2D porosity, en verde). Los dos perfiles se asemejan, aunque en algunos puntos presentan una clara anticorrelación. Si consideramos la presión hidrostática igual en toda la muestra los rápidos descensos de porosidad locales se deberán a la menor resistencia a la compresión del hielo de cada capa.

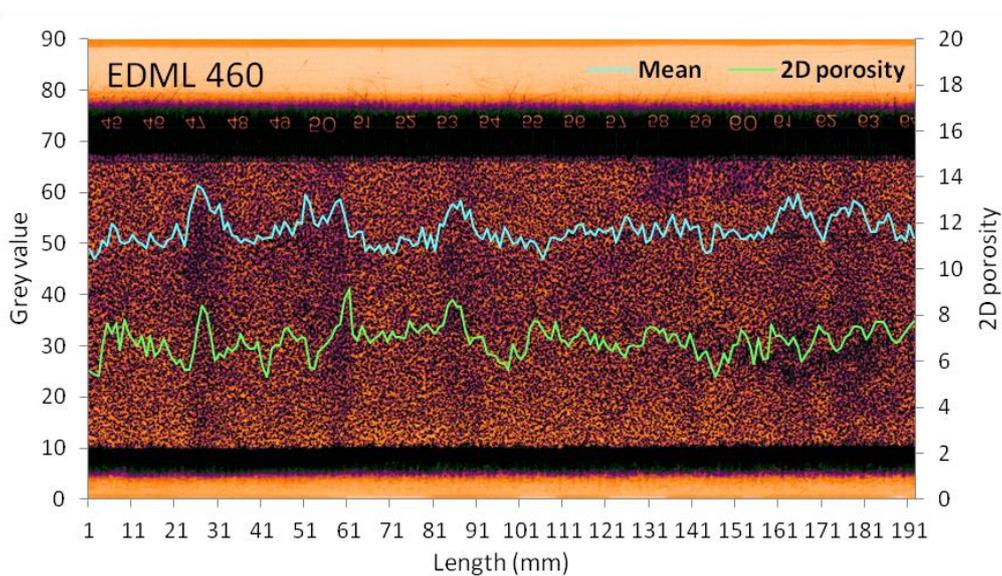


Figura 6: Pequeña muestra entre 459,45 y 459,64 m (Bag 460). En varias capas aparecen diferencias significativas entre los perfiles de intensidad de gris y porosidad 2D, que en algunos puntos se pueden considerar anticorrelación (flechas). En esta muestra vemos que la presión hidrostática puede tener distinto efecto sobre capas con parecida turbidez, lo que refuerza la idea de un influjo del quimismo sobre la dureza del hielo, encontrada por Hörhold et al. (2012).

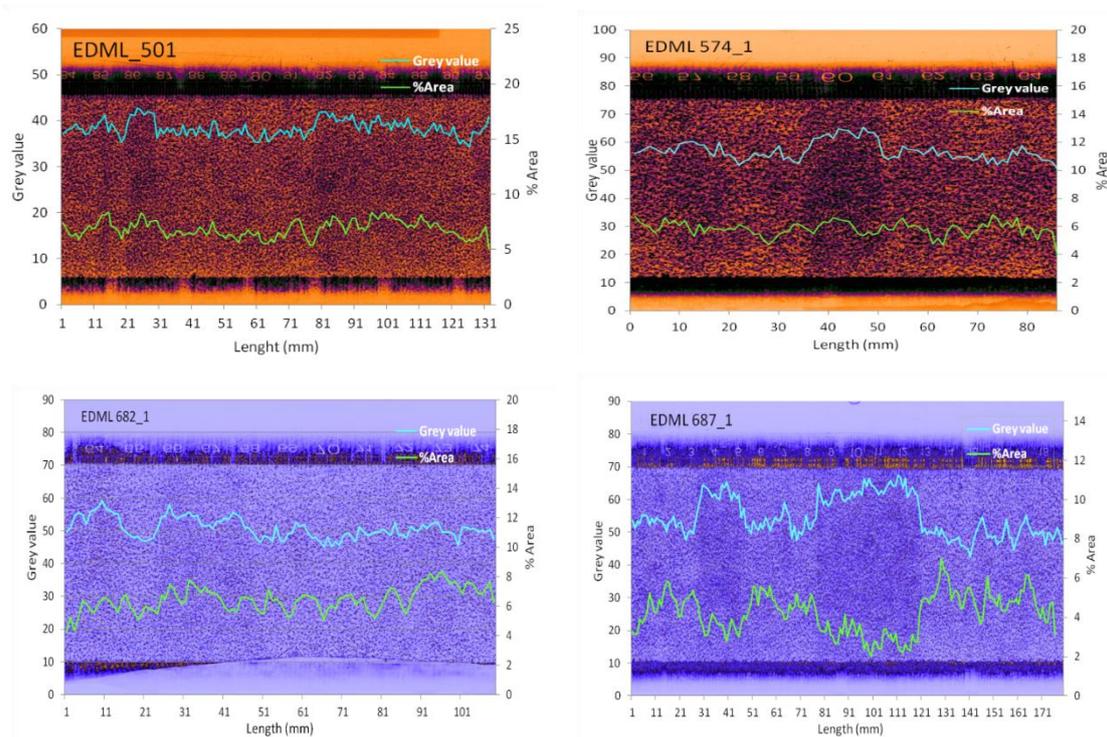


Figura 7: Cuatro muestras con variaciones de la porosidad con la profundidad.

Estas cuatro muestras (Figura 7) nos permiten ver las variaciones de la porosidad con la profundidad. Comenzando por la imagen de una muestra de 500 m de profundidad (Bag 501), aunque no esté perfectamente delimitado, vemos que en esta muestra hay un aumento de la porosidad en las cloudy bands. En esta misma imagen podemos ver que en las zonas de mayor turbidez aumenta la porosidad. Sin embargo, varias decenas de metros por debajo (Bag 574), esta relación no parece tan clara y la gráfica de porosidad no se podría relacionar con la de valor de gris, ya que tiende a igualarse en todas las capas. En la imagen de la muestra de 601 m de profundidad (Bag 602) parece volver la relación que veíamos en la muestra de la Bag 501 y finalmente, en la imagen Bag 687 la porosidad desciende en las capas turbias por debajo del nivel de las capas claras. Todas estas imágenes se podrían ver dentro de una misma muestra.

3.2 Zona superior de transición burbuja/clatrato (700–1000 m)

La zona de transición superficial (700–1000 m), está caracterizada por la aparición de clatratos a unos 700 m y por el aumento de general de la porosidad y del polvo atmosférico (Figura 8). Justamente abarca el periodo final del Último Máximo Glacial y llega hasta el Younger Dryas, al comienzo del Holoceno. En la gráfica podemos ver que aquí se dan las mayores diferencias entre las capas turbias y las capas claras. Además del aumento general de la porosidad se puede diferenciar la evolución de las bandas turbias (CB) y las bandas claras (CI) por la mayor suavidad de su curva –perfil rojo. A una profundidad aproximada de 1000 m se alcanzan los picos máximos de polvo atmosférico y porosidad. Los fuertes descensos de la concentración de burbujas en las capas turbias coinciden con los picos de concentración de polvo atmosférico.

La muestra Bag 707 (Figura 9) se puede considerar muy cercana al final del último periodo glacial y comienzo del Holoceno. La presión a que se encuentran todas estas muestras es suficiente para que comiencen a formarse clatratos. Pero la porosidad no disminuye de forma homogénea. Podemos suponer que la resistencia a la compresión del hielo es el factor diferenciador. En conjunto las capas CI

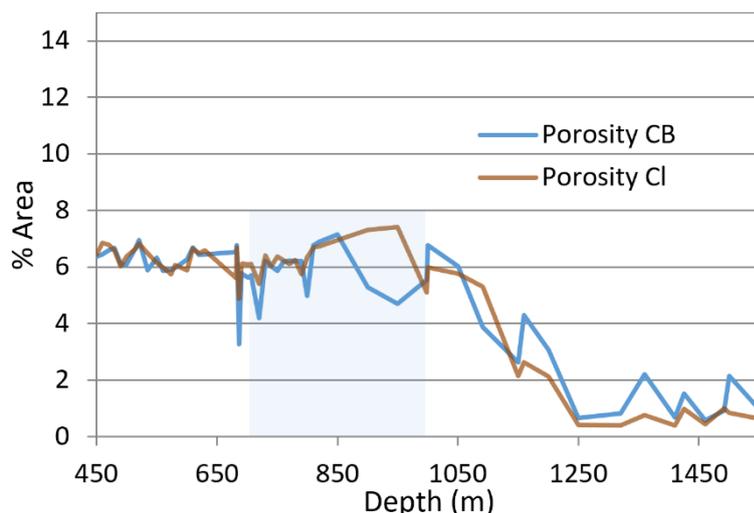


Figura 8: Zona de transición superficial (700–1000 m).

parecen tener mayor estabilidad que las CB. En este intervalo aparecen las primeras capas muy próximas a ser consideradas “libres de burbujas” y se hacen mayores las diferencias de porosidad entre CB y CI. Nótese que en la muestra Bag 1000 casi todo el perfil de intensidad de gris aumenta cuando aumenta la turbidez del hielo, que es lo que esperaríamos en un hielo no sometido a presión.

3.3 Zona de bubble-free bands (1000–1250 m)

En la última y más profunda zona de la región de transición a clatrato, el descenso de la concentración de burbujas es mucho más rápido (Figura 10). No obstante, siguen apareciendo variaciones en la porosidad del hielo, coincidiendo con variaciones de la concentración de polvo eólico. La característica diferenciadora de esta región es la presencia de capas sin burbujas que surgen de forma independiente e impredecible. De estas capas prácticamente no sabemos nada, aunque han sido descritas por bastantes autores. Este fenómeno de las capas sin burbujas parece tener su origen en las impurezas eólicas, ya

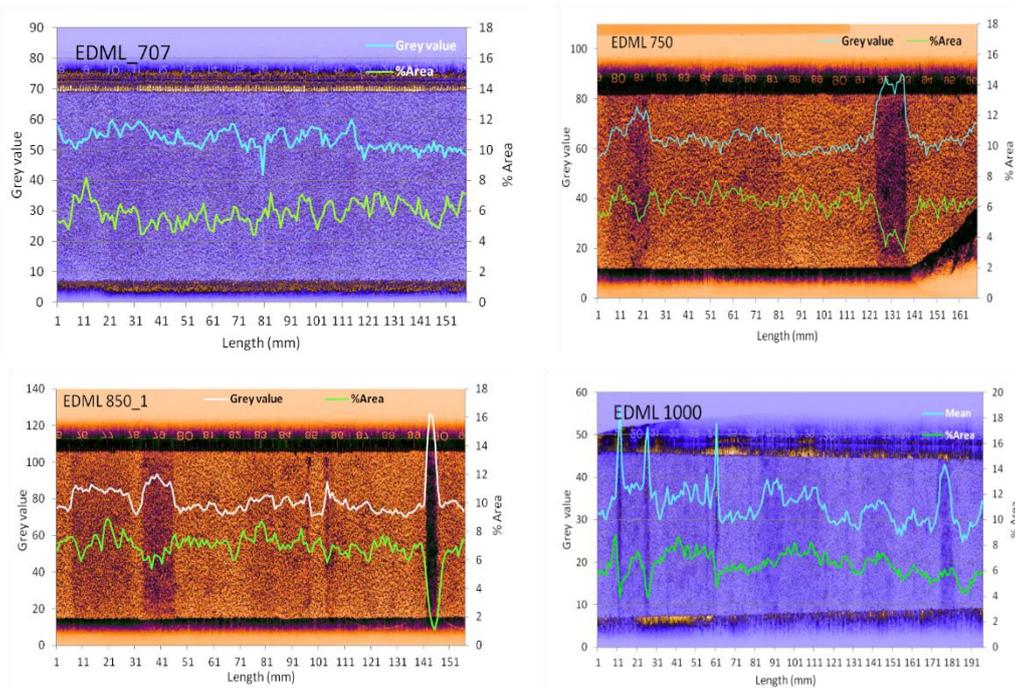


Figura 9: Muestras Bags 707, 750, 850 y 1000.

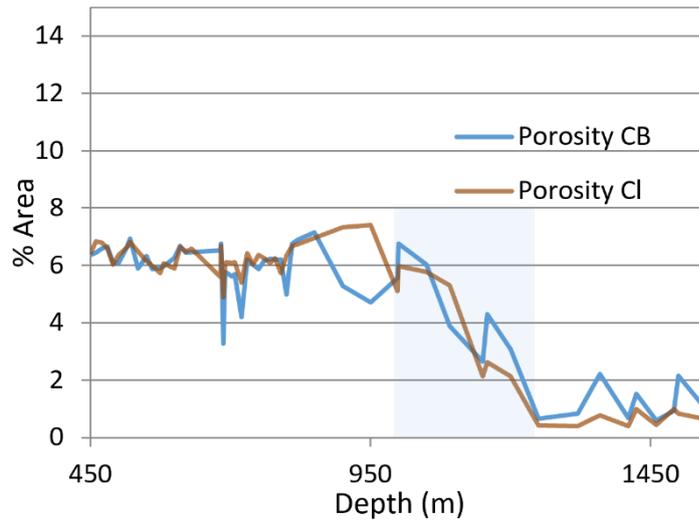


Figura 10: Última y más profunda zona de la región de transición a clatrato. Región de capas sin burbujas. que su frecuencia parece ligada a picos de impurezas. Al aumentar la concentración de polvo eólico también aumenta la diferencia de porosidad entre las CB y CI.

Una imagen bastante representativa del final de la región de transición burbuja/clatrato la tenemos en estas imágenes de la muestra Bag 1091 (Figura 11). En esta profundidad también se encuentran grandes contrastes en la porosidad del hielo. Es precisamente la región donde se produce el paso a clatratos de capas enteras, conocidas como “bubble free bands”. Como vemos en la Figura 10 en esta región también se produce el paso definitivo a mayor porosidad (2D) en las capas turbias (CB).

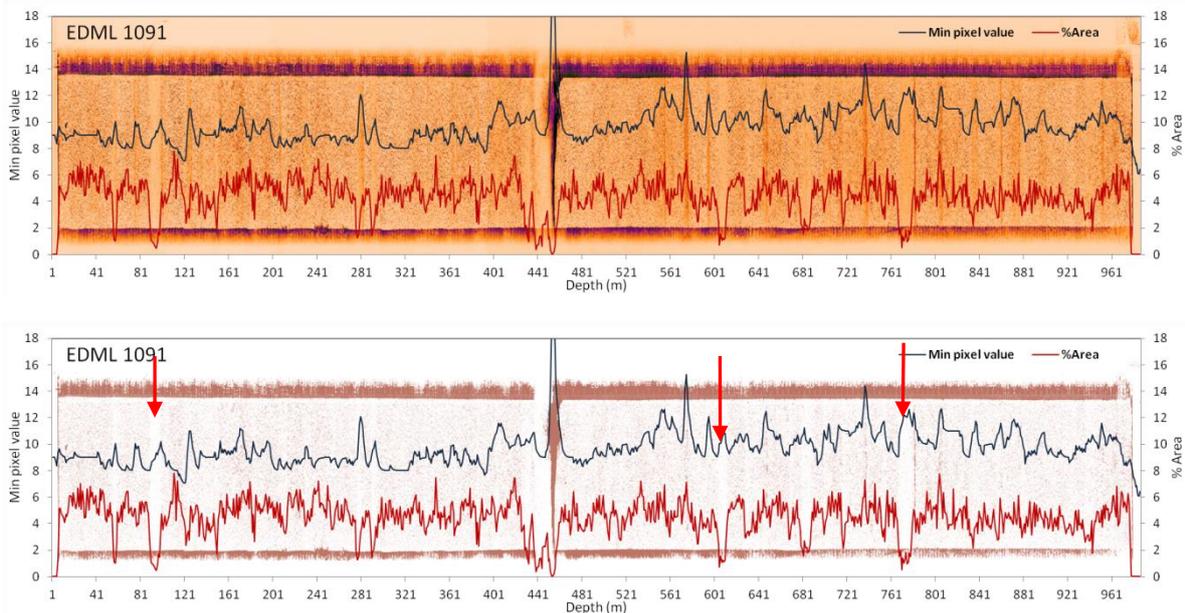


Figura 11: En la imagen podemos visualizar toda la longitud de la muestra y superpuestos los perfiles de intensidad de gris (“min pixel value”). Resulta difícil encontrar analogías entre las dos gráficas, ya que precisamente en esta zona la proporción de clatratos aumenta, mientras la de burbujas disminuye. Esta circunstancia parece distorsionar el valor medio de intensidad de gris y se hace necesario utilizar el parámetro de “Mínimo valor de pixel” para estimar la turbidez. En la muestra vemos varias capas sin burbujas, que aparecen como bandas blancas que destacan sobre sus vecinas, señaladas por flechas rojas. Las capas sin burbujas fueron identificadas por varios autores (Faria et al., 2010; Lüthi et al., 2010) y parecen originadas por el efecto catalizador de algunas impurezas.

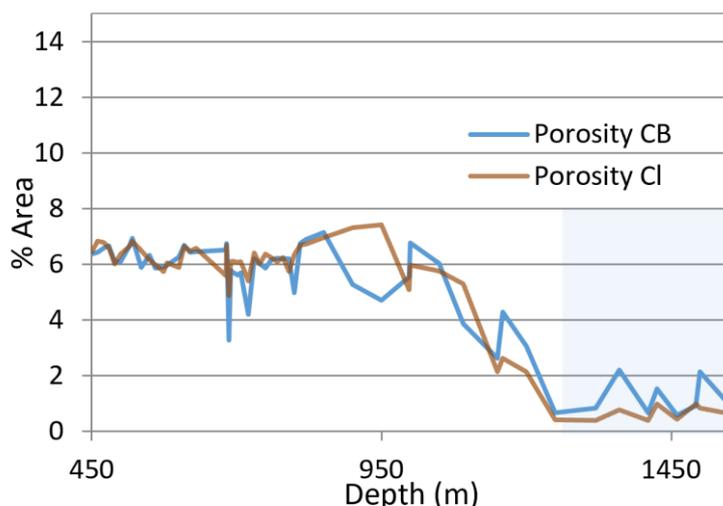


Figura 12: Región superficial de hielo sin burbujas. La característica de esta zona es que el hielo ya no se comprime por efecto de la presión, que ahora es totalmente sólido. Sin embargo, se siguen viendo white dots. Estos white dots son distintos tipos de clatrato y por tanto provenientes de las burbujas. Están formados por la asociación de varios más pequeños y alcanzan tamaños visibles, incluso mayores que las burbujas.

3.4 Zona de solo clatratos (1250–2774 m)

Para terminar, hemos seleccionado dos muestras representativas del final de la región de burbujas (Figuras 12 y 13). La muestra Bag 1159 da una idea del aspecto del hielo en la región de *bubble-free bands* y la Bag 1250 del hielo sin burbujas. La muestra de la izquierda (Bag 1159) presenta una banda sin burbujas, en este caso una banda clara. A esta profundidad la concentración de burbujas es muy pequeña y las pocas que quedan van transformándose en clatratos a medida que llegan a la profundidad de presión/temperatura crítica. En la muestra Bag 1250 ya no habrá ninguna burbuja, salvo quizá las figuras y huecos de relajación descritos por Gow (1971). Sin embargo, sigue habiendo “white dots”, como muestra el perfil de porosidad de la imagen. Estos white dots estarán formados por agregados de varios clatratos de menor tamaño, tal como encontró Kipfstuhl et al. (2001). Aunque los white dots coinciden con los picos de intensidad, podemos ver otros picos que resaltan, sobre todo en las bandas claras. Estos podrían ser cristales o clatratos originados por otras impurezas químicas (sales, gotas líquidas, etc.) quizá no tan visibles en la imagen digital como el polvo eólico. Aun así, existe una buena correlación entre la intensidad de gris y la porosidad 2D (0,65–0,95), dependiendo de la concentración de impurezas.

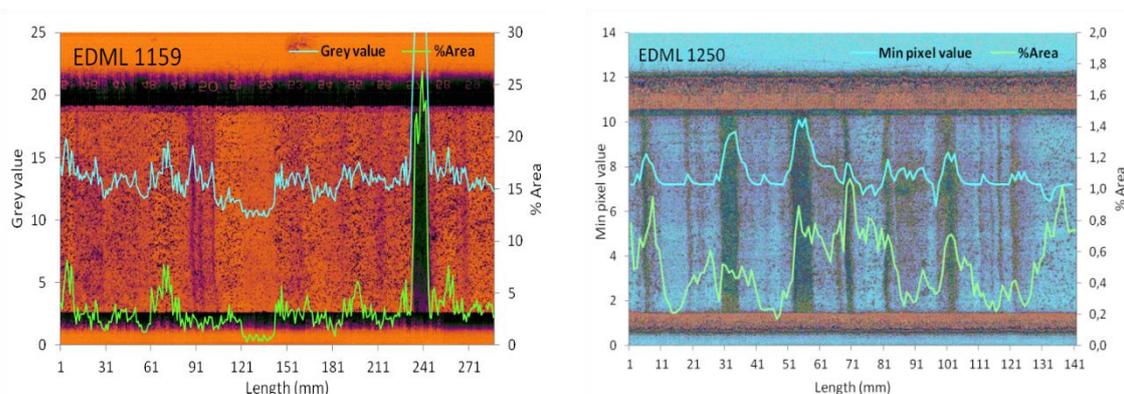


Figura 13: Gráfica de porosidad e imágenes del final de la región de transición burbuja/clatrato,

Ahora que hemos realizado un recorrido por el cambiante hielo poroso podemos fijarnos de nuevo en la Figura 8, y comprobar que el área proyectada de los white dots (la porosidad 2D) vuelve a ser definitivamente mayor en las capas turbias que en las capas claras. Si ahora revisamos la gráfica de concentración de white dots (2D porosity), veremos que en la región sin burbujas se mantiene la correlación entre la intensidad de gris y la porosidad 2D (entre 65 % y 95 % dependiendo de la concentración de polvo atmosférico).

4. Conclusiones

Este estudio ha sido realizado en gran medida de forma manual, de forma que hemos explorado las muestras tomando datos directos o aplicando distintas macros para cada parámetro. Esto supone la posibilidad de introducir errores distintos del error instrumental. Por eso nos hemos asegurado de que el error en la toma manual de medidas no supere el 5 % (ha sido del orden de ≤ 3 %), para lo cual solo hemos tenido en cuenta muestras suficientemente bien definidas.

Como el parámetro virtualmente insensible a la presión hidrostática es la turbidez, hemos realizado los análisis mediante dos variantes de intensidad de grises; media aritmética y mínimo valor de pixel.

La conclusión principal de este trabajo es que se puede verificar una continuidad en la evolución de las burbujas a clatratos, a través de la turbidez de las imágenes digitales.

Por otro lado, las burbujas disminuyen de tamaño a medida que aumenta la presión hidrostática. Esta disminución parece ser más rápida y darse de forma más intensa, en las capas turbias (CB) que en las capas claras (CI). Las burbujas de las capas turbias son las que antes pasarán a clatrato. Además, en el hielo sin burbujas, las capas turbias presentarán mayor concentración de clatratos. Sobre este patrón general, en el hielo con burbujas se pueden ver numerosas desviaciones, aparentemente no causadas por el único efecto de la presión.

Finalmente, los white dots en la región de hielo sin burbujas (clatratos), están ubicados aproximadamente en los mismos lugares donde se encontrarían las burbujas y en una concentración significativamente proporcional a la que debieron tener.

Referencias

- Bendel, V., Ueltzhöffer, K., Freitag, J., Kipfstuhl, S., Kuhs, W., Garbe, C., Faria, S.H. (2013) High-resolution variations in size, number and arrangement of air bubbles in the EPICA DML (Antarctica) ice core. *J. Glaciol.* 59(217): 972–980. doi: 10.3189/2013JoG12J24.
- Dahl-Jensen, D., Gundestrup, N., Miller, H., Watanabe, O., Johnsen, S., Steffensen, J., Clausen, H.B., Svensson, A., Larsen, L. (2002) The NorthGRIP deep drilling programme. *Ann. Glaciol.* 35: 1–4. doi:10.3189/172756402781817275
- Faria, S.H.; Kipfstuhl, S.; Lambrecht, A. (2018) *The EPICA-DML Deep Ice Core. A Visual Stratigraphy Record.* Springer: Heidelberg.
- Faria, S.H., Weikusat, I., Azuma, N. 2014a. The microstructure of polar ice. Part I: highlights from ice core research. *J. Struct. Geol.* 61: 2–20.
- Faria, S. H., Weikusat, I., Azuma, N. 2014b. The microstructure of polar ice. Part II: state of the art. *J. Struct. Geol.* 61: 21–49.

- Faria, S.H., Freitag, J., Kipfstuhl, S. (2010) Polar ice structure and the integrity of ice-core paleoclimate records. *Quat. Sci. Rev.* 29: 338–351.
- Ferreira, T., Rasband, W. (2012) ImageJ User Guide-IJ1.46r. <http://imagej.nih.gov/ij/docs/guide>
- Gow, A.J., Williamson, T. (1976) Rheological implications of the internal structure and crystal fabrics of the West Antarctic ice sheet as revealed by deep core drilling at Byrd Station. *Geol. Soc. Am. Bull.* 87: 1665–1677.
- Gow, A.J. (1971) Relaxation of Ice in Deep Drill Cores from Antarctica. *J. Geophys. Res.* 76(11): 2533–2541.
- Gow, A.J. (1968) Deep core studies of the accumulation and densification of snow at Byrd Station and Little America V, Antarctica. CRREL Research Report 197, 1–45.
- Hogan, A., Riley, D., Murphey, B.B., Barnard, S.C., Samson, J.A. (1993) Variation in Aerosol Concentration Associated with a Polar Climatic Iteration. In *Antarctic Meteorology and Climatology: Studies Based on Automatic Weather Stations* (eds D.H. Bromwich and C.R. Stearns). Antarctic Research Series 61: 175–199.
- Hörhold, M.W., Laepple, T., Freitag, J., Bigler, M., Fischer, H., Kipfstuhl, S. (2012) On the impact of impurities on the densification of polar firn. *Earth Planet. Sci. Lett.* 325–326: 93–99.
- Kipfstuhl, S., Hamann, I., Lambrecht, A., Freitag, J., Faria, S.H., Grigoriev, D., Azuma, N. (2006) Microstructure mapping: a new method for imaging deformation-induced microstructural features of ice on the grain scale. *J. Glaciol.* 52(178): 398–406.
- Kipfstuhl, S., Pauer, F., Kuhs, W., Shoji, H. (2001) Air bubbles and clathrate hydrates in the transition zone of the NGRIP Deep Ice Core. *Geophys. Res. Lett.* 28: 591–594.
- Lüthi D. and 10 others (2010) CO₂ and O₂/N₂ variations in and just below the bubble–clathrate transformation zone of Antarctic ice cores. *Earth Planet. Sci. Lett.* 297(1–2): 226–233. doi: 10.1016/j.epsl.2010.06.023.
- Ridler, T.W., Calvard, S. (1978) Picture thresholding using an iterative selection method. *EEE Trans. Syst. Man Cybern.: Syst.* 8: 630–632.
- Sheridan, P.; Andrews, E; Schmeisser, L; Vasel, B; Ogren, J. (2016) Aerosol measurements at South Pole: climatology and impact of local contamination. *Aerosol Air Qual. Res.* 16: 855–872.
- Svensson, A., Nielsen, S.W., Kipfstuhl, S., Johnsen, S.J., Steffensen, J.P., Bigler, M., Ruth, U., Röthlisberger, R. (2005) Visual stratigraphy of the North Greenland Ice Core Project (NorthGRIP) ice core during the last glacial period. *J. Geophys. Res.* 110: D02108, doi: 10.1029/2004JD005134.
- Takata, M., Iizuka, Y., Hondoh, T., Fujita, S., Fujii, Y., Shoji, H. (2004) Stratigraphic analysis of Dome Fuji Antarctic ice core using an optical scanner. *Ann. Glaciol.* 39: 467–472.
- Ueltzhöffer, K., Bendel, V., Freitag, J., Kipfstuhl, S., Wagenbach, D., Faria, S.H., Garbe, C.S. (2010) Distribution of air bubbles in the EDML and EDC (Antarctica) ice cores, using a new method of automatic image analysis; *J. Glaciol.* 56(196): 339–348.
- Winstrup, M. (2011) An Automated Method for Annual Layer Counting in Ice Cores and an application to visual stratigraphy data from the NGRIP ice core. PhD Thesis. Faculty of Science University of Copenhagen.
- Zwally, H.J., Jun, L. (2002) Seasonal and interannual variations of firn densification and ice-sheet surface elevation at the Greenland Summit. *J. Glaciol.* 48(161): 199–207.

BC3 WORKING PAPER SERIES

Basque Centre for Climate Change (BC3), Leioa, Spain

The BC3 Working Paper Series is available on the internet at the following addresses:

http://www.bc3research.org/lits_publications.html

<http://ideas.repec.org/s/bcc/wpaper.html>

BC3 Working Papers recently available:

- 2016-02 Mikel González-Eguino, Iñigo Capellán-Pérez, Iñaki Arto, Alberto Ansuategi and Anil Markandya: *Industrial and terrestrial carbon leakage under climate policy fragmentation.*
- 2016-03 Anil Markandya, Kishore Dhavala and Allesandro Palma: *The role of flexible biofuel policies in meeting biofuel mandates.*
- 2016-04 Stefano Balbi and Ferdinando Villa: *Beyond ecosystem services: a food security perspective.*
- 2016-05 María Victoria Román, Iñaki Arto and Alberto Ansuategi: *The geographic distribution of the economic impact of climate finance.*
- 2017-01 Marta Olazabal, Ibon Galarraga, James Ford, Alexandra Lesnikowsky and Elisa Sainz de Murieta: *Towards successful adaptation: a check list for the development of climate change adaptation plans.*
- 2017-02 Itxaso Ruiz, Sérgio H. Faria and Marc B. Neumann: *Drivers of climate change opinion.*
- 2017-03 Stefano Balbi: *Traveling for happiness, moving to adapt: An agent-based perspective on population mobility.*
- 2017-04 Xaquín García-Muros, Christoph Böhringer and Mikel González-Eguino: *Cost-effectiveness and incidence of alternative mechanisms for financing renewables.*
- 2018-01 Ibon Galarraga, Josu Lucas and Steffen Kallbekken: *Consumer purchases of energy-efficient cars: behavioural implications for policy.*
- 2018-02 Federica Cappelli, Caterina Conigliani, Valeria Costantini, Ketil Lelo, Anil Markandya, Elena Paglialunga and Giorgia Sforna: *Climate Change and Armed Conflicts African Observatory (CACAO): a georeferenced map of Africa.*
- 2019-01 Elena Galán del Castillo: *Revisión sistemática de los efectos del paso a un ordeño al día en pequeños rumiantes.*
- 2020-01 María del Mar Solà, Amaia de Ayala and Ibon Galarraga: *The effect of providing monetary information on energy savings for household appliances: a field trial in Spain.*
- 2020-02 Ambika Markanday, Steffen Kallbekken and Ibon Galarraga: *Impact framing and experience for determining acceptable levels of climate change risk: A lab experiment.*
- 2021-01 João Pompeu, Itxaso Ruiz, Antonio Ruano, Hugo Bendini and María José Sanz: *Land use and land cover databases for Mediterranean landscape analysis at the watershed scale.*
- 2021-02 Gonzalo Morcillo and Sérgio Henrique Faria: *Procesos visibles de la transición del hielo superficial con burbujas a hielo profundo con clatratos en el testigo EDML de Antártida.*