

Expedición Groenlandia 2009 (I). Su geología¹

Groenlandia es la mayor isla del mundo y posee una población de 57.000 habitantes, con índices de desarrollo altos. Su capital, Nuuk, cuenta con 16.000 habitantes. Durante la expedición, las poblaciones visitadas más importantes fueron Qaortoq (3.000 habitantes) y Narsaq (1.700 habitantes). Políticamente, Groenlandia dependía de Dinamarca hasta junio de 2009, momento en el que se aprobó en referéndum un nuevo estatuto que le confiere el derecho de autodeterminación. La jefa de Estado continúa siendo la reina Margarita, aunque el nuevo estatuto otorga, entre otros derechos, un control autónomo de los yacimientos petrolíferos. Hasta el momento, los recursos económicos de la isla provienen de la pesca y de la subvención anual otorgada por el Gobierno danés, equivalente al 30% del PIB.

TEXTO | Domingo de Guzmán Fuente Puente, geólogo (guzmanf1488@icog.es); Carlos J. de Miguel Ximénez de Embún, geólogo (carlosj.demiguel@gmail.com); José Manuel García Aguilar, doctor en Ciencias Geológicas (chemacyanos@msn.com)

Palabras clave
Groenlandia, viajes, expedición

FOTOGRAFÍAS | Guzmán Fuente: 10; Carlos de Miguel: 1, 2, 4, 5, 6, 7, 8, 9 y 13; José Manuel García Aguilar: 12, 19, 20; María del Carmen Salcedo de Lara: 21, 22; Agustina Cabrera: 11

El proyecto de expedición a Groenlandia surge en noviembre de 2008 entre un grupo compuesto en su mayoría por profesores y geólogos, con el fin de combinar actividades de contenido naturalista y observaciones geológicas en un escenario de máximo interés y atractivo a escala mundial. Se aventuraban visiones espectaculares sobre disciplinas geológicas tan variadas como petrología, tectónica, mineralogía y geomorfología, así como la observación de glaciares, fiordos, *inlandsis*, playas y lagos, entre otros muchos paisajes naturales. Además, teníamos el aliciente añadido

de visitar el que probablemente sea el mejor laboratorio natural para el estudio del cambio climático global y sus consecuencias a nivel ecológico y geológico.

Para llevar a cabo la organización logística de la expedición se contactó con una agencia especializada, realizando finalmente el viaje entre el 6 y el 22 de julio de 2009, con un grupo de 25 personas. Una vez llegados a Narsarsuaq, tras un recorrido previo Madrid-Londres-Reykjavik, comprobamos que las comunicaciones internas en la zona se efectúan de modo exclusivo mediante

embarcaciones, aviones o helicópteros. En nuestro caso, lo hacíamos mediante zódiac dotadas de dos motores de 125 caballos de potencia y con capacidad para 15 personas. Las actividades realizadas se centraron en rutas senderistas con diversas paradas para llevar a cabo observaciones geológicas, visitas a los museos y ruinas vikingas existentes y una visita a una granja de experimentación agrícola. Aunque nuestro alojamiento se efectuó exclusivamente en albergues y campamentos (*figuras 1 y 2*), la región visitada (*figura 3*) cuenta con hoteles, *lodges*, campamentos y albergues.



Figuras 1 y 2. Campamento "fletanes", utilizado durante varios días como base de la expedición (izquierda), y albergue de Qassiarsuk (derecha), nuestro primer alojamiento en Groenlandia.

1. La segunda parte de este artículo, la descripción de los puntos de interés geológico visitados, se publicará en el próximo número de la revista.

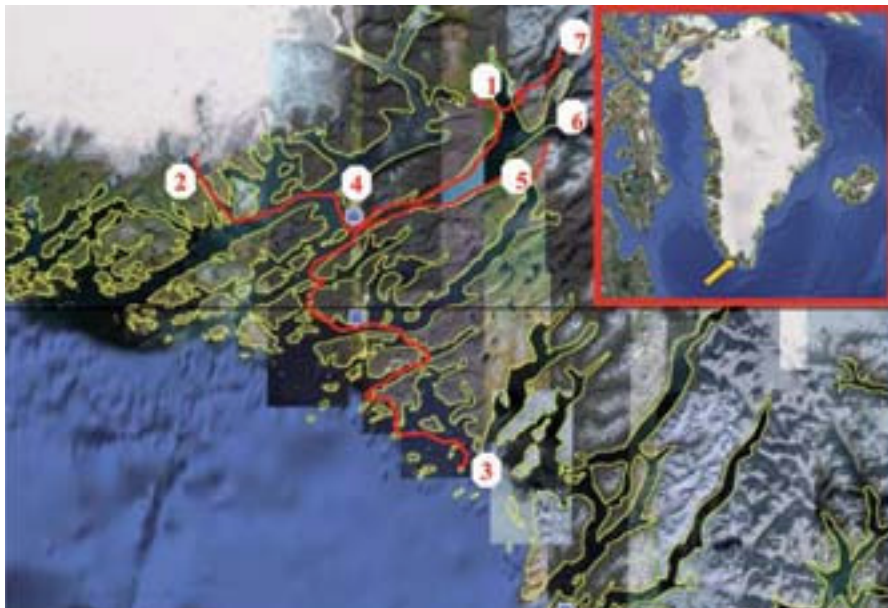


Figura 3. Google Earth: mapa general de situación (gráfico superior derecha), donde la flecha señala la zona visitada y el recorrido general de la expedición. Trazado en líneas rojas (gráfico inferior): la escala gráfica representa 50 km y los cuadrados azules marcan la posición de las localidades de Narsaq (cuadrado superior) y Qaqortoq (cuadrado inferior). La numeración corresponde a la de los PIG que se indicarán en la segunda parte del artículo a publicar en el número siguiente.



Figuras 4 y 5. Granja de Upernaviarsuk (izquierda) y la ciudad de Qaqortoq (derecha).

El recorrido

Nuestra expedición se ha desarrollado en una pequeña zona de Groenlandia, situada al suroeste (figura 3). El vuelo que nos condujo desde Reykjavik aterrizó en Narsarsuaq, cuyo aeropuerto recibe dos vuelos semanales provenientes de Islandia. La primera sensación vivida en este aeropuerto fue el intenso viento existente, que nos impidió llegar hasta el campamento de Qalerallit (que significa "fletanes" en español). Entrada la tarde, logramos cruzar el fiordo que nos separaba de Leif Eriksson Hostel, un albergue de nuestro turoperador que se utiliza como base en la población de Qassiarsuk.

La ruta seguida nos llevó desde Narsarsuaq a Qassiarsuk y Tasiusaq para continuar, vía Narsaq, hasta el campamento de "fletanes", un lugar

emblemático junto al fiordo Qalerallit, y el *inlandsis* central de Groenlandia con sus lenguas glaciares exteriores. De allí continuamos hasta la granja de Upernaviarsuk (figura 4) y el campamento de la isla de Uunartoq, famosa por su laguna de aguas termales, única en Groenlandia.

Desde Uunartoq proseguimos hasta la ciudad de Qaqortoq (figura 5) y, posteriormente, a Narsaq (figura 6), donde visitamos el importante yacimiento de uranio de Kvanefjeld. Tras esta visita volvimos al campamento de "fletanes", ya que la banquisa proveniente del Ártico nos impidió acceder a la zona sur de la isla (Nanortalik). Desde "fletanes" nos dirigimos de nuevo a Narsaq, terminando los días de expedición en las localidades de Igaliku, desde donde efectuamos un recorrido hasta el glaciar Qooqqup

El vuelo que nos condujo desde Reykjavik aterrizó en Narsarsuaq, cuyo aeropuerto recibe dos vuelos semanales provenientes de Islandia

(figura 7) y el fiordo Qooroq, y Qassiarsuk, donde llevamos a cabo una ruta por el valle de las Mil Flores (figura 8) hasta un mirador sobre el glaciar Kiattuut (figura 9).

A través de las imágenes fotográficas se puede intuir la espectacularidad de la naturaleza presente en Groenlandia, ésa a la que queremos dominar y a la que maltratamos con nuestros abusos. Será tarea de todos plantearnos si queremos seguir disfrutando de ella en toda su grandiosidad y belleza.

Los traslados

Como ya se ha comentado, los traslados entre poblaciones o entre campamentos de los 25 miembros que formábamos la expedición se realizaban en dos zódiac (figura 10). El abordaje de las zódiac se convertía en un auténtico ritual. Íbamos provistos de todas las capas de ropa que disponíamos (figura 11): camiseta térmica, forro polar fino, forro polar grueso, chaquetón de Gore-Tex, parca para el cuerpo, mallas, pantalón e impermeable para las piernas, gorro, *buff* y capucha para la cabeza. A esta indumentaria había que añadir el chaleco salvavidas. Nuestro equipaje, bien ordenado en un petate negro de 90 litros de capacidad, se situaba en el centro de la barca, mientras que nosotros nos ubicábamos sentados en los laterales.

La velocidad de las zódiac, unida al viento, nos golpeaba impidiendo ver poco más que la cara tapada del compañero de enfrente. Otras veces, cuando el viento viajaba a nuestro favor, la sensación de frío era nula y se disfrutaba sobremanera de la



Figuras 8. Valle de las Mil Flores.

Frecuentemente, aparecen publicados artículos sobre Groenlandia como ejemplo del retroceso y el deshielo de los glaciares, para alertar sobre el cambio climático global y sus efectos



Figuras 6 y 7. Imagen de la localidad de Narsaq (arriba) y del glaciar Qooqqup (abajo).

aparecía como un espejo y el sol brillaba de manera especial. Pasamos calor, hasta buscábamos la sombra en ocasiones, caminábamos en camiseta de manga corta y, al final, acabamos con nuestra piel tan bronceada como si hubiésemos estado en una playa tropical. En este sentido, tuvimos mucha suerte, ya que desde el tercer día de la expedición todos amanecieron despejados (aquí el concepto de orto es relativo puesto que, de facto, gozábamos de 21 a 22 horas de luz al día) y con unas temperaturas medias de 14 a 17 °C, aunque en las horas centrales podíamos tener máximas de 20 a 25 °C. Para que quede constancia de este hecho, podemos comprobar en la *figura 12* un termómetro exterior en la ciudad de Qaortoq que registraba ¡31 °C!

El cambio climático a debate

Frecuentemente, aparecen publicados artículos sobre Groenlandia como ejemplo del retroceso y el deshielo de los glaciares, para alertar sobre el cambio climático global y sus efectos. En este sentido,

navegación y del paisaje de témpanos de hielo. En más de una ocasión, durante estos traslados, algunos con una duración superior a tres horas, la somnolencia era generalizada pero, ¡cualquiera se dormía corriendo el riesgo de caer al agua helada!

En una de las travesías se perdió de vista a la segunda zódiac. En el lugar de destino (Qaortoq) les esperábamos impacientes para cenar en el único restaurante existente, de estilo tailandés. Al final llegaron remolcados por la primera zódiac, tras estar parados y a la deriva en el fiordo cerca de una hora debido a un fallo en ambos motores. Durante la espera bebieron té, comieron chocolatinas y se lo tomaron con el mejor humor que pudieron.

Afortunadamente, el rescate fue un éxito y pudieron llegar a tiempo para degustar esa cena tan exótica en esas latitudes.

La sorpresa: el clima

A nuestra llegada, el viento nos impidió navegar y hubo que esperar horas para llevar a cabo una corta travesía para cruzar el fiordo Tunulliarfik, desde Narsarsuaq hasta Qassiarsaq, lugar donde se hallaba el albergue. Si estas condiciones —pensábamos— de navegación, con el agua salpicando la cara y las olas “meciendo” las zódiac, iban a ser habituales, aquello podría ser insufrible. Afortunadamente, esos presagios no se cumplieron, puesto que dos días después el agua del fiordo



Figura 9. Glaciar Kiattuut.



Figura 10. Zódiac utilizada habitualmente en nuestros desplazamientos durante la expedición.



Figura 11. Indumentaria utilizada durante las travesías.

de acumulación, para estimar el balance de masas.

¡Silencio!

Desde Igaliku, siete de nuestros compañeros se fueron en zódiac para intentar acceder a la ciudad de Nanortalik, bloqueada por el hielo proveniente de la banquisa del norte. El resto del grupo comenzamos una ruta que nos sorprendería y nos entusiasmaría desde Igaliku hasta el fiordo Qooroq. Al comienzo bordeamos un lago y algunas dunas de arena, indicador de que esta zona debió de estar ocupada en el pasado por una playa. El camino continuó con una fuerte subida, sobrepasando lomas, una tras otra, en busca de un mirador que nunca llegaba. Buscábamos una vista panorámica del fiordo Qooroq y el glaciar Qooquup, pero no podíamos imaginarnos lo que íbamos a contemplar. Desde una perspectiva envidiable vimos el *inlandsis* al fondo, el frente del glaciar y los témpanos que se desprendían para invadir el fiordo en una banquisa única. José Luis, uno de nuestros compañeros, gritó de repente algo que seguro muchos estábamos pensando, ¡silencio! Silencio para contemplar tanta belleza, para escuchar el sonido del silencio y el sonido del glaciar sin nuestros parloteos, para sentir con mayor intensidad ese momento. Con esta panorámica nos sentamos al borde y comimos nuestro *picnic* diario. Debíamos volver, era la hora, pero inconscientemente intentamos dilatar ese momento. Queríamos retener en nuestra mente durante todo el tiempo posible semejante postal. Posteriormente, embarcamos en las zódiac para nuestro traslado a Qassiarsuk. En el trayecto nos adentramos entre los témpanos de hielo del fiordo Qooroq, desprendidos por el glaciar; paramos la zódiac y brindamos con

nosotros no desperdiciamos la oportunidad que nos brindaba nuestra estancia en Groenlandia para dedicar una tarde en el campamento "fletanes" a discutir sobre este apasionante tema. Estos datos siempre hay que tomarlos con la debida precaución y atendiendo a los estudios sobre cambios climáticos cíclicos producidos en la Tierra a distintas escalas de tiempo. Estos cambios son debidos a diversos factores con una complejidad mayor de la que nos hacen ver diariamente. En una de las visitas realizadas en la expedición pudimos comprobar la importancia del clima para algo muy difícil en Groenlandia: cultivar. La granja de Upernaviarsuk es un centro experimental en el que se investigan

nuevos modos de cultivar mediante invernaderos. El periodo de producción de cultivos en este lugar es de sólo dos meses a causa de las extremas temperaturas invernales. En 15 años, nos comentaron que la temperatura había subido dos grados. Para ellos cualquier subida de temperatura sólo les reportaría beneficios. Es cierto que con las observaciones realizadas en dos o tres años consecutivos se puede ver que efectivamente los glaciares han retrocedido (figuras 13 y 14). Los glaciares sufren variaciones volumétricas con una periodicidad muy corta y éstas se detectan fácilmente. Sería necesario comprobar en este sentido el retroceso en los glaciares costeros con la cantidad de hielo en el interior, en su zona

una bebida cubierta de un hielo de miles de años de antigüedad.

Los mosquitos

Nunca pensamos que la recomendación de llevar una mosquitera para la cabeza fuese tan en serio. Los mosquitos hacían acto de presencia en cuanto el viento estaba en calma, haciendo insoportable caminar tranquilamente. Más de uno se comió alguno por no llevar la boca cerrada.

Paisajes increíbles

Una de las actividades más espectaculares realizadas fue sin duda la contemplación de paisajes, como aquella vez que, desde la ciudad de Narsaq, subimos la gran mole granítica situada detrás de la población. Fue una subida exigente y con una gran pendiente, a la que bautizamos como "subida vertical". Una vez en la cima pudimos obtener el trofeo: la vista de los fiordos inundados de témpanos y la población de Narsaq a nuestros pies, bañada por el sol del atardecer. En nuestro regreso al campamento "fletanes" nos sorprendió un atardecer que quedará grabado. El sol se escondía detrás de los dos brazos del glaciar Qalerallit. Las instantáneas desde el campamento se sucedían para intentar plasmar en una foto la luz del atardecer, las sombras de las montañas y la silueta de la playa. Aunque lo que una foto nunca podrá captar son las sensaciones personales que se tienen ante esas imágenes. La intensidad y los colores de la luz del atardecer hacían de su visión un regalo.

Un poco de historia

En el año 986, un grupo de islandeses se establecieron en Groenlandia, que significa "país verde". Era el nombre elegido por Erik el Rojo, jefe de la colonia, que había explorado la zona unos años antes, tras ser expulsado de Islandia por homicidio. Se sospecha que el nombre era deliberadamente optimista para animar a sus seguidores a establecerse allí. En aquella época, Groenlandia estaba habitada por la cultura dorset, caracterizada por una tecnología primitiva. Por entonces la cultura inuit (esquimal) se



Figuras 12 y 13. Registro de 31 °C en la localidad de Qaortoq (arriba) y posibles efectos del calentamiento global traducidos en la fusión acelerada de glaciares (abajo).

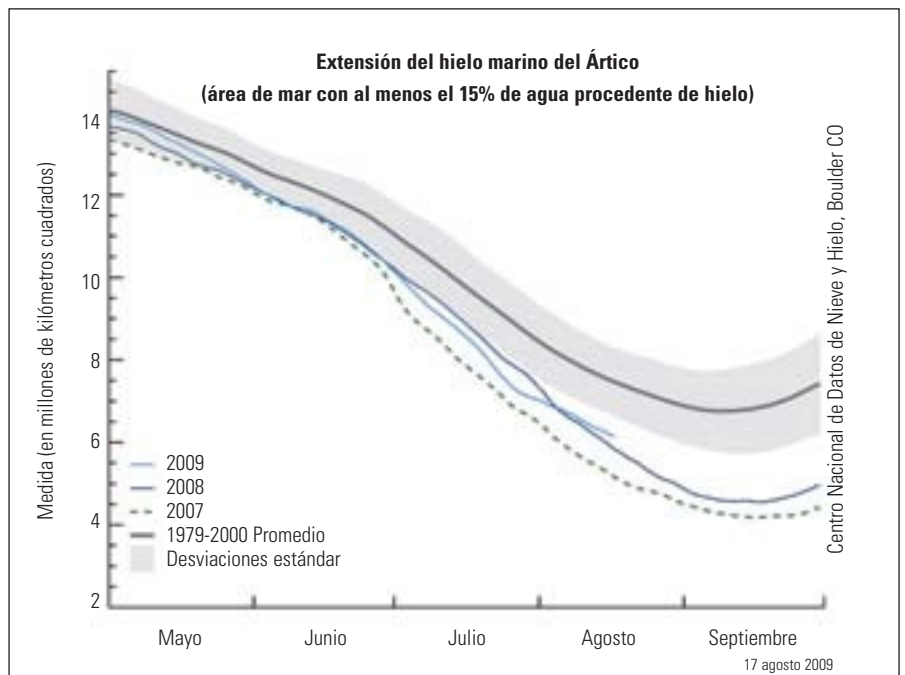


Figura 14. La cantidad de hielo en agosto de 2009 del Ártico se sitúa por encima del mismo periodo de 2007, aunque por debajo de la media en el periodo 1979-2000. Fuente: NSIDC (National Snow and Ice Data Center).



Figura 15. Mapa general de Groenlandia, donde se aprecian las zonas libres de hielo a modo de anillo exterior. El sector visitado en la expedición se halla en torno a la localidad de Qaqortoq, al SO de la isla (<http://www.clim-atic.org/images/greenland/greenland%20map.jpg>).

estaba desarrollando en lo que ahora es Canadá y no llegarían a Groenlandia hasta un siglo más tarde. Su tecnología era muy superior, sobre todo en lo referente a la indumentaria adaptada al frío y sus artes

para cazar ballenas y focas a través del hielo. Fueron los primeros en tener trineos con perros, kayaks impermeables y arpones especializados. Cuando llegaron a Groenlandia, los vikingos eran paganos,



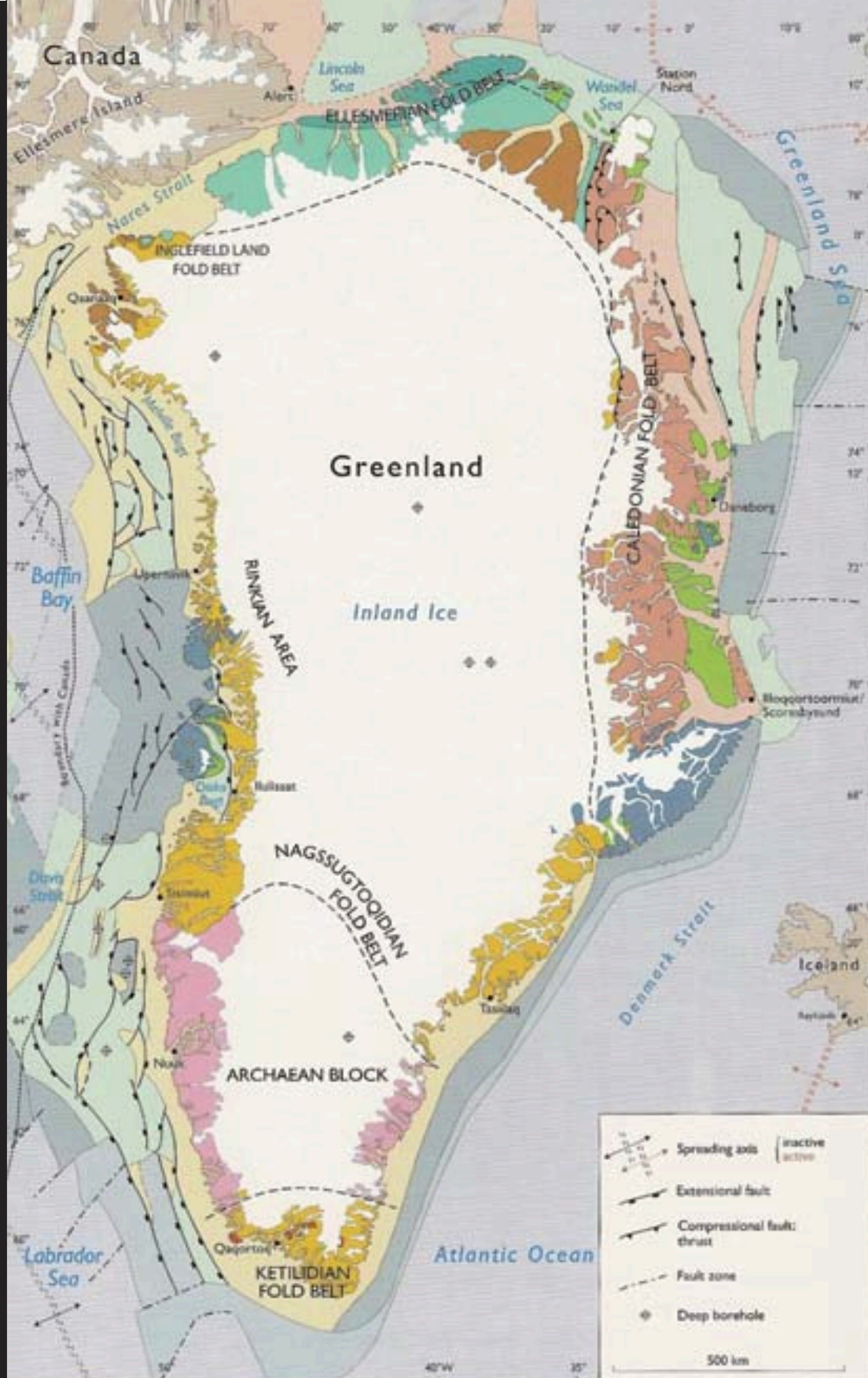
Figura 16. Mapa de contexto de Groenlandia (derecha) a escala mundial. El sector visitado aparece señalado con un círculo (<http://img2.allposters.com/images/PYREU/GPP304033.jpg>).

aunque Leif, hijo de Erik el Rojo, proclamó oficialmente el cristianismo en parte por motivos prácticos: los escandinavos convertidos no podían comerciar con paganos. Desde entonces, se construirían iglesias y se pagarían diezmos a la lejana Roma. La población escandinava en Groenlandia, de carácter medieval, llegó a alcanzar unos 5.000 habitantes en 50 granjas repartidas en dos asentamientos alejados entre sí. Estos pobladores valoraban sobre todo su ganado, basado en ovejas y vacas, como medio de subsistencia, aunque con el tiempo pasaron a depender para su sustento de la caza hasta su desaparición en el siglo XV por causas socioeconómicas y ambientales aún no establecidas en detalle.

Contexto geológico de Groenlandia

Generalidades

Groenlandia constituye la mayor isla del mundo, con una extensión de 2,17 millones de km², de los cuales un 81% está cubierto de hielo (figuras 15 y 16). Su punto más elevado se halla al SE (Gunnbjorn Fjeld), con una altura de 3.693 m. El conjunto de la isla presenta una morfología de tipo triangular invertida con dimensiones medias de 2.675 km en sentido N-S y 1.250 km en sentido E-O, quedando las zonas libres de hielo en un anillo costero exterior con una anchura media de 100 km. El extremo sur de la isla corresponde al cabo Farvel, situado a 59° 40' de latitud norte. Los paisajes dominantes son glaciares planos en su sector central (*inlandsis*) que llegan a superar los 3.400 m de espesor de hielo y se sitúan a una cota media de 2.100 m. Este *inlandsis* evoluciona



Younger volcanic areas	Younger fold belts	Sedimentary basins		Basement rocks
		Younger	Older	
Basalts and intrusions on land (40-50)	Ellesmerian (330)	Devonian-Permian on land (414-23)	Early Paleozoic (342-414)	Paleoproterozoic on land (2000-1750)
Basalts offshore (40-50)	Caledonian (430)	Offshore, Devonian-Permian (major basins) (400-0)	Proterozoic (1740-542)	Archaean on land (3800-2530)
Continental slope, largely unexplored	Offshore, often covered by younger sediments		Gander intrusions (1150-1120)	Undifferentiated offshore basement, often covered by sediments
Ocean-floor basalts (70-0)				

Ages given in million years (Ma)

Figura 17. Mapa geológico general con la distribución de grandes unidades geológicas, dominadas por materiales precámbricos y paleozoicos (modificado de Henriksen, 2008).

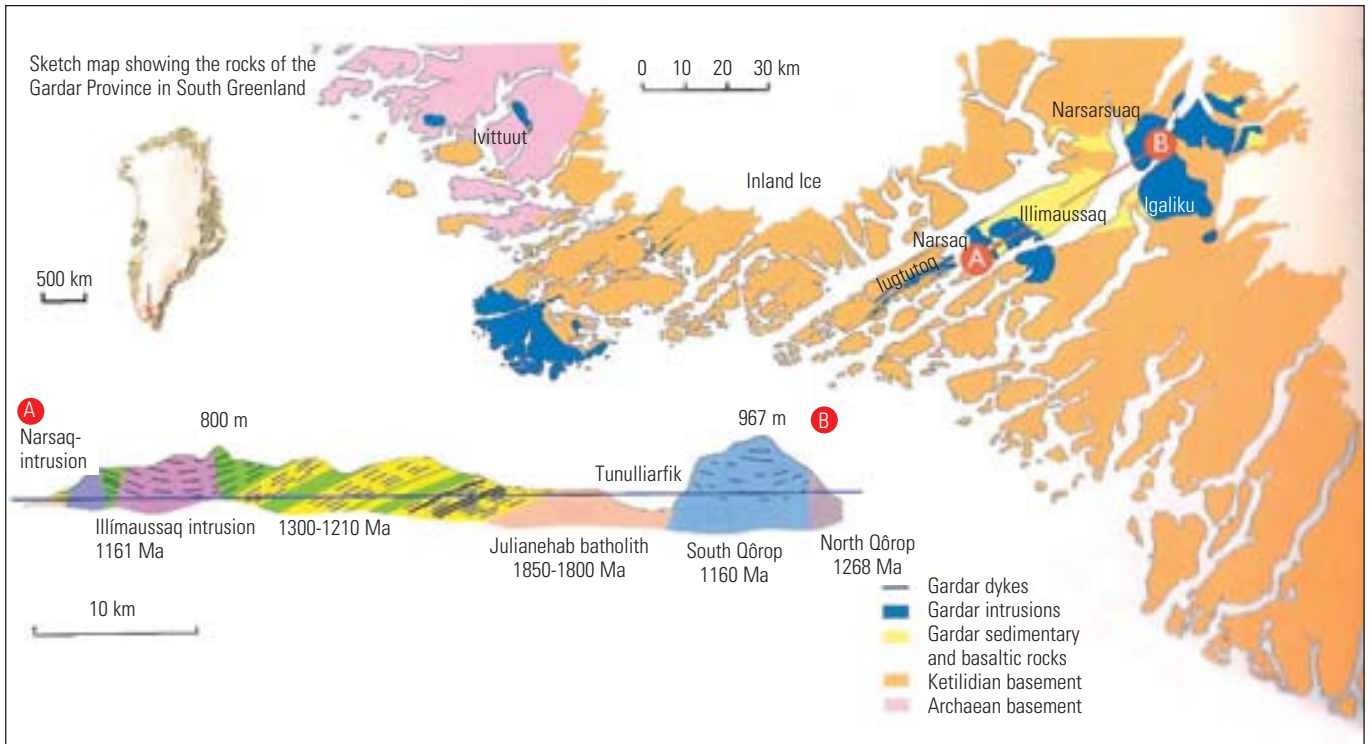


Figura 18. Mapa geológico del sector visitado en Groenlandia (modificado de Henriksen, 2008). Los colores marcan distintos tipos de materiales y unidades geológicas.

externamente hacia formas de valles glaciares de tipo alpino con perfiles en "U" que pueden conectar con el mar, dando lugar a fiordos. Otros rasgos característicos son los *horns* y *nunataks* (cimas rocosas rodeadas de un plano de hielo), islas e icebergs. La intensa erosión del hielo y las rocas que transporta (morrenas) talla un paisaje dramático de agujas, aristas rocosas, estrías horizontales (a veces de escala kilométrica), rocas pulidas, pilancones y oquedades de distinta escala que pueden desarrollar posteriormente lagos y lagunas. Los depósitos glaciares (tillitas) son comunes, así como los paisajes montañosos, cuyas cumbres desprovistas de hielo suelen tener cotas entre 800 y 2.500 m, bajo las cuales se desarrollan espectaculares glaciares. El clima de Groenlandia resulta muy variable tanto en el tiempo como en el espacio. La zona costera sur presenta temperaturas medias anuales en torno a 5 °C, con mínimas de -10 °C en diciembre-enero, máximas de 12-15 °C en julio-agosto y picos térmicos que pueden superar los 20 °C. La zona central, sin embargo, muestra temperaturas medias anuales de -10 °C y mínimas de -30 °C. En cuanto a las precipitaciones, suelen ser irregulares en el tiempo y el espacio,

La costa oeste está influenciada por la corriente polar de El Labrador, de procedencia norte, lo que explica la presencia de icebergs en latitudes más bajas que en otros lugares del océano Atlántico

siendo las máximas en la zona sur (unos 800 mm) con picos de 60 a 80 mm durante los meses de verano. En los últimos años resulta evidente una elevación general de las temperaturas, sobre todo en la época de verano, con incrementos de varios grados centígrados. Diversos testimonios recogidos durante esta expedición demuestran incrementos de 2-3 °C en los últimos 15 años. De modo directo, pudimos constatar durante nuestro viaje unas temperaturas medias de 14 a 17 °C, con mínimas de 7-8 °C y máximas por encima de 20 °C. Estos valores inducen

inevitablemente una fusión acelerada de los glaciares que generan intensas corrientes fluviales y extensas zonas de banquisa, fruto de la ruptura de dichos glaciares.

Desde el punto de vista oceanográfico, la costa oeste está influenciada por la corriente polar de El Labrador, de procedencia norte, lo que explica la presencia de icebergs en latitudes más bajas que en otros lugares del océano Atlántico. Este hecho causó el hundimiento del famoso buque *Titanic*, el 14 de abril de 1912. Cerca de la isla de Terranova, esta corriente fría de El Labrador colisiona con la corriente cálida del golfo de México.

Desde el punto de vista geológico, Groenlandia presenta un escenario único a escala mundial. Los lugares donde afloran rocas en superficie (anillo costero) han permitido a los geólogos reconocer formaciones rocosas y sucesos acontecidos en los últimos 3.800 millones de años (M.a.), desde las primeras campañas sistemáticas de exploración geológica, que tuvieron lugar a partir de 1954 a cargo de geólogos daneses (figura 17). Como accidentes geográficos más importantes destacan dos cadenas montañosas paralelas a la costa que se originaron



Figura 19. Ejemplo de terrenos pertenecientes al cinturón ketilídico: zona granítica de Qalerallit (campamento "fletanes"). Al fondo se puede apreciar el inlandsis central de Groenlandia.

en el Paleozoico inferior: una al NE (cinturón orogénico Caledoniano, hace unos 420 M.a.) y otra al N (cinturón orogénico Ellesmeriano, hace 350 M.a.). Estas cuencas sedimentarias exponen a veces eventos volcánicos, aunque fue en el momento de la apertura del océano Atlántico (60-55 M.a.) cuando aparecen grandes extensiones de coladas basálticas.

Breve historia geológica de Groenlandia

La historia geológica de Groenlandia se puede resumir en cinco etapas temporales (Henriksen, 2008; GEUS, 2006):

- Primera etapa, de edad Arcaico (3.800 a 2.700 M.a.), aparece poco representada. En la localidad de Isua afloran unas rocas sedimentarias de 3.800 M.a. que incluyen algunos de los primeros restos fósiles de seres vivos conocidos en el mundo. Se trata de cianobacterias acumuladas en láminas de hierro oxidado que nos indican la primera producción de oxígeno libre en nuestro planeta. Hace unos 2.720 M.a. las distintas subplacas tectónicas que formaban el basamento (compuestas de gneises, rocas metamórficas, rocas plutónicas y anortositas) se unieron en una placa mayor que aflora actualmente al O y SE.
- Segunda etapa, de edad Proterozoico (2.700 a 542 M.a.), resulta más compleja que la primera. En ella, Groenlandia se situaba cerca del Polo Sur, a unos 17.000 km de su posición actual. Entre 2.050 y 1.750 M.a. la mayor parte del basamento arcaico se recicla en nuevos procesos tectónicos, plutonismo granítico y secuencias sedimentarias. El viejo continente arcaico se rompe,

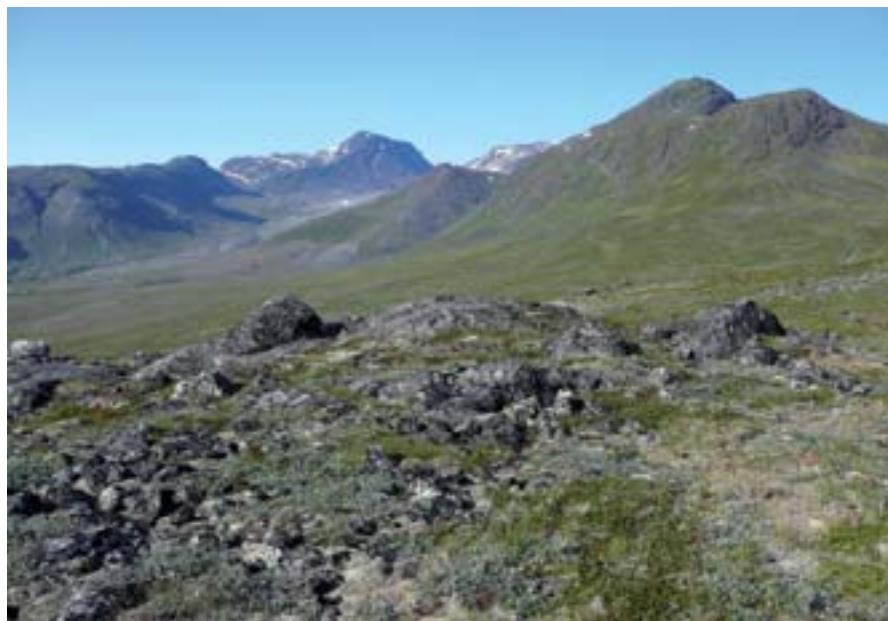


Figura 20. Ejemplo de terrenos pertenecientes a la provincia Gardar (sienitas y rocas máficas principalmente), situados al este de la localidad de Narsaq.

forma corteza oceánica y se vuelve a construir en una nueva configuración de plegamientos paleoproterozoicos. En el sur, el cinturón orogénico Ketilídico (1.825-1.725 M.a.) se forma como unidad independiente del resto. Entre 1.800 y 1.725 M.a., diversas partes del basamento se unen en un bloque único de cratón. Después se origina una gran cuenca sedimentaria donde se depositan, sobre todo, areniscas al NO, N y NE, la cual se rompe en un *rift* volcánico. Al sur, la provincia Gardar (1.350-1.125 M.a.) queda marcada por este *rift* de orientación NE-SO que afecta al basamento. Se forma entonces una cuenca sedimentaria continental que incluye materiales volcánicos y plutónicos en forma de diques. Entre 1.100 y 1.000 M.a. se forman distintas cuencas sedimentarias (marinas sobre todo) con depósito de areniscas al SE, E y NE, tectonizadas en la orogenia greenvillense (930 M.a.). La cuenca situada al este (Eleonore Bay) muestra hasta 1.400 m de sedimentos marinos de clima cálido que evolucionan hasta depósitos glaciares (tillitas).

- Tercera etapa, corresponde al Paleozoico (542 a 251 M.a.). A comienzos de este periodo se forma un nuevo océano en la Tierra (Iapetus) entre los antiguos continentes Laurentia (formado por los actuales Norteamérica y Groenlandia) y Báltica (formado por parte de Asia y

Europa actuales). En este océano se depositan unos 4.000 m de sedimentos carbonatados durante el Cámbrico-Ordovícico, visibles al este de Groenlandia (cuenca de Kong Oscar Fjord). Además, hay otra cuenca al norte (cuenca de Frankilian) con otros 4.000 m de carbonatos someros y 8.000 m de arenas y lodos marinos de mayor profundidad depositados en un contexto de tipo turbidítico. A finales del Ordovícico, Iapetus se cierra y, en el Silúrico-Devónico inferior, chocan Laurentia y Báltica, originando un cinturón montañoso plegado con plutonismo (13.000 km de orogenia caledoniana que forma toda la costa N y E de Groenlandia). En el Devónico superior tiene lugar el ascenso tectónico, erosión y extensión de este cinturón caledoniano, formando cuencas sedimentarias fracturadas en los bordes con potencias de hasta 10.000 m de sedimentos lacustres, fluviales y eólicos de edad Devónico-Pérmico. En esta etapa, Groenlandia sigue un viaje tectónico hacia el norte, que la lleva a posiciones cercanas al Ecuador.

- Cuarta etapa, de edad Mesozoico-Cenozoico (251 a 2 M.a.). En el Triásico, Groenlandia se une a Laurasia y ésta a Pangea (único continente de hace unos 250 M.a.). Posteriormente, Pangea se rompe en un proceso de *rifting* y se crea nuevo fondo marino. La costa este une el

mar Boreal con *Thetys*. Los *rifts* creados acumulan en esta etapa grandes potencias de sedimentos marinos y continentales que rodean Groenlandia al N, E y O. En el Paleógeno, la apertura del océano Atlántico entre 60 y 54 M.a. da lugar a un *plateau* de gran potencia (hasta 10 km) de basaltos en zonas costeras del E y O. Esta situación se prolonga hasta el Mioceno.

- Quinta etapa, corresponde al Cuaternario (1,8 a 0 M.a.). Tras completar su viaje tectónico hacia el norte, Groenlandia se emplaza en su posición actual y se cubre de hielo desde hace unos 2,4 M.a. Se desarrolla desde entonces una actividad glaciar de acumulación-erosión, formando valles en "U", fiordos, morrenas, etc. La capa de hielo o *inlandsis* ha fluctuado durante este periodo en espesor y extensión según ciclos periódicos. La última retracción del *inlandsis* comenzó hace unos 11.700 años, tras un máximo desarrollo.

Geología del sector visitado: grandes unidades geológicas y geomorfológicas

La zona visitada en la expedición comprende tres grandes unidades geológicas regionales (*figura 18*): basamento cristalino, cinturón plegado ketilídico y la provincia Gardar. Asimismo, podemos considerar otras tres grandes unidades geomorfológicas: glaciares y fiordos, relieves montañosos y depósitos subactuales (tillitas, abanicos aluviales, playas, terrazas y paleoterrazas). El basamento cristalino arcaico tiene una edad comprendida entre 3.800 y 2.500 M.a. y suele estar compuesto por granitos y gneises con inclusiones de otras rocas como anfibolitas. Forma cadenas montañosas originadas en este periodo bajo unas condiciones de profundidad de 20 a 50 km y temperaturas de 400 a 800 °C. Esta unidad aflora a unos 15 km al NE de nuestra zona de expedición. El cinturón plegado ketilídico es una estructura geológica de gran escala en dirección NE-SO que aparece en nuestra zona de visita. Se desarrolló en el margen sur del basamento arcaico y constituye el mejor ejemplo en Groenlandia de cinturón plegado por la colisión de antiguas placas tectónicas en el Precámbrico (1.900-1.725 M.a.). Se compone de granitos



Figura 21. Imagen aérea del inlandsis y glaciares situados junto a la localidad de Narsarsuaq, además de los relieves de clara morfología alpina, compuestos principalmente por materiales sieníticos y graníticos.

deformados, ortogneises con bandas métricas claras de cuarzo y feldespatos y oscuras de anfibolitas (rocas volcánicas metamorfizadas a 15-40 km de profundidad y temperaturas de 450 a 750 °C) ricas en hornblenda, plagioclasa y biotita. Ocasionalmente presenta esquistos, correspondientes a sedimentos y depósitos volcánicos metamorfizados en facies de esquistos verdes (10-35 km de profundidad y 350-500 °C). Las estructuras tectónicas del basamento son sobre todo pliegues de distinta escala y geometría.

La estructura geotectónica de este cinturón se compone, en sentido norte-sur, de tres zonas:

- *Foreland*, con una banda de 50 km de anchura de gneises de 2.800 M.a.
- Granitos (batolito Julianehab) desarrollados durante unos 60 M.a. (1.850 a 1.790 M.a.) como intrusiones diferentes aunque en la actualidad forman una masa continua con un afloramiento de 150 km de anchura (*figura 19*).
- Banda de 40 km de anchura formada por areniscas y gravas metamorfizadas de origen fluvial, resultado de la erosión de los granitos. En el extremo sur de la zona aparecen esquistos, resultado del metamorfismo de sedimentos fluviales

de grano fino. Posteriormente, el conjunto se vio sometido a una sutura de margen oceánico mediante subducción, lo que originó un arco volcánico y el depósito posterior de potentes series vulcanosedimentarias entre 1.900 y 1.850 M.a., que sufrieron deformación y metamorfismo, llegando incluso a formar migmatitas. Al final de la orogenia tiene lugar el emplazamiento de granitos *rapakivi* hacia el sur, ya en fases tardías (1.750-1.725 M.a.).

La provincia Gardar es un conjunto geológico (*figura 20*) que representa una rotura de placa tectónica mediante extensión (*rifting*) y depósito de sedimentos entre 1.350 y 1.120 M.a. en tres etapas:

- 1.350-1.250 M.a.: inicio del *rift* en sentido NE-SO desde Canadá, hasta unos 4.000 km al NE mediante una extensión de la corteza en sentido ortogonal. Todo ello crea un sistema de fallas de gravedad con un surco deposicional subsidente y la sedimentación de unos 3.600 m de espesor de areniscas y lavas basálticas interestratificadas. Las areniscas, con depósitos de hierro rojo, se depositan en un contexto desértico a través de ríos que fluyen en paralelo a la dirección

En los últimos 7 M.a., los periodos glaciares, originados por cambios climáticos globales de origen astronómico, han propiciado la extensión de los hielos polares hasta latitudes de unos 50° N-S y el desplazamiento ecológico de todos los ecosistemas

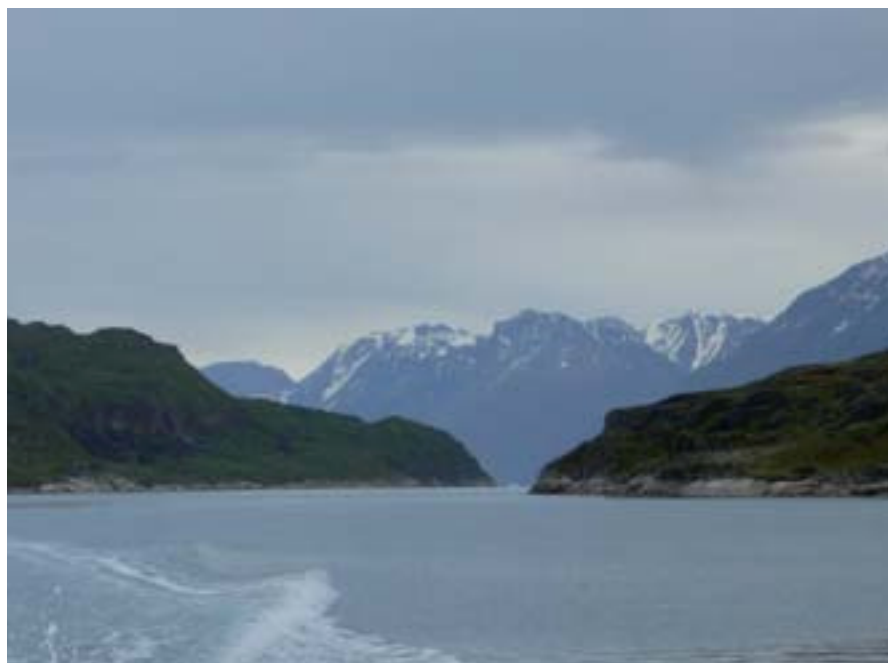


Figura 22. Imagen del fiordo Tunulliarfik, uno de los tipos paisajísticos más comunes en la costa de Groenlandia. Al fondo se aprecian los relieves sieníticos pertenecientes a la unidad Gardar, situados a cotas que superan los 1.500 m.

del *rift* y que erosionan los granitos del sustrato. Las intrusiones magmáticas supracorticales asociadas son plutones sieníticos de unos 6 x 4 km de extensión situados cerca de Ivittuut, en la zona norte, y dos plutones sieníticos de 10 x 15 km y 7 x 4 km, respectivamente, a ambos lados del fiordo Tunulliarfik (cerca de Narsarsuaq).

- 1.250-1.200 M.a.: en esta etapa sucede el emplazamiento compresivo por inyección de diques básicos tubulares durante cuatro etapas con distintas direcciones estructurales, además de dos pequeñas intrusiones en el *Foreland* de composición poco habitual (granito Ivittuut).
- 1.200-1.120 M.a.: la última etapa compone la mayoría de afloramientos de la provincia Gardar. Se trata de materiales resultado de una intensa actividad magmática somera (cámaras magmáticas de 2 a 5 km de profundidad), de contexto extensivo, que da lugar a diques básicos gigantes de dirección ENE-OSO y tamaños de hasta 25 x 45 km, además de siete intrusiones de sienitas y granito-sienitas. Cada una de las intrusiones es diferente en composición según su historia magmática. Algunas de ellas contienen anomalías geoquímicas consistentes en concentraciones de elementos y minerales raros como

niobio, uranio, tántalo y zirconio. La mayor variedad de minerales se da en la intrusión de Llimausaq (cerca de Narsaq), donde se han descrito hasta 225 especies de minerales, de las cuales 30 han sido definidas por primera vez aquí, y algunas son endémicas a escala mundial. Como ejemplos de estos minerales tenemos los siguientes: aegirina ($\text{NaFeSi}_2\text{O}_6$); tugtupita ($\text{Na}_4\text{BeAlSi}_4\text{O}_{12}\text{Cl}$), considerada la gema nacional de Groenlandia; sorensenita ($\text{Na}_4\text{SnBe}_2\text{Si}_6\text{O}_{16}(\text{OH})_4$); pachnolita ($\text{NaCaAlF}_6 \cdot \text{H}_2\text{O}$); amazonita (KAISi_3O_8); y criolita ($\text{Na}_3[\text{AlF}_6]$).

En cuanto a las unidades geomorfológicas, destacamos, en primer lugar, el sistema de glaciares —*inlandsis* central, glaciares de tipo alpino, circos, etc.— (figura 21) y fiordos producidos por las especiales características climáticas y paleoclimáticas de la región. En los últimos 7 M.a., los periodos glaciares, originados por cambios climáticos globales de origen astronómico, han propiciado la extensión de los hielos polares hasta latitudes de unos 50° N-S y el desplazamiento ecológico de todos los ecosistemas.

Se tiene constancia (Henriksen, 2008) de que Groenlandia posee un *inlandsis* desde hace unos 2,4 M.a. (finales del Plioceno),

aunque algunos investigadores extienden este periodo hasta los 7 M.a. En todo caso, esta capa de hielo ha sufrido oscilaciones importantes tanto en extensión como en espesor. A comienzos del Cuaternario (1,8 M.a.) el *inlandsis* creció y ocupó toda la isla, adentrándose hasta 250 km mar adentro respecto a la línea de costa actual. El último evento de extensión glaciar conocido como “fase Saálica” se verificó entre 400.000 y 130.000 años atrás. En su máxima extensión conocida, entre 200.000 y 150.000 años atrás, el hielo de Groenlandia se adentró de nuevo unos 300 km en el mar y acumuló un mayor espesor en su zona central. En las zonas actuales libres de hielo (litoral) se aprecian los efectos en el paisaje de dicha extensión: fiordos, valles en “U”, etc. Mar adentro, existen cañones submarinos y abanicos deltaicos gigantes causados por las fusiones posteriores.

El periodo interglaciar siguiente (fase Eémica) duró entre 130.000 y 115.000 años atrás y supuso un incremento de temperaturas de 5 °C por encima de las actuales, lo que provocó un ascenso en el nivel del mar de 50 m, puesto en evidencia por terrazas marinas situadas a esa cota con restos fósiles de especies como *Mytilus sp.*, ligadas a climas templados.

A este periodo interglaciar le siguió un nuevo periodo glacial entre 115.000 y 11.700 años atrás, conocido como "fase Weichselian". En ella, la temperatura llegó a ser hasta 25 °C menor que la actual en los picos de más frío y 5 °C menor en los picos de mayor temperatura. Las tasas de erosión de un glaciar son enormes (2-3 m cada 1.000 años, diez veces mayores de la erosión fluvial, por ejemplo) y depositan sedimentos muy característicos con grandes diferencias de tamaños, muy angulosos, y presencia de bloques aislados de tamaños descomunales.

En todo caso, hubo un avance del hielo hace 21.000 años, que enterró a los *nunataks* situados al SO de la isla, y un periodo de retracción glacial entre 19.000 y 16.000 años atrás con el ascenso del nivel del mar. Las terrazas marinas arenosas con conchas fósiles se sitúan a distintas cotas, fruto de un deshielo parcial acontecido hace 11.700 años. Las cotas donde se sitúan estas terrazas son más altas de lo esperado (pueden llegar hasta 140 m sobre el nivel del mar actual) debido a una pérdida global de 40-50 m en la capa de hielo y el consiguiente ascenso isostático de la isla. Desde 11.700 años atrás hasta la actualidad se han registrado pequeños ciclos de avance-retroceso del *inlandsis*, como hace 11.200 años con un pico de menor temperatura, y 8.000 y 6.000 años atrás con picos de mayor temperatura. Hace unos 3.500 años la temperatura bajó de nuevo y el *inlandsis* se colocó en una posición muy similar a la presente. En el *inlandsis* actual, a 80 m de profundidad, la presión hace que la nieve se transforme en hielo compacto que incluye burbujas de aire y granos de polvo atmosférico, que indican sobre todo la presencia de actividad volcánica a nivel global. Las capas más profundas del *inlandsis* (a unos 3.000 m), tienen una edad estimada de 250.000 años. El estudio de estas burbujas, recuperadas a través de sondeos, resulta de enorme interés para conocer la evolución del clima a través de la relación entre los isótopos de oxígeno ^{18}O y ^{16}O . El ^{18}O corresponde a nieve que se formó en un clima más cálido que el ^{16}O . Estos datos se analizan en los cinco grandes sondeos de 1.400 a 3.085 m

El extremo SO de Groenlandia puede considerarse una región de excepcional interés geológico a escala mundial

de profundidad, efectuados en distintas partes de la isla entre 1966 y 2002.

La segunda unidad de modelado observada corresponde a relieves montañosos, dominantes en el anillo precostero exterior del *inlandsis*. En este anillo, libre de hielo generalmente durante el verano, es posible reconocer diversos relieves de alturas variables (entre 200 y 2.500 m en su mayoría) y perfiles diferenciados según el sustrato rocoso: formas en domo para rocas graníticas y formas de aristas (*horns*) para rocas de mayor consistencia, como cuarcitas o metavulcanitas. Dominan en todo caso los valles glaciares con perfiles en "U", grandes aristas de superficie, lagos glaciares de distinto tamaño y espectaculares sistemas de fiordos (*figura 22*).

Finalmente, tenemos diversos depósitos (sub)actuales correspondientes a tillitas, abanicos aluviales, turberas, terrazas marinas y fluviales y playas. La presencia de sedimentos marinos recientes en terrazas tierra adentro a distintas cotas de hasta 100 m, formados por limos y conchas marinas, demuestran la subida del nivel del mar en épocas más cálidas de fusión de hielos y el ascenso isostático de la isla por descargas de hielo. A estos depósitos se unen otros de origen lacustre con fósiles de plantas que demuestran la existencia de estos periodos cálidos, como el sucedido hace unos 2,3 M.a. En este momento se cree que Groenlandia estaba libre de hielo y habría desarrollado un paisaje de bosques de coníferas en su zona central, bosques caducifolios al sur y tundras en zonas de mayor cota.

Geología económica

La exploración mineral de Groenlandia resulta importante aunque en la

actualidad muchas de las minas han cerrado debido a problemas económicos. Las menas principales existentes son de oro, al sur, grafito y plomo-zinc, al oeste, hierro y rubí-corindón en la zona de Nuuk, esfalerita (ZnS) en dolomías paleozoicas del norte, y arenisca Igaliku (piedra decorativa de la provincia Gardar). Además, existen yacimientos de otras rocas ornamentales y de construcción como mármoles y granitos. También se han explotado minas de uranio cerca de Narsaq, pirita, pirrotina, diamantes y otros elementos de interés (estaño, tántalo, etc.).

La primera mina de Groenlandia (mina Ivittuut) data de 1852 y se mantuvo activa hasta 1987. Explotaba criolita, usada como mena de aluminio para aviación y otros usos tecnológicos. La mina de Ivittuut fue la mayor del mundo de criolita, con 3,7 millones de toneladas y una riqueza del 57%. El cuerpo mineral medía 100 x 200 m en superficie y 60 m de profundidad. La mayor parte de las minas en Groenlandia se cerraron antes de 1990, permaneciendo activas en la actualidad minas de olivino, cerca de Nuuk, y de oro en el extremo sur, en la región de Nanortalik, con leyes de hasta 25 mg/tm y mayores concentraciones en las venas de cuarzo, que pueden contener láminas de 2 mm.

La zona de visita contiene yacimientos de oro y tierras raras (niobio, uranio, torio, tántalo y berilio), ligadas a intrusiones magmáticas de 1.300-1.120 M.a. Las concentraciones de estos elementos llegan hasta 1,4 kg/tm y valores medios de 200-300 g/tm. Además, existen yacimientos de carbón en la zona de Disko, asociados a sedimentos deltaicos de 80 M.a. En cuanto a yacimientos de hidrocarburos, actualmente se están evaluando unas prospecciones llevadas a cabo en mar abierto al oeste de Nuuk. Aunque se estiman unas reservas superiores a 500 millones de m³ de petróleo, sólo podría extraerse entre el 15 y el 50% del total. Las zonas prospectadas corresponden a sedimentos deltaicos del Cretácico-Terciario y se han evaluado mediante perfiles sísmicos y seis sondeos mecánicos.

Interés geoturístico y geodidáctico de la zona

El extremo SO de Groenlandia puede considerarse una región de excepcional interés geológico a escala mundial debido a tres factores: presencia de indicadores para el estudio del cambio climático global, presencia de un amplio y espectacular catálogo de formas de paisaje glaciares y periglaciares (lenguas, circos, morrenas, valles, fiordos, banquisas, *nunataks*, *horns*,

lagos, aristas, tillitas, suelos almohadillados, etc.), ligadas a procesos activos de erosión, transporte y depósito, y presencia de un amplio catálogo de rocas (esencialmente plutónicas) y minerales de gran belleza y rareza. Todo ello compone un escenario único para llevar a cabo actividades de tipo geoturístico (senderismo, rutas fotográficas, etc.) y geodidáctico, donde pueden ser observados y analizados *in situ* multitud

de fenómenos geológicos ligados a la actividad de agentes externos asociados al sistema glaciar-periglacial y el análisis de este excepcional catálogo de rocas, minerales y estructuras geológicas. Es por todo ello que dicha zona es altamente recomendable como destino de viaje para profesionales de la geología, profesores, aficionados o simplemente personas interesadas en conocer un lugar especial de interés geológico.

Agradecimientos

Agradecemos a todos los compañeros de la expedición su asistencia y colaboración en este proyecto, y especialmente a Lorenzo Calero, estudiante de Ciencias Ambientales de la Universidad de Málaga, por su entusiasmo y ayuda en la tarea de reconocer y catalogar los múltiples tipos petrológicos y minerales encontrados. Asimismo, agradecemos a la profesora Carmina Salcedo de Lara (Departamento de Lengua y Literatura del IES Nº 1 de Fuengirola) la corrección lingüística del trabajo. También agradecemos a Almudena Durán sus aportaciones sobre historia y sociología de Groenlandia.

Bibliografía

- Henriksen, N. (2008). *Geological history of Greenland*, GEUS, Dinamarca.
- Kvanefjeld Project-Greenland, en:
www.ggg.gl/Projects/Kvanefjeld-Project-Greenland.htm
New Multi-Element Targets and Overall Resource Potential, en: www.ggg.gl/Projects/New-Multi-Element-Targets-and-Overall-Resource-Potential.htm
- Sorensen, H. (2006). *Geological Guide-South Greenland. The Narsarsuaq-Narsaq-Qaqortoq region*, GEUS, Dinamarca.
- Strahler, A. N. (1979). *Geografía física*, Omega.

Promoción especial para el Colegio de Geólogos

Servicios gratuitos:

- 1a visita (consulta y revisión)
- Visita revisión
- 1a visita ortodoncia
- Visita de urgencias de ortodoncia
- Visita prótesis
- Fluoración anual
- Fluoración anual infantil
- Radiografías intraorales
- Extracción de puntos de sutura

Servicios por sólo 20 €:

- Extracción dental simple
- Extracción dental temporal
- Visita estomatológica de urgencias de día
- Ortopantomografía
- Higiene dental anual + Revisión + Enseñanza de Higiene Oral (EHO)

Hasta un 20% de descuento: en el resto de tratamientos, en cualquier especialidad.

Todas la especialidades, excelentes profesionales, la última tecnología, trato personalizado.

miravé
CLÍNICA DENTAL



FINANCIACIÓN A SU MEDIDA

Consulte nuestro Servicio de Atención al Paciente (SAP)

SERVICIO DE URGENCIAS CON PRESENCIA DE DENTISTA 24horas/365días



Miravé Tuset
Tuset, 36 bajos Barcelona 08006
F: 932 172 009

Miravé Travessera
Trav. de Gràcia, 71 bajos Barcelona 08006
F: 932 379 991

Servicio de Atención al Paciente
sap@clinicamirave.es
www.clinicamirave.es
T: 932 176 889