

Elogio del blanco

Conferencia pronunciada por José-Abel Flores Villarejo,
Catedrático del Departamento de Geología en la Facultad de Ciencias
de la Universidad de Salamanca, con motivo
de la festividad de Santo Tomás de Aquino,
el día 28 de enero de 2015.



| JOSÉ-ABEL FLORES VILLAREJO |

Elogio del blanco



VNiVERSIDAD
D SALAMANCA

CAMPUS DE EXCELENCIA INTERNACIONAL

2015



Universidad de Salamanca
José-Abel Flores Villarejo

Impreso en España - Printed in Spain
Gráficas Lope. Salamanca
www.graficaslope.com

Todos los derechos reservados. Ni la totalidad ni parte de este
libro puede reproducirse ni transmitirse sin permiso escrito de la
Universidad de Salamanca.

*A mis padres,
a Ana y a Álvaro.
Con cautela, antes y ahora,
han creído que algún día podría
acercarme hasta aquí.*

| INDICE |

Exordio

13

De los colores de la Tierra
y nuestra percepción

20

Hielo, paradigmas y embarcaciones

30

La deriva continental

30

La tectónica de placas

37

Polos y microfósiles

45

La teoría orbital

En las profundidades

53

Microcosmos paleontológico
y espectrómetros

59

La escala suborbital
Desentrañando la Historia

69

La ruptura evidenciada en el hielo

72

Del futuro

79

A modo de epílogo

83

Referencias y créditos

86

*... car la capacité d'attention de l'homme est limitée.
Elle doit être réveillée sans cesse, éperonnée par la provocation...*

L'homme révolté (1951)

ALBERT CAMUS

EL GESTO de encaramarme hasta lo alto del Paraninfo, contemplar desde aquí a cuantos asisten a la celebración del día del patrón, maestro de maestros, aunque de disciplinas algo alejadas a la que desde hace algunas décadas me dedico, habiendo sido desde hace ese mismo tiempo y algunos años más parte atenta del público, provoca sentimientos enfrentados, difíciles de expresar. Orgullo mezclado con cierto recelo, no diría temor. Acaso, simplemente, el por habitual obviado sempiterno nerviosismo del docente ante un auditorio de estudiantes solícitos, atento a tratar de encontrar la tensión que precisa el momento, a dosificar arresto para no defraudar a quienes tan amablemente me han invitado. Es un honor, uno de los máximos honores para quien ha sido, es y se siente Universidad de Salamanca.

| EXORDIO |

HE DE confesar que elegir el tema sobre la lección no me ha supuesto mucho esfuerzo. Confiándome completamente diré que no me ha costado en absoluto, aun consciente del reto que supone acercar, en buen número de casos presentar, la ciencia a que me dedico. No lo dudé, pues entre mis obsesiones está el explicar el sentido, transcendencia y valor histórico del *blanco*.

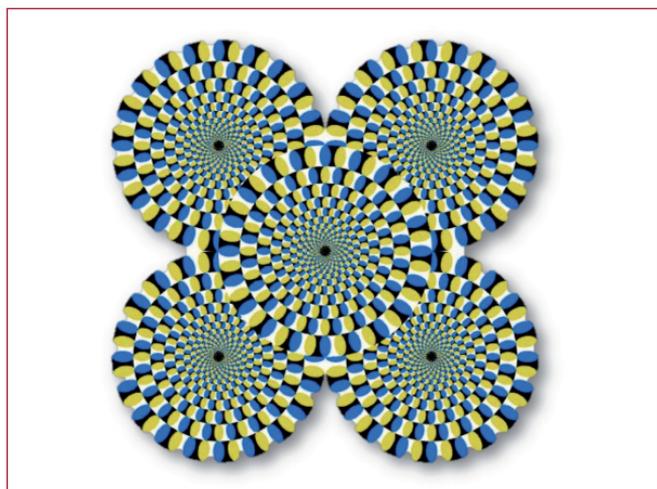
Y recordando cuáles fueron mis primeras experiencias científicas, aquellas en las que en la infancia descubría la naturaleza y los entresijos del funcionamiento de lo cotidiano desde una óptica diferente al mero observador, me viene a la mente el nombre de D. Ángel Gil, mi profesor de Ciencias Naturales, Física y Química: de todo ello, desde el primer al quinto curso del bachillerato de entonces. Don Ángel nos revelaba

en un reducido laboratorio, ordenado a fuerza de escasez, a la que se unía la precariedad de elementos, que el color blanco era una mera ilusión, que no existía, que era el reflejo de todos y la suma de todos, ensamblados. No recuerdo que aludiera a aspectos más técnicos como las longitudes de onda —el intervalo entre los 400 y 700 nanómetros que nuestro cerebro es capaz de interpretar como color—, aunque sí el efecto del paso de un rayo de luz que partía de una perforación minúscula en una cartulina negra, sujeta entre libros añosos que ejercían de sostén, tras la que había dispuesto una de aquellas linternas cuadradas, pila de petaca amarilla y colores metálicos, al cruzar por la “lágrima” despojada a alguna lámpara araña de su casa: el arcoíris. Ya había advertido el coloreado en la casa de mis abuelos, en la sala en la que colgaba el bronce y lo que llamábamos *diamantes grandes*, cuando los rayos del atardecer incidían en ellos, pero no se me había ocurrido la posibilidad de reproducirlo, y todavía faltaban algunos años para que *Pink Floyd* publicara, y yo apreciara, *The Dark Side of the Moon*, en cuya portada quedaría popularizado.

Pero la invitación de D. Ángel no terminaba allá. Con su voz áspera, segura, nos animaba a realizar por nuestra cuenta el ensayo inverso, a modo de deberes durante el periodo vacacional inminente. Se trataba de reproducir lo que Isaac Newton propusiese con su disco en su tratado *Opticks*. Lo mejor era, nos dijo, utilizar una pirindola, una de aquellas que se accionaban con pulgar y medio, a la que debíamos adherir, como mejor pudiésemos, un círculo dividido en sectores absolutamente precisos de 51° y medio, coloreados de la mejor manera. Sin disponer de la peonza, se me ocurrió realizar el experimento echando mano al ingenio giratorio que me pareció más eficaz y se encontraba disponible. La ocurrencia fue destripar uno de aquellos coches que llamábamos de *fricción*, marca Payá —latón y primeros plásticos—, y extraerle el motor, del que sabía disponía de un disco que podía mantener girando con facilidad. Medí con el transportador, pinté, recorté y pegué, ayudado en algún momento por mi padre, sin decirle a mi madre de dónde habíamos sacado el motorcito ni cómo había quedado el juguete. Hicimos girar el disco y, como era de esperar, los colores se fundieron en algo que quería ser blanco, aunque sin llegar a desprenderse de una cierta tonalidad rosada,

producto de la imprecisión en la medida angular o en la falta de homogeneidad del pintado. No sé. Un entrañable éxito a medias, que de alguna manera me descubrió la relación entre la percepción y las propiedades físicas de lo que tenemos enfrente, la potencial explicación de la cotidianeidad. Era la primera vez en la que conscientemente descubría que la percepción y la interpretación forman parte del juego científico.

Así que el blanco eran todos los colores juntos y el reflejo de todos a la vez. Algo engañoso por evidente, como aquellas figuras que, miradas una y otra vez, llegan a provocar sensación de tridimensionalidad o confunden trayectorias, como los *embelesantes* diseños de Escher.



El título de la lección, *Elogio del blanco*, puede resultar ambiguo y con seguridad compañeros de otras disciplinas académicas podrían considerarlo pretencioso. Por ello conviene advertir que en los próximos minutos no van a escuchar palabras que expliquen aspectos plásticos, técnicas pictóricas o fotográficas, ni análisis de la obra de artistas como de James Abbott M. Whistler y su serie *Sinfonía Blanca*, o sobre los paisajes gélidos o espumantes de Joseph Turner, Caspar Friedrich o Claude Monnet, ni los irreconocibles de Antoni Tapies. No aludiré a la ópera de Boieldieu, ni a la pieza entre programática y

romántica de Sir Ralph Vaughan Williams, ni a la obra que habla de esa tonalidad de Vangelis, ni al álbum con ese nombre de The Beatles. Tampoco mencionaré las alocadas películas de inviernos de Buster Keaton. No trataré temas de ajedrez y sus combinaciones bicolors, y mucho menos de aspectos relativos a balística y sus dianas, ni de fútbol y camisetas. Nada acerca de sustancias cristalizadas, dulces, amargas, insípidas o alucinógenas, y por seguir con aspectos relativos a una posible ingesta, aparto leche, vino y detergentes, y por descontado las historias gélicas de Jack London o leviatanes de Herman Melville. No voy a hablar de numismática, de esas monedas de vellón de los dichos populares; acaso, pero tampoco, de osos. Y pueden imaginar que no se me pasa por la mente contradecir las certezas raciales acerca de los afroamericanos que defendiera Martin Luther King Jr. y un número ingente de seguidores a los que admiro especialmente: Miles Davis, Abdullah Ibrahim, Randy Weston, John Coltrane, o los miembros del contestatario Art Ensemble of Chicago, por citar algunos que me vienen a la memoria.

¿Cuál es pues el crítico blanco a que quiero referirme?

Todos los diccionarios, más o menos oficializados, que he consultado coinciden en definir el adjetivo blanco como *Del color que tienen la nieve o la leche*, añadiéndose un símil interesante en la acepción del *Cambridge Dictionary*: “*Of a colour like that of snow, milk, or bone*”, esto es añade, *o del color de los huesos*.

Descartada la leche como ya indiqué, quedan *nieve* y *huesos*, y sin apelar a la larga lista de sinónimos, esas dos palabras resumen, no solo el objetivo de mi lección, diría que el de mi carrera académica. *Hielo* y *esqueleto*, *nieve* y *fósiles*, han marcado mi trayectoria profesional. Pero no es esta una cuestión de defensa de una dedicación, sino una aseveración que sostiene que en particular el hielo ha sido, y sigue siendo, un elemento crucial en el acaecer de nuestro planeta y de cuanto se aloja en él, mineral u orgánico. Los fósiles, el resto pétreo, sus formas y entresijos químicos, son herramienta fundamental para la reconstrucción, para retratar el mundo preterito, nuestros orígenes, y veremos, entender y prever futuro.

| DE LOS COLORES DE LA TIERRA
Y NUESTRA PERCEPCIÓN |

SI TUVIÉRAMOS la posibilidad de sobrevolar la Tierra a lo largo del año, observaríamos un cambio sustancial en las tonalidades que van definiéndose en continente y océano. Azules, verdes, pardos y amarillos se van alternando en las latitudes bajas y medias. Si la hiciéramos girar como en aquel experimento newtoniano, quizás alcanzásemos un resultado similar al que yo obtuve. ¡Habrà que hacer el ensayo! Sin embargo, es ostensible que en las altas latitudes, en el norte y en el sur, la llegada diferencial de energía da lugar a que el blanco se haga presente sin recurrir a remolinos. Disponemos de blanco perpetuo, pero en los inviernos crece hasta multiplicar más del doble su superficie, tanto en el océano como en la tierra emergida, Ártico y Antártico. Pinceladas más reducidas se observan en las cumbres de los sistemas montañosos. Pero de lo que los geólogos nos tratan de convencer, se verá, es de que este panorama no ha sido ni mucho menos así siempre. El blanco terrestre, el limpio, el del hielo, el frío, ha fluctuado considerablemente

desde que la Tierra se constituyó hace 4500 millones de años.

Hoy en día es difícil de imaginar un planeta congelado, salvo por la perspectiva artificiosa que en ocasiones nos ha proporcionado Hollywood. Esa visión catastrofista de los guionistas ha encontrado su inspiración en teorías científicas que se han ido pergeñando. Responden a la evolución del propio sistema terrestre, a su estatus en el planetario en que se aloja, a la energía que recibe y a cuantos elementos integrantes se encargan de su distribución, y finalmente, de la singularidad temporal de sus geosferas: litosfera, atmósfera, hidrosfera y biosfera.

Bob Dylan en su himno acaso más emblemático se preguntaba,

*... how many years can a mountain exist
before it's washed to the sea?*¹

Y concluía, sin ánimo científico, ténganlo por seguro,

*The answer my friend is blowin' in the wind*²

¹ ...¿cuántos años puede perdurar una montaña antes de ser arrastrada al mar?

² La respuesta amigo mío está flotando en el viento.

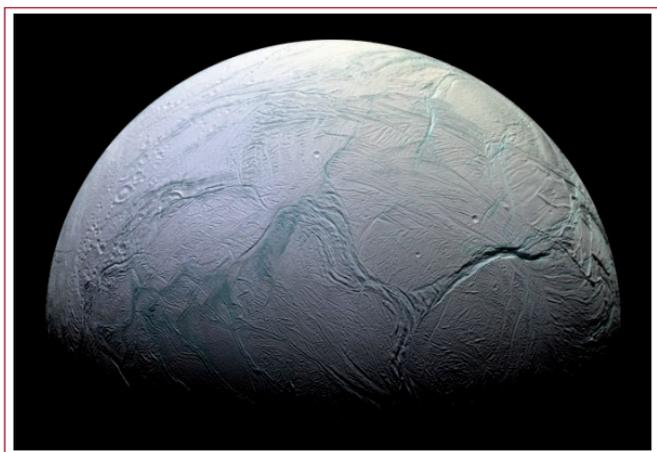
Poesía y música aciertan en la pregunta, pero dejan el trabajo de contestar correctamente a otros, pues la respuesta, amigos —lamento enormemente tener que llevar la contraria a Dylan, que seguro entendería la broma—, es posible hallarla en otros elementos que actúan de archivo intemporal, cual es el caso de las rocas y los seres que han quedado atrapados en ellas, algunas blancas, casi todos blancos.

El *blanco* no es exclusivo de la Tierra. Los avanzados sistemas de que dispone hoy en día la Astrofísica y la Ciencia Espacial —las sondas Voyager o Galileo, y en el futuro el robot Valkyrie que pretende posarse en algún astro próximo—, nos confirman que a algunos cientos de millones de kilómetros, cuerpos como Europa, el satélite de Júpiter, o Encédalo, la gran luna de Saturno, están completamente cubiertas por una capa de hielo; con alta probabilidad un océano helado. Por una situación similar pasó nuestro planeta por primera vez hace 2500 millones de años. Las rocas recuperadas en algunos de los cratones, las partículas sedimentarias que acabaron formando parte del entonces océano primigenio, la Pantalassa, pese a estar afectados por procesos metamórficos que

hace que se desvanezcan huellas, dan fiel prueba. Brian Harland, Joseph Kirschvink, o Paul Hoffman, por citar algunos autores dedicados al tema, concluyen que variaciones en la concentración de dióxido de carbono como consecuencia de la dinámica de la litosfera y sus emisiones, unido a otros factores de naturaleza extraplanetaria como podría ser la reducción en la llegada de energía solar, determinarían una caída sustancial de la temperatura, hasta el punto de congelar la ya salada agua de aquel *protoocéano*. Es el primer episodio de “*snowball*” [bola de nieve] terrestre que acontece. En aquel instante arqueas y cianobacterias flotaban, algunas ya con la capacidad para fotosintetizar desarrollada, o permanecían sumidas en los fondos fangosos, oscuros, aprovechando cualquier fuente de energía química, y pese a la situación de extremo frío, consiguen mantenerse en ese escenario, dejando jugar a la selección natural, que contando con el mecanismo que propicia el cambio radical en el sistema, consigue que aparezcan por entonces los primeros eucariontes, justamente tras el deshielo.

Transcurrirían miles de milenios para que llegando al final del Precámbrico, entre los 900

y 600 millones de años, la situación volviera a repetirse al menos tres veces de forma sucesiva, con intensidad variable. Nuevos episodios recrearían la situación de “*snowball*” hasta el punto de que ese periodo va a conocerse con el nombre de Criogénico.



| Encédalo satélite de Saturno (NASA) |

En 1946 Reginald C. Sprigg se encuentra en las colinas de Ediacara, en las proximidades de la australiana Adelaida —como paleontólogo lo imagino con sombrero para protegerse del sol, martillo y libreta de campo—, con un catálogo impreso en areniscas de estructuras

inconfundiblemente orgánicas, fósiles, distintas a cuantos seres vivos y desaparecidos, se conocerán con posterioridad a los 600 millones de años. Probablemente no fuera consciente de su descubrimiento: estaba ante los entes pluricelulares más antiguos de que se tiene noticia, perfectamente perfilados, a la espera de que se les diera explicación. Y la que plantean los expertos es que, una vez recuperados los tonos cálidos, tras la *gran congelación*, el Planeta, particularmente las costas de Pantonia —el supercontinente heredero del primigenio Rodinia—, con un océano extenso de nuevo, va a acoger a los seres a partir de los cuales se definirán el resto de los que habitamos la Tierra, incluidos nosotros, y al color verde, ocasional hasta entonces.

Así pues, la evolución orgánica está en deuda con el blanco. El propio Darwin, sin prestarle demasiada atención —todo hay que decirlo—, aludiría a la importancia del hielo en su modelo, conocedor de otros episodios glaciales menos grandilocuentes, más cercanos. Cuando se encontraba a bordo del *Beagle* no existía Ediacara para la Ciencia.

Con la aparición de los primeros organismos pluricelulares, metazoos y plantas, la diversificación orgánica inicia una carrera en la que se multiplican las formas, colonizan ambientes (la práctica totalidad), cohabitando con aquellos que habían poblado la Pantalassa, añadiendo tonalidades y, lo que es más importante, siendo una vez más elemento determinante en la configuración de la Tierra. Si los primigenios organismos, una vez foytosintetizaron van a ser determinantes en la composición final de océano y atmósfera, en particular en el enriquecimiento en oxígeno libre, los organismos que se asientan a partir del Cámbrico interfieren y son parte del ciclo del carbono, tanto en su forma orgánica laxa, como en su constituyente mineral.

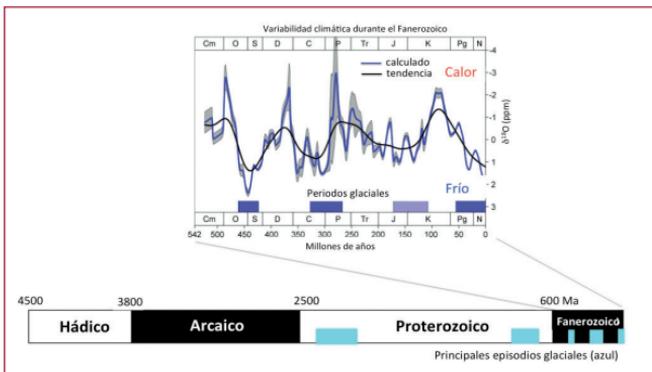
La historia del blanco terrestre va a verse condicionada por la interacción de entidades y contextos en sencillas relaciones simétricas y transitivas: uno afecta al otro y el otro al uno. Organismos a atmósfera e hidrosfera, entre todos a la litosfera, y a la inversa.

A finales del Ordovícico e inicios de Silúrico, hace unos 450 millones de años, se construye un casquete de hielo continental en las inmediaciones del entonces Polo Sur al desplazarse hacia

ese punto la masa emergida. Se inicia una gran concentración de agua en el continente en glaciares inmensos, dando lugar a una reducción de la Pantalassa y el consiguiente descenso del nivel del mar. La consecuencia fue un cambio radical en las características de los ecosistemas, y por ello una gran extinción. Los organismos que sobrevivieron se verían afectados nuevamente una vez se produjo el deshielo masivo, ya en el Silúrico, al verse modificado de nuevo el marco, en sentido opuesto.

Un ejemplo paradójico en el contexto de los colores de la Tierra lo constituye el Carbonífero, el episodio entre los 360 y 300 millones años. Como su nombre insinúa se trata de uno de los periodos “negros” de la historia de la Tierra. Un ambiente cálido, bochornoso, húmedo, en el que el paisaje estaría dominado por bosque de helechos gigantes, sería la norma que imperase durante la mayor parte de este sistema geológico. La situación de un extenso continente, Gondwana, en latitudes bajas y medias, habría favorecido la situación, a la que habría que añadir una intensificación en procesos tectónicos que afectaron a la superficies de manera relevante, con la particular definición de grandes cadenas montañosas,

producto de la orogenia Hercínica, su volcanismo asociado y un considerable incremento en la concentración de dióxido de carbono en atmósfera y océano, donde surgía un tímido Tethys, que acabará siendo Atlántico, a expensas de la todavía grandilocuente Pantalassa. A finales del Carbonífero, en un proceso similar al periodo antes explicado, la masa continental alcanza latitudes muy altas, hacia el sur, y como consecuencia se produce una nueva e intensa glaciación. Esta situación es conocida como “icehouse” [frigorífico –sic], en contraposición a los episodios dominantes de “greenhouse” [invernadero], definitivamente verde y sin hielo.



| Tendencia de las temperaturas y aproximación de episodios glaciales en la historia de la Tierra (Recopilado de varios autores. *Ver Referencias y créditos*) |

De manera que podemos ir contestando a Dylan —¿recuerdan?—, aunque para seguir con el discurso, veremos que las montañas de las que acabamos de hablar, las han desgastado ríos, nieve, viento y tiempo, a la vez que este planeta indómito no ha cesado de caminar en su esfera, replegándose, abriendo nuevos mares y cerrándolos, para finalmente generar otras montañas.

| HIELO, PARADIGMAS
Y EMBARCACIONES |

EN ESTE momento de la lección, me percaté de que, fiado, he relegado la metódica propia de la Ciencia, acuciado por llegar a tiempo a la meta planteada.

He citado orogénesis, generación de desniveles y la aparición derivada del hielo, pero no me he referido al mecanismo mediante el cual esos procesos se llevan a cabo. Conviene entonces plantear cuáles son los paradigmas vigentes.

| *La deriva continental*

Que la Tierra es un ente dinámico, con edades de gigante, millones de años, es palmario, y la Geología, con amplia contribución del resto de ciencias básicas, la que se encarga de su estudio. Lo que quizás no sea tan conocido, o al menos no se haya considerado siempre con la importancia que merece, es que el inicio de la *ciencia moderna* en términos generales se debe a un acontecimiento relacionado precisamente con las Ciencias de la Tierra. El inicio de la búsqueda de razones que expliquen el comportamiento de

los sistemas surge el día de Todos los Santos de 1755, y el acontecimiento que marca el hito el terremoto de Lisboa. Un seísmo, un incendio y el maremoto, determinaron la destrucción de la ciudad y un número elevadísimo de víctimas (se estima que unas 50,000 en Lisboa y otros cuantos miles en España, afectando como todos sabemos a poblaciones y edificios conocidos). La mayoría de nosotros, vecinos o visitantes, tenemos noticia de la referencia de Villar y Macías al suceso en su *Historia de Salamanca*, aludiendo a documentos y relatos locales de la época, en particular a su registro en las catedrales y otros edificios y calles de la ciudad.

“... repentinamente se conmovió con estrépito todo el pavimento, columnas, paredes y bóveda de ambos templos crujendo toda su máquina, asombrando con su continuo movimiento...”

El temblor de Lisboa sacudió la mente de los pensadores de la época, contribuyendo a desmontar la idea defendida por Gottfried W. Leibniz o Alexander Pope, aquel “*Este es el mejor de los mundos posibles*” que propugnaban en sus ensayos. Voltaire e Immanuel Kant dedican un buen número de páginas al análisis del desastre, tanto desde un punto de vista filosófico,

el sentido de la catástrofe desde aquella óptica leibziana y la *incompatibilidad* con su universo, como tratando aspectos técnicos de carácter científico. Pero sobre todo se genera en Europa una corriente en la que se tiende a tratar la fenomenología natural desde un punto de vista nuevo, cuestionando el carácter sobrenatural de los hechos. *La Crítica de la razón pura* es, sin lugar a dudas, heredera del Terremoto y transcendental en la historia del pensamiento y en el desarrollo del *método* hoy asumido.

Como curiosidad completo la información acerca de las ideas de Kant, que para explicar el cataclismo, imaginó cuevas descomunales en las que se almacenaban los gases que se observaba salían de las profundidades del subsuelo. Su acumulación determinaría la migración de los huecos, provocando sismos. Surge entonces la disciplina: la Sismología. Aún queda lejos el concepto asociado de previsión que en la actualidad ocupa una posición preponderante, a la vez que se explican mecanismos y definen tiempos, pero se inicia la búsqueda de las causas en fuentes aledañas.

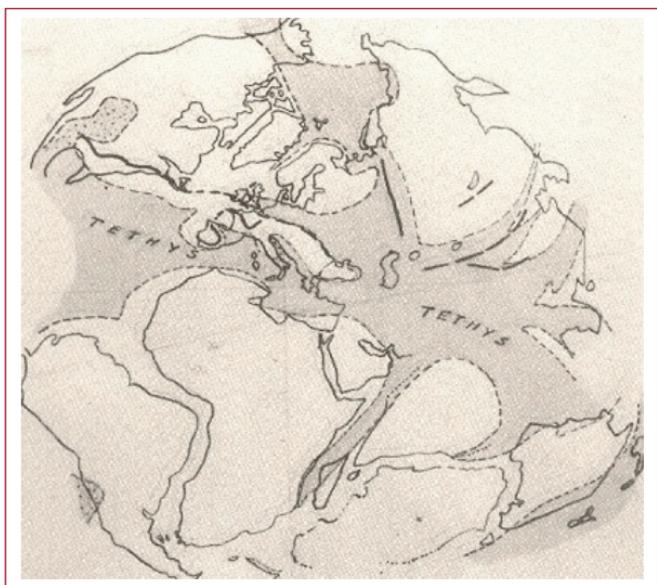
A principios del siglo xx, algunos indicios que apuntaban a la movilidad de la *tierra firme*,

de los continentes, parten de estudios y datos de exploradores que accedían a la aventura con la coartada del descubrimiento científico. La búsqueda de gloria se codeaba con la del conocimiento, y no siempre llegaban a diferenciarse bien. Por aspectos que atañen al tema que se trata y en el contexto del color que se discute, destacaría el caso de Robert F. Scott, o mejor dicho el *fracaso* de Scott. Este expedicionario, tratando de ser el primer humano en llegar al Polo Sur, se encontraría con la sorpresa de que con aproximadamente un mes de antelación el noruego Roald Amundsen y sus camaradas se le adelantaron en colocar las banderas allí donde la brújula se mostraba indecisa, en el extremo blanco del mundo. Decepcionado, iniciaría un accidentado regreso a su base costera en el que la totalidad del equipo perdería la vida. Sus cuerpos fueron hallados casi un año después, y con ellos un sobrecogedor diario, material fotográfico, y lo que es más curioso, en torno a 15 kg de rocas que contenían fósiles. Scott había continuado arrastrando su trineo, desprendiéndose de lo que hasta el momento consideraba prescindible, pero hasta el final mantuvo la pesada prueba geológica: *Glossopteris indica*. Las plantas

del orden Glossopteridales (los conocidos como *helechos con semillas*) fueron muy abundantes en el Carbonífero superior y Pérmico, extinguiéndose en el Triásico (esto es, entre los 320 y 250 millones de años). Los paleontólogos de finales del siglo XIX e inicios del XX los inventariaron en una amplísima franja que incluía Australia, Suramérica, África e India. En aquel momento —principio de 1912— es obvio que Scott se había percatado de la importancia de hallar fósiles de vegetales que sin duda conocía y eran propios de ambientes más cálidos y desarrollados hacía decenas o centenas de millones de años en “otra latitud”. ¿Pueden imaginarse al explorador pensando en el valor de su hallazgo mientras lucha contra las tormentas australes, preguntándose si abandonar o no el equipaje?

En aquella misma década otro científico con vocación polar desarrollaba lo que sería el embrión de uno de los paradigmas de la Geología, quizás inspirado en alguno de los discursos del polifacético Benjamin Franklin, o del concienzudo Alexander von Humboldt, observadores de “la existencia de una buena coincidencia antagónica en los perfiles oriental y occidental de Suramérica y África, respectivamente”.

Me refiero a Alfred Wegener, que ejerció de profesor de Meteorología, Astronomía y Física Cósmica en Marburg. Con anterioridad a la obtención de esa plaza, tras la defensa de su tesis doctoral, realizó su primera expedición a Groenlandia con objetivos geológicos y geográficos. Examinando su biografía, es más que probable que en ese periodo fuera cuando se asentaron sus ideas acerca de la movilidad de las masas continentales, ya que a partir de 1912 iniciaría la exposición pública de sus resultados, materializados en el esbozo hacia 1915 de El origen de los continentes y océanos (*Die Entstehung der Kontinente und Ozeane. Sammlang Vieweg*) publicado en su versión definitiva en 1922. Dos años después aparecería una segunda obra complementaria, coescrita con su suegro Wladimir Köppen, Los climas del pasado geológico (*Die Klimate der geologischen Vorzeit*), crucial para asentar la teoría e introducir nuevas ideas que después comentaremos. Esencialmente hablaba de la procedencia de la totalidad de los continentes de una sola masa, la Pangea, que una vez fragmentada se desplazaría lentamente, modificando geografía y clima.



| Boceto de Alexander L. du Toit en el que se muestra la Pangea antes de su fragmentación |

La teoría de la deriva continental introducía una componente dinámica a la histórica, algo revolucionario al añadir el dispositivo horizontal, aunque en buena medida *esperado* desde las observaciones de James Hutton y Charles Lyell.

Las ideas de Wegener, aunque consideradas *interesantes*, se enfrentaron con la mayoría de sus coetáneos. Solo algunos, como Alexander Logie du Toit se arriesgaban a seguirle de forma

incondicional. El mecanismo propuesto para explicar el movimiento, el desplazamiento de esas masas, así como las evidencias geológicas, no convencía.

| *La tectónica de placas*

Debieron transcurrir tres décadas, y puestos a indagar en la situación socio-política, un momento en el que tras una atroz contienda, la Segunda Guerra Mundial, la Ciencia comenzara a vincularse a aspectos de bienestar, de ascenso social, a la obtención masiva de recursos. El elemento militar no se relegaba, pero hemos de ser conscientes y justos al reconocer que en buen número de casos el progreso ha seguido de su mano. Aspiraciones como conquistar el espacio, alunizar o desentrañar las incógnitas del fondo del océano, con el desarrollo tecnológico que ello implicaba, se convirtieron en prioridad entre las potencias. Por otra parte, la situación económica global de lo que se definía como *mundo desarrollado*, bien del este, bien del oeste, lo posibilitaba.

Entre los programas que comenzaban a definirse al final de los '50 destacó el proyecto MOHOLE cuyo objetivo final era obtener muestras del manto de la Tierra, esto es, del material que

compone su interior, más accesible en el océano, tal como revelaban los ensayos geofísicos. Organizado y defendido por Walter Munk y Harry Hess, este proyecto se inicia en 1957 y finaliza en 1966, empleando como plataforma el buque CUSS I, poseedor de técnicas de posicionamiento dinámico, desarrolladas para la exploración de hidrocarburos. En esos años se realizaron diversas campañas en el Atlántico, llegando a perforar 601 m en una columna de agua de 3600 m, lejos de lo que era la meta planteada.



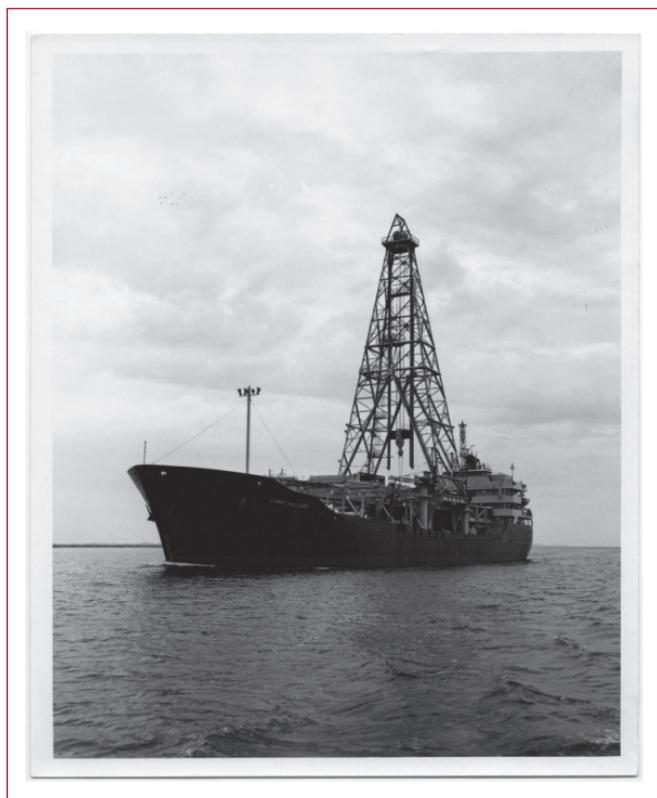
| Buque CUSS I asignado al proyecto MOHOLE (IODP) |

Pese al aparente fiasco que supuso el proyecto MOHOLE, se demostró la posibilidad de abordar estudios en el océano para recuperar material que completase el disponible en el continente, en una superficie muy superior a la emergida. Deberían cambiarse los objetivos, no hacer prioritario el sobrepasar discontinuidades, sino tener en primer lugar una idea de cómo es el fondo oceánico y la roca que constituía sus primeros centenares de metros.

El 21 de julio de 1969 Neil Armstrong pisaba la Luna, un logro científico y tecnológico sin precedentes. Se dispuso de material del satélite, pero en cambio el desconocimiento del océano y sus fondos era prácticamente absoluto (disculparán la cantilena no menos cierta por su reiteración). Aprovechando esa vorágine científica, a partir de la experiencia del proyecto MOHOLE se crea el consorcio científico más fructífero relacionado con las Ciencias de la Tierra aparecido hasta el momento, el *Deep Sea Drilling Project* (DSDP), que operó con diversos socios e instituciones entre los años 1968 y 1983. El objetivo era simple, muestrear el fondo de los océanos para caracterizar su composición, génesis y reconstruir su historia. En el programa

se emplea un buque diseñado originalmente para la industria, el *Glomar Challenger* (bautizado con ese nombre en honor al emblemático *HMS Challenger*, primera embarcación oceanográfica en el sentido moderno del término). El *Glomar Challenger* está equipado con las más modernas técnicas para la navegación, así como con una torre que permite la perforación y recuperación de rocas con diferente consistencia a una profundidad de 7000 m, y, lo transcendental, con un sistema de posicionamiento dinámico que lo estabilizaba incluso en condiciones de *mar adversa*.

Durante su existencia el *Challenger* perforó un total de 325,548 m, recuperando 170,043 m de roca en 96 expediciones en los cinco mares, llegando en una ocasión a 1741 m por debajo del fondo.



| Glomar Challenger (DSDP) |

En las expediciones del DSDP se enrolaron los más relevantes científicos de aquel momento. En campañas de dos meses y equipado con los laboratorios más modernos del momento,

sedimentólogos, geofísicos, micropaleontólogos, geoquímicos, paleomagnetistas, mineralogistas y petrólogos, compartían camarotes atestados e ilusión. Entre los que se encontraban pendientes de los resultados o participando directamente en las campañas estaban personalidades como el mencionado Harry Hess, junto con Tuzo Wilson, Walter Pitman, Allan V. Cox, Linn Sykes o Maurice Ewing.

La campaña 2 [Leg 2] del DSDP cruza la Dorsal Centrooceánica, una cordillera submarina activa que recorre de sur a norte el Atlántico. Perfora los márgenes y cuencas situadas al este y al oeste. Los resultados no podían ser más interesantes: el material volcánico que parte de la dorsal muestra un patrón especular. Las bandas de polaridad magnética, una de las técnicas empleadas, consistente en identificar la orientación de diminutos elementos minerales magnetizados, minúsculas brújulas que conservaron su inclinación una vez solidificó el magma en que se produjeron, así como las edades que proporcionan los microfósiles en los sedimentos acumulados directamente sobre el material que se ha ido generando paulatinamente, son idénticas a uno y otro lado de la cadena

sumergida. Se prueba por tanto que el fondo oceánico es dinámico, el basalto surge de la dorsal y se expande en los océanos, y con ellos las masas continentales empujadas, en fragmentos, con diferente conexión e interacción. La velocidad de deslizamiento varía, pero para que se hagan una idea, sería del orden del crecimiento de nuestro cabello, contemplando en su variabilidad toda la casuística de cabezas, del calvo y al lanudo.

Surge la teoría hoy vigente, la *Tectónica de Placas* que explica el desplazamiento de secciones de corteza terrestre, sobre la estructura más dúctil que constituye el manto, así como las rocas asociadas a las distintas características físicas de presión y temperatura. La tectónica de placas expresa la génesis de procesos sísmicos, su intensidad y localización, al tiempo que la generación de sistemas montañosos (procesos orogénicos), o su antítesis, las fosas más profundas de los océanos. Queda pues esclarecido aquel acontecimiento histórico, el terremoto de Lisboa, que comentábamos: la liberación de energía como consecuencia del rozamiento entre las placas Euroasiática y Africana, en la denominada falla de Azores-Gibraltar, y verán

que asumido el mecanismo, no resulta muy complicado explicar el origen del *blanco* presente, polar, que hoy poseemos y de aquellos del Paleozoico citados.

Entonces, precisando, ¿cuál es el origen del hielo que hoy existe en la Tierra, de lo que conocemos como criosfera?

| POLOS Y MICROFÓSILES |

COMO apunte preliminar habría que decir que el origen fue distinto en el sur y en el norte, tanto en edad como en el proceso generador en sí, aunque en ambos casos la tectónica, el juego que se establece entre placas y microplacas, migraciones y colisiones, es el responsable.

El inicio del hielo en el sur, constituyente de aproximadamente el 90% de la criosfera, está datado en torno a 35 millones de años. Con anterioridad, desde que se iniciase la separación de la Pangea hasta constituir los océanos que hoy conocemos, el Planeta no contó con masas heladas estables como las mencionadas en el Carbonífero. Los océanos actuales definen sus líneas maestras hace aproximadamente 100 millones de años, con leves diferencias paleogeográficas que, en principio, difícilmente podrían hacer suponer cambios tan abruptos. Los indicadores paleoambientales coinciden en que la temperatura media era de varios grados por encima de la actual.

En esta situación, el escenario es absolutamente diferente al que observábamos en el Paleozoico. Ahora los continentes se encuentran diseminados, incluso con una tendencia a concentrarse hacia el hemisferio norte y el océano está compartimentado.

Hace 35 millones de años India y Australia inician un desplazamiento hacia el norte, mientras que la Antártida emprende una tímida separación de América, la definición de una *conexión oceánica* que une Atlántico y Pacífico por lo que hoy conocemos como paso de Drake —en honor al corsario Sir Francis Drake, héroe inglés, villano español—. Una vez se hace efectiva esa comunicación, se forma una activísima célula oceánica, que a expensas de los vientos dominantes entre polos y trópicos, y el inmutable efecto de Coriolis, da lugar a la Corriente Circumpolar Antártica, que ejerce de aislante de un continente que ha alcanzado el punto en el que menos energía solar se recibe. La respuesta del sistema es la definición de un casquete que hoy en día en su punto de mayor espesor sobrepasa los 4000 m con un mar helado estacional que duplica en el invierno austral su superficie blanca. El efecto del frío se ve reforzado por un

intenso albedo —la reflexión de la luz solar— retroalimentando el proceso. Para ese mismo periodo se ha estimado un notable descenso en la concentración de dióxido de carbono en el sistema, que sin lugar a dudas sumaría su acción a la caída de las temperaturas. Constituye un episodio en el que, la colisión de algunas placas continentales dan lugar a lo que conocemos como orogenia Alpina, causante de elevaciones como los Alpes, Pirineos o Himalaya, y su consiguiente aportación a la criosfera con el hielo que se acumula en sus glaciares.

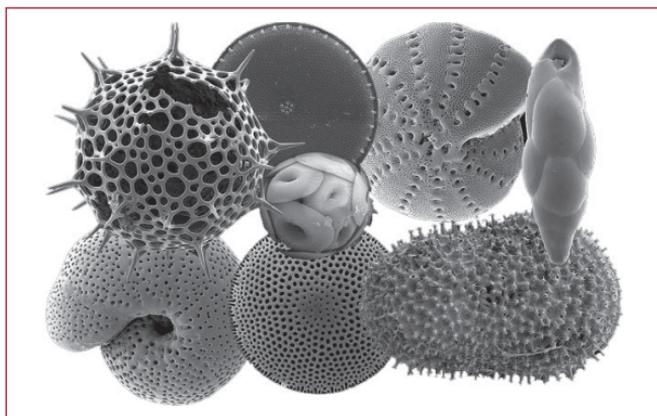
Algunas de las evidencias de este acontecimiento que, siendo justos podríamos definir como la génesis de la criosfera, dada su entidad, se han hallado en los organismos que habitaban en aquellas aguas, flotando formando parte del plancton, posados sobre el fondo, u ocupando los intersticios o galerías del barro. Las peculiaridades de las asociaciones, su dependencia de la temperatura, de la oxigenación, de la disponibilidad de alimento, así como de la batimetría a la que pudieron haber vivido, han quedado en un universo fósil de millones de millones de elementos microscópicos, los microfósiles, esqueletos a veces calcáreos, a veces silíceos, otras

de compuestos orgánicos resistentes en el tiempo, que hemos aprendido a interpretar, y que recogemos en los sedimentos que día a día, año a año se han ido acumulando hasta formar rocas, superando a veces el 95% de las mismas. Se identifican con aquella otra acepción que encontraba en los diccionarios: el blanco del hueso. El fango del fondo submarino, el barro, más o menos consolidado, está compuesto por estos restos orgánicos.

El proceso de acumulación del microplankton que posee esqueleto mineralizado se realiza esencialmente por un mecanismo por el que esas diminutas partículas, de decenas de milésimas de milímetro, una vez mueren inician el descenso hacia el fondo aglutinadas por un entramado pegajoso que, atiendan, conocemos bajo el término de *nieve marina*, así descrito por otro destacado explorador-científico, ahora de aventuras submarinas y tropicales: William Beebe.

El aspecto que muestran cámaras submarinas, o la vista que Beebe debió tener desde aquellos singulares batiscafos, es similar al de los copos descendiendo en la columna de aire, cubriendo finalmente el fondo. Cocolitóforos,

foraminíferos, diatomeas, silicoflagelados, dinoflagelados, radiolarios, gasterópodos y ostrácodos, son algunos de estos restos que se mezclan con limos y arcillas, con compuestos orgánicos que los amasan, o con cristales que se producen en los mismos intersticios del lecho oceánico, y casi siempre, finalmente, roban protagonismo a su color, ocultándose en grises y ocres con el tiempo. Un universo blanco solo visible en detalle con la ayuda de la técnica, microscopía convencional o electrónica. Su identificación es el primer análisis que se lleva a cabo en cualquiera de las expediciones oceanográficas de las que he tenido ocasión de hablar.



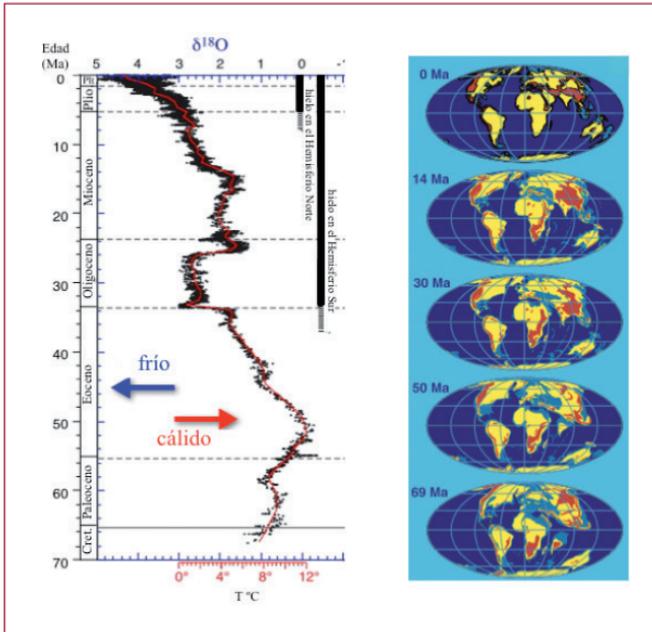
| Microfósiles oceánicos |

Pero mudemos de hemisferio. El norte, el blanco del norte, es *joven*, apenas cuenta con 3 millones de años. Para ese tiempo la posición de los continentes, su morfología y orografía era esencialmente la misma que la del presente. Solo variaciones nimias lo diferenciaban, aunque como veremos, determinantes. Hasta bien transcurrido el Plioceno (después de los ~5 millones de años), con temperaturas medias superiores a las actuales, un rasgo aparentemente insignificante lo distinguía del actual mapamundi: los océanos Atlántico y Pacífico se encontraban comunicados por un corredor en latitudes bajas. En aquel momento el istmo de Panamá no existía, de manera que ambas cuencas intercambiaban aguas y energía por esa región. Esta comunicación se vio progresivamente reducida hasta su cierre efectivo hacia los 3 millones de años. Una vez más los microfósiles dan cuenta de un cambio drástico en las asociaciones previas y posteriores a la emersión de la barrera continental, mostrando floras y faunas frías en latitudes que hasta el momento eran incapaces de colonizar. La separación *mediolatitudinal* de la conexión dio lugar al establecimiento del actual modelo

circulatorio oceánico, lo que conocemos como cinta transportadora oceánica (*Ocean Conveyor Belt*), o Circulación Termohalina. Esta idea esbozada por Wallace Broecker en los '70, asume que la distribución energética en el océano, se produce mediante la generación de masas de agua profundas en el Atlántico Norte, una vez las masas superficiales cálidas y poco densas han ido ganando salinidad al integrarse en el giro subtropical. Alcanzada cierta latitud, esa agua se enfría y hunde al ganar densidad, iniciando un recorrido inverso, en profundidad, hasta las inmediaciones de la Antártida, donde la Corriente Circumpolar Antártica la pone a su vez en movimiento alrededor del continente con su blanco consolidado, arrastrándola a las cuencas Índica y Pacífica. Esa masa de agua constituye el 75% del total de la que se reconoce en el océano: 1000 millones de km³.

Hacia los 3 millones de años, el calor que hasta entonces alcanzaba latitudes altas, ve limitada su influencia con el hundimiento descrito hacia latitudes más bajas, y un *frente* frío progresa dando lugar a un aislamiento térmico que posibilitó la acumulación de hielo continental en el norte de América, Eurasia y, hasta

hoy, en Groenlandia, y con ello el inicio de una dinámica dominante, la Era Glacial, la de las *glaciaciones*.



| Relación isotópica $\delta^{18}\text{O}$ indicando tendencias térmicas vs. paleogeografía global (modificado de Zachos et al., 2001) |

| *En las profundidades*

COMO se habrá podido comprobar, los científicos dedicados a la reconstrucción de la historia de la Tierra nos movemos en esa *cuarta dimensión* de forma comfortable. Cruzamos océanos, unimos continentes, visitamos en el hogar de seres que vivieron hace cientos de miles o millones de años y lo escudriñamos. La costumbre, el asumir la técnica, no obstante, no nos hace olvidar el esfuerzo que ello ha supuesto, la cantidad de muestras, mapas y expediciones que se han hecho, el inusitado número de láminas que han pasado por los microscopios de investigadores de todo el mundo.

Páginas atrás me referí al emblemático programa DSDP y su repercusión en la Ciencia. Entrados los '70, tras los coletazos de la crisis petrolera que tuvo lugar, el programa se ve afectado dramáticamente por reducciones de presupuesto que precipitan su finalización en 1983. Por fortuna el programa contaba con una reputación sobresaliente, en particular el potencial de aplicabilidad de sus resultados (ciencia básica)

a la industria, por lo que la siguiente iniciativa fue bienvenida por la comunidad internacional. A partir de 1985 se establece como sucesor natural el *Ocean Drilling Program* (ODP), ampliado a una serie de nuevos socios que compartirán fondos (Australia, Alemania, Francia, Japón, Reino Unido y el Consorcio Europeo para Perforación Oceánica —ECOD— incluyendo a doce países entre los que llegará a estar España). A tenor de los resultados obtenidos en el anterior proyecto, los retos del nuevo se diversifican, si bien como emblema del mismo podría decirse que surge la Paleoceanografía, ciencia en ciernes cuyo objetivo es ampliar el conocimiento histórico del océano —por ende del Planeta—, particularmente su evolución climática, pero centrándose en episodios más concretos y accediendo a lo se conoce como “alta resolución”; esto es, trabajar con unidades temporales de entidad milenaria y submilenaria, incluso secular o inferior, algo impensable para los patriarcas de la Geología. Este aparente pequeño cambio de estrategia suponía una modificación instrumental radical. Las capacidades del *Challenger* no permitían recuperar la muestra requerida. Por ello, el programa se diseñó con una nueva plataforma, el

Joides³ Resolution, un perforador proveniente de la industria pero al que se le dotaba de los últimos adelantos tecnológicos, así como de laboratorios a bordo que posibilitaban trabajar a una treintena de científicos, si bien, todo hay que decirlo, adoleciendo de cierto confort.



| Joides Resolution (ODP/IODP) |

A partir de 2004 y hasta 2013, se produce una reestructuración del programa, modifi-

³ JOIDES, *Joint Oceanographic Institutions for Deep Earth Sampling*

cándose la cuota de socios y su implicación, pasándose a denominar *Integrated Ocean Drilling Program* (IODP), al tiempo que el *Joides* se remodelaba y se incorporaba una nueva embarcación, el *Chikyu*, con un desplazamiento de 57,000 T, en lugar de las 15,000 T del *Joides*. La capacidad de perforación de estas plataformas rebasaría la imaginación de los precursores de los programas de perforación oceánica, los que perseguían aquel sueño del MOHOLE. En 2012 el *Chikyu* alcanzó los 7049.5 m bajo el fondo en el mar de Japón, con excelente recuperación de material. El programa se completaba con iniciativas más locales, empleando embarcaciones diversas, acomodadas a objetivos definidos e idóneas para puntos concretos del océano, como el caso del *Vidar Wiking* (y tres rompehielos asociados) que consiguen perforar el Polo Norte en 2004, o el *Marion Dufresne*, perteneciente a un programa asociado IMAGES (*International Marine Global Change Studies*), que obtiene secuencias altamente resolutivas, si bien más cortas, para las últimas decenas de miles de años.

Hasta el año 2013 el *Joides*, emblema de IODP —probablemente noten en mi discurso el tono

afectuoso para con esta embarcación, en la que sumando expediciones, he pasado un año de mi vida—, ha recorrido de nuevo la totalidad de los océanos en más de 180 expediciones, llegando a perforar (y recuperar) 300,000 m de sedimento, hasta una profundidad de 2111 m por debajo del fondo. Imaginen encima, a veces, 6 km de agua.



| Chikyu (JAMSTEC/IODP) |

Desde 2013 el programa mantiene el acrónimo, IODP, aunque responde a una nueva denominación, *Integrated Ocean Discovery Program*.

Cosas de la política y de las agencias norteamericanas provisoras de fondos que consideraron incorrecto mantener el término *drilling* tras el accidente del Golfo de México de 2010, que al parecer la opinión pública asociaba a *desastre* (sic). En cualquier caso, no quieran hallar en mis palabras, aquí, indicios de sublimaridad perversa ni tentativa apologeta de lo oscuro.

| MICROCOSMOS PALEONTOLÓGICO Y ESPECTRÓMETROS |

LOS FUNDADORES de la Paleocianografía provienen indefectiblemente de la Micropaleontología, y en su inmensa mayoría fueron especialistas en foraminíferos —protozoos con caparazón, planctónicos y bentónicos—, una herramienta ampliamente utilizada en la industria de los hidrocarburos, aunque desde los primeros años se añadirían a la lista otros grupos orgánicos ya citados aquí.

Tratar de justificar a quién se debería otorgar el honor de constar como primer paleocianógrafo es igual de complejo que concretar quién fue el primer micropaleontólogo. Convendrán que carece de sentido en este contexto, porque incluso alguno de mis colegas encontrarían justificación —con razón— en remitirse a los anales de la Geología, por lo que, a riesgo de ser injusto, y escudándome en la frase, de Francisco de Quevedo,

*Peor es permitir mal médico que las enfermedades.
Menos mal hacen los delincuentes que un mal juez,*

me pongo en la piel de un villano humilde y sensato, obvio una de las dedicatorias de esta obra,

Política de Dios y gobierno de Cristo —*A los doctores, que dan humo con el pábilo muerto de sus censuras, muerden y no leen*—, y me aventuro con un nombre: Cesare Emiliani.

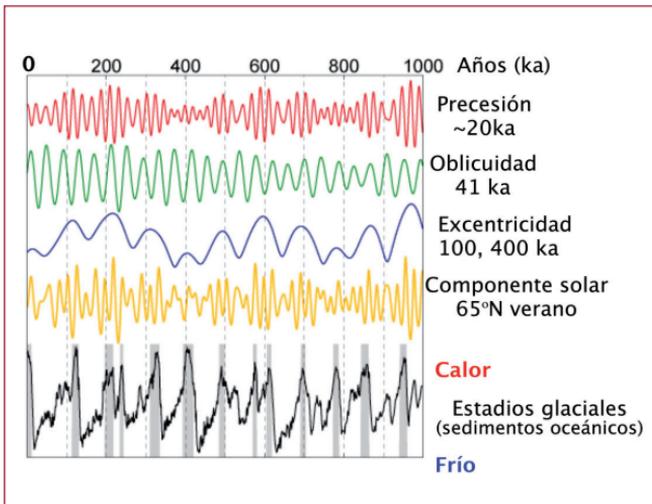
Emiliani participa ya en el análisis de muestras recuperadas en algunas de las campañas oceanográficas que se han referido, promoviendo alguna iniciativa a la sombra de MOHOLE, como el caso de LOCO (*L*ong *C*Ores). Con una robusta base micropaleontológica, Emiliani, partiendo de las ideas desarrolladas por Harold Urey, premio Nobel de Química en 1934, analiza la relación de isótopos pesados *vs.* ligeros del oxígeno en conchas. La hipótesis planteada era que esa relación isotópica extraída de la calcita de los esqueletos variaba en función de la temperatura del agua oceánica en la que habían vivido.

El estudio de muestras en diferentes océanos le llevó a concluir que para los últimos millones de años, en el episodio conocido como Cuaternario, existía una *ciclicidad correlacionable* con los lapsos fríos alternantes con cálidos que Louis Agassiz ya identificara en su obra de 1840 *Étude sur les glaciers*, conocidas como *edades del hielo*, las *glaciaciones del Cuaternario* que el mismo Darwin ya mencionara.

Estos trabajos y los que paralelamente comenzaron a implementarse empleando el material disponible, supuso una verdadera revolución al mostrar no solo su repercusión global, sino una periodicidad que hallaba su explicación en aspectos externos a la dinámica terrestre, extraplanetarios.

En los años '20 Milutin Milankovitch había desarrollado su teoría orbital. Explicaba teóricamente que la insolación recibida por la Tierra dependía de la combinación de tres parámetros: excentricidad, oblicuidad y precesión, reiterados en lapsos de 400,000/100,000, 41,000 y ~20,000 años, respectivamente. Su relación con la historia del clima terrestre para los últimos cientos de miles de años ya fue adelantada por Wegener y Köppen en *Los climas del pasado geológico* ya mencionada, sin embargo hasta ese momento no dejaba de ser una hipótesis. Los trabajos de Emiliani evidenciaron esa relación, estableciendo el paradigma orbital vigente, e inmediatamente se vieron completados por aportaciones relevantes de micropaleontólogos que poco a poco se arrimaban al espectrómetro de masas, como las de Douglas G. Martinson, James D. Hays, John Imbrie, Allan

Mix, Nicholas Pias, Theodore C. Moore Jr. (profesor invitado de esta universidad) y Nicholas J. Shackleton, que derivaría en el proyecto SPECMAP, patrocinado por la *National Science Foundation*, y que asentaría definitivamente el paradigma con la creación de una escala cronológica fundamentada en la variabilidad de aquella razón isotópica.



| Parámetros orbitales propuestos por Milankovitch para explicar la ciclicidad glacial-interglacial (Lisiecki y Raymo, 2005; Berger y Loutre, 1990) |

Pero aunque la idea de Emiliani era correcta *grosso modo*, existía un matiz transcendental para explicar el registro isotópico que apuntaba directamente a la importancia del blanco. Fue precisamente Shackleton (Nick, como prefería que se le llamase pese a estar autorizado por su majestad Isabel II a usar el de *Sir* Nicholas Shackleton) quien planteó el matiz: el contenido de las diferentes especies isotópicas del oxígeno en el agua oceánica, y consecuentemente en los esqueletos de los microfósiles, estaba directamente relacionado, no tanto con la temperatura, como con la acumulación de hielo en los casquetes polares e indirectamente con el nivel del mar. Así pues, con el crecimiento durante episodios glaciales de masas polares continentales se produciría un incremento del isótopo pesado en las aguas oceánicas (con una reducción en la nieve que se acumula en los polos), al tiempo que un descenso del nivel del mar. Durante los episodios interglaciales acontecería lo contrario. Lo más curioso de la investigación es que esta propuesta, la importancia del hielo, se puso de manifiesto estudiando testigos sedimentarios oceánicos recuperados en regiones tropicales, dando prueba de su globalidad.

En este momento, haciendo de alguna forma un resumen de mi experiencia investigadora, me viene a la memoria alguno de los acontecimientos que me marcaron. Sirva también de homenaje a aquella casi primera generación de maestros.

Allá por el año 1991, tras la defensa de mi tesis doctoral y durante una estancia en la Universidad de Estocolmo con el profesor Jan Backman, fui invitado a participar en una expedición del entonces ODP, eso sí con cierta sensación de paria, aunque exultante, al embarcar como “*no flag*”, adscrito a la *Texas A&M University*. España iniciaba su andadura en el programa, con escasos medios y pocas posibilidades de que un español pudiera acceder, y menos un recién doctorado (la cuota entonces era de 0.2 científico-español por año), pero el profesor Backman y mi otro maestro en cocolitos, el profesor Domenico Rio, entonces en la Universidad de Parma, debieron jugar un papel importante (nunca me lo han dicho claramente, pero lo sospecho). El 1 de mayo de 1991 zarpaba a bordo del *Joides Revolution* de la Ciudad de Panamá para durante dos meses recuperar material del entorno de las islas

Galápagos, con el objeto de reconstruir la historia de los últimos millones de años de aquel sector y ampliar la escala isotópica de referencia hasta que la capacidad de recuperación del sondeador del buque lo permitiera. Se trataba de la región donde se habían testado las escalas astronómicas empleadas por SPECMAP a la que accedía por primera vez un buque con ese potencial de muestreo. Un número relevante de los científicos que se encontraban a bordo eran parte de la “*bibliografía*” viva de la Paleoceanografía, algunos firmantes de los trabajos que fundamentaron las bases: Nick Pisias, Allan Mix, Larry Mayer, Jack Baldouf, Edit Vincent, Isabella Raffi (otra de mis maestras), Margaret Lyle, Ted Moore, Allan Kemp, junto con otros de mi generación, entonces con los doctorados recién leídos, y con todos, Nick Shackleton.

Fueron dos meses intensos en los que, entre mareo y mareo, colmado de un producto sin nombre que me suministraba un médico filipino simpatiquísimo que me permitía trabajar doce horas al microscopio, eso sí, con una sensación más propia de estar en las nubes que sobre olas, participé con esas personalidades del día a día de la Ciencia, generando datos e

interpretando inmediatamente. Un torbellino de informes que aquellos más adiestrados digerían velozmente e incitaban a que siguieras su ritmo. No había más remedio.

Nick tenía su microscopio a mis espaldas. Trabajaba con foraminíferos bentónicos al tiempo que ejercía de *correlacionador*, una de las labores más delicadas en estas expediciones, de manera que disponer de datos precisos era fundamental para generar sus modelos. Yo me encargaba de la biostratigrafía de nanofósiles calcáreos, proporcionando edades una vez identificaba los organismos que iban apareciendo en mis muestras, cuya visión no acababa de acomodarse al vaivén de las olas. Cada poco me solicitaba información acerca de eventos que le permitieran comparar el material. A veces, una o dos al día, siempre elegantemente, pero sin esperar negativa, en su impecable inglés insinuaba, José, ¿sería usted tan amable de ir a remuestrear el intervalo entre estos centímetros y tener la gentileza de comprobar en su microscopio si se encuentra presente *Coccolithus miopelagicus*? José no rechistaba: no se le habría ocurrido. Descendía hasta el descomunal frigorífico en el que se alojaban

los testigos ya archivados, se colgaba el abrigo y durante media hora verdaderamente glacial, abría de nuevo los estuches, tasaba y recogía nueva muestra.

Doce horas espalda con espalda durante dos meses en los que no hubo días de descanso, facilitan que las personas se lleguen a conocer y compartir aficiones. Dentro de su extrema rigidez, de su obsesiva dedicación a las muestras y datos que tenía delante, pudimos hablar mucho de literatura clásica inglesa, algo de española: Cervantes y Cervantes, y sobre todo de música. Era un excelente solista de clarinete y llevaba el instrumento a las expediciones para estudiar a escondidas en algún rincón de la nave. Pero en la familiaridad del “*paleolab*” como llamamos a nuestra esquina, discutíamos acerca de las tres o cuatro versiones de los conciertos de clarinete de Mozart y Stamitz que tenía en sus casetes, y me explicaba algunos aspectos técnicos que yo desconocía. Tras unas semanas de insistir, conseguí que disfrutara el concierto para clave de Manuel de Falla, que apreciara *Noches en los jardines de España*, pero no pude convencerle de la maravilla musical de otra obra que viajaba conmigo, *Luisa Fernanda*, de Federico Moreno Torroba. “No me

siento muy cómodo escuchando ópera”, eran sus palabras de disculpa. Del jazz, rock and roll u otras músicas populares que se escuchaban cercanas, en los laboratorios donde trabajaban los sedimentólogos y paleomagnetistas, con los técnicos moviendo metros y metros de testigos de sedimentos que llegaban cada media hora a compás cuatro por cuatro *prestissimo*, ni comentar. Aprovechaba cualquier oportunidad para dejar en “*standby*” el reproductor que así sonara.

El esfuerzo mereció la pena. Tras la expedición ODP 138 se publicó la escala astronómica que identificaba intervalos glaciales e interglaciales hasta los 13 millones de años en una secuencia continua.

Con posterioridad compartí de nuevo con Nick una expedición en el Atlántico tropical a bordo del *Marion Dufresne*. Ni su aspecto ni su conversación cambiaron.

| *Desentrañando la Historia*

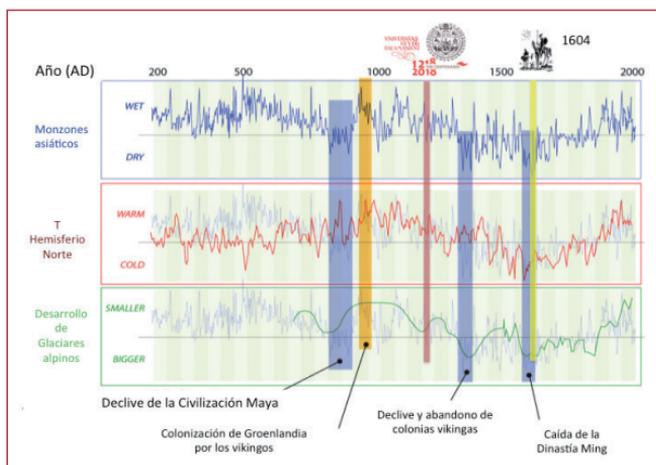
LA DINÁMICA glacial-interglacial en el Cuaternario ha sido responsable de cambios drásticos en el paisaje de Planeta, particularmente en latitudes medias, hoy descubiertas de hielo pero que solo hace unos 20,000 años poseían una capa perenne de varios cientos de metros, como sucediera en el norte de Europa.

Mi experiencia de geólogo me dice que en foros generalistas, un discurso tratando millones y cientos de miles de años no es siempre fácil de asimilar, y si bien nadie discute el valor y relevancia de su ciencia (sobre todo cuando se explica su componente económico y relación con recursos naturales, algo verdaderamente anecdótico), domina un sentido de lejanía, derivado de la aparente desconexión de aspectos sociales. Parece que en tanto y cuanto el humano no esté contemplado, la lucubración entra en una dimensión que se acerca más a disciplinas literarias, a una creación probada, pero con componente de irrealidad. No precisa justificación, pero quizás sí explicación.

Nadie pondrá en duda que el clima y la variación del mismo ha sido determinante en la evolución de sociedades, particularmente en episodios en los que el desarrollo tecnológico y el control de espacios y agentes fue limitado. Sin entrar en detalles que requerirían de otras lecciones, quiero referirme al declive de algunas civilizaciones por acontecimientos más o menos dilatados en el tiempo, en general de orden secular e inferior. Casos llamativos fueron el colapso del Antiguo Egipto hace 4000 años por devastadoras sequías, la desaparición del imperio Maya, por una intensificación del fenómeno de El Niño en el Pacífico en el siglo IX, o la caída de la dinastía Ming en China a finales del XVI coincidiendo con un episodio de extrema sequía como consecuencia de un periodo en el que el monzón de verano fue especialmente poco activo; o, en otro orden, la posibilidad de colonización de Islandia, Groenlandia y América por los vikingos aprovechando la bondad climática que aconteció hace 1000 años durante un óptimo climático medieval y su abandono 300 años después con el inicio de caída de temperaturas.

Si bien es cierto que estos colapsos o nuevas situaciones tienen una componente climática

como detonante, no menos real es que el desenlace acontece por factores más complejos que explicarían mejor mis compañeros de otras ramas.



| Eventos climáticos suborbitales/históricos y su relación con acontecimientos sociales relevantes (*National Science Foundation*) |

Pero como paleontólogo, no puedo evitar retrotraer el discurso unos milenios atrás, y re-cordar que nuestra evolución, la de nuestros ancestros más primitivos, así como la adquisición de habilidades, y sobre todo la colonización de áreas por *Homo sapiens*, estuvo condicionada por el blanco. Nuestra especie aparece en África

hace unos 200,000 años, y desde allí inicia una migración y asentamiento progresivos y escalonados al resto de continentes. Alguna de las barreras que encuentra resultan momentáneamente infranqueables. Pongo por ejemplo el problema que supondría franquear el estrecho de Bering, o la colonización de islas como Micronesia y Polinesia por parte de los grupos que ya ocupaban Europa y Asia. La colonización por el norte de América de la cultura Clovis no se realiza hasta hace 14,000 años, cuando Beringia, pese a las bajas temperaturas existentes, se hace franca, desapareciendo el mar como consecuencia de un descenso de más de 100 sobre el nivel actual. Algo similar, en puntos muy distantes, acontece en la ocupación de buena parte de las islas polinésicas. Ese descenso del nivel global de las aguas determina que se multiplique la tierra emergida, al tiempo que se facilita la navegación.

| *La ruptura evidenciada en el hielo*

Esa periodicidad, esta alternancia entre blanco y color, parece algo consustancial a la propia naturaleza del Planeta, y consecuentemente inalterable en su repetición, que se ha

de asumir, agradecer o sobrellevar. Cide Hamete Benengeli, el *filósofo mahomético* del Quijote, resume lo que en definitiva podría surgir de lo que se viene exponiendo hasta el momento, cuando comenta la aventura en la ínsula de Baratalia de un escarmentado Sancho, imagino que poco consciente de que aquel periodo, denominado Pequeña Edad del Hielo, fue extremadamente frío, comparado con el de bonanza térmica actual o, anteriormente, cuando nuestra universidad fue fundada:

“Pensar que en esta vida las cosas della han de durar siempre en un estado es pensar en lo escusado; antes parece que ella anda todo en redondo, digo, a la redonda: la primavera sigue al verano, el verano al estío, el estío al otoño, y el otoño al invierno, y el invierno a la primavera, y así torna a andarse el tiempo con esta rueda continua”.

Acaso esta necesidad de explicar la evolución del clima en aspectos más vinculados con los humanos, haya sido lo que ha determinado la necesidad de localizar archivos climáticos fidedignos ya que el registro instrumental no alcanza más que un siglo. Surge la necesidad de incrementar el conocimiento sobre el funcionamiento de los sistemas climáticos con

una perspectiva histórica que posibilite abordar retos surgidos en las últimas décadas, como es el tergiversado Cambio Climático antrópico, interpelado y vilipendiado, convertido en una cuestión de fe, objeto de debate periodístico — escaso en el científico —, por los que se aferran a la mera contemplación de la estacionalidad que comentaba Cide Hamete. Y nada más lejos de la realidad. Precisamente este conocimiento permite concluir que se está produciendo una modificación climática sin precedentes desde la perspectiva humana.

El secretario de las Naciones Unidas, Ban Ki-moon, en la presentación de los resultados del *Panel Intergubernamental sobre el Cambio Climático*⁴ constituido por más de 800 científicos, y el respaldo de otros 3000 en todo el mundo, en Copenhague, el 2 de noviembre de 2014, tras la celebración de la cumbre de Ecuador, expresa contundentemente:

This Report offers three key messages:

- *One: Human influence on the climate system is clear - and clearly growing*

⁴ IPCC: *Intergovernmental Panel on Climate Change*

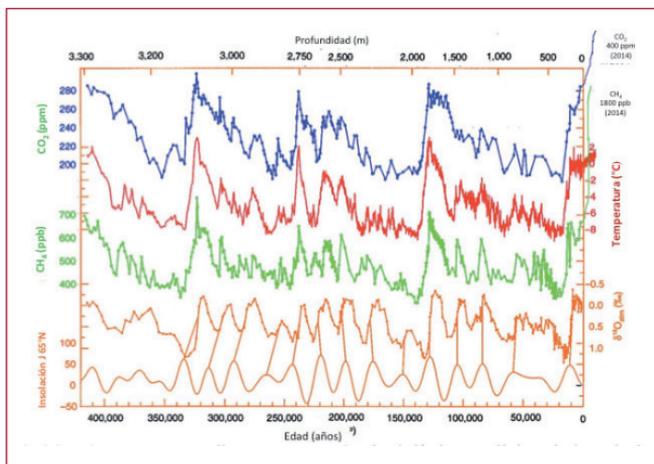
- *Second; we must act quickly and decisively if we want to avoid increasingly destructive outcomes.*
- *Three: We have the means to limit climate change and build a better future⁵.*

Del que en este momento debo ocuparme es evidentemente del primer punto —puro *escepticismo racional*: no hay réplica—, pero me ha parecido oportuno subrayar los otros, dada su transcendencia social.

El aportar estos datos de manera fehaciente se debe en buena medida al esfuerzo de los paleoclimatólogos y paleoceanógrafos que han podido establecer con precisión cómo evoluciona el clima y sus ritmos. Durante los últimos años se ha dispuesto de una nueva herramienta, un nuevo archivo esencial para constatar lo que los especialistas del IPCC exponen: los testigos de hielo.

⁵ Este informe presenta tres ideas clave:

- *Primera: la influencia humana en el sistema climático es clara - y claramente creciente.*
- *Segunda: tenemos que actuar con rapidez y decisión si queremos evitar resultados cada vez más destructivos.*
- *Tercera: tenemos los medios para limitar el cambio climático y construir un futuro mejor.*



| Temperatura, CO_2 y metano extraído de testigos de hielo comparado con registros isotópicos de sedimentos oceánicos y su correspondencia con la temperatura global (IPCC, 2007, modificado) |

En los glaciares de Groenlandia y de la Antártida, el desarrollo tecnológico ha posibilitado la extracción de secuencias continuas de hielo. En el caso particular de la Antártida, se ha conseguido recuperar 4000 m, lo que supone un registro de en torno a un millón de años de nieve acumulada, en cuyos intersticios, en las diminutas burbujas que han fosilizado, quedó atrapada una fracción de la primitiva atmósfera, en la que se pueden estudiar sus

componentes. El proyecto europeo EPICA (*European Project for Ice Coring in Antarctica*), ha conseguido hasta el momento mostrar cómo era la atmósfera antártica desde hace 800,000 años. Por un lado se ha expuesto una vez más, pero ahora sin recurrir a medidas indirectas, que la dinámica glacial-interglacial es el proceso dominante, a lo que hay que añadir la existencia de pulsos en diferentes parámetros como la temperatura, de menor entidad. Su comparación con los testigos de Groenlandia, provenientes del proyecto GRIP (*Greenland Ice Core Project*), sensiblemente más reducidos, ya que no han conseguido registrar más que 100,000 años, manifiestan diferencias inesperadas en la intensidad y tiempos de respuesta de la señal entre norte y sur. Pero lo más trascendental en lo relativo al aspecto que ahora trato, es la demostración de que el registro de gases que producen el efecto invernadero, como es el caso del metano, y de forma destacada el dióxido de carbono, van a la par que la temperatura. El efecto de llegada de energía y el de retroalimentación del dióxido de carbono queda probado.

Los datos son contundentes. En el interglacial más próximo al presente, el episodio

conocido como Eemiense (hace $\sim 124,000$ años), la temperatura media del planeta fue en torno a 2°C por encima de la actual, y la concentración de dióxido carbono 270 ppm. El mes de mayo de 2014 en el observatorio de Mauna Loa, en el Pacífico tropical, referente internacional, se alcanzaron durante 3 días valores por encima de las 400 ppm. Se trata de una situación nueva en la historia reciente del Planeta, y no tanto los valores registrados como la rapidez con que se han alcanzado, fuera de toda norma de los modelos preindustriales que manejamos, desde que se ha establecido el ya oficializado

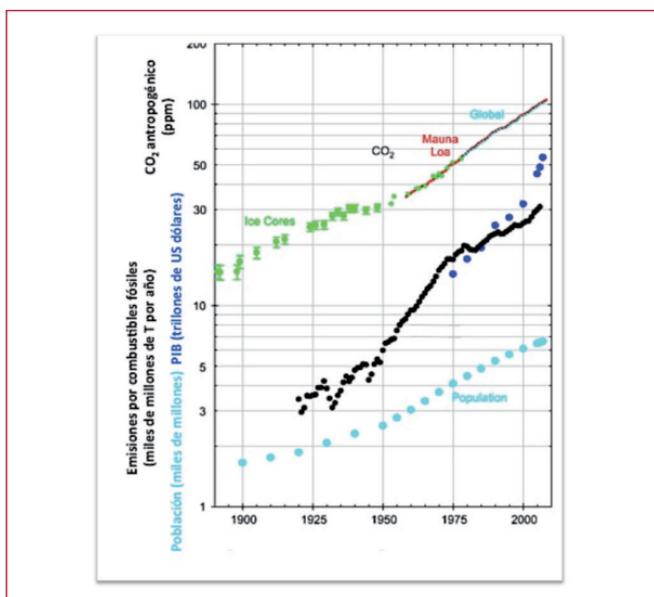
Antropoceno.

EL BLANCO se encuentra en riesgo, tanto en superficie ocupada, como en espesor del hielo que aporta el color.

La banquisa del Ártico ve año a año reducida su área, posibilitando incluso su navegación algunos meses del año. Algo como arrumbar el Paso del Noroeste, que en la época de Amundsen, en 1897, supuso todo un reto y le proporcionó gloria y prestigio, hoy en día puede hacerse sin grandes complicaciones, y según predicen nuestros colegas dedicados a la modelización, aún mejor en un futuro inmediato.

Algunas islas como las Carteret en Papúa Nueva Guinea, Maldivas o Kirivati en Nueva Zelanda se anegan y comienzan a plantearse la reubicación de sus habitantes, que en casos adquirirían estatus de refugiado allá donde les acogiesen. La expansión térmica del océano, pura ganancia de volumen por efecto del incremento de la temperatura y el deshielo, son los responsables.

No es cuestión de fe, no se trata de creer o no creer, la evidencia existe.



| Relación entre CO² antropogénico, consumo de combustibles fósiles y población (NOAA) |

En Hamlet, Ofelia le contesta a Claudio, mientras pasean por los pasillos de palacio,

*They say the owl was a baker's daughter. Lord, we know what we are, but know not what we may be*⁶.

⁶ Dicen que la lechuza fue antes una doncella, hija del panadero. Señor, sabemos lo que somos ahora, pero no lo que podemos ser.

En este fragmento de la tragedia no cabe paráfrasis, aunque trasladado a nuestro blanco, al tema, hay que ser tajante, y aunque reconozcamos que permanecemos en camino no siempre diáfano, existe la certeza de que estamos en condiciones de comenzar a vislumbrar qué seremos.

A fecha de hoy somos más de 7200 millones de personas en el Planeta, y las previsiones para las próximas décadas apuntan a los 9000 millones. Obvia decir que esa población conlleva un incremento desmesurado de necesidades energéticas para mantener los niveles, digamos de confortabilidad. Los modelos requieren ajustes, en ocasiones reformulaciones, pero todos los que se manejan hasta el momento son poco halagüeños. La inercia del sistema climático descarta un frenado instantáneo, y las buenas voluntades de los gobiernos hasta el momento son poco firmes.

Le queda mucho camino a la Ciencia. Debemos entender con mayor precisión los sistemas y sobre todo, desde mi punto de vista —este es el verdadero reto—, proporcionar modelos en los que se ajusten con precisión los tiempos en que se pueden dar los cambios, así como la

manera en que van a afectar a océano, atmósfera y biosfera.

Los datos que existen en los sedimentos y en el hielo son invaluableles, los únicos reales que permiten disponer de información fehaciente de situaciones pretéritas del océano, de la atmósfera o de la biosfera. La única referencia existente sobre cambios en la temperatura, pH del agua, salinidad, o productividad orgánica y su respuesta e interacción entre las geosferas. En efecto, no son situaciones idénticas, difieren los escenarios, pero se trata de los más próximos.

En este contexto, aquel principio que formularan los *uniformistas* James Hutton, John Playfair, Charles Lyell, y William Whewell, que abogaba porque “El presente es la clave del pasado”, vigente sin lugar a dudas, sufre una vuelta de tuerca, y permítaseme conciliar las nuevas ideas con un principio *futurista* —y no me refiero a las procaces propuestas de principios del siglo xx de Filippo Tommaso Marinetti, entiéndanme—, que podría ser enunciado como “En el pasado está la clave del futuro”.

| A MODO DE EPÍLOGO |

NO HA SIDO mi intención alarmar, más bien la opuesta, mostrar una historia de millones a cientos de años, de un tiempo en el que los únicos seres habitantes del Planeta eran células sencillas, hasta llegar a la sociedad en la que nos desenvolvemos, en la que como denominador común aparece un color, o el no color: el blanco. Hemos de ser humildes en tanto y cuanto nuestra especie es un elemento hoy significativo en el contexto del Planeta, pero con caducidad, eso sí, en tiempos que sobrepasan nuestra lógica, y por consiguiente insignificante en esa historia de miles de milenios.

Aprovechando la oportunidad, sin poder desprenderme de la impronta docente, quiero recordar con ustedes inquietudes de estudiante, que en este foro espero sirvan de ánimo. Rememorar aquellos sueños que veía inalcanzables: poder navegar en el buque científico que mostraban reiteradamente todos los libros de Geología, los documentales de *National Geographic*, el *Joides*; o, como alternativa, puestos a soñar, explorar y examinar rocas de la misteriosa Antártida. La fortuna me ha regalado poder trabajar

en la Antártida a bordo del *Joides*, con el orgullo de firmar como Universidad de Salamanca y llevarla hasta allá, haciendo que navegue.

Tratando de encontrar el resumen de todo lo que he expuesto, o mejor, de las sensaciones de quien se ha acercado al blanco inmenso del Ártico y de la Antártida rebuscando en el otro blanco fósil de sus rocas, dejo al poeta, ahora sí, opinar sobre el blanco y quizá recrear, así lo siento, cualquiera de las épocas glaciales a que me he referido.

Pablo Neruda, poeta del *blanco*, dejó escrito en su poema Piedras Antárticas.

Allí termina todo
Y no termina:
Allí comienza todo:
Se despiden los ríos en el hielo,
El aire se ha casado con la nieve,
No hay calles ni caballos
Y el único edificio
Lo construyó la piedra.
Nadie habita el castillo
Ni las almas perdidas
Que frío y viento frío
Amedrentaron:
Es sola allí la soledad del mundo,
Y por eso la piedra
Se hizo música,
Elevó sus delgadas estaturas,
Se levantó para gritar o cantar,
Pero se quedó muda.
Solo el viento,
El látigo
Del Polo Sur que silba,
Solo el vacío blanco
Y un sonido de pájaros de lluvia
Sobre el castillo de la soledad.

| REFERENCIAS Y CRÉDITOS |

- AGASSIZ, L., 1967 Studies on glaciers preceded by the Discourse of Neuchatel by Louis Agassiz. Hafner Publishing Co., New York and London. (Originalmente publicado 1840).
- BERGER A., LOUTRE M.F., 1990. Origine des fréquences des éléments astronomiques intervenant dans le calcul de l'insolation. *Bulletin Sciences*, 1-3/90, pp. 45-106.
- CRANE, D., 2005. Scott of the Antarctic: A Life of Courage, and Tragedy in the Extreme South Londres: Harper Collins.
- EMILIANI, C., 1955. Pleistocene temperaturas. *Journal of Geology*, 63 (1955), pp. 538–578.
- EMILIANI, C. 1992. Planet Earth: Cosmology, Geology, & the Evolution of Life & the Environment. Cambridge University Press.
- HARLAND, W.B., 1964. Evidence of late Precambrian glaciation and its significance. In: Nairn, A.E.M. (ed.) Problems in Palaeoclimatology. Interscience, London, pp. 119-149.
- HAYS, J. D.; IMBRIE, J.; SHACKLETON, N. J., 1976. Variations in the Earth's Orbit: Pacemaker of the Ice Ages. *Science* 194 (4270): 1121–1132.
- HOFFMAN, P. F., et al., 1998. A Neoproterozoic Snowball Earth. *Science* 281: pp. 1342- 1346.

- KIRSCHVINK, J.L., 1992. Late Proterozoic low-latitude global glaciation: The snowball Earth. In Schopf, J.W., and Klein, C. *The Proterozoic Biosphere: A Multidisciplinary Study*. Cambridge University Press. pp. 51–2.
- KUKLA, G. (2005). Saalian supercycle, Mindel/Riss interglacial and Milankovitch's dating". *Quaternary Science Reviews* 24 (14-15): 1573–83.
- LISIECKI, L. E., AND M. E. RAYMO (2005), A Pliocene-Pleistocene stack of 57 globally distributed benthic $\delta^{18}\text{O}$ records, *Paleoceanography* 20, PA1003, doi:10.1029/2004PA001071
- MILANKOVITCH, M., 1920. *Theorie Mathematique des Phenomenes Thermiques produits par la Radiation Solaire*. Gauthier-Villars Paris.
- NEEM community members, 2013. Eemian interglacial reconstructed from a Greenland folded ice core. *Nature*. doi:10.1038/nature11789.
- NEWTON, I., 1998. *Opticks or, a treatise of the reflexions, refractions, inflexions and colours of light: also two treatises of the species and magnitude of curvilinear figures*. Palo Alto, Ca. (publicado originalmente en 1704).
- RIEU, R. et al., 2007. Climatic cycles during a Neoproterozoic "snowball" glacial epoch. *Geology* 35 (4): 299–302.
- SCOTT, R.F., 2011. *Diario del Polo Sur*. Interfolio

- VAN ANDEL, TJEERD H., 1994. *New Views on an Old Planet: A History of Global Change* (2nd ed.). Cambridge UK: Cambridge University Press.
- SHACKLETON, N.J., 1967. Oxygen isotope analyses and Pleistocene temperatures re-assessed. *Nature* 215, pp. 15–17
- SHACKLETON, N. (1973). “Oxygen isotope and palaeomagnetic stratigraphy of Equatorial Pacific core V28-238: Oxygen isotope temperatures and ice volumes on a 10^5 year and 10^6 year scale. *Quaternary Research* 3: 39–55.
- UREY, H.C., 1947. The thermodynamic properties of isotopic substances *Journal of the Chemical Society* pp. 562–581
- WALKER, M. Et al., 2009. Formal definition and dating of the GSSP (Global Stratotype Section and Point) for the base of the Holocene using the Greenland NGRIP ice core, and selected auxiliary records. *Journal of Quaternary Science*, 24 pp. 3–17.
- WEGENER, A., 1912. Die Entstehung der Kontinente. *Geologische Rundschau*, 3(4): 276-292.
- WEGENER, A., 1983. El origen de los continentes y océanos. Ediciones Pirámide, S.A. Ciencias del hombre y la naturaleza. 230 págs. Madrid, 1983. (Originalmente publicado en 1915).
- ZACHOS, J. C. et al., 2001, Trends, rythms, and aberrations in global climate 65 Ma to Present. *Science*, 292, pp.686-693.

Sitios en la internet

www.deepseadrilling.org

www.esf.org/index.php?id=855

www.iodp.org

www.ipcc.ch

www.jamstec.go.jp/e/

www.nasa.gov

www.nsf.gov/news/special_reports/climate/

www.noaa.gov

www-odp.tamu.edu

*Se acabó de imprimir en
Salamanca esta Conferencia con motivo
de la festividad de Santo Tomás de Aquino
el día 27 de enero de 2015*

