

Cronología de la meteorología dinámica

(Chronology of dynamic meteorology)

Sáenz Agirre, Jon

Univ. del País Vasco

Fac. de Ciencias - Dpto. de Física de la Materia Condensada

Apartado 644

48080 Bilbao

BIBLID [1137-4411 (1997), 4; 253-281]

En este trabajo se enumeran los principales hechos que tienen lugar a lo largo del desarrollo de la meteorología dinámica como disciplina científica. Tras una breve revisión de la etapa especulativa se detallan los principales avances producidos a lo largo de los siglos XVI al XX en los aspectos relacionados con la meteorología dinámica de la física, las matemáticas y la tecnología y que han permitido a esta disciplina llegar a su estado actual.

Palabras Clave: Historia de la meteorología dinámica.

Meteorologia dinamikoa zientzia bihurtzeko bidean aipatzekoak diren datak agertzen ditugu lan honetan. Espekulazio garaietakoak gainbegiratu ondoren, XVI-XX. mendeen arteko meteorologia dinamikoarekin zerikusia daukaten aurrerapenak, bai fisikan, bai matematikan, bai eta teknologian ere aztertzen ditugu. Aurrerapen hauek direla medio heldu da meteorologia dinamikoa gaurko egoerara.

Giltz-Hitzak: Meteorologia dinamikoaren historia.

Dans ce travail s'énumère les principaux faits ayant lieu tout au long du développement de la météorologie dynamique comme discipline scientifique. Après une brève révision de l'étape spéculative se détaillent les principaux avancements produits entre le 16^{ème} et 20^{ème} siècle dans les aspects en relation avec la météorologie dynamique de la physique, le mathématique et la technologie et qui ont permis à cette discipline arriver à son état actuel.

Mots Clés: Histoire de la météorologie dynamique

INTRODUCCION

El acercamiento de los hombres al tiempo atmosférico es muy antiguo. La razón de ello es clara. El tiempo atmosférico ha tenido desde siempre, más aún en la antigüedad que en el momento actual, gran importancia en todas las actividades humanas, tanto las productivas (agricultura, comercio) como las de pura supervivencia (navegación). Por ello, el interés humano por la predicción del tiempo, es decir, la meteorología como rama del saber humano, se remonta a los principios de la historia.

Sin embargo, la existencia de la meteorología como ciencia es relativamente breve por muchas razones. Una de las principales es que en sus fundamentos teóricos requiere la utilización de una serie de avances científicos en otras disciplinas (termodinámica, análisis matemático, mecánica de medios continuos, etc...) que en ocasiones han sido tardíos y que, además, han sido en muchos casos resultados parciales que han debido finalmente integrarse en un enfoque global de la atmósfera como sistema físico sujeto a ciertas leyes de la física clásica, cuyo desarrollo teórico básico, tal y como la conocemos hoy en día, se puede cerrar en torno a mediados del siglo XIX.

Otra razón de índole práctica para que esta integración se haya realizado en estos últimos años es que no existen laboratorios de meteorología. El único laboratorio posible es la atmósfera, y los efectos físicos que en ella se producen tienen en muchas ocasiones dimensiones características de cientos o miles de kilómetros. Además de esa extensión, la atmósfera está sometida a continuas variaciones de sus características con el tiempo en escalas temporales cortas, en ocasiones de horas. Como consecuencia de ello, el reconocimiento de algunos fenómenos meteorológicos, especialmente aquellos que tienen que ver con la predicción del tiempo atmosférico, exige tener acceso a los datos meteorológicos de lugares muy distantes en un breve plazo de tiempo. Para ello se requiere algún mecanismo rápido de transporte de datos, lo que no estuvo disponible hasta la invención del telégrafo en 1837. Sin éste u otros medios posteriores, no hubiera sido posible analizar los fenómenos atmosféricos sin unos costes económicos y humanos extraordinarios. Piénsese a ese respecto en la dificultad de la realización de los primeros mapas sinópticos que requirieron expediciones científicas a lugares remotos o los primeros cálculos numéricos de la evolución de la situación atmosférica que se llevaron a cabo mediante calculadoras mecánicas sencillas. Finalmente, no se debe olvidar que la atmósfera tiene tres dimensiones, es decir, tiene altura, y hasta finales del siglo XVIII, los hombres no han tenido ningún medio poco costoso en tiempo o medios humanos de adentrarse en esta tercera dimensión, máxime si se quería minimizar la influencia del suelo. Las observaciones sobre la ladera de una montaña, al fin y al cabo, están influenciadas por el terreno.

Sin embargo, no solamente se debe analizar la historia de la fase "científica" de la meteorología. Ello es excesivamente restrictivo en el caso de una materia tan enraizada en la tradición humana. Algunas cuestiones de las etapas especulativas de la meteorología han tenido una importancia fundamental en la cosmología de la civilización occidental, e incluso ideas que para nosotros son evidentes, como la consideración de que el aire es un fluido que ejerce presión y con un peso concreto, la composición de las nubes o qué es el viento, han exigido muchos años de discusiones, por lo que parece justo que tengan cabida en este trabajo.

En consecuencia, la primera parte se dedicará a analizar la evolución de la fase "especulativa" de la meteorología dinámica, aquella que tiene su origen en la Antigüedad y que

hunde sus raíces, salvo honrosas excepciones, en conceptos a menudo preconcebidos de la filosofía o incluso de la magia. Ello se debe al legado de los griegos, especialmente desde la escuela pitagórica. Ellos despreciaban el mundo físico como imperfecto, y no utilizaban la observación como arma de conocimiento del mismo. La deducción les permitió avanzar en la geometría o la aritmética, pero no era un arma correcta para enfrentarse a la física. No obstante, no por ello podemos despreciar su contribución, ya que por una parte, revistieron el trabajo "científico" de dignidad y, por otra, separaron la ciencia de la religión.

En una segunda parte se analizarán los descubrimientos aislados que pusieron la base del posterior enfoque científico de la meteorología, tanto desde la vertiente del desarrollo de instrumentos de medida como el barómetro, el termómetro, etc... como desde un punto de vista teórico. Se puede calificar esta época como la del nacimiento de la meteorología científica. En esta época se pusieron también las bases del método científico, lo que supuso un gran avance no solamente para la meteorología, sino para toda la ciencia en general.

La última parte se dedicará a analizar la evolución de la meteorología dinámica en su período más reciente, fundamentalmente el siglo XIX y XX, época en la que la meteorología tiene un enfoque integrado, con la física y las matemáticas dedicadas de una forma especializada a analizar los fenómenos atmosféricos, tan repletos de peculiaridades respecto a otras ramas de la física clásica. Es también la época del desarrollo tecnológico, de los medios rápidos de comunicación, el ordenador o la investigación exhaustiva de la estructura vertical de la atmósfera, la meteorología se convierte ya en una ciencia adulta.

La aproximación escogida para este trabajo es de tipo positivista, es decir, básicamente se van a reseñar los avances concretos, pero sin compararlos con aquellas ideas que quedaron detrás o sin intentar dar excesivas explicaciones sobre las razones últimas del pensamiento humano que conformaron una forma y no otra de acercarse a la realidad. En la medida de lo posible, y para facilitar el seguimiento cronológico de los hechos, se han facilitado las fechas de los acontecimientos y del nacimiento o muerte de los protagonistas la primera vez que son citados. Cuando no aparecen tales fechas, es porque no se han podido encontrar en procedimientos "normales" de búsqueda de esa información.

Temáticamente, el trabajo se limitará a la meteorología dinámica, es decir, aquella parte de la meteorología que se encarga de estudiar el movimiento de las masas de aire atmosféricas, entendiéndose también que el desarrollo de instrumentos científicos y de redes sinópticas de medida de las variables meteorológicas están íntimamente relacionadas con ésta. Ello se debe a razones de espacio y de tiempo. En definitiva, la historia completa de la meteorología dinámica no es más, ni menos, que la historia de casi toda la física clásica, ya que disciplinas como la mecánica, la termodinámica o el cálculo numérico tienen mucho que decir en los fenómenos atmosféricos. Evidentemente, esta tarea excede el objetivo de este trabajo que, por lo tanto, se va a ceñir exclusivamente a los aspectos más puntuales relacionados con la meteorología dinámica y la predicción del tiempo. Por otro lado, el análisis no positivista supone en muchos casos una discusión pendiente en el seno de la epistemología actual, donde autores como Lizcano indican los diferentes caminos que, hasta una ciencia/arte tan supuestamente objetiva como las matemáticas, ha tomado en diversas culturas, algo tremendamente enraizado en los presupuestos teológicos y filosóficos vigentes en cada tiempo y cultura. Esta tarea también excede el objetivo de este trabajo, por lo que no se va ni siquiera a intentar.

Enlazando con esto se puede argumentar contra este trabajo su visión excesivamente occidental. Ciertamente es que no se dedica a analizar detalladamente la evolución de la meteorología en otras civilizaciones, civilizaciones que, como la china, en momentos de su historia exportaron conocimientos a la ciencia europea. Ese objetivo también excedería los límites marcados originalmente para este trabajo.

Por todo ello, a continuación se presenta un breve listado de los acontecimientos y descubrimientos que han posibilitado nuestra concepción actual de la meteorología dinámica, parte de la física del aire (o las ciencias de la Tierra, según se quiera), tan importante en las labores humanas, que el interés por ella nació junto con el ser humano, y pervive hasta nuestros días, es la única noticia que se repite diariamente, en todos los noticieros de todos los medios de comunicación, y escapó a la clasificación de materia reservada en tiempos de la Guerra Fría, siendo quizás el único ejemplo de colaboración entre gobiernos de bloques diferentes durante aquellos años. Por ello, parece justificado dedicarle este trabajo.

1. LA ETAPA ESPECULATIVA

La etapa especulativa se caracterizó porque sus análisis eran cualitativos, aún no se habían definido las unidades de medida, el conocimiento no tenía características experimentales, y en ese sentido, la meteorología no se puede comparar con otras ramas del saber más avanzadas por entonces, como por ejemplo la geometría o la astronomía.

A lo largo de esta época, los avances meteorológicos estaban mediatizados por las creencias que en cada momento estaban dispuestas a sustentar o tolerar las diversas sociedades, que, por aquél entonces, y salvo excepciones, eran marcadamente teocráticas. La práctica de la meteorología, en muchos casos, suponía la necesidad de acatar una serie de creencias filosóficas o cosmológicas que no se debían apartar mucho de lo aceptado si no se quería sufrir consecuencias más o menos graves.

Para la mayoría de las civilizaciones de esta época, el cielo era un continuo inseparable desde la tierra hasta los astros, morada de los dioses. No estaba nada clara la existencia de una discontinuidad entre la atmósfera, ámbito de la meteorología, y el cielo, al que se dedicaba la astronomía. Había otras razones además del puro desconocimiento para ello. Hay que darse cuenta de que para los hombres de aquella época, los fenómenos meteorológicos mostraban unos comportamientos cíclicos que coincidían bastante adecuadamente con las regularidades astronómicas. En ese sentido, asumir que las nubes y los astros ocupaban la misma morada no era en absoluto descabellado. Esta visión, de todas formas, no tardaría en cambiar, y ya en tiempos de la civilización griega, los ámbitos de ambas disciplinas se separarían pronto.

Otra característica fundamental de los conocimientos meteorológicos en esta época es su marcado carácter mágico o supersticioso por cuanto la predicción del tiempo suponía de alguna forma el conocimiento del futuro, algo que en aquellos tiempos era una omnipresente aspiración humana. Ello, además de prestigio social, daba a la persona capacitada para ejercer estas predicciones un cierto poder, por lo que estas tareas se circunscribieron normalmente al ámbito de las castas sacerdotales.

1.1. Civilizaciones prehelenísticas

En la civilización egipcia, en tiempos cercanos al año 3500 a. J. C., la meteorología tenía un marcado carácter religioso, y los fenómenos atmosféricos se suponían bajo el control directo de los dioses.

En la civilización babilonia, en fechas situadas entre el año 3000 y el año 300 a. J. C., los astrónomos-sacerdotes intentaron relacionar los fenómenos meteorológicos con los movimientos de los astros y con buenos y malos sucesos. La descripción actual de los vientos en ocho cuadrantes generados a partir de los cuatro puntos cardinales (Norte, Sur, Este y Oeste dan además Noreste, Noroeste, Sureste y Suroeste) parece que proviene también de esta civilización, aunque su sentido de utilización era diferente al nuestro, ya que contaban desde el Sur. Otra aportación de la civilización babilónica a la cosmología de la civilización judeo-cristiana fue su *teoría* de la formación del mundo (2300 a. J. C.), posteriormente recogida en el *Génesis del Antiguo Testamento*. Por lo demás, el saber babilónico se reducía a la mera crónica de sucesos, sin intentar unificar las diferentes observaciones mediante un esquema lógico común.

La antigua civilización china conocía ya el ciclo del agua, que aparece descrito en textos del siglo IV a. J. C. Debido a su bien organizada sociedad, poseen el mejor registro histórico conocido de sucesos meteorológicos.

Un manuscrito hindú del siglo V a. J. C. menciona cómo estimaban la cosecha anual a partir de la lluvia recogida en un pluviómetro rudimentario.

1.2. La civilización griega

La civilización griega también estaba muy interesada en los fenómenos atmosféricos, y, desde al menos el siglo V a. J. C., existen evidencias de la realización sistemática de observaciones meteorológicas y astronómicas que se exhibían al público en unos almanaques fijos en columnas llamadas *parapêgma*.

Tales de Mileto (624-545 a. J. C.) fue el primer filósofo a quien se puede relacionar con la meteorología. Siguió la tradición babilonia de asociar la meteorología con la astronomía, además de defender que la tierra estaba formada por agua que era el constituyente en varios estados de todos los seres. La misma pasaba, según Tales, del cielo a la tierra y de ésta al cielo, tras ser utilizada por los seres vivos. A pesar de ello, no hay evidencia que demuestre que conociera el proceso de la condensación y la formación de nubes, por lo que no llegó a descubrir el ciclo del agua como lo consideramos hoy en día. Trató también de dar una explicación al que en aquellos tiempos era uno de los problemas más famosos, el de las periódicas crecidas del Nilo, que él explicaba a partir de los vientos del Norte que impedían su descarga al mar.

Uno de sus seguidores, Anaximandro de Mileto (611-547 a. J. C.), defendió que el viento era el flujo de aire, criterio que no tuvo ningún éxito entre sus contemporáneos ni en filósofos posteriores durante siglos.

Anaxágora de Clazómene (499-427 a. J. C.), miembro de la escuela jonia y considerado por algunos como uno de los primeros utilizadores del método experimental, explicó la formación del granizo y las corrientes convectivas en la atmósfera, aunque basándose en hipó-

tesis erróneas. También trató de explicar el rayo y el trueno a partir de la existencia de un éter ígneo en la atmósfera superior.

Empédocles de Agrigento (492-430 a. J. C.) fue el primer filósofo en el que aparece la teoría según la cual el universo estaba formado por aire, tierra, agua y fuego, cuatro elementos básicos cuyas propiedades respectivas se contraponían. En base a las propiedades diferentes entre el fuego y el agua, y a sus luchas y respectivas victorias, explicó la alternancia de las estaciones.

El problema de las crecidas del Nilo volvió a ser tratado por Demócrito de Abdera (460-370 a. J. C.), quien señaló algo que hasta entonces era desconocido, es decir, que el mal tiempo viaja. El afirmaba que el mal tiempo viajaba desde el frío del Norte al Sur, por lo que llovía en el curso alto del Nilo y esto originaba las crecidas. Aplicó su teoría atomística a la explicación del viento, el trueno y el rayo.

Hipócrates de Cos, (460-375 a. J. C.), muy posiblemente el más famoso médico de la historia, analizó la relación entre el clima y las enfermedades, pero sin intentar analizar las causas del primero y centrándose en sus consecuencias en la salud humana.

Los movimientos de la estrella Sirio eran, según las teorías de Eudoxo de Cnidos (408-355 a. J. C.), los causantes de un ciclo de cuatro años de períodos de mal y buen tiempo.

Aristóteles (384-322 a. J. C.) preparó el tratado más antiguo que se conoce dedicado exclusivamente a la meteorología, *Meteorologica*. En él, defendía la esfericidad de la tierra y la cosmología de Eudoxo según la cual el universo estaba formado por esferas concéntricas. De esta forma, distinguía lo que sucedía en el exterior de la esfera lunar como asunto de la astronomía de lo que sucedía en la atmósfera (entre la esfera lunar y la terrestre), asunto de la meteorología. Aceptó también el esquema de Empédocles de los cuatro elementos, aunque distribuidos de forma concéntrica (tierra, agua, aire y fuego del interior al exterior). Admitió transformaciones entre los elementos, y la estratificación entre ellos no era rígida, lo que explicaba las irregularidades evidentes (islas, montañas, etc...). Asumió también algunas ideas de predicción del tiempo provenientes de los egipcios, y el sistema babilonio de representación de la dirección del viento. Trató los vientos, el rayo y los meteoros acuosos, pero frente a esquemas cognoscitivos experimentales anteriores (Anaxágora), Aristóteles se basaba principalmente en deducciones a partir de ideas preconcebidas. A pesar de sus errores, este tratado pervivió como la referencia en los conocimientos meteorológicos hasta casi el siglo XII, y, excepto contadas excepciones, hasta el Renacimiento, casi no se introdujeron mejoras en sus esquemas, sino que el trabajo que se realizó consistió fundamentalmente en comentarios al mismo.

Teofrastus de Ereso (372-287 a. J. C.), discípulo de Aristóteles, recogió en un tratado una serie de signos de mal tiempo que aparecían en la atmósfera o en el comportamiento de los animales.

Eratóstenes de Alejandría (276-194 a. J. C.), dio por fin una explicación razonable de las crecidas del Nilo en base a las precipitaciones que se producían en sus fuentes, precipitaciones para entonces conocidas y probadas. Para ello, preparó un mapa del valle del Nilo hasta latitudes cercanas al actual Jartum.

1.3. Civilización romana

La civilización romana se caracterizó por un menor gusto por la filosofía natural que la civilización griega, y, por ello, toda la ciencia que no supusiera avances tecnológicos potencialmente generadores de beneficios económicos cayó un tanto en desgracia en aquellos años. La meteorología no fue menos, y por ello las obras romanas en este ámbito se limitan básicamente a una serie de comentarios sobre Aristóteles (Séneca y Plinio). Existía además la costumbre por parte de los historiadores de reseñar los fenómenos atmosféricos notables, especialmente aquellos que implicaban sacrificios para la población como sequías, inundaciones, etc....

Claudio Tolomeo (85-165) realizó las aportaciones más importantes de la civilización romana a la meteorología, ya que escribió un tratado de astronomía (*Almagesto*), en el cual explicaba ciertas cuestiones meteorológicas en base a criterios astronómicos. Además de ello, realizó un atlas de los climas del mundo conocido en el que dividía el mismo en zonas climáticas considerando la insolación como único factor climático.

1.4. La Edad Media

La Edad Media supuso un parón en el desarrollo y estudio de viejas y nuevas teorías. El conocimiento se conservó en una parte en el ámbito eclesiástico y en mayor medida en la civilización árabe, aunque los intercambios con esta última fueron escasos en una primera etapa por razones políticas y religiosas. Sin embargo, a pesar de este parón, hubo algunos avances reseñables, especialmente hacia el principio de la Edad Media (siglos V-VII) y hacia el final de la misma (siglo XIII). Las épocas intermedias estuvieron caracterizadas por el respeto total hacia las ideas de Aristóteles en base al argumento de autoridad que se impuso tras los escolásticos de los siglos XI y XII, como San Anselmo de Canterbury (1033-1109) y los dominicos San Alberto Magno (1193-1280) y Santo Tomás de Aquino (1225-1274). Las obras de Aristóteles solamente se conocieron en Europa a partir del siglo XII, por lo que anteriormente a esta fecha, el único filtro existente para el conocimiento científico era el acuerdo con las Escrituras. Sin embargo, los cronistas de la época efectuaron la recogida sistemática de hechos meteorológicos notables, costumbre que ha posibilitado en gran medida el desarrollo de la paleoclimatología.

De la época anterior al conocimiento de Aristóteles datan las obras del monje inglés Veda el Venerable (673-735), en las que se volvían a citar las ideas de algunos filósofos clásicos sobre el viento, la atmósfera, el trueno, etc... De la misma forma, el obispo de Sevilla Isidoro (570-636) también trató temas meteorológicos, aunque con excesivo empeño en permanecer dentro de la más estricta ortodoxia religiosa.

Dentro del mundo musulmán, Ibn Al-Haitham (Alhacén, 965-1039), proporcionó un ejemplo de aplicación del método científico, pues ya en el siglo X dio una explicación del ocaso a partir de la refracción atmosférica y, en base a razonamientos geométricos, calculó una altura de la atmósfera de 170 km. En la actualidad, se estima que cerca del 99.99% de la masa de la atmósfera está por debajo de los 110 km. Hay que reseñar que la ley de la refracción, tal y como la conocemos hoy en día, la descubrió Willebrord Snell van Royen (1580-1626) en 1620.

Pero a partir de entonces, con el conocimiento en el siglo XII de las obras de Aristóteles, el criterio de autoridad se impuso sobre cualquier otro, y en caso de discrepancia entre la naturaleza y los clásicos, éstos se convirtieron en la fuente a seguir. La influencia de Roger

Bacon (1214-1294) fue decisiva para que las cosas cambiaran. Roger Bacon postuló la aproximación experimental y la deducción matemática en todo trabajo científico, y en ello se incluía la meteorología. Además de ésta, que fue su gran aportación, realizó comentarios, a veces críticos, a la obra de Aristóteles, e incluyó la topografía como factor climático dentro de los trabajos cartográficos de Tolomeo.

El miembro del *Merton College* William Merle recogió en sus diarios la crónica del tiempo atmosférico en Oxford de forma regular entre 1337 y 1344.

El cardenal Nicolás de Cusa (1401-1464) describió en el siglo XV una forma sencilla de construir un higrómetro a partir de lana. Sin embargo, el concepto del contenido de agua del aire y el significado real del vapor de agua, estaban aún por desarrollar.

También en el siglo XV, en 1450, León Battista Alberti (1404-1472) describió un anemómetro-veleta de presión, basado en la desviación de una lámina orientada al viento, pero más bien como curiosidad, sin intenciones claras de construir un instrumento meteorológico. Un instrumento similar fue descrito por Leonardo da Vinci (1452-1519) en 1500. Tanto Leonardo da Vinci como Benedetto Castello (1577-1644) hicieron referencias a la medición de la cantidad de agua caída mediante el uso de vasijas para recogerla.

Y la Edad Media no dio mucho más de sí desde el punto de vista de conocimientos meteorológicos, a excepción de algunos comentarios de Girolamo Cardano (1501-1576) a la obra de Aristóteles.

Desde el ámbito de la magia, destacó la astrometeorología, disciplina que conoció un gran auge hasta bien entrado el siglo XVI y en la que se mezclaban las predicciones astrológicas con las meteorológicas desde el punto de vista de la magia y la superstición. Entre estos magos destacó el alquimista y filósofo rosacruz Robert Fludd (1574-1637), cuyas ideas se defienden todavía en libros publicados en el siglo XX dentro del mundo de la literatura mágica.

2. EL COMIENZO DE LA EPOCA CIENTIFICA

El siglo XVII marcó, como en tantas otras áreas de la ciencia, el final de la influencia de Aristóteles en temas científicos. Determinados sucesos importantes, como los trabajos de Descartes y Galileo contribuyeron de forma decisiva a este hecho. Se comenzaron a desarrollar los instrumentos científicos, y el método científico como lo conocemos en la actualidad se gestó entonces.

2.1. El siglo XVII

El nacimiento del método científico se sitúa cuando René Descartes (1596-1650) publicó en 1637 su *Discurso del Método*, obra en la que establecía sus bases. El personalmente aplicó esta forma de razonamiento a varios fenómenos naturales, solamente para concluir en muchos casos que esos fenómenos no eran aún explicables por falta de comprensión de las leyes de la naturaleza. Dio explicaciones sobre la composición de las nubes, la nieve, la lluvia o el granizo. Achacó la permanencia de las nubes en el aire a la existencia de corrientes ascendentes de aire. Estableció el sistema cartesiano de coordenadas, de utilización general en toda la física, y la que se considera su teoría del arco iris, aunque al parecer, el monje alemán Teodorico de Friburgo en 1304 ya había sugerido la misma e incluso había experi-

mentado con una botella esférica la existencia de un arco iris en cada gota. A pesar de que la teoría del arco iris cae fuera del ámbito de la meteorología dinámica, lo cierto es que ha sido una de las teorías de especial trascendencia histórica en el desarrollo de la óptica, ya que en el arco iris se encuentran características que solamente se pueden explicar a la luz de la teoría ondulatoria o de la teoría corpuscular de forma exclusiva. Por ello, esta teoría ha sido referencia obligada de los partidarios de una u otra teoría (corpuscular u ondulatoria) hasta comienzos del siglo XX. Esta teoría solamente se pudo mejorar notablemente explicando los arco iris supernumerarios en el siglo XIX tras aplicar Thomas Young (1773-1829) los conocimientos entonces existentes sobre interferencia de ondas.

Descartes consideraba el agua como formada por pequeñas partículas alargadas, finas y separadas por una sustancia rarificada, una especie de éter. A pesar de ello, ya diferenciaba el vapor de agua del aire como sustancias distintas. Postuló que el calentamiento del aire y su expansión y contracción eran el mecanismo básico que provocaba los vientos, y, debido a que ese calentamiento dependía del movimiento diario del sol de este a oeste, explicó, aunque de forma errónea, la existencia de vientos del este. Su esquema fue posteriormente mejorado por Halley, ya que éste introdujo el concepto de ascensión del aire en el mismo.

La recogida de datos meteorológicos de forma sistemática siguió vigente a lo largo del siglo XVI, aún con más importancia que en siglos anteriores. Esta labor dejó ya de ser propia de cronistas de carácter general, y pasó a manos de científicos dedicados a la meteorología. En ella destacan los nombres de Johann Werner (1468-1528), Tycho Brahe (1546-1601) o Johann Kepler (1571-1630), grandes científicos de su época, lo que atestigua la importancia que entonces tenía el tiempo atmosférico. Sin embargo, estas observaciones no tenían aún datos cuantitativos de temperatura, presión o humedad, para lo que eran necesarios los instrumentos meteorológicos que todavía debían ser desarrollados o que aún estaban sometidos a grandes discusiones. Ese fue el siguiente paso importante en el desarrollo científico de la meteorología, el diseño de instrumentos científicos que permitieran cuantificar las variables meteorológicas.

El termómetro fue el primer instrumento complejo que se desarrolló. Si bien la capacidad del aire para contraerse y expandirse se conocía desde la época griega, este conocimiento no se había aplicado a la medida del calor hasta que Galileo Galilei (1564-1642) inventó un termómetro hacia 1595. Galileo también se dedicó al problema del "peso" del aire. Ya Aristóteles había demostrado que el aire tiene volumen, pero no llegó a determinar si además tenía peso. Galileo intentó medir de forma experimental este peso, pero no llegó a resultados correctos, ya que mezclaba los conceptos del peso y la presión. Tomó medidas regulares de temperatura desde 1613.

En 1625, Santorio Santorio (1561-1636) construyó un instrumento basado en una balanza para medir la fuerza del viento e inventó el termómetro clínico.

En 1643, Evangelista Torricelli (1608-1647) realizó el primer barómetro conocido, inicialmente con agua, lo que le exigía un tubo de dieciocho metros de altura, y posteriormente con mercurio para disminuir la longitud del tubo. Existe una polémica sobre si Descartes fue el primero en inventar el barómetro, ya que con anterioridad había sugerido un instrumento parecido en una carta a un discípulo. Sin embargo, no existen pruebas de que efectivamente lo construyera o que comprendiera del todo el funcionamiento del citado instrumento. Sin embargo, Torricelli no profundizó en las consecuencias de sus experimentos, ya que se dedicó

especialmente al estudio de la cicloide. En todo caso, Descartes inventó posteriormente el barómetro de dos líquidos, en el que la sensibilidad del instrumento era mejor que la del barómetro original.

Blaise Pascal (1623-1662) demostró en 1648 que la presión atmosférica cambia según la altura a la que se coloca el barómetro, ascendiendo a la cumbre del monte Puy de Dôme, sugiriendo además que este método se podría usar para medir la altura de diferentes ciudades. Con ello dio origen a uno de los problemas fundamentales de la meteorología del siglo XVII. Además, calculó el peso total de la atmósfera en $3.8 \cdot 10^{18}$ kg, valor que hoy en día se estima en $5.4 \cdot 10^{18}$ kg, por lo que su estimación parece bastante correcta para los tiempos en que se realizó.

El año de 1650 vio las primeras estimaciones de la velocidad de desplazamiento de las nubes mediante transformaciones trigonométricas.

El termómetro de Galileo era de cuba abierta, por lo que estaba afectado por la presión atmosférica. Tuvieron que pasar del orden de 50 años desde su invención hasta que el Gran Duque Ferdinando II de Toscana (1610-1670), miembro de la famosa familia Médici y fundador de la *Accademia dell Cimento* en 1657, selló el tubo de vidrio en 1641, con lo que la lectura del termómetro era ya independiente de la presión atmosférica. Además de esta aportación en la técnica de construcción de termómetros, a principios de la segunda mitad del siglo XVII, en la *Accademia dell Cimento*, iniciaron los experimentos que años después darían paso al higrómetro de condensación sobre superficies frías, aunque sin llegar a desarrollar el instrumento de medida como tal. Estableció la realización regular de mediciones atmosféricas como una de las actividades de la *Accademia*, con instrumentos desarrollados por la misma y con observadores seleccionados en diversas localidades italianas en un principio, y añadiendo posteriormente París, Osnabruck, Innsbruck o Varsovia hasta el cierre de la *Accademia* por presiones eclesiásticas en 1667, diez años después del comienzo de sus actividades.

Entre 1649 y 1651, un experimento inspirado por Robert Hooke (1635-1703), Robert Boyle (1627-1691), Marin Mersenne (1588-1648) y Gottfried Wilhelm Leibniz (1646-1716) en las ciudades de Estocolmo, París y Clermont Ferrand intentó analizar las posibilidades del barómetro para predecir el tiempo atmosférico. El experimento se continuó posteriormente incluyendo Hanover en 1678 y Kiel de 1679 a 1714.

Otto Von Guericke (1602-1686) inventó entre 1660 y 1662 un termómetro de máximas y mínimas. Además de ello, produjo nubes artificiales mediante la liberación de aire húmedo desde un matraz hacia otro vacío. La expansión y el enfriamiento asociado a ella producían una niebla en el primer matraz. Según Guericke, esta niebla estaba formada por diminutas burbujas de agua. A partir de ello, concluyó que el aire no se puede convertir en agua, pero que ésta puede entrar en el aire y luego condensarse. Para comprender totalmente el ciclo del agua en la atmósfera faltaba por demostrar cómo puede el aire cargarse de humedad, y aún así, no estaba todavía claro porqué el agua de las nubes permanecía suspendida en el aire.

La primera referencia cierta al uso del pluviómetro para medir la precipitación caída aparece en 1662, cuando Sir Christopher Wren (1632-1723) inventó un pluviómetro que se vaciaba solo al llegar a un nivel dado. Además, realizó los primeros diseños de un reloj

meteorológico que registrara a intervalos iguales de tiempo las variables meteorológicas. Este instrumento sería finalmente fabricado por Hooke posiblemente en 1675, aunque no se conoce con seguridad la fecha, situada entre 1673 y 1678.

En torno a 1673, René Grillet construyó el primer anemómetro rotatorio de eje vertical que reflejaba en un cuadrante el número de vueltas que daba el rotor.

Richard Towneley (1629-1707) inventó en 1677 un pluviómetro que conducía el agua a una balanza, lo que permitía pesar la cantidad de agua caída.

Tras la invención del termómetro insensible a la presión, y simultaneado con desarrollos sencillos que mejoraron la visión de las columnas de líquido u otros detalles de los termómetros, el siguiente paso necesario era la unificación de las escalas de medida, tarea a la que se aplicaron multitud de científicos de la época. Robert Boyle fue uno de los primeros en advertir esta necesidad, pero no encontró un punto fijo al que referir su escala, ya que en aquella época no se consideraba el punto de congelación del agua como un punto fijo. Además de su trabajo en la homogeneización de las escalas termométricas, inventó un barómetro portátil que la *Royal Society* decidió en 1668 enviar por el mundo para medir la presión atmosférica en diversos lugares. Basándose en sus experimentos, formuló la ley que lleva su nombre, que fue básica en la solución del estudio de la variación de la presión con la altura.

Robert Hooke empleó el punto de congelación del agua como punto 0 de su escala e inventó el barómetro de rueda y una versión mejorada del barómetro de dos líquidos de Descartes. Posteriormente, desarrolló un barómetro de tres líquidos. El diseño básico de este barómetro siguió en activo hasta mediados del siglo XIX. Además de trabajar sobre el barómetro, realizó estudios sobre la medición de la humedad atmosférica, a partir de la constatación de que las cuerdas de los instrumentos variaban de longitud con la humedad del aire. Para ello, construyó un higrómetro con barba de avena silvestre. Realizó en 1667 un anemómetro basándose en el mecanismo ya descrito anteriormente por León Battista Alberti. Hooke diseñó también un método para normalizar las observaciones meteorológicas en 1663, indicando qué variables se debían medir, los instrumentos a utilizar, la frecuencia de las mediciones e incluso un formulario para escribir los datos.

A partir del último cuarto del siglo XVII, la Academia de Ciencias francesa se dedicó también a recopilar mediciones de las variables atmosféricas a excepción de la temperatura y la presión, debido seguramente a la falta de acuerdo en la escala a utilizar.

El siguiente avance importante en la estandarización de escalas termométricas vino de manos de Carlo Renaldini, quien propuso utilizar como segundo punto fijo el punto de ebullición del agua y dividir la escala entre los dos en partes proporcionales, pero su proposición no fue reconocida debido a que no se tenía constancia de que este segundo punto fuera fijo.

Isaac Newton (1642-1727) tuvo también en este campo una importante aportación, ya que propuso una escala de temperaturas con varios puntos fijos, y además descubrió la ley del enfriamiento de los cuerpos, por medio de la cual podía estimar las temperaturas fuera del rango de su termómetro, método que empleó para estimar la temperatura del hierro al rojo. Esta metodología básica es, a grandes rasgos, la que se sigue hoy en día para las escalas de temperaturas en las normas actuales. Por otra parte, la aportación de Newton al cálculo diferencial tuvo, como es obvio, gran importancia tanto para el desarrollo de la meteorología, como de la física en general.

El perfeccionamiento del barómetro siguió fundamentalmente dos vertientes. Por un lado, se persiguió mejorar la legibilidad del mismo, para lo que se hicieron varios cambios, como el empleo de un tubo diagonal (barómetro de Morland) o el barómetro en L de Johann Bernoulli (1667-1748).

A finales del siglo XVII, Edmund Halley (1656-1742) investigó el problema de la variación de la presión con la altura, y descubrió, basándose en los anteriormente descubiertos por Napier (1550-1617) logaritmos, una fórmula aproximada para el cálculo de la altura a partir de la presión, aunque señalando que la misma dependía de la temperatura. Tras ello, se dedicó al estudio de los movimientos atmosféricos y sus causas. En 1686, señaló que los movimientos dependían de la distribución del calentamiento en zonas diferentes de la tierra. Este calentamiento explicaba el ascenso del aire en las zonas calientes, y el viento era el movimiento del aire que tendía a ocupar el espacio dejado por el aire que había ascendido. Esto permitía explicar los vientos del este en la franja del Ecuador, ya que el máximo calentamiento sigue el movimiento del sol desde el este. En este sentido, mejoró el esquema de Descartes de forma notable, ya que cerró la circulación atmosférica en las capas superiores de aire. Representó este movimiento en un mapa, y esta teoría básica fue posteriormente criticada y mejorada por George Hadley (1685-1758) de forma notable. Sin embargo, a pesar de la simplicidad e incorrección de su idea, Halley contribuyó con ella a crear la meteorología dinámica como quizás nadie lo había hecho hasta entonces, al crear una teoría de la circulación general que no era solamente descriptiva, sino que hacía referencia a las causas del movimiento.

En 1697, el capitán William Dampier (1652-1715), a la sazón célebre bucanero, explorador y aventurero, publicó un registro de las características de un tifón que le atrapó en los mares de China, describiendo el ojo calmado en el centro del mismo y los vientos de direcciones opuestas a medida que el tifón pasaba.

2.2. El siglo XVIII

El siglo XVIII fue especialmente fructífero en la creación de instrumentos científicos de calidad para las observaciones meteorológicas. Los mismos se buscaron portátiles, con objeto de poderlos transportar en expediciones científicas. Avanzó considerablemente la creación de redes meteorológicas internacionales de tomas de medida, y la constatación de la necesidad de existencia de entes dedicados exclusivamente al estudio de los fenómenos atmosféricos fuera de las sociedades científicas dedicadas a la ciencia en general.

A principios de siglo, en 1700, Gottfried Wilhelm Leibniz (1646-1716) comenzó a proponer los barómetros aneroides en correspondencia privada a Johann Bernoulli, pero el citado barómetro no se construiría hasta 150 años más tarde por falta de habilidad técnica para resolver los problemas que el mismo comportaba. Además de ello, sus contribuciones a la aparición del cálculo diferencial fueron de gran ayuda en la evolución de la meteorología teórica.

Gabriel Fahrenheit (1686-1763) construyó termómetros de mercurio con escalas fiables ya a partir de los primeros años del siglo XVIII, aunque no fue el primero en emplear este material. Sus termómetros estaban calibrados con tres puntos fijos, el punto de congelación de agua salada, el punto de congelación del agua destilada y la temperatura corporal de un hombre saludable. Fuera de estos puntos, la escala se alargaba simplemente añadiendo puntos a los extremos. No consideró el punto de ebullición del agua como uno de los puntos

fijos. La razón para ello es que demostró que, tanto en el caso del agua como en el de otros muchos líquidos, el punto de ebullición depende de la presión atmosférica.

Johann Kanold inauguró en 1717 una red internacional de recogida de datos meteorológicos. Estos datos los publicó en un informe trimestral durante diez años.

En 1722, Horsley (1669-1735) sentó las bases del funcionamiento actual de los pluviómetros, al calcular la base de los mismos de forma que la altura de la columna de agua recogida proporciona una lectura directa en litros por unidad de área de la cantidad de agua caída.

En el mismo año, James Jurin (1684-1750), secretario de la Royal Society, dio comienzo a una campaña nacional de recogida de datos meteorológicos. Para ello, se normalizaron los procedimientos de medida, las variables a medir, los instrumentos a utilizar y la frecuencia de las mediciones. Estos datos se publicarían anualmente en el boletín de la Sociedad. La reputación de esta campaña hizo que en pocos años, a esta red se sumaran observadores de Suecia, Finlandia, Nápoles, Roma, India y Norteamérica. Pocos años después, por iniciativa de Isaac Greenwood (1702-1745), a estas observaciones se unieron los registros regulares de tiempo atmosférico que llevaban a cabo los barcos por los diferentes océanos. Greenwood lo planteó como una forma de determinar los vientos habituales en los océanos para ayudar a la navegación, las causas de los mismos y el régimen de circulación a las diferentes latitudes. Todo esto constituyó la base de los posteriores mapas de circulación planetaria continuación del ya realizado por Halley.

René Antoine Ferchault de Réaumur (1683-1757) prefería los termómetros de alcohol por su mayor coeficiente de expansión. Utilizó como puntos fijos el punto de congelación como 0 y el punto de ebullición como 80. Su termómetro, propuesto en 1730 fue criticado por utilizar el punto de ebullición del agua, que ya se sabía dependiente de la presión y por su tamaño, excesivo frente a los termómetros de Fahrenheit. Pese a ello, dio nombre a una escala de medición de temperaturas que ya ha caído en desuso.

En 1734, Louis-Jean Pajot d'Ons-en-Bray (1678-1754) mejoró el diseño del anemómetro de Grillet, registrando las medidas en una cinta de papel, con lo que dio origen al anemógrafo.

George Hadley (1685-1758) completó en 1735 la teoría de Halley sobre la circulación atmosférica, incluyendo también el efecto de la rotación de la tierra mediante la conservación de la velocidad angular (no del momento angular) del aire, lo que le permitió explicar los vientos del oeste de las latitudes medias a ambos lados de la franja de vientos del este que soplan en el Ecuador, donde respetó la teoría del ascenso por causas térmicas establecida por Halley. Señaló además la necesidad de que estas dos corrientes principales se equilibraran para evitar que la tierra termine parándose en su movimiento en torno al eje. Esta teoría se mantuvo en pie hasta principios del siglo XX sin cambios importantes, y ese esquema de circulación general recibe el nombre de célula de Hadley en su honor. No obstante, en su tiempo no obtuvo el reconocimiento inmediato, ya que por aquellas fechas, Jean le Rond d'Alembert (1717-1788) achacaba los movimientos atmosféricos no al calentamiento solar, del que decía que no podía afectar más allá de las primeras capas de la atmósfera, sino a la atracción gravitatoria de la luna y el sol sobre el aire, considerado como un fluido, por lo que los vientos serían la analogía de las corrientes de marea en el mar. A pesar de su error de planteamiento, su trabajo fue importante en la medida en que supuso el principio de la expresión en

forma matemática de los movimientos de la atmósfera, y ello contribuyó a sentar las bases de la meteorología como una ciencia.

Otro gran nombre relacionado con las escalas termométricas es el de Anders Celsius (1701-1744), quien propuso en 1742 una escala basada en el punto de ebullición del agua (0°) y el punto de congelación (100°). Esta graduación centesimal se impuso finalmente en el trabajo científico, a pesar de que su escala original fue cambiada de sentido por Pierre Christian en 1743, quedando tal y como se usa en la actualidad, 0° en el punto de congelación y 100° en el punto de ebullición del agua.

Dentro de sus trabajos sobre navegación, Pierre Bouguer (1698-1758) describió en 1746 un anemómetro de presión portátil cuya lectura se medía por la fuerza que hacía el viento sobre un muelle. Inventó también el heliómetro, y estudió con él la radiación atmosférica y la forma en que ésta dependía de la naturaleza de la superficie terrestre y el espesor de la atmósfera.

En 1749, Benjamin Franklin (1706-1790) explicó las corrientes ascendentes en la atmósfera como resultado del calentamiento local de la atmósfera por el sol. En el mismo año, Jean Andre De Luc (1727-1817) estudió intensamente la causa de los errores en las lecturas de los barómetros no causadas por la presión atmosférica, especialmente los causados por la temperatura, y construyó un barómetro de sifón portable. Con ello comenzó también un agrio debate entre los partidarios de los barómetros de sifón frente a los partidarios de los barómetros de cisterna, que al final han acabado por imponerse. En el estudio del higrómetro, De Luc postuló la necesidad de un punto fijo, de estandarización de las escalas y de escalas lineales. Además de ello, en 1773 inventó un higrómetro de marfil y posteriormente de hueso de ballena, mucho más preciso que los que se estaban realizando por esa época. También en 1749, Alexander Wilson (1714-1779) llevó a cabo medidas de las características del aire en altura utilizando cometas.

En 1751, Charles Le Roy (1726-1779) realizó estudios sobre la condensación del vapor de agua del aire en superficies frías, y, aunque sus trabajos no servían para crear un instrumento, acuñó el término de *grado de saturación* del vapor de agua en el aire.

En 1755, William Cullen (1710-1790) estudió el enfriamiento que se produce en los cuerpos a causa de la evaporación de diferentes líquidos, incluyendo el agua. Para ello, midió el descenso en la temperatura de termómetros que se dejaban secar tras haber estado inmersos en un líquido. También estudió el enfriamiento asociado a la expansión brusca de un gas.

En el mismo año de 1755, Leonhard Euler (1707-1783) realizó el que quizá ha sido uno de los descubrimientos más importantes en la meteorología dinámica, ya que desarrolló las ecuaciones del movimiento para fluidos compresibles y no compresibles no viscosos a partir de la segunda ley de Newton y el concepto de ecuaciones en derivadas parciales. Además de ello, formuló en su forma actual la ecuación de continuidad, previamente descrita por D'Alembert mediante una fórmula sencilla y conceptualmente por otros (Bacon, Boyle, Newton, Hadley). Sus ecuaciones permitieron describir el movimiento en fluidos considerando campos de variables físicas, en la llamada formulación euleriana de la mecánica de fluidos, que es una de las formas principales empleadas en la actualidad.

Johann Heinrich Lambert (1728-1777) explicó en 1765 las condiciones necesarias para la formación de corrientes convectivas en la atmósfera. Según él, el aire caliente que asciende fluye sobre áreas contiguas de aire frío, que de esa forma se ve obligado a ocupar el lu-

gar dejado por el aire caliente, por lo que se forma la circulación. Esta explicación implicaba el reconocimiento de la existencia del peso del aire, algo reconocido desde el desarrollo del barómetro. Estudió extensivamente la humedad atmosférica, construyendo en 1768 un barómetro de intestino de gato retorcido, cuya aguja giraba en función del contenido de humedad del aire. Con ese instrumento, para el que propuso el nombre de higrómetro, analizó las variaciones mensuales y anuales de humedad. Estudió también las relaciones entre la humedad y la temperatura y las variaciones de la humedad en diferentes localidades. Obtuvo una relación experimental en forma de serie de funciones para predecir la temperatura y la humedad media mensual anual en función de la posición del sol. Pero su principal aportación fue el hecho de representar sus datos en gráficas y no en tablas, algo en lo que fue pionero en el campo de la meteorología. Finalmente, en 1771, J.H. Lambert propuso la creación de una red meteorológica que tomara medidas alrededor del mundo. Para ello representó el mundo como un icosaedro e instaló los puntos de observación en el centro de las caras y en algunos puntos aislados. Las medidas se debían tomar una vez al día coincidiendo con el mediodía de Londres, lo que permitiría tener una "instantánea" del tiempo en el mundo.

En 1769, William Heberden (1710-1801), cuyas principales aportaciones a la ciencia fueron en el campo de la medicina, con el estudio de la angina de pecho y la varicela, demostró que las lecturas de los pluviómetros eran muy sensible a la altura sobre el suelo en la que se situaban los mismos. La causa última de ello no fue comprendida hasta finales del siglo XIX, en que se achacó a la turbulencia atmosférica.

En 1773, Horace Bénédict de Saussure (1740-1799) construyó un higrómetro con pelo humano. Además de ello, analizó la evaporación y las consecuencias meteorológicas de la humedad atmosférica. Demostró que, a igualdad de presión y temperatura, el aire húmedo es más ligero que el aire seco. Demostró asimismo que los cambios en la presión atmosférica están relacionados con el movimiento del aire y que las montañas influyen en el tiempo.

En el mismo año, Carl Wilhelm Scheele (1742-1786) demostró que el aire está compuesto por gases diferentes, y ya en 1774, Antoine Laurent de Lavoisier (1743-1794) descubrió uno de estos gases, el oxígeno.

En 1775, James Lind (1716-1794), descubridor del remedio contra el escorbuto, construyó el primer anemómetro de presión basado en la diferencia entre los dos niveles del agua en un tubo acodado, siguiendo un diseño que ya había presentado unos años antes Pierre-Daniel Huet (1630-1721).

Los hermanos Montgolfier, Joseph (1740-1799) y Étienne (1745-1799) lograron que un globo aerostático se elevara en el aire en junio de 1783. Jacques Alexandre Charles (1746-1823) extendió este descubrimiento y este dispositivo fue utilizado ya desde 1784 para medir las características del aire en las capas superiores de la atmósfera por los aeronautas Jeffries y Blanchard (1753-1809). En el mismo año de 1783, Saussure describió la existencia de agua superenfriada (en estado líquido por debajo de 0°C).

Hacia finales de siglo, todos los intentos de generar una red internacional de medición del tiempo se habían encontrado con un problema concreto, la existencia de muchas ramas científicas por investigar y la ausencia de entes que se dedicarían exclusivamente a la meteorología. En 1780, el Elektor Karl Theodor de Baviera (1724-1749) creó la primera sociedad meteorológica, *Sociedad Meteorológica Palatina*, que puso finalmente en marcha una red internacional con 57 puntos de medida, procedimientos e instrumentos normalizados (baróme-

tro, termómetros, higrómetros de pluma, pluviómetro, electrómetro, anemómetro y en algunas estaciones, brújula). Las mediciones se debían realizar a intervalos concretos fijos, tres veces al día (7h, 14h y 21h en hora local). Las estaciones cubrían puntos en Norteamérica, Europa y Asia, y se editaban en el boletín de la Sociedad. Esta red meteorológica estuvo en funcionamiento hasta 1792.

En 1784, en su obra *Teoría de la tierra* y en 1793 en *Teoría de la lluvia*, James Hutton (1726-1797) presentó una teoría de la formación de la lluvia en la que achacaba la misma al contacto entre dos masas de aire con el grado de saturación suficiente. Identificó estas masas de aire como una corriente polar inferior y una ecuatorial superior, de una forma similar a lo que hoy en día se considera un frente frío.

Sir John Leslie (1766-1832) creó en 1799 un nuevo tipo de higrómetro que permitía medir, a partir del enfriamiento provocado por la evaporación en dos bulbos idénticos llenos de aire, el contenido en humedad atmosférica. Sus trabajos anticiparon así el desarrollo del psicrómetro, instrumento empleado para medir la humedad atmosférica en la actualidad a partir de la diferencia de temperatura entre dos termómetros, uno seco y otro húmedo. Fue además el primero en crear hielo artificial.

Pierre Simon de Laplace (1749-1827) desarrolló a finales de siglo la formulación moderna de la aproximación hidrostática, empleó por primera vez el operador que lleva su nombre, precisó la explicación de la velocidad del sonido mejorando las predicciones newtonianas, y realizó aportaciones a la termodinámica y la realización de observaciones meteorológicas. Dentro de sus trabajos sobre termodinámica, destaca el libro *Memoria sobre el calor*, que escribió de forma conjunta con A.L. Lavoisier, y en el que definieron la unidad de medida del calor, y recogieron otros conceptos importantes de la calorimetría, como los conceptos de calor específico y calor latente de fusión y evaporación, ya presentes anteriormente en la obra de Joseph Black (1728-1799).

El principal trabajo en meteorología de Joseph-Louis Lagrange (1736-1813) consistió en el desarrollo de la aproximación lagrangiana a la mecánica de fluidos, realizada a finales del siglo XVIII. En ella, el movimiento de un fluido se estudia siguiendo el movimiento de las partículas individuales que lo forman. A pesar de que ya existía la aproximación euleriana, basada en campos de las propiedades de los fluidos, y de que la aproximación euleriana es la más utilizada en la actualidad en la mayoría de problemas relacionados con los movimientos de aire en la atmósfera, la aproximación lagrangiana aún encuentra aplicación en algunos estudios de seguimientos de penachos contaminantes, discontinuidades en sistemas frontales, o en la caída de gotas de lluvia, es decir, aquellos fenómenos en los que la influencia de las fronteras es importante.

John Dalton (1766-1844) demostró que el agua no sufre ninguna reacción química para convertirse en vapor, y que la introducción del vapor por evaporación en una columna de aire debe modificar el peso de la misma y, por tanto, la lectura del barómetro, algo que ya Saussure había puesto de manifiesto de forma experimental. Además de ello, sus estudios sobre la presión parcial de los gases posibilitaron el tratamiento moderno de las mezclas de gases, especialmente en lo que a la atmósfera se refiere. "Redescubrió" el esquema de circulación general de Hadley en el año 1793 sin tener conocimiento del mismo, y añadió importantes contribuciones a este apartado en el tratamiento de los transportes de humedad de las zonas tropicales al ecuador.

3. LA METEOROLOGIA MODERNA

A todos los efectos, podemos considerar que la meteorología moderna comienza en el siglo XIX, con instrumentos meteorológicos avanzados y fiables, y con avances considerables en la física que permitieron obtener una imagen aproximada de la atmósfera para la predicción de su comportamiento. A lo largo del siglo XIX y el XX se formularon las leyes que gobiernan los movimientos atmosféricos y que han permitido por lo tanto explicar muchas cosas de forma detallada y predictiva con ciertas garantías de éxito. Las leyes principales son la primera ley de la termodinámica, formulada a mediados del siglo XIX, la ley de estado del aire, que es una combinación de las leyes de Boyle y Charles, esta última formulada en el año 1787 por Charles pero que no fue conocida hasta principios del siglo XIX. La ecuación de movimiento vertical se puede simplificar con la aproximación hidrostática, conocida desde Arquímedes, mejorada por los trabajos de Pascal en el siglo XVI, pero imposible de emplear tal y como la conocemos hoy en día hasta el siglo XVIII, cuando se inventaron las ecuaciones diferenciales en derivadas parciales. La primera referencia conocida a esta ley se encuentra en trabajos de Laplace a finales del siglo XVIII y principios del XIX. Las ecuaciones del movimiento comenzaron a desarrollarse ya con el concepto de magnitud vectorial en el siglo XVI, de manos de Simon Stevin (1548-1620), la separación entre velocidad y aceleración la impulsó Galileo, también en el siglo XVI y fundamentalmente los trabajos de Newton (sus tres leyes), en el siglo XVII, en las que sentó el tratamiento teórico de toda la mecánica clásica no relativista, ya que el resto de descubrimientos se pueden considerar aplicaciones de las mismas. Estas aplicaciones se llevaron a cabo mediante el cálculo diferencial, también iniciado por Newton (y Leibniz por separado), y posteriormente por los descubridores de las ecuaciones en derivadas parciales, uno de cuyos trabajos fundamentales se debió a Euler. Estas leyes pusieron la base de la descripción actual de los fenómenos meteorológicos, y, como se ve, todos ellos estaban ya desarrollados para 1800, o a punto de desarrollarse (primer principio de la termodinámica o fuerza de Coriolis), lo que permitió un rápido avance de la meteorología a partir de este momento.

Para finales del siglo XIX, los años de recogida de observaciones meteorológicas habían permitido detectar aspectos relevantes de muchos fenómenos meteorológicos a nivel descriptivo e incluso algunas explicaciones cualitativas correctas en sus rasgos generales. Este es el caso de, por ejemplo, la baja térmica estival de la Península Ibérica, ya mencionada en libros de esta época.

También hay que señalar que la meteorología adquirió una gran importancia en esta época debido a las campañas militares, bastante abundantes a lo largo de los siglos XIX y XX, y los primeros gabinetes meteorológicos se crearon a la sombra de los ejércitos.

Ya a finales del siglo XIX se reconocía la imposibilidad de predecir el tiempo para intervalos largos. Las técnicas de predicción se basaban o bien en reglas experimentales obtenidas tras procesar los datos de muchos años de observaciones que describían una sucesión determinada de variaciones en los elementos meteorológicos y otros signos en el aspecto del cielo o bien en la predicción para un lugar en función del estado del tiempo unas horas antes en localidades situadas a barlovento de la estación para la que se deseaba practicar la predicción.

La predicción numérica era aún inexistente, y solamente se pudo formalizar a lo largo del siglo XX, con la ayuda del desarrollo de la técnica para la transmisión y el procesamiento masi-

vo de datos y la evolución exponencial en la capacidad de cálculo de los ordenadores. Además de permitir el tratamiento de los datos, el ordenador ha permitido poner en marcha complejos sistemas de comunicaciones y la creación de redes automáticas de medida y almacenamiento de datos, incluso en lugares de muy difícil acceso, como boyas marinas, desiertos, etc...

3.1. El siglo XIX

En 1800, Friedrich Wilhelm Herschel (1738-1822), astrónomo del rey de Inglaterra, probó que el sol emitía calor en forma de radiaciones invisibles para el ojo humano, sin las cuales era imposible completar el balance de energía.

El naturalista Jean Baptiste de Monet Lamarck (1744-1829) desarrolló en 1801 el primer esquema de clasificación de nubes, casi 50 años después de que Karl von Linneo (1707-1778) comenzara con la clasificación de las plantas. Este esquema fue mejorado por Luke Howard (1772-1864) en el año 1803 en su obra *On the modification of clouds*, consiguiendo la base del esquema actualmente utilizado. Su esfuerzo, sin embargo, no fue solamente taxonómico, ya que en su clasificación señaló que las nubes reflejan en sus formas las causas dinámicas que originan los cambios atmosféricos.

Boeckmann analizó en 1802 los datos que le proporcionaba un higrómetro de Leslie y comenzó los trabajos que llevarían al desarrollo final del psicrómetro, tras la contribución de al menos 72 científicos del siglo XIX, entre los que destaca Ernst Ferdinand August (1795-1870).

En 1804, Joseph-Louis Gay-Lussac (1778-1850) ascendió en globo hasta 7000 metros, y determinó que en aquellas altitudes, el contenido porcentual en oxígeno del aire era el mismo que en el suelo.

Henry Foster (1797-1831) realizó en 1809 estudios de la velocidad del viento en altura, demostrando que la consideración de la dimensión vertical era importante.

En 1812, Laplace dio pie al determinismo científico, al indicar que el conocimiento completo de las masas, posiciones y velocidades de todas las partículas del universo en un momento dado permitiría la predicción de todos los sucesos pasados y futuros. Este principio era de posible aplicación a la meteorología, aunque esta aplicación no se formalizó hasta principios del siglo XX.

En 1816, Heinrich Wilhelm Brandes (1777-1834) dibujó los primeros mapas sinópticos, analizando sus características en el libro *Contribuciones a la Meteorología*.

En 1817, Alexander von Humboldt (1719-1859) publicó un mapa con la distribución de las temperaturas medias anuales sobre el Hemisferio Norte. En este mapa, von Humboldt fue el primero en utilizar isoterma de temperatura, y fue el primero en hablar de la continentalidad como un factor climático añadido a la insolación y la topografía.

En 1826, Brandes señaló que la dirección del viento está determinada por la presión atmosférica, que las depresiones viajan normalmente hacia el oeste en Europa, y que los cambios en la presión atmosférica son los que determinan los cambios del tiempo.

En 1828, Heinrich Wilhelm Dove (1803-1879) señaló que los ciclones tropicales son sistemas que viajan con vientos fuertes que soplan en el sentido contrario a las agujas del reloj

en el hemisferio Norte y de acuerdo con el sentido del reloj en el hemisferio Sur. De aquí, determinó cómo cambia la dirección del viento en un lugar determinado a medida que pasa una tormenta. Este mismo hecho había sido registrado en 1821 por el meteorólogo autodidacta norteamericano William C. Redfield (1789-1857) a partir de los daños en la vegetación causados por un huracán en Nueva Inglaterra. Redfield identificó el cinturón tropical como la zona donde se generan los huracanes, y señaló cómo tienden a cambiar de dirección hacia el Este cuando entran en la región extratropical de vientos del Oeste situada en torno a los 30° de latitud N.

En 1831, Gustave Gaspard Coriolis (1792-1843) describió matemáticamente la fuerza que lleva su nombre y que permite explicar la rotación de los anticiclones y borrascas.

James Pollard Espy (1785-1860) desarrolló en el mismo año un modelo para explicar las fuentes de energía de las tormentas. El modelo citado asumía un flujo de aire radialmente convergente en la base de la tormenta. Ello provocaba la ascensión del aire, que se condensaba y el agua precipitaba. La liberación de calor latente de fusión provocaba una mayor ascensión del aire, y el desequilibrio se mantenía mientras el aire en superficie no dejase de fluir hacia el centro de la tormenta. Realizó también estimaciones experimentales del valor de los gradientes verticales de temperatura, adiabático seco y adiabático saturado.

Dove determinó en 1837 que los vientos predominantes en superficie en latitudes medias son principalmente del suroeste y no del noroeste como predecía la teoría de Hadley, introduciendo una variación longitudinal del flujo más cercana a la realidad pero basada en hipótesis erróneas. Introdujo también los conceptos de masas de aire polares y ecuatoriales. A pesar de que sus predicciones estaban de acuerdo con la conservación del momento angular de la tierra y las distribuciones de energía y temperatura observadas en la tierra, la falta de soporte teórico a su hipótesis hizo que la misma no se aceptara en su tiempo.

También en 1837, Samuel Finley Breese Morse (1791-1872) inventó el telégrafo, y su utilización facilitó la transmisión rápida de datos meteorológicos de un lugar a otro del mundo. Ya a mediados de la década de los 50, las compañías telegráficas enviaban datos meteorológicos por sus líneas a la Institución Smithsonian, donde Joseph Henry (1797-1878) realizaba mapas diarios del tiempo a partir de 1849. Esta red alcanzó pronto las 500 estaciones, aunque su expansión fue detenida por la Guerra Civil en los Estados Unidos.

Thomas Brown Jordan (1807-1890) puso a punto un heliógrafo para medir la intensidad y la duración de la radiación solar.

La década de 1840 contempló la postulación del principio de conservación de la energía de forma independiente por Robert Mayer (1814-1878), James Joule (1818-1889) y Hermann von Helmholtz (1821-1894). También en esta época, Claude-Louis-Marie-Henry Navier (1785-1836) y George Gabriel Stokes (1819-1903) añadieron independientemente términos de rozamiento viscoso newtoniano a las ecuaciones de Euler, dando origen a las ecuaciones básicas de descripción del movimiento de un fluido que llevan su nombre conjunto, ecuaciones de Navier-Stokes.

En 1841, Elias Loomis (1811-1889) identificó varias causas distintas que provocan la lluvia. Aire caliente que entra en contacto con agua o tierra frías causa niebla. La mezcla de corrientes de aire caliente y frío provoca lluvias débiles. El transporte súbito de aire a gran

altura por ascensión forzada por pendientes de tierra o una corriente opuesta de aire frío provoca lluvias intensas. Así, invalidaba la necesidad de convergencia en la base de las grandes tormentas de la teoría de Espy. En concreto, del estudio de los vientos, los cambios de temperatura y de presión causados por una tormenta en 1836, determinó que una masa de aire frío del noreste había desplazado una masa de aire soplando del sur haciendo que ésta circulara por encima de ella. De esta forma, identificó el concepto actual de superficie frontal.

En 1844, Lucien Vidie (1805-1866) inventó un barómetro que medía la presión atmosférica mediante la deformación de una cápsula de vacío. Este instrumento fue posteriormente perfeccionado por Eugène Bourdon (1808-1884) hasta llegar al diseño básico de los barómetros aneroides empleados en la actualidad.

Henri Victor Regnault (1807-1878) propuso en 1845 un higrómetro basado en la medición del punto de rocío.

William Thomson (1824-1907), más conocido por Lord Kelvin, definió en 1848 la escala absoluta de temperaturas que lleva su nombre, así como varias otras contribuciones a la termodinámica.

En 1849 William Reid (1791-1858) analizó los ciclones del hemisferio Sur, confirmando que los sentidos de rotación y las direcciones de propagación están cambiadas respecto al hemisferio Norte. Henry Piddington (1797-1858) realizó la misma tarea en la zona de Arabia y el Golfo de Bengala.

Esta época de mediados de siglo marcó también la aparición de un gran número de servicios meteorológicos nacionales. En 1847 se creó el *Instituto Meteorológico Prusiano*, en 1850, la *Royal Meteorological Society* en Londres, en 1852, la *Sociedad Meteorológica de Francia*, en 1854 el *Real Instituto Meteorológico Holandés*, en 1859 en Suecia, en 1860 en España, en 1862 en Sudáfrica e Isla Mauricio, Italia en 1863, etc....

Desde 1852 a 1890, la presión, la temperatura y la humedad se midieron en altura con globos tripulados por Welsh, James Glaisher (1809-1903) y Richard Assman (1845-1918) hasta grandes alturas. También en globo, Barral y Bixio llegaron a una altura superior a los 7000 m y descubrieron agujas de hielo en suspensión, lo que explicaba la composición de las nubes estratiformes.

En 1850, Espy demostró que las nubes se mantienen suspendidas debido a las corrientes ascendentes de aire.

En 1854, una tormenta hundió varios barcos de guerra de las flotas inglesa y francesa en el puerto de Balaklava, Ucrania. Como consecuencia de ello, Francia creó en 1856 un servicio nacional de aviso de tormentas.

William Ferrel (1817-1891) publicó en 1856 un nuevo esquema de circulación general según el cual existían tres células de circulación en cada hemisferio frente al esquema de una célula de Hadley y Dove. Las células de Hadley (en el Ecuador) y la polar eran de origen puramente térmico, y entre ambas aparecía una tercera célula en latitudes medias que permitía explicar los vientos del suroeste en esas latitudes en base a la conservación del momento angular total. La subsidencia del aire en latitudes de 30 grados explica, por la falta de humedad, la aparición de los desiertos en esa zona de la tierra. La zona lluviosa de latitudes subárticas

sería un reflejo de los movimientos ascendentes en la célula intermedia. Las desviaciones de los flujos en estas células incorporaban ya la teoría de Coriolis sobre las fuerzas en los sistemas de referencia no inerciales. Su esquema no explicaba del todo los transportes de calor existentes en latitudes medias ni daba ninguna razón física que causara la existencia de la célula intermedia, de hecho, solamente servía para explicar los hechos experimentales, pero no se sabía la razón última de la misma. En ese sentido, esta célula tenía más bien las características de un artefacto diseñado por Ferrel para dar cuenta de los hechos experimentales.

En 1857, Rudolf Clausius (1822-1888) explicó con su teoría cinética de los gases el fenómeno de la evaporación y también formuló el segundo principio de la termodinámica. Buys Ballot (1817-1890) enunció en el mismo año la famosa ley sobre la dirección de los vientos que relaciona la misma con las posiciones relativas de las altas y las bajas presiones respecto a la localización del observador.

En 1860, Robert Fitzroy (1805-1865), que dirigió la expedición del barco Beagle, en la que Darwin desarrolló su teoría del origen de las especies y con el cual polemizó posteriormente de forma furibunda por sus tesis evolucionistas, identificó las corrientes de Dove en los mapas sinópticos.

Janman desarrolló en 1861 una teoría de ciclones en los que se producen variaciones súbitas de la dirección de la velocidad del viento basada en observaciones marítimas.

En 1863, el *Observatorio de París* comenzaría a editar mapas sinópticos diarios en el formato actual. Francis Galton (1822-1914) definió el concepto de anticiclón y publicó un libro de título *Meteorographica or Methods of Mapping the Weather*, donde analizó diversas estructuras meteorológicas y la manera de representar las mismas en los mapas sinópticos.

En 1868, Alexander Buchan (1829-1907) publicó un mapa de las trayectorias de viaje de las depresiones a través de Norte América, el Atlántico y Norte de Europa. En 1869 publicó también los mapas de presión mensual media y anual para todo el mundo, con lo que la comprensión de la circulación general dio un gran avance, al menos en sus aspectos descriptivos.

W. Clement Ley (1840-1896) mejoró la clasificación de nubes de Howard entre los años 1865 y 1878. Realizó además un modelo matemático de lo que posteriormente se consideraría un frente.

Robinson inventó el anemómetro de cazoletas en 1870.

El *Servicio Nacional Meteorológico* de Estados Unidos comenzó a funcionar en 1871 como dependiente del *Departamento de la Guerra*. Su intención principal era servir de servicio de predicción de tormentas para las zonas costeras y los Grandes Lagos. Las predicciones ganaron pronto en exactitud, y además se extendieron a los cambios de temperatura, las precipitaciones y las olas de frío. A partir de 1878 publicaron mapas sinópticos diarios. En años subsiguientes se formaron servicios meteorológicos nacionales en Japón, India, Brasil y otros países. En 1873 se celebró en Viena el primer Congreso Internacional de Meteorología. En 1880, entre estos servicios constituyeron la *International Meteorological Organization* (IMO), y reconocieron la necesidad de cooperación internacional.

En 1874, Julius von Hann (1839-1921) determinó, a partir de ascensiones en globo y escaladas a altas montañas que incluyeron picos en los Alpes e Himalaya que más del 90% del vapor de agua atmosférico se concentra por debajo de 6000 m, por lo que las montañas se

comportan como barreras para el transporte del mismo. En 1883 publicó su *Handbuch der Klimatologie*, en el cual recopilaba prácticamente todo el conocimiento climatológico hasta aquellas fechas, y que se actualizó en ediciones sucesivas hasta 1911. A lo largo de su vida, desarrolló teorías sobre los vientos de ladera.

En 1875, los trabajos de Paul-Jean Coulier (1824-1890) demostraron que, contra lo que defendía Guericke, el simple descenso de temperatura del vapor de agua por debajo del punto de rocío puede no provocar la condensación, sino que en el caso de repetir los experimentos de Guericke en matraces en los que el aire se ha filtrado con algodón, ésta no se producía. Por ello, llegó a la conclusión de que la existencia de polvo en el aire cuyas partículas actuaran como núcleos de condensación era imprescindible. Ello abrió paso a las teorías de nucleación heterogénea, actualmente en vigor.

En 1877, H.H. Hildebrandsson (1838-1925) publicó un atlas de los movimientos superiores de la atmósfera.

Elias Loomis (1811-1889) preparó en 1882 el primer mapa mundial de precipitación anual media utilizando isohietas.

En 1883, Abercromby desarrolló un modelo de ciclón en función de la distribución de presión en mapas sinópticos. Julius von Hann publicó en estas fechas su *Handbuch der Klimatologie*, en el cual recopilaba prácticamente todo el conocimiento climatológico hasta aquellas fechas, y que se actualizó en ediciones sucesivas hasta 1911.

En 1886, Léon-Philippe Teisserenc de Bort (1855-1913) publicó mapas con la distribución mundial de la nubosidad media anual y mensual para todo el mundo. En 1898, al analizar el decrecimiento de la temperatura con la altura, descubrió que a una altura aproximada de 11 km, el descenso de la temperatura con la altura pasaba de -5.5° por kilómetro a permanecer la temperatura constante. De esta forma descubrió la tropopausa, y llamó troposfera a la parte inferior y estratosfera a la superior.

En 1899, Andrew John Herbertson mejoró el mapa de precipitación anual de Loomis calculando las medias mensuales de precipitación.

A. Oberbeck buscó soluciones matemáticas a las ecuaciones del movimiento para descubrir la circulación atmosférica a nivel planetario en el año 1888, algo en lo que fue el primero, pues hasta entonces, las argumentaciones al respecto eran puramente cualitativas. Inicialmente, intentó calcular un balance entre las fuerzas de presión, rozamiento y Coriolis, llegando así a demostrar la existencia de una célula de Hadley. Al añadir ciertas componentes no lineales de las ecuaciones en busca de situaciones más complejas, los resultados que obtuvo no fueron realistas, y su fracaso retrasó la aplicación de métodos dinámicos para la búsqueda de alguna solución al problema de la circulación atmosférica durante muchos años. En las mismas fechas, 1888 y 1889, Helmholtz postuló que los flujos contrarios en altura de las células de latitudes medias de Ferrel y ecuatorial de Hadley se disiparían en turbulencias horizontales y verticales que se deberían de formar en la zona de encuentro de estos flujos contrarios de aire en latitudes medias. A pesar de que Helmholtz se refería a ondas gravitacionales que actualmente se conocen como la inestabilidad de Kelvin-Helmholtz, mecanismo que no es de aplicación por el tamaño del movimiento, su visión de la importancia de la turbulencia para calcular correctamente los flujos de calor dentro de un esquema de circulación general es un aspecto que hoy en día se considera de gran relieve, ya que las

actuales teorías de circulación general están basadas en el mismo. Los trabajos de Helmholtz y de Lord Kelvin a finales del siglo XIX anticiparon los conceptos de circulación y vortici­dad en la mecánica de fluidos.

A lo largo del siglo XIX, la mecánica de fluidos comenzó a considerar la necesidad de incluir el rozamiento en sus análisis, y un gran número de físicos experimentalistas empezaron a estudiarlo en fluidos en condiciones reales. A finales de siglo, la unificación entre los experimentalistas y los teóricos llegó de manos de William Froude (1810-1879) y su hijo Robert Froude (1846-1924), que desarrollaron las leyes de validación de modelos. Lord Rayleigh (1842-1919), publicó la técnica del análisis dimensional, y Osborne Reynolds (1842-1912) publicó en 1883 la importancia del número adimensional que lleva su nombre.

Van Bebber desarrolló en 1890 un modelo de ciclón que incluía la consideración de la convergencia en superficie y divergencia en altura y la distribución de la presión en superficie. Del mismo año 1890 data la primera utilización de un globo sonda no tripulado para el estudio de las variables meteorológicas en altura. En 1893, se constituyó la primera red de medida de las variables meteorológicas en altura por medio de cometas. En este mismo año, un globo libre equipado con un barotermógrafo se elevó por primera vez por encima de 16000 m de altura y, en 1897, se unió un higrómetro al registrador. En 1896 se lanzaron globos libres de forma simultánea en San Petersburgo, París, Estrasburgo, Munich, Berlín y Varsovia.

En esta última década del siglo XIX se intentó provocar lluvia de forma artificial explotando dinamita en el seno de las nubes, transportándola con globos o cometas. Sin embargo, los resultados no fueron nada positivos.

3.2. El siglo XX

Guglielmo Marconi (1874-1937) inventó la radio en 1900, lo que facilitaría más que el telégrafo la transmisión de datos meteorológicos, debido a que ya no había necesidad de establecer costosas líneas telegráficas a lugares remotos.

En 1901, Julius von Hann publicó la primera explicación correcta del efecto Föhn en su libro *Lehrbuch der Meteorologie*. También en este año, Richard Assman inventó los globos sondeadores de caucho elástico, que explotaban al llegar a cierta altura y cuyos instrumentos se recuperaban al caer con paracaídas.

En 1902, Vagn Walfrid Ekman (1874-1954) descubrió la espiral que lleva su nombre, espiral de Ekman. Esta espiral es la forma que tiene la hodógrafa de la distribución vertical de velocidades en un fluido sometido a arrastre viscoso en sus caras superior e inferior y situado en un sistema de referencia que gira. A pesar de que su desarrollo original lo hizo para la oceanografía, la misma metodología que él empleó permite obtener una solución similar para la variación de la velocidad del viento con la altura en la atmósfera.

Los hermanos Wilbur Wright (1867-1912) y Orville Wright (1871-1948) inventaron el aeroplano en 1903, lo que facilitó el estudio de la atmósfera en altura. En ese mismo año, Max Margules (1856-1920) lanzó la hipótesis de que la energía cinética de las tormentas procede de la energía potencial total asociada con los contrastes horizontales de temperatura.

En 1904, Prandtl (1875-1953) señaló la existencia, en los fluidos de baja viscosidad, de una capa límite cercana a los obstáculos sólidos y una capa externa donde se verifican las

ecuaciones de Euler y Bernoulli. En el mismo año, Vilhelm Frimann Koren Bjerknes (1862-1951) descubrió que la predicción meteorológica es fundamentalmente un problema de valor inicial de la física matemática, y que las ecuaciones a resolver ya eran conocidas en su forma básica pero la resolución de estas ecuaciones era imposible por medios analíticos. Publicó sus conclusiones al respecto en *The Problems of Weather Prediction Considered from the Point of View of Mathematics and Mechanics*.

Lempfert y Sir William Napier Shaw (1854-1945) estudiaron mediante el análisis de trayectorias las corrientes de Dove en 1906. Este último introdujo el concepto de milibar y el tefigrama en 1930.

En 1909, el piloto de globos Rotch inventó el primer teodolito para medir los vientos en altura. Independientemente, Alfred de Quervain (1879-1929) y Hugo Hergesell (1859-1938) emplearon teodolitos para seguir globos y medir así la velocidad del viento en altura.

Sandstrom y V. Bjerknes (1862-1951) utilizaron por primera vez entre 1909 y 1911 el análisis de líneas de corriente en mapas meteorológicos.

En 1911, William H. Dines (1855-1927) completó el concepto de ascensión en los ciclones de Espy cerrando el flujo en cada ciclón mediante la divergencia y el descenso del aire en las capas altas atmosféricas. De la relación entre la convergencia en superficie y la divergencia en altura explicó que los ciclones se intensificaran o se debilitaran.

El primer modelo de balance de la radiación atmosférica lo realizó Robert Emden (1862-1940) en 1913, distinguiendo ya las características de la radiación solar de la terrestre en cuanto a características espectrales de la misma.

Los primeros vuelos meteorológicos con aeroplano se realizaron en 1917, año en el que se realizaron los primeros sondeos meteorológicos con cometas que transmitían los datos por línea telegráfica.

En 1919, Jakob Bjerknes (1897-1975) describió la estructura de las depresiones a nivel del suelo.

La década de los veinte vio las actividades de Lewis Fry Richardson (1881-1953), el primer científico que resolvió las ecuaciones del movimiento de la atmósfera de forma numérica antes de la existencia de ordenadores. Para ello, demostró que las ecuaciones planteadas por la escuela noruega (V. Bjerknes) se podían aproximar por series de operaciones aritméticas sencillas. Los resultados de su intento se publicaron en 1922 bajo el título *Weather Prediction by Numerical Process*, pero no fueron buenos porque no simplificó lo suficiente las ecuaciones originales, y sin embargo, su intento supuso un trabajo humano considerable. Contribuyó de forma importante al descubrimiento de métodos numéricos para ecuaciones diferenciales en derivadas parciales, y descubrió entre 1919 y 1920 el número de Richardson que se emplea en el estudio de la turbulencia atmosférica.

Entre 1918 y 1928, los miembros de la escuela de Bergen Vilhelm Bjerknes, Helvor Solberg y Ton Bergeron (1891-1977) crearon la primera teoría de formación del frente polar y los conceptos de frente cálido y frente frío.

Entre 1923 y 1935, diversos científicos inventaron y perfeccionaron el radiosondeador, lo que permitió emplear globos libres no tripulados para realizar sondeos hasta alturas de 31 km. Se empezaron a utilizar de forma rutinaria desde 1937.

En 1925, David Brunt (1886-1965) demostró la imposibilidad de predecir el tiempo por extrapolación del comportamiento cíclico de las series temporales. Además, desarrolló un modelo teórico de las oscilaciones verticales de partículas en una atmósfera estratificada. Este modelo había sido ya desarrollado un año antes de forma independiente por Vilho Väisälä (1899-1969), y desde entonces se conoce como frecuencia de Brunt-Väisälä. Contribuyó a la teoría de los ciclones y anticiclones y a los intercambios de calor en la atmósfera. En estas fechas, Exner señaló que los esfuerzos en explicar la circulación general en base a movimientos continuos en sentido polar o ecuatorial sobre todas las longitudes y sobre intervalos grandes de latitud es imposible, ya que exigirían gradientes horizontales de presión a lo largo de todo el globo, algo que es imposible, ya que a nivel terrestre, las condiciones de contorno deben ser periódicas. Por ello, Exner señaló la necesidad de considerar gradientes de presión zonalmente asimétricos.

Un avance importante en las teorías de circulación general se produjo en 1926. Hasta ese momento, todos los esquemas importantes de circulación general habían supuesto que, de alguna forma, para que se mantuviera la rotación terrestre, el flujo zonal en dirección al oeste del ecuador debería estar compensado por otros flujos zonales en dirección al este en latitudes medias con objeto de que se cumpliera la conservación del momento angular total del planeta. En caso contrario, las fuerzas de rozamiento viscoso provocarían que la rotación de la tierra finalmente se detuviera. Harold Jeffreys (1891-) demostró que este transporte de momento no se podía justificar mediante un flujo zonal en una capa límite planetaria. La única forma de justificarlo era en base a una transferencia turbulenta de momento.

En 1928, Bergeron, en su teoría de la frontogénesis, postuló que los ciclones se forman a partir de perturbaciones débiles en los frentes, generalmente en el frente polar para los ciclones en latitudes templadas.

El concepto de análisis isoentrópico se introdujo en el año 1930 de manos de Sir William Napier Shaw, que también introdujo la unidad de medida milibar.

Durante el año 1933 se realizaron los primeros mapas de las capas altas de la atmósfera, inicialmente en niveles de altura constante, y, posteriormente, a niveles de presión constante.

Vilhelm Bjerknes señaló en 1937 que el planteamiento de Helmholtz sobre la circulación general tenía sentido si se consideraba que las turbulencias que se generaban no eran de tipo gravitatorio, sino los ciclones de latitudes medias que se generaban en el frente polar. Ello permitió unificar las teorías de la circulación general con la teoría del frente polar de la escuela noruega. De la misma forma, Bjerknes afirmaba que, fuera de los trópicos, la media zonal de la circulación meridional tendía a cero de forma estadística. Los radiosondeadores se empezaron a emplear de forma rutinaria a partir de 1937. Ese mismo año, Carl Gustav Rossby (1898-1957) y Jerome Namias (1910-) introdujeron el análisis isoentrópico del aire superior, siendo esta técnica utilizada de forma rutinaria en Estados Unidos a partir de 1941. Los avances que Rossby generó en la ciencia de los fluidos geofísicos incluyen también el descubrimiento de las ondas planetarias, el concepto de radio de deformación y el ajuste geostrofico.

I'lya A. Kibel (1904-1970) desarrolló en 1940 un sistema de predicción simplificado basado en las ecuaciones primitivas. Fue también el introductor del número de Rossby.

El año 1941 es el mismo año en que se inventó el radar con fines militares. Este aparato se empezaría a utilizar para detectar lluvia en 1944, y es el primer dispositivo de una familia

llamada sensores remotos activos, que se utilizan para medir a distancia el estado de determinadas magnitudes atmosféricas.

Ton Bergeron y Robert Walter Findeisen (1909-1945) dieron origen a la teoría de la nucleación heterogénea del vapor de agua sobre partículas de hielo que se crean en torno a núcleos de sublimación. Según esta teoría, las gotas de agua de las nubes frías no crecen a partir de la condensación del vapor de agua atmosférico sobre la gota, sino que el vapor de agua se deposita sobre partículas de hielo, ya que su presión de vapor es menor. Ello conlleva también que las gotas de agua superenfriadas se deshagan hacia las partículas de hielo. La fase en la que la precipitación cae finalmente depende según esta teoría de la temperatura de las capas inferiores y no de la temperatura en las capas donde el vapor de agua se solidifica. Los cristales de hielo crecen también por choques entre ellos a partir de un cierto tamaño. En sus rasgos generales, esta teoría sigue vigente en la actualidad para la precipitación en nubes frías.

Posteriormente Langmuir postuló el mecanismo de coalición coalescencia, según el cual las gotitas de vapor condensadas en agua en una primera fase, tras alcanzar un tamaño determinado empiezan a caer, y entonces su crecimiento es más rápido debido a que se unen en los choques que tienen en su caída. Estos choques no son completamente al azar, ya que la velocidad terminal de las partículas depende de su tamaño. De esta forma se podía explicar la formación de gotas en nubes cálidas. Estas teorías condujeron en la década de los 40 y 50 a experimentos con los que se intentaba provocar lluvia mediante la siembra de nubes con yoduro de plata o dióxido de carbono sólido mediante aeroplanos. Los resultados tampoco fueron buenos a la hora de mejorar la precipitación, aunque se pudieron utilizar para la dispersión de nieblas en aeropuertos.

En 1943, un avión penetró por primera vez en el ojo de un huracán. En este mismo año, Nicholai Y. Kochin (1901-1944) y Blinova calcularon a partir del balance de las fuerzas de presión, Coriolis y de viscosidad los transportes de momento y calor en el ámbito de la circulación general. Tras introducir en su modelo las diferentes características del terreno, obtuvieron como resultado los patrones zonales y monzonales de circulación.

También a mediados de la década de los cuarenta, se empezaron a realizar sondeos verticales de la atmósfera hasta 200 km mediante cohetes no tripulados. Junto con los sondeos meteorológicos, que ya iban siendo rutinarios, ello permitió realizar mapas detallados del estado habitual de las capas altas de la atmósfera, inicialmente a altura constante, y posteriormente a presión constante.

En 1945 se adoptó internacionalmente el procedimiento del análisis a presión constante. Se descubrió la corriente en chorro por parte de la escuela de Chicago -Erik Herbert Palmén (1898-), Newton - a partir de los vuelos a gran altura de los aviones B-29. En estas fechas, Jule Gregory Charney (1917-1981) justificó matemáticamente la aproximación cuasigeostrófica, que consiste en suponer movimientos cercanos al equilibrio geostrófico en fluidos continuamente estratificados y con términos no lineales en las ecuaciones dinámicas..

En 1949 Horace Robert Byers (1906-) dirigió un proyecto en el que un equipo comenzó a estudiar tormentas de desarrollo vertical de forma exhaustiva. De esta forma, explicaron la estructura general de las células convectivas, la magnitud de las corrientes ascendentes y la

manera como se organiza la generación de la precipitación en el interior de una célula convectiva.

En el año 1950 John von Neumann (1903-1957) inventó el computador digital, y una de sus primeras aplicaciones fue la predicción numérica del tiempo con un modelo cuasigeostrofico preparado por Charney, Fjørtoft y el propio von Neumann. De esta forma, estos investigadores retomaban el camino emprendido veinte años antes por L.F. Richardson, pero obtuvieron resultados mucho mejores, ya que el modelo empleado era mucho más simplificado que el de aquél. Sus resultados eran comparables a los de los pronosticadores expertos, y con ello dieron nacimiento a la predicción numérica del tiempo. Por aquellas fechas, Reed descubrió los frentes en altura. También en este año se constituyó la *Organización Meteorológica Mundial*, OMM, dependiente de la ONU.

3.3. Avances más recientes

A partir de los años 50, la realización de una cronología es una labor más compleja por la falta de perspectiva histórica, pero los hechos más destacados de estos últimos años se pueden resumir en los siguientes.

Entre 1950 y 1954, las grandes compañías aéreas, comenzando por la PANAM y Air France desarrollaron proyectos que permitieran definir los planes de vuelo en función del estado de la atmósfera, minimizando los riesgos, el consumo de combustible y los tiempos de viaje.

Tras los huracanes *Connie* y *Diane*, que asolaron la costa Este en 1955, se fundó un centro nacional de estudios de tornados en Estados Unidos.

En 1957 la Unión Soviética lanzó el primer satélite (*Sputnik*), y a continuación, los estados Unidos lanzaron en 1959 el primer satélite exclusivamente meteorológico (*Explorer VII*), y posteriormente (1960), el *Television Infrared Operational Satellite*, (*TIROS*). En esta década de los sesenta se lanzó el primer satélite de comunicaciones, se inventó el radiar de pulsos Doppler, los sensores de infrarrojos en los satélites, los satélites geoestacionarios (1966) y los primeros sondeos verticales con satélites dotados de los sensores adecuados, hechos todos los cuales marcaron un tremendo avance en la instrumentación y en la posibilidad de recibir datos meteorológicos abundantes. A partir de estas imágenes se obtuvieron datos meteorológicos de zonas remotas, sondeos verticales de temperatura, datos de velocidad del viento, etc... En esta década de los sesenta se creó el *Geophysical Fluid Dynamics Laboratory* (*GFDL*) en Princeton en torno a Joseph Smagorinsky.

En 1963, dentro del ámbito de la meteorología, E.N. Lorenz publicó un artículo de título *Deterministic non periodic flow* en el que exponía los resultados obtenidos con un modelo que representaba el movimiento de un fluido sometido a convección térmica que se ha constituido en una referencia obligada en el desarrollo posterior de la teoría de sistemas dinámicos no lineales.

En la década de los setenta, los desarrollos teóricos vinieron marcados por el análisis de los frentes costeros, la documentación detallada de los sistemas de precipitación mesoesférica, la introducción de la teoría semigeostrofica y su aplicación al estudio de frentes y corrientes en chorro y la teoría de la inestabilidad simétrica condicional y las bandas de precipi-

tación en ciclones de manos de Hoskins, Emanuel y Bennetts. En el aspecto del desarrollo tecnológico, esta década significó las primeras observaciones de desplazamiento Doppler con multifrecuencia, el inicio de la utilización del radar Doppler en aire claro, la irrupción de los miniordenadores como herramienta de trabajo de los científicos, un sistema interactivo de análisis meteorológico de uso general llamado *McIDAS*, las primeras observaciones con *LIDAR* y el establecimiento de redes superficiales de datos automatizadas. En estos años, Syukuro Manabe comenzó sus trabajos en modelos climáticos, lo que le permitió analizar el impacto sobre el clima de concentraciones crecientes de gases en la atmósfera. También en esta época empezó a madurar, principalmente como resultado de la obra de Joseph Pedlosky (1938-), el término *Dinámica de fluidos geofísicos*, especialidad en la que se unifican el tratamiento de los fenómenos atmosféricos y oceánicos. En 1975 se creó en Reading, Inglaterra, el *Centro Europeo para Predicción a Plazo Medio*.

Finalmente, la década de los ochenta ha marcado el descubrimiento de los perfiladores de viento, los radares de polarización dual para detección del granizo, la aparición de los supercomputadores, el desarrollo de nuevos métodos numéricos para la solución de ecuaciones diferenciales en derivadas parciales, el desarrollo de intentos generalizados de predecir la evolución del clima según los niveles de contaminantes atmosféricos o la utilización de modelos de mesoescala o de área limitada para mejorar de forma local las predicciones de los modelos globales, por citar unas cuantas.

BIBLIOGRAFIA

- BARRY, R.G. y CHORLEY, R.J. (1985). *Atmósfera, tiempo y clima*. 4ª edición. Barcelona, Omega.
- BLUESTEIN, H.B. (1992) *Synoptic-Dynamic Meteorology in Midlatitudes*. 1ª edición. Nueva York, Oxford University Press, 2 Volúmenes.
- CUSHMAN-ROISIN, B. (1994) *Introduction to Geophysical Fluid Dynamics*. 1ª edición. Englewood Cliffs, Prentice Hall.
- DESPRETZ, C. (1839) *Tratado elemental de física*. 1ª edición. Madrid, Señora Viuda de Calleja e Hijos. 2 volúmenes. Traducción de la 4ª edición.
- FIERRO, A. (1991) *Histoire de la météorologie*. 1ª edición. París, Éditions Denoël.
- FRISINGER, H.H. (1977) *The History of METEOROLOGY to 1800*. 1ª edición. Nueva York, Science History Publications.
- GILLISPIE, C.C. ed. (1981) *Dictionary of Scientific Biography* 10ª edición. Nueva York, Charles Scribner's Sons. 8 volúmenes.
- GROTJAHN, R. (1993) *Global Atmospheric Circulations. Observations and Theories*. 1ª edición. Nueva York, Oxford University Press.
- GWINN, R.P. ed. (1988) *The New Encyclopaedia Britannica*. 15ª edición. Chicago, Encyclopaedia Britannica, Inc.
- HALTINER, G.J. y WILLIAMS, R.T. (1980) *Numerical Prediction and Dynamic Meteorology*. 2ª edición. Nueva York, John Wiley & Sons.
- JOLY, A. (1995) *El frente polar: un concepto superado que tiene siete vidas*. *Mundo Científico* 156 (04), 308-315.
- LIZCANO, E. (1993) *Imaginario colectivo y creación matemática. La construcción del número, el espacio y lo imposible en China y en Grecia*. Grupo Ciencias Sociales. Subgrupo: Sociología/Antropología. 1ª edición. Barcelona, Gedisa.
- McGRAW-HILL ed. (1980) *McGraw-Hill Modern Scientists and Engineers*. 1ª edición. Nueva York, McGraw-Hill, 3 volúmenes.
- MOHN, H. (1884) *Les phénomènes de l'atmosphère. Traité illustré de météorologie pratique*. París, J. Rothschild.
- NUSENZVEIG, H.H. (1977) *Teoría del arco iris*. *Investigación y Ciencia* 9(06), 82-94.
- PEREZ, E. (1986) *El rumor de las estrellas. Teoría y experiencia en la astronomía griega*. Madrid, Siglo XXI de España.
- TRICKER, R.A.R. (1970) *Introduction to Meteorological Optics*. 1ª edición. Londres, American Elsevier Publishing Company Inc./Mills & Boon.
- VAN DE HULST, H.C. (1981) *Light Scattering by Small Particles*. 2ª edición. Nueva York, Dover.
- WALLACE, J.M. y HOBBS, P.V. (1977) *Atmospheric Science. An Introductory Survey*. 1ª edición. San Diego, Academic Press Publishers.
- WASHINGTON, W.M. y PARKINSON, C.L. (1986) *An Introduction to 3D Climate Modeling*. 1ª edición. Mill Valley, University Science Books.

