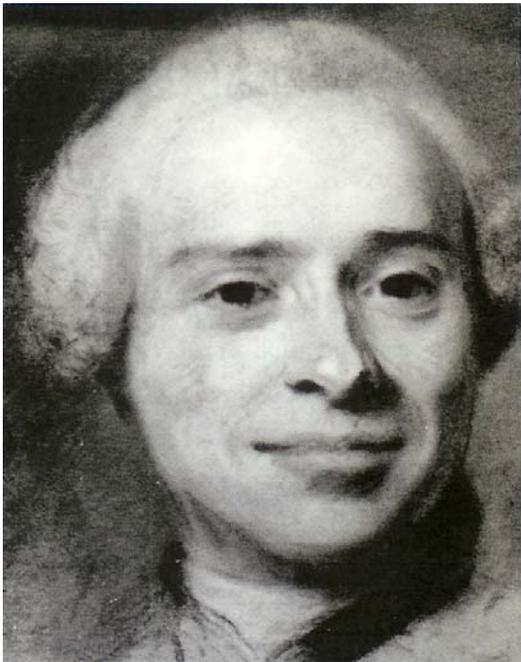


# Teoría de los Alisios durante la Ilustración (II)

Joaquín Pelkowski. Universidad de Frankfurt

## Los contribuciones de d'Alembert, Daniel Bernoulli y Mylius

El libro auspiciado por la Academia de Berlín reúne tres de las once contribuciones sometidas al concurso del año 1746 sobre los vientos, una en latín, otra en francés, y la tercera en alemán; estas dos últimas aparecen anónimas, pero con el tiempo se ha identificado a sus autores: Daniel Bernoulli, campeón de la hidrodinámica clásica y prematuro paladín de la teoría cinética, y Christlob Mylius (1722-1752), publicista, escritor y aficionado a la astronomía. La memoria galardonada, originalmente en latín, fue traducida y publicada por separado por su autor, Jean Le Rond d'Alembert, con aditamentos, en el mismo año de 1747.



Jean D'Alembert, junto a una reproducción de la portada de su memoria, galardonada por la Academia de Prusia en 1747.

D'Alembert, en sus *Réflexions sur la cause générale des vents*, reconoce que el calentamiento solar constituye una de las causas de los vientos generales, pero al mismo tiempo reconoce que un tratamiento analítico sería prematuro, ya que se carecía “*enteramente de los principios necesarios para ese cálculo, puesto que ignoramos tanto la ley, según la cual actúa el calor, como la dilatación que produce en las partes del aire*” (d'Alembert, 1747). Por eso se siente autorizado a “*hacer abstracción del calor solar*”, y

*“como no es posible calcular con alguna exactitud los movimientos que puede ocasionar en la atmósfera, es preciso reconocer que la teoría de los vientos es apenas susceptible de perfeccionamiento por ese lado.”* Y tras considerar el estado imperfecto de lo que hoy llamaríamos la termodinámica de la atmósfera, concluye que la única cuestión general que podía ser analizada con sus herramientas matemáticas era la determinación de los movimientos del aire, si se suponía un globo completamente uniforme, donde *“la agitación de la atmósfera”* esté sujeta solamente a *“la sola atracción de la Luna y el Sol”*. Su estrategia es clara: *“Pero la mayoría de las cuestiones físico-matemáticas son tan complicadas, que resulta imprescindible contemplarlas primero de una manera general y abstracta, para luego elevarse gradualmente desde los casos simples a los compuestos. Si hasta ahora se ha hecho algún progreso en el estudio de la naturaleza, se lo debemos a la observación constante de ese método. Una teoría completa sobre la materia que nos ocupa es tal vez la obra de varios siglos”* (d’Alembert, 1747).

Ateniéndose a este método, d’Alembert postula primero una esfera sólida en reposo, cubierta de un fluido homogéneo, *“sin resorte”* y sometida a la acción de las atracciones solar y lunar. Más adelante permite que haya un movimiento relativo entre el globo atraído y uno de los cuerpos celestes, para finalmente permitir que el fluido sea de densidad variable en una dirección. Si el fluido es la atmósfera, las mareas producidas por el astro, el cual causa un desplazamiento en bloque de masas enteras, no son otra cosa, según d’Alembert, que los vientos.

Tras la lectura de la introducción a su obra, cabe afirmar que d’Alembert se propuso, si exceptuamos las últimas partes del tratado, donde incluye las modificaciones del curso y de la fuerza de los vientos debidas a montañas paralelas (a lo largo de latitudes y meridianos), aplicar la teoría newtoniana de la gravitación universal al caso de la atmósfera. Al tratarse de una teoría aún no establecida universalmente, la oportunidad brindada por el tema del concurso desafió a d’Alembert a aportar nuevas pruebas a dicha teoría, por cuanto una explicación de los alisios basada en la gradualmente victoriosa gravitación newtoniana no podía dejar de impresionar a sus detractores, en su mayoría cartesianos empedernidos que, aunque diezmados, aún pervivían en las universidades y academias.

El trabajo impresionante de d’Alembert fue un fracaso completo como explicación de los vientos generales. Es una obra teórica de difícil lectura, de la que ojos más penetrantes que los míos podrán acaso desenterrar aspectos sorprendentes como la aceleración de Coriolis (Paty, 2002). De hallarse allí, no fue reconocida como importante por d’Alembert. El primero en reconocer su importancia en oceanografía fue Pierre Simon de Laplace (1749-1827), en unas investigaciones sobre el sistema del mundo, en particular sobre las mareas, y en las que aparecen ecuaciones del movimiento de las corrientes marinas con los términos de la aceleración (horizontal) de Coriolis (véase Ripa, 1996).

La obra suscitó reacciones de admiración en los partidarios del método analítico, pero más bien repudio en los que esperaban algo más que elegantes ejercicios en matemáticas puras. La reacción de Daniel Bernoulli, quien admiraba a d’Alembert como matemático, comprensiva al comienzo, cuando aún no la había leído, se trueca en exclamación de disgusto: *“Cuando uno lo ha leído todo, sabe tanto acerca de los vientos como antes”*. Tras mis propios intentos de “disfrutar” la obra galardonada, me proporciona un gran alivio la

reacción del historiador Clifford Truesdell (1919-2000), dechado de erudición moderna, quien juzgó la contribución de d'Alembert para la historia de la mecánica así (Truesdell, 1975): “*Tortuoso, obscuro, inelegante, pretencioso, fatigante con sus rodeos, restricciones inútiles y enredantes,... llega a obtener ciertas ecuaciones en derivadas parciales que, se afirma, gobiernan el flujo axialmente simétrico de un fluido compresible en movimiento pequeño sobre una esfera. Después de varios intentos a lo largo de los pasados quince años, he de confesar que nunca he podido seguir las profusas notaciones, conceptos tortuosos e interminable álgebra de d'Alembert en suficiente medida como para decidir si sus resultados son correctos o no*”. Con esta severa caracterización (un tanto sesgada, como reconoce el mismo Truesdell en una ocasión posterior) de la contribución de d'Alembert, que tanto fascinó a Euler, pasemos a discutir la de Daniel Bernoulli, cuya fama es la del físico-matemático más físico que matemático.

Daniel Bernoulli introduce su memoria *Recherches physiques et mathématiques sur la théorie des vents réglés* (1747) advirtiéndole que la “*compuso sólo para satisfacer a las solicitudes apremiantes de uno de sus mejores amigos*”, y pidiendo disculpas “*por haber tratado bastante superficialmente y con alguna precipitación una materia que merece toda la aplicación de la que uno puede ser capaz... El autor juzga el éxito inopinado de su ensayo como una aprobación de los principios de los cuales se sirvió...*” (Bernoulli, 1747). En el párrafo siguiente, se pregunta si la teoría de los vientos sería menos oscura, si desde un principio se hubiese seguido el sendero señalado por la ilustre Academia. Es decir, si se hubiese reducido el problema a sus primeros principios efectivos, dejando de lado las causas secundarias que cortan el paso a todo conocimiento. Según Bernoulli, las causas secundarias consisten en la casi infinita irregularidad de nuestra Tierra, mientras que los primeros principios, permanentes ellos, se han de buscar en el movimiento de la Tierra y la acción solar, y, acaso, la lunar.

Procede entonces a definir un problema más simple que el propuesto por la Academia, introduciendo el modelo de un canal que contiene a la atmósfera ecuatorial. Una hipótesis básica de su teoría se refiere a la elasticidad del aire, el cual, siendo dilatante en toda su extensión, precisa de una “*fuerza contraria*” que impida su expansión y lo retenga dentro de sus confines. Descartando la posibilidad “*absurda*” de una atmósfera infinita, busca en una “*atmósfera solar, en la cual nadan todos los planetas*”, el fluido compresor que mantiene a nuestra atmósfera dentro de sus límites. Para ello es preciso que en el tope de la atmósfera la elasticidad (presión) sean iguales de uno y otro lado. Se tiene, pues, en el plano ecuatorial, el modelo de un fluido limitado por el ecuador y por un círculo de radio igual al terrestre, más la altura de la atmósfera, donde por “*adhesión*” está obligada a asumir una velocidad de rotación nula, mientras que el ecuador gira con la velocidad diaria de la rotación de la Tierra. Bernoulli supone la atmósfera solar exenta de movimiento, sin detenerse en las implicaciones de semejante supuesto. El modelo que Bernoulli propone es un prototipo del flujo de Couette entre dos cilindros, uno estacionario y el otro en rotación uniforme. Cabe destacar que Bernoulli incluye en su modelo la viscosidad del fluido o “*fuerza de adhesión mutua*”, cuya ley, lo dice deplorándolo, no es suficientemente conocida. Bernoulli contempla capas delgadas (infinitesimales), en movimiento de rotación sólida, sometidas a mutuas fuerzas de cizalladura, cuyos momentos considera constantes en dirección perpendicular al ecuador. Los valores numéricos que logra calcular provienen de una fórmula que deriva a partir del equilibrio de pares de fuerzas, o, expresado

modernamente, de la aplicación de la ley de conservación del momento angular a una situación estacionaria. Por cada 100 m el viento aumenta su velocidad en 5 m/s. Es fácil ver cómo se crean los alisios en su modelo: para quien viva en el ecuador, el rozamiento impide que sienta aire en los pies, y, dependiendo de la altura de la atmósfera, el viento aumenta más o menos rápidamente con la altura, pudiendo hasta convertirse en ¡corriente en chorro en el tope de la atmósfera! Bernoulli ajusta los valores de densidad y altura atmosférica de tal forma que puedan despelucar a una persona. Aunque nadie parece haberlo señalado antes, acaso porque nadie haya leído su memoria antes de que se reimprimiera en sus obras completas (Bernoulli, 2002), tengo la impresión de que Bernoulli aplica en esa obra sobre los vientos, por primera vez en la historia de la hidrodinámica, una forma particular del equilibrio de pares de fuerzas a un problema geofísico, que en décadas posteriores se convertiría en el principio de conservación universal del momento angular, tan importante como el de la conservación del momento lineal.

Bernoulli concluye la primera sección de su memoria anotando que la velocidad del viento tiene que disminuir con la latitud y, sin entrar en detalles, ofrece una estimación grosera de esa disminución, como siendo proporcional al coseno de la latitud.

Una vez resuelto el problema del flujo con cizalladura, que había desembocado en una distribución vertical de la componente este-oeste de los alisios, Bernoulli procede al estudio de las oscilaciones diarias de la velocidad del viento, debidas al calentamiento de la atmósfera por el sol durante el día, y a su enfriamiento nocturno. El problema es enfocado nuevamente para la configuración simple de una simetría axial en el plano del ecuador, que supone coincidente con la eclíptica. Bernoulli presenta sus resultados en forma de una tabla, en la que figuran los vientos horarios que soplan en la mañana y durante el día, de oeste a este, así como los vientos nocturnos, de este a oeste.

Finalmente, Bernoulli considera la distribución de los vientos anuales, pero esta vez teniendo en cuenta el cambio de las estaciones, es decir, la inclinación de la eclíptica. Las estimaciones burdas que obtiene para las velocidades meridionales no exceden 0.3 m/s. Según el resumen de Mikhailov (2002), Bernoulli no presta atención al papel fundamental que desempeñan las diferencias de calentamiento en la atmósfera y, por consiguiente, las diferencias de presión atmosférica superficial entre la zona tórrida y los polos, que son las que dan origen a los flujos meridionales hacia el ecuador, tan importante en la teoría de la circulación atmosférica propuesta por Hadley una docena de años antes, pero que Bernoulli no parece haber conocido.

Bernoulli también examina otras causas. Observa, por ejemplo, que el sol no sólo dilata el aire con su calor sino que engendra igualmente una especie de aire nuevo, por cuanto aumenta la evaporación de las aguas. Discute la dependencia latitudinal de la evaporación, y saca algunas conclusiones cualitativas de índole climatológica. Nos informa también que a raíz de unos cálculos relacionados con la cantidad observada de la evaporación bajo diferentes latitudes, ha encontrado que esa misma evaporación puede producir vientos suficientemente fuertes en las capas cercanas a la superficie. Señala que la distribución, temporalmente variable, de la evaporación de los mares y aguas continentales podría explicar las brisas, pero se abstiene de comentarios adicionales, en vista de que no atañen el problema propuesto por la Academia.

En la parte final de su tratado, Bernoulli analiza los efectos de la Luna sobre la atmósfera, y en una carta a Euler afirma que no son distintos de lo que había demostrado en su tratado sobre las mareas oceánicas.

Curiosamente, la memoria de Daniel Bernoulli nunca fue citada por autores posteriores, a diferencia de la contribución que resumiremos ahora, de menor valor que la de aquél.

La tercera memoria que encierra el volumen publicado por la Academia, de Mylius, lleva por título: *Versuch einer Bestimmung der Gesetze der Winde, wenn die Erde überall mit einem tiefen Meer bedeckt wäre* (Intento de determinar las leyes de los vientos, si la Tierra estuviera totalmente cubierta por un océano profundo). En su planteamiento, el malogrado Mylius elige, como para remediar el defecto en la explicación de d'Alembert, la elasticidad del aire como única causa de los vientos. Elasticidad es una propiedad del aire que ha de ser “activada” por una causa externa. Tal causa es el calentamiento solar y posiblemente la atracción solar y lunar. El calentamiento del aire lo hace menos denso y, en virtud de su propia elasticidad, el aire circundante se precipita desde todos los lados hacia donde ha sido enrarecido, o sea, hacia el punto “subsolar”, y como ese punto progresa constantemente con el movimiento aparente del sol, el aire que se encuentra al este fluye continuamente hacia ese punto. (Mylius guarda silencio sobre lo que ocurre de noche, aunque más adelante menciona una especie de histéresis como explicación de los vientos perpetuos del este.) “En un acuaplaneta, el sol, en virtud de su calor, causará por doquier un viento”, dice Mylius, recurriendo al argumento bien conocido en la época. Por otro lado, Mylius rechaza la explicación de muchos naturalistas del siglo anterior que imaginaban al aire demasiado liviano para poder seguir el movimiento de la Tierra en rotación, creando así los vientos. La gravedad, razona, al atraer el aire lo obliga a moverse con la misma velocidad que el cuerpo sólido en rotación. Y agrega que otra explicación de los alisios, a efectos de que en la zona tórrida el aire es más liviano, es refutada por las observaciones barométricas de Halley y otros.

Mylius no excluye del todo las mareas. Nos explica que la atracción solar causa un abultamiento de la atmósfera que se mueve con el sol aparente, un abultamiento que implica aire dilatado y por ende vientos. Según este razonamiento, la luna debería causar un viento, “mucho más sensible”, que seguiría a la marea alta resultante de la atracción, produciendo así los vientos del este.

En un párrafo central, mediante unas consideraciones geométricas, prueba que los efectos del calentamiento solar son proporcionales al ángulo de incidencia de los rayos solares, definiendo por ángulo de incidencia la elevación del sol sobre el horizonte. Es consciente del hecho de que con un sol bajo, el calentamiento resulta adicionalmente reducido debido a la intercepción de rayos que han de atravesar una porción mayor de la atmósfera, pero descarta el efecto como irrelevante para su teoría de los vientos.

A continuación, afirma efectivamente que su teoría depende de la insolación, proporcional al coseno de lo que es hoy nuestro ángulo de incidencia, con los rayos solares golpeando más duro cuando provienen de direcciones cercanas al cenit: “la fuerza del viento o su

*velocidad ha de ser proporcional al enrarecimiento del aire, y por lo tanto al calentamiento de éste, y por consiguiente al seno de la elevación solar”.*

Conociendo el ángulo de incidencia de los rayos del sol en un lugar dado, inmediatamente se obtendría el viento relativo del lugar. Para obtener el viento absoluto, Mylius asigna arbitrariamente la unidad de la fuerza del viento a aquella fuerza que resulta de la insolación bajo un ángulo de elevación igual a 1°.

Los resultados son presentados en forma de tablas, para latitudes y estaciones diferentes. Finalmente, con el fin de encontrar la dirección del viento bajo latitudes diferentes, aplica un procedimiento semejante, basado en una hipótesis igualmente arbitraria y algunos cálculos elementales.

Luego repasa, a la luz de su teoría, otros efectos y otras causas posibles, así como objeciones concebibles a su teoría, llegando a la conclusión de que en un acuaplaneta las siguientes causas potenciales son despreciables: las atracciones solar y lunar, las refracciones de los rayos solares, los eclipses solares, la excentricidad de la órbita terrestre, ¡e incluso la declinación del sol! Juzga igualmente despreciables los efectos de los vapores provenientes de los océanos que, aunque responsables de múltiples irregularidades en nuestra Tierra actual, no influyen en el régimen de vientos en un acuaplaneta, ya que la evaporación, a pesar de ser zonalmente uniforme, depende de la elevación solar, de modo que no puede resultar ninguna desviación de los vientos de su comportamiento conforme a las “*leyes generales*”.

En un apéndice, remata sus deliberaciones con unas observaciones generales sobre la Tierra real y el acuaplaneta ideal: “*Muy probablemente nunca llegará el día en que seamos capaces de determinar asaz correctamente las leyes de los vientos en nuestra Tierra tal como realmente es.*” Sin embargo, añade, aun los vientos terrestres no están enteramente desprovistos de orden: “*Tengo a menudo el placer de ver realizados mis pronósticos tanto del viento como del tiempo, y de descubrir cierta conformidad entre el orden de los vientos actuales y los del acuaplaneta.*”

## **La anemología de Immanuel Kant**

Es sabido que el joven Immanuel Kant (1724-1804) se dejaba inspirar por los temas propuestos por la Academia de Berlín. El gran regiomontano publica en 1756 un folleto titulado *Nuevas anotaciones para aclarar la teoría de los vientos*, en el que introduce un efecto parcial de la rotación terrestre, muy similar al infructuoso intento de Hadley, pero con la ambición de ofrecer una anemología que diera cuenta de todos los vientos del mundo. Siendo posible remitir al lector a una traducción de su pequeño tratado (Pelkowski, 2004), me limitaré a resumir sus ideas, complementando la introducción a la traducción con algunas observaciones extraídas de Adickes (1924), cuya obra no había podido consultar entonces.

Kant sabe que para que se dé el equilibrio del aire asimilado a un mar de materia fluida y elástica, cuya densidad disminuye con la altura, es preciso que las columnas aéreas contiguas tengan el mismo peso y la misma altura, es decir, que las capas de cierta densidad estén “*al mismo nivel a lo largo de toda su extensión*”. Para Kant, las causas capaces de perturbar ese equilibrio son las siguientes: 1) Disminución de la fuerza expansiva del aire por enfriamiento y por la presencia de vapores (sulfúreos y minerales), que debilitan la fuerza de resorte del aire; 2) disminución de la gravedad como consecuencia: a) de la confluencia de los vapores de agua, previamente suspendidos en el aire y que, al separarse de éste, le sustraen cierto peso, y b) de columnas dilatadas por el calor, que se elevan por encima del nivel de las columnas vecinas, derramándose en derredor y aligerándose por ello mismo. Siempre se ha de generar un viento hacia el lugar donde el aire ha perdido peso o fuerza expansiva. Sin embargo, según Kant, en los casos 1 y 2a se restablece el equilibrio prontamente, puesto que en esos casos se requiere de un aumento (y no una mayor duración, como en el caso 2b) de la causa para mantenerlos.

En realidad, como es bien sabido hoy en día, los vapores de agua son específicamente más livianos que el aire seco; su “precipitación” significaría un aumento, no una disminución, del peso específico del aire. También sabemos que no se crearía un viento hacia el lugar de disminución de la elasticidad si es debida al enfriamiento, pero Kant precisa de este principio (falso) para explicar las brisas de mar nocturnas en las zonas costeras. Una vez más, tenemos aquí un ejemplo de la confusión que prevalecía en estas cuestiones, al no disponer de una ley que relacionaba la presión, la densidad y la temperatura del aire.

Kant aduce otras causas más: 3a) Incremento de la elasticidad del aire por calor, y 3b) incremento de su gravedad por “*aire liberado en el derretimiento de la nieve*”. El argumento venía ya de antaño y seguía siendo transmitido en el tiempo de Kant. Por ejemplo escribía Wolff: “*Encontramos que en la primavera, cuando se funden la nieve y el hielo y se seca la tierra húmeda, y por tanto el aire se llena de vapores, hay generación de viento*”. Pero Kant no le atribuye a la fusión de la nieve una importancia más que local, alegando que el movimiento tendría que realizarse contra el peso entero de un aire en reposo, al mismo tiempo que el calentamiento haría elevarse al aire, debilitando así su invasión horizontal. Pues hoy sabemos que no se forman vientos ni siquiera de corto alcance (locales). Los vapores de la nieve en fusión hacen que el aire se vuelva más liviano, no más pesado, y el calor implica un ascenso del aire y no una dilatación lateral cerca de la tierra, contra la resistencia del aire adyacente. Si Kant concede tal posibilidad de generación de vientecillos débiles, no hace más que recoger las opiniones contemporáneas. Citemos como un ejemplo más de la falta de claridad en estos puntos de la cuarta edición de un manual que gozó de varias ediciones (Eberhard, 1774): “*Pues como el calor aumenta el volumen del aire, el aire así dilatado presiona contra la más fría, penetrando en el lugar del aire frío.*” Kant se sirve de este “principio” de la presión lateral del aire calentado, en la fundamentación de su primera ley anemológica. La tesis correspondiente (“primera anotación”) dice así: “*Un grado mayor de calor, actuando sobre una región aérea más que sobre otra, hace un viento hacia aquella región recalentada, viento que persiste mientras perdura el mayor calor de ésta*” (véase Pelkowski, 2004). De esta tesis resultan las dificultades que Kant experimenta al rechazar la idea de que el aire recalentado originaría, gracias a su mayor presión lateral, un viento desde el lugar de caldeo al más frío.

En base a su primera ley fundamental, Kant explica las marinadas diurnas en zonas costeras e islas, ya que el aire se enrarece sobre la tierra por calentamiento, dando paso a la más pesada que está sobre el mar. En cambio, no sabía que el mar se enfría más lentamente que la tierra y que por lo tanto el aire marino es más cálido de noche que el aire sobre tierra: de ahí el terral. Kant cree que la tierra conserva su calor durante la noche, mientras que el agua, que no ha recibido sino poco calor durante el día, hace que el aire marino se enfríe más rápido que el aire sobre tierra. De donde se sigue que las brisas de mar también soplan durante la noche. Para evitar esta conclusión en contradicción con las observaciones, propone nuestro joven filósofo, ciñéndose a las opiniones predominantes, una segunda ley fundamental (“segunda anotación”) que no concuerda con los hechos: *“Una región aérea que se enfría más que otra, acarrea en la vecindad un viento, el cual sopla hacia el lugar de enfriamiento”* (ver Pelkowski 2004). La razón de ello la busca el inmortal regiomontano en la mermada capacidad expansiva del aire enfriado. Por consiguiente, el aire sobre el mar, enfriándose más rápido que sobre la tierra, pierde su elasticidad y se contrae, cediendo el paso al aire más expansivo sobre la tierra. Asimismo, en noviembre los vientos del sur de Francia se han de atribuir a un enfriamiento del aire en el lejano norte, donde empieza el severo invierno, explicación que ya había dado Mariotte (1686).

En realidad, tenemos en todos estos casos las condiciones de la primera tesis. Pero Kant trata de ajustarse a la tradición de su tiempo al diferenciar artificialmente entre un calentamiento (1ª anotación) y un enfriamiento (2ª anotación), como si hubiese una diferencia cualitativa entre ambas tasas. Mas en ambos casos sólo puede hablarse de un viento que sopla del área fría al área caldeada. Lo decisivo es la diferencia de temperaturas entre dos regiones, sin importar cómo se crea tal diferencia. El aire que se enfría junto a la tierra o al mar, se espesa y se hunde, y desde arriba fluye nuevo aire, pero no desde los lados. Las superficies isobáricas se levantan al mismo tiempo, dejando de correr paralelamente a la superficie terrestre, causando un flujo hacia las regiones más cálidas, según las previas consideraciones generales de Kant. Sin embargo, Kant se halla enfrentado a grandes dificultades en sus explicaciones dependientes de las diferencias de temperatura, y debido a su mal disimulada contrastación de las dos tesis no pudo evitar que en sus explicaciones se extraviase al igual que la mayoría de sus contemporáneos (Adickes, 1924). El único que parece haber comprendido en su tiempo las causas de las brisas, parece haber sido J.A. Segner (1754): *“La tierra ora se calienta en su superficie y ora vuelve a enfriarse: pero en las aguas de los lagos esta variación rápida no tiene lugar en el mismo grado, porque el calor penetra en el suelo lentamente y se almacena principalmente en las capas superiores. Las partes de las aguas, en cambio, se mezclan permanentemente entre sí, perdiendo así su calor las más superficiales, para quedar distribuido entre los demás. Algo igual ocurre con el enfriamiento. Por lo tanto, tampoco el calor ni el frío sobre los grandes mares (o lagos) será modificado tanto como sobre la tierra firme, y por esta razón está el aire durante el día más cálido sobre la tierra firme que sobre el mar, y el aire de mar es más cálido que sobre tierra. De donde es fácil concluir que ha de resultar un viento, el cual sopla durante el día del mar a la tierra, y de noche de nuevo de la tierra al mar. Lo cual se encuentra en todas las costas de los países no muy alejados en ambas direcciones del ecuador, porque en esos lugares, gracias a la constante igualdad de días y noches, aquellos son más cálidos que estas.”*

Nos hemos extendido demasiado sobre la explicación de las brisas cuando lo que nos interesa aquí es la explicación kantiana de los alisios. La justificación radica en el hecho de que en algunas explicaciones tempranas del origen de éstos, se aplicaban esos mismos principios, y al tratarse de Kant, cuyos aportes meteorológicos son inasequibles salvo en su patria, no estarán exentos de interés histórico, complementando lo que yo había escrito con motivo del bicentenario de su muerte.

Para la teoría de los alisios, tal como fue publicada por Kant en 1756, remito a un trabajo anterior, que incluye la traducción del texto kantiano (Pelkowski, 2004), conformándome aquí con citar un pasaje tomado de un borrador de Kant (1911), en el que se encuentra una figura que ilustra muy bien el argumento principal (véase la figura adjunta).

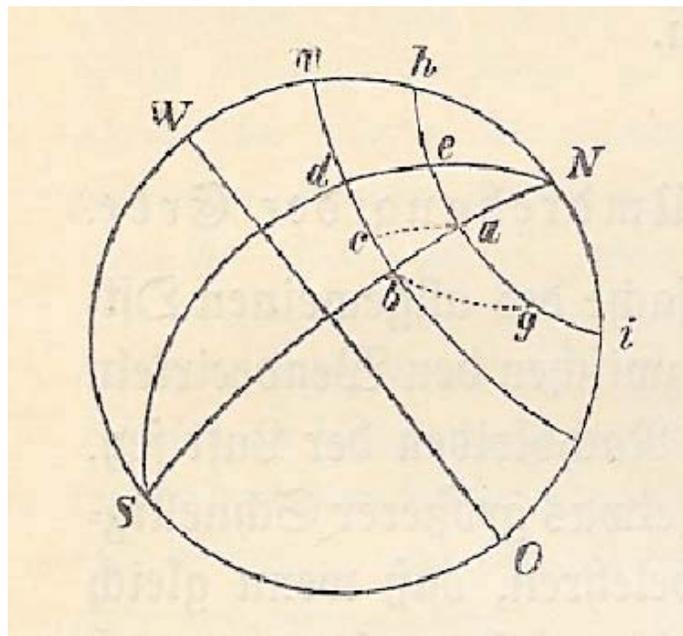


Figura tomada de un borrador de Kant (1911)

Tras rechazar la teoría vigente de Halley como insuficiente, apunta Kant con arrojo juvenil: *“Me propongo aquí renovar la vieja teoría, añadiendo una condición que hará de ella una teoría mecánicamente válida.”* Propone a continuación un primer teorema sobre la desviación de un viento que al soplar del norte y recorrer grandes extensiones, se torna cada vez más del este. Refiriéndose a su figura, explica: *“Supóngase que en **a** no haya viento, de manera que el aire no tenga allí otro movimiento que el de la superficie terrestre, o sea que el del semicírculo **hi** descrito en 12 horas, de oeste a este. Supóngase ahora que el aire en **a** se mueve a lo largo de su meridiano hacia **b**, y si se tiene en cuenta que este viento naciente recorre el arco **ab** en el mismo tiempo en que por su rotación la Tierra describe el arco **ea** de poniente a levante, y además dejando a un lado todos los obstáculos que el aire pueda encontrar en su camino, se sigue entonces que al cabo de ese intervalo de tiempo el aire no se encontrará en **b** sino en **c**, tal que  $dc = ea$  [...], resultando un movimiento compuesto según un cierto arco diagonal **ac**, con los lados **ab** y **bc** representando*

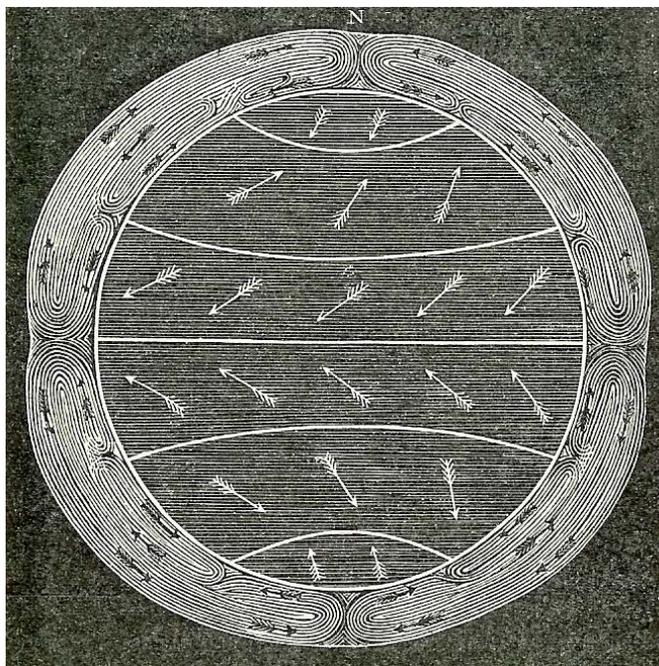
*respectivamente la velocidad meridional del viento y la diferencia de movimientos de ambos círculos paralelos: es decir, el viento que tenía inicialmente una dirección de norte a sur, cobra en su progresión una dirección colateral hacia oeste, la cual, a medida que se aproxima al ecuador, aumenta de tal forma que la dirección del norte se inclina casi completamente resultando en una dirección del este.” (Kant, 1911.)*

Kant propone como segundo teorema la desviación de un viento sur para tornarse en uno del sureste, ilustrándolo del mismo modo que en el caso anterior. Ambos “teoremas” se hallan reunidos en la “tercera anotación” de su ensayo publicado en 1756 (véase Pelkowski, 2004).

Vemos, pues, que Kant redescubre en su esencia el argumento de Hadley (1735). Ambos ensayos son de rara concisión, pero mientras Hadley se propone exponer un principio novedoso con la mayor brevedad posible, Kant busca abarcar en una sola teoría las causas de todos los vientos regulares conocidos. El encanto del ensayo de Kant estriba en que trata de reducir la plétora típica de un Musschenbroek a unos pocos principios racionales.

## **Los hadleyanos de la Ilustración**

Se suele afirmar que en 1793 John Dalton desempolvó el ensayo de Hadley, señalando que lo había hecho tras haber dado con la misma explicación de los alisios. Se trata de uno de esos mitos perpetuados por los manuales por autores que no buscan más que adornar sus exposiciones con uno que otro dato histórico. Hoy en día se mencionan a Hadley y Dalton, y a veces a Kant, como los únicos autores que dieron con la explicación esencialmente correcta de los vientos alisios. Se pasan por alto otros autores, aparentemente desconocidos por los historiadores, que o propusieron o repitieron la explicación de Hadley, invalidando la afirmación de que su hoy célebre explicación haya sido completamente ignorada hasta el redescubrimiento proclamado por Dalton. Es esta una buena oportunidad para resarcir el registro histórico, pero limitándonos sólo a enumerar las contribuciones sin citar de ellas o resumirlas, salvo en un caso, ya que no contienen nada que vaya más allá de Hadley o Kant. No está claro si los autores que propugnaron la explicación de Hadley hayan leído su ensayo, o, mucho menos probable, el de Kant. Como partidarios del razonamiento de Hadley, resulta conveniente calificarlos de “hadleyanos”, fueran conscientes o no de ello.



**Representación de la circulación atmosférica según el esquema de Hadley (Ferrel, 1859)**

El primer hadleyano en este sentido fue Daniel Bernoulli, quien en una memoria sobre corrientes marinas, premiada por la Academia de París en 1751, pero que no se llegó a publicar sino hasta 1769 (véase Mikhailov, 2002), y ateniéndose a su propia teoría expuesta en 1747, añade que la figura ovalada de la atmósfera, debida al calentamiento del aire, implica una circulación meridional de éste, que tiene lugar, en el hemisferio septentrional, de norte a sur por debajo, y hacia el norte por encima, de tal modo que el viento inferior, polar, se rezaga debido a las mayores velocidades de los paralelos a los que llega, reforzando así la causa de los alisios de su primera teoría.

En orden cronológico sigue Kant (1756) como redescubridor de la explicación de Hadley, de cuya anemología ya se habló. Quizás cabe considerar a Benjamin Franklin (1706-1790) como un redescubridor simultáneo a Kant, pues en ese año leyó una memoria destinada a publicación en la misma revista donde apareció el ensayo de Hadley, memoria que no se publicó sino hasta 1765, pero no podemos estar seguros de que los textos de la memoria leída y la publicada fueran idénticos en las partes esenciales, ya que en una nota de pie de página se lee que el texto publicado en 1765 era parecido en “algunos particulares” a la memoria leída.

En todo caso, en 1765 se podía conocer la explicación de Hadley ofrecida por un ya muy famoso científico de la Ilustración. Para honrar el tricentenario de su nacimiento, citemos algunos pasajes pertinentes de la breve exposición de Franklin: “*El sol calienta más el aire de nuestra atmósfera cerca de la superficie; pues allí, además de los rayos directos, hay muchas reflexiones. Por lo demás, la tierra propiamente es calentada y comunica parte de su calor al aire adyacente*” (Franklin, 1765). Luego de explicar que los rayos del sol, al atravesar sin menoscabo las regiones superiores de la atmósfera, las dejan

*“comparativamente muy frías”, y de algunas consideraciones sobre la estabilidad estática de la atmósfera, aclara que “la región inferior del aire, al ser calentada y dilatada, se abulta hacia arriba y soporta, por algún tiempo, el aire más frío de encima, y seguirá soportándolo mientras se mantenga el equilibrio”, agregando que “el aire frío y pesado que ha sido elevado sobre una región calentada, por el soporte desigual o debido a los pesos desequilibrados, desciende primero por sus partes más pesadas y en seguida por el resto, impetuosamente. De ahí las ráfagas que siguen a los calores, y los huracanes de los climas tórridos.”* A continuación, refiere que la Tierra gira en cerca de veinticuatro horas alrededor de su eje, de modo que las partes ecuatoriales cubren aproximadamente 15 millas por hora. En latitudes norte y sur tal movimiento disminuye gradualmente hasta los polos, donde cesa. Pero *“si hay una calma general sobre la faz del globo, tiene que ser porque el aire se mueve en cada parte tan rápido como la tierra, o el mar, que cubre.”* Finalmente, nos ofrece la explicación que nos interesa más: *“El aire bajo el ecuador y entre los trópicos, al ser constantemente calentado y enrarecido por el sol, se eleva. Su lugar [evacuado] es suplido por aire de latitudes más al norte y al sur, el cual, proviniendo de partes donde la tierra y el aire tenían un movimiento menor, y como no adquiere de repente el movimiento más veloz de la tierra ecuatorial, aparece como viento del este soplando hacia el oeste, puesto que la Tierra se mueve del oeste al este, deslizándose debajo del aire.”* Y concluye cerrando el circuito que conocemos como célula de Hadley: *“El aire enrarecido entre los trópicos, elevándose, tiene que fluir en altura hacia el norte y sur. Antes de elevarse, había adquirido el máximo movimiento que la rotación terrestre pudo impartirle. Retiene cierto grado de este movimiento, y descendiendo en latitudes mayores, donde el movimiento de la tierra es menor, aparece como un viento del oeste, pero tendiendo hacia las partes ecuatoriales para suplir el vacío ocasionado por el aire de las regiones inferiores que fluyen hacia allá.”*

Es difícil suponer que los siguientes autores que dan la misma explicación no hayan leído por lo menos a Franklin, cuya memoria se publicó en una revista tan célebre como él mismo. Sin citar los pasajes correspondientes, añado dos autores que ofrecieron esencialmente la misma explicación que Franklin antes que se publicaran los ensayos de Dalton en 1793, uno de ellos conocido y el otro no: Jean André Deluc (1727-1817), en dos de sus ampulosas obras (1779, 1788), y Johann Michael Hube (1737-1807) en un libro que ha sido relegado al olvido (1790). En la última sección, que se sale del marco histórico que nos hemos fijado, describiremos el trabajo de un astrónomo que, aunque reconociera el efecto de la rotación terrestre propuesto por los hadleyanos, lo rechaza como demasiado débil.

## **El triunfo de Halley**

Pese al elemento dinámico novedoso de la teoría de Hadley y a suficientes hadleyanos que la defendieran, no se impuso la teoría sino hasta bien entrado el siglo siguiente. La teoría de Halley parece haber prevalecido incólume hasta finales del siglo y aun más allá, como lo prueba el artículo dedicado a los vientos en la edición príncipe de la prestigiosa *Encyclopaedia Britannica* (1771). (Véase el pasaje traducido en Pelkowski, 2004). Otra prueba de ello es la teoría de vientos contenida en una memoria, también coronada por una

Academia, esta vez la de Dijon, que publicara en 1786 el caballero De la Coudrayes (1743-1817), titulada *“La théorie des vents”*, con un éxito que redundó en dos ediciones adicionales. Para redondear las teorías de los alisios durante la Ilustración, esta obra es representativa de lo que seguía siendo la doctrina “oficial” de los vientos. Citaré algunos pasajes de esta obra basándome en mi ejemplar de la segunda edición, de 1796.

La Coudrayes hace hincapié en el principio de condensación y dilatación establecido en el siglo anterior: *“...de todos los conocimientos de los filósofos acerca del aire, los únicos que importa recordar aquí, es que el frío lo condensa y el calor lo dilata.”* En base a tal principio advierte que un *“viento condensado por el frío pega más duro que el viento dilatado por el calor...por eso en invierno las ráfagas son más poderosas...”*.

Pero antes se hacía una pregunta que apuntaba a una causa innata: *“El Creador del mundo, en su sabiduría, ha dado, pues, los vientos; ¿pero de qué recursos se sirvió para imprimir así a la atmósfera una tendencia continua al movimiento?”* Y contesta que es preciso discutir las observaciones y los efectos del viento, para poder remontar desde ellos al examen de la causa. Discute la importancia de conocer bien la velocidad del viento, mencionando las contribuciones de Mariotte, Bouguer y otros, entre ellos las del jefe de escuadra de las armadas navales de Su Majestad Católica, don Jorge Juan.

En su indagación de las posibles causas, contempla, como era de rigor durante la Ilustración, la atracción de la Luna y el Sol, cuyos influjos sobre las mareas, incluso las atmosféricas, consideraba estar fuera de toda duda, pero en el caso de la atmósfera se trata, nos dice, *“de un movimiento dulce, igual, progresivo, sensible en toda la masa al mismo tiempo, como el de las mareas, y muy diferente, por consiguiente, de esas agitaciones bruscas, violentas y parciales del aire, que denominamos viento.”* También habla, recogiendo la tradición, de los vapores que causan vientos, preparando su poca original teoría: *“Es un hecho fuera de duda que el aire recibe más calor de la reverberación de la tierra que de la emanación directa de los rayos del Sol; ya sea que este aumento de calor sea el simple producto de partículas ígneas reflejadas, ya sea que se deba en parte a un principio de fermentación causado por las materias que se elevan de nuestro globo. He ahí el porqué los lugares elevados son respectivamente menos cálidos, y por qué el calor siempre es menor sobre las tierras cubiertas de bosques y sobre el agua, que no se prestan tanto para la reflexión. No hay marinero que no haya sido golpeado por esta diferencia.”* Después de esta aclaración, empezamos a oír los ecos de Halley: *“El aire, al igual que todo fluido, tiende siempre al equilibrio. Así, en todas partes donde una causa cualquiera enrarezca el aire en un espacio determinado, el aire circundante presionará sobre ese espacio a raíz del aumento de su peso sobre el del aire enrarecido. Según el mismo principio, si este espacio deja alguna apertura por donde el aire circundante pueda introducirse, entrará, en efecto, con una fuerza siempre proporcional a la diferencia de pesos de los dos aires. Esta observación, sumamente importante para la teoría que vamos a exponer, está certificada por una experiencia que todo el mundo puede realizar. Si en una habitación sin fuego nos acercamos a la puerta y a las ventanas, se percibirá que poco o nada de aire se introduce en el recinto por las aperturas que siempre deja en aquellas partes la falta de calafateado; pero si se calienta el interior del cuarto, la introducción de aire se sentirá muy bien, y si redoblamos el fuego, puede incluso adquirir suficiente velocidad para formar un silbido que el oído puede distinguir.”* Ejemplos parecidos son

típicos de la época. Antes de aplicar este esquema de circulación, repasa lo que desea explicar: *“La experiencia nos ha enseñado que hay tres clases particulares de vientos: unos son constantes, otros, variables y los terceros, finalmente, son periódicos. Los vientos constantes se hallan a diestra y siniestra de la línea equinoccial, aproximadamente entre los 30° de latitud norte y los 30° de latitud sur. Allí, los vientos soplan constantemente de la parte del este y sin interrupción, por lo menos sobre la superficie de los mares: también se les llama vientos alisios. Desde dichos paralelos hasta los polos, tanto en la parte boreal como austral, los vientos, lejos de ser fijos, toman a veces una dirección, a veces otra, no teniendo nada de regular que pudiera preverse, sea su curso, su fuerza o su duración: se llaman vientos variables. Finalmente, en la zona tórrida, es decir, en la misma región de los vientos alisios, hay en algunos lugares, particularmente en el mar de Indias, una excepción al curso regular de los vientos alisios; de tal modo que en esos lugares encontramos vientos que soplan durante una mitad del año de un lado, y durante la otra mitad del lado opuesto. Estos últimos vientos tienen un curso regular, periódico y aniversario, y se conocen bajo el nombre de monzones.”* Menciona finalmente las brisas, los vientos jornaleros más que aniversarios, y se aplica a tratarlos en el orden indicado, tratando de “dar la teoría” de cada uno.

A nosotros nos interesa solamente la que atañe los primeros: *“El viento alisio puede ser considerado en ciertos aspectos como el viento primitivo, y acaso bastaría él solo para imprimir su movimiento a la masa entera de la atmósfera. Para convencernos de ello, hay que dirigir la mirada al mapa reducido de la Tierra... Se verá la vasta banda de los vientos alisios en medio del globo, dividiendo la región de los vientos variables..., induciendo a pensar que la banda de los alisios no abarca sino una pequeña porción del todo en comparación con las otras dos. Pero el cálculo puede rectificar esta idea...”* Explica entonces la proporción de área cubierta por los alisios, en leguas cuadradas, y afirma que *“justifica lo que dijimos acerca del viento alisio, como capaz de dar posiblemente movimiento a la totalidad de la atmósfera.”* Los ecos de Halley se hacen más audibles en lo que sigue: *“La perfecta analogía que hay entre el curso del sol, los fenómenos de su calor y los vientos alisios, no deja ningún lugar a dudas de que este astro sea la causa y el motor de éstos; pero por otro lado no hay que olvidar jamás que por la simple expresión de calor del sol entendemos el calor reflejado, y que, como ya se ha dicho, tiene un poder bastante superior. La región de los vientos alisios está conformada en la mayor parte por la zona tórrida, luego podemos, para mayor facilidad de expresión, confundirlas; es la parte de nuestro globo que el sol calienta con una fuerza tanto más grande, cuanto más verticalmente actúan los rayos, que la tierra, penetrada más hondamente, refleja de la misma manera. El aire así calentado se dilata, enrareciéndose, y no pudiendo escaparse por los costados, ya que está rodeado por todas partes de columnas de aire más densas, se ve obligado a elevarse, lo cual hace con mayor facilidad cuanto más ligero se haya tornado por la rarefacción misma; mas hay un término a la elevación de este aire, allende el cual se enfría y se condensa. Gravita entonces, desparramándose, en busca de su nivel. Más frecuentemente, puede participar en su movimiento del curso de la atmósfera inferior; sin embargo, es frecuente ver en la zona tórrida que las nubes en altura no sólo siguen un curso diferente al de las nubes inferiores, sino que pueden tener uno totalmente opuesto al del viento reinante, aunque éste sea constante, lo que parece probar que este aire se derrama en todos los sentidos...”* Finalmente expone el razonamiento: *“Sin embargo, el aire no se puede dilatar así en todo el espacio expuesto a la acción del sol, sin que las*

*columnas laterales, compuestas de aire más denso y por ende más pesado, vengan a rellenar el vacío que se ha hecho, para ser enrarecidas y elevadas a su vez, a medida que se ubiquen en el foco de los rayos solares, dejando así campo a nuevas columnas destinadas a sufrir el mismo efecto. Si el sol siempre actuase sobre el mismo punto, no hay duda alguna de que el aire se precipitaría desde todas las direcciones hacia ese foco; pero no ocurre así: a cada instante la Tierra, por su rotación, contrapone nuevos lugares al sol, y, como es hacia las partes occidentales que se dirige la acción de este astro, las columnas de aire orientales son las que primero se enfrían. Son, pues, las que, al condensarse primeramente, cobran peso y se precipitan hacia el nuevo vacío que el sol forma al oeste.”* Y poco antes de entrar en algunos detalles, concluye: *“Tal es la causa de los vientos alisios: vientos tan constantes en su dirección como la marcha del astro que es su principio.”*

## **Conclusión**

La teoría galardonada del caballero francés, en las postrimerías de nuestro supuesto período histórico, y pese a los previos esfuerzos de avanzar la teoría de los alisios, nos devuelve al punto de partida, la teoría de Halley propuesta cien años antes.

Menciono para completar que hay una teoría que puede considerarse justamente como perteneciente al siglo XVIII y por ende a nuestro tema, por cuanto su autor se inspiró expresamente en el tema del concurso ganado por d’Alembert, a la cual, aunque publicada más de medio siglo después, bien pudiera dársele cabida en nuestro recorrido panorámico, si no fuera porque el espacio limitado no permite incluirla. La omisión, sin embargo, también puede justificarse por el hecho de que la teoría aludida ha sido resumida en otra parte, a la cual puedo remitir al lector curioso (Pelkowski, 2005). Se trata de un trabajo, un tanto inacabado, de un astrónomo alemán de Gotha, Bernhard August von Lindenau (1779-1854), quien se propuso resolver nuevamente el problema propuesto por la Academia de Berlín en 1746. Tras repasar las teorías de los vientos desde la Antigüedad hasta el fin del siglo XVIII y consciente de la falta de observaciones acerca del viento, sin las cuales su impacto sobre los distintos climas de los países no podía conocerse, von Lindenau (1806) nos asegura que *“sería interesante tratar de determinar, de la teoría de d’Alembert o mejor aún de la teoría de oscilaciones atmosféricas de Laplace... las corrientes de viento que probablemente tienen lugar en cada zona y en cada punto de nuestra tierra.”*

La meteorología tuvo que esperar más de un siglo para presenciar la solución del problema con el rigor matemático que Euler había esperado en 1746. Pocos sospecharíamos que en el joven continente americano floreció el meteorólogo que con rigor laplaciano hubiese sido merecedor del premio ofrecido por la Academia prusiana. Para darle al lector una impresión de la distancia que media entre los tanteos de nuestros héroes ilustrados y el progreso realizado hacia mediados del siglo XIX, conviene recordar el programa ambicioso de nuestro meteorólogo norteamericano, William Ferrel (1817-1891), publicado en 1856: *“Si la gravedad específica de la atmósfera y del océano fueran iguales en todas partes, todas las fuerzas de gravedad y de presión que actúan sobre cualquiera de sus partes, se equilibrarían perfectamente, y éstas se mantendrían para siempre en reposo. Pero como*

*unas partes de la tierra son más calientes que otras, y como el aire y el agua se dilatan y enrarecen al aumentar su temperatura, sus gravedades específicas no son iguales en todas partes de la tierra, destruyéndose así el equilibrio, y produciéndose un sistema de vientos y corrientes. ... Me propongo investigar en este ensayo los efectos producidos, tanto en la atmósfera como en el océano, por esa perturbación del equilibrio, y trataré de explicar, mediante una nueva fuerza que nunca ha sido tenida en cuenta en ninguna teoría de vientos y corrientes, ciertos fenómenos en sus movimientos, que no han dejado de ser un enigma en meteorología e hidrología.”*

Ferrel ignora los viejos trabajos de aquellos que introdujeron una componente de la “nueva fuerza”, e incluso parece desconocer los trabajos de Simeon-Denis Poisson (1781-1840) y Gustave Gaspard Coriolis (1792-1843) publicados una veintena de años antes. Pero la gloria de haber recalcado e investigado teóricamente la importancia de la nueva fuerza de Coriolis para las grandes corrientes aéreas y marinas le pertenece completamente a él. Sus trabajos, publicados hacia 1860, marcan definitivamente el comienzo de una nueva era en meteorología, la era de la meteorología dinámica.

## Referencias

- Adickes, E.**, 1924: Kant als Naturforscher (Kant el naturalista). Dos tomos. De Gruyter, Berlín.
- Bernoulli, D.** 1747: Recherches physiques et mathématiques sur la Théorie des vents réglés Ver d’Alembert (1747), pp. 137-176. Reimpreso en Bernoulli (2002).
- Bernoulli, D.** 2002: Die Werke von Daniel Bernoulli. Band 5. Hydrodynamik II. (Las obras de Daniel Bernoulli. Volumen 5. Hidrodinámica.) Editor: G. K. Mikhailov. Birkhäuser Verlag, Basilea.
- Coudrayes, Caballero de la**, 1786: Théorie des vents. De Cambonneau, Fontenay.
- d’Alembert, Jean Le Rond.** 1747: Réflexions sur la cause générale des vents. Haude & Spener, Berlín.
- Dalton, J.**, 1793: Meteorological Observations and Essays. Richardson, Londres.
- Deluc, J. A.** 1779: Lettres physiques et morales sur l’histoire de la terre et de l’homme. Tomo V. Duchesne, París.
- Deluc, J. A.**, 1788: Idées sur la météologie. Spilsbury, Londres.
- Demidov, S. S.** 1989: D’Alembert et la naissance de la théorie des équations différentielles aux dérivées partielles. En: Emery y Monzani (1989), pp. 331-350.
- Eberhard, J.P.**, 1774 (4a ed., 1a ed. 1753): Erste Anfangsgründe der Naturlehre (Principios de la filosofía natural). Halle.
- Encyclopaedia Britannica.** 1771: M-Z, Tomo III. A. Bell & C. Macfarquhar, Edimburgo.
- Emery, M. y P. Monzani** 1989: Jean d’Alembert. Savant et Philosophe. Portrait à plusieurs voix. Gordon and Breach Science Publishers S.A., Glasgow.
- Ferrel, W.** 1856: An essay of the winds and the currents of the ocean. Nashville J. Medicine and Surgery, 11, 287-301. Reimpreso (1882) en: Popular essays on the movements of the atmosphere. Professional Papers of the Signal Service No. XII, 7-19.
- Franklin, B.**, 1765: Physical and Meteorological Observations, Conjectures, and Suppositions. Phil. Trans. Roy. Soc. London, 55, 182-192.
- Hadley, G.** 1735: Concerning the cause of the general tradewinds. (Traducción al castellano en Meteorología Colombiana No. 1, Marzo 2000, 95-96.) Phil. Trans. Roy. Soc. London, 39, 58-62.
- Hube, M.**, 1790: Ueber die Ausduenstung und ihre Wirkungen in der Atmosphaere (Acerca de la evaporación y sus efectos en la atmósfera). Goeschen, Leipzig.
- Kant, I.** 1911: Kants gesammelte Schriften (Colección de sus obras). Edición de la Real Academia Prusiana de Ciencias. Tomo XIV. Druck und Verlag von Georg Reimer, Berlín.
- Laplace, P.S.** 1778: Recherches sur plusieurs points du système du monde. Mém. Acad. Roy. Sci. París, 75-182. (Reimpreso en Oeuvres complètes de Laplace, Vol. IX, 1893, p. 71 ff.)

- Lindenau, B.A.** v. 1806: Beyträge zu einer Geschichte merkwürdiger Winde (Contribuciones a una descripción de vientos notables.) *Monatliche Correspondenz*, XIII, 32-44, 249-273, 455-452.
- Mariotte, E.** 1686: *Traité du mouvement des eaux et autres corps fluides*. Michallet, París.
- Mikhailov, G.K.** 2002: Introduction to Daniel Bernoulli's papers on geophysical fluid dynamics and barometrical studies. En Bernoulli (2002).
- Mylius, G.** 1747: Versuch einer Bestimmung der Gesetze der Winde, wenn die Erde überall mit einem tiefen Meer bedeckt wäre. (Intento de determinar las leyes de los vientos si la Tierra estuviera totalmente cubierta por un océano profundo.) En d'Alembert (1747). Pp.137-224. Reimpreso en Bernoulli (2002).
- Paty, M.**, 2002: *Analyse et dynamique. Études sur l'oeuvre de d'Alembert* (editada por Michel, A. y M. Paty). Presses de l'Université Laval, Saint-Nicolas (Canadá), pp. 25-93.
- Pelkowski, J.** 2004: La anemología kantiana: contexto histórico y versión castellana. *Meteorología Colombiana*, No. 8, 115-127.
- Pelkowski, J.**, 2005: El certamen de 1746 acerca de la causa de los vientos generales. *Meteorología Colombiana*, No. 9, 1-18.
- Ripa, P.** 1996: *La increíble historia de la malentendida fuerza de Coriolis*. Fondo de Cultura Económica, Méjico.
- Segner, J.A.**, 1754: *Einleitung in die Naturlehre* (Iniciación a la filosofía natural.) Gotinga.
- Truesdell, C.** 1975: *Ensayos de historia de la mecánica*. (Traducción de *Essays in the History of Mechanics*, publicada en 1968.) Editorial Tecnos, Madrid.