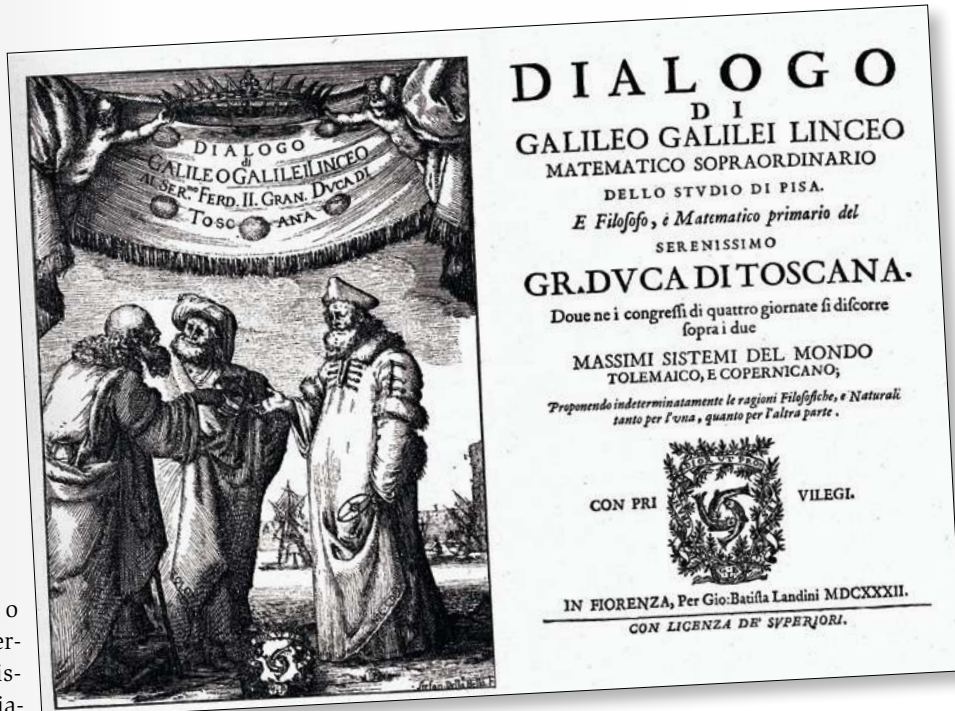


Los alisios según Galileo

ALEJANDRO ROA

Es bien conocido que los alisios o “trade winds” (vientos del comercio)¹ fueron descubiertos por Cristóbal Colón durante su primer viaje a América, si bien ya se tenía alguna idea de su existencia previamente al viaje colombino por parte de los marinos que frecuentaban las costas de África y las Canarias. Pero fue Colón quien pudo constatar la existencia y continuidad del cinturón de alisios en el Atlántico, que permitieron hacer la travesía a su expedición desde la Gomera hasta La Española en poco más de un mes. Tuvo suerte Colón, pues en las fechas de su viaje, septiembre-octubre de 1492, los alisios soplaron más al norte de lo habitual, casi en su límite septentrional. En condiciones normales la ruta seguida por Colón, utilizando el paralelo 28° norte, hubiera estado expuesta a calmas y vientos variables (o peor aún, a alguno de los terribles huracanes propios de la temporada), siendo lo aconsejable en esas fechas navegar entre los 15° y los 20° de latitud norte. Tuvo además que sufrir el temor de que sus compañeros de viaje se sublevaran, temiendo que esos vientos tan persistentes para el viaje de ida impidieran luego volver, tal y como refleja en su diario el día 22 de septiembre, en un momento en que sopló el viento del oeste: “Mucho me fue necesario este viento contrario, porque mi gente andaban muy estimulados, que pensaban que no ventaban en estos mares vientos para volver a España”.

Posteriormente, gracias entre otros a Magallanes, Elcano y Urdaneta, fue observado cómo el cinturón de los alisios también circundaba el Océano Pacífico, y cómo al otro lado del ecuador existía un reflejo del observado al norte, sólo que con vientos soplando continuamente del SE en vez del NE. En torno a 1600 ya estaba generalizado el conocimiento de la existencia del cinturón de calmas y aire seco alrededor de los 30° norte, al sur del cual soplan con regularidad vientos del NE en dirección al ecuador, mientras que al norte predominan los vientos del oeste, aunque con mucha menos regularidad, patrón reflejado especularmente en el Hemisferio Sur. De ahí que los primeros intentos de explicar científica-



Portada original del Dialogo di Galileo Galilei Linceo al Ser.^{mo} Ferd. II Gran. Duca di Toscana, conocido posteriormente como Dialogo supra i due massimi sistema del mondo ptolemaico e copernicano.

mente la circulación general atmosférica se focalizaran en los alisios, conocidos entonces habitualmente como “brisas” por los marinos españoles, cuya extensión y regularidad parecían permitir una explicación sencilla, tal y como sugería el padre Joseph de Acosta (1539-1600) en su Historia natural y moral de las indias de 1590:

“Porque en todo lo que se navega entre los Trópicos, es ordinario y regular viento el de la Brisa, lo cual por ser una de las maravillosas obras de la naturaleza, es bien se entienda de raíz cómo pasa.”

Entre esos intentos tempranos de “entender de raíz como pasa”, es decir, de explicar el mecanismo de los alisios se encuentran los de Galileo Galilei (1564-1642) y Johannes Kepler (1571-1630), cuyas explicaciones estaban basadas exclusivamente en la rotación de la Tierra, si bien no del modo en que lo entendemos ahora, tal y como veremos más abajo, así como los del francés Edme Mariotte (1620-1684), que seguía a Galileo, y los del prestigioso astrónomo inglés, Edmund Halley (1656-1742), para quien la principal causa era el desplazamiento diurno del calentamiento solar de este a oeste en el cinturón ecuatorial, según explicó en un artículo publicado en 1686: “An historical account of the Trade Winds, and Monsoons, observable in the Seas between and near the Tropicks, with an attempt to assign the Phisical cause to the said Winds”.

Una explicación aproximadamente correcta la dio George Hadley (1685-1768) en 1735, en su artículo “On the cause of the General Trade Winds”, publicado en *Philosophical Transactions of the Royal Society*, aunque su teoría, basada en la conservación del momento lineal de las partículas de aire

¹ La palabra “trade” (“comercio”) en realidad deriva de “tread” (“pisar”, “hacer sendero”), por lo que “trade winds” se podría traducir como “vientos que hacen sendero”. En cuanto al nombre de “alisios”, que sustituyó al original de “brisas”, viene del francés “alizés”, quizá haciendo referencia a su regularidad y constancia. Ver al respecto Pelkowski, Joaquín: “Teoría de los Alisios durante la Ilustración (I)”, *Boletín de la AME* (2ª etapa) n° 14, p. 2.

que se mueven en dirección norte-sur debido al mayor calentamiento en la zona ecuatorial respecto de la polar, tardó un siglo en ser aceptada. El motivo fue muy probablemente al enorme prestigio de Edmund Halley, con el que debido a la similitud del nombre era confundido, cuando no lo era con su hermano mayor, el matemático e inventor John Hadley. De hecho George Hadley era abogado, no científico, y ni siquiera estaba muy convencido de la bondad de su teoría. Durante los cien años que siguieron a la publicación del artículo de Hadley otros muchos otros científicos se interesaron por la cuestión. Este listado incluye a algunos de los más grandes talentos de la época, entre ellos a un joven Immanuel Kant (1724-1804) en la época en la que se dedicaba a la filosofía natural (o sea, a la física), cuya explicación es muy similar a la de Hadley, de la que muy probablemente no tenía noticia; al político y científico norteamericano Benjamín Franklin (1706-1790), en la línea de Kant y Hadley; al enciclopedista d'Alembert (1717-1783), que pergeñó una elaboradísima al tiempo que totalmente incorrecta teoría en la que no tenía en cuenta ni la rotación de la Tierra ni el calentamiento solar, tan sólo la atracción gravitatoria por parte del Sol y de Luna, todo ello resuelto con mucho aparato matemático, eso sí, como correspondía a un entusiasta del novedoso cálculo diferencial; a Daniel Bernouilli (1700-1782), buen amigo del anterior, que también aportó una explicación muy desencaminada, aunque con más sentido físico; al gran Pierre Simon de Laplace (1749-1827), que trató sobre la cuestión, dándole un enfoque similar al de Kant y Hadley, en su *Exposition du système du monde* (1796) y en su colosal *Traité de mécanique céleste* (1799-1825); a John Dalton (1766-1844), conocido sobre todo por su teoría atómica, que opinaba que la aceleración producida por la rotación de la Tierra era proporcional al seno de la latitud y que pasa por ser el redescubridor de Hadley; hasta llegar los precursores de la meteorología sinóptica, los casi homónimos Heinrich Wilhelm Brandes (1777-1834) y Heinrich Wilhelm Dove (1804-1879), que pusieron en valor las teorías de Hadley a la vez que rechazaron las de Edmund Halley, predominantes durante un siglo un medio a pesar de su escaso valor científico. La gran influencia de Dove en la meteorología de su época hizo que la teoría de Hadley, recuperada por el alemán, fuese conocida como "Ley de Hadley-Dove".

El reconocimiento posterior a George Hadley se refleja en que se le homenajera dos siglos después de sus aportaciones llamando "célula de Hadley" a una de las tres que según el esquema de Rossby componen el esquema de la circulación general de la atmósfera en cada hemisferio, la que corresponde con la zona subtropical, y en el nombre del centro climatológico del Reino Unido, conocido como "The Hadley Centre". Sin embargo, no es cierto, como decíamos arriba, que la explicación de Hadley sea la correcta, pues considera que se basa en la conservación del momento lineal absoluto y sólo sirve

para movimientos norte-sur, puesto que lo que se conserva es el momento angular absoluto, lo que explica la desviación también en el caso de movimientos este-oeste².

Pero volviendo con Galileo, es en su más famosa obra, el *Diálogo sobre los dos máximos sistemas del mundo ptolemaico y copernicano*, donde encontramos su explicación sobre los alisios, entre otras muchas cuestiones físicas. La obra de Galileo, publicada en 1630, adoptó la forma de diálogo supuestamente neutral como un medio para evitar la censura de la Inquisición. A lo largo del *Diálogo* y durante cuatro jornadas, tres personajes debaten sobre las visiones ptolemaica y copernicana del Universo. El defensor de la primera visión es el filósofo aristotélico Simplicio, mientras que el académico Salviati defiende la visión copernicana. Un tercer personaje, llamado Sagredo en honor a un amigo de Galileo, hace de árbitro de la discusión. A pesar de la supuesta neutralidad del *Diálogo* es evidente que Galileo no lo es en absoluto, y los mejores argumentos del debate son los que pone en boca de Salviati, quedando frecuentemente Simplicio en ridículo.

Sin embargo, a pesar de las muchas ventajas del sistema copernicano heliocéntrico sobre el ptolemaico geocéntrico, también eran muchos los problemas que se presentaban a la hora de explicar los diversos fenómenos físicos, y entre ellos singularmente el del movimiento del aire. Al fin y al cabo Galileo, por muy avanzado que estuviese científicamente, no estaba libre de la concepción física de la Antigüedad que consideraba tan sólo la existencia de los cuatro elementos, aire, agua, tierra y fuego (más la quinta esencia que conforma los cielos), cada uno de ellos con características propias. Además para él era un dogma el movimiento circular. Puede decirse que se encontraba a medio camino entre la Física de la Antigüedad, la de Aristóteles, y la moderna Física.

Según esta visión el aire tiene características distintas de las de la tierra y no se mueve con ella, es decir, que no tiene la misma inercia (impetus en la terminología de la época). Tal y como explica Salviati en un momento de la primera jornada, el giro del cóncavo lunar (la esfera en la que estaría incrustada la Luna) arrastraría consigo al fuego en su totalidad, y a la mayor parte del aire. La Tierra tendría su propio movimiento de rotación, que arrastraría con ella a todo aquello que participara de su naturaleza. Esto explicaría por qué al arrojar una piedra desde lo alto de un mástil de un barco en movimiento, ésta cae al pie del mástil y no a cierta distancia en dirección contraria al movimiento de la nave, lo mismo que si arroja desde lo alto de una torre cae a su pie: porque la piedra que se deja caer participa del movimiento de rotación de la Tierra, por tener su misma naturaleza, cosa que no sucede con el aire, ni tampoco, aunque en menor medida, con el agua. Así pues, ambos elementos, sobre todo el aire, deberían ser dejados atrás por la Tierra en su movimiento, con lo que deberíamos sentir unos vientos fortísimos.

² Sobre la aceptación de la teoría de Hadley ver Persson, Anders O.: "Hadley's Principle: Understanding and Misunderstanding the Trade Winds" en *History of Meteorology* 3 (www.meteohistory.org). Y para más detalles sobre las aportaciones de Kant, D'Alembert, Bernouilli y demás luminarias del siglo XVIII consultar Pelkowski, Joaquín: "Teoría de los Alisios durante la Ilustración (I y II) en *Boletín de la Asociación Meteorológica Española* (2º etapa) nº 14 y 15

Los alisios según Galileo

¿Cómo solventaba Galileo esta contradicción? En el transcurso del debate mencionado sobre el movimiento y caída de los objetos Salviati explica:

“es necesario que, al menos la parte del aire que está más baja que los montes más altos, sea arrastrada y hecha girar por la aspereza de la superficie terrestre, o bien que, en cuanto mezcla de muchos vapores y exhalaciones terrestres, observe naturalmente el movimiento diurno”.

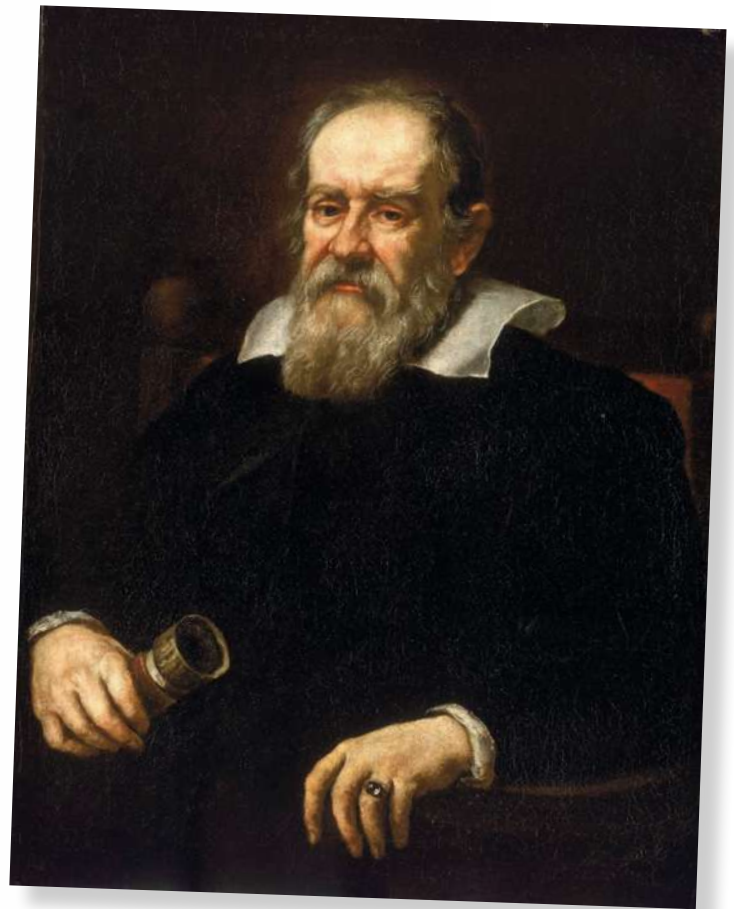
Es decir, que el que no experimentemos esos vientos fortísimos se debe a que la Tierra arrastra en parte el aire en sus capas más bajas y a que el aire en sus capas más próximas a la Tierra, siendo casi evaporación terrestre, la sigue en su movimiento, cosa que ya había propuesto Copérnico en su obra *De Revolutionibus Orbium Coelestium*. Esta explicación, aunque no demasiado convincente, al menos hoy en día, parecía solucionar el problema planteado, o al menos así debía parecerse a Galileo.

Pero es en la cuarta jornada cuando se ve lo absurdo del planteamiento galileano, cuando intenta explicar el mecanismo de los alisios. Según Salviati, volviendo a lo argumentado en la primera jornada

“el aire, y en particular la parte de éste que no se eleva por encima de las cimas de las montañas más altas, es transportada en su rotación por la aspereza de la superficie terrestre. De ahí parece que se deduce que si la superficie de la Tierra no fuese irregular sino tersa y pulida, ya no habría razón para que se llevara consigo el aire, al menos para llevarlo con tanta uniformidad. Ahora bien, no toda la superficie de este globo nuestro es escabrosa y áspera, sino que hay grandes espacios lisos, esto es la superficie de mares amplísimos que, además de estar alejadísimos de las crestas de los montes que los circundan, no parece que tengan la facultad de llevar consigo el aire que tienen sobre sí. Al no llevarlo consigo, en esos lugares debería sentirse lo que se sigue como consecuencia”.

Más adelante, continúa con que

“el aire, siendo un cuerpo tenue, fluido y no unido a la Tierra fuertemente, no hubiera de tener necesidad de obedecer su movimiento, más que en el caso en que la aspereza de la superficie terrestre lo arrebata y se lleva consigo una parte contigua con ella, que no sobrepasa en mucho las montañas más altas. Dicha porción de aire habrá de ser tanto menos reticente a la rotación terrestre, cuanto que está llena de vapores, humos y exhalaciones, materias todas que participan de las propiedades terrenas y, en consecuencia, adaptadas por su naturaleza a los mismos movimientos. Pero donde faltasen las causas del movimiento, este es donde la superficie del globo tuviese grandes espacios llanos y hubiera menos mezcla de vapores terrestres, ahí cesaría en parte la causa por la que el aire ambiente habría de obedecer totalmente al arrebato de la rotación terrestre. De modo que en esos lugares, mientras la Tierra gira hacia oriente, se debería sentir continuamente un viento que nos golpease soplando de levante hacia poniente, y tal soplo habría de hacerse más sensible donde la rotación terrestre



Galileo Galilei retratado por Justus Sutermans

fuese más veloz. Esto sucedería en los lugares más alejados de los polos y próximos al círculo máximo de la rotación diurna”.

Y finalmente concluye diciendo que

“la experiencia aplaude mucho este argumento filosófico. Porque en los amplios mares y en las partes lejanas de tierra y situadas en la zona tórrida, esto es comprendidas entre los trópicos, donde además no se dan evaporaciones terrestres, se siente un aura perpetua que se mueve desde oriente de modo tan constante que gracias a ésta las naves van prósperamente hacia las Indias Occidentales y de éstas, dejando las playas mexicanas, surcan con el mismo favor el Mar Pacífico hacia las Indias, orientales para nosotros, pero occidentales para ellos”.

Así pues, aquí tenemos la “explicación” galileana de los alisios (aunque no se refiere a ellos por ese nombre, ni siquiera por el habitual entonces de “brisas”), claramente disparatada como se puede comprobar echando unas sencillas cuentas, perfectamente al alcance de Galileo que conocía bastante bien las dimensiones de la Tierra y por tanto su velocidad de rotación, que él mismo cifra unas páginas antes entre 800 y 1000 millas por hora en el Ecuador, lo que es bastante correcto teniendo en cuenta que la milla que usaba Galileo era algo mayor de 1600 metros. Por tanto, según el razonamiento de Salviati-Galileo, se deberían experimentar vientos de esa intensidad en las regiones tropicales atlánticas, muy alejados de la suavidad de los vientos alisios, típicamente entre 5 y 10 m/s.

³ Sobre estas cuestiones se puede consultar el artículo “Vientos y monzones”, de J. M. Sánchez-Laulhé publicado en el número 50 de esta misma revista, en el que aparecen también citas a los trabajos de los autores mencionados.

Galileo era además conocedor, según lo demuestra su correspondencia con Gianfrancesco Buonamici (que sí se refiere a los alisios con el nombre de “brisas”) de la existencia de los huracanes “*que son vientos rotos producidos por el choque de diferentes vientos entre sí*”, según informa el corresponsal, y de las calmas ecuatoriales, argumentos ambos que se opondrían a la explicación galileana, por si no fuera bastante lo absurdo de la velocidad prevista por su teoría, pero decidió ignorarlos. Realmente toda la cuarta jornada del *Diálogo*, dedicada principalmente a una explicación totalmente errónea del mecanismo de las mareas y su relación con el movimiento de la Tierra, desmerece al resto del escrito de Galileo, que en sus tres primeras jornadas explica satisfactoriamente el movimiento relativo de los objetos en la Tierra, teoría que sigue siendo perfectamente válida cuatro siglos después siempre y cuando las velocidades sean pequeñas comparadas con la de la luz, así como la existencia de las fases de Venus, la distancia entre la Tierra y la Luna, el movimiento de las manchas solares y los satélites de Júpiter, entre otras muchas cosas. Es al intentar explicar el movimiento del aire y del agua cuando Galileo falla estrepitosamente, y casi podría decir que intenta echar tierra sobre las contradicciones evidentes que se deducen de su modelo, lo que muestra que, a pesar de su leyenda, tampoco el gran sabio toscano fue un empirista a ultranza.

Pero quizá no hay que ser excesivamente críticos con Galileo, pues la correcta explicación del mecanismo de los alisios, y no digamos ya de la circulación general de la atmósfera, tardó aún varios siglos en aparecer. Ya vimos que Edmund Halley, medio siglo después de Galileo, aportó una explicación totalmente incorrecta que sin embargo fue la que predominó durante 150 años, ensombreciendo a la que dio George Hadley otro medio siglo después, que aunque algo más acertada tampoco era correcta. Según vimos, esta última se basaba en la conservación del momento lineal, de modo que una partícula de aire que se desplazara hacia el sur en el Hemisferio Norte se movería con menor velocidad que la Tierra, lo que haría que su movimiento adquiriera componente este, y a la inversa en el movimiento hacia el norte. Pero unas sencillas cuentas nos muestran que en las latitudes medias un desplazamiento hacia el sur de un solo grado implicaría un aumento de 5 m/s en la componente zonal de la velocidad, con lo que bastaría con un desplazamiento de 6 ó 7 grados para que el viento se convirtiera en huracanado, algo que no concuerda en absoluto con la suavidad de los alisios, ni tampoco con los vientos que se observan en otras latitudes. Tanto Hadley como los científicos que un siglo después le reivindicaron intentaron solventar la contradicción con ayuda del rozamiento con la superficie de la tierra o de los mares, pero esta explica-

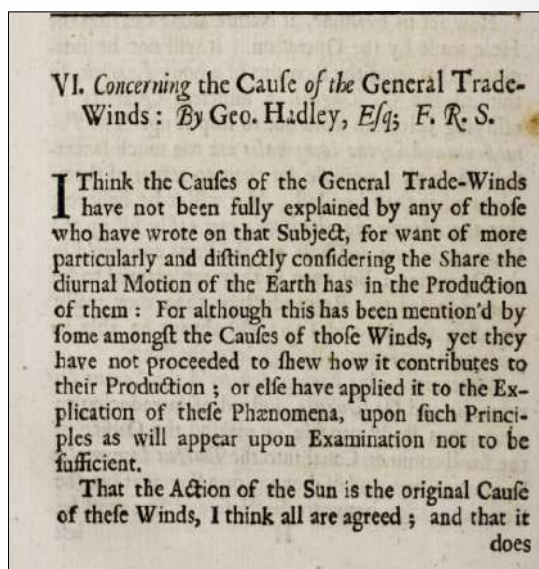
ción pronto se reveló insuficiente. Además persistía el problema de que sólo era válida (más o menos) para el movimiento norte-sur, pero no para el este-oeste.

Hubo que esperar a los años 70 del siglo XIX, cuando el meteorólogo norteamericano William Ferrel (1817-1891), basándose en las aportaciones de Jean Bernard Foucault (1819-1868) y Gustave Coriolis (1792-1843), diera con una correcta explicación de la desviación del aire en movimiento sobre la superficie de la Tierra, cualquiera que sea la dirección en que se mueve, y no fue hasta los años 40 del siglo XX cuando, gracias al conocimiento de la alta atmósfera y a las aportaciones de destacados meteorólogos, singularmente del sueco-estadounidense Carl Gustav Rossby (1898-1957), pudo determinarse correctamente el esquema de circulación planetaria del que los alisios forman parte importante. Esquema que en las últimas décadas ha sido revisado por autores como Adrian Gill o M. J. Rodwell y B. J. Hoskins, quienes han demostrado la relación entre los monzones y los anticiclones subtropicales, y la existencia de una única célula de Hadley en el hemisferio que se encuentra en invierno, pero no en el que está en verano³.

La complejidad e interés del problema se demuestra en que en cuatro siglos y medio que transcurrieron desde que los navegantes españoles y portugueses de finales del siglo XV aportaran las primeras observaciones al respecto hasta que pudo establecerse una teoría que lo explicara de modo satisfactorio, fueran tantos y de tal categoría los filósofos y científicos que dedicaron parte de sus esfuerzos a intentar resolverlo. Bien es verdad que con poco éxito en la mayor parte de los casos, entre ellos el del sabio toscano Galileo Galilei,

cuyas colosales aportaciones otras ramas de la Ciencia Física resultan incuestionables.

- Colón, Cristóbal: *Diario de a bordo*. Ediciones Océano-Éxito. Barcelona, 1992.
- Linés Escardó, Alberto: “Colón y Urdaneta, descubridores de los anticiclones del Atlántico y Pacífico”. *Revista de Historia Naval*, año I, nº I, pp. 95-102 (publicado en www.divulgameteo.es)
- Galilei, Galileo: *Diálogo sobre los dos máximos sistemas del mundo ptolemaico y copernicano*. Alianza Editorial, Madrid, 1995.
- Pelkowski, Joaquín: “Teoría de los Alisios durante la Ilustración (I y II)”. En *Boletín de la Asociación Meteorológica Española* (2ª etapa) nºs 14 y 15. Madrid, 2006 y 2007 (publicado en www.divulgameteo.es)
- Persson, Anders O.: “Hadley’s Principle: Understanding and Misunderstanding the Trade Winds”. En *History of Meteorology* 3, 2006 (www.meteohistory.org.)



Inicio del artículo “Concerning the Cause of the Trade Winds” de George Hadley, publicado en 1735 (fuente: <http://rstl.royalsocietypublishing.org/content/39/437/58>)