

LA "LEY DE GIRO" (DREHUNGSGESETZ) DE DOVE (1827) Y EL
NACIMIENTO DE LA DINÁMICA ATMOSFÉRICA EN ALEMANIA¹

DAVID CARRAMOLINO
UNED, Becario de Investigación del Dpto. de Lógica

La ciencia alemana del s.XIX fue particularmente fructífera en sus contribuciones a la constitución de la meteorología como disciplina científica. El desarrollo de esta ciencia fue relativamente tardío con respecto a disciplinas afines, como la óptica o la electricidad, lo cual no es de extrañar, dadas, por un lado, su dependencia de resultados de ciencias más básicas, como la teoría del estado gaseoso, la termología o la teoría de la electricidad, y por otro, la necesidad de una base empírica amplia que difícilmente podría haber sido proporcionada por un científico o grupo de científicos aislado². El estudio de la meteorología a nivel global exigió, en efecto, la creación de redes de observadores significativamente amplias, la estandarización de los instrumentos y patrones de observación y la acumulación de los registros meteorológicos así obtenidos durante un buen número de años.

Estos requerimientos implicaban una inversión económica importante y convirtieron a la meteorología en una empresa estatal. Por ello, hasta prácticamente finales del s.XVIII, cuando los

¹ Esta investigación ha sido realizada dentro del marco del Proyecto de Investigación PB.DGCiCYT 89/0200: *La consolidación de la Meteorología como disciplina científica*.

² Uno de los tratados de física y meteorología más influyentes de principios del s.XIX, el *Tratado de Física experimental* de Biot, definía precisamente la meteorología como la aplicación de la física a los fenómenos atmosféricos:

"La meteorología es la aplicación de la física a los fenómenos constantes o pasajeros que se verifican en la masa de la atmósfera, o en la superficie terrestre, por la acción general de los agentes naturales, tales como el calor, la electricidad o el magnetismo" (J. B. BIOT, *Tratado de Física experimental* 4, 4 vols., trad. de F.Grimaud, Madrid, 1826, pg. 309).

gobernantes se hicieron especialmente sensibles a las repercusiones de los meteoros sobre la agricultura y la salud pública, no se obtuvieron los primeros éxitos en la creación de redes meteorológicas. Fue con la fundación de la Sociedad Meteorológica Palatina en Mannheim (1780), y la Sociedad Real de Medicina en París (1778) cuando se empezó a contar con información meteorológica sistemática y precisa a la que aún en la actualidad recurren los meteorólogos para conocer el tiempo atmosférico de la época. La acumulación de información sobre la atmósfera por estas instituciones, además de las valiosas descripciones de los aventureros de tierras exóticas, hicieron posible el desarrollo del primer modelo global de circulación atmosférica empíricamente fundado - la ley de giro o 'Drehungsgesetz' (1827) del meteorólogo alemán Heinrich Wilhelm Dove - antes del desarrollo y aplicación de la termodinámica a la meteorología que produciría la moderna teoría de los ciclones y del frente polar.

La necesidad de crear una meteorología científica a través de la fundación de una red de observadores se dejó notar en las memorias de la Academia de Ciencias de Berlín de fines del s.XVIII. Especialmente interesante fue la propuesta de Johann Heinrich Lambert (1728-1777) de aplicar la metodología de la astronomía, la ciencia más antigua, a la escasamente desarrollada meteorología³. Convencido del carácter periódico y regular de los fenómenos atmosféricos, Lambert consideraba que la primera tarea que la meteorología científica debía abordar era el establecimiento de leyes generales que permitieran posteriormente el enunciado de predicciones de interés para las diferentes actividades humanas. La conciencia de la importancia de la meteorología para la agricultura y la salud pública justificaban una inversión económica fuerte por parte del Estado. Lambert proponía como punto de partida el establecimiento de una red de observadores a escala

³ J.H.LAMBERT, "Exposé de quelques Observations qu'on pourroit faire pour répandre du jour sur la Météorologie", *Nouveaux Mémoires de l'Académie Royale des Sciences et Belles-Lettres à Berlin pour l'année 1771* (1773), pg.60.

planetaria. La superficie del globo terráqueo sería dividida en veinte triángulos iguales que formaban un icosaedro⁴. Las observaciones meteorológicas serían realizadas en el centro de cada triángulo evitando los lugares incómodos y peligrosos y trasladando los observatorios, cuando fuera posible, a las colonias comerciales y a las misiones religiosas de las naciones europeas. Los marinos también podrían colaborar en esta tarea marcando la fuerza y dirección de los vientos en sus derrotas. Los observadores portarían simplemente un barómetro y un termómetro, y los registros serían divididos en cuatro tablas - barométricas, termométricas, anemométricas y del estado general del cielo. Este patrón de observaciones fue posteriormente afinado por Nicolás de Beguelin (1714-1789) quien publicó los registros de observaciones meteorológicas de la Academia de ciencias de Berlín entre 1770 y 1786⁵.

Las propuestas de Lambert y Beguelin se dejaron oír en la corte del Palatinado donde el príncipe Elector Karl Theodor (1724-1799) fundó en 1780 la Sociedad Meteorológica Palatina, vinculándola a la Academia de Ciencias de Mannheim e invitando por mediación del director de la Sociedad, el sacerdote Johann Jakob Hemmer (1733-1790), a 27 academias científicas, universidades y monasterios a participar en esta noble empresa con una respuesta en general bastante positiva, excepción hecha de la Sociedad Real de Londres⁶. Entre sus corresponsales figuraron nombres tan ilustres

⁴ *Ibid.*, pp.61-63.

⁵ N. DE BEGUELIN, "Extrait des observations météorologiques faites à Berlin en l'année 1770", *Nouveaux Mémoires de l'Académie des Sciences et Belles-Lettres à Berlin pour l'année 1770* (1772): 75-94; 1771 (1773): 74-94; 1772 (1774): 163-182; 1773 (1775): 63-82; 1774 (1776): 134-153; 1775 (1777): 159-180; 1776 (1778): 177-196; 1777 (1779): 86-105; 1778 (1780): 70-90; 1779 (1781): 98-118; 1780 (1782): 181-200; 1781 (1783): 127-148; 1782 (1784): 145-166; 1783 (1785): 164-184; 1784 (1786): 164-184; 1785 (1787): 135-156; 1786 (1788): 141-158.

⁶ Sobre la Sociedad Palatina existen numerosos estudios. Véanse F.TRAUMÜLLER, *Die Mannheimer meteorologische Gesellschaft (1780-1795). Ein Beitrag zur Geschichte der Meteorologie*, Leipzig, 1885; G.HELLMANN, "Die Entwicklung der meteorologischen Beobachtungen in Deutschland von der ersten Anfängen bis zur Einrichtung Staatlicher Beobachtungsnetze", *Abhandlungen der preussischen Akademie der Wissenschaft 1926. Physikalisch-mathematische Klasse*, pp.1-25; J.A.KINGTON, "The Societas Meteorologica Palatina: an Eighteenth-Century Meteorological Society",

como el de Euler en San Petersburgo, y Sénebier en Ginebra. Existieron intentos previos de constitución de redes que fracasaron por distintos motivos. El más notorio fue el de Jurin, miembro de la Sociedad Real de Londres en 1723, que no prosperó dadas la falta de estandarización instrumental - los observadores tenían que procurarse sus propios instrumentos - y la publicación irregular de las observaciones⁷.

El triunfo de la Palatina radicó en la formulación precisa de una normativa relativa a la estandarización de los instrumentos y a la forma de realización y registro de las observaciones, y naturalmente en la respuesta en general positiva de los diferentes correspondientes. La mencionada normativa se halla recogida en el primer volumen de las *Ephemerides* de la Sociedad y exigía el uso de símbolos comunes para denotar los distintos meteoros, buena parte de los cuales se basan en los sugeridos por Lambert en 1771⁸. Las observaciones eran realizadas a horas fijas (7, 14 y 21 h.) y los registros en blanco con un formato preciso eran distribuidos gratuitamente por la Sociedad. Los instrumentos meteorológicos, su diseño y construcción, aparecen también descritos en el primer volumen de las *Ephemerides*⁹.

Weather 29 (1974): 416-426; A.CAPPEL, "Societas Meteorologica Palatina (1780-1795)", *Annalen der Meteorologie* 16 (1980): 10-27, 255-261; H.E.LANDSBERG, "A Bicentenary of International Meteorological Observations", *World Meteorological Bulletin* 29 (1980): 234-238; D.C.CASSIDY, "Meteorology in Mannheim: The Palatine Meteorological Society, 1780-1795", *Sudhoffs Archiv* 69 (1985): 8-25.

⁷ J.JURIN, "Invitatio ad Observationem Meteorologica communi consilio instituendas", *Phil.Trans.* 379 (1723): 422-427.

⁸ "Monitum ad observatores societatis meteorologicae Palatinae, a serenissimo Electore Carolo Theodoro recens institutae", *Ephemerides Societates Meteorologicae Palatinae. Historia et Observationes Anni 1781*, Mannheim, 1783, pp.8-14.

⁹ "Descriptio Instrumentorum Meteorologicum tam eorum, quae Societas distribuit quam quibus praeter haec Manheimi utitur", *Ephemerides Societates Meteorologicae Palatinae. Historia et Observationes Anni 1781*, Mannheim, 1783, pp.59-90. Sobre la historia de los instrumentos meteorológicos puede verse también W.E.KNOWLES MIDDLETON, *The history of the Thermometer and its Use in Meteorology*, The John Hopkins Press, Baltimore, 1966; *The history of the barometer*, The John Hopkins Press, Baltimore, 1968 y *Invention of the Meteorological Instruments*, The John Hopkins Press, Baltimore, 1969.

La red primitiva de 1781 contaba con once observatorios en Europa central que en los cinco años siguientes fueron ampliados hasta un número de cincuenta hasta Rusia, Groenlandia y Norteamérica, la mayoría de ellos asociados a Academias científicas. Desgraciadamente la conquista de Mannheim por los franceses en 1793 durante las guerras revolucionarias dieron al traste con la Sociedad, al mismo tiempo que el fervor revolucionario clausuraba la Sociedad Real de Medicina de París, símbolo del Antiguo Régimen. Esto no fue obstáculo para que los datos meteorológicos de la Palatina hayan sido utilizados hasta prácticamente la actualidad constituyendo la base empírica del primer mapa de isotermas de Alexander von Humboldt (1817), de los primeros estudios sinópticos de la meteorología europea de Heinrich Wilhelm Brandes (1820), y del libro de texto de meteorología más popular del s.XIX, el *Lehrbuch der Meteorologie* (2 vols., Halle, 1831) de Kämtz.

La obra meteorológica de Heinrich Wilhelm Dove (1803-1879)

No cabe duda de que Dove fue el meteorólogo alemán más prolífico e influyente del siglo XIX. Escribió más de 200 obras de meteorología sin tener en cuenta el resto de sus contribuciones científicas publicadas en su mayoría bajo el formato de artículos en los *Annalen der Physik* y en los *Monatsberichte* de la Academia de ciencias de Berlín. Nacido en Liegnitz - en la actual Silesia - en 1803, accedió en 1821 a la Universidad de Breslau para estudiar inicialmente filología¹⁰. La influencia de Heinrich Wilhelm Brandes (1777-1834), profesor en la Universidad de Breslau y meteorólogo consagrado, desvió los intereses de Dove hacia las ciencias naturales. Brandes había publicado recientemente su obra

¹⁰ Sobre la vida y la obra de Dove véanse "Foreign Honorary members. Heinrich Wilhelm Dove", *Proceedings of the American Academy of Arts and Sciences* 7 (1880): 383-391; M.BÖCHER, "The Meteorological Labors of Dove, Redfield and Espy", *American Meteorological Journal* 5 (1888): 1-13; H.NEUMANN, *Heinrich Wilhelm Dove. Eine Naturforscher Biographie*, Krumbhaar, Liegnitz, 1925. Esta última obra contiene un apéndice que refiere todas sus obras científicas.

meteorológica principal, los *Beiträge zur Witterungskunde* (Leipzig, 1820) en los que apoyándose en los registros de la Sociedad Meteorológica Palatina realizó un estudio exhaustivo del tiempo meteorológico del año 1783 mes a mes y día a día, comparando su evolución en diferentes ciudades, regiones y continentes, en lo que afecta a la presión, la temperatura, y la dirección y fuerza del viento. Este enfoque, precursor de la meteorología sinóptica, será bien asimilado por Dove. Su pertenencia a la *Burschenschaft*, la corporación nacional de estudiantes de Alemania, organización clandestina, impidió que pudiera concluir sus estudios en Breslau forzando su traslado a Berlín, en cuya Universidad leyó su tesis doctoral y primera obra meteorológica *De Barometri Mutationibus* (1826). Ese mismo año se trasladó a Königsberg donde encontró un puesto de Privatdozent en ciencias naturales, y publicó su primera versión de la 'ley de giro', modelo de circulación atmosférica que vertebrará toda su obra, en los *Annalen der Physik* (1827). En 1830 al casarse regresó a Berlín donde comenzó a enseñar física y matemáticas en un Gymnasium, y en 1837 fue elegido miembro de la Academia de ciencias de Berlín. En 1845 fue nombrado profesor ordinario en la Universidad de Berlin, de la que llegaría a ser rector. En 1848 sucedió a Wilhelm Mahlmann (1812-1848), discípulo de Humboldt, en la dirección del Instituto Meteorológico de Prusia.

Dove cultivó prácticamente todos los aspectos de la meteorología recibiendo la influencia directa, a través incluso del conocimiento personal, de tres grandes precursores de la meteorología alemana: Brandes en meteorología sinóptica, Alexandert von Humboldt (1769-1859) en climatología y Leopold von Buch (1744-1853) en la formulación de su modelo de circulación atmosférica. Ya hemos comentado brevemente la significación de la obra de Brandes, precursor de la meteorología sinóptica. Dove favoreció el aumento y la integración de las observaciones, promovió la aplicación del telégrafo a la transmisión de la información meteorológica y aumentó el número de estaciones de observación dependientes del

Instituto Meteorológico de Prusia de 35 a 168 durante el período durante el cual fue director del mismo (1858-1877).

De gran significación para su obra meteorológica fue la elaboración y publicación del primer mapa de isotermas de Humboldt en 1817 en un intento de establecer la relación existente entre la temperatura y la distribución geográfica de las plantas. Humboldt se fundó en los registros de la Sociedad Palatina y la Sociedad Médica de París, en las observaciones de von Buch, Beguelin, Euler, Jurin, Cotte, Kirwan, Young y en las suyas propias, dada su condición de viajero infatigable por las tierras del Nuevo Mundo¹¹. Humboldt puso definitivamente de manifiesto con sus investigaciones la falsedad de la creencia, procedente de la filosofía natural griega, relativa a la simple determinación del clima por la latitud introduciendo la influencia de otros factores como los vientos, la proximidad de los océanos, la inclinación, la naturaleza química, el color, la evaporación, la dirección de las cadenas montañosas,... Esta labor tuvo continuidad en las sucesivas ediciones del *Lehrbuch der Meteorologie* (Halle, 1832) de Lüdwig Friedrich Kämtz que revisaban los mapas de isotermas anuales del hemisferio norte utilizando la información procedente de más de 145 estaciones meteorológicas.

Mahlmann publicó en 1841 el primer mapa mundial de isotermas anuales utilizando registros de 305 estaciones y refiriendo las temperaturas medias de los meses más frío y más cálido así como el del invierno y el verano¹². Dove continuó esta labor, de forma independiente a Mahlmann, de quien se consideraba rival. Su principal aportación en este campo fueron las primeras series de mapas de isotermas mensuales introduciendo tres correcciones: la eliminación de las desviaciones derivadas del breve tiempo de

¹¹ A.VON HUMBOLDT, "Des lignes isothermes et de la distribution de la chaleur sur le globe", *Mémoires de physique et de chimique de la Société d'Arcueil* 3 (1817): 462-602. Puede verse también J.MUNZAR, "Alexander von Humboldt and his Isotherms", *Weather* 22 (1967): 360-363.

¹² H.W.MAHLMANN, "Vertheilung der Wärme auf der Oberfläche der Erde", en H.W.DOVE (ed.), *Repertorium der Physik* 4, Berlin, 1841, pp. 1-174.

observación con respecto a la media (1), la eliminación de las fluctuaciones diarias (2) y la reducción de la temperatura en el lugar de observación al nivel del mar (3)¹³. En 1852 delimitó las zonas térmicas de la Tierra a partir de mapas mensuales de isothermas determinando medias para paralelos y meridianos de 10° en 10° de latitud y longitud respectivamente a partir de la información proporcionada por registros de más de 1.500 observatorios y discutió la influencia de las corrientes marinas, los vientos y el estado de agregación del terreno sobre la distribución térmica¹⁴. El conocimiento de la distribución térmica unida a la de océanos/continentes le llevará a intentar explicar la distribución de las lluvias sobre el planeta en 1857¹⁵.

La obra de Dove se vió también influida por la de Leopold von Buch cuya obra meteorológica no ha recibido todavía la atención que merece. Von Buch estudió mineralogía, geología e ingeniería de minas en Berlín y Freiberg accediendo en 1796 al servicio civil prusiano. En meteorología destaca su teoría del granizo en cuya formación considera gratuita la intervención de la electricidad en favor de un proceso de evaporación/condensación en las capas bajas de la atmósfera, sus observaciones barométricas en Berlín, y su descripción del clima de las islas Canarias¹⁶. Su influencia fundamental sobre la obra de Dove reside en la formulación de un modelo de circulación atmosférica que éste desarrollará y utilizará como fundamento de toda su obra:

¹³ H.W.DOVE, "Über die Gestaltänderung der Isothermen in der jährlichen Periode", *Monatsberichte der preussischen Akademie der Wissenschaften zu Berlin* (1839), pg.125.

¹⁴ H.W.DOVE, *Die Verbreitung der Wärme auf der Oberfläche der Erde erläutert durch Isothermen, Thermische Isanomalien und Temperatur curven*, Dietrich Reimer, Berlin, 1852.

¹⁵ H.W.DOVE, *Klimatologische Beiträge*, 2 vols., Dietrich Reimer, Berlin, 1857-1869.

¹⁶ L.VON BUCH, "Über den Hagel", *Abhandlungen der königlichen Akademie der Wissenschaften in Berlin aus den Jahren 1814-1815*, pp. 73-104; "Über die Bewegungen des Barometers zu Berlin ", 1818-1819 (1820): 83-98; "Einige Bemerkungen über das Klima der canarischen Inseln", 1820-21 (1822): 105-122.

"...cada movimiento del aire, del ecuador hacia los polos debe producir no solamente en lo alto sobre los otros, sino junto a los otros su corriente opuesta de los polos hacia el ecuador. Donde ambas ambas corrientes contactan se superponen a menudo, y forman vientos de torbellino y reflexión (vents de rémoux) aislados y poco duraderos, por los cuales el viento principal raramente puede ser desviado. El barómetro es un guía, si antes ha sido comprobado a través de una larga serie de observaciones, cuya altura corresponde a algún viento aislado"¹⁷.

No hay espacio en este trabajo para analizar en profundidad todas las contribuciones a la meteorología de Dove por lo que me he centrado en su modelo de circulación atmosférica, la ley de giro, piedra angular de su obra, y a su papel en la explicación de los alisios, los monzones y las tormentas.

La ley de giro (1827)

Dove heredó la concepción de la meteorología de Lambert según la cual los fenómenos meteorológicos no eran arbitrarios sino que estaban sometidos a leyes análogas a las de la astronomía. Dove estaba así convencido de que los cambios de dirección del viento no eran aleatorios sino que obedecían una cierta ley. Fue esta convicción la que le condujo al descubrimiento de la ley de giro en 1826¹⁸. Dove correlacionó la dirección del viento con el estado del barómetro en Königsberg entre el 25 de septiembre y el 6 de octubre de 1826, y observó que al mismo tiempo que el viento completaba un giro regular S.O.N.E.S, el nivel del mercurio en el

¹⁷ "...jede Bewegung der Luft, vom Aequator gegen die Pole, nicht bloss in der Höhe über einander, sondern neben einander hin ihren entgegengesetzten Strom von den Polen gegen den Aequator erzeugen müsse. Wo beide einander berühren laufen sie häufig übereinander, und bilden einzelne, wenig ausdauerne Wirbel- und Reflexionswinde (vents de rémoux), durch welche man nicht selten über den Hauptwind ganz irre geleitet werden kann. Das Barometer wird dann ein Führer, wenn vorher durch eine grosse Reihe von Beobachtungen festgestellt worden ist, welche Höhe des Barometers jedem einzelnen Winde zukomme" (L.VON BUCH, "Über die Bewegungen des Barometers zu Berlin", *Abhandlungen der königlichen Akademie der Wissenschaften in Berlin aus den Jahren 1818-1819* (1820), pg.89).

¹⁸ H.W.DOVE, "Einige meteorologische Untersuchungen über den Wind", *Annalen der Physik* 11 (1827): 545-590.

barómetro describía una onda. Algunos giros podían durar hasta 22 días. Los resultados se recogen en la tabla de la ilustración 1 donde cada día se registran tres medidas de la presión barométrica - a las 8 de la mañana, al mediodía, y a las 10 de la noche - una de la

	Tag	8 U. Vorm.	Mittag	10 U. N.	Wind	Witterungsabicht
September	25	335 ^{''} ,84	335 ^{''} ,81	338 ^{''} ,53	W	cumuli
	26	340,55	341,27	342,18	W-N	bedeckt
	27	342,74	342,76	342,11	NO	hell
	28	341,94	341,63	341,22	O	—
	29	340,74	340,34	340,67	O	—
	30	341,06	340,65	340,53	O	—
October	1	340,34	340,28	340,21	OSO	—
	2	340,51	340,27	340,00	SO	—
	3	339,52	338,77	337,45	S	cirri
	4	336,48	336,66	335,69	S	fein bezogen
	5	335,49	335,35	335,29	S	Regen
	6	336,46	337,44	339,23	W	bedeckt

Ilustr. 1. Tabla de correlación de la presión con la dirección del viento (H. W. DOVE, "Einige meteorologische Untersuchungen über den Wind", *Annalen der Physik* 11 (1827), pg.545).

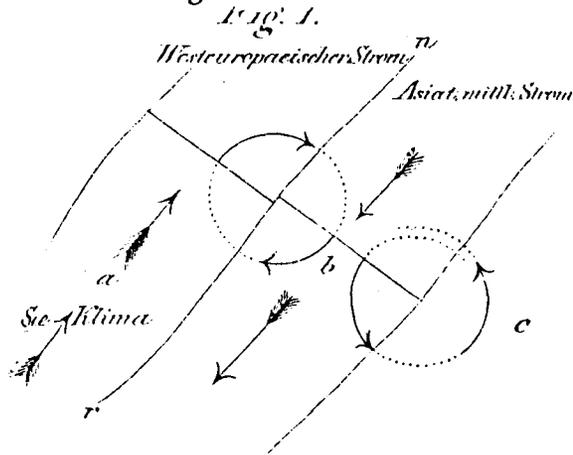
dirección del viento y otra del estado general del cielo. De esta experiencia concluyó que el estado barométrico era función de la dirección del viento, y el barómetro podía proporcionar una valiosísima información acerca de la dirección del viento.

La temperatura seguía una evolución inversa a la de la presión barométrica. Con viento SO la temperatura era máxima y la presión mínima produciéndose precipitaciones. Con viento N la temperatura descendía, la presión ascendía y el cielo se despejaba. Con viento NO se alcanzaba la máxima térmica y la mínima barométrica. A partir de entonces la temperatura volvía a aumentar, la presión disminuía y aparecían cirros en el cielo con viento E, y SE. Este proceso continuaba con viento S nublándose cada vez más el cielo y volviéndose a producir precipitaciones con viento

SO. De esta forma se completaba el ciclo, el giro completo de la dirección en la rosa de los vientos y la evolución paralela de la temperatura y la presión atmosférica. Dove concluía también de su experiencia que todos los vientos, al menos en Europa, eran realmente generados por torbellinos giratorios¹⁹.

Dove se trazó un modelo de la formación de los torbellinos en Europa occidental fundándose en las observaciones anemométricas de Lambert en San Petersburgo de 1777 y en el mapa de isotermas de Humboldt de 1817²⁰. Lambert había constatado que

en San Petersburgo la dirección media del viento era NE mientras que en Berlin y otras ciudades de la Europa occidental la dirección media del viento era SO. La curvatura de las isotermas del mapa de Humboldt proporcionaba también información sobre la dirección del viento supuesto que las corrientes que proceden del Sur son cálidas y las que proceden del Norte frías. Según esto Dove concluyó que las costas occidentales de ambos continentes



Ilustr. 2. Formación de un torbellino por una corriente NE y otra SO (H.W.DOVE, "Über mittlere Luftströme", *Annalen der Physik*, Taf.VII, Fig.1)

¹⁹ "...hier wenigstens alle Winde Wirbelwinde im Grossen sind" (*Ibid.*, pg.547).

²⁰ J.H.LAMBERT, "Sur les observations du vent", *Nouveaux Mémoires de l'Académie Royal des Sciences et Belles-Lettres à Berlin pour l'anné 1777* (1779): 36-41 y A.VON HUMBOLDT, "Des lignes isothermes et de la distribution de la chaleur sur le globe", *Mémoires de physique et de chimique de la Société d'Arcueil* 3 (1817): 462-602.

eran cálidas porque en ellas dominaba la corriente SO, y las costas orientales frías porque en ellas dominaba la NE²¹. Los torbellinos se formaban en las zonas de contacto entre las corrientes SO y NE - véase la ilustración 2. Esto explicaba que en Europa occidental los giros en la dirección del viento siempre fuesen SO.O.-NO.N.NE.E.SE.S.SO. por el encuentro de una corriente SO procedente del Ecuador y una corriente NO de Europa oriental y Asia procedente del Polo Norte. Este modelo era avalado por las observaciones en Europa occidental y en el Océano Índico pero Dove carecía de datos correspondientes a ambas costas del continente americano, datos con los que contará años más tarde.

Esta concepción permitía explicar también las precipitaciones en Europa occidental en el marco de la teoría clásica de Hutton según la cual las precipitaciones se producían cuando dos masas de aire de diferente temperatura y humedad, una cálida y húmeda, y otra fría y seca se encontraban²². Dove distinguía entre precipitaciones originadas por el encuentro de la corriente SO, cálida y cargada de humedad, procedente del Ecuador, y la corriente NE, fría y seca, procedente del Polo Norte, y precipitaciones ocasionadas únicamente por la corriente SO procedente del Ecuador²³. En cuanto al primer tipo de precipitaciones, Dove vinculó las precipitaciones del vapor de agua atmosférico con los cambios en la dirección del viento y con la evolución del barómetro y del termómetro. El encuentro de las corrientes opuestas del SO y del NE provocaba un giro y las consiguientes precipitaciones según el modelo ya explicitado²⁴. Las precipitaciones se ven tanto más favorecidas cuanto mayor es la diferencia de temperatura entre las corrientes

²¹ H.W.DOVE, "Ueber mittlere Luftströme", *Annalen der Physik* 13 (1828): 583, 586.

²² J.HUTTON, "The Theory of Rain", *Transactions of the Royal Society of Edinburgh* 1 (1788): 42-86.

²³ H.W.DOVE, "Ueber mittlere Luftströme", *Annalen der Physik* 13 (1828), pg.94.

²⁴ Véase también H.W.DOVE, "Über die Windverhältnisse in Europa", *Annalen der Physik* 15 (1829): 53-70 y "Bemerkungen über den Regen", *Annalen der Physik* 31 (1834): 545-560.

que se encuentran. El segundo tipo de precipitaciones era consecuencia de la corriente del SO originada en los alisios que al alejarse del Ecuador pierde su vapor de agua en forma de precipitaciones. Las precipitaciones eran duraderas porque la dirección de las corrientes SO y NE era constante, y los cambios locales de las precipitaciones se explicaban porque la frontera entre las dos corrientes opuestas cambiaba localmente. El predominio de la corriente NE producía inviernos fríos y secos y veranos cálidos y húmedos, buen tiempo y máximos barométricos. El predominio de la corriente SO originaba lluvias y mínimos barométricos. El predominio de una y otra corriente alternan sobre un determinado lugar geográfico.

Dove enmarcó su modelo, que originalmente estaba restringido a Europa occidental, en la circulación general de la atmósfera, recuperando la teoría de los alisios de Halley y Hadley²⁵. El astrónomo Edmond Halley (1656-1743) había formulado en 1686 una teoría de los vientos alisios y de los monzones que se fundaba en lo que hoy conocemos como "convección térmica", es decir, el ascenso de aire caliente en las regiones más cálidas del planeta, próximas al cinturón ecuatorial, donde la irradiación solar es máxima, que crea un desequilibrio térmico y un gradiente de presión causando el movimiento de la masa de aire, es decir, los vientos²⁶. Halley pensó acertadamente que la atmósfera gira con la Tierra, y que sin una distribución desigual del calor sobre su superficie no existirían vientos. Esto permitía explicar los vientos occidentales de la costa del Golfo de Guinea y la alternancia de los monzones por la alternancia de temperaturas relativas en la Tierra y el mar en la India. Según esta hipótesis, los vientos alisios habrían de dirigirse del Ecuador hacia el Polo Norte en el hemisferio norte, y del Ecuador hacia el Polo Sur en el hemisferio sur,

²⁵ A este respecto el artículo clave es H.W.DOVE, "Über den Einfluss der Drehung der Erde auf die Strömungen ihrer Atmosphäre", *Annalen der Physik* 36 (1835): 321-351.

²⁶ E.HALLEY, "An historical Account of the trade-winds and monsoons", *Philosophical Transactions* 26 (1686): 153-168.

pero de hecho, sus direcciones son Noreste, y Sureste respectivamente. Halley se limitó a señalar que el viento posee una tendencia a seguir el movimiento diurno del Sol del Este al Oeste sin aclararlo más.

Fue su compatriota el inglés George Hadley (1685-1768), capitán de la marina británica, quien en 1735 concibió correctamente la influencia de la rotación terrestre sobre el movimiento del aire en la atmósfera²⁷. Por una parte, siguió a Halley en atribuir la causa física de la circulación atmosférica al calentamiento desigual de la atmósfera por el Sol²⁸. El aire calentado, más ligero asciende dejando un vacío que se llena por una masa de aire frío, más denso y pesado. La desviación de los vientos alisios de sus direcciones originales Norte en el hemisferio norte y Sur en el hemisferio sur - si la Tierra estuviese en reposo - al Noreste y Sureste respectivamente son atribuibles a la rotación diaria de la Tierra sobre su eje. Los paralelos poseen diferente diámetro, aumentando de los Polos al Ecuador, pero cada punto de la superficie terrestre da una vuelta cada 24 horas de forma que la velocidad de los puntos de la superficie terrestre aumenta de los Polos al Ecuador. Una masa de aire frío que se dirige de los Trópicos al Ecuador irá perdiendo progresivamente velocidad con respecto a la superficie terrestre en dirección Oeste-Este, y reteniendo su momento angular absoluto, adquirirá una componente en el sentido opuesto, hacia el Este:

"Los paralelos aumentan de tamaño a medida que se aproximan al Ecuador y el Ecuador es mayor que los Trópicos... y la superficie de la Tierra en el

²⁷ G.HADLEY, "Concerning the Cause of The General Trade Winds", *Philosophical Transactions* 39 (1735): 58-62. Sobre las primeras teorías de circulación atmosférica consúltense H.L.BURSTYN, "Early Explanations of the Role of the Earth's Rotation in the Circulation of the Atmosphere and the Ocean", *Isis* 57 (1966): 167-187, y E.N.LORENZ, "A History of Prevailing Ideas about the General Circulation of the Atmosphere", *Bulletin of the American Meteorological Society* 64 (1983): 730-734.

²⁸ "...the Action of the Sun is the original Cause of these Winds" (G.HADLEY, *Op.cit.*, pg.58).

Ecuador se mueve más deprisa que la superficie de la Tierra con su aire en los Trópicos. De donde se sigue que el aire, a medida que se mueve de los Trópicos hacia el Ecuador, teniendo una menor velocidad que las partes de la Tierra a las que llega, poseerá un movimiento relativo contrario al movimiento diurno de la Tierra en aquellas partes, que se combina con el movimiento hacia el Ecuador..."²⁹.

El efecto que Hadley describe es lo que hoy conocemos como componente Este-Oeste de la fuerza de Coriolis³⁰. La teoría de Hadley permaneció ignorada en Europa hasta que John Dalton (1766-1844), fundador de la teoría atómica moderna, la recuperó en 1793³¹. El filósofo alemán Immanuel Kant introdujo, independientemente de Hadley, el efecto de la rotación terrestre en la circulación general de la atmósfera en la *Physische Geographie* (1756), apuntes que redactó para las clases de Geografía Física impartidas en la universidad de Königsberg³².

²⁹ "The Parallels are each of them bigger than the other, as they approached to the Equator and the Equator is bigger than the Tropicks... and the Surface of the Earth at the Equator moves so much faster than the Surface of the Earth with its Air at the Tropicks. From which it follows, that the Air, as it moves from the Tropicks towards the Equator, having a less Velocity than the Parts of the Earth it arrives at, will have a relative Motion contrary to that of the diurnal Motion of the Earth in those Parts, which being combined with the Motion towards the Equator..." (G.HADLEY, *Op.cit.*, pg.60).

³⁰ El matemático francés Gaspard Gustave de Coriolis (1792-1843) publicó en 1835 un trabajo en el que analizaba la aceleración en el movimiento compuesto al que estaban sometidos los puntos de la superficie terrestre (*Journal de l'École Polytechnique* 15 (1835): 93-125, 142-154).

³¹ Dalton descubrió la obra de Hadley después de que él mismo ideara una teoría de la circulación atmosférica muy similar que inicialmente consideró como enteramente original y novedosa. Con una honestidad infrecuente reconoció la prioridad de Hadley en el descubrimiento. En el prefacio a sus *Meteorological Observations* escribió:

"The second essay, containing the theory of the trade-winds, was, as I conceived when it was printed off, original; but I find since, that they are explained on the very same principles, and in the same manner, in the *Philosophical Transactions* for 1735, by George Hadley..." (J.DALTON, "Preface", *Meteorological Observations and Essays*, W.Richardson, London, 1793, pg.V).

³² Véase sobre este tema el trabajo D.CARRAMOLINO, "La dinámica atmosférica en la *Physische Geographie* (1756) de Kant", *Éndoxa* 1 (1993): 341-357.

Dove no tuvo noticia de la teoría de Kant de la *Physische Geographie* hasta 1846 y se inspiró originalmente en la versión de Dalton³³. La "ley de giro" (*Drehungsgesetz*) del viento podía ser derivada de la concepción de la circulación global de la atmósfera. El efecto de la rotación terrestre sobre la circulación atmosférica tenía como consecuencia que en el hemisferio Norte, los vientos que se forman como vientos Norte se conviertan en vientos NE, y giren en sentido N.NE.E.SE.S..., y los vientos Sur se conviertan en SO y giren en sentido contrario. En el hemisferio Sur los giros tienen lugar en sentido contrario. En el hemisferio Norte el viento gira en sentido S.O.N.E.S cuando la corriente polar y ecuatorial se intercambian, y en el hemisferio Sur en sentido contrario. En resumen la "ley de giro" especificaba³⁴:

- en la zona Tropical no se producen giros completos sino una desviación de la dirección proporcional al alejamiento del Ecuador.

- en las zonas Tropicales debido a la distribución desigual de continentes y océanos en ambos hemisferios sólo se produce un único giro al año en el momento de producirse la alternancia entre los monzones. Dove aplica la teoría de las brisas, vientos periódicos diarios en las costas de mares y lagos producidos por el calentamiento desigual de la tierra firme y los mares, a la explicación de los monzones anuales que soplan seis meses en un sentido y seis meses en el sentido contrario. Los monzones son producidos por el calentamiento y distribución desiguales de la tierra y el mar, en dos estaciones extremas del año. El desplazamiento del ecuador térmico en los Trópicos, dada la inclinación del ecuador terrestre con el plano de la eclíptica, provoca en verano un mayor calentamiento del continente. En invierno este desplazamiento se invierte y es el mar el que se

³³ H.W.DOVE, "Über die Stürme der gemässigten Zone", *Monatsberichte der preussischen Akademie der Wissenschaften zu Berlin aus dem Jahre 1872*, pg.374.

³⁴ H.W.DOVE, "Über den Einfluss der Drehung der Erde auf die Strömungen ihrer Atmosphäre", *Annalen der Physik* 36 (1835), pp.325-326.

calienta más. En verano la tierra está más caliente que el mar por el desplazamiento del ecuador térmico hacia la masa continental y sobre el continente se forman masas de aire caliente que ascienden y son reemplazadas por masas de aire frío. En invierno el mar, que se enfría más lentamente que la masa continental, conserva el calor y se invierte el proceso, soplando el viento en sentido contrario.

- en las zonas templadas y probablemente también en las frías, donde la corriente ecuatorial alterna continuamente con la polar, el viento gira en el punto de encuentro en un cierto sentido en el hemisferio norte y en el sentido opuesto en el hemisferio sur.

Dove contaba con numerosa información empírica de la meteorología centroeuropea, pero su modelo tenía unas pretensiones globales, y en sus artículos no sólo cita, como pruebas de su ley, observaciones de meteorólogos profesionales sino también de marinos y viajeros de tierras exóticas. Como testimonios de los giros del viento en el hemisferio norte cita la *Meteorología* de Aristóteles, la *Historia naturalis et experimentalis de ventis* (1600) de Bacon, *La meteorologia applicata all'agricultura* (1774) de Toaldo o el *Systematischer Grundriss der Atmosphärologie* (1806) de Lampadius, entre otros, además de sus propias observaciones en Königsberg³⁵. La falta de información acerca de la dirección del viento y sus cambios en el hemisferio sur le hacen recurrir a menudo a los testimonios de marinos. A modo de ejemplo destaca el *Apéndice a la Relación del viage al estrecho de Magallanes* (1793) de Cosme Churruca, el *Extrait du Journal du voyage de l'Astrolabe relativement aux principales variations du vent dans l'hémisphère Austral durant les années 1826 et 1827* (1837) de Dummont d'Urville, contraalmirante de la marina francesa o la *Narrative of the surveying voyages of Adventure and Beagle* de King y Fitzroy, capitán del barco que hizo

³⁵ *Ibid.*, pp.329ss. Véase también H.W.DOVE, "Über directe Prüfungen des Drehungsgesetzes auf der nördlichen Erdhälfte, und über Wahrnehmungen desselben auf der südlichen", *Annalen der Physik* 67 (1846): 305-318.

posible que el padre de la teoría de la evolución encontrara un material empírico decisivo.

El modelo de Dove no fue aceptado en la comunidad científica sin discusiones. No obstante, sus cargos en la universidad de Berlín y en el Instituto Meteorológico de Prusia facilitaron la difusión de sus ideas. La única polémica a destacar es la que mantuvo con J.F.Schouw (1728-1777), profesor de fitogeografía de la Universidad de Copenhague, en los *Annalen der Physik* entre 1828 y 1833³⁶. Schouw había propuesto un modelo de circulación atmosférica en la zona templada distinto al de Dove en *Skildring af Veirligets Tilstand in Danemark* (Kiöbenhavn, 1826). En lugar de las dos corrientes enfrentadas polar y ecuatorial del modelo de Dove, Schouw mantenía que sobre la zona templada del hemisferio Norte sólo dominaba una corriente SO u O. Schouw pretendía fundar su modelo en sus propias observaciones realizadas a lo largo de veinte años y descalificó la base empírica con la que Dove pretendía fundar su modelo. Los cambios en la dirección del viento en el hemisferio Norte no siempre tenían lugar, según Schouw, en el sentido que Dove indicaba. Muchos marinos no apoyaban la tesis de Dove, las observaciones de Lambert en las que Dove se apoyaba eran escasas, y Schouw pretendía además que la deformación de las isotermas en el mapa de Humboldt apoyaba su tesis. En resumen, la polémica no tuvo ninguna consecuencia interesante, y la "ley de giro" de Dove fue aceptada por la comunidad científica alemana hasta finales del siglo cuando la aplicación de la termodinámica a la meteorología produjo la moderna teoría del frente polar.

La teoría de las tormentas

³⁶ J.P.SCHOUW, "Einige Bemerkungen über die Windverhältnisse in der nördlichen Hemisphäre", *Annalen der Physik* 14 (1828): 541-558; H.W.DOVE, "Über die Windverhältnisse in Europa", *Annalen der Physik* 15 (1829):53-70, y J.P.SCHOUW, "Erwiederung auf eine Bemerkung des Hrn.Prof.Dove", *Annalen der Physik* 28 (1833): 510-511.

Especial importancia en la aplicación de la "ley de giro" de Dove tuvo el análisis de las tormentas, primero de las tormentas en la Europa templada, y posteriormente de los ciclones tropicales. La formación de las tormentas era a principios del s.XIX un fenómeno cuyo análisis permanecía aún en la oscuridad. Dove mantuvo inicialmente la creencia habitual según la cual las tormentas tenían lugar cuando el aire era expulsado de las nubes por la repulsión eléctrica entre las mismas³⁷. La tormenta era tanto más violenta cuanto mayor era la electricidad de la nube.

La génesis de una tormenta venía acompañada por fuertes precipitaciones y Dove había relacionado la producción de precipitaciones con los cambios de dirección del viento. De esta forma las tormentas en Europa occidental podían ser consideradas como una consecuencia del encuentro de la corriente polar SO y de la corriente ecuatorial del NW. El aire sofocante y la calma que precede a las tormentas era explicable porque en ese momento un viento sopla contra otro conteniéndose entre sí. La tormenta comenzaba cuando un viento cálido del SO se mezclaba repentinamente con un viento frío del NE. El giro se produce en sentido S.O.N.E y la tormenta se forma en el lado Oeste.

Dove asoció los mínimos barométricos con la presencia de un torbellino que en el caso de las tormentas europeas avanzaba desde el SO hacia el NE³⁸. El modelo permitía asociar el avance de las tormentas, según los resultados de las observaciones barométricas, con la corriente ecuatorial del SO. Este esquema permitió a Dove el análisis de dos célebres y violentas tormentas europeas con los datos sobre la mesa.

En la tormenta que recorrió Europa occidental desde Bretaña hasta Escandinavia, la dirección media del viento en la corriente Sur había sido durante los meses de noviembre y diciembre del SO. La tormenta fue especialmente violenta causando destrozos en

³⁷ H.W.DOVE, "Ueber das Gewitter", *Annalen der Physik* 13 (1828), pg.420.

³⁸ H.W.DOVE, "Über barometrische Minima", *Annalen der Physik* 13 (1828): 596-613.

toda Europa y naufragios en las costas españolas, francesas e italianas. En la figura 3 la línea ab une los mínimos más significativos indicando la dirección de la corriente. La línea curva cd indica la amplitud, y su tangente la línea barométrica que une los puntos correspondientes a los mismos valores barométricos en un momento dado. El lugar correspondiente al menor mínimo barométrico no tiene que corresponder necesariamente al centro de la corriente. Esta tormenta era un fenómeno asociado a la corriente ecuatorial del SO.

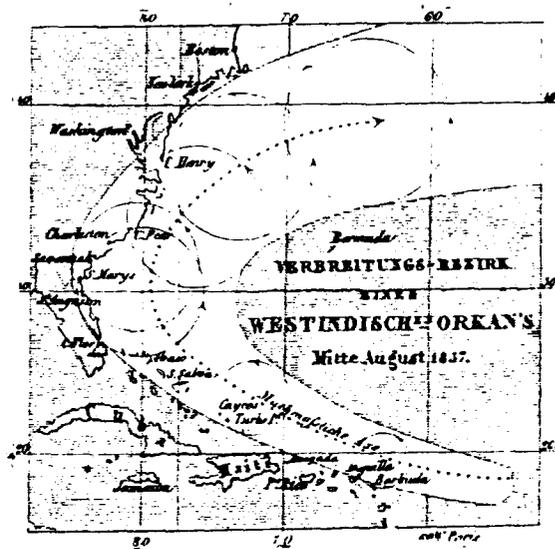
El segundo ejemplo que Dove presenta es el análisis de la tormenta de los días 2 y 3 de febrero de 1823 - véase la ilustración 4. A diferencia del caso anterior en el que se partía de un estado inicial en el que predominaba la corriente ecuatorial del S ahora la tormenta comienza en estado de predominio de la corriente N con frío intenso en toda Europa occidental. A finales de enero sopla un fuerte viento SSO, baja el termómetro y sube la temperatura. Entonces sopla una corriente de aire cálido del SO que encuentra el aire frío, y genera un torbellino, es decir, la tormenta. El barómetro desciende progresivamente en los días sucesivos alcanzando un mínimo el 2 de febrero. En esta tormenta, a diferencia del ejemplo anterior, se registraron dos lugares de presión mínima m y n - véase la ilustración 4. Esta partición del mínimo barométrico se explica por el internamiento de la corriente del NE en otra corriente del SO. El mínimo más fuerte n está situado en el Sur de Francia, y el m a los largo de las costas de Inglaterra.

Años más tarde Dove ampliaría el modelo inicialmente pensado para las tormentas de la Europa occidental a los ciclones de las costas asiáticas y americanas. En esta nueva etapa resultaron esenciales los trabajos de algunos meteorólogos norteamericanos como Redfield, Reid o Espy. Brandes había expuesto en *Dissertatio physica de repentinis variationibus in pressione atmosphaerae observatis* (Leipzig, 1826) la hipótesis centrípeta de las tormentas según la

de la rotación terrestre.

Las investigaciones decisivas fueron las del meteorólogo norteamericano W.C. Redfield quien recopiló abundante información sobre las tormentas de la costa atlántica norteamericana publicando sus resultados en el *American Journal of science* (1831). Las observaciones de los efectos y del curso de las tormentas llevó a Redfield a pensar que los ciclones eran torbellinos con un rápido movimiento de rotación en sentido contrario al de las manecillas de un reloj generados entre el Trópico y el Ecuador. En su movimiento de traslación los ciclones describían una trayectoria parabólica. Su dirección original era NO, pero al entrar en la zona templada giraban en ángulo recto y se movían con dirección NE aumentando en magnitud - véase la ilustración 5. W.Reid, gobernador de Bermudas, realizó numerosas observaciones que confirmaban la teoría de Redfield, y publicó sus resultados en *An Attempt to develop the law of Storms* (Londres, 1838).

Dove aprovechó los resultados de Redfield y Reid al ampliar su estudio de las tormentas de las zonas templadas a las tropicales y tuvo el mérito de incluirlos en su



Ilustr. 5. Trayectoria de los ciclones según Redfield (H.W.DOVE, "Über das Gesetz der Gewitter", *Annalen der Physik* 52 (1841), Taf.I, fig.IV)

modelo general de circulación atmosférica³⁹. Los torbellinos son originados por el efecto conjunto de la rotación terrestre y la resistencia que el aire, que desde el Ecuador se impulsa inicialmente hacia el N, sufre. Por el efecto de rotación terrestre una masa de aire que se mueve desde el Ecuador hacia el N sufre una desviación hacia el NO. Esta masa de aire encuentra la resistencia del alisio que se mueve en dirección SE-NO que provoca un giro en sentido contrario a las manecillas de un reloj y la consiguiente formación del torbellino. En la zona de los Trópicos donde el torbellino encuentra constantemente la resistencia del alisio, la propagación tiene lugar siempre hacia el NO. Al entrar en la zona templada este efecto desaparece y el torbellino encuentra vientos de occidente lo que motiva que gire en ángulo recto y se propague hacia el NE. Al desaparecer la influencia del alisio el torbellino se ensancha y debilita.

La tormenta se produce porque la parte superior del torbellino se propaga con mayor velocidad que la inferior produciendo una absorción y una fuerte disminución de presión en el centro de la tormenta. La elevación de la temperatura con las tormentas se debe al calor generado por el movimiento del torbellino, y las precipitaciones asociadas a la mezcla de las capas de aire inferiores con las superiores por la inclinación del eje de rotación del torbellino.

Examinando la información proporcionada por diversos autores, Dove pudo elaborar una tipología de las tormentas de la zona templada⁴⁰:

(1) ciclones - *Wirbelstürme*. Ciclones que al llegar a la zona templada se doblan en ángulo recto y se propagan hacia el NE debilitándose y ensanchándose continuamente.

³⁹ A este respecto la obra clave es H.W.DOVE, "Über das Gesetz der Stürme", *Annalen der Physik* 52 (1841): 1-41.

⁴⁰ H.W.DOVE, "Über den Sturm von den 6ten und 7ten Dezember 1868", *Monatsberichte der preussischen Akademie der Wissenschaften zu Berlin* (1868): 632-636.

(2) tormentas originadas en la corriente ecuatorial superior que baja en la frontera de los alisios. Pierden su contenido en agua en los Alpes con fuertes precipitaciones y luego suben hacia el N.

(3) tormentas de invierno - *Wintergewitter*. Por el encuentro entre una corriente ecuatorial del SO y una corriente polar perpendicular del NO.

(4) *Burans* o *Staustürme*. Por el encuentro entre una corriente ecuatorial del SO y una corriente polar del NE. En el punto de encuentro el barómetro se estanca a una altura poco frecuente.

La teoría de las tormentas significaba, de esta forma, uno de los mayores éxitos de la obra meteorológica de Dove, al hacer compatibles sus observaciones y las de otros autores con su modelo de circulación general de la atmósfera, y permitir una de las primeras tipologías de tormentas con base científica. Aunque sus teorías cayeron en desuso a finales del siglo pasado por la aplicación de las leyes de la termodinámica a los movimientos de las masas de aire de la atmósfera y la emergencia de la moderna teoría de los ciclones y del frente polar, Dove tiene el mérito de haber sido uno de los grandes pioneros en la constitución de una meteorología auténticamente científica.