
LAS INVESTIGACIONES METEOROLOGICAS DE CALDAS (*)

VICTOR SAMUEL ALBIS GONZALEZ

Departamento de Matemáticas y Estadística-Facultad de Ciencias-Universidad Nacional de Colombia

REGINO MARTINEZ-CHAVANZ

Departamento de Física-Universidad de Antioquia

Albis V., & R. Martínez. 2000: Las investigaciones meteorológicas de Caldas. Meteorol. Colomb. 2:131-140. ISSN 0124-6984. Bogotá, D.C. – Colombia.

1. INTRODUCCION

El siguiente es el texto de la conferencia pronunciada en 1986, con ocasión del Coloquio que sobre el estado actual de la investigación de la obra de **Francisco José de Caldas** se celebró en la ciudad de Popayán. El trabajo que aquí exponemos intenta responder los siguientes interrogantes, relativos a los trabajos meteorológicos de **Caldas**, en especial aquellos que tienen que ver con su modo termométrico para calcular las alturas: ¿Que sabía **Caldas**? ¿Dónde lo aprendió? ¿Se trata, partiendo de las respuestas a las anteriores preguntas, de un verdadero descubrimiento? ¿Es este descubrimiento anterior o posterior a lo que sobre el tema se había hecho en Europa? ¿Es independiente de esta última circunstancia? Las respuestas a estos interrogantes se encuentran afortunadamente en los escritos y cartas de **Caldas**, en donde, además, es posible seguir el itinerario de sus experiencias y razonamientos, y en el escrutinio de lo publicado sobre el tema en las revistas y libros europeos de los siglos XVIII y XIX.

Nuestras conclusiones son las siguientes:

a) La utilización del termómetro para calcular las alturas de las montañas y la propuesta de aparatos (hipsómetros, como los llamó más tarde **Regnault**), se remonta a **Fahrenheit** [1724, 179-180]; (véase la nota (8)), aunque sobre verdaderas experiencias sobre el asunto sólo podemos hablar a partir de los trabajos de **De**

Luc, [1762]; sus conclusiones eran muy conocidas tanto en Inglaterra como en el Continente [véase **Maskelyne**, 1774]; y [**Sigaud De La Fond**, 1787]. El principio subyacente es la constancia de la temperatura de ebullición del agua a una determinada altura (o presión barométrica).

b) Este principio era conocido por **Caldas**, quien considera que su verdadero pequeño descubrimiento es usar este hecho para medir las alturas; su única fuente disponible [**Sigaud De La Fond**, 1787] le sugiere que el modelo debe ser lineal, pero no le indica cuál es la constante de proporcionalidad; su propósito inmediato es encontrar esta constante mediante, un gran número de experiencias [**Caldas** 1978, Carta 40, del 5 de agosto de 1801, 93]. Sus observaciones le llevan a proponer la fórmula (7) (**vid. infra**). Su preocupación porque este descubrimiento fuese conocido en Europa era bien fundada como lo hemos indicado en a). Además, su descubrimiento sólo es independiente en cuanto se realiza en la periferia de los centros de investigación importantes, aunque le parezca increíble a **Caldas** que una "idea tan clara, tan sencilla, tan segura" no se le haya ocurrido a otros en Europa.

c) La constante que obtiene para su fórmula (7) es tan buena en un modelo lineal como las que se obtendrían de las tablas publicadas por **De Luc** y **Schuckburg**, 40 y 10 años antes, respectivamente. Su Memoria [**Caldas** 1802 (1819)] sobre el tema hubiera tenido cabida, en

(*)Conferencia invitada del "Coloquio sobre Francisco José de Caldas", Popayán 1986. La investigación que apoyó este trabajo se realizó en el Proyecto de Investigaciones sobre la Historia de la Matemática en Colombia de la Sociedad Colombiana de Matemáticas, parcialmente apoyado por CONCIENCIAS (202-1-01-74). El primer autor quiere agradecer al Programa de Maestría Centroamericana en Matemáticas de la Universidad de Panamá, las facilidades y garantías que le permitieron terminar la redacción de este trabajo. Este trabajo fue publicado anteriormente en Revista de la Universidad Nacional de Colombia (II época), Vol III, N°14-15, (1987), 12-23, y en Quipu: Rev Latinoamericana de Historia de la ciencia y la tecnología 4 (1987), 413-432.

nuestra opinión, en un periódico europeo, de no haber sido escrita tardíamente y en la periferia.

d) Si la descripción o construcción de un termómetro barométrico o hipsómetro se acepta como invención, **Caldas** también es inventor de uno [**Caldas** 1802 (1819)].

e) La publicación póstuma de su Memoria, hasta donde hemos podido verificar, no tuvo ninguna repercusión en Europa. Creemos, finalmente, que **Caldas** nunca la publicó, ni aún en su propio periódico científico (*El Semanario del Nuevo Reyno de Granada*), por una serie de observaciones, registradas por él mismo [1804], que no concordaban con la fórmula (7) y también, quizá, porque había empezado a comprender todo lo que **Humboldt** le había comunicado sobre lo que acerca del asunto se conocía en Europa, después de conocer la tabla que éste incluye en el manuscrito que envió a **Mutis**, en 1802, y que **Caldas** logra conocer después de la muerte de éste (1807) y publica en el Semanario en 1809.

En la primera parte del trabajo hacemos una historia sucinta de las fórmulas de nivelación barométrica, indicando que buena parte de ella tuvo lugar en Ecuador y Colombia. Esta historia creemos facilita la comprensión del resto del trabajo, vale decir, el estudio y evaluación histórico científico de lo realizado por **Caldas** en la relación altura barométrica-temperatura.

Los autores quieren agradecer aquí la invaluable colaboración bibliográfica de la señora **Beatriz Farías de Craignoux**, sin la cual les hubiera sido imposible el acceso a gran parte de las fuentes citadas.

2. UN RESUMEN SUCINTO DE LA HISTORIA DE LA RELACION PRESION ATMOSFERICA-ALTURA DESDE PASCAL A LAPLACE. LA CONEXION HISPANOAMERICANA

El siguiente resumen se basa esencialmente en los estudios de **Cajori** [1929] y **Frisinger** [1974], insistiendo por nuestra parte en que un buen trozo de la historia de la relación presión atmosférica-altura tuvo lugar en tierras americanas, con más precisión, en los actuales territorios de las repúblicas de Ecuador y Colombia y con intervención de hispanoamericanos. El asunto comienza con la construcción del primer barómetro por **Torricelli**, en 1643, y su observación sobre la existencia de una tal relación. **Pascal** repite los experimentos de **Torricelli** y con ayuda de su cuñado realiza la famosa experiencia del Puy de Dôme (1648), publica sus resultados en 1648 [**Pascal** 1984, 105-132; **Boynton** 1948, 231-241], y sugiere entonces el empleo del barómetro para determinar la altura de las montañas. Este es el principio de la búsqueda de *formulas de nivelación barométrica*, es decir, de aquellas que establecen la diferencia de nivel h altura entre dos puntos mediante lecturas del barómetro, como ayuda o sustituto de lo que se sabía hacer geodésicamente. Este tipo de relaciones cuantitativas constituyen las primeras aplicaciones de las matemáticas a la meteorología y sólo aparecen después de que

Robert Boyle, en 1660, enunciase su famosa *ley de los gases*, que relaciona la presión P con el volumen V : $PV = const.$, a temperatura constante [**Boyle** 1774, 97-104; **Boynton** 1948, 242-247]¹. Con esta ley se asocia también a **Edme Mariotte** (1740) a quien se le atribuye además el haber propuesto esta otra: *la altitud crece según una progresión geométrica, mientras la presión decrece según una progresión aritmética*. Desde **John Napier** o **Neper** los matemáticos sabían que cada vez que pueden aparearse los términos de una progresión aritmética con los de una geométrica, se está en presencia de logaritmos [**Edwards** 1979, Chap. 6]. Este hecho fue capitalizado por **Edmund Halley** [1689, 104-116] para expresar la *ley de Mariotte* como la relación siguiente:

$$\frac{h_2 - h_1}{\log b_1 - \log b_2} = \frac{h_3 - h_1}{\log b_1 - \log b_3} \quad (1)$$

donde \log designa a los logaritmos vulgares y b_i a la lectura, barométrica, en líneas, en la altura h_i ($i = 1, 2$).

Una exposición de la manera como **Halley** obtiene la relación (1) se encuentra, por ejemplo, en [**Juan & Ulloa** 1748, 115-120] o en [**Frisinger** 1924, 266-267]. **Halley** sabía muy bien que su fórmula no era lo suficientemente precisa, pues para determinarla consideraba a "la atmósfera como un cuerpo inalterado, que tiene constantemente en la superficie de la tierra la 800-ava parte del peso del agua y es capaz de rarefacción y condensación *in infinitum*" [1686, 109], y, por otra parte, también era consciente de que la densidad del aire se altera con la temperatura. Aún así estimaba que la relación (1) era lo suficientemente exacta para las altitudes generalmente consideradas. Por su parte, **Mariotte** propone una progresión aritmética (1676), equivalente a:

$$H = 63d + \frac{63}{168} \cdot \frac{d(d-1)}{2} \quad (2)$$

donde H y d son, respectivamente, la diferencia de alturas, en toesas, y la diferencia de lecturas del barómetro en líneas. Claramente 63 y 168 deben interpretarse como *constantes experimentales* resultantes de las observaciones [**Mariotte** 1740, 174-175].

Las relaciones (1) y (2) fueron usadas mucho en los finales del siglo XVII y los principios del XVIII, además de servir de base a casi todas las fórmulas de nivelación barométrica que se establecieron en este último siglo. Particularmente, la Academia de Ciencias de París y sus miembros se interesaron en el problema; por ejemplo, **Jacques Cassini** [1705; 1733] propuso nuevas fórmulas que discrepaban, como él mismo lo reconoció, de sus resultados experimentales y geodésicos, concluyendo que parecería imposible conciliar las observaciones con una ley (modelo matemático) general y sencillo. En la

1. La segunda edición del *Spring of the Air* (1662) contiene como apéndice los experimentos y tablas resultantes que relacionan la presión y el volumen del aire (a temperatura constante), y que demuestran cuantitativamente la elasticidad o resorte del aire.

primera, mitad del siglo XVIII las fórmulas (1) y (2) fueron verificadas y controladas en condiciones muy especiales en la América Meridional. En efecto, una de las tres expediciones organizadas por la Acadèmia de París para verificar el *achatamiento polar del esferoide terrestre*, deducido por **Newton** en los *Principia Mathematica* [1982, Prop. XVIII, Teo. XVI, 687-688] y reforzado por el descubrimiento hecho anteriormente por **Jean Dominique Cassini** del achatamiento polar del planeta Júpiter, se dirigió a territorios de la actual república del Ecuador. Esta expedición estaba encabezada por los académicos **Pierre Bouguer** y **Charles Marie de La Condamine**, y a ella se le unieron en Cartagena de Indias los entonces jóvenes tenientes de navío **Jorge Juan y Santacilia** y **Antonio de Ulloa**. (Es conveniente anotar aquí que **Jacques Cassini** había puesto en duda la deducción de **Newton**). El objetivo principal de estos tres grupos de académicos era determinar la *figura de la tierra* midiendo los radios del esferoide, basándose en un método que proviene de **Eratóstenes** [Vera, 1970 II, 460-461] y que requiere la determinación, por triangulación, de la longitud de un arco de meridiano de pocos grados, y la de las latitudes de los extremos de ese arco, las que se hacen por observaciones astronómicas. En una región totalmente montañosa y alta, como la escogida en los Andes ecuatoriales, esta triangulación necesitaba de un conocimiento exacto de las alturas de los puntos de referencia. En principio, el cálculo de estas alturas se haría geodésicamente; pero la disposición del terreno no lo permitía, por lo que resolvieron deducir las alturas con el barómetro. Tomada esta resolución, procedieron a utilizar las observaciones barométricas tomadas durante el largo viaje de Europa a Quito y las tomadas *in situ*, para establecer las constantes experimentales que hicieran confiables las relaciones de Marione y Halley [Juan & Ulloa 1748, 105-110].

Juan & Ulloa [1748, 127-129] propusieron la siguiente versión de la progresión de Mariotte:

$$H = \frac{207}{2} d + (0,125) \frac{d(d-1)}{2} \quad (3)$$

que estimaron más conforme con las medidas geométricas. En (3) H se da en pies y la diferencia d de lecturas barométricas en líneas². Para la relación (1) propusieron, entre otras, la siguiente:

$$H = (10000)A \frac{\text{Log } d - \text{Log } a}{\text{Log } a - \text{Log } b} \quad (4)$$

donde A es la diferencia de alturas entre Caraburu (lugar cuya altura sobre el nivel del mar, 1226 toesas, suponían exactamente calculada) y un lugar B cuya altura sobre

Caraburu estaba determinada geodésicamente; a es la lectura en líneas del barómetro en Caraburu, b en el lugar B y d en el lugar D cuya altura se quiere calcular; las alturas se toman en toesas. **Bouguer**, por su parte, propone la fórmula:

$$H = (10000)A \frac{29}{30} (\text{Log } B - \text{Log } b) \quad (5)$$

[1749, 39; 1753, 119], donde h se da en toesas, B es la lectura barométrica en líneas en la altitud menor, b la lectura, en la mayor y \log indica logaritmos vulgares tanto en (4) como en (5). La constante 9666,6 que aparece en (5) difiere muy poco de la propuesta por **Halley** menos de sesenta años antes: 9719 [Frisinger 1974, 268, 271]. Para las partes bajas, cercanas al nivel del mar, **Bouguer** reconoce que su fórmula no funciona ni en Europa ni en América Meridional, y se propone en el resto de su memoria de 1753 establecer la razón de éste y otros fenómenos, usando observaciones hechas en su viaje de regreso por el territorio colombiano³.

Aunque desde el siglo XVII se sabía que las lecturas barométricas se afectaban con la temperatura ambiente, quizás la primera persona en tomar seriamente este factor en la elaboración de una fórmula de nivelación barométrica fue el suizo, **Jean André De Luc**, quien publicó sus resultados en los dos volúmenes de su tratado *Recherches sur les modifications de l'atmosphère* [1772]. En primer lugar introdujo sustanciales mejoras en la construcción de termómetros y barómetros, aumentando su confiabilidad; en segundo lugar, para las fórmulas de nivelación barométrica que elaboró tuvo en cuenta los cambios de densidad del aire exterior y del mercurio de los barómetros debidos a la temperatura ambiente. Una de sus fórmulas, transcrita por **Maskelyne** [1774, 158-163], es la siguiente:

$$H = (10000)(\text{Log } B - \text{Log } b) + \frac{C - 16 \frac{3}{4}}{215} \quad (6)$$

donde H es la diferencia de alturas, expresada en toesas; B y b son las respectivas lecturas barométricas en las dos alturas, corregidas por una regla dada en función de las temperaturas señaladas, en grados de De Luc (más pequeños que los de Réaumur)⁴. por sendos termómetros adosados a los barómetros; y C es la media aritmética de las lecturas de otros dos termómetros auxiliares graduados según De Luc, colocados al aire libre, uno en cada altura. Como observamos, nuevamente el punto de partida es la relación (1) de **Halley**.

3. La fórmula (5) fue usada sistemáticamente por los expedicionarios franceses: "...je me suis servi pource calcul, de la table dressée par M. Bouguer, sur une hypothèse qui répond jusqu'ici mieux que toute autre, á nos experiences du Baromètre, faites à diverses hauteurs déterminées géométriquement" [La Condamine 1745,22].

4. Los grados de De Luc y los de Fahrenheit están en la proporción 80:178.

2. Una progresión aritmética como la (1) ya había sido usada en América para el cálculo de alturas por el abate **Feuillée**; ver, por ejemplo, la página 456 de su *Journal des observations physiques &a.*, citada por **Juan & Ulloa** [1748], en donde se menciona que las constantes experimentales se determinaron en Lima, Perú.

En el último cuarto del siglo XVIII se continuaron haciendo esfuerzos; por mejorar la fórmula (6) o sus variantes por **George Schuckburgh** [1777], **Jean Trembley** y **Samuel Horsley** [1770]. **Gregorio Fontana** [1771] y **John Playfair** tuvieron en cuenta en sus fórmulas la *influencia de la gravedad*; en particular, éste último consideró el *decrecimiento de la gravedad con la altura*. **Johann F. Hennert**, en un trabajo premiado por la Sociedad de Ciencias de Gotinga, usó algunas ideas de **Euler** sobre el problema de la relación presión atmosférica-altura e introdujo además la *temperatura ambiente como una función de la altura* [**Frisinger** 1974]; con esta idea algunos pretendieron establecer una proporción numérica entre la altura de las montañas y la temperatura ambiente con el fin de calcular aquellas con el sólo uso del termómetro. **Caldas** cita entre otros a **Heberden** (?), **Saussure** y **Paulian** [**Caldas** 1802 (1819) = 1966, 157, 166-167; **Sigaud De La Fond** 1787 III, 203].

La influencia de la latitud en la altura del barómetro era sospechada por muchas personas. Durante la expedición para medir el meridiano, **Bouguer**, **Juan** y **Ulloa** realizaron observaciones para verificar esta sospecha, concluyendo los últimos que "la atmosfera pesa igualmente en Europa, y América" [**Juan & Ulloa** 1748, 111]; hoy sabemos que esto no es así, aunque la diferencia sea pequeña [**Laplace** 1805 IV, 571]. Por otro lado, estos mismos expedicionarios comprobaron que las *variaciones del barómetro* eran menores en el Ecuador que en otras latitudes y que también allí las variaciones eran menores en cuanto más altos estuviesen los lugares [**Juan & Ulloa** 1748, 109].

El siglo XVIII culmina brillantemente con la fórmula de **Pierre Simon de Laplace** [1805 IV, 469-522; **Frissinger** 1974, 281-284], que contiene correcciones para la temperatura, la latitud, la diferencia de la gravedad a diversas alturas y variaciones de la humedad. Su obtención parte de la siguiente ecuación de Laplace $dp = \rho g dr$, donde p designa a la presión, g a la aceleración de la gravedad y ρ a la densidad del aire a la altura r . Esa fórmula aún se usa hoy⁵.

Algunas de estas fórmulas de nivelación barométrica tuvieron en la Nueva Granada una interesante aplicación. Los finales del siglo XVIII y los principios del XIX presentaron allí un interés pronunciado por conocer los recursos naturales del país, con su distribución geográfica exacta, sus posibilidades de explotación y comercio, la clasificación de sus especies animales y vegetales, la cría y cultivo de aquellas consideradas útiles y la adaptación de otras del mismo carácter a sus climas, determinados, bien se sabe, por la altura de los suelos. Sin este conocimiento, pensaban muchos criollos, era

5. Esta ecuación puede expresarse como :
 $r = 18336 (1 + 0.002845 \cos 2\psi) [1 + 2(t+T)/100] \{[(1+r)/a] (\log h' - \log h) + 0.868589/a\}$,
 donde r = diferencia de alturas de los dos lugares; ψ latitud del lugar inferior; t = temperatura, por encima del punto de congelación, del lugar inferior; T = temperatura, por encima del punto de congelación, del lugar superior; a = distancia del centro de la tierra al punto más bajo; h' = altura del barómetro en el punto inferior; y h = altura del barómetro en el punto superior.

imposible iniciar un verdadero despegue económico, en lo posible independientemente de la metrópoli, cuya decadencia económica era entonces un lugar común [**Pacheco** 1975, 8]. La creación de la *Expedición Botánica* de la Nueva Granada (1783) y sus actividades, organizadas y orientadas por **José Celestino Mutis**, catalizaron este interés por las ciencias naturales y la geografía económica, impulsando a varios jóvenes neogranadinos al estudio de estos temas. Entre ellos se encontraba **Francisco José de Caldas** (1786 -1816). Utilizando la colección de cartas que de él se conservan [**Caldas**, 1978] y sus *Obras Completas* [1966], es posible no sólo conocer cuánto aprendió de su iniciador en las ciencias naturales **José Félix de Restrepo**, y, en considerable proporción, de sus lecturas de autodidacta, sino también en gran parte el itinerario de sus observaciones y descubrimientos. Sus observaciones astronómicas, barométricas y termométricas, conjugadas, con sus conversaciones personales o epistolares con **Mutis** y **Alexander von Humboldt**, le condujeron a trabajar en lo que éste último llamó *geografía de las plantas* o su distribución según alturas sobre el nivel del mar y latitudes geográficas [**Humboldt** 1802 (1809) > 1806/07], cuyos resultados consignó **Caldas** en [1803 = 1966, 335-344] y [1805 = 1966, 241-260], por ejemplo. **Pérez Arbeláez** estima que la obra de **Humboldt** debe mucho al intercambio de ideas con **Mutis** y **Caldas**, aunque ésta viniese madurándose en la mente de aquél después de escuchar los principios expuestos por su profesor **Karl L. Willdenow** en 1792 [**Pérez** 1981, 189-190].

Caldas adquiere buena parte de sus conocimientos astronómicos, y meteorológicos en [**Juan & Ulloa** 1748], [**Bouguer**, 1749] y [**Sigaud De La Fond** 1787]. De los primeros y de **Bouguer** toma las fórmulas de nivelación (3), (4) y (5) que usa para el cálculo de alturas [**Caldas** 1801 = 1966, 365-374; 1803 = 1966, 337, 343-344]. En 1802 aprende de **Humboldt**, además de confusas noticias de los trabajos de **De Luc**, **Maskelyne**, **Schuckburgh** y **Saussure**, una versión de la fórmula (6), debida a **Trembley** y **Tralles** [**Caldas** 1803 = 1966, 336; **Humboldt** 1982, 51, a], que se propone verificar "en la zona tórrida y grandes elevaciones", pues, con razón, cree que "aún no se ha pensado en sujetarlas a este examen bajo la línea ecuatorial" [**Caldas** 1978, carta 71, del 8 de agosto de 1802], contrariamente a las de **Juan**, **Ulloa** y **Bouguer** que fueron obtenidas en ese lugar y condiciones; aunque desconocemos los resultados de esta verificación, sí sabemos que esta versión de la fórmula (6) fue usada en la Nueva Granada por **Caldas** [1804 = 1966, 486-487; 1966, 139] y otras personas interesadas en la nivelación barométrica y la geografía de regiones particulares, como la de Antioquia [**Restrepo** 1809, 49]. En 1809 conoce la fórmula de **Laplace** en la versión que da, casi inmediatamente después de su publicación, **René J. Haüy** en la segunda edición de su *Traité Élémentaire de Physique* [1806], y con ella calcula la altura del piso del Observatorio de Santafé de Bogotá [1809 b = 1966, 239-241], del que ya era director. En 1804 **Caldas** empieza a observar que las variaciones del barómetro "aumentan en razón de la latitud" y añade inexplicablemente que este "pequeño descubrimiento" le pertenece [**Caldas**, 1809a = 1966, 395; 1978, Cartas 96,

100 y 102], olvidando sus lecturas previas de **Juan & Ulloa** [1748,109].

No queremos terminar esta primera parte sin mencionar que las múltiples observaciones barométricas llevadas, a cabo por **Mutis** y posiblemente otros miembros de la Expedición Botánica, le condujeron a proponer la hipótesis de la *existencia de mareas atmosféricas diarias en el trópico*; esta hipótesis fue difundida por **Humboldt** (con el debido crédito) en Europa y aceptada por muchos [**Boussingault** 1985 III, 40, 62]. El propio **Caldas** realizó en Quito experiencias que confirmaban esta teoría, anotando que en un periodo de 24 horas se presentaron dos flujos y dos reflujos [**Caldas** 1978, Cartas 68 y 69; 1966, 395].

3. CALDAS Y EL METODO TERMOMETRICO PARA EL CALCULO DE ALTURAS

Paralelas con las observaciones barométricas de **Caldas** corrían las termométricas, también al parecer numerosas. En efecto, además de las registradas en los documentos publicados hasta la fecha, **Boussingault**, en el entonces abandonado edificio del Observatorio de Santafé de Bogotá, tuvo, en 1823, "la fortuna de descubrir y de salvar manuscritos preciosos: en primer lugar las observaciones termométricas llevadas a cabo durante muchos años en la casa de la Expedición Botánica..." [1985 III, 64]; creemos que ellas se deben en buena parte a **Caldas**, aunque no podamos afirmarlo con certeza, pues desconocemos el paradero actual de estos manuscritos, posiblemente llevados a Europa por **Boussingault**.

La rotura accidental de uno de sus termómetros por el extremo superior y, por consiguiente, aún reparable después del accidente, y su intento de reconstruirlo, le conducen a *reencontrarse con el hecho de que la temperatura de ebullición del agua depende de la presión atmosférica*: después de "revolver mamotretos" [1978, Carta 34, del 5 de Mayo de 1801] encuentra la razón por la cual no le es posible determinar, a la altura de Popayán, el extremo superior de su reconstruido termómetro:

Sabernos que el agua no puede hervir sin levantar la columna de aire que grava sobre su superficie, y es tan cierto esto, que en Europa no cierran los termómetros mientras el mercurio en el barómetro no esté en las 28 pulgadas, pues una pulgada de este instrumento hace variar el calor del agua cerca de dos grados Fahrenheit en el termómetro [el subrayado es de los autores de este trabajo]; luego (atienda usted a estas consecuencias) [nuevamente el subrayado es de las mismas personas], el calor del agua hirviendo sigue las leyes de la gravedad del aire; luego es siempre proporcional. a su peso; luego a proporción que se eleve sobre el mar debe disminuir el calor del agua, y esto en razón del peso del aire. En suma, el calor del agua destilada cuando hierve, sigue las leyes de la gravedad del aire, lo mismo que la columna de mercurio en el barómetro. Si a esto añade usted que el agua, en cualquier elevación que sea, esté con las mezclas que estuviere, una vez hirviendo no se calienta más; que el agua llovediza da el mismo grado

de calor que la destilada y en fin, que una atmósfera no varía en su peso más que 11/2 línea del barómetro, hallará usted que no se puede desear cosa más exacta y cómoda en este género. *Esta es mi teoría* [el subrayado sigue siendo de las mismas personas], y ésta es la que me he resuelto a trabajar hasta confirmarla con un número grande de experiencias [**Caldas** 1978, Carta 36, del 5 de junio de 1801, 74].

Una confrontación nos indica que el mamotreto consultado no es otro que el tratado de **Sigaud De La Fond** [1787 III, 188-189], del que torna la anterior argumentación y continuará citando en cartas y escritos posteriores. En particular, encontramos en este autor que "la elevación o descenso del mercurio siendo de una pulgada en el barómetro, el calor del agua cociendo varía algo menos de dos grados, según la escala de Fahrenheit", hecho que dice tornar de la obra de un doctor **Martine**: *Observations sur les thermomètres*. Esto le dice a **Caldas** que la relación entre temperatura de ebullición del agua y presión atmosférica debe ser lineal, y como **Sigaud De La Fond** no *explicita* la correspondiente constante de proporcionalidad, se propone calcularla experimentalmente. Para empezar asume que el barómetro sube 28 pulgadas al nivel del mar y que la correspondiente temperatura de ebullición es de 80°R; conociendo que en Popayán la temperatura de ebullición es de 75,7°R a la presión de 22 pulgadas 10,9 líneas, encuentra que esta constante de proporcionalidad sería 0,8, evidentemente algo menor que 0,888°R que corresponden a 2°F⁶. Esto no le satisface pues los datos al nivel del mar no le parecen confiables: "...ni he querido calcular sobre el nivel del mar, porque es indispensable hacer observaciones en la costa misma, y sin este requisito no pienso publicar nada" [**Caldas** 1978, Carta 40, del 5 de agosto de 1801, 93], pues "nada se oponía al buen éxito de mi teoría que la perplejidad en que estamos de la altura media del mercurio al nivel del mar, en la vecindad de la línea ecuatorial, a pesar de las observaciones de **Bouguer, La Condamine, Juan, Ulloa**" [**Caldas** 1802 = 1966, 296]. Decide, pues, encontrar la constante de proporcionalidad tomando como punto de partida la altura de Popayán, realizando primero observaciones en las cercanías de esta ciudad, que le indican que la constante debe ser mayor que 0,8 y luego en diversos puntos de una ascensión por las faldas del volcán Puracé [**Caldas** 1978, Carta citada]; para estas observaciones se prepara escrupulosamente utilizando siempre los mismos instrumentos, barómetro y termómetro, y la misma agua destilada. Su conclusión es que a 12 líneas (una pulgada) del barómetro corresponden 0,974°R como valor promedio de la constante y propone la siguiente *fórmula para calcular la altura barométrica Z*, en líneas, *conociendo la temperatura de ebullición del agua en grados Réaumur*:

$$Z = a \pm \frac{12(b-d)}{0,974} \quad (7)$$

donde *a* es la altura en líneas del barómetro al nivel de Popayán, *b* y *d* son respectivamente las temperaturas de ebullición del agua en Popayán y en el lugar cuya altura

6. Aquí **Caldas** comete un error que explicaremos más adelante.

barométrica se quiere determinar, siendo claro cuándo se debe sumar y cuándo restar. Usando esta fórmula encuentra que los valores de Z calculados con ella difieren muy poco de las lecturas barométricas correspondientes (en menos de 1/2 o 1 1/2 líneas) en ocho lugares distintos, que incluyen cinco de los usados para determinar experimentalmente la constante 0,974 [Caldas 1978, Carta citada, 93; 1802 (1819) = 1966, 165]. Un mes más tarde realiza el mismo tipo de experiencias en niveles más bajos, en el valle del río Patía, y sus resultados parecen confirmar la fórmula (7) [Caldas 1978, Carta 43, del 21 de septiembre 1801]. Sin embargo, observaciones posteriores hechas en la provincia de Quito le muestran grandes discrepancias:

Tagualó:	agua hirviendo	76,9°R
	<i>altura calculada con (7)</i>	290,6 líneas
	lectura del barómetro	282,0 líneas
	temperatura ambiente	18°R
	<i>diferencia</i>	<i>8,6 líneas = 0,715</i> <i>pulgadas</i>
Quimsacruz:	agua hirviendo	69,3°R
	<i>altura calculada con (7)</i>	<i>169,968 líneas</i>
	lectura del barómetro:	202 líneas
	<i>diferencia</i>	<i>5,032 líneas =</i> <i>0,419 pulgadas</i>

(Los datos en cursiva han sido calculados por los autores de este trabajo). [Caldas 1804 = 1966, 449, 472]. Ni aún haciendo las correcciones por temperatura de las lecturas del barómetro indicadas por **De Luc, Trembley y Tralles**, conocidas ya por **Caldas**, pueden reconciliarse los resultados obtenidos por la fórmula (7) y las lecturas del barómetro; por otra parte, ellos se obtuvieron después de elaborada la memoria que sobre el tema [Caldas 1802 (1819)] envió a **Mutis** en 1802, con la intención de que hiciese publicar en el periódico científico que **Cavanilles** editaba en Madrid, y que poco tiempo después ruega a **Mutis** no remitirla, pues estimaba que todavía era necesario perfeccionarla [Caldas 1978, Carta 70, del 21 de julio de 1802, 191]. En 1804 creemos que empieza, **Caldas** a tener dudas sobre la *validez global y general* de su fórmula, obtenida en *condiciones locales* y sobre la base de muy pocas experiencias: "... muchas son las observaciones que hay que añadir a la memoria sobre el método de medir las montañas con el termómetro" [Carta citada, 191]. Es posible también que para esa época empezase a entender algo de lo que **Humboldt** le pudo explicar de lo que sobre el tema se conocía en Europa.

En las observaciones de 1804 descubre además que *la temperatura de ebullición del agua "aumenta en por lo menos un grado" si elimina, soplándolo, vapor de agua que está sobre la superficie en ebullición*; este otro factor (que miraremos después), tiene, si no es eliminado protegiendo las experiencias de los vientos, una gran influencia en la determinación experimental de una fórmula como la suya.

En 1805 vuelve a quedarse sin termómetro [Caldas 1978, Cartas 100 y 102, 249-251] y suspende sus experiencias, sin que posiblemente las haya vuelto a reanudar (Cfr. [Caldas 1978, 288, 289]). Antes de 1809 y después de la muerte de **Mutis** (1807), conoce el manuscrito (en francés) que a éste le envió **Humboldt** sobre la geografía de las plantas y en el que señala que el modelo parece no ser lineal [Humboldt 1802 (1809)]⁷.

Todo lo anterior explicaría por qué nunca publicó la memoria que había enviado a **Mutis**, ni siquiera en su propio periódico científico, *El Semanario del Nuevo Reyno de Granada* (1808-1810), y que en 1809 todavía se expresase así:

Ahora trabajo para darle a mi descubrimiento la última mano o el grado de perfección de que son capaces mis luces y mis fuerzas. Con este objeto he realizado medidas geométricas en los alrededores de esta capital (Santafé de Bogotá), y espero concluirlo dentro de pocos meses. Entonces tendré el honor de consagrarlo a la memoria del ilustre nombre de Vuestra Excelencia Amar y Borbón [Caldas 1966, 124].

Ahora sí estamos en posición de decidir en qué consiste el "pequeño descubrimiento" (como llamaba a todos los suyos) de Caldas. No es, como pretenden algunos, el descubrimiento de que la temperatura de ebullición del agua disminuye con la altura del lugar, pues este hecho no le era desconocido; en efecto, esto se ve claramente leyendo atentamente sus cartas y observando la facilidad con que encuentra en **Sigaud De La Fond** todo el material que transcribe de esta fuente para explicar sus ideas a su amigo **Arroyo** [1978, Carta 36 del 5 de junio de 1801]. Evidentemente, es muy posible que todo este material no lo tuviese muy presente cuando intentaba reparar el termómetro roto, pero si lo recordaba aunque fuese vagamente (éste sería un ejemplo bastante claro del papel que desempeña el subconsciente en el trabajo de investigación (Taton 1967, 78); anotemos así mismo que en esta situación parece también aplicable lo que dice **Taton** sobre el pretendido "azar" en los descubrimientos científicos: éste "sólo es fecundo si el experimentador está suficientemente preparado para explotarlo" [obra cit., 381]).

Su verdadero "pequeño descubrimiento" es la "idea tan clara, tan sencilla, tan segura" de *usar el solo termómetro para determinar las alturas*, calculando primero con él la

7. En [Humboldt 1902 (1809)], se da una tabla de la relación entre la elevación (en metros), la altura barométrica (en metros) y la temperatura en grados centígrados y Réaumur no se sabe si como resultado de sus experiencias "sobre el hervir el agua en las cimas de los Andes", pues añade que "se propone publicarlas, y con ellas otras ejecutadas por el señor Caldas". Un escudriñamiento de sus *Tagebüch* en [Humboldt 1982] nos muestra que estas experiencias sí fueron efectivamente realizadas. Añade, además, que todo parece indicar que entre el nivel del mar y los 7.000 metros de elevación, cada disminución de 1 grado centígrado puede representar una altura de 304 metros, pero que entre el nivel del mar y 1000, "el grado equivale a 357 metros". Es decir, no se adhiere a un modelo lineal del fenómeno; Cfr. [Humboldt 1806/07]. Estima finalmente que aún se requieren "instrumentos [hipsómetros] que pudieran indicar con exactitud pequeñas fracciones de grado".

altura barométrica y a partir de ésta la altura, mediante una cualquiera de las fórmulas de nivelación barométrica conocidas. Para convencerse de esto, basta su carta citada del 5 de junio de 1801 (véase también [Caldas 1978,75]).

Su preocupación porque este descubrimiento ya fuese conocido en Europa, le atormentó desde un principio: "¡Qué dudas! ¡Qué suerte tan triste la de un americano!. Después de muchos trabajos, si llega a encontrar alguna cosa nueva, lo más que puede decir es: no está en mis libros" [Caldas 1802 (1819) = 1966, 158]. El mismo **Humboldt**, quien comprobaba casi siempre el punto de ebullición del agua cada vez que determinaba la altura barométrica de un lugar, indicio de que sabía de las experiencias de **De Luc**, **Masquelyne** y **Schuckburgh** sobre la relación entre presión atmosférica y temperatura de ebullición del agua, pero no las recordaba con precisión al encontrarse con **Caldas**, no pudo o no quiso (porque consultó también sus mamotretos) disipar estas dudas, sobre todo ante la manera sigilosa y sibilina como **Caldas** le abordó sobre el problema, pensando que el alemán pudiera "arrebatarle" su "pequeño descubrimiento". En 1802 Caldas abrigaba esperanzas de que lo que hacía era algo verdaderamente original en el concierto de la ciencia europea, aunque no descartase lo contrario [Caldas 1802 (1819) = 1966,158-159].

Sus dudas empero estaban bien fundadas aunque quizá esto nunca lo supo a ciencia cierta. Nos vemos pues obligados a realizar una corta crónica del *método termométrico para medir las alturas de las montañas*, un poco más extensa y detallada que la que aparece en [Cajori 1929, 512-514], intercalando comparaciones entre los trabajos anteriores de los europeos y los del payanés.

4. EL METODO TERMOMETRICO EN EUROPA

En 1724 **Fahrenheit** [1724, 179-180] ya había observado que el punto de ebullición del agua aumenta al incrementar la presión y había sugerido un aparato para determinar la presión atmosférica con el solo uso del termómetro; este aparato sería el primer diseño prototípico de un *hipsómetro* (nombre acuñado más tarde por **Regnault**) del que se tenga noticia⁸. Años más tarde,

8. "Inrecensione experimentor nonnullorum circa ebullitionem quorundam liquorum a me factorum mentionem feci, gradum caloris aquae ebullientis termino tunc memorato, 212 nempe graduum coerci; postea variis observationibus atque experimentis edoctus sum terminum hunc, manente eadem atmosphaerae gravitate, fatis fixum esse, sed variante gravitata atmosphaerae hunc terminum quoque diversimode variari posse. Experimentis in hunc scopum jam facta nunc quidem traderem, sed quonian adhuc de certis circumstantis edoctus esse velim, hirc reccensionem illorum usque inaliud tempus reponam, & interea solummodo thermometri alicujus mentionem faciam, quos forsitan si non magis, tamen acque idoneum erit ad explorandam atmosphaere gravitatem, quam barometrum. Hujus delineatio in Figura VIII. est apposita.

Cylindro AB annectitur tubus BC, cui additur globulus oblongus CD & huic tubulus gracillimo foramine praeditus DE. Cylindrus liquore quodam, qui calorem aquae ebullientis perferre potest,

De Luc repite las experiencias de **Fahrenheit**, y encuentra que un aumento de una línea en la altura del barómetro, aumenta la altura, del mercurio en el termómetro sumergido en agua hirviendo, en la 1134-ava parte del intervalo entre la lectura en el punto de congelación y la lectura en el de ebullición del agua a 30 pulgadas inglesas, según **Maskelyne**. Sin embargo, estima que esta regla no es adecuada para las grandes variaciones del barómetro causadas al ascender a grandes alturas sobre la superficie de la tierra, pues los cambios termométricos no son proporcionales a los cambios barométricos: pero añade que es adecuada para pequeñas variaciones del barómetro [De Luc 1762; **Maskelyne** 1774, 162-163].

Usando la regla de **De Luc** vemos que un aumento de 1 línea en el barómetro corresponde a $180/1134 = 0,1587... = 0,16$ °F de aumento en el punto de ebullición del agua, en un termómetro cuyo término superior se ha cerrado a la presión de 30 pulgadas inglesas. Luego a un aumento de una pulgada inglesa corresponde un aumento de aproximadamente 1,91°F, lo que concuerda con el "algo menos de dos grados según la escala de Fahrenheit" que encuentra **Caldas** en **Sigaud De La Fond**. Si tenemos un termómetro en la escala de Réaumur, sellado a 28 pulgadas francesas, tal como lo supone **Caldas** [1978, 74], de modo que el punto de ebullición del agua, 80°R, sería sensiblemente igual a 212°F, es claro que a un aumento de una pulgada inglesa. en el barómetro corresponderá un aumento de 0,848°R en el punto de ebullición del agua; como hemos visto, éste es el valor que encuentra **Caldas**. Las experiencias preliminares le muestran además que este aumento debe ser sensiblemente mayor, y con razón, como veremos en seguida. Si por otra parte, usamos un termómetro graduado según la escala de **De Luc**, es decir, dividido el intervalo entre el punto de congelación y el de ebullición del agua en 80 partes iguales, y sellado a 27 pulgadas francesas, tal como, lo hace **De Luc**, encontramos que a un aumento de una pulgada inglesa corresponde un aumento de 0,858 grados según De Luc, pues, según **Maskelyne** [1774, 163] los grados Fahrenheit y los De Luc están en la proporción 178:80. Por tanto, dado que 30 pulgadas inglesas equivalen a 28,15 pulgadas francesas [ib. 163], a una pulgada francesa de aumento en el barómetro corresponde un aumento de 0,9150 De Luc ó 0,904°R. Estos valores están muy cercanos a la constante de proporcionalidad que obtiene **Caldas** en sus experiencias: 0,974. Pero esto debiera ser así, pues si en

repletibus. In tubulo BC, gradus caloris in aere obvii mensurabuntur open scalae affixae bc. Si autem thermometrum hocce aquae bullienti imponatur, liquor thermometri non solum globulum CD implebit, sed etiam usque ad terminos varios tubuli DE affurget. secundum gradum caloris, quem aqua tempore experimenti a gravitate atmosphaere aquisitura est. Ita, si, exempli gratia, tempore experimenti altitude mercurii e invarometro sit 28 pollicum Londinensium, liquor in hocce thermometro attinget infimum locum in tubulo De; si vero gravitas atmosphaerae aequipolleat altitudine mercurii triginta & unius pollicum, liquor a calore aquae ebullientis usque ad locum supremum tubuli DF attolletur, termini barii autem caloris aquae ebullientis no gradibus, sed illorum loco numeris digitorum, quibus altitudo mercurii in barometris vulgo mensuratum, ope nempe scalae additae DE denotabuntur".

sus raciocinios **Caldas** no hubiese dado por sentado que las pulgadas de que habla **Sigaud De La Fond** eran pulgadas francesas, su "adivinación" habría sido más certera; en realidad hay que suponer que este autor, aunque no lo diga, estaba refiriéndose a pulgadas inglesas, pues ya en esa época se tenía mucho cuidado de no mezclar los sistemas de unidades. Lo interesante de todo este asunto es que la constante de proporcionalidad que **Caldas** obtuvo en Popayán sólo difiere en menos de 6/100 de la propuesta por **De Luc** cuarenta años antes.

En 1775, **George Schuckburgh** [1779, 537-540] repite los experimentos de **De Luc** y concluye que la temperatura de ebullición de agua no decrece, con el aumento de la altitud, tan rápidamente como lo, indicaba aquél. Como la relación entre altura del barómetro y temperatura de ebullición del agua tampoco le resultaba lineal, proponía estudiarla con más cuidado y describía en este trabajo la manera de construir el aparato (jotro hipsómetro!) que le sirvió para sus experiencias. En la tabla I presentamos sus resultados comparados con los de **De Luc** y los que se obtienen de la fórmula de **Caldas**, expresados en grados Fahrenheit y pulgadas inglesas. Recordemos aquí que las experiencias de **Caldas** que aparecen en la memoria de 1802 se hicieron entre 20, 21 y 24, 44 pulgadas inglesas de altura en el barómetro. La tabla nos muestra que las diferencias entre los valores que produce la fórmula de **Caldas** y los obtenidos experimentalmente por **De Luc** y **Schuckburgh**, en altitudes más bajas que las empleadas por aquél, difieren en menos de $0,19^{\circ}\text{F} = 0,08^{\circ}\text{R}$, lo cual no está mal dentro de la precisión de los instrumentos de la época, que dicho sea de paso eran construidos por los mismos artesanos o artistas europeos, siguiendo técnicas más o menos estandarizadas. Por otra parte, por lo que hemos visto antes, el error de lectura en el barómetro en estas circunstancias sería aproximadamente de 1,19 líneas. Todo lo anterior nos muestra que el *modelo lineal de Caldas*, dentro de las limitaciones instrumentales de época, era tan bueno como el que podría obtenerse de las tablas o reglas de **De Luc** o **Schuckburgh**.

El tema continúa en Europa a principios del siglo XIX: **Wollaston** [1817] describe un *barómetro termométrico*, es decir, un termómetro graduado para leer alturas barométricas, y observa que a una pulgada inglesa en el barómetro le corresponden 1,697... $^{\circ}\text{F}$; más tarde, usando un tipo de barómetro de montaña construido por **Troughton**, encuentra que a una pulgada inglesa corresponden 1,658... $^{\circ}\text{F}$, lo cual le parecía concordaba con las observaciones publicadas por **Ure** en 1818, que darían 1,6528... $^{\circ}\text{F}$ para una pulgada inglesa, si se toma el dato entre 211° y 212°F . Las observaciones de **Ure** [1818], resultante de un extenso estudio que hizo sobre la ley de Dalton sobre la tensión de los vapores, le condujeron a establecer que la tensión de vapor F del agua hirviendo está dado por la fórmula⁹

$$\text{Log } F(n) = \text{Log } (28,9) \pm \text{Log } r \quad (8)$$

donde r es el valor medio entre 210°F y la temperatura dada, n es el número de intervalos de 10°F entre ambas temperaturas y se usa el signo + (resp. el signo -) según que la temperatura dada esté encima (rep. debajo) de 210°F . Como el agua empieza a hervir cuando F iguala a la presión en la capa de aire inmediatamente superior, entonces la tensión de vapor a una temperatura dada indica también la presión atmosférica a la cual hierve el agua a esa temperatura [**Ure** 1818, 350-352]. Partiendo, pues del trabajo de **Ure** e introduciendo por interpolación intervalos más pequeños que los considerados por éste, **Wollaston** produce una tabla que le da la altura en pies ingleses a partir de la lectura del termómetro, colocado en un aparato que describe detalladamente [**Wollaston** 1820, 295-305]. Como ejemplos presenta los cálculos hechos de la altura de Snowdon Hill usando su termómetro (3.546,25 pies), el barómetro (3.548,9 pies) y el valor geométrico (3.555,4 pies) calculado por **Roy** [Phil. Trans. Royal Soc. of London (1777), 771], y los de **Moel Elio**: termómetro, 2.350,55 pies; barómetro, 2.391,8 pies; geométrico: (**Roy**), 2.370 pies. La coincidencia de los resultados en el primer sitio es clara, mas no lo es en el segundo, y parece no encontrar una explicación satisfactoria. Sin embargo, anota que en este último lugar sopló un fuerte viento el día de las observaciones; es, pues, posible que a pesar de las precauciones tomadas, el viento incidiera en los resultados, pues como ya lo había hecho notar **Caldas**, sin explicárselo [1804, 449, 472], el viento modifica la tensión de vapor del agua y, por tanto, su temperatura de ebullición. Con **Wollaston** empieza el uso de las tablas de tensión de vapor para elaborar tablas y aparatos hipsométricos.

Mucho más tarde, **Henri Víctor Regnault** (1810-1878) produjo tablas de tensión más exactas sobre 85 y 101°C y construyó un pequeño y cómodo instrumento para la determinación termométrica de alturas, al que llamó hipsómetro. La fórmula de **Biot**

$$\log F(n) = \log 30 + an + bn^2 + cn^3 \quad (9)$$

(aparecida en su *Traité de Physique* (tome I) [1816]) o sus variantes, como la (8), han sido la base de la construcción de hipsómetros usando la tensión de vapor, a partir del siglo XIX. Sin dejar de tener en cuenta que sólo se trata de fórmulas aproximadas, se propusieron en el mismo siglo las siguientes fórmulas: $h = 295 (100 - t)$, donde la altura h se da en metros y la temperatura en grados centígrados (**Soret**) y $h = 300 (t' - T)$ (**John David Forbes**), en las mismas unidades y donde $t' - T$ es la diferencia de temperaturas entre los dos lugares cuya diferencia de alturas se desea medir [**Cajori** 1929]. Esta última se deducía de la fórmula de **Laplace**.

9. En el mismo trabajo, **Ure** compara los resultados de su fórmula con las que se obtienen de la fórmula:

$$\text{Log } F_n = \text{Log } 30 + an + bn^2 + cn^3$$

propuesta por **Biot** [1816, I] y los contenidos en las tablas publicadas por el español **Betancourt** en el volumen dos del *Journal Polytechnique*. (Ver [**Ure** 1818] para los detalles).

TABLA I. TEMPERATURA DE EBULLICION °F

Altura del Barómetro en pulgadas Inglesas						
	SCHUCKBURG	DIF	DE LUC	DIF	FORMULA DE CALDAS	DIF
26,0	204,91		205,17		205,5859	
26,5	205,82	0,91	206,07	0,90	206,6155	1,0296
27,0	206,73	0,91	206,96	0,89	207,6435	1,0280
27,5	207,63	0,90	207,84	0,88	208,6718	1,0283
28,0	208,52	0,89	208,69	0,85	209,7000	1,0282
28,5	209,41	0,89	209,55	0,86	210,7272	1,0272
29,0	210,28	0,87	210,38	0,83	211,7546	1,0274
29,5	211,15	0,87	211,20	0,82	212,7845	1,0299
30,0	212,00	0,85	212,00	0,80	213,8128	1,0283
30,5	212,85	0,85	212,79	0,79	214,8408	1,0280
31,0	213,69	0,84	213,57	0,78	215,8691	1,0283
		$\bar{x} = 0,87$		$\bar{x} = 0,84$		$\bar{x} = 1,028$ 32

Si la descripción o construcción de un aparato para medir la altura de un lugar termométricamente se acepta como la invención de un "hipsómetro", Caldas también es inventor de uno, pues basándose en la fórmula (7) propone la graduación simultánea de un termómetro en grados y líneas barométricas [Caldas 1802 (1819) = 1966, 169-173].

BIBLIOGRAFIA

BIOT, Jean B. 1816 *Traité de physique expérimentale et mathématique* (4 vols.). Paris.

BOUGUER, Pierre 1744 *Rélation abrégé du voyage fait au Pérou*. Paris.

_____ 1749 *Théorie de la figure de la terre*. Paris.

_____ 1753 "Sur les dilatations de l'air dans l'atmosphère". *Mémoires de l'Académie Royale de Sciences* (1753), 515-538.

BOUSSINGAULT, Jean B. 1985 *Memorias de Boussingault* (5 vols.) Bogotá (Banco de la República).

BOYLE, Robert 1744 *The Works of the Honourable Robert Boyle*. Vol.1 London.

BOYNTON, Holmes 1948 *The Beginnings of Modern Science*. Roslyn (Walter J. Black Inc.).

CAJORI, Florian 1929 "History of the determinations of the heights of mountains". *Isis* 12,482-514.

CALDAS y Tenorio, Francisco José de 1801 "Observaciones sobre la verdadera altura del Cerro de Guadalupe". *El Correo Curioso* (Bogotá), Nos. 23-25 (julio-agosto)=1966, 365-374.

_____ 1802 (1819). *Ensayo de una Memoria sobre un nuevo método para medir la altura de las montañas por medio del termómetro y el agua hirviendo, seguida de un apéndice*. Burdeos (Lawalle Joven y Sobrino) = 1966, 153-173.

_____ 1802 "Memoria sobre el origen del sistema de medir la altura de las montañas y sobre el proyecto de una expedición científica" = 1966, 293-302.

_____ 1803 "Memoria sobre la nivelación de las plantas que se cultivan en la vecindad del ecuador". MS. Biblioteca Nacional (Bogotá) = 1966, 335-344.

_____ 1804 "Viajes al corazón de Barnuevo, sur de Quito, Paute y Cuenca" = 1966, 437-499.

_____ 1805 = 1966, 241-260.

_____ 1809a "Prefación y notas a la Geografía de las plantas o cuadro físico de los Andes equinociales... de F.A. von Humboldt". *El Semanario del Nuevo Reyno de Granada, No. 16 (abril, 1809)*.

_____ 1809b = 1966, 239-241.

_____ 1966 *Obras completas*. Bogotá (Universidad Nacional de Colombia).

_____ 1978 *Cartas de Caldas*. Bogotá (Academia Colombiana Ci. Fis. Ex. Nat.).

CASSINI, Jacques 1705 "Reflexions sur les rigles de la condensation de l'air". *Mémoires de l'Académie Royale des Sciences* (1733), 61-74.

_____ 1733 "Réflexions sur la hauteur du baromètre..." *Mémoires de l'Académie Royale des Sciences* (1733) 40-49.

DE LUC, André 1762 *Recherches sur la variation de la chaleur de l'eau bouillante*. Genève.

_____ 1772 *Recherches sur les modifications de l'atmosphère*. Genève.

EDWARDS Jr., C.H. 1979 *The Historical Development of the Calculus*. Heidelberg-New York-Berlin (Springer-Verlag).

FAHRENHEIT, Daniel Gabriel 1724 "Barometri novi descriptio". *Phil. Trans. Royal Soc. of London* 33, 179-180.

- FONTANA, Gregorio** 1771 *Delle altezze barometriche, e più alcuni insigni paradossi relative alle medesime saggio analitico...* Pavia (G. Bolzani). 22.
- FRISINGER, H. Howard** 1974 "Mathematicians in the History of Meteorology: the pressure-height problem from Pascal to Laplace". *Historia Mathematica* 1, 263-286.
- HALLEY, Edmund** 1686 "On the height of the mercury in the barometer at different elevations above the surface of the earth: and the rising and falling of the mercury on the change of weather". *Phil. Trans. Royal Soc. of London* 16, 104-116.
- HAÜDY, René J.** 1806 *Traité élémentaire de physique*. 2^{ème} éd. (2 vols.). Paris.
- HORSLEY, Samuel** 1774 -M. de Luc's Rule for the measurement of heights by the barometer, compared with theory, and reduced to English measures of lengths...". *Phil. Trans. Royal Soc. of London* 64, 241-301.
- HUMBOLDT, F. Alexander von** 1806 *7 Géographie des plantes...* Paris-Strasbourg (Levrault et Schoell) = 1949 Paris (A. Lasaffe) = 1802 (1809) "Geografía de las plantas o cuadro, físico de los Andes equinocciales". El *Semanario del Nuevo Reyno de Granada*, No. 16 (abril).
 _____ 1982 *Alexander von Humboldt en Colombia: extractos de sus diarios /Auswahl aus seinen Tagebüchen*. Bogotá (Academia Colombiana Ci. Ex. Fis. Nat./Akad. Wiss. Deutschen Demokratik Rep.).
- JUAN y Santacilia, Jorge & Antonio de ULLOA** 1748 *Observaciones astronómicas y físicas hechas por orden de S. Mag. en los reynos del Perú de las cuales se deduce la figura y magnitud de la tierra y se aplica a la navegación &a*. Madrid (Juan de Zúñiga).
- LA CONDAMINE, Charles Marie de** 1942 *Viaje a la América Meridional*. Madrid (Espasa-Calpe) = 1745 *Rélation abrégée d'un voyage à l'intérieur de l'Amérique Meridionale*. Paris (Pissot).
- LAPLACE, Pierre Simon de** 1805 *Mécanique céleste*. Vol. IV. Paris.
- MARIOTTE, Edme** 1740 *Oeuvres de M. Mariotte*. Vol. I La Haye.
- MASKELYNE, Nevil** 1774 "M. de Luc's Rule for measuring heights by the barometer, reduced to the English measure of length, and adapted to Fahrenheit's thermometer and other scales of heat, and reduced to a more convenient expression". *Phil. Trans. Royal Soc. of London* 64, 158-170.
- NEWTON, Isaacs** 1982 *Principios matemáticos de la filosofía natural y su sistema del mundo*. Madrid (Editora Nacional).
- PACHECO, Juan Manuel** 1975 *La Ilustración en el Nuevo Reino*. Caracas (Universidad Católica "Andrés Bello").
- PASCAL, Blaise** 1984 *Tratados de pneumática*. Madrid (Alianza Editorial).
- PEREZ Arbeláez, Enrique** 1981 *Alejandro de Humboldt en Colombia*. Bogotá (Colcultura).
- RESTREPO, Jose Manuel** 1809 "Ensayos sobre la geografía, industrias y población de la Provincia de Antioquia en el N. R. de Granada". *Seminario del Nuevo Reyno de Granada*, No. 6, 41-96.
- SIGAUD DE LA FOND, Jean- René** 1787 *Elementos de física teórica y experimental. Tonto III*. Traducidos (y añadidos) por Tadeo López. Madrid (Imprenta Real) = 1783 *Eléments de physique théorique et expérimentale*. Paris.
- SCHUCKBURGH, George** 1777 "Observations made in Savoy, in order to ascertain the heights of mountains by means of the barometer". *Phil. Trans. Royal. Soc. of London* 67(2), 513-592.
 _____ 1779 "On the Variation of the Temperature of boiling water". *Phil. Trans. Royal. Soc. of London* 69 (Abridged, Vol XIV, 535-540).
- TATON, René** 1967 *Causalidad y accidentalidad de los descubrimientos científicos*. Barcelona (Editorial Labor).
- URE, Andrew** 1818 "New experimental researches on some of the leading doctrines of caloric; particularly on the relation between the elasticity, temperature, and latent heat of different vapours; and on thermometric admeasurement and capacity". *Phil. Trans. Royal. Soc. of London* 108, 338-395.
- VERA, Francisco** 1970 *Científicos Griegos. Vol. II*. Madrid (Aguilar), pp460-461.
- WOLLASTON, F.J.H.** 1817 *Phil. Trans. Royal. Soc. of London* 107, 183.
 _____ 1820. "On the measurement of Snowdon by the thermometrical barometer". *Phil. Trans. Royal. Soc. of London* 110, 295-305.