

CALDAS Y EL HIPSOMETRO (1)

ALFREDO D. BATEMAN

INTRODUCCION

Hipsómetro, del griego "Hypsos", altura y "metron" medida, es una aparato de física, destinado a medir indirectamente la presión atmosférica, determinando la temperatura de ebullición del agua.

De este término se deriva el de "Hipsometría", que se define como el arte de determinar la altitud de uno o más puntos por medio del hipsómetro. La determinación de la altitud por medio del hipsómetro, o sea conociendo la temperatura de ebullición del agua, comprende en realidad dos problemas, a saber: primero, determinación de la presión atmosférica conociendo la temperatura de ebullición del agua; y, segundo, determinación de la altitud de un lugar conociendo la presión atmosférica en ese lugar.

Para un mejor desarrollo de esta exposición, invertiremos el orden de los problemas enunciados.

I

EL TRABAJO DE CALDAS

Caldas, Francisco José de Caldas, nuestro sabio por antonomasia, desde su más tierna edad, y a pesar de los estudios de jurisprudencia que adelantara para cumplir con la voluntad paterna, tuvo una afición y un interés por las ciencias naturales tales que, aún hoy, a pesar del tiempo transcurrido y del adelanto de la Ciencia en todo orden, no deja de admirarnos.

Habiéndose procurado —con miles de dificultades— las pocas obras de orden científico que España, dentro de su política de mantener a sus colonias sumidas en la ignorancia y alejadas de las inquietudes intelectuales, dejó penetrar a la Nueva Granada, las leyó con avidez y se aprovechó de ellas, no sólo para aprender las enseñanzas que allí estaban escritas, sino también —y muy principalmente— para que le sirvieran de base y fundamento a sus ideas geniales y a sus esbozos y tesis científicas.

No podríamos decir que Caldas fue un erudito, es decir, un individuo que conociera toda la producción del intelecto humano hasta la época de su vida, entre otras razones por la muy obvia de que no estaba a su alcance el procurarse las obras escritas hasta entonces; pero sí podemos decir que fue un sabio, en toda la extensión de la pala-

bra, ya que fue dotado de un talento prodigioso, de un modo de raciocinar dentro de una lógica irreprochable, que lo llevó a conclusiones, lo condujo a proposiciones y teorías que tan sólo fueron desarrolladas y comprobadas en la culta Europa muchos años después.

El mismo, en sus trabajos, se daba cuenta de la cortina de ignorancia que lo rodeaba; él, en su modestia, no confiaba en que sus nuevas ideas fueran desconocidas en los países más civilizados. Al efecto decía así:

"¡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*. ¿Podrá algún pueblo de la tierra llegar a ser sabio sin una acelerada comunicación con la cultura de Europa? ¡Qué tinieblas las que nos cercan!".

Al penetrarse Caldas más y más en los secretos de las ciencias naturales, ayudado de un formidable instinto de observación, tuvo siempre como mira inmediata el aprovechamiento para la patria, que ya vislumbraba grande y libre, de los mismos recursos naturales; y es por ello que, al estudiar sus trabajos sobre las distintas ramas del saber, encontramos en todos ellos deducciones admirables sobre la utilidad práctica de esos mismos conocimientos y de esos mismos recursos. Caldas fue, sin saberlo, lo que hoy llamamos un *economista*.

Naturalmente para llegar a tales conclusiones y a sus aplicaciones, tuvo que profundizar —como lo hizo— el estudio de la que pudiéramos llamar la madre de las ciencias naturales: la Geografía. Y se compenetró tanto con esta ciencia, que a ella refirió todos sus otros conocimientos y es así que llegó a sentar tesis profundamente originales como la distribución de la flora y de la fauna en las cercanías del Ecuador, de acuerdo con la altitud de los lugares.

Mucho le preocupó, precisamente como complemento de sus estudios, la determinación de la posición de los lugares. Especialmente a través de su correspondencia se ve que en todos sus viajes, aun en aquellos que hubo de hacer cuando por azares de la vida se dedicó al comercio o para ir a defender sus intereses patrimoniales, su máxima preocupación era la determinación de la longitud y latitud de los sitios más importantes por donde transitaba, así como la altura barométrica de los mismos.

Estas alturas barométricas las aprovechaba —como un buen ingeniero— para deducir de ellas las altitudes de los lugares y obtener así el perfil

(1) Conferencia dictada por el autor en la sesión del 4 de diciembre de 1951, al ser recibido como miembro de número.

de sus viajes, procedimiento que aplicó muy especialmente en su memoria sobre la "Carta del camino de Malbucho".

Para pasar de las alturas barométricas a las altitudes, Caldas empleó varios métodos que nos describe en sus "Observaciones sobre la verdadera altura del cerro de Guadalupe que domina esta ciudad" (publicado en los números 23, 24 y 25 del "Correo Curioso", periódico de Santafé de Bogotá, correspondientes al 21 y 28 de julio y 4 de agosto de 1804), y los cuales analizaremos adelante.

Basta por ahora anotar que las inexactitudes en las altitudes halladas por Caldas deben atribuirse más a las fórmulas aplicadas que a sus observaciones barométricas y a la bondad de sus aplicaciones.

Caldas, decía, vivía obsesionado por la determinación de posiciones y altitudes; era, por tanto, un enamorado de los instrumentos que le permitían adelantar esta clase de trabajos. Cuando, he aquí, que un buen día sufre un percance que a otro hubiera aniquilado y que para él fue el origen del más genial de sus trabajos.

En un viaje que proyectó con don Antonio Arboleda y don Juan José Hurtado al volcán de Puracé, para reconocer sus bocas, elevación, término de la nieve permanente, etc. se le rompió, por uno de sus extremos, el termómetro que llevaba.

Al regresar a Popayán, fue su primera idea arreglar este termómetro, único que poseía, y para ello pensó, nada más obvio que rellenarlo de mercurio y luego regraduarlo, colocándolo primero entre hielo para obtener el grado cero (0°) y luego en agua hirviendo para obtener el grado ochenta (80°), ya que usaba la escala de Reaumur. Como lo pensó lo hizo, determinó los dos puntos extremos y luego con gran cuidado, válido de un nonio, dividió la distancia obtenida para hallar los grados.

Pero tuvo una sorpresa. Citaremos sus propias palabras:

"Hallo unos grados demasiado pequeños comparados con los que tenía el termómetro antes de romperse. El calor de la atmósfera en Popayán, tan conocido para mí por mis anteriores observaciones, crece: y habría creído cualquiera, desnudo de este conocimiento, que esta ciudad tiene el temperamento de Neiva o de Mariquita. Concluí en general, que había error en los extremos de mi escala y que era necesario profundizar la materia".

He aquí al sabio. Está seguro de la bondad con que ejecutó las operaciones materiales para determinar los puntos básicos del termómetro. Los resultados son errados, luego hay una causa que él no conoce y que debe investigar.

Muchas son estas causas. En primer lugar piensa en la temperatura del hielo en fusión. Variará esta temperatura en relación con la latitud de los lugares? Tras agudas reflexiones llega a

la conclusión de que la temperatura dada por el hielo en su cambio de estado es constante; lo prueba el hecho de haber sumergido antes su termómetro en hielo en fusión, en el mismo Popayán, y haber hallado el mismo grado de calor que indicaba su termómetro, no obstante haber sido cerrado éste en Londres. Luego, dedujo, la causa del error estaba en el otro extremo del termómetro: en la temperatura del agua hirviendo, y entró así a estudiar este fenómeno.

"Bien presto —dice él— vi que aunque el calor del agua hirviendo es constante, supone igual presión atmosférica; que aumentándose o disminuyéndose ésta, se aumenta o disminuye el calor del agua; y en fin, que yo obraba a 800 toesas sobre el nivel del mar, y con sólo la presión de 22 pulgadas 10,9 líneas, elevación del mercurio en Popayán, en lugar de 28 que se requieren para obtener el término superior de una buena escala".

Es decir, concluye, debe aumentar el espacio entre los dos puntos fundamentales, tantas cantidades cuantas corresponden a la diferencia de presión, es decir 5 pulgadas 1,1 líneas de mayor presión sobre el agua. El fruto de esta conclusión es que reanude sus estudios en los pocos libros de que dispone, y encuentra en la "FISICA EXPERIMENTAL" de Sigaud de la Fond, al hablar del doctor Martini, lo siguiente:

"Este físico ha experimentado que la elevación o descenso del mercurio, siendo de una pulgada el calor del agua hirviendo, varía *algo menos* de dos grados según la escala de Fahrenheit".

Esta expresión, *algo menos*, lo llena de incertidumbre, pero al mismo tiempo le anima a proseguir sus investigaciones para poder verificar el termómetro en Popayán, sin necesidad de ir a un lugar bajo, donde la presión sea de 28 pulgadas, entre otras razones por carecer de medios —afortunadamente— para hacer un viaje costoso con solo tal objeto científico.

Plantea luego esta cuestión:

"Dos grados de Fahrenheit hacen 0,9888 de Reaumur. Serán acaso el *algo menos* del doctor Martini las dos últimas cifras de la fracción antecedente? Quiero creer que ésta es la cantidad que asigna este físico; quiero por ahora calcular con sólo 0,98 de Reaumur para una pulgada de barómetro, y será:

$$12 \text{ líneas: } 0,98 :: 5^p \ 11,1 : x \\ \text{de donde } x = (0,8 \times 61,1) : 12 = 4,073.$$

"Debo, pues, conforme a este cálculo, añadir 4,073 al término superior que da el calor del agua en Popayán, es decir que el agua debe hervir en Popayán a $80 - 4,073 = 75,927$ ".

Pero inmediatamente le asaltan las dudas. Los resultados hallados no le satisfacen, ya que a continuación dice:

"Tales fueron los resultados de mis combinaciones, resultados que no contentaban mi escrupulosidad. Ellos eran el producto de dos números que aun no conocemos bien. La elevación media del mercurio en el barómetro al nivel del mar bajo del ecuador y en sus inmediaciones, y lo que aumenta o disminuye el calor del agua por una pulgada de este instrumento, son cantidades inciertas".

Por otra parte plantea nueva duda! A pesar de las observaciones de Bouguer, de La Condamine, Juan, Ulloa, la altura barométrica al nivel del mar y en las cercanías de la línea ecuatorial, está bien determinada? Caldas considera que nó, por falta de suficientes observaciones y dice:

“Aun es más dudoso el otro dato de mi cálculo y si he de hablar con la ingenuidad propia de un amante de la verdad, mi fracción $0^{\circ},8$ por 12 líneas del barómetro es una adivinanza. De estos principios, que se me presentaban con toda la fuerza de su verdad, concluí que el calor del agua en Popayán era incierto, y que era preciso buscarlo de un modo directo e independiente de toda suposición”.

Ya en este pie, y ante la imposibilidad de hallar otro termómetro para hacer una comparación directa, duplica sus esfuerzos, lee nuevamente los físicos de que dispone y, como dice él mismo, comienza a meditar con seriedad. Fruto de esta meditación es la siguiente tesis, que constituye por sí sola su invento:

“El calor del agua hirviendo es proporcional a la presión atmosférica; la presión atmosférica es proporcional a la altura sobre el nivel del mar; la presión atmosférica sigue la misma ley que las elevaciones del barómetro, o hablando con propiedad, el barómetro no nos enseña otra cosa que la presión atmosférica; luego el calor del agua nos indica la presión atmosférica del mismo modo que el barómetro; luego puede darnos las elevaciones de los lugares sin necesidad del barómetro y con tanta seguridad como él”.

Pero la misma simplicidad de la ley que ha descubierto asusta a su modestia.

“¿Será éste un verdadero descubrimiento? ¿Habré adivinado —dice— en el seno de las tinieblas de Popayán un método que estará hallado y perfeccionado por algún sabio europeo? O por el contrario, ¿seré yo el primero a quien se haya presentado estas ideas? Siendo tan claras, ¿se habrían ocultado a Reaumur, Delisle, Fahrenheit, De Luc y Suncio?”.

Vuelve a consultar los libros de que dispone, en ninguno halla nada parecido. Pero no se desanima y dice:

“Sean conocidas o nuevas, yo debo perfeccionarlas, me decía, debo consultar la experiencia. Si lo primero, tendremos un ejemplo de que una misma verdad se presenta al mismo tiempo a muchos; comparamos los trabajos del europeo con los del hijo de Popayán; veremos los caminos que han seguido, sus resultados, y acaso los unos corregidos por los otros, perfeccionarán esta teoría. Aun cuando haya salido bastante perfecta de las manos del primero, no habría perdido mi trabajo. Mis observaciones en este caso serían hechos que la confirmarían; probarían que es general; que bajo la línea, a pequeñas latitudes, en todas las elevaciones, los resultados son iguales a los de la zona templada, y que no influyen en ella ni la distancia ni el clima. Si lo segundo, ¿no es una perezosa reprensible abandonar una materia que puede tener resultados importantes?”.

No obstante sus buenos ánimos para proseguir sus investigaciones, se halla perplejo sobre la manera de hacerlo. Vuelve luego a indagar y averiguar si hay en Popayán otro termómetro. La suerte lo favorece esta vez, pues encuentra dos, uno de espíritu de vino, que no le sirve, y otro de

mercurio, que le permite una comparación. Lo coloca en el hielo en fusión y lo halla exacto. Lo coloca en agua hirviendo y el termómetro indica $75^{\circ},7$ R.

Si bien es cierto que el resultado es algo diferente, dos décimas de grado, del valor hallado anteriormente por el cálculo, al menos lo confirma en sus primeras conjeturas. El mismo Caldas cuenta que saltó de contento al leer este resultado.

Dispone entonces de estos datos: Altura del barómetro al nivel del mar, 28 pulgadas; temperatura de ebullición del agua al nivel del mar 80° R; temperatura de ebullición del agua en Popayán $75^{\circ},7$ R; altura del barómetro en Popayán 22° 10.9¹.

Ejecuta luego las siguientes operaciones:

$$28^{\circ} - 22^{\circ} 11 = 5^{\circ} 1^1 = 61^1$$

$$80^{\circ} - 75^{\circ},7 = 4^{\circ},3$$

y establece la siguiente proporción:

$$61 : 4^{\circ},3 :: 12 : x$$

de donde $x = (12 \times 4^{\circ},3) : 61 = 0^{\circ},8$

Es decir, había acertado en la determinación del *algo menos* del doctor Martini. Hace entonces el cálculo inverso, es decir, que partiendo del calor del agua en Popayán calcula la presión barométrica, estableciendo la proporción:

$$0^{\circ},8 : 12 :: 4^{\circ},3 : x$$

de donde $x = (4.3 \times 12) : 0,8 = 64^1 = 5^{\circ} 4^1$

$$28^{\circ} - 5^{\circ} 4^1 = 22^{\circ} 8^1$$

resultado que difiere en $2^1,9$ de la lectura directa del barómetro. El mismo Caldas dice:

“Este resultado tiene una precisión superior a mis esperanzas, pero no me satisface; resucitan mis escrúpulos, mis dudas se aumentan. ¡Cuántos principios de error se presentan a mi imaginación! La impureza del agua, la forma de la vasija, la altura del barómetro en nuestros mares, el exponente, la escala y sobre todo mi poca práctica en este género de experiencias me afligen; me avergüenzo de mi flojedad, me rependo, entro en nuevas reflexiones; para remover obstáculos, distingo los que me parecen invencibles de los que no lo son; sólo queda la altura del barómetro en el mar, entre los primeros; los segundos no exigen sino paciencia y trabajo para desaparecer”.

En ese entonces recibe una invitación del doctor Manuel María Arboleda, Vicario General del Obispo de Popayán, invitándolo a ir a una casa de campo situada en las faldas de los Andes. Acepta complacido la invitación para aprovechar la ocasión de hacer observaciones, idea que comunica a su invitante ofreciéndole éste su colaboración.

En las observaciones que allí practica, encuentra la misma inexactitud, lo que lo hace dudar del dato de la altura barométrica a la orilla del mar. Resuelve entonces hacer a Popayán, centro de sus observaciones, fijando la altura media del mercurio

en dicha ciudad, de un modo escrupuloso y seguro, determinando el calor del agua destilada (la que resolvió emplear, adelantándose así más de un siglo a las conclusiones halladas en 1906 por Sydney y Young), descartando en esa forma la altura inicial de 28^o al nivel del mar, para poder así determinar el factor de proporcionalidad que él llamó el “exponente”.

Pero en ese entonces, en su interior se consideraba ya satisfecho de los resultados obtenidos, pues con fecha 20 de mayo de 1801 escribe desde Popayán a su amigo D. Santiago Arroyo, de Santafé, lo siguiente:

“Estamos en vísperas de un descubrimiento que hará honor a mi país...”

“He hallado, amigo querido, el medio de hallar la altura de todos los lugares con sólo el termómetro y con tal grado de precisión, que no difiere de las indicaciones del barómetro ni en media línea, precisión que no me habría osado esperar si el suceso no hubiera confirmado mis ideas. Si las experiencias ulteriores que voy a emprender en varias elevaciones de la cordillera vecina a esta ciudad, me salen tan felices como las hechas hasta aquí, si salen lo mismo las que usted tiene que practicar en ésa, puedo asegurar a usted que aun cuando no se inutilice el barómetro, perderá seguramente la mitad de su mérito para los viajeros...”

En la misma carta le solicita haga una observación en Santafé y le da las instrucciones del caso, pues le dice:

“Ahora sólo digo a usted que se procure recoger una buena cantidad de agua de lluvia en vasijas limpias y con el auxilio de doña Manuela (se refiere a doña Manuela Santamaría) (a quien ocultará usted su designio y miras); destilar con cuidado un frasco regular del agua más pura que le sea a usted posible; cuide usted de echar en la matraz que ha de servir a la destilación seis tantos a ocho de la que pueda contener el frasco; éste debe taparse con tapa de vidrio y no de corcho, cera, etc. Prevenga usted esto, y con el siguiente entrará usted a trabajar conmigo en esta importante materia...”

En carta de fecha 5 de junio de 1801, al mismo destinatario, luego de extenderse sobre la materia, continúa las instrucciones sobre el experimento y le dice:

Lo que quiero que usted me haga con el agua destilada, es que la ponga a hervir en vasija abierta y no tapada, que luego que esté hirviendo a borbotón, sumerja un buen termómetro y note el grado en que se fija a una hora que señalará en la observación; esto me basta para determinar la elevación del suelo en Santafé con toda la precisión posible, y esto es a lo que yo llamo descubrimiento...”

Julio 22 de 1801. Fecha memorable en la historia de la Física. Ese día parte Caldas hacia la cordillera dotado de los elementos necesarios y luego de adoptar, tras múltiples observaciones, los valores de 22^o 11', 2 y 75^o65 R como presión barométrica y temperatura de ebullición del agua en Popayán respectivamente.

Hace varias observaciones que están resumidas en el cuadro siguiente:

Sitios	Juntas	Paispamba	Sombreros	Tambores
Altura barométrica	21994,0	20994,1	19961,05	189114,6
Diferencia con Popayán	1924,2	2224,1	3961,05	39114,6
Diferencia en líneas	14,2	26,1	41,15	47,6
Temp. ebullición del agua	74 ^o ,50	73 ^o ,50	72 ^o ,50	71 ^o ,75
Diferencia con Popayán	1 ^o ,15	2 ^o ,15	3 ^o ,25	3 ^o ,90
X	0.971	0.988	0.948	0.983

En todas estas observaciones, para deducir X, planteó la proporción,

$$\frac{\text{diferencia de alturas barométricas}}{\text{doce líneas}} = \frac{\text{diferencia de temperaturas}}{x}$$

Estudiando los resultados anteriores dice Caldas:

Me lleno de satisfacción al ver este último número; se disipan mis dudas; me confirmo en la incertidumbre sobre la altura del barómetro en el mar; y conozco que más de nueve décimas es el exponente verdadero; que la presión que indica el barómetro no se diferencia de la que da el calor del agua; y, en fin, que mis ideas están comprobadas por la experiencia”.

Continúa luego sus análisis para hallar lo que él llama “exponente” en forma que le satisfaga; combina las observaciones de las Juntas y Sombreros, las de Paispamba y Timbío, encontrando para el primer caso 0^o, 979 R. y para el segundo 9^o, 976 R por cada 12 líneas de barómetro.

Hace nuevas combinaciones con estos resultados numéricos, y al final resuelve adoptar el valor 0^o, 974 R por cada 12 líneas del barómetro y dice:

“Ya estamos en el caso de resolver el problema. Dado el calor del agua hirviendo en un lugar, hallar la elevación correspondiente del mercurio en el barómetro y su altura sobre el nivel del mar”.

Aplica los valores hallados para deducir la altura barométrica y compararla a las lecturas hechas directamente, y halla resultados muy acordes, razón por la cual se atreve ya a plantear una fórmula general así:

- Sea a = altura del barómetro en Popayán o en el mar;
- b = calor del agua en los mismos lugares;
- c = el exponente;
- e = 12 líneas;
- d = calor del agua en un lugar cualquiera;
- z = altura del barómetro en este lugar.

De la proporción antes establecida se obtiene:

$$\text{Con referencia a Popayán, } a \pm \frac{(b - d) e}{c} = z$$

$$\text{Con referencia al mar, } a - \frac{(b - d) e}{c} = z$$

Quiso luego Caldas confirmar aun más sus resultados, y aplicando la fórmula a los lugares donde había hecho ya observaciones y a los sitios que recorrió en su viaje que, por intereses particulares, tuvo que hacer a Quito, en compañía de D. Toribio Miguel Rodríguez, abogado de dicha ciudad, en los cuales hizo lecturas directas de alturas barométricas y tomó la temperatura del agua en ebullición para luego comparar los resultados de sus cálculos con los tomados directamente, ha-

lló que la mayor diferencia en un sentido era de $+1^{\circ}.10$ y en el otro de $-1^{\circ}.54$.

Debe observarse que la menor temperatura de ebullición del agua en esta serie de experimentos fue de $71^{\circ} 75R$ ($= 89^{\circ},69 C$) y la mayor fue de $78^{\circ}.50 R$ ($= 98^{\circ},13 C$).

Es decir, la experiencia, en el reducido número de observaciones que hizo (diez en total), confirmó la exactitud de su fórmula.

En este entonces se aproximaba la fecha en que Caldas debía encontrarse con Humboldt, encuentro que ansiaba y pudiéramos decir, temía a la vez, pues iba a definirse de una vez por todas, si su invento era verdaderamente nuevo o si tan sólo había descubierto algo ya conocido en Europa. Humboldt, cuando Caldas le explica su procedimiento por primera vez, cree se trata de un método ya enunciado por Suncio (se refiere a Saussure), pero luego al estudiarlo a fondo le dice:

“Suncio no ha pensado como usted en agua hirviendo; sus trabajos se han limitado al temple de la atmósfera; asigna 640 pies de altura por un grado en el termómetro, y yo he observado en el Pico de Teide que da muy bien este coeficiente cuando el día es sereno y no se obra en lugares elevados”.

Es decir, Caldas, por boca de Humboldt, queda confirmado como inventor de este sistema, que ha pasado a la física con el nombre de HIPSOMETRIA. Caldas planea luego un termómetro con una escala común para el calor y altura barométrica, a fin de hacer a todos partícipes en este descubrimiento, evitando cálculos.

La memoria en que Caldas resumió sus trabajos sobre la materia está fechada en Quito en abril de 1802. Además del desarrollo de sus labores al respecto, queda constancia profusa en sus cartas a D. Santiago Arroyo.

II

RELACION ENTRE ALTITUD Y ALTURA BAROMETRICA

Estudemos ahora la segunda parte del problema: la relación que liga la altitud de un lugar con la altura barométrica en ese mismo lugar. El principio fundamental es que siendo la presión atmosférica debida al peso, o mejor dicho, a la presión ejercida por la masa de aire que tenemos encima, se comprende que esta presión debe disminuir a medida que se aumenta de altitud. Si la densidad del aire fuere constante, como lo es sensiblemente la del agua de mar, a causa de su incomprensibilidad, el descenso de la columna barométrica sería proporcional a la variación en altitud, pero no siendo esto así, sino que la densidad del aire disminuye con la altura, la ley que regula la diferencia de altitudes con los respectivos valores de la presión resulta más complicada.

Para las capas bajas de la atmósfera y por consiguiente para pequeñas altitudes la densidad del aire puede admitirse como constante, resultando así que el barómetro descende aproximadamente 1 mm. por cada 10 metros de altitud.

La primera idea de aplicar el barómetro a la medida de altitudes, se debe a Pascal, quien se fundó para ello en los trabajos de Torricelli, así como de los conocimientos que de la constitución de la atmósfera se tenían en aquella época. Por tanto sólo se pudo obtener una ley sencilla de proporcionalidad aplicable sólo a las capas bajas de la atmósfera. Posteriormente, el descubrimiento de la ley de los gases, llamada de Boyle o de Mariotte, según la cual, a igualdad de temperatura, los volúmenes de los gases varían en razón inversa de su presión, fue un gran paso en el sentido de hallar una fórmula que exprese la relación entre presión atmosférica y altitud. Esta fórmula fue establecida por el mismo Mariotte, no teniendo hoy valor distinto del histórico. Más tarde Halley indicó el camino directo que debía seguirse para hallar la verdadera fórmula, el que consiste que partiendo de ciertos datos empíricos, así como de la relación que existe entre las densidades del aire y del mercurio, se llegaba a establecer la ley que se buscaba. Esta fórmula de Halley, si bien no es suficientemente exacta, sí puede considerarse como fundamental.

Sucesivamente otros físicos aplicaron otras fórmulas, entre las cuales merecen citarse tres, no por su mayor interés científico, sino por haber sido aquellas que aplicó Caldas en sus cálculos de altitudes. Ellas son:

Primera. Tomando como base de los cálculos la altura de Caraburú, por ser este el punto mejor establecido en altitud, entre los que sirvieron en la Provincia de Quito para la determinación de la figura de la tierra, en la famosa expedición de La Condamine, observó alturas barométricas, las cuales según la graduación de los aparatos usados por él, estaba en pulgadas y líneas, reduciéndolas a líneas.

Halló luego los logaritmos vulgares de estas alturas barométricas en Caraburú y en Pichincha, Santafé y Guadalupe, planteando entonces una regla de tres, basándose en el principio de que las altitudes son proporcionales a los logaritmos de las alturas barométricas. En esta forma, como conocía las altitudes de Caraburú y de Pichincha y sus alturas barométricas, pudo establecer la siguiente relación:

$$\frac{a}{b} = \text{constante}$$

siendo a = diferencia de logaritmos de alturas barométricas en líneas

b = altitudes en toesas.

Segunda. Bouguer, en su obra "*Mens. des trois degrés*", que cita el mismo Caldas, modificó el sistema reduciéndolo a restar del logaritmo de la mayor altura del mercurio, reducida a líneas, el logaritmo de la menor, y de este residuo o diferencia, deducir la trigésima parte.

Tercera. Don Jorge Juan, en sus "*Observaciones Astronómicas*", también citado por Caldas, luego de proponer varias fórmulas para hallar la altura de un lugar con el barómetro, concluye que la más conforme es la suma de una progresión aritmética que comienza al nivel de Caraburú por 103 $\frac{1}{2}$ pies y por diferencia aritmética de 0.215. Es decir, se plantea una progresión aritmética de la cual se conoce

a = primer término = 103.5 pies.

d = diferencia o razón = 0.215.

u = número de términos, que es 7 $\frac{1}{2}$ para Santafé o 26 $\frac{1}{42}$ para Guadalupe, etc.

s = suma de los términos de la progresión = altitud del lugar.

Caldas en sus cálculos sobre la altura de Guadalupe, buscó los valores por los tres métodos citados para compararlos, adoptando luego como medida definitiva de la altura de Guadalupe sobre Santafé, el promedio aritmético de los tres valores así hallados.

Correspondió a Laplace establecer la fórmula definitiva en esta materia, fórmula que aparece por primera vez en el tomo IV de su célebre "*Mecánica celeste*", en la cual tuvo en cuenta todas las circunstancias y aplicó todas las correcciones necesarias para que la Hipsometría alcance el grado de precisión que tiene en los tiempos actuales.

Por ser suficientemente conocida, y en gracia de la brevedad, me abstengo de entrar en mayores detalles sobre esta fórmula, recordando sí que en ella intervienen los siguientes factores:

Presión atmosférica en la estación inferior;

Presión en la estación superior;

Temperatura del aire ambiente en la estación inferior;

Temperatura del aire ambiente en la estación superior;

Tensión del vapor difundido en la atmósfera en cada una de las dos estaciones de observación, entre las cuales se busca la diferencia de altitudes;

Radio de la tierra;

Latitud del lugar;

Coefficiente de dilatación del aire;

Decrecimiento de la intensidad de la gravedad con respecto a la altitud y a las masas terráneas vecinas.

Pero, resumiendo, esta parte del problema, o sea la relación entre la altitud y la altura barométrica es independiente de la parte que estudió Caldas, que es la que para el efecto de esta exposición nos interesa.

III

RELACION ENTRE TEMPERATURA DE EBULLICION DEL AGUA Y PRESION

Juan Dalton, físico y químico inglés (1766-1844) estudió por primera vez la relación existente entre la temperatura de ebullición del agua y la tensión del vapor áqueo, deduciendo por sus experimentos las llamadas leyes de Dalton, de las cuales la segunda dice:

"La evaporación es proporcional a la diferencia que existe entre la presión máxima F del vapor del líquido, a la temperatura que se experimenta, y la presión f que en ese momento tiene el vapor del líquido en la atmósfera".

Regnault, físico francés (1810-1878) y a quien en las físicas se le atribuye erróneamente el invento de la hipsometría, en realidad planteó el problema de la relación entre presión y temperatura de ebullición del agua, pero tomándolo desde otro punto de vista. Partió del principio de física de que todo líquido hierve cuando la tensión de su vapor es igual a la presión a que esté sometido, por lo que el punto de ebullición de todo líquido, y por tanto, del agua en particular, descenderá a medida que disminuya la presión que soporta, existiendo entre ambos elementos, presión y temperatura de ebullición, íntima correspondencia fijada por la tabla de tensiones del vapor de agua a diferentes temperaturas.

Regnault ideó sí, y de ahí proviene se le atribuya el invento de la hipsometría, un hipsómetro de forma práctica y portátil. Consta de una pequeña caldera de cobre con doble fondo, estando envuelta por un cilindro de metal que contiene también la lámpara de alcohol para hacer hervir el agua. La caldera se prolonga en su parte superior por una especie de chimenea que da salida al vapor formado que se escapa por la parte superior; dicho vapor envuelve la columna del termómetro contenido en el interior de la chimenea, estando el depósito del mismo cerca de la superficie del agua. Al exterior del conjunto del aparato asoma sólo la porción del termómetro necesaria para poder verificar la lectura del mismo. Dicha chimenea está formada de varias piezas que enchufan unas con otras como los tubos del anteojo, pudiéndose así variar su longitud según la temperatura que se ha de leer y poderlo reducir de dimensiones para el transporte. Ha sido preocupación constante de los físicos encontrar la relación que liga la temperatura del agua hirviendo con la tensión del vapor, y aún llegaron a dudar que la presión del vapor p dependiera sólo de la temperatura t. En 1906 Sydney y Young

demonstraron que p es función únicamente de t , si el líquido es químicamente puro, si el vapor no tiene vestigios de aire y si la evaporación no va acompañada de ningún cambio químico. Biot, físico francés (1774-1862) propuso para el vapor de agua la siguiente fórmula:

$$\log. p = a + \delta \alpha^t + c \beta^t$$

Esta fórmula debe considerarse como la más importante de todas; es la que se ha empleado más y se utiliza en la actualidad, reduciéndola con frecuencia a los dos primeros términos.

$\log. p$ es logaritmo de Briggs o vulgar.

En 1881 se demostró que α tiene casi el mismo valor para los distintos líquidos. En 1890, por experiencias verificadas con 156 líquidos, se halló

$$\alpha = 0.9932$$

Regnault utilizó la fórmula de Biot, para expresar los resultados de sus numerosas investigaciones sobre la tensión del vapor de agua y de otros líquidos. Para el caso del vapor de agua, con temperatura entre 0° y 100° , que es lo que nos interesa, halló Regnault la siguiente expresión:

$$\log. p = a - b \alpha^t + c \beta^t$$

con b negativo. Los valores de las constantes que dio Regnault fueron corregidos por Moritz, y ya corregidos son:

$$\begin{aligned} a &= 4.7393707 \\ \log. \alpha &= 0.996725536 - 1 \\ \log. b &= 0.61140767 \\ \log. c &= 0.131990711 - 2 \end{aligned}$$

Las fórmulas de Regnault, cuando se usan para el agua, fueron resumidas en una sola por Gnouzine en 1899 quedaron así:

$$p = a + bt + ct^2 + dt^3$$

en donde los coeficientes numéricos varían para los intervalos -20° a 46° ; 46° a 157° y 157° a 230° .

Regnault mismo observó que el tercer término de su fórmula no tiene grande importancia, y que siendo α casi la misma para todas las sustancias, $\alpha = 0.9932$, queda por tanto su fórmula así:

$$\log. p = a + b(0.9932)^t$$

que expresa muy bien los resultados con diferentes clases de líquidos.

Es pues numerosa la cantidad de fórmulas que interpretan la expresión

$$h = f(t)$$

Entre todas ellas se ha escogido la especial para el vapor de agua dada por Thiesen en 1899, porque Henning demostró en 1907 que dicha fórmula corresponde de un modo notable a las mejores mediciones.

Dicha fórmula, llamando T la temperatura del vapor de agua en grados centígrados, tomando logaritmos vulgares, y h expresado en milímetros de mercurio, es:

$$\log. h = \log. 760 - \frac{1}{273 + T} (515.847726 - 5.409T + 0.508(365-T)^{10^{-8}})$$

IV

RELACION ENTRE ALTITUD Y TEMPERATURA DEL AGUA

Con anterioridad a Caldas sólo se sabe que Tiverio Cavallo, físico anglo-italiano (1749-1809) señaló la circunstancia de que la temperatura de ebullición del agua variaba con la altitud de los lugares, pero que no señaló ni siquiera planteó una posible ecuación que expresara relación entre estos dos valores.

Pero sí hubo físicos que trataron de relacionar la altitud con la temperatura. Entre ellos hallamos en primer término a Saussure (a quien Caldas llama Sucio en su "*Memoria sobre la altura de las montañas*"). Este físico estableció la proporcionalidad entre la temperatura y la altitud. Sobre su sistema veámos lo que dice el mismo Caldas en carta dirigida desde Quito el 21 de marzo de 1802 a su amigo don Santiago Arroyo:

"M. Saussure imaginó medir las montañas por medio del termómetro sumergido en el agua hirviendo: bello principio! Hizo muchos experimentos sobre las montañas de Suiza, y halló que seiscientos cuarenta pies correspondían a un grado de Reaumur. El Barón no suscribe a este modo de pensar de M. Saussure, porque este célebre físico forma una progresión aritmética, siendo así que la ley de las densidades del aire es en progresión logarítmica o geométrica. M. Saussure con los mismos principios ha seguido un rumbo bien diferente, pues olvidando esta ley, ha perdido su trabajo, cuando yo he tenido por objeto principal esta ley; a ella se reduce mi fórmula. Ya se acordará usted que le remití un ejemplar del cálculo, y todo él se dirige a calcular elevación del barómetro por el termómetro en agua hirviendo; conocida la del barómetro, está resuelto el problema de medir las montañas por el termómetro. Saussure me ha precedido en la teoría; pero soy original en la fórmula, y tengo la gloria de haber resuelto este problema físico de un modo elegante, y lo que es más, que mi método, absolutamente diferente del de Saussure, es tan exacto, que las mayores diferencias en los resultados de cálculo no pasan de $1\frac{1}{2}$ líneas, exactitud a que no ha podido llegar M. Saussure ni otro europeo. El Barón me dice que se ha abandonado del todo el método de este físico por su inexactitud. Ahora sí debe usted felicitarme; ya sé lo que Europa sabe en esta materia, y si yo por mis libros miserables adiviné la teoría fundamental, he llevado el cálculo por un camino bien diferente, y he dado un grado de perfección al método, no conseguido en Europa...".

Debemos aquí recordar que el trabajo de Caldas fue publicado en Europa en un folleto cuya portada dice así: "*Ensayo de una memoria sobre un nuevo método de medir las montañas por medio del termómetro y el agua hirviendo, seguida de un apéndice que contiene algunas observaciones muy importantes y útiles para la mejor in-*

teligencia de dicha Memoria, por Don Francisco José de Caldas. Burdeos. En la Imprenta de La- valle Joven y Sobrino. Paseo de Tourny, número 20. 1819”.

D. Lino de Pombo, anota Posada en su compilación de las “Obras de Caldas”, aseguró que esta publicación fue ordenada por un amigo de Caldas. Tras algunas deducciones, Posada asegura fue el cartagenero D. J. M. del Real. No obstante la importancia de este trabajo, quizá por proceder de un americano, pasó desapercibido en Europa.

Forbes (Juan David —físico escosés— 1809-1868), observó que la diferencia de nivel entre dos puntos era proporcional a la diferencia entre los puntos de ebullición del agua en los mismos, y dio la fórmula

$$h = 300 (t' - t)$$

es decir, que la variación del punto de ebullición es de 1° por cada 300 metros.

Soret estudió detenidamente este problema encontrando que el coeficiente que más se adapta es 294.

Estas fórmulas, como se ve, tienen las mismas objeciones que hizo Caldas a la de Saussure.

V

CRITICA DE LA FORMULA DE CALDAS

Las primeras objeciones hechas al invento de Caldas lo fueron por Humboldt, pero el mismo Caldas en su “Memoria” las destruye. En efecto dice:

“No se pueden objetar estos defectos a mi coeficiente (los que se refieren al coeficiente de Saussure). Este es relativo a la presión, aumenta la altura en donde se disminuye aquélla; es relativo al barómetro y todas las indagaciones sobre la ley y la progresión que convienen a este instrumento se acomodan y convienen al calor del agua, pues ambos no tienen otro fundamento que la presión atmosférica. El señor Barón de Humboldt, a quien he manifestado una parte de mis ideas, creyó que mi coeficiente tenía los mismos defectos que el de Sudio; pero meditando el caso, convino conmigo en esta precisa propiedad de mi coeficiente, que lo distingue de todos”.

“El mismo sabio me objetó que el calor del agua variaba a la misma presión hasta un grado. Yo habría suscrito con el mayor gusto a una autoridad tan respetable, si hubiera autoridad contra la experiencia. Una larga práctica me ha enseñado que el calor del agua a igual presión es invariable, observando con las precauciones convenientes. La autoridad de todos los físicos apoya mi modo de pensar. De otro modo, ¿podía haber termómetros comparables? ¿No es esta invariabilidad del calor del agua hirviendo a la presión de 28p el fundamento del término superior de la escala de todos los termómetros? Es verdad que a los primeros hervores no ha adquirido el agua todo el calor que es capaz; pero avivando el fuego, aumentando el hervor hasta su máximo, adquiere siempre el mismo calor”.

Caldas utilizó en su fórmula termómetros graduados según Reaumur, y para las alturas barométricas empleó pulgadas y líneas.

El primer punto que merece nuestra atención es saber el valor de las pulgadas y de las líneas que tenía el barómetro de Caldas, a fin de poder convertir su fórmula al sistema métrico decimal.

En el importante libro titulado “Historia de las Medidas Agrarias Antiguas” de que es autor el doctor Luis E. Páez Courvel, encontramos los siguientes datos:

“PULGADA, LINEA Y PUNTO. La pulgada era igual a 12 líneas, o sea a 2.322 cm. (Sistema antiguo de Pesas y Medidas). Rueda dice que una pulgada es igual a 12 líneas, con una equivalencia de 0.023555 m. Es decir, a 23.2 milímetros, según los datos de la Topografía Práctica; y a 23.19 mm. según el doctor Ossa.

“El artículo 8º de la ley de 12 de octubre de 1821, dice:

“... La pulgada será de 12 líneas”. Es decir, 23.16 mm. de acuerdo con el valor de la línea.

“La pulgada inglesa, que es hoy la de mayor uso, tiene 25.4 milím.

“Una LINEA, en el sistema antiguo de pesas y medidas, es igual a 12 puntos, o sea a 1.935 milímetros.

“Es la duodécima parte de una pulgada y equivale a 2 milímetros, aproximadamente (Diccionario de la Academia).”

“Según el ingeniero Ossa, la línea es igual a 1.93 mm. cuando se refiere a medidas españolas antiguas.

“El punto es igual a 0.16125 milímetros (Sistema antiguo de Pesas y Medidas)”.

A primera vista se ve que hay discrepancias entre las distintas definiciones de pulgadas que se han citado. No obstante, las diferencias son tan pequeñas que no producen ningún resultado que discrepe notoriamente de los otros.

Caldas afirma en su “Memoria” que la altura barométrica al nivel del mar es de 28 pulgadas y que en Popayán es de 22 pulgadas 11.2 líneas. Si partimos del dato de la altura al nivel del mar que da Caldas (28 pulgadas) y reducimos este dato a milímetros, según las definiciones de pulgada dadas anteriormente, encontramos que la altura barométrica al nivel del mar sería:

para pulgada igual a 2.322 cm. = 650.16 mm.
para pulgada igual a 0.023555m. = 659.54 mm.
para pulgada igual a 23.19 mms. = 649.32 mm.

Es de todos sabido que la presión barométrica al nivel del mar es de 760 mms., por consiguiente la pulgada, o sean las famosas 12 líneas de la fórmula de Caldas no puede convertirse al sistema métrico tomando las definiciones usuales. Debemos más bien calcular el coeficiente de proporcionalidad partiendo de la igualdad de que 28 pulgadas o sean 336 líneas son iguales a 760 mms., de donde una pulgada es igual a

27mms., 14285 714285 714285... y una línea igual a 2 mms., 2619047 619047 619047...

Tomando el valor así hallado para la pulgada tendremos que la altura barómetro en Popayán (que Caldas da de 22° 11,2 líneas) será en milímetros: 622, 476.

Teniendo en cuenta esta corrección, podemos formar el cuadro siguiente comparativo de resultados aplicando la fórmula de Caldas, la fórmula de Thiesen y los datos que trae el cuadro que figura en el libro "*Struzione per la osservazioni meteorologiche e per l'altimetria barometrica*" por P. F. Denza, editado a mediados del siglo pasado.

Hacemos el cuadro tomando temperaturas en grados centígrados, recordando que Caldas trabajó con grados Reaumur, cuya conversión a centígrados es fácil.

Temp. °C	Fórmula Caldas	Fórmula Thiesen	Fórmula Denza
85°	409.292	433.48	433.00
90°	522.613	525.76	525.40
94°6 (Popayán)	622.476	623.72	624.5
95°	632.22	633.94	633.8
100°	741.36	760.00	760.00

Si convertimos la fórmula de Caldas al sistema métrico, o sea si reemplazamos 12 líneas por 27mms., 14285 714285 y a 0°,974R por 1°C, 2175, tendremos que la fórmula de Caldas, refiriéndola al nivel del mar, será:

$$z = 760 - \frac{(100 - d) 27.1429}{1.2175}$$

de la cual, reemplazando a d por los mismos valores del cuadro anterior, obtendremos:

para 85°	z = 425.67
para 90°	z = 537.06
para 94°6	z = 644.79
para 95°	z = 648.53

Como se deduce de esta comparación, los datos de la fórmula de Caldas difieren bastante de los calculados por la fórmula de Thiessen o los que da la tabla de Denza.

Ello es natural por varias razones:

a) Caldas partió del principio de que el aumento de la presión es directamente proporcional a la variación de temperatura de ebullición del agua. Lo cierto es, según vemos en las fórmulas citadas de Biot, Regnault, Thiesen y otras, que la relación que liga estos dos valores es una relación exponencial.

b) Caldas dedujo su factor, que él llamó "exponente" de unos muy pocos experimentos. Es cierto que hizo muchas operaciones combinando entre sí los distintos datos obtenidos, pero las observaciones directas fueron en realidad cuatro.

c) Las observaciones que hizo Caldas lo fueron dentro de temperaturas de ebullición del agua muy próximas entre sí (la mayor fue la de Popayán: 75°65, la menor la de Tambores 71°75R), lo que no le permitió encontrar un valor promedio más acertado.

VI

CONCLUSIONES

Del estudio anterior se deduce:

- Caldas fue el primero en señalar que existe una relación entre la temperatura de ebullición del agua y la altura barométrica, en un mismo lugar.
- Fue igualmente el primero en hallar una ecuación que ligara estos dos valores.
- Si bien la fórmula de Caldas no es exacta, sí tiene el mérito de la originalidad.
- Los físicos que estudiaron posteriormente este fenómeno lo estudiaron indirectamente, pues partieron del principio físico de la tensión del vapor de agua.
- Por tanto, ante la Historia de la Física, Caldas debe ser considerado, sin lugar a duda, como el verdadero inventor de la HIPSOMETRIA.

Bogotá, diciembre 4 de 1951.