

RESUMO DA MEMÓRIA "SOBRE UN NUEVO MÉTODO DE MEDIR LA ALTURA DE LAS MONTANAS POR MEDIO DEL TERMOMETRO Y EL AGUA HERVIENDO" POR DON FRANCISCO JOSÉ DE CALDAS, DATADA DE QUITO, ABRIL DE 1802

Ricardo Ferreira

Departamento de Química Fundamental, UFPE, Cidade Universitária, 50739, Recife, Pernambuco.

Recebido em 30/09/90

The Memoir first published in 1802 by the noted Colombian scientist F.J. de Caldas is reprinted in a condensed and annotated form. Caldas, isolated in his native Andes, was the first scientist to describe how the altitude of a place can be measured from the decrease in the boiling temperature of water. He clearly related this effect to the reduced atmospheric pressure at high altitude places.

1. BREVE NOTÍCIA BIOGRÁFICA:

Francisco José de Caldas, o cientista-mártir da Colômbia, nasceu em 1768 em Popayán, na Cordilheira dos Andes, perto da atual fronteira com o Equador. Sua cidade natal fica a 1760 metros de altitude e nas vizinhanças do vulcão Puracé. Aos 25 anos Caldas formou-se em advocacia, em Santa Fé (como então se chamava Bogotá) mas apenas para satisfazer seus pais, ricos fazendeiros. Seu interesse foi sempre pelas ciências: astronomia, geologia e meteorologia, além de botânica. Em dezembro de 1801 encontrou-se em Ibarra com o grande naturalista alemão Humboldt, com quem conviveu durante alguns meses.

Em 1805, Don José Celestino Mutis, o grande naturalista nascido em Cadiz e educado nos melhores centros da Europa, nomeou Caldas como Diretor do Observatório Astronômico de Santa Fé, construído em 1803. Durante oito anos Caldas editou um "Seminário" e as "Memórias Científicas do Observatório".

Em 20 de junho de 1810 Caldas toma parte decisiva nos acontecimentos que deram início à penosa guerra da Independência, sob o comando de Simon Bolívar. Caldas foi o fundador do primeiro jornal da jovem Província Unidas de Granada, o "Diário Político de Santa Fé de Bogotá". Em 1816 o governo da Espanha mandou um grande exército para reprimir a rebelião e que reconquistou muitas cidades do país. Caldas, com o posto de Coronel de Engenharia do Exército Patriota, esteve em muitas campanhas, e na batalha de Cuchilla del Tambo caiu em poder dos espanhóis. Conduzido preso a Bogotá, foi julgado sumariamente e fuzilado a 29 de outubro de 1816, aos 48 anos de idade.

Francisco José de Caldas, cujo destino foi semelhante ao do nosso Frei Caneca (fuzilado em 1825), é reverenciado no seu país, a tal ponto que um dos Departamentos (Estados) tem o seu nome; é uma região a oeste de Bogotá, produtora do melhor café colombiano.

2. A MEMÓRIA DE 1802

A memória foi impressa em Quito, em abril de 1802. É um folheto de 25 páginas de tiragem muito reduzida e praticamente inacessível hoje. Uma segunda edição foi publicada em Bordeaux em 1819, três anos após a morte de Caldas, e teve maior difusão. Finalmente, em 1873, o trabalho foi publicado na *Revista de Filosofia, Literatura y Ciencias* de Sevilha. (Po-

de ser encontrado nas *Obras completas de F. J. Caldas, editada em Bogotá pela Universidad Nacional de Colombia, em 1966*).

Na memória, Caldas descreve as experiências que levaram-no a descobrir o método de medir a altitude de um lugar pela temperatura de ebulição da água. Ao tentar recalibrar seu único termômetro, quebrado num acidente, ele percebeu que em Popayán, a 1760 metros acima do nível do mar o ponto de ebulição da água ficava abaixo dos 80° da escala Reaumur. Ele raciocinou que a pressão de vapor saturante da água na temperatura de ebulição é igual à pressão atmosférica agindo sobre a superfície da água e medida pela altura da coluna barométrica. Como Caldas conhecia bem a técnica de medir a altitude pela coluna do barômetro, viu que a temperatura de ebulição da água era uma maneira indireta, mas precisa, de medir a altitude do lugar.

É realmente extraordinário que Caldas, completamente isolado do mundo científico de então, nas montanhas e nevoeiros de sua terra natal, tenha feito uma descoberta deste porte. Faz alguns anos¹ citei a opinião de Priestley, segundo o qual se os cientistas escrevessem "engenhosa e analiticamente, e não de maneira sintética" veríamos o quanto, em ciência, se deve à intuição. A síntese, exigida cada vez mais pelos editores modernos de revistas científicas, é possivelmente inevitável dado o crescimento exponencial dos trabalhos de pesquisa, mas não há dúvida de que a gênese dos trabalhos não pode mais ser aferida a partir das comunicações impressas. Felizmente que Caldas pode escrever "engenhosa e analiticamente", de maneira que sua memória é muito valiosa para a história das idéias científicas, e um desafio para todos os cientistas da América Latina.

3. TEXTO DA "MEMÓRIA", RESUMIDO E COMENTADO:

1. En un pequeño viaje que hicimos² al volcán de Puracé, distante cinco leguas al este de Popayán, para reconocer sus bocas, elevación, término de la nieve permanente en esta latitud, muchas vertientes de aguas minerales y plantas, no tuve acontecimiento más feliz que romper un termómetro por la extremidad del tubo. Si, este fue el fruto más precioso de esta expedición porque fue la causa de que nacieran en mi alma ideas que de otro modo nunca se habrían excitado.

2. Restituido a Popayán sin más termómetro que el que acababa de romper, con el dolor de ver interrumpida una serie de observaciones comenzadas, traté de hacer útil lo que me quedaba de este instrumento. El término del hielo -me decla-, aunque ha quedado invariable, es preciso que baje a causa del mercurio, que se ha de derramar cuando lo hierva; pero nosotros gozamos de la nieve todo el año, y es fácil obtener el término inferior de mi escala. En mis primeras reflexiones creí que el calor³ del agua hirviendo me daría con igual seguridad el término superior. Sin profundizar más sobre la verdad de estos principios, tomo agua de lluvia con precaución, la hiervo, sumerjo mi termómetro, deajo que evacue todo el mercurio superabundante, lo cierro y creo tener un extremo de mi nueva escala. Hago venir nieve, la machaco y envuelvo en ella la bola del termómetro; señalo el punto en que se detiene y pienso que no faltaba ya otra cosa que dividir el espacio contenido entre dos puntos en 80 partes, si quería la escala de Reaumur, y en 180 si la de Fahrenheit. Pongo en ejecución mi pensamiento: hallo unos grados demasiado pequeños comparados con los que tenía el termómetro antes de romperse. El calor de la atmósfera de Popayán, tan conocido para mis anteriores observaciones, crece; y habría creído cualquiera, desnudo de este conocimiento, que esta ciudad tenía el temperamento de Neiva o Mariquita. Concluí en general que había error en los extremos de mi escala y que era necesario profundizar la materia. Ambos puntos, el hielo y el calor del agua, estarán afectados por alguna corrección precisa que he omitido? Tendrá la nieve menos frío en la vecindad de la línea⁴? Resucitará la opinión de que el hielo es más frío en razón de la latitud? Yo había tenido cuidado de sumergir mi termómetro muchas veces en la nieve antes de que se rompiese, y siempre había bajado exactamente al término de la congelación. No podía pues concluir nada contra la invariabilidad del término inferior. Por el contrario, mis observaciones sobre este objeto confirmaban su fijeza de un modo más victorioso que las del doctor Martine. Este físico había visto solamente que el hielo era tan frío a 56° 30' de latitud boreal, entre quienes no hay más diferencia que 3° 48'. Pero mis trabajos en este género prueban que mi termómetro, que señala 0° en Londres a 51° 30' de latitud, se detiene en el mismo punto a 2° 24' latitud, cuando se le sumerge en el hielo, y acabo de ver que lo mismo sucede en Quito a 13' de latitud austral. El hielo es pues igualmente frío bajo de la línea que a 51° 30' de latitud boreal, en un país bajo como Londres, a 800 toesas⁵ en Popayán, y 1,600 sobre el mar en Quito; países tan diferentes por su clima y por sus producciones, que parecen los extremos.

3. Si tenía ideas claras y hechos que demuestran el término del hielo, había pensado muy poco en el del agua hirviendo. Desde entonces conocí que el error de mi escala se acumulaba sobre el término superior, y traté de adquirir nociones exactas sobre él, como las tenía del inferior. Bien presto vi que aunque el calor³ 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 solo la presión de 22P . 10² . 9, elevación del mercurio⁶ en Popayán, en lugar de 28 que se requieren para obtener el término superior de una buena escala⁷. Era pues preciso aumentar el espacio entre los dos puntos fundamentales, tanta cantidad cuanto corresponde a 5P . 1² . 1 de mayor presión del agua. Pero sobre qué principios debía establecer mi cálculo? Muy poco o nada se ha escrito, diré mejor muy poco o nada ha llegado a mis manos sobre

este particular. Todos los físicos, todos los artistas cierran sus termómetros cuando el barómetro está a 28 pulgadas, y Déluca adopta la altura de 27 como más general en las ciudades de Europa. La única luz, y esta escasa, que tenía era un pasaje de M. Sigaud de la Fond en el cual dice del doctor Martine: "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". La expresión algo menos, que no asigna una cantidad determinada, me arrojaba en la incertidumbre y en la imposibilidad de poder verificar en mi termómetro el término superior de la escala, sin pasar a un lugar bajo en que ascendiese mil barómetro a 28P. La necesidad era urgente y no podía hacer un viaje costoso por solo este interés. Dirigí todas mis fuerzas a ver si podía verificar mi escala sin salir de Popayán.

4. Dos grados de Fahrenheit hacen 0°.888 de Reaumur. Serán acaso el algo menos del doctor Martine las dos últimas cifras de la fracción antecedente? Quiero creer que esta es la cantidad que asigna este físico; quiero por ahora calcular con solo 0°.8 de Reaumur para una pulgada de barómetro, y será:⁸

$$122 : 0^\circ . 8 :: 5P1^2 . 1 = 61^2 1 \dots \frac{61^2 . 1 \times 0^\circ . 8}{12} = 4^\circ . 073$$

Debo, pues, conforme a este cálculo, añadir 4°.073 al término superior que dé el calor del agua en Popayán, y la unidad que debe servir para verificar esta cantidad le hallo así:

$$80^\circ - 4^\circ . 073 = 75^\circ . 927$$

Por consiguiente debo dividir en el nivel de Popayán el espacio comprendido entre el hielo y el agua hirviendo en 75°.927, y este es el calor³ que tiene este fluido a la presión de 22P . 10² . 9.

5. Tales fueron los resultados de mis combinaciones, resultados que no contentaban mi escrupulosidad. Ellos eran el producto de dos números que aún 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.

6. Apesar de las observaciones hechas en Portobelo, en Panamá, Manta, Guayaquil, por los astrónomos Godin, Bouguer, De la Condamine, Juan, Ulloa, quedamos en la incertidumbre sobre la altura del barómetro al nivel del mar entre los trópicos.⁹ El tiempo que se mantuvieron estos sabios sobre nuestras costas fue muy limitado, y el resultado de sus observaciones, vario. Si reflexionamos sobre sus escritos, si nos tomamos el trabajo de compararlos y tenemos presente el estado de nuestros conocimientos en aquella época, hallaremos que las variaciones son mayores en los lugares bajos, y mucho menores en el clima de las montañas: que sus determinaciones van desde 27 . 11 hasta 28 1/2²; que en 1735 y 36 no se pensaba en disminuir la columna de mercurio dilatada por 27, por 28 y muchas veces por 29 grados de calor en la escala de Reaumur; que es bien dudoso que se haya tomado la precaución de no deducir la altura media de la suma de todas las observaciones, partida por su número, método que ha expuesto a muchos a los mayores errores, y que ha inutilizado tantos trabajos preciosos; y en fin, que su elevación media es la indicada

por un barómetro simple y único, y nunca por muchos tubos de diferente densidad y calibre. Qué desconfianza no deben inspirarnos estas reflexiones! Esta materia la he tratado con más extensión en mi Memoria sobre la elevación media del mercurio entre los trópicos al nivel del mar.

7. Aún 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 $0,8$ por 12 líneas del barómetro es una adivinanza¹⁰. De estos principios, que se me presentaban con toda la fuerza de su verdad, concluí que el calor³ del agua en Popayán era incierto, y que era preciso buscarle de un modo directo e independiente de toda suposición.

8. Aquí habría acabado la lucha con mi escala si hubiera hallado un termómetro que substituir al primero. Las observaciones comenzadas se iban a inutilizar y he aquí un poderoso motivo que me anima: duplico mis esfuerzos, leo los pocos físico que tengo y comienzo a meditar con seriedad. Un día revolviendo en mi espíritu todas las ideas expuestas hasta aquí, quiero volver sobre mis pasos para aclararlas, y tomo un camino inverso. "El calor³ del agua herviendo 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,¹¹ logo 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". Será este un verdadero descubrimiento? Habré adivinado 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 hayan presentado estas ideas? Siendo tan claras, se habrán ocultado a Reaumur, Delisle, Fahrenheit, Deluc y Sucion? El libro más reciente que tengo es Sigaud; lo consulto de nuevo; no hallo nada que se parezca a mi teoría. Indica, es verdad, un método de medir las alturas por el termómetro, pero qué diferente! qué imperfecto! Habría suprimido el del calor del agua si hubiera sido conocido al tiempo que escribía? Por lo menos concluyo que hasta esta época no se ha pensado en él. La simplicidad de los principios, la claridad de las ideas me inspiraban, a pesar de estas reflexiones, una grande desconfianza. *Es posible-me volvía a preguntar-que se hayan ocultado estas pequeneces a tan grandes hombres?*¹² Es verdad que la historia nos presenta ejemplos que no se pueden leer sin humillación. Quién creyera que los antiguos que poseyeron el arte de hacer el vidrio no alcanzaron a usar de él para defenderse del aire y del frío sin privarse de la luz? Que los peruanos que erigieron unos edificios que hacen nuestra admiración, no supieron formarse una ventana? Puede ser que a estos sabios, ocupados siempre de grandes objetos, se hayan escapado estas ideas.¹³ *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 a algún pueblo de la tierra llegar a ser sabio sin una acelerada comunicación con la culta Europa?* Qué tinieblas las que nos cercan! Pero ah! ya dudamos, ya comenzamos a trabajar, ya deseamos. Esto es haber ilegado a la mitad de la carrera. Cuál es ese genio bienhechor que nos ha conducido hasta este término? Mutis llega a nuestras costas; la luz raya sobre nuestro hemisferio, levanta el grito y despierta a este mundo aletargado.

9. Sean conocidas o nuevas, yo debo perfeccionarlas-me decla-debo consultar a la experiencia. Se lo primero, tendremos un ejemplo de que una misma verdad se presenta al mismo tiempo a muchos: comparemos los trabajos del europeo con los del hijo de Popayán; veremos los caminos que han seguido, sus resultados, y tal vez unos corregidos por los otros perfeccionarán esta teoría. Aun cuando haya salido 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-decla-, no es una pereza reprehensible abandonar una materia que puede tener consecuencias importantes?

10. Estas reflexiones me inspiran un valor superior a los obstáculos que me rodean, me hacen tomar la resolución de trabajar en cuanto esté de mi parte. Pero por dónde debo comenzar? Qué principios deben guiarme en mis indagaciones? Solo, aislado, sin luces, sin libros, sin instrumentos, mi mano debe formar, yo he de ser el creador de cuanto necesite para poder dar un paso en los trabajos proyectados. El primero debe ser una observación del calor del agua en Popayán con un termómetro exacto. Qué dificultad! Aún no he comenzado; ya estoy detenido en mis trabajos. Nada me acobarda, indago con el mayor cuidado y de todos modos si existe alguno en Popayán en Popayán y en qué maos. Descubro dos, el uno de espíritu de vino que no me podía servir; el otro de mercurio hace el objeto de mis deseos; lo consigo sin dificultad; era de Dollond, cerrado en Londres; examino el término del hielo, y lo hallo exacto; no puedo sujetar a igual examen el término superior, y lo supongo bien establecido; divido el espacio fundamental en 80° : le adapto un nonio* que subdivide en diez partes cada grado; tomo agua de lluvia, la hiervo, sumerjo el termómetro, avivo el fuego, el mercurio se detiene, se fija en $75^{\circ}.7$; salto de contento;¹⁴ qué cerca de mis primeras conjeturas! Mis ideas comienzan a confirmarse por la experiencia. Depongo por este momento mis escrúpulos, adopto 28 pulgadas del barómetro al nivel del mar, y 80° del termómetro por calor del agua a esta presión; conozco que este es de $75^{\circ}.7$ a $22^{\text{P}} 10^{\text{L}}.9$ en Popayán; emprendo el cálculo de lo que debe variar por una pulgada en el barómetro: obro así:

$$28^{\text{P}} - 22^{\text{P}} 11^{\text{L}} = 5^{\text{P}} 1^{\text{L}} = 61^{\text{L}};$$

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

$$61^{\text{L}} : 4^{\circ}.3 :: 12^{\text{L}} : \frac{12 \times 4^{\circ}.3}{61} = 0^{\circ}.8 \text{ grados de } \pm$$

* Interessante que Caldas use a palavra *nónio*, que vem do nome do matemático português Pedro Nunes, do século XVI. É comum este dispositivo de medida ser chamado *vernier*, do nome do cientista francês Pierre Vernier, do século XVII.

en el termómetro de Reaumur por 12 líneas de \pm en el barómetro. Qué bien había adivinado el algo menos del doctor Martine.

11. Con este resultado comienzo un cálculo inverso; empujando a conocer por él y por el calor del agua en Popayán la altura del barómetro que le corresponde:

$$0^{\circ}.8 : 12^{\ell} :: 4^{\circ}.3 : \frac{4^{\circ}.3 \times 12^{\ell}}{0^{\circ}.8} = 64^{\ell} = 5^{\text{P}} 4^{\ell};$$

$$28^{\circ} 5^{\text{P}} 4^{\ell} = 22^{\text{P}} 8^{\ell}$$

altura del mercurio en el barómetro correspondiente a Popayán. No difiere de lo que indica este instrumento sino en $8^{\ell}.9$. Este resultado tiene una precisión 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 reprendo, entro en nuevas reflexiones para remover obstáculos, distingo los que me parecen invencibles de los que no son; solo queda la altura del barómetro en el mar, entre los primeros; los segundos no exigen sino paciencia y trabajo para desaparecer.

12. A este tiempo un amigo* quiere que le acompañe a una bella casa de campo que posee en las faldas de la famosa cordillera de los Andes, y situada a muchas toesas sobre el nivel de Popayán. No pierdo esta ocasión: manifiesto a mi amigo mis ideas, hallo las más favorables disposiciones en él, y animados del mismo celo, partimos con nuestros instrumentos. Qué actividad, qué constancia la del compañero de mis trabajos. No esquivo hacer los oficios más penosos y humildes. A pesar de la educación bárbara que se le dio en su juventud, ha sabido sacudir las preocupaciones, conoce el camino de la verdad, trabaja con utilidad propia y de sus compatriotas. Libros, instrumentos, luces, he aquí el objeto de su ambición. Cuánto debo a este amigo generoso! La mitad de la gloria, si alguna merecen estos pequeños trabajos, a él le pertenece. Estoy seguro que a no haberme auxiliado con su persona y con sus bienes, estaría ya mis ideas sepultadas en el olvido. Faltaría a las leyes del reconocimiento si no le diera este testimonio de mi gratitud y de mi amor.

13. Hacemos muchas experiencias en Poblazón: subimos a un cerro inmediato nombrado **Buenavista**; observamos el calor del agua: los resultados son aproximados y tienen el mismo grado de precisión que he hallado para Popayán. Nuevas pruebas de la incertidumbre de la altura media del barómetro en el mar. Qué elemento tan necesario para mis indagaciones! Cómo asegurarme, cómo saber con exactitud la altura de esta columna sobre nuestras costas? O verificarla bajando a ellas, o dirigir el cálculo de modo que no exija este principio, tomo este camino, y el modo de ejecutarlo es el siguiente:

14. Hago a Popayán el centro de mis operaciones; fijo la altura media del mercurio en esta ciudad, de un modo escrupuloso y seguro; determino el calor del agua destilada en su

nivel, por repetidas experiencias; refiero a este mis observaciones y *destierro de mis cálculos el principio de 28 pulgadas al nivel de mar*.¹⁵ Cuando por nuevas y exactas observaciones conozcamos este principio fundamental, no tendremos sino aplicarlos, sin alterar en nada los resultados de mis observaciones.

15. Los cálculos relativos al nivel de Popayán con el exponente 0° me manifiestan que es preciso aumentarlo, y resuelvo un viaje a la cordillera. Rectifico de nuevo mis instrumentos; destilo agua, que sujeto a las pruebas de la solución de plata (nitrato de plata) y de mercurio (nitrato de mercurio), y provisto de lo necesario, parto el 22 de julio de 1801.¹⁶

16. Antes de exponer los resultados de mis trabajos sobre esta famosa cadena de montañas, es preciso saber que la altura del barómetro en Popayán, por mis últimas observaciones hechas con el mayor cuidado, es de $22^{\text{P}}.11^{\ell}.2$, es decir 0.3 mayor que la que asignamos anteriormente, y que el calor del agua presión es de $75^{\circ}.65$ de la escala de Reaumur.

17. En un sitio nombrado **Las Juntas** hago mi primera observación. El barómetro se sostuvo aquí en $21^{\text{P}}.9^{\ell}.14$, más bajo que en Popayán; hiervo el agua; el licor del termómetro se detiene en ella a $74^{\circ}.5$; calculo el exponente por esta observación.

Altura del barómetro en Popayán. $22^{\text{P}} 11^{\ell}.2$ Calor del agua $75^{\circ}.65$

En Las Juntas $21^{\text{P}} 9^{\ell}.0$ Calor del agua $74^{\circ}.50$
Diferencias $1^{\text{P}} 2^{\ell}.2$ $1^{\circ}.15$

$$1^{\text{P}} 2^{\ell}.2 = 14^{\ell}.2 : 1^{\circ}.15 :: 12^{\ell} : \frac{12 \times 1^{\circ}.15}{14.2} = 0^{\circ}.971$$

de Reaumur, por 12 líneas del barómetro.

18. Subo un poco más, hago mi segunda observación en **Paispamba**, pequeña hacienda a cinco leguas al sur de Popayán. El barómetro se sostiene en $20^{\text{P}}.9^{\ell}.1$ y el calor del agua es de $73^{\circ}.5$.

Altura del barómetro en Popayán. $22^{\text{P}}.11^{\ell}.2$ Calor del agua $75^{\circ}.65$

En Paispamba $20^{\text{P}}.9^{\ell}.1$ Calor del agua $73^{\circ}.50$
Diferencias $2^{\text{P}}.2^{\ell}.1$ $2^{\circ}.15$

$$2^{\text{P}} 2^{\ell}.1 = 26^{\ell}.1 : 2^{\circ}.15 :: 12^{\ell} : \frac{12 \times 2^{\circ}.15}{26.1} = 0^{\circ}.988$$

grados del termómetro de Reaumur por 12 líneas del barómetro.

19. Mil alegría fue extrema al ver el resultado de esta segunda observación. Qué conformidad en el exponente! No difiere del primero sino en $0^{\circ}.017$ milésimas, cantidad que no la puede indicar el más delicado instrumento.

20. Animado por unos resultados tan felices, doy un paso más: subo a un cerro al este de **Paispamba**, llamado **Sombrosos**; el barómetro se mantiene en $19^{\text{P}}.6^{\ell}.05$; el agua hierve a $72^{\circ}.4$.

* don Manuel Maria Arboleta

Altura del barómetro en Popayán. 22P . 11^l . 20 Calor del agua 75° . 65

En Sombreros 19P . 6^l . 05 Calor del agua 72 . 40
Diferencias 3P . 5^l . 15 Calor del agua 3° . 25

$$3P . 5^l . 15 = 41^l . 15 : 3^o . 25 :: 12^l : \frac{12 \times 3^o . 25}{41.14} = 0^o . 948$$

del termómetro de Reaumur por 12 líneas del barómetro

21. Hé ahí un resultado acorde con los antecedentes; he ahí tres observaciones que demuestran que más de nueve décimas de un grado en el termómetro de Reaumur de \pm en el calor del agua corresponden a 12 líneas del barómetro.

22. Resuelvo subir más: llego a la cima de otro cerro llamado **Tambores**. El barómetro se sostiene aquí a 18P . 11^l . 6; el agua marca 71° . 65.

altura del barómetro en Popayán. 22P . 11^l . 2 Calor del agua 75° . 65

En **Tambores** 18P . 11^l . 6 Calor del agua 71° . 75
Diferencias 3P . 11^l . 6 Calor del agua 3° . 90

$$3P . 11^l . 6 = 47^l . 6 : 3^o . 90 :: 12^l : \frac{12 \times 3^o . 90}{47.6} = 0^o . 983$$

el termómetro de Reaumur por 12 líneas del barómetro.

23. Me lleno de satisfacción al ver este último número; se disipan mis dudas, me confirmo de la incertidumbre sobre la altura del barómetro en el mar, y conozco que más de 9 décimas es el exponente verdadero; que la presión indicada por el barómetro no se distingue de la que da el calor del agua, y en fin, que mis ideas están comprobadas por la experiencia.

24. Emprendo un nuevo trabajo: combino las más satisfactorias; les elijo con prudencia y con precaución, pues se trata de fijar un exponente que va a ser el fundamento de todos los cálculos posteriores; tomo las observaciones de **Las Juntas** y **Sombreros** y calculo de nuevo el exponente.

Altura del barómetro en **Las Juntas**. 21P . 9^l . 00 Calor del agua 74° . 60

En **Sombreros** 19P . 6^l . 05 Calor del agua 72° . 40
Diferencias 2P . 2^l . 95 Calor del agua 2° . 20

$$2P . 2^l . 95 = 26^l . 95 : 2^o . 20 :: 12^l : \frac{12 \times 2^o . 20}{26.95} = 0^o . 979$$

del termómetro de Reaumur por 12 líneas del barómetro.

25. Hago lo mismo con las observaciones de **Paispamba** y **Tambores**.

Altura del barómetro en **Paispamba**. 20P . 9^l . 1 Calor del agua 73° . 50

En **Tambores** 18P . 11^l . 6 Calor del agua 71° . 75
Diferencias 1P . 9^l . 5 Calor del agua 1° . 75

$$1P . 9 . 5 = 21^l . 5 : 1P . 75 :: 12 : \frac{12 \times 1^o . 75}{21.5} = 0^o . 976$$

del termómetro de Reaumur por 12 líneas del barómetro.

26. No podemos ya dudar que más de 9 décimas es el exponente verdadero. Fijemos de una vez este elemento suspirado. Reúno en una suma los seis resultados, *parto por el número de ellos* y el cociente 0° . 974 es el número que buscamos¹⁷, el que expresa la cantidad de \pm en el termómetro de Reaumur por 12 líneas del barómetro.

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

28. Como el exponente 0° . 974 : a 12 líneas : : así la diferencia del calor del agua del lugar con el de Popayán, por ahora, o con el del mar cuando se conozca: a un número de pulgadas, líneas, etc. del barómetro, que se quitarán si el lugar está sobre, y se añadirán si está debajo del nivel de Popayán; respecto del mar siempre se quitarán de la altura mercurial. Ensayemos la aplicación de estos principios.

29. El calor³ del agua en **Tambores** es de 71°75; se pide la altura correspondiente del barómetro.

Calor del agua en Popayán 75.65
En **Tambores** 71.15
Diferencia 3.90

$$0^o . 974 : 12^l : : 3^o . 90 : \frac{3^o . 90 \times 12}{0^o . 974} = 48^l . 05 = 4P . 0^l . 05$$

Como **Tambores** está sobre el nivel de Popayán, resto este resultado de la altura del barómetro en esta ciudad.

Altura del barómetro en Popayán 22P . 11^l . 20
Resultado 4P . 00^l . 05
Residuo . 18P . 11^l . 15 altura del barómetro en **Tambores**.

Comparemos el resultado del cálculo con la observación que hice sobre este cerro.

Altura del barómetro en **Tambores** 18P . 11^l . 60
Altura del barómetro calculada por el calor del agua.
18P . 11^l . 15
Diferencia 00P . 00^l . 45

30. No se puede desear mayor exactitud. Si queremos una expresión general de este cálculo, hagamos:

a = la altura del barómetro en Popayán o el mar;

b = calor del agua en los mismos lugares;

c = el exponente;

e = 12 líneas;

d = calor del agua en un lugar cualquiera;

x = altura del barómetro en este lugar.

TABLA 1

LUGARES	Calor del agua		Alturas del barómetro observadas	Altura del barómetro calculadas por el calor del agua		Diferencias
	T. Reaumur	T. Fahrenheit				
Popayan	75°.65	202°.21	22P.11 ^l .2			
Juntas	74°.50	199°.62	21P. 9 ^l .0	21P. 9 ^l .04		+ 0 ^l .04
Paispamba	73°.50	197°.37	20P. 9 ^l .1	20P. 8 ^l .72		- 0 ^l .38
Sombremos	72°.40	194°.90	19P. 6 ^l .05	19P. 7 ^l .15		+ 1 ^l .10
Tambores	71°.75	193°.43	18P.11 ^l .6	18P.11 ^l .15		- 0 ^l .45
Estrellas	73°.30	196°.87	20P. 7 ^l .0	20P. 6 ^l .25		- 0 ^l .75
Poblazón	74°.30	199°.17	21P. 6 ^l .9	21P. 6 ^l .59		- 0 ^l .31
Buenavista	73°.80	197°.05	21P. 1 ^l .15	21P. 0 ^l .5		- 0 ^l .65

Razonando como anteriormente, obtendremos:

$$a \pm \frac{(b - d) c}{c} = x, \text{ con referencia a Popayán.}$$

$$a - \frac{(b - d) e}{c} = x, \text{ con referencia al mar.}$$

31. Siguiendo estos principios, he calculado las alturas del barómetro correspondientes a los lugares en que he observado el calor del agua, como llevo referido, y de otros e que lo observé durante mi regreso a Popayán. La tabla siguiente representa de una ojeada los lugares, calor del agua en la escala de Reaumur y de Fahrenheit, las alturas del barómetro observadas, y las mismas calculadas por el calor del agua, con las diferencias entre unas y otras (tabla 1).

32. Siete observaciones del calor del agua, siete alturas del barómetro calculadas por ellas y comparadas con las observadas, que no difieren sino en cantidades que nuestros instrumentos no nos pueden indicar, que en seis no llega el error a una línea y en otra no para de 1^l. 1 anuncian un método seguro para medir las elevaciones de los lugares sin el auxilio del barómetro.

33. Este era el estado de mis trabajos cuando me fue preciso pasar a Quito por intereses particulares. Me alegraba de una ocasión que se me iba a presentar para poder multiplicar mis observaciones en niveles tan diferentes como tienen los países que era preciso atravesar. A pesar de los deseos que me animaban de ponerlas en práctica, no pude hacer sino tres; la una en el valle abrasador del Patía, la otra en Pasto y la última en Quito. Aun estas no se habrían verificado sin el socorro de

un amigo celoso e ilustrado, que era mi único compañero de viaje. No puedo dejar de hacer mención de él, en muestra de mi reconocimiento. La tabla siguiente presenta de un golpe todos nuestros resultados (tabla 2).

34. La llegada del señor Barón de Humboldt se acercaba: espero con impaciencia a este joven sabio para salir de mis dudas. Con su trato me confirmo en que la altura media del mercurio al nivel del mar en la vecindad del ecuador es dudosa, y que absolutamente ignoramos el calor del agua en el mismo. Manifiesto mi método, pregunto si es nuevo. Cree este sabio, a primeira vista, que Sucio había trabajado sobre esta idea; ve sus manuscritos y me contesta: **Sucio no ha pensado como usted en agua hirviendo; sus trabajos se ha limitado al temple de la atmósfera; asigna 640 pies de altura por un grado en el termómetro¹⁸, y yo he observado en el pico de Teide que da muy bien este coeficiente cuando el día es sereno y su obra en lugares elevados.** Desde este momento entro en posesión de este, si se puede llamar, pequeño descubrimiento. Qué diferencia del método de Sucio al mío! qué imperfecto el del primero! qué precario! Sucio no es sino el perfeccionador de las ideas de Heberden, ideas expuestas a los mayores errores, casi impracticables y que exigen el juicio y la prudencia de un físico experimentado para poderlas aplicar con suceso. Cómo es posible que el temple de la atmosfera, variando hasta el infinito sobre un mismo nivel en que influye el lugar, la reflexión, un viento, una nube, la hora, puede servir con fijeza para determinar la elevación? Aun cuando se supongan dos observadores que de convenio observe al mismo momento, cuántas causas locales y particulares a cada estación alterará el licor del termómetro? Qué raro, qué difícil hallar un día perfectamente sereno! Y solo esta circunstancia cuán limitado hace el método de Heberden y de Sucio! Por el contrario, el del agua hirviendo presenta toda la comodidad, toda

TABLA 2

LUGARES	Calor del agua		Alturas del barómetro observadas	Alturas del barómetro calculadas por el agua hirviendo		Diferencias
	T. Reaumur	T. Fahrenheit				
Herradura	78°.50	208°.62	25P11 ^l .85	25P.10 ^l .31		- 1 ^l .54
Pasto	73°.60	197°.60	20P 9 ^l .85	20P. 9 ^l .95		- 0 ^l .10
Quito	73°.05	196°.30	20P 2 ^l .00	20P. 3 ^l .18		- 1 ^l .18

la precisión que se puede apetecer. Que sea el tiempo sereno, nublado, frío, caluroso, con viento; que el observador esté a cubierto, o expuesto, el agua hirviendo indicará siempre en el termómetro un calor proporcionado a la presión.

35. Por otra parte, el coeficiente de 640 por un grado es en el barómetro un coeficiente relativo a la altura, y es menester variarlo en los lugares bajos, en los medios, en los elevados, sin lo cual estaría el método expuesto a los más groseros errores y en contradicción con la teoría¹⁹. Este coeficiente constante es lo mismo que si le diésemos uno al barómetro, com lo hace Paulian, asignando 12 toesas de altura por una línea de menos en este instrumento. Es preciso no estar iniciado en la física para admitir un principio tan erróneo. Los trabajos hechos em Quito a principios del siglo pasado hacen ver que en la elevación de Caraburfn ya es necesario subir 17 toesas para que el barómetro baje una línea. Yo pienso que todo coeficiente constante relativo a la altura es un absurdo.

36. No se pueden objetar estos defectos a mi coeficiente. Este es relativo a la presión, aumenta la altura en donde se disminuye aquella, es relativo al barómetro, y todas las indagaciones sobre la ley y la progresión que conviene 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 is ideas, creyó que mi coeficiente tenía los mismos defectos que el de Sudio; pero meditado el caso convino conmigo e esta preciosa propiedad de mi coeficiente, que le distingue de todos.

37. 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*²⁰. 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 podría haber termómetros comparables? No es esta invariabilidad del calor del agua hirviendo a la presión de 28 pulgadas 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.

4. A FÍSICO-QUÍMICA DO TRABALHO DE F.J. DE CALDAS.

Os fundamentos teóricos do método de Caldas baseiam-se na equação de Laplace (relação entre a pressão atmosférica e a altitude do local) e na equação de Clausius-Clapeyron, relacionando a variação na pressão de vapor de um líquido com a temperatura.

$$\frac{dp}{dy} = -\rho g \quad (1)$$

onde

p = pressão ρ = densidade do ar
y = altitude g = aceleração da gravidade

Supondo que a temperatura do ar é aproximadamente constante entre dois pontos separados pela altitude y, e se o ar for um gás ideal:

$$pV = RT \quad (2)$$

$$pV = p_0 V_0 \quad (3)$$

$$\frac{p}{p_0} = \frac{\rho}{\rho_0} \quad (4)$$

Onde p_0 e ρ_0 são a pressão e a densidade normais (nível do mar).

Substituindo em (1):

$$\frac{dp}{dy} = -\frac{\rho_0 g}{p_0} p \quad (5)$$

Portanto:

$$\frac{dp}{p} = -\frac{\rho_0 g}{p_0} dy \quad (6)$$

Integrando entre $y = 0$ e $y = y$ ($g = \text{constante}$)

$$\ln \frac{p}{p_0} = -\frac{\rho_0 g}{p_0} y \quad (7)$$

ou

$$p = p_0 e^{-\frac{\rho_0 g}{p_0} y} \quad (8)$$

Os valores numéricos são os seguintes:

$$\rho_0 = 1,20 \text{ kg/m}^3 \text{ (20}^\circ\text{C)}$$

$$g = 9,80 \text{ m/s}^2$$

$$p_0 = 1,01 \times 10^5 \text{ N/m}^2$$

Daf, (8) pode ser escrita:

$$p = p_0 e^{-1,16 \times 10^{-4} \text{ m}^{-1} \cdot y/m} \quad (9)$$

Pela equação de Clausius-Clapeyron:

$$\frac{dp}{dT} = \frac{\Delta H_v}{T \Delta V} \quad (10)$$

onde ΔH_v é a entalpia de vaporização (da água) e $\Delta V = V_g - V_l$. Assumido que $\Delta H_v = \text{constante}$ e que $\Delta V \approx V_g$ (e que o vapor da água se comporta como um gás ideal)

$$\frac{dp}{dT} = \frac{\Delta H_v}{R} \frac{p}{T^2} \quad (11)$$

ou

$$\frac{dp}{p} = \frac{\Delta H_v}{R} \frac{1}{T^2} dT \quad (12)$$

Integrando:

$$\ln \frac{p}{p_0} = \frac{\Delta H_v}{R} \left[\frac{1}{T_0} - \frac{1}{T} \right] \quad (13)$$

onde $T_0 = 373 \text{ K}$ e $T = (273 + t^\circ\text{C}) \text{ K}$; t é a temperatura de ebulição da água em graus centígrados. Usando $\Delta H_v = 44,01 \times 10^3 \text{ J/mol}$; $R = 8,314 \text{ JK}^{-1}\text{mol}^{-1}$, e os outros valores normais a equação (13) pode ser escrita

$$\ln \frac{p}{p_0} = 14,19 \frac{100-t}{273+t} \quad (14)$$

Igualando-se (14) com (7):

$$y/m = 1,12 \times 10^5 \frac{100-t / ^\circ\text{C}}{273+t / ^\circ\text{C}} \quad (15)$$

y será obtido em metros acima do nível do mar e t será a temperatura de ebulição em graus centígrados. Podemos dar um exemplo de aplicação da eq. 15. Assim, sendo o ponto de ebulição da água em Popayán (p.10) $75,7^\circ \text{ R}$, ou $94,6^\circ\text{C}$, a altitude de Popayán será:

$$y = 1,13 \times 10^5 \times \frac{100-94,6}{273+94,6} = 1650\text{m}$$

Uma análise detalhada dos trabalhos de Caldas está publicada por Juan P. Negret²¹.

AGRADECIMENTO

O autor deseja registrar seu agradecimento ao Prof. Carlos Alberto L. Filgueiras, por seu interesse e sugestões.

NOTAS E REFERÊNCIAS

1. Ferreira, R., *Ciencia e Cultura* (1973), 25, 1123.
2. Em 1801
3. i.e., temperatura.
4. Da linha do equador.
5. 1 toesa = 2,2m
6. 12 linhas = 1 polegada
7. $28^p = 27^p 12^l - 22^p 10^l . 9 = 5^p 1^l . 1$
8. Caldas supõe uma relação linear.
9. Além de flutuações horárias, g varia com a latitude.
10. Indução notável
11. Este é o raciocínio central de Caldas.
12. Notável a perplexidade de Caldas.
13. Americano do Sul! Talvez, na época, qualquer americano (itálicos do apresentador)
14. Alegria da descoberta.
15. Generaliza para 2 níveis relativos quaisquer.
16. Percebe que a presença de cloretos na água pode diminuir a temperatura de fusão do gelo.
17. Cálculo da média.
18. Apenas uma queda média da temperatura da atmosfera com a altitude do lugar.
19. Pois a dependência da pressão com a altura é exponencial.
20. Afirmção de independência científica; não há autoridades absolutas na ciência.
21. Negret, J.P., *The Physics Teacher*, May, 1986, pp.290-292.