

de la medición de altitudes. En efecto, si nos referimos á la fórmula de Laplace, se comprenderá que en el caso en que la altitud de la estación donde se observa sea conocida, ó se haya calculado previamente, servirá para conocer la altura barométrica al nivel del mar, considerada como incógnita. Procediendo de este modo se ha podido calcular las tablas de reducción de las que hemos dado una muestra.

Conocemos ya los instrumentos con que se mide la presión atmosférica, el modo de observar y las correcciones que se han de hacer en las indicaciones barométricas. Veamos ahora cómo han servido estas observaciones acumuladas para descubrir las leyes de variación de dicha presión en la superficie del globo terráqueo según las circunstancias variables de los tiempos ó de los lugares.

IV

VARIACIONES PERIÓDICAS DE LA PRESIÓN DE LA ATMÓSFERA. — VARIACIÓN DIURNA

Los barómetros de cuadrante, ya sean de mercurio ó bien aneroides, los que podríamos llamar *barómetros populares* aun cuando se valgan de ellos con frecuencia los observadores de profesión, suelen tener en el cuadrante, además de las divisiones que marcan los milímetros y que miden la presión, otras indicaciones del estado del tiempo formuladas de este modo: *buen tiempo fijo, buen tiempo, variable, lluvia, tempestad*, etc. Más adelante veremos hasta qué punto se puede confiar en la exactitud de estas predicciones del tiempo y cómo se deben interpretar por tal concepto las variaciones de presión que marca la aguja al recorrer las divisiones del cuadrante barométrico. Lo cierto es que estas variaciones acompañan á menudo ó preceden á los cambios que ocurren en el tiempo meteorológico del lugar, que son tan irregulares como estos cambios y que al parecer no obedecen á ninguna ley de periodicidad. En los climas de la zona templada especialmente, en donde la columna barométrica oscila de continuo entre límites bastante dilatados, quizás hubiera sido difícil desentrañar la ley de las variaciones diurnas, cuando por el contrario se la ha reconocido fácilmente entre los trópicos, donde la marcha del barómetro ofrece gran regularidad.

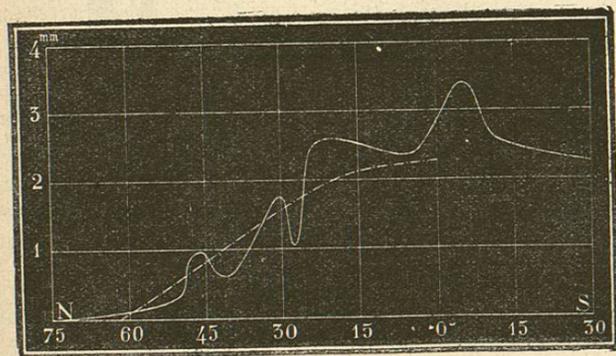


Fig. 37.—Variación de la oscilación diurna con la latitud

Véase cómo varía, por lo general, la presión barométrica en un lugar situado cerca del ecuador y en el intervalo de un día. Entre 8 y 10 de la mañana, el mercurio, que va subiendo progresivamente desde las 4, llega á su máximo de altura para volver á bajar poco á poco hasta eso de las 4 de la tarde, llegando á su altura mínima entre 3 y 4. A partir de este momento sube de nuevo hasta las 10 ó las 11 de la noche, á cuya hora alcanza un segundo máximo, y luego baja otra vez durante la noche hasta las cuatro de la madrugada, momento del segundo máximo. Hay que ad-

vertir que el máximo de las 10 á las 11 de la noche no es por lo regular tan alto como el de las 9 de la mañana, y que tampoco baja el mercurio á las 4 de la madrugada tanto como el mínimo de igual hora de la tarde.

Esta doble oscilación que, según veremos, se observa en todas las latitudes, es tan constante, tan marcada y tan regular en las regiones tropicales, que con razón ha podido decirse que la observación del barómetro podría suplir la falta de relojes y marcar la hora con suficiente exactitud (aserto controvertido á la verdad por algunos observadores) (1).

Sin embargo, los primeros físicos que observaron el barómetro en el ecuador no echaron de ver la *variación barométrica diurna*. Presumida ya en 1666 por Beale, no fué descubierta hasta 1722 en Surinam (Guayana holandesa), por un observador cuyo nombre se ignora (2), comprobada en 1740 en Chandernagor por Boudier; en 1741 en las Cordilleras por La Condamine y Bouguer, que atribuyeron su descubrimiento á Godín; en la Martinica en 1751 por Teobaldo de Chanvalón, y en 1761 en Santa Fe de Bogotá por Mutis. Otros muchos físicos observaron la variación diurna en varios puntos del globo; pero á Humboldt (1799) se deben las primeras observaciones exactas de la columna barométrica. Digamos de paso que si transcurrió medio siglo entre el descubrimiento de la variación y las observaciones del ilustre autor del *Cosmos* en Cumaná, fué porque todavía no se había dotado al barómetro de los perfeccionamientos que más adelante facilitaron tanto su uso á los viajeros, pues á mediados del siglo XVIII todavía se hacían las observaciones como en tiempo de Torricelli, es decir, llenando de mercurio el tubo en el momento de servirse de él.

Las investigaciones de Humboldt llamaron por fin la atención de los físicos sobre un fenómeno tan notable, y la ley descubierta con respecto á las regiones inmediatas al ecuador lo fué asimismo relativamente á las de la zona templada, por Swinden en Holanda, por Ramond en Clermont-Ferrand y por Hallstroem en Abo. Kaemtz contribuyó de 1827 á 1837 en Halle, por medio de una serie de observaciones hechas de

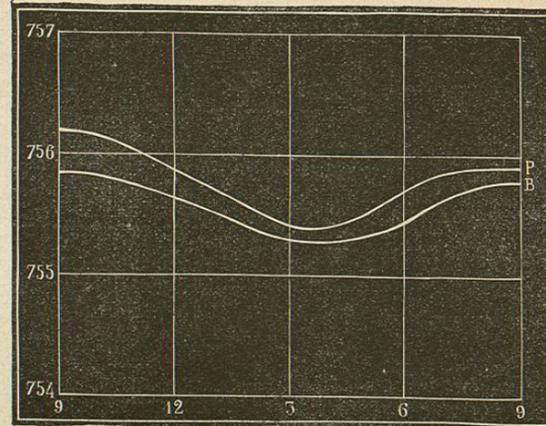


Fig. 38.—Oscilación diurna en París y en Bruselas (de 9^h m. á 9^h m.)

(1) El estudio de estas variaciones ha sido largo tiempo para mi objeto de observaciones asiduas de día y de noche, dice Humboldt. Es tanta su regularidad, que á la simple inspección del barómetro se puede averiguar la hora, sobre todo de día, sin temor de equivocarse en más de 14 á 17 minutos por término medio; y tan permanente, que no la perturban los temporales, ni las tormentas, ni la lluvia, ni los terremotos, persistiendo lo mismo en las cálidas regiones del litoral del Nuevo Mundo, que en las mesetas de más de 4,000 metros de altura, en donde la temperatura media baja hasta 7°. (*Cosmos*, I.)

(2) M. Boussingault, de quien tomamos parte de la historia de este descubrimiento, cita en su Memoria el extracto siguiente de una carta fechada en Surinam el año 1722: "El mercurio sube aquí todos los días con regularidad desde las 9 de la mañana hasta eso de las 11, y después baja hasta las 2 ó las 3 de la tarde, volviendo luego poco á poco á su primera altura. Durante todos estos cambios no varía más que de media línea á tres cuartos de línea (de 1^{mm}, 13 á 1^{mm}, 69)."

hora en hora, desde las 6 de la mañana á las 10 de la noche, á establecer todas las circunstancias del fenómeno.

La comparación de todas las observaciones ha demostrado que si la amplitud de las oscilaciones diurnas varía con la posición geográfica ó la latitud de los lugares, esta posición no ejerce al parecer influencia alguna en las horas de las máxima y de las mínima de la noche ó del día, es decir, en lo que se llama *horas trópicas*. Pero estas horas varían sensiblemente en un mismo lugar con las estaciones, y la amplitud de las oscilaciones disminuye cuando el observador se eleva á mayor altura siguiendo la ver-

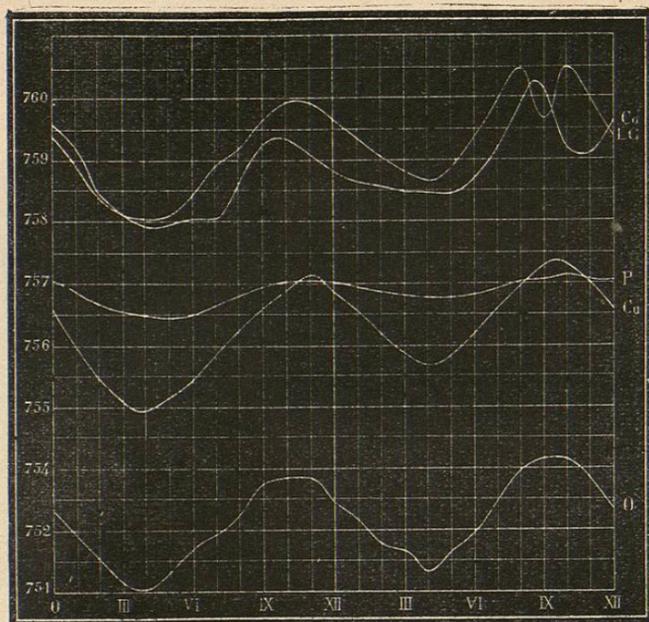


Fig. 39.—Variaciones diurnas en las regiones intertropicales. Las curvas de esta figura se refieren á las estaciones siguientes: O, Grande Océano; Cu, Cumaná; P, Padua; LG, La Guayra; Ca, Calcuta

tical, ó cuando la altitud del barómetro aumenta. Entremos acerca de estos puntos en algunos detalles.

Hablemos ante todo de la *amplitud* de las observaciones diurnas. Entiéndese por tal amplitud la diferencia que media entre las máxima y las mínima de la altura barométrica en un período diurno, diferencia que se calcula de muchos modos. Humboldt consideraba únicamente el máximo de las 9 á las 10 de la mañana y el mínimo de las 3 á las 4 de la tarde. Otros toman el máximo más alto y deducen de él el mínimo más bajo. En concepto de Kaemtz, ambos métodos son inexactos, y llama *oscilación diurna* á la diferencia entre el promedio de las máxima de la mañana y de la noche y el de las mínima (1). Entiéndese que, en todos los casos, no se trata de la

(1) Un ejemplo hará comprender la diferencia de estos métodos. En Abo, las máxima de la mañana y de la tarde son respectivamente $759^{\text{mm}},32$ y $759^{\text{mm}},47$; las mínima $759^{\text{mm}},03$ y $759^{\text{mm}},25$. El primer método da $0^{\text{mm}},29$ para la amplitud de la variación diurna, el segundo $0^{\text{mm}},44$ y el tercero $0^{\text{mm}},255$. M. Bous-singault ha deducido en La Guayra $760^{\text{mm}},50$ y $759^{\text{mm}},98$ para las máxima, $758^{\text{mm}},05$ y $758^{\text{mm}},68$ para las mínima. Según los dos primeros métodos, la oscilación diurna es igual á $2^{\text{mm}},45$, y según el de Kaemtz á $2^{\text{mm}},375$.

amplitud de un solo día, sino de la que puede deducirse de un crecido número de observaciones hechas en el mismo lugar.

La comparación de los resultados obtenidos por muchos observadores ha probado del modo más evidente que cerca del ecuador es donde la amplitud de las oscilaciones diurnas es mayor que en ninguna parte. Desde el ecuador va disminuyendo hacia los polos, y es nula entre los 60° y 75° de latitud, esto es, hacia el círculo polar. Kaemtz ha reducido al nivel del mar las variaciones diurnas observadas desde el ecuador hasta los 60° de latitud Norte; la ley que resulta de la discusión de estos datos está represen-

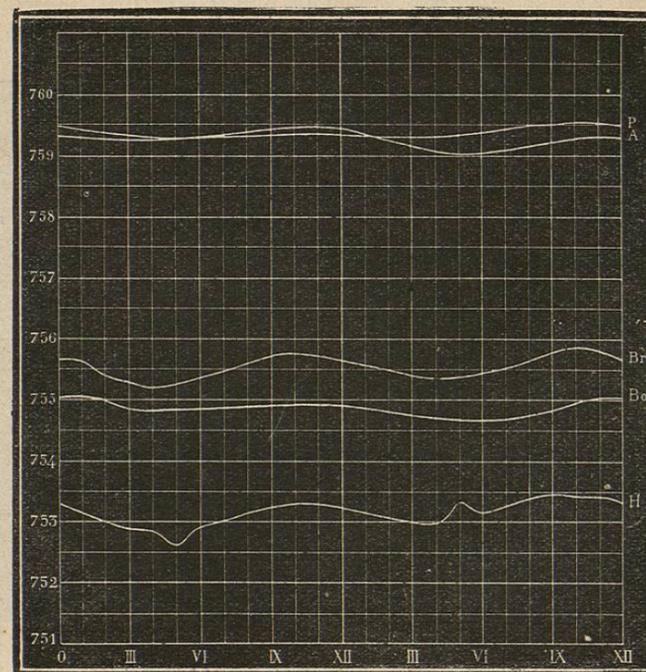


Fig. 40.—Variaciones diurnas en las altas ó medias latitudes. Las curvas de esta figura son las de las estaciones siguientes: H, Halle; Bo, Bossekop; Br, Bruselas; A, Abo; P, Petersburgo

tada en la curva puntuada de la figura 37. La otra curva representa las oscilaciones diurnas observadas en quince puntos diferentes, situados unos en las regiones tropicales, otros en latitudes comprendidas entre los 22° S. y los 74° N., pero no están reducidas al nivel del mar y se advierte en ellas la influencia de la altitud. Si se consideran dos lugares vecinos, como París y Bruselas, cuya latitud sólo difiere en 2 grados, llamará la atención la regularidad de la variación diurna, así como la similitud de las curvas que la representan (fig. 38), y se verá además que la amplitud es algo menor en Bruselas que en París, por estar esta última población más inmediata al ecuador, lo cual es una confirmación de la ley.

Según Kaemtz, el valor medio de la oscilación diurna es de $2^{\text{mm}},28$ en el mismo ecuador; pero el de la amplitud excede mucho de esta cifra, como lo prueban especialmente las observaciones de Bous-singault efectuadas á diferentes altitudes entre los 10° de latitud Norte y los 5° de latitud Sur. Dicho físico vió en 1832 que eran de $3^{\text{mm}},46$ en el puerto de Payta al nivel del mar, de $4^{\text{mm}},20$ en Cartago (valle del Cauca), á 978

metros de altitud, y de $4^{\text{mm}},40$ en Antioquía, á 629 metros. Lœvy ha deducido en Honda un valor de $4^{\text{mm}},75$ como oscilación diurna, más del doble del promedio admitido por Kaemtz al nivel del mar y en el ecuador.

Más allá del círculo polar es negativa, á juzgar por las observaciones de Parry, lo que equivale á decir que hay interversión entre las máxima y las mínima de la mañana y de la tarde. Con todo, en Bossekop (70° de latitud), Bravais observó solamente un retraso de dos horas, con una amplitud que apenas llegaba á $0^{\text{mm}},3$.

Si en lugar de marchar en el sentido de los meridianos, ó sea del ecuador al polo, el observador transporta su barómetro á altitudes progresivamente mayores, comprueba una ley muy semejante: la oscilación diurna va disminuyendo con la altura. Las curvas

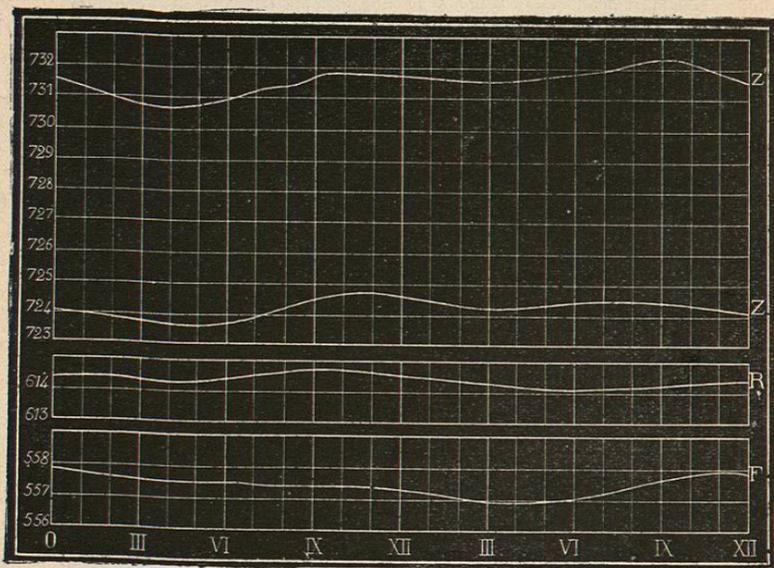


Fig. 41.—Amplitud de la oscilación diurna á diferentes altitudes

de la figura 41, trazadas en vista de dos series de observaciones horarias correspondientes hechas por Kaemtz, la primera en Zurich y en el Righi, y la segunda también en Zurich y en el Faulhorn, confirman esta segunda ley de la disminución de la amplitud con la altura. Como se ve, la curva Z (Zurich) sigue casi las mismas inflexiones que la curva R (Righi). Sin embargo, las horas trópicas no son las mismas. Las líneas Z y F representan también la marcha diurna de las columnas barométricas para la segunda serie de observaciones hechas simultáneamente en Zurich y en el Faulhorn, y dan lugar á una apreciación análoga. Por lo que hace á la amplitud, es decir, á la diferencia entre los promedios de las máxima y de las mínima, he aquí lo que dice Kaemtz: "En Zurich, la diferencia entre las máxima y las mínima medias es de $0^{\text{mm}},644$; en el Righi es tan sólo de $0^{\text{mm}},237$. Otras observaciones simultáneas hechas en Ginebra y en Zurich dan para la oscilación media diurna $0^{\text{mm}},897$, al paso que en el Faulhorn la diferencia correspondiente no era más que de $0^{\text{mm}},268$ (1). Así pues, la oscilación diurna debe ser nula á cierta elevación sobre el nivel del mar."

(1) La relación de la oscilación diurna en el Righi comparada con la de Zurich es 0,37 próximamente, mientras que la misma relación para el Faulhorn es solamente 0,30. La altitud del primero es de 1,800 metros, y la del segundo de 2,680.

Los números que acabamos de reproducir relativamente á la estación de Zurich hacen ver que la oscilación varía en un mismo lugar según la época de la observación. Las estaciones ejercen en ella una influencia marcada, según lo comprobó Ramond por primera vez. En los trópicos, y especialmente en la India, es menor durante la estación de las lluvias que en el resto del año. En nuestros climas llega á su maximum en verano, bajando al minimum en los meses de invierno. Así se advierte examinando la figura 42 que da los promedios mensuales de la amplitud en Milán y en Halle, deducidos de numerosas observaciones. El minimum ocurre en diciembre en ambas ciudades; el maximum del verano ocurre en junio y julio en Milán y en agosto en Halle.

Considerando las curvas de las figuras 39 á 41 que indican la presión, á todas las horas del día, á partir de 0^{h} ó mediodía hasta el mediodía siguiente, no tan sólo se

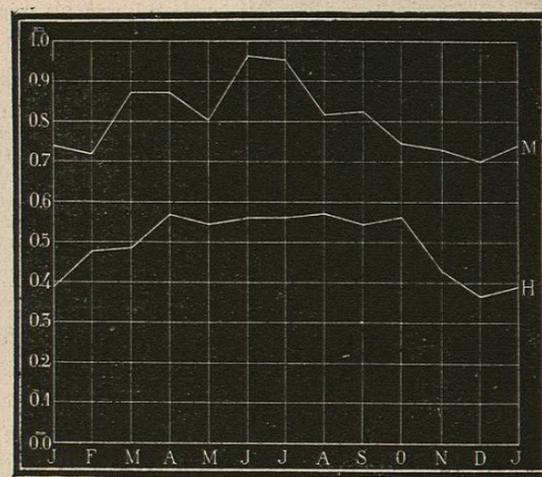


Fig. 42.—Variaciones mensuales de la oscilación diurna. Influencia de las estaciones

pueden comparar las amplitudes de las oscilaciones según las altitudes y las latitudes de los lugares de observación, sino que también facilitan la comparación de las horas de las dos máxima y de las dos mínima. Hemos dicho que cuando se averiguan estas horas, no ya en virtud de una ó de muchas observaciones aisladas, sino tomando el promedio de un gran número de ellas, eran casi constantes entre los trópicos. Pero no son las mismas en todos los países, y además, en un mismo lugar varían al tenor de las estaciones. La ley de esta variación es bastante regular, conforme se puede juzgar considerando la figura 43, que da las *horas trópicas* de Halle para cada mes del año. Fácilmente se ve que, si se toma por duración del período diurno el intervalo que separa el maximum de la mañana del maximum de la tarde, esta duración va aumentando del solsticio de invierno al de verano para disminuir en seguida en sentido precisamente contrario; y que se obtendría un resultado casi semejante si se tomaran los intervalos comprendidos entre el minimum de la mañana y el de la tarde. En una palabra, las horas trópicas siguen en sus variaciones poco más ó menos las de la salida y la puesta del Sol. Con objeto de hacer bien clara y evidente esta ley, hemos trazado en la misma figura las curvas puntuadas que representan las horas en que el Sol se pone ó sale todos los meses, á la latitud de Halle. Así pues, como dice Kaemtz, "la influencia de las estaciones es muy marcada; en invierno, el barómetro llega á eso de las 3 á su pun-

to más bajo; pero en verano baja lo menos hasta las 5. En resumen, *durante el invierno los momentos trópicos ocurren unas dos horas más cerca de mediodía que en verano; y por consiguiente más tarde por la mañana y más temprano por la tarde.*

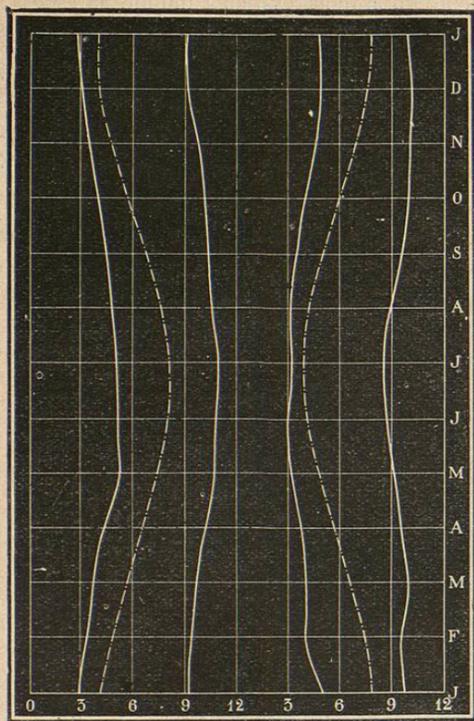


Fig. 43.—Variación de las horas trópicas según las estaciones. Curvas que representan las horas de las máxima y las mínima barométricas diurnas en Halle, en todos los meses.

En resumen, las horas trópicas de la variación barométrica diurna parecen tener conexión en sus cambios con la presencia más ó menos prolongada del Sol sobre el horizonte.

V

PRESIÓN BAROMÉTRICA MEDIA: SUS VARIACIONES

Hemos dado principio al estudio de la presión atmosférica por las variaciones que presenta en el intervalo de un día, variaciones que en realidad son poco latas. Estas pequeñas oscilaciones regulares son á los cambios accidentales de la columna barométrica lo que las arrugas de un mar tranquilo á las olas de un mar agitado. Pero subsisten en medio de los más bruscos movimientos de las curvas atmosféricas, de las oscilaciones más irregulares del nivel del mercurio, y en fin durante las borrascas más violentas y los temporales más terribles. Fácil es convencerse de ello examinando las curvas trazadas por los barómetros anotadores durante un período de algunos días, por ejemplo de una semana. Cada fracción diurna de una de estas curvas lleva la huella de

las máxima y de las mínima cotidianas, aun cuando la columna de mercurio esté sujeta á fluctuaciones mucho mayores.

Trátase ahora de saber si la presión atmosférica está ó no sujeta á variaciones de mayor período, si cambia de un año á otro en un mismo lugar, ó en el decurso de un año, con las estaciones ó los meses, y si depende de la posición geográfica ó de la latitud de los lugares.

Sabemos ya que depende de la altitud ó de la altura á que se observa el barómetro sobre el nivel del mar; y la razón de esta dependencia es muy sencilla, dado que, cuando la altura cambia, el espesor y la densidad de las capas atmosféricas que sobre ella pesan cambian á la vez necesariamente.

Empecemos por explicar qué es lo que se entiende por presión barométrica de una estación ó punto dado.

Puesto que la altura de la columna mercurial cambia de continuo, trátase sin duda

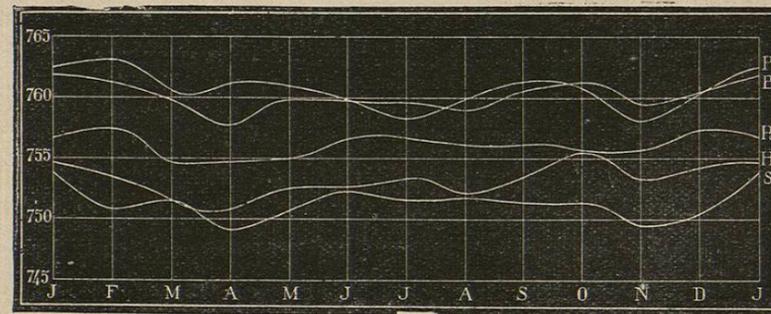


Fig. 44.—Alturas medias mensuales del barómetro. Latitudes medias

alguna de la presión media durante todo el período que se considera. Para conocerla, se averigua primero la presión media de cada día; tomando el promedio de todas las presiones medias de los días de un mes, se tiene el promedio de un mes ó *mensual*. El del año se obtendrá tomando el de las presiones de los diferentes días del año ó bien presiones mensuales.

Como se ve, no es más que cuestión de cálculo, pero cálculo muy sencillo, aunque á menudo bastante largo, y que se refiere á la averiguación de la presión media diurna.

Si fuese menester hacer cada día un gran número de observaciones barométricas, de hora en hora por ejemplo, la tarea sería tanto más prolija cuanto que cada observación requiere, según hemos visto, muchas correcciones. Por fortuna, se ha podido conocer la presión media del día limitándose á hacer observaciones de tres en tres horas, y hasta de ocho en ocho.

Si se trata de las primeras, se elige la serie de horas siguientes: 6 y 9 de la mañana, 12, 3 y 6 de la tarde y 9 y 12 de la noche, ó también: 4, 7 y 10 de la mañana, 1, 4, 7 y 10 de la tarde y noche. Se obtiene la altura barométrica media con bastante aproximación haciendo observaciones tres veces al día, á las 6 de la mañana, á la 1 de la tarde y á las 9 de la noche. Finalmente, en último resultado pueden bastar dos observaciones, con tal de hacerlas á la hora del máximo de la mañana y á la del mínimo de la noche, ó sea á las 9 de la mañana y á igual hora de la noche en nuestros climas. "El barómetro llega á su altura media, dice Kaemtz, á eso de