MEMORIAS
DEL INSTITUTO
GEOGRAFICO
Y CATASTRAL

12

año
1912

528
IG
BIBLIOTECA IGN

I.G.C.

525 11 64

MEMORIAS

DEL

INSTITUTO GEOGRÁFICO Y CATASTRAL

Tomo XVIII

INSTITUTO GEOGRÁFICO · BIBLIOTECA
54-55-56
3 tomos
Madrid

MADRID
TALLERES DEL INSTITUTO GEOGRÁFICO Y CATASTRAL
—
1946

MEMORIAS

DEL

INSTITUTO GEOLÓGICO Y CATASTRAL

TOMO XVIII

Índice de los folletos del tomo XVIII

1.º «Cálculo de Coordenadas rectangulares», por D. José María de la Puente.
2.º «Determinaciones de la longitud del péndulo que bate segundos», por D. Guillermo Sans Huelin.
3.º «Los fenómenos de Laroya», por D. José Cubillo.
4.º «Prontuario de la gravimetría aplicada», por D. Guillermo Sans Huelin.

CÁLCULO DE COORDENADAS RECTANGULARES

MEMORIAS
DEL
INSTITUTO GEOGRÁFICO Y CATASTRAL

Tomo XVIII

I

CÁLCULO
DE
COORDENADAS RECTANGULARES
DE LOS TRABAJOS DE
TAQUÍMETRO, TEODOLITO Y BRÚJULA

Reglas concretas y prácticas para todos los casos
con ejemplos de cálculo y modelos de formulario

POR

JOSÉ M.ª DE LA PUENTE

INGENIERO GEÓGRAFO

(2.ª edición.)

INSTITUTO GEOGRAFICO BIBLIOTECA

MADRID — Talleres del Instituto Geográfico y Catastral. — 1945.

MEMORIAS
DEL
INSTITUTO GEOGRÁFICO Y CATASTRAL

TOMO XVIII

CÁLCULO
DE
COORDENADAS RECTANGULARES
DE LOS TRABAJOS DEL
TAQUÍMETRO, TEODOLITO Y BRÚJULA

POR
JOSÉ M.ª DE LA PUENTE
INGENIERO CIVIL

MADRID
IMPRENTA DEL INSTITUTO GEOGRÁFICO Y CATASTRAL
1917

INTRODUCCIÓN

Se trata en esta monografía del cálculo de coordenadas rectangulares en su aspecto puramente práctico. La cuestión, bastante sencilla en sí, es, desde ciertos puntos de vista, algo compleja por los diversos casos que pueden presentarse, según el método seguido en la observación, el instrumento usado y otros detalles íntimamente ligados con la misma. Por todo ello, se ha procurado aquí únicamente presentar, en forma clara y sencilla, los distintos estilos que, tanto para la observación como para el cálculo, utilizan los técnicos de las diversas ramas de la Ingeniería, dando aquellas reglas de carácter práctico que sólo se aprenden muchas veces de viva voz. Al mismo tiempo se ha procurado dar variedad a los modelos de formulario que se insertan, a fin de que el lector elija el que más le agrade o acomode a su caso particular, o incluso lo modifique a su gusto o según la aplicación que haya de darle.

Como cuestiones complementarias se insertan: la compensación de coordenadas en su aspecto práctico, un ensayo de ubicación de los errores fortuitos o faltas, reglas prácticas para la observación y un procedimiento sencillo de orientación de bases. Y, a manera de ejemplos, dos de las numerosas aplicaciones del cálculo de coordenadas, relativa al cálculo de tramos rectos de trazados entre puntos no visibles entre sí, una de ellas, y al cálculo de superficies con los datos de campo, otra. Muchas más, no menos importantes, encontrará el lector que empieza, una vez que se haya familiarizado con este fecundo método de la ciencia topográfica.

R-1028.

ÍNDICE

Páginas

CAPÍTULO PRIMERO.—Cálculo de coordenadas 7
1.—Generalidades sobre ángulos, rumbos y acimutes 7
2.—Coordenadas polares y su transformación en rectangulares 10
3.—Signo de las coordenadas 12
4.—Poligonal observada por rumbos menores de un cuadrante 13
5.—Poligonal por rumbos menores de medio cuadrante 13
6.—Poligonal por rumbos menores de una semicircunferencia 14
7.—Poligonal por rumbos desde cero a 360° 15
8.—Poligonal por ángulos 17
9.—Poligonal por rumbos magnéticos de declinación conocida 20

CAPÍTULO II.—Compensación de coordenadas 27
10.—Diversos procedimientos de compensación 27

CAPÍTULO III.—Análisis de los errores fortuitos 31
11.—Procedimientos para la localización en ciertos casos de los errores en longitud y angulares 31

CAPÍTULO IV.—Ejemplos de aplicación 39
12.—Cálculo de un tramo recto de un trazado, cuyos extremos no son visibles entre sí 39
13.—Cálculo de superficies con los datos de campo 41

CAPÍTULO V.—Reglas prácticas para la observación de las poligonales en campo y resumen general 43
14.—Observación de las poligonales 43
15.—Observación con brújula 44
16.—Observación con teodolito 44
17.—Observación con taquímetro 48

APÉNDICE.—Un procedimiento sencillo y práctico para la orientación de bases topográficas 51
18.—Orientación de bases por el acimut de la Polar en su máxima digresión 51

CAPÍTULO PRIMERO

CÁLCULO DE COORDENADAS RECTANGULARES

1) Generalidades sobre ángulos, rumbos y acimutes.—Usualmente se sobreentiende en Topografía, al decir *ángulo de dos visuales*, que nos referimos al que forman los planos verticales que las contienen.

Este diedro tiene por medida en el plano del horizonte un ángulo plano, que es el que forman las proyecciones sobre él—que suelen llamarse *direcciones*—de las visuales consideradas.

Este último ángulo es el que miden, en general, los instrumentos topográficos; excepto el sextante, que proporciona, como es sabido, el ángulo de las visuales en su propio plano.

Recordemos que se llama *meridiana local* de un lugar, o simplemente meridiana, la intersección de su meridiano con su horizonte. Los extremos de la meridiana y de su perpendicular en el plano del horizonte son los *puntos cardinales del plano*, que se designan por las iniciales *N*, *S*, *E* y *O*. Algunos emplean para este último la inicial de la palabra inglesa *West*, en atención a que no se confunde con el cero ni con la preposición.

El ángulo de dos direcciones se llama *rumbo* o *acimut* cuando una de ellas es la meridiana. La segunda denominación es más categórica que la primera, como vamos a ver.

Rumbo es el ángulo que una dirección forma con la meridiana—generalmente magnética—; los rumbos pueden contarse desde el Norte o desde el Sur; en el sentido positivo o de las agujas de un reloj, que suele llamarse *normal*, o en el contrario, *anormal*.

Acimut es el ángulo que una dirección forma con la parte sur de la meridiana astronómica, contado a partir de ésta, de cero a 360° y en sentido normal (*).

(*) A menos que la naturaleza de la cuestión exija otra cosa, nos referiremos siempre a la graduación sexagesimal.

Aunque la manera más general de contarse los rumbos y acimutes es *de cero a 360°*, otras veces se cuentan *por medios cuadrantes, por cuadrantes* y *por semicircunferencias*. Resultan así cuatro modos distintos, que constituyen otros tantos estilos propios o peculiares de cada grupo de técnicos de empresa u organismo, que llevan también aparejados otros tantos procedimientos de cálculo de coordenadas, por lo cual vamos a dedicarles alguna atención.

Para ello consideremos la figura 1, en la que se han anotado los rumbos de los puntos *X, Y, Z, K*, contados desde el Norte, de cero a 360° y en sentido normal.

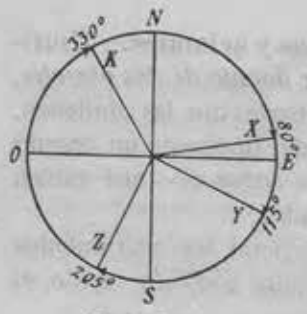


Fig. 1.—Rumbos.

Por el procedimiento de *medios cuadrantes* estos rumbos se leen y anotan así:

X	*Y*	*Z*	*K*
E 10°	E 25° S	S 25° O	N 30° O,

siendo siempre la primera letra que se escribe la correspondiente al punto cardinal más próximo y leyendo rumbos menores que medio cuadrante.

Por cuadrantes los rumbos se leen de cero a 90°, en cualquier sentido, pero siempre a partir del Norte o del Sur, siendo estas iniciales las primeras que se escriben:

X	*Y*	*Z*	*K*
N 80° E	S 65° E	S 25° O	N 30° O

Por semicircunferencias los rumbos se leen siempre desde el Norte, de cero a 180°, hacia la izquierda *O*, o hacia la derecha *E*, y se anotan de este modo:

X	*Y*	*Z*	*K*
80° E	115° E	155° O	30° O.

Con un transportador a la vista es fácil pasar de rumbos expresados de una manera a cualquiera otra.

Sobre estos diversos modos de contar los rumbos conviene recordar una advertencia, bien conocida en todo topógrafo, relativa a las brújulas o a cualquier otro aparato, teodolito, pantómetra, etc., pro-

visto de limbo de brújula *completo* que participa del movimiento general de giro del instrumento, y que es la siguiente:

La construcción de los rumbos en el dibujo debe hacerse *en sentido contrario* a la graduación del limbo empleado.

La razón de ello es que, en estos aparatos, el eje de colimación del anteojo—en posición horizontal—es paralelo a la línea *0 — 180* del limbo (fig. 2); el rumbo es la lectura que acusa el extremo de la aguja magnética.

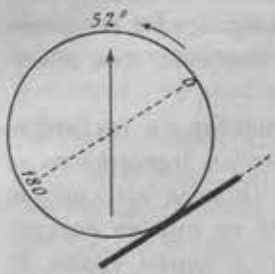


Fig. 2.—Lectura del rumbo en el limbo.

Para trasladarlo al dibujo se traza en el papel la meridiana *NS* (fig. 3), se hace coincidir con ella la línea *0 — 180* del transportador y se marca la lectura correspondiente al rumbo *en sentido contrario*.

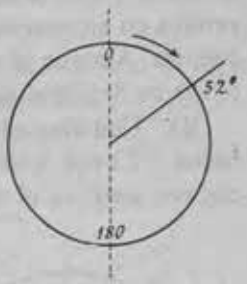


Fig. 3.—Construcción del rumbo en el dibujo.

Muchas brújulas tienen estampadas en el limbo las iniciales de los puntos cardinales, pero se observa que, generalmente, están cambiadas las iniciales *E* y *O* con respecto a la situación verdadera de estos puntos (fig. 4), estando la *E* donde debiera estar la *O*, y viceversa.

Esto es consecuencia de lo que acabamos de decir; si no estuvieran cambiadas, al llevar al cálculo o al papel un rumbo tal como *N 52° O* habría que cambiarlo en *N 52° E*, lo que se evita trocando la posición relativa de ambas iniciales en el limbo. Los rumbos así leídos corresponden entonces fielmente a la posición relativa que los puntos visados tienen en el terreno con respecto al observador y a su meridiana (*).

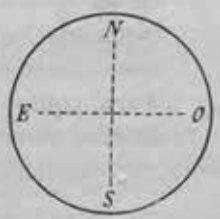


Fig. 4.—En los limbos de brújula suele estar cambiada la situación de los puntos cardinales *E* y *O*.

Conviene también observar que, en los taquímetros, la línea *0 — 200* del limbo es paralela a la de ceros de la de-

(*) Es sabido que también pueden construirse los rumbos con un transportador del mismo sentido que el limbo, colocándolo de modo que el rumbo coincida con la meridiana y marcando en el papel el punto correspondiente al cero; pero la verdadera traducción del rumbo, sobre todo a los efectos del cálculo de coordenadas que nos proponemos, es la indicada.

clinatoria (*); por tanto, una vez orientados con ésta, a diferencia de lo que ocurre en las brújulas, los rumbos dados por los nonios corresponden fielmente a la orientación de las respectivas direcciones en el terreno, *sin que haya necesidad de invertirlos.*

En resumen; en los aparatos de *limbo móvil*, brújulas corrientes, brújulas teodolito, pantómetras, etc., hay que invertir de sentido los rumbos leídos; y en los de *limbo fijo*, taquímetros, brújulas de limbo montado sobre la aguja, etc., no. El lector observará, por tanto, si se verifica en su aparato una u otra circunstancia para proceder en consecuencia. Aunque el asunto parezca trivial, por lo conocido, esta advertencia es decisiva para el cálculo de coordenadas.

2) Coordenadas polares y su transformación en rectangulares.—Como quiera que sea, con los instrumentos topográficos se obtiene siempre el rumbo o acimut r (fig. 5), y la distancia horizontal d, desde el punto O en que se encuentra el observador, al punto visado P; o sea, las coordenadas polares de éste con respecto a un sistema de elementos de referencia constituído por la meridiana, como eje polar, y el punto de observación, como polo.

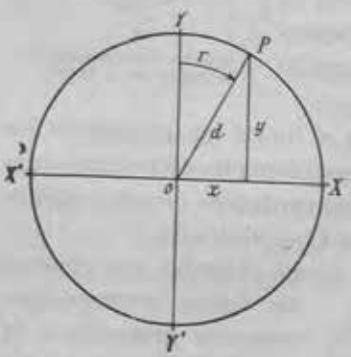


Fig. 5.—Transformación de coordenadas.

La transformación consiste en pasar, de las coordenadas polares d y r, a las cartesianas rectangulares x, y, que tienen como elementos de referencia: la meridiana, como eje de las y, y su perpendicular, como eje de las x.

Por definición de funciones trigonométricas *seno* y *coseno* del ángulo r, se verifica:

$$x = d \operatorname{sen} r, \qquad y = d \cos r,$$

teniendo en cuenta que, por estar el origen del arco en la meridiana, la *ordenada* de su extremo es x y la *abscisa*, y.

Según se sabe, estas fórmulas son generales para todos los valores del rumbo, desde cero a 360°.

(*) En realidad las cosas no son tan sencillas; la línea *0 — 200* forma, aproximadamente, ángulo recto con la de *ceros* de la declinatoria, pero también la de *ceros* de los nonios forma el mismo ángulo con el eje de colimación del anteojo.

Quede, por tanto, bien sentado, y de una vez para siempre, que: *La abscisa* x *es el seno del rumbo y la ordenada* y *el coseno,* multiplicados por la distancia.

El cálculo de las fórmulas que anteceden no suele hacerse por logaritmos, sino por medio de tablas de senos y cosenos naturales, algunas de las cuales contienen sus productos por los nueve primeros números o presentan otras disposiciones, más o menos ingeniosas, para facilitar el producto de seno y coseno por la distancia (*). En el cálculo de tablas sólo se lleva la estima hasta el minuto por ser innecesaria mayor apreciación. El producto puede obtenerse también con la regla o el círculo de cálculo y con la máquina de calcular (**).

Dado un itinerario o una poligonal, como el *1, 2, 3, 4,* ..... de la figura 6, se empieza por calcular las coordenadas *x, y,* que se llaman *parciales* o *relativas,* del extremo de cada eje con respecto a su origen, y de ellas se pasa a las *X, Y, totales* o *absolutas,* de cada punto de la linea con respecto al primero de ellos u otro cualquiera *O,* arbitrario o hipotético, elegido como origen absoluto de coordenadas.

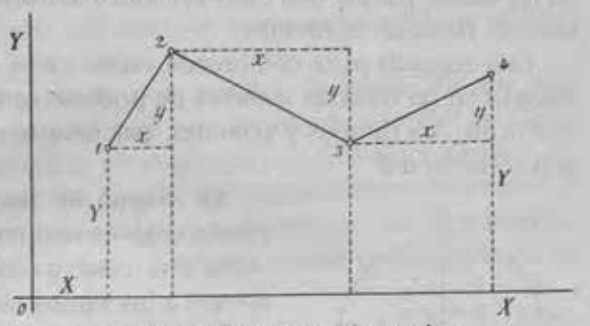


Fig. 6.—Coordenadas parciales y totales.

(*) La generalidad de las tablas, Claro y Garro, Gorria, Cuartero, etc., contienen los valores de seno y coseno para una unidad de longitud y han de ser multiplicados a mano o a máquina por la distancia; las de Gillette, Herrera, Durán y Walkinsaw....., contienen los productos por los números dígitos y reducen, por tanto, la multiplicación a una suma; en las de Sanfelichi el producto se obtiene por dos sumandos, uno que corresponde a las decenas de la distancia y otro a las unidades y fracción; las «Gurden Traverse Tables» contienen los productos de seno y coseno sexagesimales por la serie de los números hasta 100; las «Tablas Maestras Taquimétricas» proporcionan estos mismos productos hasta 200, así como los de reducida y altura, para ambas graduaciones, sexagesimal y centesimal.

(**) Hay máquinas especiales para este cálculo, como la «Thales-Geo», que tienen dos secciones, en una se pone el valor del seno y en la otra el del coseno; por las vueltas de manivela correspondientes a la distancia, ambos productos se obtienen simultáneamente, lo que representa una gran ventaja.

Estas coordenadas totales se obtienen muy fácilmente, pues basta aplicar a las absolutas del punto *1* las relativas del *2*, con sus signos, para obtener las totales de éste, a éstas, las parciales del *3*, etc.

Al punto *1*, o de partida, se le asignan unas coordenadas arbitrarias, pero suficientemente grandes para que en ningún caso puedan resultar para ningún punto de la poligonal coordenadas totales negativas, lo cual es bien fácil, puesto que siempre se tendrá un desarrollo gráfico del trabajo, o al menos un croquis, en el cual puede medirse la extensión longitudinal aproximada del trabajo en el sentido de las x y en el de las y para que esto no ocurra.

El cálculo de las coordenadas parciales x, y, comprende dos partes, a saber: 1.ª Determinación del signo. 2.ª Ángulo que hay que buscar en las tablas, puesto que éstas contienen los argumentos angulares solamente hasta un cuadrante.

Esta segunda parte comprende varios casos muy distintos, concordantes con las diversas maneras de poderse contar, según se dijo anteriormente, los rumbos y acimutes; nos ocuparemos, por tanto, en primer término del

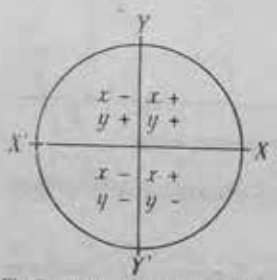


Fig. 7.—Signo de las coordenadas.

3) Signo de las coordenadas. - En nuestro país es costumbre, mientras no se advierta otra cosa, contar las coordenadas con arreglo a los signos que se indican en la figura 7, según el cuadrante en que termina el extremo del rumbo, así:

Las x situadas a la *derecha* del eje y, son *positivas*, y a la *izquierda, negativas.*

Las y situadas por *encima* del eje x, son *positivas*, y por *debajo, negativas.*

Por tanto, para saber el signo de las coordenadas, dado un rumbo o acimut, basta observar en qué cuadrante termina aquél. He aquí varios ejemplos:

		Termina entre	Signo	
			x	y
Acimut astronómico.....	346°	X, Y'	+	−
Rumbo (después de invertido)...	S 58° W	X', Y'	−	−
Id. id.	E 32° N	X, Y	+	+
Id. id, ...	87° W	Y, X'	−	+
Rumbo norte en taquimetro normal.....	327°	X', Y	−	+

Y en caso de duda bastará tener a la vista una figura análoga a la 7.

Antes de pasar a la determinación del ángulo que hay que buscar en las tablas, queremos poner en guardia a nuestros lectores para que no se sorprendan si en alguna ocasión encuentran cálculos en los que se ha tomado como eje de las x la meridiana, y la perpendicular como eje de las y, pues en algunos países así se hace. Tengan en cuenta que en tal caso la x es el coseno del rumbo y la y el seno; lo demás, como fácilmente se comprende, es análogo, cambiando simplemente la letra x por la letra y. También los signos pueden contarse de modo distinto de como es corriente en España.

Pasaremos, por tanto, al cálculo del ángulo de tablas, considerando sucesivamente los diversos casos que pueden ocurrir y examinando en algunos de ellos cuestiones íntimamente relacionadas con los mismos y que son de la mayor importancia.

4) Poligonal observada por rumbos menores de un cuadrante.—Empezamos por este caso por ser el más sencillo de todos. El rumbo, por ser menor que un cuadrante, se encuentra siempre en las tablas; las iniciales de los puntos cardinales indican claramente a qué cuadrante pertenece y, por tanto, los signos de las coordenadas. La x es el seno y la y el coseno. El cálculo puede consignarse en un estado como el siguiente:

ESTADO N.° 1.—Rumbos menores que un cuadrante.

Lados	Rumbos	Dist. Hor.	COORDENADAS PARCIALES		COORDENADAS TOTALES		Puntos	OBSERVACIONES
			x	y	X	Y		
					5.000,00	6.000,00	1	De partida.
1-2	S 43°15' W	89,3	— 61,19	— 65,05	4.938,81	5.934,95	2	
2-3	S 39°30' E	148,5	+ 94,46	— 114,59	5.033,27	5.820,36	3	
3-4	N 15°45' W	24,0	— 6,52	+ 23,10	5.026,75	5.843,46	4	Alcantarilla.
4-5	N 22°00' E	68,7	+ 25,74	+ 63,70	5.052,49	5.907,16	5	

La extensión del levantamiento se supone que es de unos 4 km. de *E* a *W* y unos 5 de *N* a *S*, por lo cual, adoptando como coordenadas de partida del punto *1*, *5.000* y *6.000*, es seguro que no habrá coordenadas totales negativas. El resto del estado no requiere más explicación.

5) Poligonal por rumbos menores de medio cuadrante.—Como en el caso anterior las iniciales de los puntos cardinales dan a

conocer el signo de las coordenadas parciales y los rumbos se encuentran siempre en las tablas, pero hay que advertir lo siguiente:

Para los rumbos que tienen su origen en la meridiana, la x es el seno y la y el coseno, pero para los que empiezan en el Este o en el Oeste el coseno es la x y el seno la y.

Algunos se previenen de posibles equivocaciones por cambio indebido de seno por coseno, escribiendo los rumbos en el estado y anotando las iniciales s ó c en las casillas de coordenadas parciales y los signos correspondientes antes de empezar el cálculo, como se ve en el siguiente

ESTADO N.° 2.—Rumbos menores de medio cuadrante.

Puntos	Rumbo	Reducida	COORDENADAS PARCIALES		COORDENADAS TOTALES		OBSERVACIONES
			x	y	X	Y	
A					7.425,34	5.870,45	De la triangulación.
B	N 16°35′ E	170,0	$s+48,52$	$c+162,93$	7.473,86	6.033,38	
C	E 31°57′ S	93,4	$c+79,26$	$s-49,43$	7.553,12	6.082,81	
D	O 42°23′ S	28,4	$c-20,98$	$s-19,14$	7.532,14	6.063,67	
E	S 5°46′ O	74,8	$s-7,51$	$c-74,43$	7.524,63	5.989,24	Pozo número 7.

6) Poligonal por rumbos menores de una semicircunferencia.—En este caso el rumbo puede ser menor o mayor que un cuadrante: si es menor estará en las tablas, siendo el seno la x y el coseno la y, como de ordinario; si es mayor, se le quita un cuadrante y se busca el exceso en las tablas, pero teniendo en cuenta que ahora la x será el coseno y la y el seno, puesto que, en valor absoluto,

$$\operatorname{sen}\left(\frac{\pi}{2}+a\right)=\cos a, \qquad \cos\left(\frac{\pi}{2}+a\right)=\operatorname{sen} a.$$

Como a las razones trigonométricas se las solía llamar antes *líneas*, la manera de operar se traduce en la práctica en la siguiente regla: En general, la x es el seno y la y el coseno; pero, *para los rumbos mayores que un cuadrante se cambian las colíneas por las líneas.*—Ejemplos:

Rumbo	Ángulo para las tablas	x	y
83° 15′ E	83° 15′	seno +	coseno +
136° 45′ O	46° 45′	coseno —	seno —
94g,25 O	94g,25	seno —	coseno +
187g,34 E	87g,34	coseno +	seno —

La determinación del signo, que también hemos consignado en estos ejemplos, se hace, según ya sabemos, observando en qué cuadrante está situado el extremo del rumbo.

7) Poligonales por rumbos de cero a 360° ó a 400^g.—Algunos transforman éstos en rumbos menores de un cuadrante, bien formando un estado como el de más abajo o haciendo la transformación al trasladar los rumbos al estado de cálculo.

Rumbos leídos en taquímetro anormal	Rumbos transformados para el cálculo
g	g
97,35	N 97,35 O
186,17	S 13,83 O
214,78	S 14,78 E
365,87	N 34,13 E

Una vez transformados los rumbos se aplica el procedimiento de cálculo del párrafo **4)**. El ángulo está siempre en las tablas, y las iniciales de los puntos cardinales indican el signo de las coordenadas.

Otros consideran que dicha transformación de unos ángulos en otros constituye un paso u operación inútil y expuesta a errores, por lo cual prefieren hallar directamente sobre la marcha el ángulo de tablas, o sea, el ángulo menor que un cuadrante que en valor absuluto tiene las mismas funciones trigonométricas que el dado.

Dicho ángulo se obtiene muy fácilmente restando al propuesto los cuadrantes que contenga, operación la más sencilla posible. Los casos que pueden ocurrir son (valores absolutos):

Rumbo	Ángulo de tablas	x	y
a	a	seno	coseno
$\frac{\pi}{2} + a$	a	coseno	seno (cambiar colíneas por líneas)
$\pi + a$	a	seno	coseno
$\frac{3\pi}{2} + a$	a	coseno	seno (cambiar colíneas por líneas)

La inspección de este cuadro hace ver que para los ángulos del primero y tercer renglones la x es, como de ordinario, el seno y la y el coseno, y al contrario para los otros dos renglones, o sea que, en general, la x es el seno y la y el coseno; pero,

Cuando se resta un número impar de cuadrantes se cambian las colíneas por las líneas.

Esta regla se aplica también en el cálculo ordinario a tangentes y cotangentes cuando se trata de hallar las de un ángulo mayor que un cuadrante.

En la graduación centesimal, para restar al rumbo los cuadrantes que contenga, basta prescindir de la cifra de sus centenas: 124^g, 24^g; 318^g, 18^g; 257^g, 57^g.

En la graduación sexagesimal «restar cuadrantes al ángulo es hallar el resto de su división por 90°», o más sencillamente, de sus decenas por 9; y ya se sabe con qué facilidad se obtiene el resto de la división de un número por 9, sumando los valores absolutos de sus cifras significativas y despreciando las cifras 9.

El signo de las coordenadas se determina por la simple inspección del rumbo según costumbre. Lo demás no presenta diferencia alguna con lo ya expuesto.—Ejemplos:

Rumbo	Cálculo mental	Ángulo de tablas	Cuadrantes contenidos	x	y
349°	3 y 4, 7	79°	3	coseno	seno
173	1 y 7, 8	83	1	coseno	seno
298	2	28	3	coseno	seno
214	2 y 1, 3	34	2	seno	coseno
306	3	36	3	coseno	seno
109	1	19	1	coseno	seno

En el cálculo de coordenadas suelen cometerse equivocaciones, siendo una de las más corrientes el cambio indebido de seno por coseno y viceversa. Para darse cuenta rápidamente de si se ha deslizado un error de esta naturaleza, basta recorrerlo teniendo a la vista una de las figuras 8 ó 9, que se insertan más abajo, las cuales hacen ver que:

De 45° a 135 } la x es mayor que la y.
y de 225 a 315 }

De 50^g a 150 } la x es mayor que la y.
y de 250 a 350 }

Y al contrario en los otros dos sectores; y observando que lo mismo se verifica, ya se cuenten los rumbos desde el Norte o desde el Sur, y en cualquier sentido.

Algunos emplean ésta, como regla, para discernir cuál de los dos

números, seno, coseno, de las tablas, es la x y cuál la y, en sustitución de la que hemos dado más arriba.

Estas figuras se complementan con la 7, signo de las coordenadas, y convendrá tener ambas a la vista al hacer el cálculo.

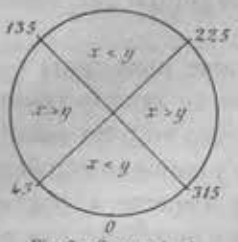


Fig. 8.—Sexagesimal.

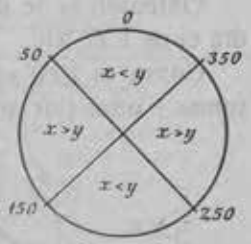


Fig. 9.—Centesimal.

El estado de cálculo que sigue se refiere a una poligonal por acimutes astronómicos sexagesimales con lados medidos con cinta metálica; en cada eje, en el renglón superior figuran las coordenadas totales y en el inferior las parciales; esta disposición facilita la corrida de coordenadas.

ESTADO N.° 3.—Poligonal por acimutes astronómicos de cero a 360°

Puntos	Acimutes	Dist. hor.	COORDENADAS PARCIALES y TOTALES		OBSERVACIONES
			X	Y	
1			9.625,37	7.240,25	1 = 27 del perímetro.
	166°34′	92,37	— 21,45	+ 89,85	
2			9.603,92	7.330,10	
	253°18′	141,60	+ 135,63	+ 40,69	
3			9 739,55	7.370,79	
	287°41′	108,24	+ 103,13	— 32,88	
4			9.842,68	7.337,91	
	32°56′	40,51	— 22,03	— 34,00	
5			9.820,65	7.303,91	5 = Vértice 18 de la triangulación.

8) Poligonal observada con teodolito, por ángulos, de la que se conoce el ángulo de cada dos lados consecutivos y un acimut o rumbo de partida.—En este caso lo primero que hay que hacer es «correr el acimut», o sea, dar acimut, a partir del conocido, a todos los lados de la línea.

Sea la poligonal $ABCD$ de la figura 10, de la que se supone conocido el acimut $a = 237°$ del primer lado en el sentido AB.

Con dicho acimut pueden calcularse las coordenadas parciales del punto B con respecto a A, pero para dar coordenadas a C es preciso conocer el acimut de BC.

Como se observa en la figura, para ello basta hallar el acimut *57°* inverso del de partida, o sea el de *B* hacia *A* (*) y sumarle el ángulo *b*.

Obtenido el de *BC*, se invierte, y sumándole el ángulo *c* se obtendrá el de *CD*, etc.

Como es fácil observar podría también operarse unas veces por sumas y otras por diferencias, tomando los ángulos en sentido conveniente; pero en todo cálculo seguido y continuo conviene siempre atenerse a reglas sencillas e invariables que no den nada que pensar. Por ello se emplea la siguiente:

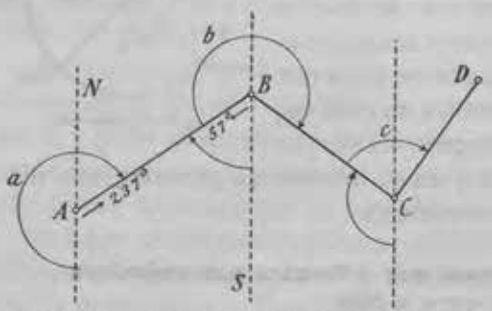


Fig. 10.—Para dar acimut a un lado se invierte el del anterior y se le suma el ángulo de ambos lados, contado en sentido positivo o normal.

Para obtener el acimut de cada lado se invierte el del anterior y se le añade el ángulo de ambos lados en el sentido de las agujas de un reloj.

Si al hacer esta operación resultan ángulos mayores que una circunferencia, se les resta *360°*.

La regla subsiste si los acimutes se cuentan desde el Norte.

Si acimutes o rumbos se cuentan en sentido contrario —anormal —, ya sea desde el Norte o desde el Sur, el ángulo de cada dos lados se contará también en ese mismo sentido, o sea, contrario al de las agujas de un reloj.

En resumen, puede decirse lo siguiente: el ángulo de cada dos lados, que se añade, debe contarse en el mismo sentido que los rumbos que se están empleando.

Una vez corrido el acimut, el cálculo en nada difiere del expuesto en el párrafo anterior. Si se desea conservar todos los cálculos, lo que facilita su revisión, se puede hacer un estado como el de más abajo. A la izquierda de cada llave figura el cálculo de tablas, suponiendo que

(*) Para lo cual basta sumarle o restarle 180°. Por una sencilla propiedad de las congruencias entre un rumbo o acimut sexagesimal y su inverso se verifica que la suma de sus cifras de decenas y centenas es la misma, por ejemplo: 327° y 147° (3 y 2, 5; 1 y 4, 5); 223° y 43° (2 y 2, 4); 237° y 57° (3 y 2, 5), lo que facilita el cálculo. En graduación centesimal basta sumar o restar 2 a las centenas.

se han empleado unas de las que contienen los productos de seno y coseno por los nueve números dígitos.

ESTADO N.° 4.—Poligonal observada por ángulos.

Longitud y acimut del lado 1-2.

293° 18' 30" de partida.

167m,45

91,84		39,55	
55,11	X'	23,73	Y'
6,43	6.579,18	2,77	8.236,20
37	— 3	16	+ 2
5	6.579,15	2	8.236,22

x = + 153,80 y = — 66,23

X = 6.425,38 Y = 8.303,43

Longitud y acimut del lado 3-4.

195° 54' 30" de partida.

38 15 30

234 09 00

128m,14

81,05		58,57	
16,21	X'	11,71	Y'
6,48	6.659,37	4,69	8.228,18
8	— 9	6	+ 6
3	6.659,28	2	8.228,24

x = + 103,85 y = + 75,05

X = 6.555,52 Y = 8.153,13

Longitud y acimut del lado 2-3.

113° 18' 30" de partida.

262 36 00

15 54 30

86m,37

21,92		76,94	
1,64	X'	3,77	Y'
8	6.555,52	29	8.153,13
2	— 6	7	+ 4
	6.555,46		8.153,17

x = — 23,66 y = — 83,07

X = 6.579,18 Y = 8.236,20

Longitud y acimut del lado 4-5.

54° 09' 00" de partida.

287 38 20

341 47 20

90m,40

28,13		85,49	
13	X'	38	Y'
	6.687,63		8.142,31
	— 12		+ 8
	6.687,51		8.142,39

x = + 28,26 y = — 85,87

X = 6.659,37 Y = 8.228,18

En el primer lado se supone conocido el acimut de partida *293° 18' 30"*, con él, y con la longitud del lado *167,45*, se calculan las coordenadas parciales *x*, *y*, que, sumadas algébricamente con los de partida del punto 1, que se han escrito debajo designándolas por *X*, *Y*, dan las *X'*, *Y'* del punto 2.

Para el segundo lado se ha invertido el acimut del anterior, obteniéndose *113° 18' 30"*; y sumando a este número el ángulo de ambos lados, *262° 36'*, se ha obtenido el acimut *15° 54' 30"*, que, con la distancia *86,37*, proporciona las coordenadas parciales *x*, *y*, que, sumadas con las totales del punto *2*, que se han copiado debajo, dan las *X'*, *Y'* del 3, etc.

(De los números de cursiva escritos debajo de las coordenadas totales se hablará más adelante.)

Como ya se dijo, en el cálculo de tablas la apreciación se lleva sólo hasta el minuto en los ángulos, pero al hacer la corrida del acimut deben irse conservando los segundos, pues su acumulación puede dar lugar a una cantidad importante.

9) Poligonal observada por rumbos magnéticos con taquímetro, teodolito o brújula cuya declinación se conoce.—Antes de pasar a explicar la manera de operar en este caso creemos indispensable dejar bien sentados algunos extremos relativos a la declinación de los aparatos topográficos provistos de aguja magnética.

Recordemos ante todo que se llama *declinación* de una aguja al ángulo que el plano vertical en que se orienta forma con el meridiano astronómico. Estando situado el Norte magnético hacia la Bahía de Hudson, en nuestro país la declinación es *occidental*, de modo que para un observador *O* situado de cara al Norte, su meridiana magnética queda a la izquierda de la astronómica (fig. 11).

Fig. 11.—Norte astronómico y Norte magnético.

La declinación, como fácilmente se comprende, es distinta para las diferentes latitudes de un país, varía también con el tiempo y, en general, la declinación de cada aguja magnética es diferente de unas a otras y distinta de lo que se llama «declinación teórica» del lugar terrestre que se considere (*).

Declinación de un aparato topográfico, provisto de aguja, es el ángulo que el plano vertical en que ésta se orienta forma con el vertical que describe el eje de colimación del anteojo, cuando con éste se ha apuntado al Norte astronómico.

En esta clase de aparatos el plano vertical que contiene al eje colimación debe ser paralelo a la línea *0 — 180* del limbo, o esta última a la línea de fe de la declinatoria, pero en la práctica este paralelismo pocas veces se verifica, y esta causa viene a sumarse con la indicada anteriormente para hacer que cada aparato tenga su declinación propia.

Algunos están provistos de un sistema de corrección formado por

(*) La fuerza con que el magnetismo terrestre actúa sobre una aguja es función de su masa y de la permeabilidad magnética de su núcleo, o sea, de la sustancia que lo constituye. *Declinación teórica* es la de una aguja ideal que reúne determinadas condiciones físicas y químicas.

dos tornillos antagonistas (fig. 12), que permiten imprimir un pequeño giro al limbo de la brújula o de la declinatoria, con lo cual se puede conseguir dicho paralelismo, o lo que es más práctico, poner en acuerdo los distintos instrumentos usados en un levantamiento para que todos ellos tengan la misma declinación (*).

La declinación de los aparatos usados corrientemente en Topografía puede variar entre 10 y 20°, y aun fuera de estos límites, por lo cual, cuando se trata de trabajos de conjunto, ejecutados por distintos operadores e instrumentos, es preciso referir todos ellos a Norte verdadero, pues si así no se hiciera no habría posibilidad de acoplarlos.

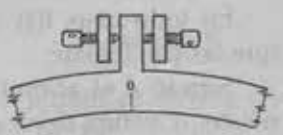


Fig. 12.—Corrección de la situación del limbo.

Para declinar un aparato, o sea, para determinar su declinación propia, se estaciona con él en el extremo de una base o lado cuya orientación a N. V. se conozca, y se visa al otro extremo, procediendo, como se indica a continuación, según cual sea el instrumento usado (**).

Si se trata de una brújula basta simplemente leer el rumbo.

Si es un taquímetro se orienta previamente, calando la declinatoria a cero, y se visa al otro extremo de la base. Se repite varias veces la operación de orientar y visar y se toma el promedio de lecturas obtenidas.

Si es un teodolito repetidor, en cuyos instrumentos la brújula o la declinatoria es solidaria del movimiento horizontal del anteojo y gira con él, se hará previamente la coincidencia de ceros de nonios y limbo horizontal, después se cala a cero la aguja, y conseguido esto, se suelta el tornillo de presión del movimiento acimutal del anteojo para visar

(*) Por ejemplo, hacer que el instrumento usado en un replanteo tenga la misma declinación que el que se empleó en el levantamiento. La corrección de paralelismo es inútil, puesto que, después de conseguido, el aparato tendrá una declinación propia distinta de la anterior, pero no siendo la teórica, lo mismo da que sea una u otra.

(**) También se puede proceder por observaciones astronómicas. La orientación de una base es una de las operaciones más delicadas de la Topografía, pero con motivo de los trabajos para la formación del Mapa Nacional, los de Catastro Parcelario y aun los de planos de poblaciones de alguna importancia, que ejecuta el Instituto Geográfico y Catastral, es fácil hoy día encontrar en cualquier provincia lados o bases de triangulación o de poligonación orientados, o sea, de acimut astronómico conocido, y de cuya existencia o situación puede informar cualquier técnico de dicho Centro, Ingeniero Geógrafo o Topógrafo Ayudante de Geografía, de la localidad.

con él al otro extremo de la base, repitiendo varias veces estas operaciones y tomando el promedio de lecturas.

Si el limbo del teodolito es *normal* se puede *leer* en él directamente la declinación. Para ello se pone el nonio en el acimut de la base y se visa al otro extremo de ésta. Soltando entonces el tornillo de presión del movimiento horizontal del anteojo se cala a cero la aguja; la lectura del nonio I (*) es directamente la declinación del instrumento.

En todo caso, hay que atenerse a las siguientes reglas y fórmulas que las condensan:

Siendo A el acimut astronómico de la base, S el rumbo sur magnético, o lectura del nonio II (**) y d la declinación, se tendrá:

Taquímetro normal o brújula anormal (fig. 13).

La declinación se obtiene restando del rumbo sur el acimut:

$$d = S - A.$$

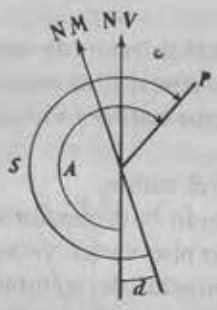


Fig. 13.—Declinación en graduación normal.

Taquímetro anormal o brújula normal (fig. 14).

La declinación se obtiene restando de 360° o 400^g la suma del acimut con el rumbo sur:

$$d = 360° - (A + S).$$

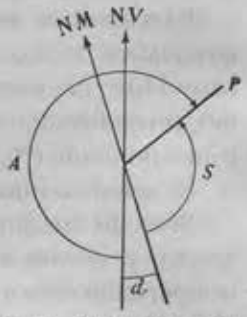


Fig. 14.—Declinación en graduación anormal.

En ambos casos hay que sumar 360° al minuendo cuando sea menor que el sustraendo.

Para las brújulas que tienen el limbo movible con la aguja, por ser solidario de ella, y para los teodolitos repetidores, hay que emplear las fórmulas del taquímetro.

Volviendo al cálculo de coordenadas, del cual nos hemos apartado

(*) Los aparatos dotados de vuelta de campana total del anteojo—a cuyo movimiento llaman *tránsito* los americanos y *tránsitos* a los teodolitos que lo verifican—tienen dos posiciones para el anteojo, una que se llama *normal*, y otra *invertida*; se entiende que es el nonio I en posición normal.

(**) Si el instrumento no da más que lecturas o rumbos norte, por tener un solo índice, se invertirá la lectura, sumándole o restándole 180° ó 200^g.

en esta larga digresión, para que no quede ningún punto oscuro o dudoso, diremos que, una vez que sea conocida la declinación del instrumento con que se hizo el levantamiento, se podrá obtener el acimut de cada eje de la poligonal por las siguientes fórmulas, que se deducen fácilmente de las anteriores:

Taquímetro normal o brújula anormal.—El acimut se obtiene restando del rumbo sur—o lectura del nonio II—la declinación:

$$A = S - d. \qquad \textbf{[Fórmula I]}$$

Taquímetro anormal o brújula normal.—El acimut se obtiene restando de 360° la suma del rumbo sur con la declinación:

$$A = 360^\circ - (S + d);$$

o mejor,

$$A = (360^\circ - d) - S. \qquad \textbf{[Fórmula II]}$$

Siendo esta última fórmula más conveniente por ser $(360^\circ - d)$ una constante cuyo valor se determina de una sola vez para todo el cálculo.

En los estados que figuran a continuación, que son una variación más de cuantos venimos exponiendo, presentamos ejemplos de esta manera de calcular. Como fácilmente se comprende, cada estado no es privativo del procedimiento o estilo con el que ha sido presentado, sino que puede ser empleado con cualquiera de ellos.

ESTADO N.° 5.– Brújula anormal cuya declinación es 12° 35'.

Fórmula I: Acimut = Rumbo sur – declinación.

Longitud y acimut del lado *A-B*.					Longitud y acimut del lado *B-C*.				
	° '					° '			
	137 15	Rumbo sur.				218 45	Rumbo sur.		
	— 12 35	Declinación.				— 12 35	Declinación.		
94m,5	124 40	Acimut.			79m,6	206 10	Acimut.		
	74,02	*X'*	51,19	*Y'*		30,87	*X'*	62,83	*Y'*
	3,29	2.922,28	2,28	5.053,75		3,97	2.957,38	8,08	5.125,20
	41	*— 11*	28	*+ 5*		26	*— 22*	54	*+ 10*
		2.922,17		*5.053,80*			*2.957,60*		*5.125,30*
x=	77,72	*y*= +	53,75		*x*= +	35,10	*y*= +	71,45	
X=	3.000,00	*Y*=	5.000,00		*X*=	2.922,28	*Y*=	5.053,75	

ESTADO N.º 6.—Taquímetro anormal cuya declinación *d* es $19^g,17$.

400^g
$-\ 19,17$
$380,83$

Fórmula II: Acimut = (400 — d) — nonio II = $380^g,83$ — nonio II.

Puntos	Dist. hor.	Cálculo del acimut	Cálculo de X	Cálculo de Y	Coordenadas compensadas X	Coordenadas compensadas Y
1			X=5.328,17	Y=6.241,25		
	72,45	$380^g,83$ $-194,1546$ 186,6754	14,54 42 8 1 } x=— 15,05	68,47 1,96 39 5 } y=+ 70,87		
2			X=5.313,12 + 2	Y=6.312,12 — 3	5.313,14	6.312,09
	85,63	380,83 — 74,9255 305,9045	79,66 4,98 60 3 } x=+ 85,27	7,40 46 6 } y=— 7,92		
3			X=5.398,39 + 4	Y=6.304,20 — 6	5.398,43	6.304,14
	97,86	380,83 —145,9117 234,9183	46,93 3,65 42 3 } x=+ 51,03	76,80 5,97 68 5 } y=+ 83,50		
4			X=5.449,42 + 6	Y=6.387,70 — 9	5.449,48	6.387,61

En este último estado, como en el anterior, se ha conservado el cálculo de tablas para facilitar la revisión. El acimut de cada lado se obtiene restando de la constante $380^g,83$ la lectura del nonio II. El resto no requiere más explicación. De los números de cursiva que aparecen bajo las coordenadas totales y de la casilla «Coordenadas compensadas» se hablará más adelante. Su disposición, como la del estado número 3, es ventajosa para facilitar la corrida de coordenadas.

Obsérvese que en todos los cálculos que anteceden nos hemos referido siempre a acimutes astronómicos contados desde el Sur. Ello

obedece a que los lados o bases orientados por observación astronómica se dan siempre en esta forma. Fácilmente se comprende que la modificación que hay que hacer en las fórmulas, si los acimutes se cuentan desde el Norte, es tomar también los rumbos norte o las lecturas del nonio I.

Con lo expuesto creemos haber dicho todo lo necesario para que ningún caso, por raro que sea, pueda sorprender a nuestros lectores, que, es seguro, lo resolverán con éxito, sin que el procedimiento usado por tal o cual empresa pueda resultar nuevo para ellos, así como sus estados de cálculo propios, que, en último término, quedan reducidos a algunos de los tipos que hemos insertado.

Como complemento de todo ello vamos a ocuparnos de los errores sistemáticos que pueden cometerse en esta clase de trabajos y de la mejor manera de atenuarlos o repartirlos, todo lo cual constituye una cuestión muy importante, llamada «Compensación de coordenadas», que puede verse en toda su extensión teórica en los buenos tratados de Topografía, y que en su aspecto puramente práctico o de aplicación se expone en el capítulo siguiente.

CAPÍTULO II

COMPENSACIÓN DE COORDENADAS

10) Diversos métodos de compensación.—Si la línea poligonal que se calcula es cerrada, como el perímetro de una finca, por ejemplo, las coordenadas del último punto debieran ser iguales a las del primero, pero, aun estando el trabajo bien hecho, a causa de los pequeños errores instrumentales y de observación que se van cometiendo en cada estación, no ocurre así, y aun cuando parcialmente se compensan, dan lugar a una diferencia entre las coordenadas de partida y las de llegada, que en conjunto se denomina *error de cierre.*

Lo mismo ocurre si se trata de una poligonal $A\,B\,C\,.....\,L$ que empieza y termina en puntos de coordenadas conocidas.

Por ejemplo, A y L son vértices de una triangulación.

El cálculo da unas coordenadas para un último punto, que llamaremos L', que difieren de las de L, o verdaderas, en el error de cierre.

Este, si no es grosero, sólo puede imputarse al error natural cometido en ángulos y distancias; y en la imposibilidad de achacarlo a éste o al otro eje, o a unos cuantos, ¿qué hacer?, repartirlo lo más equitativamente posible entre los distintos ejes de la línea, de manera que cada punto de ella participe del error total en la medida que le corresponda.

Cuál ha de ser esta medida es el problema de la compensación, brillantemente resuelto en teoría por distintos autores, si bien, en general, los resultados obtenidos tienen escaso valor práctico por que conduzcan a cálculos más o menos complicados que no son en absoluto necesarios en los trabajos corrientes.

Una de las soluciones consiste en suponer que el error cometido en

la observación es proporcional a la distancia (*) y repartir, por tanto, el error de cierre en x y en y proporcionalmente a aquélla.

Por ejemplo, si la longitud de la línea es 1.748 m. y los errores de cierre en x y en y son, respectivamente, $-$ *32 cm.* y $+$ *21 cm.*, se calculan los cocientes *0,32 : 1.748* y *0,21 : 1.748;* si la longitud del eje *1-2* es *139 m.* se corrigen las coordenadas *parciales* del punto *2* en

$$-139 \times \frac{0{,}32}{1.748}, \qquad +139 \times \frac{0{,}21}{1.748},$$

y lo mismo se hace con los demás lados.

Otro procedimiento consiste en repartir los errores de cierre ε_x, ε_y proporcionalmente a las distancias, proyectadas sobre los ejes coordenados. Si se designan por Σx, Σy las sumas aritméticas de todas las coordenadas parciales, se aplica como corrección a las x, y de cada eje.

$$\pm x \cdot \frac{\varepsilon_x}{\Sigma x}, \qquad \pm y \cdot \frac{\varepsilon_y}{\Sigma y}.$$

Hay fórmulas más complicadas. En general, puede decirse lo siguiente: Para hacer que el punto L', dado por el cálculo, coincida con el verdadero L, se puede: 1.° Alargar o acortar la longitud de la recta ideal AL' para que sea igual a AL. 2.° Darle un giro alrededor de A para que L' coincida con L. Se ve, por tanto, que en la corrección que han de sufrir las coordenadas han de intervenir ambos factores, longitudinal y angular, y se hace la compensación atendiendo a ambos.

Pero todos los métodos que se empleen para obtener la compensación tienen algo de arbitrario y convencional, puesto que se desconoce cómo se han podido combinar las causas del error para producir el de cierre, y, además, se le considera como obedeciendo a causas sistemáticas, siendo así que no lo son. Precisamente la existencia de esos diversos

(*) Lo cual sólo a medias es cierto, pues en una visual, aparte del error en distancia, se cometen los siguientes: 1.° Falta de verticalidad del eje general del aparato: *error de horizontación* (de la plataforma). 2.° Falta de coincidencia entre la proyección de dicho eje y el punto del terreno y de coincidencia entre el eje de simetría de la señal y la vertical del punto visado: *error de dirección*. 3.° Falta de coincidencia entre la cruz filar y el eje de simetría de la señal: *error de puntería*. 4.° *Error de lectura*; y, 5.° *Apreciación del limbo*, ninguno de los cuales es debido a la lectura de la distancia. Si éstas se leen en la mira tampoco el error cometido — dentro de ciertos límites — depende propiamente de la distancia, sino de la claridad con que se vea aquélla, por la iluminación y estado del tiempo y de la correcta colocación de la misma.

métodos, que se excluyen unos a otros puesto que conducen a resultados diferentes, aunque poco, prueba que ninguno de ellos es categórico.

Por todo ello, en la práctica suele aplicarse un procedimiento sencillo, pero suficiente para la generalidad de los casos, que consiste, lisa y llanamente, en repartir el error de cierre en partes iguales entre todos los ejes de la poligonal (*).

	x		COMPENSADAS	
			x	y
A	**2.348,27**	**3.685,43**		
B	2.506,45 + 4	3.601,24 − 6	2.506,49	3.601,18
C	2.667,84 + 9	3.545,62 − 13	2.667,93	3.545,49
.....	.....	.....	.....	.....
.....	.....	.....	.....	.....
L	6.849,99	7.230,63	6.851,35	7.928,72
Debe ser	**6.851,35**	**7.928,72**		
Error de cierre...	+ 1,36 : 30 = 4,5 cm.	− 1,91 : 30 = 6,4 cm.		

En la anterior lista de coordenadas, las del primer punto *A* y el último *L*, conocidas de antemano, figuran en negritas. El error de cierre es positivo para las *x* y negativo para las *y*, puesto que hay que sumarlo o restarlo a las del cálculo para obtener las verdaderas.

Suponiendo que sean 30 los lados de la poligonal, corresponderá a cada uno *4,5 cm.* en *x* y *6,4* en *y*. Por tanto, corregiremos las coordenadas *totales* de *B* en *+ 4* y *— 6;* las de *C*, en el doble de la corrección, *+ 9* y *— 13;* las de *D*, en el triplo, etc. Es evidente que, siguiendo así, para el último punto resultarán las coordenadas verdaderas.

Estas correcciones, en números de cursiva, así como las coordenadas compensadas, se han consignado en los estados números 4, 5 y 6.

(*) La enunciación hecha en la nota anterior de los distintos errores cometidos por cada visual hace ver que también es criterio repartir el error total entre el número de ellas, puesto que en cada una intervienen todos los que se han enumerado. Por otra parte, las correcciones que se obtienen para cada punto, por éste y los demás métodos difieren tan poco entre sí, que no vale la pena aquilatar más, para que la corrección sea de 19 cm. en vez de 17, por ejemplo, cuando el error de observación es mucho mayor.

CAPÍTULO III

ANÁLISIS DE LOS ERRORES FORTUITOS

11) Procedimientos para la localización, en ciertos casos, de los errores en longitud y angulares.—Puede ocurrir que para el cierre se obtenga un error grosero (*) y descontado por la repetición concienzuda del cálculo que resida en éste, sólo podrá ser imputable a una equivocación o falta, que podrá ser en longitud o en ángulo.

Si la linea fué observada con taquímetro o brújula, leyendo rumbos, no es posible discernir si el error es de una u otra naturaleza.

Pero si fué observada por ángulos, tendrá una comprobación que puede excluir casi con certeza la posibilidad de un error angular.

En efecto, si es cerrada, la suma de sus ángulos interiores debe ser $2\,(n-2)$ *rectos*, siendo n el número de puntos.

Si la poligonal $A\,B\,C\,.....\,K\,L$ es abierta y va de vértice a vértice de triangulación, o de otra poligonal ya comprobada, al correr el acimut se obtendrá un cierto valor para el último lado $K\,L$, pero al estacionar en L se obtiene directamente, a partir de la triangulación, el acimut inverso $L\,K$, y ambos deben comprobar dentro de una prudente tolerancia.

Suele aceptarse para ésta, tanto en un caso como en otro, el doble

---

(*) La tolerancia en el cierre de poligonales puede ser, por ejemplo, de 1 a $2\ m.$ por kilómetro si las distancias se midieron con estadia, y de $0{,}5$ a $1\ m.$ si fueron medidas con cinta. Pero como los errores tienden a compensarse más cuanto mayor es la longitud de la línea y, por tanto, el número de observaciones, pueden emplearse las fórmulas $1\ m\sqrt{k}$ ó $2\ m\sqrt{k}$ para el primer caso y $0{,}50\ m\sqrt{k}$ ó $1\ m\sqrt{k}$ para el segundo, siendo k la longitud de la línea en kilómetros.

Estos valores no tienen nada de absolutos y se dan a título de simple indicación, aunque aseguramos que constituyen un término medio de lo que se obtiene en la práctica. Los resultados dependen, como se comprende, de la apreciación del instrumento, del modo de observar, del empleo de niveles o plomadas en las miras verticales, del uso de miras horizontales, etc.

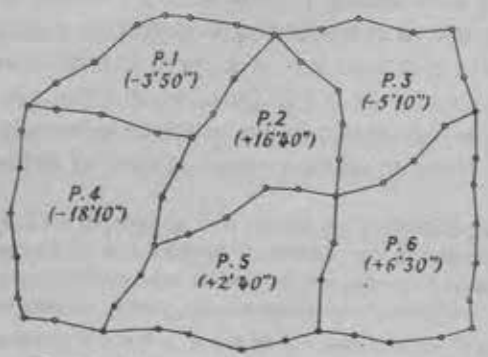
de la apreciación del goniómetro, por ángulo, o con más rigor, la apreciación, por ángulo; en términos generales *1'* por ángulo, por ejemplo, pero la compensación de los errores da lugar a que las poligonales de muchos lados cierren con pocos minutos.

Por ejemplo, si un polígono de *27* vértices cierra con *24'* es sospechoso y puede presumirse —y así lo confirma la experiencia— que en uno de sus ángulos se ha cometido un error grosero de *10* ó de *20'*, por lo cual el cierre es, en realidad, de *14* ó de *4*.

El error angular del polígono o de la línea, si es admisible, puede repartirse antes del cálculo, por partes iguales, entre todos sus ángulos —la línea cerrará así mejor, *aparentemente*—, pero si la compensación de coordenadas ha de hacerse por el último procedimiento descrito es inútil hacerlo así, puesto que aquél compensa todos los errores naturales en ángulos y en distancias.

Cuando las poligonales constituyen una red continua conviene hacer, *a priori*, el cierre angular de toda la red.

Para ello se hace un croquis de la misma, a tenor del que figura más abajo, en el cual se numeran todos los polígonos. Por separado se hace un estado, como el que se indica al margen, calculando el cierre de cada uno de ellos. Estos cierres se llevan al croquis escribiéndolos entre paréntesis en cada polígono, con su signo correspondiente.



Croquis del cierre angular de una red de poligonales.

POLÍGONO NÚM.

Vértices	Ángulos
	° ' "
1	124 37 40
2	87 43 00
3	108 16 20
...	.....
12	163 47 10
Suma.....	1.799 53 20
Debe ser..	1.800 00 00
Cierre.....	— 6' 40"

La simple inspección del croquis proporciona datos del mayor interés. Por ejemplo: se observa en él que los cierres de todos los polígonos, en general, son aceptables, pero los polígonos 2 y 4, aun estando

casi justo dentro de la tolerancia, tienen cierres algo elevados, el uno en + y el otro en —, y aproximadamente de igual cuantía. Puede presumirse que hay un error de *10'* en el trozo común a ambos polígonos, y es casi seguro que si se rectifica dicho trozo se encontrará en él dicho error, o tal vez uno de *20'*.

Cuando se ha cometido un error en longitud, la recta *L L'* que une el verdadero punto, que debiera ser de llegada *L* con el erróneo *L'*, dado por la poligonal, es sensiblemente paralela al lado erróneo (figura 15). Inversamente, supongamos que en la línea no hay error angular (por haberlo dado así a conocer el cierre tolerable en ángulos o acimutes), y que los errores de cierre ε_x, ε_y arrojan un desplazamiento inadmisible ε, entre el último punto *L'* y el verdadero de llegada *L*. Se puede presumir que se ha cometido un error de distancia en uno de los lados, cuya dirección aproximada es la de ε.

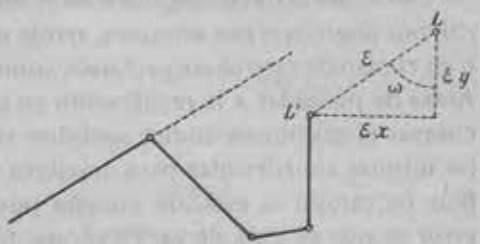


Fig. 15.—Localización, por el cálculo, de un error en longitud.

Si $\varepsilon = \sqrt{\varepsilon_x^2 + \varepsilon_y^2}$ es un número redondo, *10, 20, 50, 100,.....*, y el ángulo ω dado por la ecuación $\operatorname{tg} \omega = \frac{\varepsilon_x}{\varepsilon_y}$ coincide con el acimut de un lado, se puede asegurar, con visos casi de absoluta certeza, que en la longitud de dicho lado se ha cometido un error de *10, 20, 50, 100,.....* (*), y claro es que éste es el que debemos volver a medir para cerciorarnos.

Si la equivocación es en un ángulo, parece a primera vista que no se puede localizar el punto de la línea en que se cometió la falta, pero no es así. Supongamos que la observación angular en el punto *R* es errónea; todos los ángulos anteriores al *R* serán buenos, y todos los posteriores también. Situemos en un papel, por sus coordenadas verdaderas, los puntos extremos *A* y *L*. Si se desarrolla la línea en la parte comprendida entre *A* y *R*, a partir de *A*, se obtendrá una cierta posición para *R*. Si ahora se desarrolla la parte comprendida entre *L* y *R*, a partir de *L*, se obtendrá la misma posición, puesto que en uno y otro desarrollo

(*) Naturalmente, este procedimiento no es aplicable si varios lados de la línea tienen el mismo acimut y ω coincide con él.

sólo han intervenido los ángulos buenos BCD..... y KJI....., pero no el erróneo R.

Dicho en otros términos. Si se desarrolla toda la línea en el sentido AL, a partir de A, y se desarrolla también en sentido contrario, a partir de L, ambos desarrollos se cortarán en el punto R que tiene la falta.

De la misma manera, si se calculan coordenadas de la poligonal, primero en un sentido a partir del primer punto, y después en el contrario a partir del último, el punto que en ambos cálculos tenga las mismas coordenadas será el erróneo.

Este criterio puede seguirse en el caso de que el cierre de la poligonal, por ángulos o por acimutes, arroje un error grosero, $1°$, $5°$, $10°$,....., o en el caso de cierres sospechosos como el de $27'$ citado anteriormente. Antes de proceder a la rectificación en campo de toda la línea se puede ensayar el cálculo en ambos sentidos; si se obtienen aproximadamente las mismas coordenadas para un cierto punto R se empezará por rectificar en campo la estación en este punto. Si no se encuentra aquí el error es que se trata de varios o está diluido en toda la poligonal.

Sin necesidad de recalcular en sentido inverso se puede también obtener las coordenadas (x, y) del punto R (fig. 16), donde está el error angular que se presume ω, en función de este ángulo y de las coordenadas (a, b) y (a', b') de los puntos L y L', por las fórmulas

$$x = \frac{a + a'}{2} + \frac{b - b'}{2} \cot \frac{\omega}{2}$$

$$y = \frac{b + b'}{2} - \frac{a - a'}{2} \cot \frac{\omega}{2}.$$

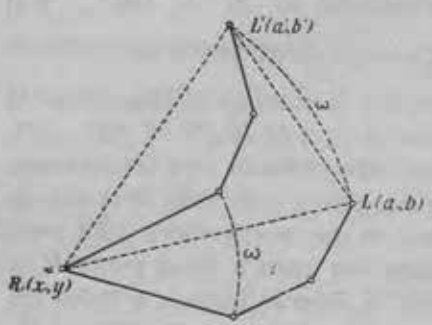


Fig. 16.—Ubicación de un error angular.

Por ejemplo, en el mismo caso ya citado de un cierre sospechoso, como el de $27'$, se supone que en un cierto punto se cometió un error de $20'$ ó de $10'$; adoptando para ω el valor $\omega = 20'$ se calculan dichas fórmulas, que son bien sencillas, para ver si los valores que proporcionan para x, y, coinciden aproximadamente con las coordenadas de uno de los puntos de la línea Si no es así, se tantea nuevamente el cálculo para el valor $\omega = 10'$, etc.

Igualmente pueden aplicarse cuando el cierre angular del polígono o de la línea denota un error de bulto; por ejemplo, si el cierre es de $9^{o}\ 53'$ se tantea para $\omega = 10^{o}$.

Esto permite restringir la rectificación a un sólo punto, en el cual, casi siempre, se encuentra el error previsto.

A pesar de la sencillez de estas fórmulas, conviene prepararlas para no achacarles el posible fracaso en su utilización, cuando sólo puede ser debido a un error de cálculo, pues están bien probadas. Para ello se empieza por escribir los valores de a y a' y los de b y b', y se continúa el cálculo hacia arriba y hacia abajo, como se ve a continuación:

$$\frac{a-a'}{2} =$$

$$a-a' =$$

$$a =$$

$$a' =$$

$$a+a' =$$

$$\frac{a+a'}{2} =$$

$$\frac{b-b'}{2} =$$

$$b-b' =$$

$$b =$$

$$b' =$$

$$b+b' =$$

$$\frac{b+b'}{2} =$$

$$x =$$

$$\frac{a+a'}{2} =$$

$$\frac{b-b'}{2} \cot \omega =$$

$$\lg \frac{b-b'}{2} \cot \omega =$$

$$\lg \frac{b-b'}{2} =$$

$$\lg \cot \omega =$$

$$\lg \frac{a-a'}{2} =$$

$$\lg \frac{a-a'}{2} \cot \omega =$$

$$\frac{a-a'}{2} \cot \omega =$$

$$\frac{b-b'}{2} =$$

$$y =$$

Después se escribe en el centro el valor de *lg cotangente* y los de $\frac{b-b'}{2}$ y $\frac{a-a'}{2}$; y como antes, se sigue en ambos sentidos hasta llegar a obtener x, y, cuyos valores hay que comparar con las coordenadas de los diversos puntos de la poligonal para ver si los de alguno de ellos coinciden aproximadamente con los referidos valores.

Este cálculo resulta insignificante si se compara con lo que exigiría la repetición, en orden inverso, de una poligonal de 50 lados, por ejemplo.

Las fórmulas utilizadas se obtienen fácilmente observando (fig. 17) que los puntos L y L' equidistarán de R. Por tanto, siendo M el punto medio de $L\,L'$ e Δx, Δy, las diferencias entre sus coordenadas y las de R, y δx, δy, las diferencias entre las de L y M, la semejanza de los triángulos rectángulos que forman, da:

$$\frac{\Delta x}{\delta y} = \frac{\Delta y}{\delta x} = \frac{RM}{ML} = \cot\frac{\omega}{2} \left\{ \begin{array}{l} \Delta x = \delta y \cot\frac{\omega}{2} \\ \Delta y = \delta x \cot\frac{\omega}{2} \end{array} \right.$$

Pero se tiene:

$$\Delta x = \frac{a+a'}{2} - x \qquad \delta x = a - \frac{a+a'}{2} = \frac{a-a'}{2}$$

$$\Delta y = \frac{b+b'}{2} - y \qquad \delta y = \frac{b+b'}{2} - b = -\frac{b-b'}{2}.$$

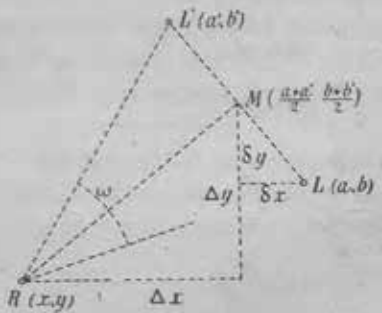


Fig. 17.

Cuyos valores, sustituídos en las dos ecuaciones anteriores, proporciona los de x, y:

$$x = \frac{a+a'}{2} + \frac{b-b'}{2}\cot\frac{\omega}{2}$$

$$y = \frac{b+b'}{2} - \frac{a-a'}{2}\cot\frac{\omega}{2}.$$

Estas fórmulas son generales, cualquiera que sea la posición relativa de los puntos R, L y L'.

Un error en longitud puede ser localizado también por el desarrollo de la línea, en sentidos contrarios, a partir de los extremos. Sea la poligonal A ..... L de la figura 17'. Si en el lado DE se ha cometido un

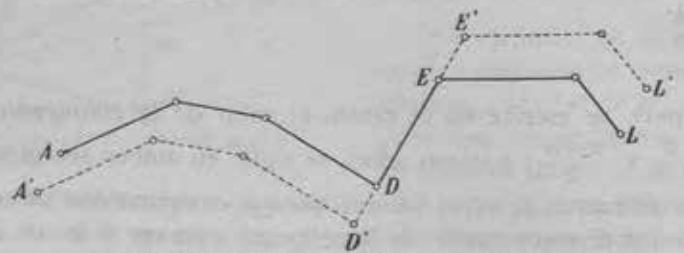


Fig. 17'. – Localización, por desarrollo, de un error en longitud.

error en longitud que traslada el punto E a E', el vértice L, que debiera ser de llegada, se habrá trasladado a L'. Si ahora se desarrolla a partir

de L, D se trasladará a D', y el primer punto A de la poligonal a A'. Ambos desarrollos tendrán común la parte DE, que es precisamente la verdadera longitud del lado erróneo.

Los falsos puntos A' y L' estarán a distinto lado de la recta ideal AL; al contrario de lo que ocurre si el error es angular, como se vería construyendo una figura adecuada.

El desarrollo en sentidos contrarios puede servir, por tanto, en ciertos casos, para discernir la naturaleza del error, pues además de lo dicho se tendrá el siguiente criterio: si la falta es longitudinal, ambos desarrollos tendrán común un trozo de un lado, y si es angular, tendrán común un vértice.

Cuanto llevamos dicho es, naturalmente, en el supuesto de que haya un solo error y de una sola naturaleza, longitudinal o angular, lo que no siempre ocurre. Es caso frecuente la equivocación de punto, y entonces ambos datos, ángulo y distancia, son falsos. Igualmente, repetimos, si se trata de una poligonal observada por rumbos, sin comprobación angular, es imposible discernir la naturaleza de la falta.

CAPÍTULO IV

EJEMPLOS DE APLICACIÓN

12) Cálculo de un tramo recto de un trazado, cuyos extremos no son visibles entre sí.—Es esta una de las más corrientes aplicaciones del cálculo de coordenadas, por lo cual vamos a dedicarle unas líneas. Se presenta este caso en el proyecto de túneles en tramo recto, en el de líneas eléctricas de alta tensión o de importancia, etc. Para replantear sobre el terreno el perfil del trazado y poder proyectar los pozos de ataque, postes, etc., se necesita el rumbo del tramo.

Para ello se enlazan los dos extremos A y B (fig. 18) por medio de una poligonal lo más corta posible y observada con garantías de la mayor precisión y exactitud (debe hacerse dos veces en sentidos contrarios y con distintas estaciones) y tomando las precauciones necesarias para que sea imposible que se deslice error de campo, y se procede en gabinete al cálculo de coordenadas rectangulares.

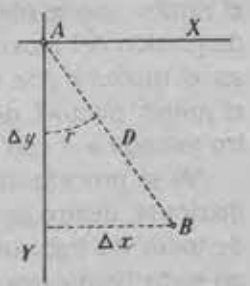


Fig. 18.—Cálculo de un tramo recto.

Como rumbo de partida de dicho cálculo, si no hay triangulación, se toma el que dé el taquímetro para el primer eje de la poligonal, habiéndolo orientado con la declinatoria al estacionar en A.

Si se designan por Δx, Δy las diferencias entre las coordenadas del punto B y del A, el rumbo r se obtendrá por la fórmula

$$\operatorname{tg} r = \frac{\Delta x}{\Delta y}.$$

También suele necesitarse la longitud geométrica AB del tramo. Se empieza por calcular su proyección horizontal D, que es la hipotenusa

de un triángulo rectángulo que tiene por catetos Δx, Δy, aunque es preferible calcularla por la fórmula

$$D = \frac{\Delta x}{\operatorname{sen} r},$$

que es más sencilla. Obtenida D, la longitud AB será la hipotenusa de un triángulo rectángulo cuyos catetos son D, y la diferencia de nivel entre A y B, que proporciona la poligonal si se observaron las cenitales, aunque es mejor obtenerla con nivel si se trata de túneles, acequias, etc.

Obtenido en gabinete el rumbo r, se puede proceder al replanteo del perfil del tramo recto sobre el terreno.

Si el trabajo no es de precisión se puede proceder por rumbos. Se estaciona en A con el taquímetro, se orienta con la declinatoria, se hace acusar al nonio el rumbo r y se hace entrar una mira en la alineación correspondiente, obteniéndose el primer punto, L, del perfil. Se traslada el taquímetro al punto L y se procede del mismo modo, etc.

En trabajos más escrupulosos es preferible operar por ángulos, del modo siguiente:

Al hacer el replanteo se estaciona en A, y en lugar de orientarlo con la declinatoria, se orienta visando al primer punto de la poligonal con el rumbo que se obtuvo al observar ésta. Se suelta entonces el tornillo de presión del movimiento acimutal del anteojo, se hace al nonio acusar el rumbo r y se mete una mira o jalón en la alineación para obtener el primer punto L del perfil. Al estacionar en L se orienta el taquímetro visando a A con el rumbo inverso de r (*), etc.

Ya se proceda de un modo o de otro, la llegada a B o a sus inmediaciones, dentro de una prudente tolerancia, nos garantizará la bondad de todos los trabajos hechos, tanto de campo como de gabinete, pues no se ha hecho otra cosa que recorrer un polígono cerrado.

El pequeño error de desviación, en la llegada, de medio, uno, dos metros ....., se puede compensar entre todos los puntos del trazado proporcionalmente a las distancias al origen, llevando las correcciones correspondientes (que se pueden hallar gráficamente) sobre pequeñas normales al eje del trazado y señalando en el terreno los nuevos puntos resultantes que serán los definitivos del perfil.

(*) O con el mismo r en que quedó el anteojo al levantar la estación de A, pues una diferencia de $200\,g$ proporciona la misma alineación. Se ahorra así el 50 por 100 de las coincidencias de nonio y limbo.

El lector se dará cuenta fácilmente de que toda la escrupulosidad que ponga cuando se le encomiende una operación de esta índole será poca, por la responsabilidad en que puede incurrir en el caso de obras costosas; pero si las consecuencias no acarrean gastos la cosa tendrá poca importancia; ¿quién no ha visto una torcedura en una línea de alta tensión eléctrica?, aun cuando el defecto quede allí permanente para demostrar la impericia o el descuido del que hizo el proyecto.

13) Cálculo de superficies con los datos de campo. — Para terminar ofrecemos otro ejemplo de aplicación del cálculo de coordenadas. La superficie se obtiene sin medir gráficamente ninguna dimensión en el plano.

Sea *A B C D E* una parcela cuyo levantamiento se ha hecho con cualquier instrumento que mida ángulos y distancias, bien por el procedimiento de rodeo, de radiación o mixto.

Descompuesta, como se ve en la figura 19, por paralelas a los ejes coordenados, después de haber calculado las coordenadas rectangulares de sus vértices, su superficie será la suma de los rectángulos y de los triángulos resultantes.

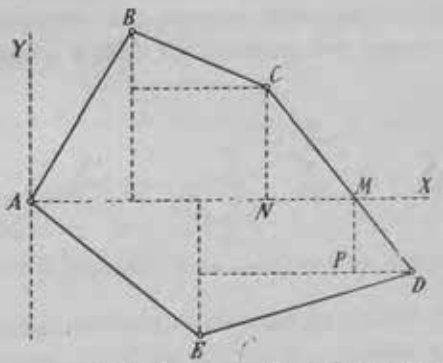


Fig. 19.— Cálculo de una superficie con los datos de campo.

Tanto unos como otros tienen por dimensiones las diferencias entre las coordenadas de sus vértices; por ejemplo, el rectángulo *H K N C* tiene por base la *X* de *C* menos la *X* de *B*, y por altura la *Y* de *C* menos la *Y* de *A*.

Dos triángulos como los *C M N* y *D M P*, cuyas hipotenusas constituyen un lado de la poligonal, se tratan como uno solo cuyas dimensiones son las diferencias de coordenadas entre *C* y *D*.

Como se ve, en el cálculo no interviene ninguna dimensión que se haya medido gráficamente en el plano; todo él se basa en los números escritos en la libreta de observación, y el resultado supera en mucho en exactitud al que se obtendría con el planímetro.

Este procedimiento es especialmente apto para polígonos de poca extensión y gran valor, como parcelas urbanas, solares, etc.

CAPÍTULO V

REGLAS PRÁCTICAS PARA LA OBSERVACIÓN DE LAS POLIGONALES EN CAMPO Y RESUMEN GENERAL

14) Observación de las poligonales.—Las poligonales pueden ser observadas con instrumentos provistos o no de aguja magnética, o dicho en otros términos, por rumbos o por ángulos.

En el primer caso, un error cometido en la observación de un rumbo (fortuito o sistemático de apreciación del aparato) queda en el lado a que afecta y no trasciende al resto de la poligonal más que en la cuantía del mismo. Así el error angular φ (fig. 20) produce un desplazamiento lineal ε en la situación del punto C', y este mismo, y paralela mente a él, es el que sufre el último punto de la poligonal.

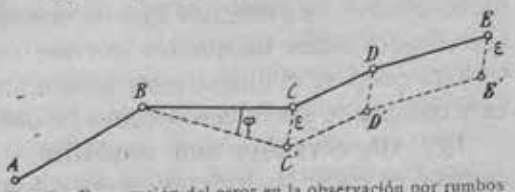


Fig. 20.—Propagación del error en la observación por rumbos

En cambio, si la observación fué angular (fig. 21), el desplazamiento obtenido en el último punto E', con respecto al que debiera ser el verdadero E, equivale al giro de la recta ideal BE alrededor de B en la magnitud angular φ, y, por tanto, mucho mayor que en el caso anterior.

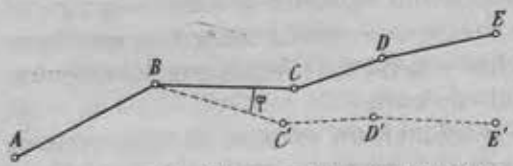


Fig. 21.—Propagación del error en observación por ángulos.

De aquí las ventajas que representa la observación por rumbos cuando se trata de itinerarios largos y de muchos lados, que justifican el empleo de la brújula, y los excelentes resultados que se obtienen con este instrumento a pesar de su menor apreciación.

En lo que sigue vamos a dar algunas reglas prácticas sobre la manera de llevar la observación según sea el instrumento que se emplee para ello.

15) Observación con brújula.—Cuando se sabe de antemano que un itinerario que se va a hacer con brújula ha de ser calculado por coordenadas conviene mucho hacer las lecturas de la punta norte por el procedimiento de *rumbos menores de un cuadrante* (4), pues, según se dijo, el ángulo está siempre en las tablas y la indicación de los puntos cardinales, que acompaña a la lectura, da a conocer los signos de las coordenadas. Por tanto, el cálculo no requiere preparación alguna y es especialmente apto para los que no estén muy expertos.

Las lecturas de la punta sur de la aguja pueden hacerse en tal caso *de cero a 360°*, lo que proporciona, en gabinete, una excelente comprobación de las hechas con la punta norte, excluyendo los errores *de oído*, ya que en muy contados casos unas y otras tendrán algún parecido.

Al hacer la observación por rumbos menores de un cuadrante no conviene corregir de declinación cada eje al hacer el cálculo —como se hizo en los estados números 5 y 6—, porque el rumbo puede pasar a otro cuadrante al ser corregido y ello ocasionaría una perturbación en dicho cálculo. Es preferible hacerlo con los rumbos magnéticos, y una vez situados todos los puntos por sus coordenadas rectangulares, se saca un calco en el que se pone la situación de la meridiana astronómica y que puede ser utilizado como de ordinario.

16) Observación con teodolito.—El procedimiento ordinario consiste en hacer las lecturas correspondientes a las miras de espalda y de frente, cuya diferencia proporciona el ángulo; la corrida de acimutes se efectúa según la regla dada (8) *invirtiendo el acimut del lado anterior y añadiendo el ángulo de ambos lados en el sentido directo o normal.*

Cuando se dispone de un teodolito repetidor se simplifican algo las operaciones visando siempre a la mira de espalda con lectura *cero*, pues de este modo las lecturas hechas a la mira de frente son los ángulos, evitándose, por tanto, el cálculo de éstos.

De un modo u otro, este procedimiento presenta el inconveniente de que si se ha cometido un error al calcular el acimut de un lado, el error trasciende a todo el resto de la línea, de cuyo cálculo no puede aprovecharse nada, teniéndolo que repetir *íntegramente*.

Hemos ensayado un procedimiento de observación que está exento del inconveniente apuntado y presenta, además, las siguientes ventajas:

1.ª, la comprobación del cierre en acimut de la línea se hace en el mismo campo al terminar la observación; 2.ª, el cálculo de los acimutes es fácil y rápido. La idea de este procedimiento, conocido de antiguo, ha sido modificada suprimiendo lo que había en ella de inútil y engorroso y, con la ayuda de los compañeros que lo practican, se le ha dado la soltura y sencillez apetecibles para que la observación sea rápida y fácil, así como el cálculo.

Para la práctica de este método se necesita un teodolito repetidor; y, entre éstos, los más aptos y cómodos son aquéllos que están provistos de una palanca cuyo juego sujeta índice y limbo en una lectura determinada.

Suponiendo que las poligonales se desarrollan siempre dentro de una triangulación, para llenar con puntos trigonométricos los espacios que no pueden ser cubiertos por triángulos, por impedirlo las edificaciones o el arbolado, de dicha triangulación se conocerán exactamente los acimutes de los lados si ya ha sido calculada, y de un modo aproximado si la observación se ha hecho orientando el teodolito en cada estación a partir de los acimutes de los vértices de salida, o simplemente con la orientadora.

El procedimiento consiste en dejar en cada estación el teodolito en la lectura de la mira de frente y visar en la estación siguiente a la mira de espalda con dicha lectura, *sin invertirla*. Si en la estación de salida se orientó con el acimut de un lado de la triangulación, las lecturas a cada mira serán los acimutes verdaderos, o sus inversos, sin que ello importe gran cosa, puesto que nunca habrá duda respecto a la verdadera orientación de cada lado, cuyo extremo puede aclarar en todo caso el croquis de la línea, que ha debido llevar el observador.

La comprobación del cierre en acimut se obtendrá en la última estación; si la línea es cerrada, la última lectura será el acimut de salida $\pm$ 180°; y si es abierta, será el acimut de otro lado de la triangulación o de otra poligonal ya observada, y, tanto en un caso como en otro, el error de cierre nos dará idea de la bondad del trabajo en el mismo campo, pudiendo hacerse sobre la marcha la rectificación que proceda.

El estado de observación presenta el aspecto que puede verse más abajo. Se ha partido del vértice *H* de la triangulación. No disponiéndose de acimut, ni aun aproximado, del lado *HM* de ésta, se ha orientado en *H* con la orientadora y se ha continuado la poligonal conservando las lecturas de frente en cada estación para pasar a serlo de

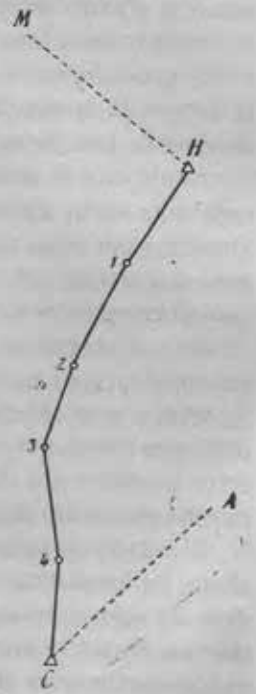
espalda en la siguiente, sin invertirlas, con lo que resulta que en las estaciones *H, 2, 4,* los acimutes están tomados en su verdadero sentido; y en las *1, 3, C,* están invertidos. Dado que los teodolitos modernos no suelen tener más que un índice, en aquéllas escribiremos las lecturas en la casilla de nonio I, y en éstas en nonio II. Si tiene dos, se llenan todas las casillas, pero alternando el orden de escritura.

Como se ve en el estado, cada lectura figura en él dos veces, y además está leída en el limbo dos veces, lo que disminuye la posibilidad de cometer errores de lectura. Como éstas son acimutes, aunque sean aproximados, el croquis puede ser bastante correcto e incluso puede construirse con transportador y escala. Las lecturas, como se ha dicho, se van escribiendo alternativamente en la casilla I y en la II; las primeras son acimutes directos y las segundas inversos.

ESTADO N.° 7.—Observación por ángulos conservando las lecturas de la mira de frente.

Estaciones	Puntos Obsv.ª	Lecturas de mira	LECTURAS ACIMUTALES I Directas	LECTURAS ACIMUTALES II Inversas
			° ' "	° ' "
Vce *H*	Vce *M*		132 47 10	
	1	98,10	29 50 40	
1	Vce *H*	97,90		29 50 40
	2	90,00		203 32 40
2	1	90,00	203 32 40	
	3	61,80	17 22 40	
3	2	62,20		17 22 40
	4	100,00		174 42 40
4	3	100,00	174 42 40	
	Vce *C*	86,00	2 34 40	
Vce *C*	4	86,00		2 34 40
	Vce *A*			51 27 50

CROQUIS



Para hacer el estado del cálculo se escribe en cada eje la lectura, invirtiendo las de nonio II, y la longitud del lado. En seguida se calcula, por diferencia entre el verdadero acimut del lado *H M*, que ya se conocerá, y la lectura hecha, la corrección que hay que aplicar en todos los ejes para obtener los acimutes verdaderos, como se ve en el estado núm. 8 al margen.

ESTADO N.º 8.—Cálculo de la poligonal del Estado n.º 7.

Puntos	Dist. hor.	Cálculo del acimut	Abscisas	Ordenadas
		° ′ ″		
Vce *H*			$X = 1.000,00$	$Y = 1.000,00$
		29 50 40		
	98,00	— 7 40	$-x = 48,58$	$-y = 85,11$
		29 43 00		
1			$X = 951,42$	$Y = 914,89$
		23 32 40		
	90,00	— 7 40	$-x = 35,77$	$-y = 82,58$
		23 25 00		
2			$X = 915,65$	$Y = 832,31$
		17 22 40		
	62,00	— 7 40	$-x = 18,38$	$-y = 59,21$
		17 15 00		
3			$X = 897,27$	$Y = 773,10$
		354 42 40		
	100,00	— 7 40	$+x = 9,44$	$-y = 99,55$
		354 35 00		
4			$X = 906,71$	$Y = 673,55$
		2 34 40		
	86,00	— 7 40	$-x = 3,67$	$-y = 85,92$
		2 27 00		
Vce *C*			$X = 903,04$	$Y = 587,63$

	° ′ ″
Acimut Vce *H* — Vce *M*	= 132 39 30
Lectura	= 132 47 10
Corrección	= — 7′ 40″

	° ′ ″
Vce *C* — Vce *A*	= 231 27 50
	— 7 40
	231 20 10
Debe ser	= 231 24 30
Cierre	= — 4 20

El cálculo de aquéllos resulta así muy sencillo, pues queda reducido a sumar o restar una constante; y, además, según se dijo al principio, un error cometido en cualquiera de ellos no trasciende de unos

ejes a otros, sino que queda localizado en el eje en que se produjo; el cálculo de los demás puede aprovecharse casi en la totalidad, pues sólo habrá que modificar la corrida de coordenadas.

El error de cierre en acimut, si es de alguna importancia, aun cuando tolerable, puede compensarse entre todos los lados acumulando a la constante de corrección la parte correspondiente; de modo que si ésta es, por ejemplo, — *10"*, y la constante — *7' 40"*, las correcciones para el primer eje y siguientes serán, respectivamente, — *7' 50"*; *8' 00"*; *8' 10"*,.....

17) Observación con taquímetro. — Los taquímetros clásicos participan a la vez de las condiciones orientadoras de la brújula y de la cualidad de teodolitos repetidores para la observación de los ángulos, de modo que pueden ser empleados de un modo u otro.

Cuando la observación se hace por rumbos, orientando cada estación, habrá una pequeña diferencia entre el rumbo directo e inverso de cada eje, debido al rozamiento del soporte de la aguja en el estilete, inercia, etc. Esta diferencia es, en general, superior a la apreciación instrumental, que en estos aparatos suele ser de un minuto.

Por esta razón, los rumbos de taquímetro, en contra de lo que algunos, poco enterados, creen, no son ni más ni menos exactos que los que se obtienen con la brújula. Cierto es que la apreciación de lectura es de un minuto, pero esta apreciación es relativa entre las distintas visuales tomadas desde cada estación, pero no absoluta entre las punterías hechas desde diversas estaciones, para las cuales la apreciación es de cinco a diez minutos, como lo es con toda aguja imantada de tipo corriente, sea de brújula o de declinatoria.

Esta diferencia (de posición de equilibrio de la aguja) se puede corregir en todos los ejes, de manera que la posición de aquélla en todas las estaciones resulte paralela a la que tenía en la primera de ellas.

Para esto se forma un estado de rumbos corregidos como el que figura a continuación. La corrección para la estación *B* es — *7*; la parcial para la *C*, + 4; por tanto, la total para esta última estación será la suma algébrica — *3*; etc.

Con esta corrección de rumbos se consigue, como se ha dicho, que todos ellos estén referidos a la posición de equilibrio de la aguja en la primera estación; pero adviértase que al proceder de este modo, la poligonal corregida queda como si hubiera sido observada por ángulos y, por tanto, se pierden las ventajas señaladas, **14)**, que presenta

la observación por rumbos para las poligonales largas y de muchos lados.

ESTADO N.° 9.—Corrección de rumbos en una observación con taquímetro.

EJES	Rumbos leídos	CORRECCIONES		Rumbos corregidos
		Parciales	Totales	
A-B.....	29° 36′			
		— 7′		
B-A.....	209 43			
			— 7′	
B-C.....	46 28			46° 21′
		+ 4′		
C-B.....	226 24			
			— 3′	
C-D.....	57 18			57 15
		— 8′		
D-C.....	237 26			
			— 11′	
D-E.....	19 40			19 29

A este respecto, y como orientación segura para el lector, a manera de resumen comparativo entre las observaciones por rumbos y por ángulos, copiamos a continuación la autorizada opinión que el Ingeniero suizo Sr. Wild expone sobre el asunto:

«Para levantamientos poligonales de gran longitud y un número elevado de vértices es bien conocida la ventaja de las brújulas de fina apreciación sobre los teodolitos (*).

Esta ventaja proviene de dos causas. Por una parte, la ley de la propagación de los errores es mucho más favorable utilizando la brújula; tanto que, para los grandes recorridos, tiene en su longitud total una mayor precisión a pesar de su menor precisión en la medida aislada de cada ángulo. Esto resulta claro del estado adjunto, que da la

(*) Se refiere a las brújulas modernas que tienen el limbo unido a la aguja y en las cuales la lectura se hace con apreciación de 1 a 2 minutos; muy superiores desde algunos puntos de vista a los antiguos taquímetros de tipo clásico.

comparación entre un recorrido poligonal corriente y uno con brújula, aplicando las fórmulas de *Jordan*, relativas a la propagación del error.

Se supone en este estado que cada lado del polígono tiene *100 m.* y que el error medio con teodolito corriente es $\pm$ *20″* (Para obtener esta precisión se necesita centrar bien el instrumento y visar exactamente, pues un error de centraje de $\pm$ *5 mm.* y uno de puntería de la misma importancia conducen a un error angular de $\pm$ *20″)* y que el de la brújula es $\pm$ *1′* ó $\pm$ *2′* por ángulo.

Longitud del recorrido con lados de 100 metros	ERRORES MEDIOS CUADRÁTICOS		
	CON TEODOLITO $\varepsilon = \pm 20''$	CON LA BRÚJULA	
		$\varepsilon = \pm 1'$	$\varepsilon = \pm 2'$
500 m.	$\pm$ 0,07 m.	$\pm$ 0,07 m.	$\pm$ 0,13 m.
1.000	0,18	0,09	0,19
2.000	0,52	0,13	0,26
5.000	2,00	0,21	0,41
10.000	5,63	0,29	0,58

Por otra parte, además de las condiciones favorables de la propagación del error, interviene el hecho de que, utilizando la brújula, se puede suprimir la estación de instrumento donde se colocan las miras, o sea, que puede hacerse el recorrido por estaciones alternativas, en vez de tener que estacionar en todos los puntos, como ocurre con el teodolito, lo cual reduce a la mitad el tiempo invertido en el recorrido.»

APÉNDICE

UN PROCEDIMIENTO SENCILLO Y PRÁCTICO PARA LA ORIENTACIÓN DE BASES TOPOGRÁFICAS

18) Orientación de bases por el acimut de la Polar en su máxima digresión.—En el párrafo **9)** se dieron las reglas necesarias para obtener la declinación de brújulas y taquímetros por medio de una base de acimut conocido. No siempre es posible encontrar una base orientada en las inmediaciones del sitio en que radica el levantamiento, por lo cual vamos a exponer un procedimiento sencillo para orientación de bases.

Tiene este método la ventaja de que no requiere cálculo alguno en gabinete, pues la operación queda totalmente ultimada sobre el terreno, proporcionando, sin embargo, una rigurosa exactitud de una décima de minuto —si el instrumento usado tiene esta apreciación—, que es el intervalo con que están calculados los acimutes de las estrellas circumpolares en la tabla que inserta el «Anuario del Observatorio Astronómico de Madrid».

Este procedimiento no es otra cosa que una reducción, adaptada al caso de la Polar y puesta en condiciones de fácil realización, del que se describe en el citado Anuario, por la observación de la máxima digresión de seis estrellas circumpolares. Como es sabido, se dice que un astro se encuentra en dicha posición cuando más apartado está del meridiano, unas seis horas antes y después de su paso por el mismo. En dichos instantes su horario y su vertical son perpendiculares entre sí (fig. 22).

La Polar describe alrededor del eje del mundo un paralelo celeste de poca amplitud —un grado y medio, aproximadamente—. En su máxima digresión o elongación su variación en acimut es nula durante

unos cuantos minutos, lo que permite una enfilación muy exacta, que depende poco del factor tiempo. Una indecisión de cuatro o cinco minutos en el estado del reloj empleado en la operación tiene poca importancia, y, por tanto, puede aquél tomarse de la estación telegráfica más próxima, de la del ferrocarril, o por las campanadas del reloj que radian diariamente las emisoras.

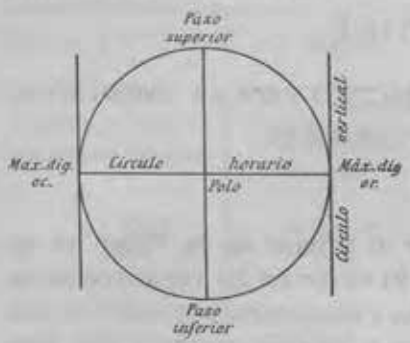


Fig. 22.

El «Anuario del Observatorio Astronómico de Madrid» publica las horas en *tiempo medio civil local* de los pasos superiores por el meridiano de Madrid de seis estrellas circumpolares, entre ellas la α *Ursae Minoris*, o Polar, de diez en diez días. Por sencilla interpolación puede obtenerse la que corresponde a un día cualquiera.

Publica también, en otra tabla, los acimutes y horarios, en la máxima digresión, de las referidas estrellas. Si de la hora de la culminación se resta el horario para dicho instante se tendrá el momento de la máxima digresión oriental, y, si se suma, el de la occidental, uno y otro expresados en *tiempo medio civil local* (*).

Supongamos que el día 19 de agosto de 1945 hubiera que hacer en Oropesa, cuya latitud aproximada es *39° 55′* y su longitud en tiempo *seis minutos al Oeste de Madrid*, una orientación (**).

(*) Si al sumar resultara un número superior a veinticuatro horas se le restará este número, pues la máxima digresión occidental, posterior a la culminación, tendría lugar al día siguiente de la fecha de ésta. Del mismo modo, si el horario fuera superior a la hora del paso, agregaríamos a ésta veinticuatro horas para hacer la resta, pero el resultado se referiría al día anterior. Por tanto, en tales casos, para saber la hora de la máxima digresión en un día determinado se partirá de la hora de la culminación del día siguiente o del anterior, respectivamente. En realidad, el número que debería restarse o sumarse es $23^h, 56^m,1$ (duración de un día sidéreo) pero la diferencia no tiene importancia alguna para nuestro objeto.

(**) Las coordenadas geográficas del lugar se pueden obtener por las de algún vértice geodésico que esté próximo. Hoy día se conocen las de todas las cabezas de Ayuntamientos de España por la red geodésica de 3.er orden, siendo éstas suficientes para las orientaciones que se practiquen en el término municipal. También pueden obtenerse gráficamente de una carta o mapa.

Como en dicho día la *hora local* de la culminación de la Polar en Madrid es, según da la tabla, $3^h\ 58^m$, *y esta misma es muy aproximadamente la del paso en hora local por cualquier otro meridiano de España,* restando y sumando a este número el horario de la máxima digresión para la latitud dada, que según la tabla es $6^h\ 3^m$, se obtiene:

Hora local del paso.....	$3^h\ 58^m$	Hora local del paso.....	$3^h\ 58^m$
Horario de la m. d.....	$-\ 6^h\ 3^m$	Horario de la m. d.....	$+\ 6^h\ 3^m$
Hora local de la m. d. oriental	$21^h\ 55^m$	Hora local de la m. d. occidental	$10^h\ 01^m$

Excluída la occidental, tendremos que hacer la observación a las $21^h\ 55^m$ *de hora local de Oropesa.*

Suponiendo que hemos arreglado nuestro reloj con la hora oficial (*) dará, según el sencillo cálculo siguiente:

Longitud Madrid W. Greenwich.....	$14^m\ 45^s$
— Oropesa W. Madrid.....	6^m
— Oropesa W. Greenwich.....	$20^m\ 45^s$

la hora local de Oropesa con unos 21^m de adelanto. A sus indicaciones habrá que quitar esos 21^m; o mejor, sumar a la hora de la m. d. estos 21^m para saber la hora que debe marcar nuestro reloj en tal momento, lo que es más práctico. Diremos:

Hora local de la m. d.....	$21^h\ 55^m$
Diferencia de longitud.....	$+\ 21^m$
Hora del reloj (T. M. G.) para la m. d.....	$22^h\ 16^m$

Para practicar la operación se estaciona con el aparato unos veinte minutos antes de la hora prevista. Si aquél es repetidor, lo más cómodo es ponerle en la lectura $1°\ 18',2$ que da la tabla de acimutes y horarios de la m. d. para acimut de la Polar en dicho instante (**).

Se apunta a la estrella valiéndose de los tornillos repetidores, y se observa que para mantenerla en el hilo vertical de retículo es preci-

(*) La hora oficial es el tiempo medio civil de Greenwich (T. M. G.) por el que se rige el huso de Europa occidental, en el que está situada España.

(**) Si la m. d. hubiera sido occidental lo pondríamos en la diferencia entre dicho acimut y 360° ó 400^g. Se supone que el goniómetro es de graduación normal.

so ir moviendo, cada vez más lentamente, el tornillo de coincidencia, hasta que llega un momento en que no es preciso actuar sobre él, porque la Polar recorre durante unos cuantos minutos el referido hilo, lo que puede comprobarse que ocurre en las inmediaciones de la hora calculada. Asegurada bien la puntería, la observación astronómica ha terminado y sólo falta referirla al terreno.

Para ello se suelta el anteojo, y con lectura *cero* se manda clavar una estaca en la enfilada a 100 ó 150 metros. La dirección de aquélla será la meridiana, que puede servir para declinación de brújulas, etc.

Si se trata de orientar una base AB, en cuyo extremo A se ha hecho la observación del modo dicho, se visa a una linterna colocada en B y tapada con un cartón provisto de un agujero para disminuir la extensión del foco luminoso. La lectura que se haga en el limbo horizontal será el acimut de la base, referido al Norte.

PREPARACIÓN DE LA OBSERVACIÓN PARA LA

Orientación de la base ..... por la máxima digresión de la Polar haciendo estación en el extremo .....

La observación se realizó el día ..... de ..... de 19....

Posición geográfica del lugar de observación:

Latitud..... ....° ....'

Longitud..... .... = ...^{m} ....^{s} al .... de Madrid.

Longitud de Madrid al W. de Greenwich..... 14^m 43^s

Longitud de ..... al .... de Madrid ....

Longitud de ..... al .... de Greenwich.. ... ...

Hora local del paso superior de la Polar el día..... ....^{h} ....^{m}

Horario de la máxima digresión $\begin{matrix}\text{occidental} +\\ \text{oriental} -\end{matrix}$ ....

Hora local de la máxima digresión ..... el día ....

Longitud de ..... al $\begin{matrix}W +\\ E -\end{matrix}$ de Greenwich..... ....

Hora del reloj para la máxima digresión..... ....

Acimut de la Polar..... ....° ....' ....'' (o diferencia a 360° ó 400^g)

Acimut de la base, referido al Norte. ....

Si se ha operado con taquímetro o brújula, la $\left\{\begin{matrix}\text{suma}\\\text{diferencia}\end{matrix}\right\}$ del rumbo de la Polar en la máxima digresión $\left\{\begin{matrix}\text{occidental}\\\text{oriental}\end{matrix}\right\}$ y el acimut que da la tabla inserta en el Anuario es la declinación del instrumento.

La puntería a la Polar, que con algunos aparatos se hace difícil por tener el buscador pintado en negro o en disposición poco adecuada, se facilita teniendo en cuenta lo que sigue (*):

1.° Que la latitud de un lugar es igual a la altura del Polo sobre el horizonte (o la colatitud igual a la distancia cenital del Polo).

2.° Que en las proximidades de la m. d. la estrella y el Polo tienen, aproximadamente, la misma altura.

Por tanto, si ponemos el limbo vertical en la lectura correspondiente a la latitud o a la colatitud del lugar —según que mida ángulos de pendiente o cenitales—, a poco que movamos el anteojo horizontalmente tendremos en el campo del mismo a la Polar, que, tanto por su brillo o magnitud, como por su color característico, más amarillo que las que la rodean, se distingue, sin duda alguna, de las demás estrellas circumpolares próximas.

(*) Siendo muy reducido el campo de los anteojos topográficos (de 1° a 1°,5 de amplitud) las constelaciones no se ven completas, por lo cual únicamente puede juzgarse de lo acertado de la puntería por el aspecto de la estrella.

Este procedimiento de orientación se practica del mismo modo con cualquiera de las seis estrellas circumpolares cuyas tablas inserta el ***Anuario***, pero la puntería a algunas de ellas no es fácil con anteojos que no estén dotados de buscador adecuado y no se dispone de una buena carta del Cielo.

OTRAS OBRAS DEL AUTOR

Topografía, ajustada al programa de ingreso en el Cuerpo de Topógrafos. (Agotada.)

Meteorología y Sismología, como la anterior, en colaboración. (Agotada.)

Tablas maestras taquimétricas.—Seno, coseno, reducida y altura; centesimal y sexagesimal; de minuto en minuto hasta un cuadrante y de metro en metro hasta 200 metros.

Topografía práctica, de López Caja (†).—4.ª edición; refundición encargada por la Propiedad de la obra, ampliada y puesta al día con los más modernos procedimientos y los últimos modelos de aparatos producidos por la industria. (En prensa.)

Círculo de cálculo taquimétrico.—Construído especialmente para el cálculo rápido de reducidas y alturas, proporciona también seno y coseno. En 360° ó en 400^g.

DETERMINACIONES DE LA LONGITUD DEL PÉNDULO QUE BATE SEGUNDOS

MEMORIAS
DEL
INSTITUTO GEOGRÁFICO Y CATASTRAL

Tomo XVIII

II

DETERMINACIONES DE LA LONGITUD DEL PÉNDULO QUE BATE SEGUNDOS

EFECTUADAS POR MARINOS DE LA REAL ARMADA ESPAÑOLA EN EL TRANSCURSO DEL SIGLO XVIII

POR

GUILLERMO SANS HUELIN
INGENIERO GEÓGRAFO

MADRID Talleres del Instituto Geográfico y Catastral 1946

DETERMINACIONES DE LA LONGITUD DEL PÉNDULO QUE BATE SEGUNDOS

GUILLERMO RAMS RUBIN

INTRODUCCION

En la historia de la gravimetría española, muy completa desde la observación absoluta de la intensidad de la gravedad por el geodesta y Coronel de Ingenieros D. Joaquín Barraquer y Rovira, en el Observatorio Astronómico, en el año 1883, hasta el momento actual, se notaba la falta de una exposición cronológica, resumida en un solo volumen, de las observaciones pendulares realizadas por españoles después de la observación clásica de Richer en La Cayena hasta el final del siglo XVIII. A suplir esta laguna tiende esta publicación, que al mismo tiempo servirá para realzar la labor científica, de índole geodésica, desarrollada por marinos de la Real Armada Española, en el transcurso de dicha centuria.

A la gloriosa Marina española le cabe la honra, en efecto, de ser la iniciadora en tierras americanas de tan interesante estudio físico. A los profundos conocimimientos científicos de don Jorge Juan y D. Antonio de Ulloa, se debe la primera determinación de la longitud del péndulo que bate segundos realizada en Quito, en colaboración con el Académico francés Godin, con ocasión de la medición de un arco de meridiano de un grado de longitud en los reinos del Perú, organizada por la Academia de Ciencias de París, en 1735.

Otros dos marinos ilustres que prestaban sus servicios en la Armada española, D. Alejandro Malaspina y D. José de Bustamante, contribuyen, medio siglo después, con las experiencias realizadas, aprovechando su viaje científico de circunnavegación, para averiguar la longitud del péndulo que bate segundos en distintas latitudes australes, con la intención de proporcionar datos que

aclarasen los conocimientos que entonces se posesían respecto a la verdadera figura de la Tierra.

Al finalizar el siglo XVIII, otro marino insigne, D. Gabriel Císcar, miembro de la Comisión de Pesos y Medidas del Instituto Nacional de Francia por parte de S. M. C., recibe el encargo de que se construya en París, donde se encontraba con motivo de las reuniones de la Comisión antes citada, un juego de cuatro péndulos con los que determina, en 1800, la intensidad de la gravedad en Madrid.

Dada la personalidad y relieve científico de los cinco marinos citados que pueden considerarse como verdaderos precursores de las determinaciones pendulares modernas, hemos juzgado interesante cerrar este trabajo con un Apéndice en que se incluyen unos ligeros apuntes biográficos de tan excelsos cultivadores de la ciencia geodésica.

CAPITULO PRIMERO

OBSERVACIONES FÍSICAS PENDULARES REALIZADAS POR JORGE JUAN Y ULLOA

El estudio de la forma y dimensiones de la Tierra puede considerarse bajo dos aspectos diferentes, el geométrico y el dinámico. En el primero de ellos el problema a resolver es la determinación de los elementos indispensables para representar a nuestro planeta en una escala determinada. El punto de vista dinámico se basa en la consideración de las dos fuerzas que se ejercen sobre un punto material de la superficie terrestre. Son éstas la atracción de todas las masas terrestres y la fuerza centrífuga que se desarrolla por el movimiento de rotación. La resultante de estas fuerzas es otra fuerza llamada gravedad, cuya dirección es la vertical del punto.

Los nombres de Newton, Huyghens y Clairaut están íntimamente ligados con las investigaciones iniciales teóricas para determinar la forma de nuestro globo, atendiendo únicamente a consideraciones dinámicas; pero podemos afirmar que la observación experimental de la longitud del péndulo que bate segundos efectuada por Richer en La Cayena, en 1672, fué el experimento básico que coadyuvó al establecimiento de la teoría newtoniana de un elipsoide de revolución achatado por los polos. Richer observó que el retraso de la péndola de su reloj era de dos minutos y veintiocho segundos, con relación a París, necesitando acortarla una línea y tres cuartos para que su reloj continuase batiendo el segundo. Como es sabido, La Cayena se encuentra situada a 4º 57' 17" de latitud

Norte, contra 48º 50' 11", que corresponden al Observatorio Astronómico de París. La variabilidad de la longitud del péndulo de segundos con la latitud, ya sospechada en aquella época, quedaba confirmada con esta observación hecha con todas las garantías de exactitud inherentes a un hombre de reconocida solvencia científica como fué el astrónomo Richer.

Newton y Huyghens, contemporáneos, consideraron esta disminución de la gravedad con latitudes decrecientes como una consecuencia necesaria de la forma y rotación de la Tierra. Transcurridos quince años de la célebre observación de Richer antes citada, enuncia Newton (1687) en su inmortal obra "Principia Mathematica Philosophie Naturalis" su conocido principio de la atracción universal, en virtud del cual dos moléculas materiales se atraen en razón directa de sus masas y en razón inversa del cuadrado de sus distancias. Sienta, asimismo, dos postulados, afirmando por el primero de ellos que la forma de equilibrio de una masa flúida homogénea sometida a la ley de atracción y girando alrededor de un eje, es un elipsoide de revolución aplastado, y por el segundo, que la gravedad aumenta del Ecuador a los Polos proporcionalmente al cuadrado del seno de la latitud. Al establecer esos postulados, Newton partió de una hipótesis falsa al admitir la homogeneidad de la Tierra, dado que las obsevaciones posteriores demostraron que la densidad crece desde la superficie al centro, en la relación de 2, 0 a 11, aproximadamente.

En su obra "Discours de la cause de la pesanteur" (1690), no admite Huyghens la atracción recíproca de las moléculas materiales, pero sí, como Newton, la condición de homogeneidad. Con esta concepción resultaría que cada molécula de una masa flúida homogénea sería atraída únicamente por el centro de gravedad de la masa en razón inversa del cuadrado de su distancia a ese centro. Huyghens encuentra como forma de la curva meridiana una elipse de aplastamiento 1 : 578, mucho más apartada de la verdad que el valor 1 : 230 deducido por Newton para el achatamiento terrestre.

Las investigaciones teóricas de estos dos sabios eminentes abrieron el camino para estudios más ajustados a la realidad de los hechos. Así, transcurrido apenas medio siglo, en 1743, Clairaut en su "Theorie de la figure de la Terre", consideran-

do ya un elipsoide constituído por capas concéntricas de densidades variables según una ley determinada, obtiene unos resultados conocidos hasta nuestros días con el nombre de "Teoremas de Clairant", que merecieron de Laplace el siguiente comentario:

"La importancia de estos resultados y la elegancia con que estan presentados, elevan esta obra a la categoría de las más be-"llas producciones matemáticas."

Los resultados a los que llegó Clairaut se expresan por las dos igualdades:

$$g_0 = g_a (1 + \beta \operatorname{sen}^2 L), \qquad \text{y} \qquad [1]$$

$$\alpha = \frac{5}{2} - \beta \qquad [2]$$

en las que se adoptaron las anotaciones siguientes:

g_0, g_a, g_b, intensidades de la gravedad (al nivel del mar), en una estación de latitud L, en el Ecuador, en el Polo,

$$\beta = \frac{g_b - g_a}{g_a},$$

$$\alpha = \frac{a - b}{a},$$

aplastamiento, siendo a y b el semieje mayor y el semieje menor del elipsoide, y

$$\gamma = \frac{w^2 a}{g_a},$$

relación de la fuerza centrífuga ecuatorial a la intensidad de la gravedad en el Ecuador, siendo w la velocidad angular de rotación de la Tierra.

La investigación experimental había por su lado aportado nuevas pruebas, de conformidad con la teoría, en apoyo del elipsoide de revolución achatado por los Polos, pues la observación de Richer había sido confirmada por las de Varin, Deshayes y de Glos, en Cabo Verde, en 1682. Al desarrollar Huyghens los principios de

la teoría del péndulo compuesto y aplicar el péndulo como regulador de los relojes y el resorte en espiral al volante de los mismos, se hizo factible la determinación precisa del tiempo, y, por consiguiente, de la duración de oscilación del péndulo. Se estaba efectivamente en condiciones desde ese momento de observar la duración de oscilación s de un péndulo de longitud l y deducir la intensidad de la gravedad por la fórmula

$$s = \pi \sqrt{\frac{l}{g}} \qquad [3]$$

Más tarde, Bouguer aplica por primera vez la corrección que lleva su nombre a la intensidad de la gravedad observada en Quito para compararla a la observada en la isla del Inca, lográndose obtener la gravedad g_0 (al nivel del mar) a la misma latitud L. Cada observación de péndulo dará por la primera fórmula de Clairaut una ecuación para calcular g_a y β, bastando teóricamente con dos observaciones para obtener estas dos incógnitas. La segunda fórmula de Clairaut proporcionará el valor de α con la condición de conocer previamente un valor de a por el método geométrico.

Acabamos de esbozar el fundamento del método dinámico para determinar la forma de la Tierra, que había encontrado su instrumento de observación en el péndulo, aparato de extremada sencillez que, con las modificaciones pertinentes al progreso de los tiempos, se sigue empleando en la actualidad.

Una vez establecido por Newton el principio de la atracción fué éste el punto de partida para las investigaciones teóricas respecto a la forma elipsoidal de la Tierra, que suscitó larga controversia entre los newtonianos y los partidarios de Cassini, abogando los primeros por un elipsoide achatado por los Polos y los segundos por uno alargado en el sentido de la línea de los Polos. Cassini sentó su teoría como consecuencia de la prolongación de la denominada cadena de Picard, en Francia, en los dos sentidos, para extenderla desde Dunquerque a Collioure, y en cuya operación geodésica tomó parte activa de 1700 a 1718.

Los partidarios de Newton tildaban de sospechosos los trabajos de Cassini, a causa de la insuficiente precisión con la que

se habían determinado las latitudes en el caso del meridiano. Oponían a la conclusión de Cassini la experiencia de Richer en La Cayena ,anteriormente mencionada. Bouguer, en su obra "La Figure de la Terre" describe con las siguientes palabras esta famosa querella científica: "La Geometría y la Física parecían hallarse en contradicción sin que se viese el medio de reconciliarlas. La propia Academia se encontraba indecisa, y las dudas no podían ser por completo disipadas sino mediante viajes emprendidos al Polo y al Ecuador. Mientras sólo se comparen los grados de latitud medidos en un espacio de poca extensión, su desigualdad, que es muy pequeña, no se pone bien de manifiesto a través de los errores a los cuales están sujetos las operaciones. La cosa varía si se comparan los grados medidos en regiones muy distanciadas entre sí, como ocurre con los grados medidos en la proximidad del círculo polar y en las cercanías del Ecuador."

La Academia de Ciencias de París tomó la iniciativa, secundada por el Cardenal Fleury y el conde de Maurepas, y obtuvo los medios para organizar y llevar a cabo las expediciones a los reinos del Perú y a la Laponia, que mediante la medición de un arco de meridiano de un grado en ambas regiones había de poner fin a toda duda respecto a la figura de la Tierra, dando la razón a los partidarios de la teoría de Newton.

La expedición de Laponia partió de París para Estocolmo en abril de 1736, o sea un año después de la salida de la Comisión de Académicos para el Perú. Figuraron en ella cuatro Académicos: Maupertius, promotor y jefe de la expedición; Camus, el gran matemático Clairaut y Lemonier, figurando como agregados el abate Outier, correspondiente de la Academia, y Celsius, profesor de Astronomía en la Universidad de Upsala. Calculadas las observaciones realizadas resultó para el arco de un grado de longitud en Laponia un valor sensiblemente mayor que el obtenido por Cassini en Francia. La intensidad de la gravedad fué observada en Pello, empleándose por primera vez un péndulo invariable de Graham.

La expedición del Perú, constituída por los Académicos Godin, Bouguer y La Condamine, desembarcó en la bahía de Manta en marzo de 1736, o sea un año después de su partida de Rochefort, debido a las largas escalas hechas en La Martinica, San-

to Domingo y Cartagena, en cuyo último punto subieron a bordo los dos Tenientes de navío de la Marina española, designados por el Rey Felipe V para "asistir de parte suya" a todas las operaciones de los Académicos franceses, D. Jorge Juan de Santacilia, comendador de Aliaga en la Orden de San Juan de Jerusalén, y D. Antonio de Ulloa.

* * *

Jorge Juan nos ha legado en su obra "Observaciones astronómicas y físicas hechas de orden de S. Mag. en los Reynos del Perú", la relación completa de las observaciones científicas realizadas por él con ocasión de la medición del arco de meridiano en el Ecuador, incorporado a los Académicos franceses.

En el prólogo dice textualmente: "El principal fin del viaje fué el averiguar el verdadero valor de un grado terrestre sobre el Ecuador, para que cotejado éste con el que resultase tener el grado que havían de medir los Astrónomos, enviados para esto al Norte, se infiriese, sin duda, de uno y otro, la figura de la Tierra, y, además de su utilidad, se decidiese de una vez, con tan ilustres experiencias, esta ruidosa question, que ha agitado a todos los Mathemáticos, y aun a las Naciones enteras por casi un Siglo."

Divide su obra en nueve libros, en los que trata los temas siguientes:

Libro I. Observaciones sobre la máxima oblicuidad de la Eclíptica.
Libro II. Observaciones de latitud.
Libro III. Observaciones de las inmersiones y emersiones de los satélites de Júpiter, como de los eclipses de la Luna.
Libro IV. Sobre la dilatación y compresión de los metales.
Libro V. Sobre las experiencias del barómetro simple.
Libro VI. De la velocidad del sonido.
Libro VII. De la medida del grado de meridiano contiguo al Ecuador.
Libro VIII. De las experiencias del péndulo simple y conclusión de la figura de la Tierra.
Libro IX. De la navegación sobre el elipsoide.

Dada la finalidad de este trabajo, expuesta en la Introducción, prescindiremos, en las páginas que siguen, de comentar el gran caudal de observaciones científicas llevadas a cabo por Jorge Juan durante su viaje y estancia en América, para ceñirnos exclusivamente a las experiencias del péndulo simple por él realizadas, y de que da cuenta detallada en el Libro VIII de su obra.

Al hablar en el capítulo primero del mencionado libro, de los motivos que obligaron a emprender las experiencias pendulares, dice lo siguiente:

"El principal fin que nos llevó a los Reinos del Perú, como tengo dicho, fué la determinación de la figura de la Tierra; y sobre este asunto, las observaciones que se oponían al dictamen de que fuese Longa (alargada), eran las del péndulo; pues M. Richer, habiendo pasado a la isla de Cayena, que se halla en 4º 56' y 17" y medio de latitud boreal en el año 1672, halló que para que vibrase el péndulo los segundos de tiempo medio en aquel país, era preciso acortarle una línea y cuarto de longitud, que necesitaba en París para lo mismo; y como las longitudes de los péndulos con que se forman de igual duración sus oscilaciones, según se tiene bien entendido, y han demostrado varios autores, son como las pesadeces de los cuerpos ,se sigue por esta experiencia que la pesadez en Cayena es menor que en París.

"Esta alteración del peso de los graves, la atribuyeron al instante M. Huyghens y M. Newton al movimiento diurno de la Tierra, pues en él nacía una segunda fuerza, llamada centrífuga, que se oponía a la gravedad, con la cual no sólo se explicaban fácilmente la observación de M. Richer, pero determinaban que la Tierra era lata (achatada).

"Sin embargo, de esta observación reiterada en Cayena por diez meses, y de la teórica dada por M. Newton en su obra "Philosophie Naturalis Principia Mathematica", dudaron en la Academia Real de París de la verdad del hecho, como se ve en el tomo primero de su Historia, con motivo de las observaciones hechas por M. Picard en Montpellier y en Uranibourg; y sólo se aseguraron de la justa medida de M. Richer después que M. Varin, M. Deshayes y M. Glos, hicieron nuevas observaciones en la Gorea y en la Guadalupe, y hallaron que ciertamente la longitud del péndulo de igual duración en sus oscilaciones era menor en los parajes cer-

canos al Ecuador que en mayores latitudes, cuyas experiencias fueron después confirmadas por varios, de suerte que ya no se duda de su verdad.

"No obstante, en nuestro viaje al Perú parecía como preciso reiterar las observaciones, y más cuando nos hallábamos sobre el mismo Ecuador, donde la disminución de la longitud del péndulo debía de ser mayor, y por ella podíamos también concluir la razón de los diámetros de la Tierra para confrontarla con la que diera la medida de los grados y estar por su concordancia seguros de las operaciones.

"A este fin se hicieron varias experiencias en el discurso del viaje; en Panamá y Guayaquil las hice juntamente con M. Godin diversas veces; pero no habiendo salido justificación deseada, las omito al presente. En Quito, hallándonos con más tranquilidad (que la pide muy grande esta experiencia), la repetimos varias veces en compañía de D. Antonio de Ulloa; en el Guarico o cabo Francés, a mi regreso a España, también hice algunas, y todas se ejecutaron con el instrumento que en el capítulo siguiente describo."

* * *

Dedica, efectivamente el capítulo II a la descripción del instrumento con que se hicieron las experiencias del péndulo simple y uso del mismo.

La figura 1.ª representa todo el instrumento, en la cual la pieza AB es una regla de madera, que tendrá de 44 a 46 pulgadas de largo y dos de ancho, y en su cabeza está el suspensorio o pinzas, que mantienen el hilo, las cuales se ven mejor en la figura 2.ª

"El hilo de pita, baja desde dichas pinzas hasta la máquina de abajo, y en su extremo está suspendido el peso o doble cono, que se ve en la figura 4.ª Este está taladrado de extremo a extremo en su medio cónicamente, y en el agujero se incluye un cilindro un poco cónico, que ajuste bien, y siendo rajado por medio, se incluye en la cortadura el extremo del hilo, que queda oprimido de tal suerte con el ajuste del cilindro, que se mantiene sin desasirse, en cuya conformidad se excusa el aplicarle al peso un gancho para mantenerlo, lo que siempre ocasiona mayor yerro.

"La figura 3.ª (es la máquina B, que se ve en la primera) está compuesta de una pieza de cobre AB, unida a la regla de madera por dos tornillos, que se aplican por detrás; ésta tiene dos encajes, C y D, por los cuales corre libremente la pieza EF, sobre la cual está hecha firme la H, y en ésta una punta como diamante, que sirve para que cuando se mide la longitud del péndulo sólo toque al dicho diamante el peso, que está suspendido.

"En la misma pieza H hay otra punta I, que corre sobre la pieza principal AB, y cuando la pieza EF se lleva arriba y abajo, va marcando en las divisiones las pulgadas de la longitud del péndulo.

"Sobre la pieza H está la L, también unida a la EF, en la cual hay algunas líneas marcadas, y sirve para conocer por ellas la magnitud de las observaciones.

"En lo más bajo de la pieza EF, y sobre ella unida, hay otra M, que hace firme la cabeza del tornillo N, el cual pasa por otra pieza O (firme también en la pieza principal), que tiene sus roscas, todo lo cual hace que, volteando el tornillo, suba y baje suavemente la pieza.

"Este tornillo sirve también de micrómetro; pero no siendo las divisiones de la pieza principal menores que pulgadas, el tornillo determina líneas y partes de línea con su plancha circular dividida.

"La figura 2.ª es la misma que la A de la figura 1.ª; X es un agujero por donde salen las pinzas, que mantienen el hilo y peso, pasando entre ellas el hilo y cerrando después el tornillo que las cruza, y le aprietan, de suerte que no puede deslizarse la menor cosa.

"Por el agujero Z se fija un clavo en la pared firmemente, el cual mantiene todo el cuerpo del instrumento.

"La posición de las pinzas en la regla se ve en la figura 5.ª (que representa el plano, que corta la recta RY en la figura 2.ª); el 2 . 3 es una pieza de cobre de quita y pon, y una vez puestas las pinzas, como se ve en la figura, se pasa el tornillo 4, que forman las dos pinzas, por un agujero que tiene dicha pieza, aplicándola a su lugar, y poniendo la hembra 5, oprime las pinzas contra las dos piezas de cobre 2 . 3, 6 . 7, y quedan sólidas y firmes.

"El método de servirnos de este instrumento fué colocándose en un cuarto bien abrigado, cerrábamos todas las puertas y venta-

nas, cuidando al mismo tiempo que toda rendija estuviese bien tapada para que con ello no se pudiese introducir el menor viento que interrumpiese las oscilaciones del péndulo.

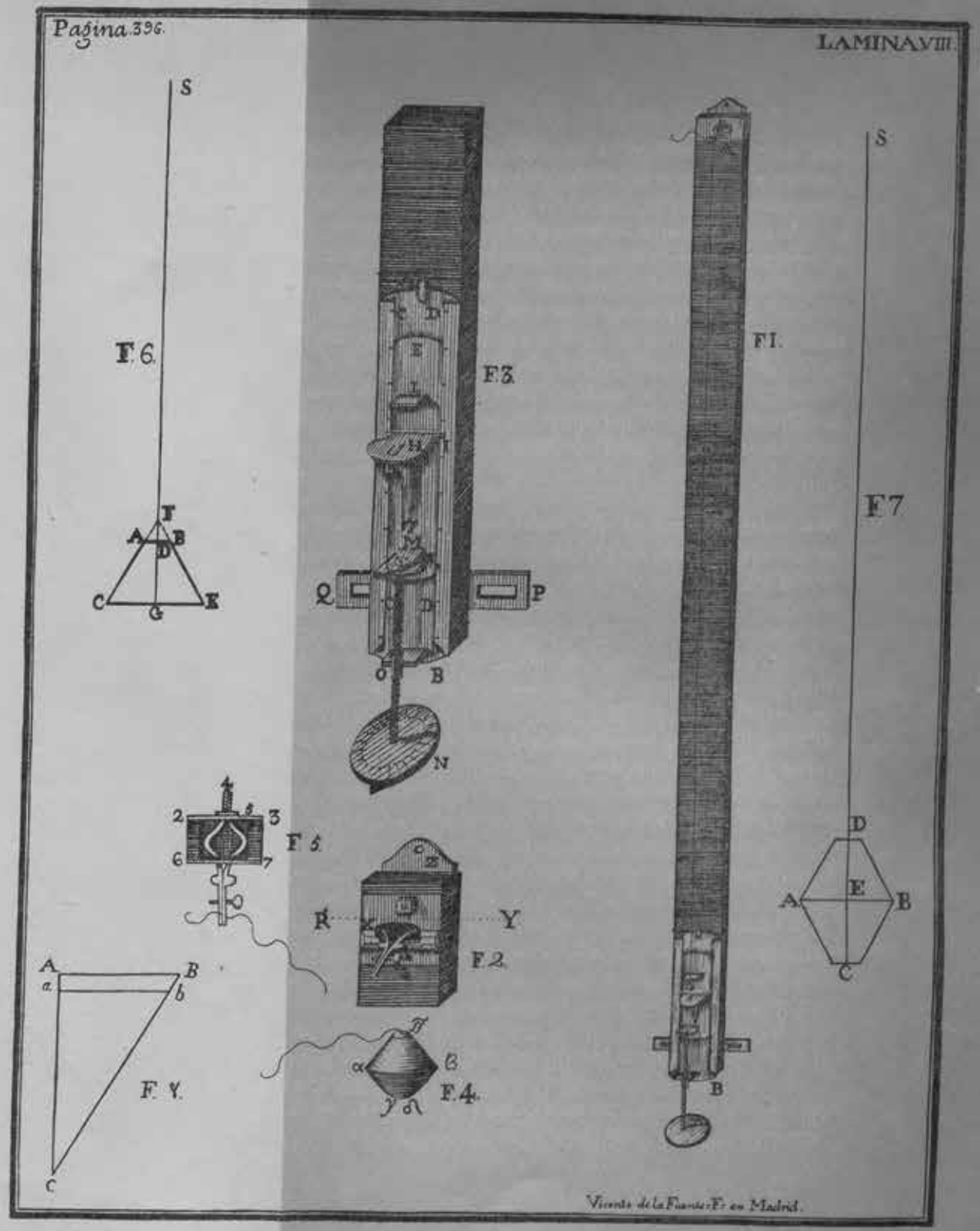
"Al lado del instrumento se colocaba también el reloj de péndola, ya arreglado al movimiento medio del Sol, o, lo que es lo mismo, habiendo ya examinado lo que se adelantaba o atrasaba, respecto al tiempo medio, por las alturas correspondientes tomadas, según se dijo en el libro III; y también el termómetro para notar el grado de calor al tiempo de la observación y poderla comparar a cualquiera otra hecha en otro grado.

"Formábamos el péndulo, o perpendículo, de un hilo de pita (del cual 64 toesas pesaban 26 granos), poniendo en su extremo el duplo cono, ya explicado en la fig. 4.ª, que tenía de α a β 11.41 $\frac{2}{3}$ líneas; de δ a π 9.31 $\frac{3}{4}$ líneas, y de γ a δ 1.76 $\frac{3}{4}$ líneas, y lo mismo en su parte alta correspondiente, el cual pesaba 870 granos, pero dejábamos la longitud del péndulo tal, que no llegase el duplo cono a tocar la punta de diamante.

"Después de esto se ponía en oscilación el péndulo, de suerte que no excediese cada una más que media a dos pulgadas, para que con ello fueran sin diferencia sensible ejecutadas como en una cycloide, que es la curva que hace iguales a todas las oscilaciones, como lo demostró M. Huyghens, pues de lo contrario no se podían suponer todas las oscilaciones del péndulo de una misma duración.

"Ya que estaba en movimiento, como precisamente habíamos de estar cercanos al instrumento, procurábamos cubrirnos la boca, lo mejor que permitía la precisión de haber de respirar, para que el aliento no interrumpiera las vibraciones u oscilaciones, y en esta conformidad notábamos cuándo el péndulo y reloj de péndola fenecían una vibración unánimes, o al mismo tiempo, a cuyo instante se empezaba a contar cero, y se proseguía con uno, dos, etc., hasta que se remataba la observación, que solía durar una, dos y tres horas; y se notaban las vibraciones hechas, tanto en el péndulo como por el reloj, o después de haber contado cero, se tenía cuidado en las vibraciones, que perdía o ganaba el péndulo en el discurso de la observación respecto del reloj.

"Ya fenecida la observación o experiencia, se hacía acercarse



Vicente de la Fuente Fc en Madrid.

la pieza EF de la figura 3.ª; esto es, la punta de diamante, hacia el doble cono, hasta que la punta I quedase exactamente sobre la división de una pulgada, y de allí se proseguía notando con el micrómetro las líneas y partes que tenía de menos longitud el péndulo, hasta que la punta de diamante tocaba la base del doble cono.

"La distancia de las pinzas a la división, en donde quedaba o se notaba la punta I, se tenía ya bien examinada antecedentemente con un compás de micrómetro, sirviéndonos de la misma toesa que se midió la Meridiana o grado terrestre.

"Con esta justificación se hacía la experiencia y se medía la longitud del péndulo desde las pinzas a la base del doble cono, del cual, restando el semidiámetro 4,65 líneas, nos quedaba la longitud del péndulo desde las pinzas al centro de gravedad del doble cono; a lo que añadiendo o sustrayendo lo que el centro de oscilación estaba más bajo, se tenía la verdadera longitud del péndulo con que se había hecho la experiencia."

* * *

El capítulo III está dedicado a las experiencias hechas en Quito. Juzgamos adecuado emplear sus propias palabras para exponer las mismas.

"Por no cansar con la repetición de las observaciones, que se reducen a la reiteración de la misma cosa, será suficiente explicar la primero con todas las particularidades y circunstancias que intervinieron en ella y después incluir la tabla de todas las que se ejecutaron, ya corregidas generalmente.

"El día 13 de julio de 1736, a las 8 horas, 49 minutos y 58 segundos de la mañana, habiendo puesto M. Godin y yo, en Quito, el péndulo en movimiento, empezamos a contar sus oscilaciones, hasta las 10 horas, 2 minutos y medio segundo, y en este tiempo hizo el reloj de péndola 4322 y media; luego el péndulo perdió en este espacio medio segundo ,y en 24 horas hubiera perdido 10 segundos.

"Las oscilaciones del péndulo eran al principio de la observación de media pulgada, y al fin de media línea el reloj se ade-

lantaba, respecto del tiempo medio, en 24 horas, 28 segundos y medio, según se había examinado por las alturas correspondientes que tomamos; luego el péndulo se adelantaba en las mismas 24 horas de tiempo medio 18 segundos y medio.

"Acabada la experiencia, medimos la longitud del péndulo desde las pinzas hasta la base del doble cono, y le hallamos de — 36 pulg. 11.29 lín.

"De lo que restando el semidiámetro del doble cono — 0 pulg. 4.65 $\frac{7}{8}$

"Queda la longitud del péndulo desde las pinzas hasta el centro de gravedad del doble cono de — 36 pulg. 06.63 $\frac{1}{8}$

Fáltanos añadir ahora lo que el centro de oscilación está más bajo que el centro de gravedad."

Esta corrección fué calculada directamente por Jorge Juan, resultando ser de —0.016, con lo que la longitud del péndulo con que se hizo la experiencia desde el punto de suspensión al centro de oscilación será igual a 36 pulgadas 6.615 líneas. Después continúa el relato de sus experiencias como sigue:

"Para deducir la longitud del péndulo, que vibra los segundos de tiempo medio por el antecedente, tenemos esta analogía, 86400^2 oscilaciones, que hace un reloj en 24 horas de tiempo medio, son a 86418^2 y media, que hizo el péndulo en el mismo tiempo, como 36 pulgadas 6.615, a 36 pulgadas 6.802 líneas; verdadera longitud del péndulo simple, que vibra los segundos de tiempo medio en Quito (1). Con esta misma práctica hicimos dieciséis experiencias en la misma ciudad, que son las de la Tabla siguiente:

---

(1) *Nota del autor.* — Jorge Juan estableció la siguiente proporción:

$$\frac{s_r^2}{s_p^2} = \frac{l_p}{l_r},$$

designando por los subíndices r y p al reloj y péndulo gravimétricos, respectivamente.

TABLA DE LAS EXPERIENCIAS DEL PÉNDULO SIMPLE HECHAS EN QUITO

Experiencias	SUJETOS POR QUIENES SE HICIERON	Tiempo que duraron	MAGNITUD DE LAS OSCILACIONES AL: prin.	MAGNITUD DE LAS OSCILACIONES AL: fin.	Lo que se atrasó o adelantó el péndulo en 24 horas de tiempo medio	Longitud del péndulo hasta la base del duplo cono	Longitud del péndulo que vibrará los segundos de tiempo medio, resultante
		h ' "	lín.	lín.	"	pulg. lín.	pulg. lín.
1	M. Godin y yo	1 12 02 1/2	6	1/2	18 1/2 adel.	36 11.29	36 6.802
2		57 13 1/2			16		.779
3		2 30 00			16 9/10		.786 1/2
4	M. Godin y Ulloa	1 32 24 1/2	16	3/4	899 3/4	02.463	.791 1/2
5	M. Godin	2 25 00	18	1/5	34 1/4	11.10	.805
6	Por mí	1 51 00	20	1/2	30	.182	.846 1/2
7	M. Godin	2 39 00	24	1/8	66	10.70	.695
8		10 00	27	1/8	61 1/2	10.84	.791 1/2
9		19 00	11	1/6	151 1/2 atras.	37 00.958	.741 1/2
10	Por mí	04 00	15	1 1/2	263	02.19	.831 1/2
11	M. Godin	3 04 00	12	1/8	74 1/4	00.21	.781 1/2
12		00 00	18	1/6	8 adel.	36 11.33	.738

Las siguientes experiencias se hicieron con el duplo cono vuelto lo de arriba abajo, por ver si resultaba alguna diferencia.

13		2 00 00	18	1/8	13 adel.	11.273	.731 1/2
14		3 00 00	24	1/6	4 atras.	.40	.686 1/2
15		4 00 00	22	1/10	8	.455	.701 1/2
16	Por mí	2 46 00	14	1/2	13 1/2	.477	.665

El promedio de todas las longitudes del péndulo que bate segundos, deducidas de las observaciones de Jorge Juan, Godin y Ulloa en Quito, y que figuran en la última columna del cuadro anterior, es 36 pulgadas 6.761 líneas.

"Partiendo de este valor observado a la altura de Quito, y teniendo en cuenta la altitud de esta población, 1.517 toesas, hace Jorge Juan la reducción de la misma al nivel del mar, aplicando el razonamiento de que "los cuerpos gravan en razón inversa de los quadrados de sus distancias al centro", para lo que toma por valor del radio terrestre la cantidad 3,269-297 toesas, deducida por Cassini. Hecha esta reducción, obtiene para la longitud del péndulo de segundos reducida al nivel del mar, el valor 36 pulgadas 7.173 líneas.

A su regreso a España por el Cabo de Hornos se vió obligado el barco que transportaba a Jorge Juan a entrar de arribada forzosa en el puerto de Guarico, para proveerse de agua y víveres, y mientras se efectuaba la carga de éstos decidió el ilustre marino repetir las experiencias de determinación de la longitud del péndulo que bate segundos, con el fin de averiguar la variación de la gravedad a diversas latitudes. Utilizó para este fin el mismo aparato de suspensión del péndulo que en Quito, sustituyendo el doble cono del péndulo por una esfera de cobre suspendida del mismo hilo de pita que sirvió en Quito.

Como promedio de ocho determinaciones, encontró el siguiente valor: 36 pulgadas 7.32 líneas.

Godin, antes de salir de París, observó la longitud del péndulo sirviéndose de la misma toesa utilizada en Quito, y la halló igual a 36 pulgadas 8 $\frac{50}{90}$ líneas. Por su lado, Maupertius, en su viaje a Laponia, encontró que el péndulo que bate segundos en Pello, a la latitud de 66° 48' 20", era 36 pulgadas 9.13 líneas, o sea 6/10 de línea mayor que en París. De estas observaciones realizadas por distintos observadores a diversas latitudes deduce Jorge Juan que los péndulos que baten el segundo son de distinta longitud en distintas latitudes, y estando relacionada la longitud con el peso del cuerpo suspendido (lenteja), se sigue que el peso de los cuerpos varía con la latitud.

Como complemento de sus estudios de gravedad relacionados

con la forma de la Tierra calculó Jorge Juan una tabla con las longitudes del péndulo simple en pulgadas, líneas y milésimas de línea para todos los grados de latitud 0° a 90°, que aparece publicada en la página 347 de su obra "Observaciones Astronómicas y Físicas en los Reinos del Perú".

Según informa D. José Espinosa y Tello en sus "Memorias sobre las observaciones hechas por los navegantes españoles en distintos lugares del Globo", impresa en Madrid en el año 1809, al conceder S. M. el Rey D. Felipe V licencia para que los Académicos franceses pasasen al Ecuador a fin de realizar las observaciones geodésicas que combinadas con las de Laponia habían de resolver la tan discutida cuestión en aquella época de la figura y magnitud de la Tierra, y designar a Jorge Juan y a Ulloa para que acompañasen a los sabios franceses, puso a disposición de éstos el navío de guerra "El Conquistador" y la fragata "Incendio", a bordo de los cuales zarparon de Cádiz el 28 de mayo de 1735, arribando a Cartagena de Indias el 9 de julio. A su vez, los Académicos franceses M. Godin, M. Bolgues y La Condamine llegaron adicho puerto, en una balandra de su nación, a mediados de noviembre siguiente, en la que embarcaron los dos marinos españoles, haciéndose a la vela el 29 del mismo mes. En Panamá se trasladaron a bordo de un buque español del comercio, en el que llegaron a Guayaquil el 25 de marzo de 1736. Aún habían de transcurrir más de dos meses para su entrada en la ciudad de Quito.

Los trabajos de la Comisión dieron comienzo en el mes de junio, empezando por medir una base, a lo que siguió el levantamiento de un mapa geográfico de la comarca. Proyectada la cadena de triángulos a observar, se formaron dos brigadas de campo, constituída una de ellas por Jorge Juan y Godin y la otra por Bouguer, La Condamine y Ulloa. Grandes fueron los fríos y riesgos que pasaron en estos puntos, aunque las molestias experimentadas no fueron más que un pálido reflejo de las que les quedaban por pasar en la prosecución del trabajo de la Meridiana hasta fines de julio de 1739, es decir, por espacio de dos años, en el cual vivieron siempre en las cumbres de ásperas montañas, alojados en tiendas de campaña y sujetos a sin fin de penalidades e incomodidades. Según el relato de Espinosa, la brigada de don Antonio Ulloa habitó en 35 páramos diferentes y la de D. Jorge

Juan en 32, correspondientes a los estacionamientos en los vértices de los triángulos observados.

Concluída la observación de la serie de éstos al Sur de Quito y efectuadas las correspondientes observaciones astronómicas, se disponían a participar en la observación de la cadena al Norte de Quito, cuando Jorge Juan y Ulloa fueron requeridos por el Virrey del Perú a trasladarse a Lima, con motivo de la declaración de guerra de la Corte de Londres y el recelo de lo que los ingleses pudiesen intentar efectuar en aquellos parajes.

Hasta agosto de 1741 permanecieron los dos Oficiales de Marina en Lima, dedicándose a poner en el mejor estado de defensa posible las costas de aquel reino, pero habiendo pasado ya el temor de que ninguna escuadra enemiga doblase el Cabo de Hornos, solicitaron y obtuvieron permiso del Virrey para volver a continuar su comisión de la Meridiana. Llegados de nuevo a Quito, en septiembre del mismo año, cundió la noticia de haber sido saqueado y quemado el pueblo de Payta por un navío enemigo al mando del Vicealmirante Jorge Anson. Temiendo el Corregidor de Guayaquil algún intento enemigo contra dicho puerto, procuró disponerse a la defensa, pidiendo auxilio al Presidente y Audiencia de Quito. Nuevamente se dispuso que Jorge Juan y Ulloa pasasen a toda prisa a Guayaquil para mandar las tropas que allí se reuniesen. Cuando llegaron a dicha población se supo que la escuadra inglesa que pirateaba en aquellos mares se había corrido hacia el Norte para la costa de Acapulco; la Junta de Guerra decidió entonces, a propuesta de nuestros marinos, que Jorge Juan se quedase en Guayaquil, para lo que pudiese ocurrir en lo relativo a su defensa, y que Ulloa regresase otra vez a Quito, a fin de concluir las observaciones que faltaban. Cuando, tras un viaje penosísimo, se vió Ulloa de nuevo en Quito, se le notificó una orden urgentísima del Virrey de Lima para que volviesen ambos a aquella capital. En consecuencia, se puso otra vez en marcha Ulloa para Guayaquil, y habiéndose unido allí con su compañero, siguieron juntos a Lima, caminando día y noche sin cesar. El Virrey, satisfecho de la actividad con que efectuaron su viaje los dos españoles, les dió el mando de dos fragatas que había dispuesto fuesen a Chile para guardar aquellas costas y las islas

de Juan Fernández, por si los enemigos volvían a dejarse ver por aquellas aguas con nuevas fuerzas.

El 4 de diciembre de 1742 salieron de Lima con derrotero para dichas islas las dos fragatas "Nuestra Señora de Belén", al mando de Jorge Juan, y "La Rosa" al de Ulloa. Hasta finales del año 1743 estuvieron embarcados los dos marinos en el desempeño de la misión que les confió el Virrey, volviendo de nuevo a Quito en enero de 1744, de donde, terminadas ya sus operaciones geodésicas y astronómicas, habían partido los Académicos franceses, a excepción de Godin, que aún permanecía en aquella provincia. Como les faltaba concluir la observación de los triángulos de la parte Norte, desde Pambamarca, fué su primer cuidado el realizarla, no regresando a Quito hasta tener la seguridad de no tener que repetir tan molestos trabajos, ni habitar por más tiempo aquellos páramos desiertos. Deseando abreviar lo más posible su viaje de regreso, les pareció que sería lo mejor aprovechar la ocasión que les brindaba la presencia de unos buques franceses en el Pacífico, los que estaban preparándose para su viaje de retorno a Europa, con lo cual lograrían dar la vuelta por el Cabo de Hornos, adquiriendo de este modo por sí mismos mayores conocimientos de tal navegación. Tomada, pues, esta resolución, emprendieron el camino para Lima, adonde llegaron a tiempo que se hallaban en el puerto del Callao, preparándose para la salida, las dos fragatas francesas "Nuestra Señora de la Deliberanza" y "La Lis", embarcando Jorge Juan en ésta última y Ulloa en la "Deliberanza", con la intención de sortear los riesgos que pudieran presentarse en el viaje de retorno, para, llegado el caso de faltar uno de ellos, quedase el otro para dar razón del desempeño de su cometido. En esta forma hicieron vela para Chile, adonde arribaron juntas, pero a poco se separó la fragata "Lis" en busca de un refugio en la costa a causa de una vía de agua. Llegadas las fragatas francesas y la "Deliberanza" a la isla de Fernando de Noroña, después de ciento quince días de una navegación tan penosa como llena de sobresaltos por la necesidad de aguada y víveres, prosiguieron su viaje, pero en la latitud de 43° 57' encontraron dos fragatas inglesas corsarias, que después de alguna resistencia se apoderaron de las francesas, y mientras se estaban los enemigos en las operaciones del apresamiento, pudo escapar la "Deliberan-

za", que se encontraba un poco apartada. El temor de tropezar con otros corsarios decidió a su Capitán a poner rumbo al puerto de Luis-Bourgo, en la isla Real, próxima a Terranova, ignorando la reciente toma de dicho puerto por los ingleses. Al acercarse al mismo, rodearon los barcos ingleses a la "Deliberanza", que arrió su bandera, comprendiendo su Capitán lo inútil de la resistencia. Sometidos los tripulantes a un minucioso registro, tuvo Ulloa la precaución de arrojar al agua en el acto del apresamiento todos aquellos papeles y planos que no convenía cayesen en manos del enemigo, conservando tan sólo los que se referían a la medición de los grados del Ecuador, observaciones astronómicas y físicas, pudiendo salvarse sin dificultad de la rapacidad de unas gentes que estimaban en poco todo lo que no fuese plata u oro, y que, por consiguiente, remitieron a su Gobierno todos esos escritos. Ulloa, que en un principio no dejó de expresar con rasgos vigorosos el mal trato que recibió de sus apresadores, no halló más tarde frases con que elogiar suficientemente la urbanidad del Comandante de la escuadra Mr. Warren y las atenciones que le prodigó el Capitán Mr. Le Bret, del navío "Sunderland", en que fué transportado a Inglaterra, adonde llegó el 22 de diciembre de 1745. A mediados de abril del siguiente año pasó Ulloa a Londres con el fin de rescatar sus papeles, que estaban en poder del Almirantazgo. Allí fué bien recibido por el Conde de Harrington, que había sido Embajador de Inglaterra en Madrid, recibiendo también muchas distinciones de otros personajes y hombres de ciencia, declarándose con singular empeño protector suyo Mr. Folkes, Presidente de la Real Sociedad de Londres, que consiguió, no sólo que el Gobierno le devolviese los papeles que reclamaba, sino que la Real Sociedad le recibiese entre el número de sus socios.

Por fin, logró embarcar en Falmauth para Lisboa, y pasando desde aquí a Madrid, llegó a esta capital el 26 de julio de 1746, a los once años y dos meses de haber salido del puerto de Cádiz para desempeñar su comisión.

Distinta fué la suerte que corrió Jorge Juan en la fragata "Lis". Separada ésta de las otras tres, arribó a Valparaíso, y reanudado su viaje y después de diversas vicisitudes, arribó al puerto de Guarico ,perseguida por dos buques grandes, que se consideraron corsarios enemigos. Aprovechando la ocasión de un convoy francés

que salía para Europa, escoltado por cuatro navíos y una fragata, se hicieron a la vela dos meses después, avistando el Cabo Prior el 27 de octubre de 1745, y entrando en el puerto de Brest el 31 del mismo mes. Desembarcó allí Jorge Juan y pasó a París con objeto de cambiar impresiones con los individuos de la Real Academia de Ciencias de asuntos relacionados con los trabajos científicos hechos mancomunadamente, mereciendo que aquel organismo le nombrase socio correspondiente. Desde París se restituyó a Madrid para dar cuenta de su comisión.

Este sucinto relato sólo permite formarse una leve idea del viaje y peregrinaciones de los dos célebres marinos, a los que el Intendente general de Marina D. Luis María de Salazar, en su "Discurso sobre los progresos y estado actual de la hidrografía en España", publicado en la obra de Espinosa, anteriormente citada, dedica el siguiente elogio: "Es, por cierto, cosa digna de grande admiración que unos jóvenes en la clase de Guardias Marinas, sin haber aún salido del noviciado de su carrera, y hallándose todavía completando en cierto modo su instrucción en el Colegio de Cádiz, saliesen de él para ir a alternar por sí solos con los más célebres Académicos de la Francia, en una de las empresas científicas más delicadas y más importantes que jamás han podido ocupar la atención de los sabios, y, sobre todo, que se distinguiesen en este honrosísimo encargo con tal aplicación, zelo y profundidad de conocimientos como respectivamente acreditaron en sus escritos. Quizá será éste un exemplar único en su especie, o, por lo menos, habrá muy pocos hombres en el mundo de quien pueda citarse tan relevante título para su gloria y para la del Cuerpo y la Patria que logran la fortuna de contar entre el número de sus hijos sujetos tales..."

CAPITULO II

EXPERIENCIAS CON EL PÉNDULO INVARIABLE LLEVADAS A CABO POR MALASPINA Y BUSTAMANTE

La Memoria segunda de las cuatro coleccionadas por el Jefe de Escuadra de la Real Armada, D. José Espinosa y Tello, y publicadas de orden superior en el año 1809, está dedicada a la descripción del viaje científico al hemisferio del Sur a la costa Noroeste de América, al mar Pacífico, al Archipiélago filpino, a la Nueva Holanda y Nueva Zelandia, emprendido en 1789 por varios Oficiales de la Marina española, en las corbetas "Descubierta" y "Atrevida", bajo el mando y dirección de los Capitanes de fragata D. Alejandro Malaspina y D. José de Bustamante, Comandantes de dichas corbetas.

El día 30 de julio zarparon dichos buques de Cádiz, y después de reconocer la isla de la Trinidad, fondearon en Montevideo el 20 de septiembre, donde se iniciaron la serie de trabajos astronómicos e hidrográficos que habían de hacer memorable este periplo. Así, después de levantar el plano geométrico de Río de la Plata, se reconoció toda la costa oriental patagónica. Más tarde emprendieron derrota para Puerto Egmont, en las islas Malvinas, adonde arribaron el 19 de diciembre de 1789, levantando el plano de dicho puerto y determinando su posición astronómica. Posteriormente, en enero de 1794, volvieron ambas naves a estas islas siendo en esta época cuando se efectuaron las experiencias de la gravedad conducentes a averiguar la longitud del péndulo de segundos en dicha latitud austral, dado que hasta el mes de diciembre de 1790, o sea un año después de la primera visita a las Malvinas, no recibió Malaspina una Real Orden promovida por el

Ministro de Marina, en aquella sazón D. Antonio Valdés, que por su interés reproducimos a continuación:

"Tratándose en Francia de arreglar un sistema de pesos y medidas derivado de la longitud del péndulo, que oscila los segundos en la latitud de 45º: el Rey ha juzgado conveniente aprovechar esta coyuntura par apromover los progresos de la Geografía y ha resuelto que pues el curso de su viaje le proporciona a V. S. hacer observaciones sobre este interesante punto, las execute en los lugares convenientes, para que, comparadas con las que han de verificarse en aquel reyno, puedan perfeccionar los conocimientos actuales sobre la verdadera figura de la Tierra, determinando si el hemisferio meridional es más aplanado, ¿quál sea esta diferencia y las demás que pueda haber en la forma exterior de nuestro Globo, supuesto que su superficie no sea tan simétrica como comúnmente se imagina? Como estos puntos han de resolverse por las medidas de varios grados en diferentes regiones o por las observaciones del péndulo en cierto número de lugares, conducen a V. S. uno, construído de intento con el mayor cuidado, los Tenientes de navío D. Josef de Espinosa y D. Ciriaco Ceballos.

"Pues que para formar idea de la figura del meridiano es el mejor medio el del examen del péndulo en dos lugares propios para deducir la alteración que ha tenido, ha resuelto S. M. que a su tiempo se repitan a 45º S. las observaciones que se practiquen ahora a igual latitud N. para ligar nuestras investigaciones con las de los Académicos franceses."

El primer párrafo de esta Real Orden merece un ligero comentario histórico. En 1789 llamaba la atención de la gente culta la incoherencia del antiguo sistema de medidas, estando todos dispuestos a aceptar con entusiasmo las reformas útiles que hiciesen desaparecer la diversidad de las unidades metrológicas en uso. Fué Talleyrand, Arzobispo de Autun, quien toma la iniciativa en Francia de presentar a la Asamblea Constituyente, en 1790, un proyecto de unificación relativo a las pesas y medidas. Entre los motivos que aduce para esta reforma, menciona en primer lugar la confusión nacida de las diversas medidas existentes y las molestias que ésta creaba constantemente al comercio honrado, en razón de las diferencias verdaderamente sorprendentes que existían entre las medidas de la misma denominación.

Después de pasar revista a los anteriores proyectos de unificación, propone crear un sistema basado sobre un prototipo invariable, tomado de la Naturaleza, a fin de que todos los países puedan adoptarlo, y señala como tal prototipo la longitud del péndulo simple, que bate el segundo a la latitud de 45°, longitud que habrá de determinarse nuevamente por las observaciones más precisas.

Para dar a este sistema un carácter de universalidad y de exactitud más rigurosa, propone Talleyrand escribir al Parlamento de Inglaterra para invitarle a concurrir con Francia a la fijación de la base de las nuevas medidas, mediante comisarios escogidos, en número igual, en la Academia de Ciencias de París y en la Sociedad Real de Londres.

Simultáneamente, la Cámara de los Comunes de Inglaterra discutía, a su vez, un proyecto de unificación presentado por Sir John Miller, que quejoso también de la diversidad de medidas, proponía, asimismo, la longitud del péndulo de segundos como prototipo del nuevo sistema.

En los Estados Unidos, Jefferson, Secretario de Estado, habló primeramente de tomar como unidad la longitud del péndulo de segundos en el paralelo de 38°, latitud media de los Estados Unidos, mas enterado de la proposición presentada por Talleyrand a la Asamblea Nacional, aceptó la idea de tomar como unidad la del péndulo a 45°.

El 8 de mayo de 1790 fué presentada a la Asamblea la propuesa de Talleyrand, e inmediatamente dicho organismo aprobó un decreto para rogar al Rey, entre otras cosas, que se determinase la longitud del péndulo de segundos conjuntamente por comisarías, en número igual, de la Academia de Ciencias de París y de la Sociedad Real de Londres.

A esta orientación, en boga en 1790, respecto a la elección de la longitud del péndulo de segundos a los 45°, como prototipo invariable, responde el texto de la Real Orden antes mencionada transmitida a Malaspina, y que se tradujo en observaciones con un péndulo invariable en diversos puertos de Europa, América y Asia, durante el crucero de las corbetas "Descubierta" y "Atrevida".

Otras habían de ser las ideas dominantes al año siguiente en que una Comisión integrada por Borda, Lagrange y Laplace, en-

tre otros sabios, presentó su rapport a la Academia de Ciencias de París relativo a la elección de una unidad de medida. En él se razonaba que las unidades naturales que parecen las más adecuadas para servir de base, son las tres siguientes:

1.º La longitud del péndulo de segundos.
2.º Un cuarto de círculo del Ecuador terrestre.
3.º Un cuarto de meridiano, entre el Polo y el Ecuador.

La primera presenta dos inconvenientes, a saber: el estar ligada a la unidad segundo de tiempo, completamente arbitraria, y el intervenir en ella el tiempo y la intensidad de la gravedad, conceptos bien extraños a la unidad de longitud.

El cuarto del círculo máximo del Ecuador es rechazado también por la Comisión, porque la regularidad de este círculo no es más segura que la de los meridianos, y, en cambio, son de un acceso más difícil las regiones ecuatoriales.

Eliminadas las dos primeras unidades citadas se adoptó, como es sabido, la diezmillonésima parte del cuadrante del meridiano terrestre como unidad de longitud, o sea, la tercera considerada. En atención a la imposibilidad de medir por completo el cuadrante citado, se propuso limitar la medida a la de un arco suficientemente grande cuyos extremos cayesen uno al Norte y otro al Sur del paralelo 45º, fijándose la parte de meridiano comprendido entre Dunquerque y Barcelona. Aparte de la medición geodésica de la cadena de triángulos proyectados en dicho trozo de meridiano, se encargó a Borda y Coulomb la determinación de la longitud de péndulo de segundos.

Respecto al péndulo utilizado por Malaspina y Bustamante en sus experiencias consta en las Memorias de esta famosa expedición publicadas por Espinosa, que construído en Londres, estaba constituído por una lente de cobre pendiente de una barra de madera cortada en el sentido longitudinal, o sea, en la dirección de las fibras. Terminada la barra por el lado contrario en una pieza de metal cónica, en la que encajaba una lámina de acero que suspendía al péndulo por medio de un eje que la atravesaba por su extremo superior. El péndulo estaba colocado dentro de una caja, que permanecía cerrada durante el tiempo de las observaciones; la puerta tenía un cristal, a la altura de la lenteja del péndulo, leyéndose a través de aquél un limbo graduado que servía para me-

dir la amplitud de las oscilaciones y para nivelar el péndulo, haciendo que coincidiese con el cero de la graduación un índice colocado en el extremo inferior del péndulo.

Las experiencias se hicieron siempre por tres observadores del modo siguiente: dos de ellos se dedicaban a contar el número de oscilaciones del péndulo durante una hora, alternando de minuto en minuto en pronunciarlas en voz alta, en tanto que el tercero atendía al reloj y apuntaba el segundo de tiempo en que empezaba y acababa la observación del péndulo, oyendo la voz del que contaba los pasos de éste. El error de las señales del principio y del final es dependiente de la duración total de la observación, y por consiguiente, su influencia en el valor de — g — está en razón inversa de esta duración. Fué ésta la razón por la que se tomó por norma en las experiencias de gravedad de Malaspina el que no se realizasen nunca observaciones por menos de tres cuartos de hora, haciendo durar una hora por término medio cada grupo de observaciones seguidas. De este modo no hallaron diferencias superiores a medio segundo.

En el cuadro siguiente figuran los lugares del hemisferio boreal y austral en que se hicieron observaciones de gravedad por Malaspina y Bustamante, con los valores de la longitud del péndulo simple expresados en metros, correspondientes a los mismos, tomados del libro de Petrus van Galen "Disputatio Mathematica Inauguralis de Pendulo Ejusque Applicationes Ad Telluris Figuram Determinandam", Amsterdam, 1830.

HEMISFERIO BOREAL

LUGARES	LATITUDES	LONGITUD DEL PÉNDULO
Mulgrave	59° 33'	0.99509 m.
Nutka	49° 35'	0.99365 »
Monterrey	36° 36'	0.99229 »
Cádiz	36° 32'	0.99254 »
Macao	23° 12'	0.99110 »
Acapulco	16° 50'	0.99123 »
Manila	14° 36'	0.99137 »
Umatag	13° 18'	0.99083 »
Zamboanga	06° 55'	0.99092 »

HEMISFERIO AUSTRAL

LUGARES	LATITUDES	LONGITUD DEL PÉNDULO
Puerto Egmont.....	51° 21′	0.99394 m.
Santa Elena.....	44° 30′	0.99374 »
Concepción.....	36° 42′	0.99259 »
Montevideo.....	34° 55′	0.99263 »
Puerto Jackson.....	33° 51′	0.99254 »
Babao.....	18° 29′	0.99139 »
Lima.....	12° 05′	0.99101 »

El Brigadier de la Real Armada D. Gabriel de Císcar, que calculó estas observaciones, expresó su opinión de que constituían una colección "suficiente por sí sola para determinar con despreciable diferencia la figura verdadera de la Tierra". Aunque no pueda actualmente aceptarse con todo rigor la opinión anterior, es lo cierto que utilizando las observaciones de Mulgrave, Nutka, Monterrey y Cádiz halló Císcar como valor del achatamiento terrestre poco más de $\frac{1}{285}$, que no se diferencia mucho del valor $\frac{1}{297,4}$ deducida por el Geodesta norteamericano Bowie en 1917, tomando en consideración 217 estaciones de péndulo en los Estados Unidos, 42 en el Canadá, 73 en la India y 40 en otros países.

En las experiencias de gravedad de Malaspina y Bustamante se tuvieron presente todos los principios fundamentales teóricos. Así, en los comentarios a las mismas redactados por el Teniente de navío D. Ciriaco de Ceballos, publicados por Novo y Colson en su monumental obra "Viaje político-científico alrededor del mundo por las corbetas "Descubierta" y "Atrevida", Madrid, 1885, se dice lo siguiente:

"Se sabe que un cuerpo sumergido en un flúido pierde de su peso el peso del flúido que desplaza. Según este principio, la lenteja del péndulo, en virtud de cuyo peso se hacen las oscilaciones, debe perder una parte de su peso igual al peso del aire que ocupa. Si el aire fuese un flúido igualmente denso en todas las regiones de la Tierra, no habría necesidad de ninguna corrección, porque produciendo entonces disminuciones iguales, no habría causa que alterase la relación entre las gravedades; pero como

los pesos del aire son distintos en diversos lugares, y para un mismo lugar en distintas circunstancias, de aquí nace una corrección sin la cual confundiríamos muchas veces las disminuciones reales de la gravedad, con las causas que sólo son un estorbo de ejercerse. Nuestras experiencias están todas reducidas a las 29 y media pulgadas del barómetro.

"Según Newton, la gravedad se ejerce en razón inversa de las distancias al centro. Nos hubiéramos servido de este principio para reducir las experiencias de una propia altura; pero no ha sido necesario, porque todas se han hecho al nivel del mar, con diferencia de cuatro a seis toesas, cantidad absolutamente despreciable. También se ha hecho atención a la corrección que deben tener las oscilaciones por la circunstancia de no ser cicloidales, etc."

* * *

Es interesante seguir, aunque sea a la ligera, la ruta de las corbetas "Descubierta" y Atrevida" a partir de su primera llegada a Puerto Egmont. Desde dicho punto se dirigieron directamente ambos buques al cabo de las Vírgenes, y pasando al Oeste del bajo de Sarmiento, en la embocadura del estrecho de Magallanes, doblaron el cabo de Hornos, y tomando rumbo Norte y llegando la "Atrevida" a Valparaíso con todos los Oficiales peritos en observaciones astronómicas para efectuar conjuntamente con éstas las de una cadena de triángulos hasta Santiago de Chile, en tanto que la oficialidad de la "Descubierta", fondeada en Talcahuano, levantaba el plano de dicho puerto, reuniéndose más tarde a la "Atrevida" en Valparaíso.

Siguiendo sus derroteros a lo largo de la costa occidental sudamericana llegaron a Guayaquil y más tarde a Panamá y Acapulco, unas veces trabajando juntas y otras separadas. En este último puerto se incorporaron a la expedición los Tenientes de navío don José Espinosa y D. Ciriaco Ceballos, portadores del equipo pendular.

Mientras las dos corbetas continuaban de este modo el objeto de su viaje, el Geógrafo Mr. Buache leyó a la Academia de Ciencias de París una memoria, en la que, refiriéndose al diario del na-

vegante español Lorenzo Ferrer Maldonado, que suponía haber descubierto en 1588 el tan deseado paso del Noroeste de América, intentaba conciliar las contradicciones que se presentan en la relación de Maldonado, opinando por la existencia de tal estrecho. Con este motivo, y deseando el Gobierno español contribuir por todos los medios posibles a la solución de un problema tantas veces planteado, participó a Malaspina en Real Orden de 22 de diciembre de 1790, "que aunque antes de haber partido de Cádiz dejó a su arbitrio que, según las circunstancias, executase o no la campaña al Norte en busca del paso del Atlántico indicado por Ferrer Maldonado, era ahora la Real voluntad que la verificase, sirviéndose al intento de las noticias que reune la memoria publicada en Francia acerca de esta empresa".

Acordado por Malaspina y Bustamante emprender desde luego la exploración que ordenaba S. M., el 1.º de mayo de 1791 se dieron a la vela ambas corbetas, dirigiéndose a alcanzar el paralelo para examinar toda la costa que desde el cabo Buentiempo sigue por la bahía de Behring, monte de San Elías e isla de Kaye hasta el cabo Hinchimbrook en la entrada del Príncipe Guillermo. El 27 de junio atracaron la costa por los 57º de latitud, desde cuyo punto hacia el Norte no se encontró indicio alguno del paso que se buscaba, y únicamente a la latitud de 59º 45', al Este del monte de San Elías se notó un abra de bastante amplitud, cuya apariencia se asemejaba a la descrita por Ferrer Maldonado en su viaje. Para reconocerla dispuso Malaspina la entrada en el puerto inmediato de Mulgrave, desde donde podría reconocerse con lanchas las circunstancias de dicha abra. El propio Malaspina efectuó dicho reconocimiento, comprobando la corta extensión del canal. Fué breve la estancia en Mulgrave, que se aprovechó para efectuar varias observaciones físicas, entre ellas la de la gravedad.

Pudiendo contarse todavía por esta época con tiempo benigno, se resolvió continuar las operaciones hidrográficas en estas costas, haciendo escala en el puerto de San Lorenzo de Nutka, a los 49º 35' de latitud, donde también se hicieron las observaciones del péndulo.

Reanudada la navegación, llegaron a Monterrey, tercer punto en la costa occidental norteamericana, donde se determinó la longitud del péndulo de segundos, continuando las tareas hidrográficas hasta el cabo San Lucas, donde se separaron las corbetas, di-

rigiéndose la "Atrevida" al cabo Corrientes, para terminar la carta de aquella costa hasta Acapulco, y haciendo rumbo la "Descubierta" a San Blas para efectuar reparaciones. Ambos barcos se volvieron a reunir en Acapulco para prepararse a emprender la navegación al Asia en la próxima estación favorable.

Aunque el principal objeto de esta expedición a América fué el trazado de cartas exactas de sus costas, se aprovechó tal oportunidad para realizar otras observaciones relacionadas con la geografía física y la náutica, como son las del péndulo invariable, las de la variación e inclinación de la aguja magnética, las de las mareas, las de la velocidad del sonido y las de barómetro y termómetro aplicadas a la determinación de las diferencias de nivel de los lugares en que se ejecutaron.

El día 20 de diciembre de 1791 salieron las dos corbetas del puerto de Acapulco, alcanzando la isla de Guam (Marianas) el 1.° de febrero siguiente y fondeando en la ensenada de Umatag, en la parte Suroeste de la isla. Inmediatamente se estableció el observatorio en tierra y se emprendieron las observaciones astronómicas necesarias para determinar con exactitud la posición geográfica de la isla. A continuación se practicaron las experiencias con el péndulo, así como observaciones magnéticas.

El 24 del mismo mes pusieron rumbo a Filipinas los buques españoles, fondeando en Manila el 26 de marzo. Con el fin de aprovechar la estación favorable, se dispuso que la corbeta "Atrevida" fuese al puerto de Macao, en China, para hacer en aquella ciudad las observaciones de gravedad. Cincuenta días empleó la "Atrevida" en este crucero, entre el viaje de ida y vuelta a Manila. Durante la estancia en Filipinas se efectuaron numerosos reconocimientos, y en Manila se hicieron repetidas observaciones de latitud y longitud, a más de la determinación de la longitud pendular.

La salida de los dos navíos de Manila tuvo lugar el 15 de noviembre de 1792, y después de haber reconocido y trazado con precisión las costas occidentales de las islas de Mindoro, Panay, Negros y Mindanao, fondearon en la rada de Zamboanga el 23 del mismo mes, donde prosiguieron las observaciones astronómicas y físicas objeto del viaje. Desde Zamboanga emprendieron la derrota a lo largo de la costa meridional de Mindanao, con la idea

de penetrar lo antes posible en el Pacífico, pero dificultada la navegación por frecuentes turbonadas, no llegaron a descubrir las islas de Erronam y Anatom, las más orientales del Archipiélago de las Nuevas Hébridas, hasta mediados de febrero de 1793. Con objeto de hacer la observación de la gravedad en el paralelo de 45° Sur, como se había encomendado a Malaspina en la Real Orden anteriormente citada, pusieron las dos naves rumbo directo a la bahía de Dusky, en el extremo meridional de Nueva Zelanda, avistando tierra el 26 del mismo mes, e intentando fondear el 28 en la bahía Doubtful, así bautizada por el Capitán Cook, pues su latitud de 45° 10' le hacía muy propia para las experiencias; pero a la mañana siguiente un fuerte temporal del Noroeste les hizo desistir de dicho propósito y dirigirse al puerto de Jackson, nueva estación de gravedad, y donde, según el relato de este memorable viaje, recibieron nuestros navegantes las mayores atenciones de todos los jefes militares y políticos de la colonia.

Pasaron desde allí al Archipiélago de Babao, en las islas de los Amigos, con navegación sumamente penosa, sufriendo averías de bastante importancia las corbetas en los aparejos y cascos. En Babao complementaron las experiencias sobre la gravedad con las observaciones usuales en las distintas escalas del recorrido.

Dando por terminadas las tareas científicas, que constituían el programa de su viaje en el Pacífico, se pusieron en derrota para la América meridional, fondeando en el puerto del Callao, de Lima, el 23 de julio de 1793. A mediados de octubre arribaron a Montevideo, desde donde emprendieron la segunda campaña en las islas Malvinas, y posteriormente el reconocimiento de las islas Auroras en enero de 1794, cuya posición se encontraba incierta en 12' ó 15' de latitud y hasta 7° de longitud, según los cálculos diversos de los navegantes que hasta entonces habían dado noticias de ellas.

Regresados a Montevideo el 15 de febrero, zarparon para Cádiz en el mes de junio siguiente, entrando con toda felicidad en dicha bahía el 21 de septiembre.

Quedaría incompleto el sucinto relato de esta gran empresa llevada a cabo por Malaspina y Bustamante si no se diera somera cuenta de la organización de la misma.

El armamento de las dos corbetas, construídas de intento para esta expedición, se hizo con todo el esmero imaginable, dotándolas con marinería y oficialidad escogida a gusto de sus Comandantes respectivos. En la "Descubierta" embarcó el Teniente de Reales Guardias de infantería española D. Antonio de Pineda, encargado de todo lo relativo a Historia Natural y Física experimental, en cuyas ciencias era muy experto. Igualmente figuraron entre el personal técnico de ambos barcos dos botánicos y naturalistas, así como dos pintores para las vistas y dibujos que se precisasen sacar durante la expedición.

En el medio año que transcurrió desde que se cursaron las primeras órdenes hasta la salida de los navíos, se habilitó en Cádiz un Observatorio especial, en el cual, tanto los Oficiales como los Guardias Marinas destinados, se ejercitaron en todas las observaciones de la Astronomía náutica. Mientras tanto, se reconocían por otra parte los archivos de Indias, tomando nota de datos interesantes para las navegaciones proyectadas. Esto permitió trazar las derrotas con más acierto y modificar, mejorándolo, el plan en un principio proyectado. Además, se dotó a cada corbeta con una escogida selección de libros y de instrumentos apropiados a los fines de la campaña, el conjunto de todo lo cual hizo afirmar al Intendente general de la Armada, Sr. D. Luis María de Salazar, en su "Discurso sobre los progresos y estado actual de la Hidrografía en España", Madrid, 1809, que "no será exageración el decir que ninguna otra potencia, hasta entonces, había puesto en el mar expedición más completa ni mejor provista de todos los medios conducentes al perfecto desempeño de su encargo".

CAPITULO III

LA DETERMINACIÓN DE LA GRAVEDAD EN MADRID, POR CISCAR

En su "Memoria elemental sobre los nuevos pesos y medidas fundados en la Naturaleza" da cuenta D. Gabriel Císcar que con el fin de averiguar la fuerza de la gravedad en distintos parajes de la Tierra se construyeron en París, por orden de S. M., unos péndulos, que describe con las palabras siguientes:

"Se componen de una barra de acero, que en su parte inferior lleva una lente de plata, esto es, un sólido, que resulta de dos segmentos de una esferoide achatada, unidos por sus bases. Por medio de una pieza de latón está unida la parte superior de la barra a un prisma triangular de acero, a que suele darse el nombre de "cuchillo". El canto o arista inferior del prisma apoya sobre un plano horizontal de acero, que tiene una gran hendidura, por la cual se introduce la barra. Dicha arista es el exe de rotación sobre el que el péndulo hace sus oscilaciones. Cada péndulo tiene su termómetro para calcular la dilatación de la barra según el grado de calor." Fué con este juego de cuatro péndulos con el que determinó Císcar la gravedad en Madrid, en 1800, y en su manuscrito, firmado por Císcar, en 10 de mayo de 1821, y que debía servir de prólogo a una segunda edición de su "Memoria", antes citada, dice lo que sigue, refiriéndose a esta determinación:

"Las observaciones hechas en Madrid en 1800 con los cuatro péndulos descritos en la nota II de la "Memoria elemental sobre los nuevos pesos y medidas fundados en la Naturaleza", comparadas con las hechas en París el año anterior, manifiestan con suma precisión la verdadera diferencia de gravedad en los dos puntos expresados, según se demostrará en una Memoria dirigida a este objeto, cuya publicación no ha podido verificarse por la necesi-

dad de atender a otras de mayor consideración o de mayor utilidad."

De esta Memoria no se tiene el menor rastro. El Ingeniero del Cuerpo de Minas D. Juan Sánchez Massiá, en su libro "Introducción al estudio de la intensidad de la gravedad por medio del péndulo", afirma que los cálculos de la determinación de la intensidad de la gravedad en Madrid observada por Císcar, fueron hechos en Cartagena, sin que le fuese posible encontrar en parte alguna el método seguido ni la marcha de sus operaciones.

Por su parte, el Coronel de Ingenieros D. Joaquín Barraquer, en una nota de su Discurso de ingreso en la Real Academia de Ciencias Exactas, Físicas y Naturales, sostiene que la Memoria en cuestión de Císcar no vió jamás la luz pública.

Pero si bien parece fuera de duda la inexistencia de dicha Memoria, se conoce el resultado obtenido, porque tanto Antillón, en la primera edición de su Geografía (1808), como posteriormente Vázquez Queipo, lo han publicado.

El valor encontrado por Císcar para la gravedad en Madrid, que incluye Vázquez Queipo en su tabla de logaritmos, es

$$g = 980.4486 \text{ cm.}$$

Independientemente de esta determinación absoluta de la gravedad, afirma Císcar en el prólogo de su obra titulada "Apuntes sobre medidas, pesos y monedas", que la verdadera longitud del péndulo, que oscila los segundos en Madrid, es de 1 vara corregida y 0,191456 de vara.

Respecto a la unidad de longitud—vara corregida—, tomada para la determinación de esta magnitud, aclara Císcar que "haciendo en la vara de Burgos, tan conocida en Castilla, y de la cual se hace uso en todos los Arsenales y fábricas de la Armada, la ligera diminución de una línea y dos décimas de punto, propuesta por primera vez en la Memoria publicada en el Almanaque Náutico en 1810, se logrará una vara tan natural como el metro de los franceses, pues que estaría comprendida 12 millones de veces en el cuadrante del meridiano terrestre, así como el metro está comprendido 10 millones de veces en dicho arco, que es la cuarta parte del perímetro del meridiano".

APENDICE

APUNTES BIOGRÁFICOS DE D. JORGE JUAN, D. ANTONIO DE ULLOA
D. ALEJANDRO MALASPINA, D. JOSÉ BUSTAMANTE Y D. GABRIEL CISCAR

I.—D. JORGE JUAN

D. Jorge Juan y Santacilia, honra de su Cuerpo y de España, fué un marino ilustre que unió a una excepcional inteligencia, conocimientos muy extensos y profundos en distintos ramos del saber humano y raras y excelentes condiciones de carácter, que puso siempre, con éxito, al servicio de aquella inteligencia y aquel saber.

Nació en Novelda (Alicante) en 5 de enero de 1713.

Huérfano de padre a los tres años, cursa con aprovechamiento sus primeras letras en el Colegio de la Compañía de Alicante, bajo la tutela de su tío y tutor, D. Antonio Juan, canónigo de aquella Colegiata.

De allí pasa a Zaragoza, para ampliar sus estudios y conocimientos, a la sombra de otro tío suyo, caballero de la Orden de Malta, D. Cipriano Juan.

Una vez que adquirió las nociones necesarias de Matemáticas y humanidades, fué enviado por su tío a Malta, con recomendación para D. Antonio Manuel de Villena, gran Maestre de la Orden, que lo admitió como paje.

En 1726, a los trece años, toma el hábito de la Orden; y antes de cumplir los catorce, obtiene la Encomienda de Aliaga.

Siente nacer su afición a la Marina en aquel ambiente tan propicio para ello; y en 1729 regresa a España y se le concede la carta orden de Guardia Marina.

Por falta de vacante tiene que esperar algún tiempo en Cádiz antes de ingresar en la Academia. Aprovecha este tiempo para asistir a clase como oyente, con tal fruto, que al tener vacante e ingresar a los diecisiete años, está ya en condiciones de embarcar inmediatamente para hacer sus prácticas de mar.

Efectúa varias campañas en corso contra los moros, y en ellas y

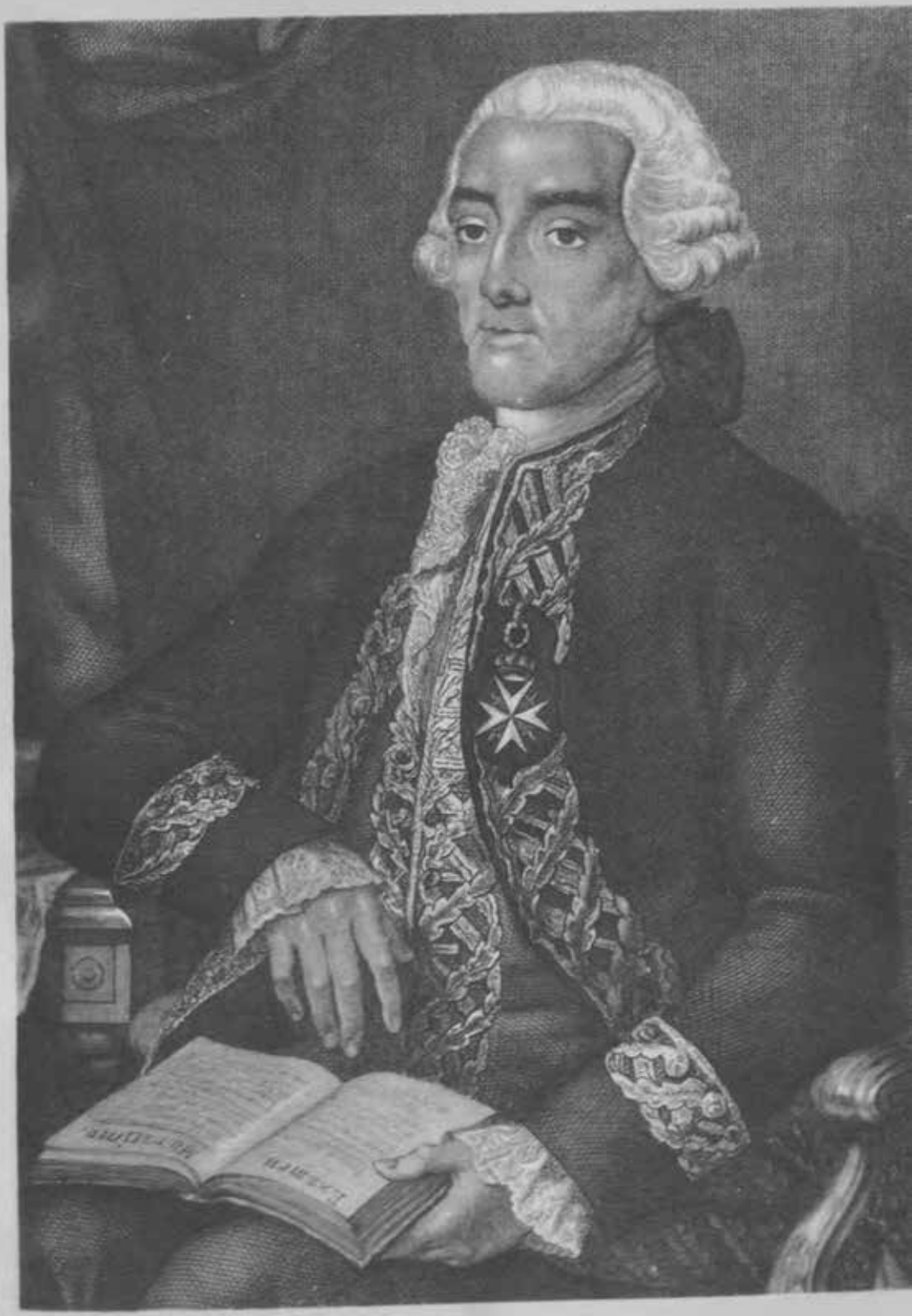
en distintos incidentes, acusa ya personalidad propia. También se encuentra en la expedición contra Orán, siendo ya Brigadier de Guardias Marinas. Asimismo, asiste a las jornadas que culminan en la elevación al trono de Nápoles del entonces Infante D. Carlos.

En 1734, a los veintiún años, regresa a España para cursar sus últimos estudios, antes de examinarse para ascender a Alférez de fragata; y es ya tan completa y cierta su preparación científica y tan poco comunes sus circunstancias personales, que van concretándose en un creciente prestigio impropio de su categoría de Guardia Marina y de su edad. Este prestigio hace que se le escoja, en calidad de profesor, para que en horas extraordinarias enseñe a sus compañeros el fruto de sus conocimientos; ellos pagan sus enseñanzas dándole cariñosamente el remoquete de EUCLIDES.

Y en este punto, surge la ocasión que ha de ser causa de que este ser singular y enciclopédico empiece a demostrar al Mundo y a la Ciencia su genio. Genio que brilla más por la integridad de su carácter insobornable y por un amor sin límites a la verdad y a la justicia, defendidas siempre por él con temple de acero.

Esta ocasión fué la solicitud del Rey de Francia a nuestro Felipe V para que autorizase, a instancias de la Academia de Ciencias de París, ciertas observaciones y medidas encaminadas a resolver el problema, apasionante en aquella época, de determinar la figura real de la Tierra, autorización necesaria, ya que las tales medidas y observaciones habían de efectuarse precisamente en lugares próximos al Ecuador, pertenecientes al Virreinato del Perú, de la Corona española.

Generosamente, accede a ello nuestro Monarca, e incluso se obliga a sufragar los gastos consiguientes a la empresa en no menor medida que Francia, pero con la condición de que en tan extraordinario y trascendental trabajo científico figuren dos españoles. Francia aceptó la propuesta. ¿Dónde escoger aquellos dos españoles? Necesariamente en la Marina, que, aunque físicamente inexistente por falta de material, espiritualmente había heredado de la preclara y famosa Casa de Contratación sevillana todo el caudal de conocimientos, aficiones y entusiasmos matemáticos que por aquel entonces existía en España; y ya dentro de la Marina, los elegidos fueron dos modestos Guardias Marinas, de dieci-



nueve y veintiún años; se llamaban Antonio de Ulloa y Jorge Juan. Para que gozaran en su trato con los sabios extranjeros de una mayor consideración que la correspondiente a su edad y destino, fueron ascendidos a Tenientes de navío, antes de embarcar para América, en 3 de enero de 1735, concediéndoles la gracia de cuatro ascensos a la vez: Alférez de fragata, Alférez de navío, Teniente de fragata y Teniente de navío.

Jorge Juan salió de Cádiz, en el navío de 67 cañones "Conquistador", el 25 de mayo de 1735; y fué en 27 de octubre de 1745 cuando avistó, en su viaje de regreso, las costas de Galicia; después de más de diez años de muy meritorios trabajos científicos, militares y marineros, y de sufrir penalidades sin cuento y de toda índole.

No es este lugar adecuado para las noticias y comentarios referentes a tan famosa y conocida expedición, que, por otra parte, harían extensos unos apuntes que por el hecho de serlo han de ser breves; lo que de ella concierne, en su aspecto científico, a este trabajo, en él se considera. Nos limitaremos, por tanto, a decir que en estos diez años tan intensos de la vida de Jorge Juan se afirmó su recia personalidad, y fué acentuándose la fama de sus méritos, que siguió siempre en aumento hasta el fin de sus días.

A poco de regresar a España, morir Felipe V, ocupar el trono Fernando VI y ser elevado el Marqués de la Ensenada a la suprema gobernación del país, fué recibido por el Ministro, Jorge Juan. Pronto apreció el Marqués de la Ensenada los méritos y discreción del marino al leer las Memorias que éste le presentó, alguna de ellas secreta y de índole delicada, por tratarse de informes reservados a la Corte, que se referían al verdadero estado de aquellas provincias tan lejanas, en sus diversos aspectos político, militar, de justicia, etc. Propuso al Monarca su ascenso a Capitán de fragata, propuesta inmediatamente aceptada por el Rey.

Desde entonces, Jorge Juan interviene, no sólo con su informe, sino también con su actuación personal, en todos los varios y complejos asuntos de gobierno y de interés nacional, siempre con acierto y cada día con mayor éxito.

Muy aficionado y entendido en asuntos de construcción naval, con grandes conocimientos prácticos en maniobra, experimentado en lances de mar y con dotes excepcionales de observación y me-

ditación, debe considerársele como el mejor Ingeniero naval de su tiempo. Fué entonces cuando empezó a ser conocido en el mundo científico por el sobrenombre de "El Sabio Español", con el que después fué siempre designado por antonomasia; y fué entonces, también, cuando acompañado por los Guardias Marinas José Solano y Pedro Mora salió para Londres en comisión reservada, donde llegó el día 1.º de marzo de 1749.

Gran provecho se obtuvo de esta compleja Comisión, que abarcaba muy diversos asuntos y duró dieciocho meses. Fruto de ella fué la idea de un nuevo y revolucionario sistema de arquitectura naval, que se aplicó en la construcción de los dos navíos de nuestra Armada, el "Aquilón" y el "Oriente", con tan excelente resultado, que llegaron a alcanzar con desahogo las velocidades de nueve y doce nudos, navegando de bolina y a un largo, respectivamente, desconocidos en aquella época.

En Cádiz siguió realizando multitud de experiencias relacionadas con los problemas de ingeniería naval, que fueron traduciéndose en nuevos y originales modelos de buques, experiencias que, trascendiendo al extranjero, fueron causa de que en 1753 viniese a España, para conocerlas, el ilustre Almirante inglés Howe.

Jorge Juan siguió efectuando viajes, comisiones y trabajos de la más diversa índole. Proyectó los arsenales de El Ferrol y Cartagena, con sus diques, gradas, etc. Se le consultaba en los proyectos de canalizaciones, riegos, etc., en toda obra hidráulica de importancia. En fin, no hubo en aquellos días actividad técnica en la que no interviniese como consejero o ejecutor.

Ascendido a Capitán de navío, fué nombrado Capitán de la Compañía de Guardias Marinas, con facultades para regirla a su albedrío, incluso en los asuntos de enseñanza, aun saliéndose de los métodos seguidos y reglas de la Ordenanza. Mejoró los estudios, nombró un buen profesorado, estableció el Observatorio Astronómico de Cádiz, intervino en asuntos de la fábrica de artillería de La Cavada y publicó, en 1757, su "Compendio de navegación para uso de los caballeros Guardias Marinas", resumen claro y completo de cuanto se había escrito hasta entonces en la materia.

Estableció en su casa la titulada "Asamblea Amistosa Literaria"—como ensayo afortunado de la Academia Nacional de Ciencias que se proyectaba crear en Madrid—, en la cual se discutían

cuestiones las más diversas, de física, matemática, geografía, higiene, antigüedades, etc., con la única condición de que los asuntos a debatir fuesen inéditos y en lo posible experimentados. Jorge Juan presentó varias comunicaciones, base, algunas de ellas, de su famosa obra, titulada "Examen Matemático", cuyo primer tomo lo dedicó a la mecánica del buque y el segundo a la teoría de su construcción y maniobra. Esta obra fué, sin excepción, muy alabada por propios y extraños.

En 1766 vuelve a Madrid, donde fija su residencia para mejor atender las misiones que se le confían y como lugar más estratégico para realizar los múltiples viajes que ha de hacer para atenderlas.

En este mismo año fué nombrado Embajador extraordinario en la Corte del Emperador de Marruecos Sidi Mohamed ben Abdalá, para donde salió el 15 de febrero de 1767.

La misión relativa a la cesión de territorio a España duró seis meses y medio; fué delicada y difícil y tuvo pleno éxito.

Sigue trabajando sin cesar en sus tareas científicas e informando en negocios de todas las Secretarías de despacho y Consejo Superior de Estado.

En 1770 fué nombrado por el Rey Director del Real Semanario de Nobles; tomó posesión de su cargo, dió nuevo plan de estudios y fué tan fructífera su labor, que en dos años consiguió que el número de seminaristas fuese seis veces mayor que cuando se encargó de la dirección. Poco tiempo después, murió, víctima de un ataque de apoplejía.

Su cadáver fué depositado en una de las bóvedas de la parroquia de San Martín, donde se celebraron suntuosos funerales, a los que asistió numerosísima concurrencia y, entre ella, cuanto había de más destacado en la Corte, especialmente en ciencias y artes.

La "Gaceta de Madrid" dió cuenta de su fallecimiento como sigue:

"El día 21 del mes pasado falleció en esta Villa, de edad de sesenta años, el Excmo. Sr. D. Jorge Juan y Santacilia, Comendador de Aliaga en la Religión de S. Juan, Gefe de Esquadra de la Real Armada, Capitán de la Compañía de Caballeros Guardias Marinas, Director del Real Seminario de Nobles, del Consejo de S. M.

en la Junta de Comercio y Moneda, y Embaxador que fué del Rei nuestro Señor en la Corte de Marruecos, en cuyos destinos, y en diferentes Comisiones de la mayor entidad y confianza, ha acreditado su zelo, desinterés y amor al servicio de S. M., por espacio de cuarenta y tres años, desde Guardia Marina. Su particular talento, incesante aplicación a las Ciencias, especialmente las respectivas a su profesión, y a la profunda instrucción que adquirió en ellas, bien patente en las diferentes obras que ha publicado, le dieron digno lugar y crédito entre los sabios de Europa; era Consiliario de la Real Academia de San Fernando de esta Corte, Miembro y Socio correspondiente de la de Ciencias de París y Académico de las Reales Sociedades de Londres y Academia de Berlín. Finalmente, el notorio adelantamiento que han tenido bajo su dirección los arsenales, diques y otras obras de Marina, acreditan haber sido un vasallo mui útil al Rei y a la Patria, y que hace honor a nuestro siglo."

Terminaremos estos muy breves apuntes copiando lo que de él escribió un íntimo amigo y discípulo suyo:

"Fué de estatura y corpulencia medianas, de semblante agradable y apacible, aseado, sin afectación en su persona y su casa y parco en el comer. Cuando se le hacía una pregunta de carácter científico parecía en su ademán que era él quien buscaba la instrucción. Si se le pedía informe sobre algún asunto, primero se enteraba, después meditaba y últimamente respondía. De la madurez con que daba su parecer provenía su constancia en sostenerlo."

II.—D. ANTONIO DE ULLOA

D. Antonio de Ulloa, célebre sabio español, marino, explorador, físico y literato, nació el día 12 de enero de 1716, en Sevilla, en la calle del Clavel, 1, esquina a la Plaza de Armas.

De ilustre familia—especialmente por línea paterna—, tuvo nueve hermanos más, y recibió muy esmerada educación, primero en su casa y después en el Colegio de Santo Tomás, de Sevilla.

Por su afición a la carrera de marino y quizá también por la necesidad de fortalecer su salud, su padre, valiéndose de la buena amistad que tenía con el General D. Manuel López Pintado, Mar-

qués de Torre Blanca de Aljarafe, logró su embarco en el galeón "San Luis", perteneciente a una expedición que debía zarpar para Cartagena de Indias al mando del citado General. Antes, solicitó plaza en la Compañía de Guardias Marinas, instalada en Cádiz, plaza que no consiguió por falta de vacante. Esto fué lo que le decidió a embarcar como aventurero, a los catorce años, en la citada expedición. Entonces se denominaban aventureros a los que navegaban para hacer méritos, como medio de ingreso en dicha Academia de Marina.

Estuvo navegando desde el 26 de junio de 1730, fecha en que salió de Cádiz rumbo a Cartagena de Indias, hasta el 29 de septiembre de 1732, que volvió a fondear en Cádiz.

Durante este tiempo, además de efectuar prácticas de mar, estudió con gran aprovechamiento las materias necesarias para entrar en la Academia. Ulloa se presentó a examen, e ingresó en la Compañía de Guardias Marinas, con la nota de sobresaliente, el día 28 de noviembre de 1733. Inmediatamente fué destinado al navío "Santa Teresa", que, con el "Galicia" y el "Real", escoltó hasta Nápoles un convoy de infantes y artilleros que España enviaba para auxiliar al Infante D. Carlos, después Carlos III de España.

Ulloa tuvo su bautismo de fuego en esta campaña, en un encarnizado combate contra fuerzas superiores austríacas, en el que el "Santa Teresa" alcanzó una brillante victoria.

A los diecinueve años fué escogido, con Jorge Juan, entre los Guardias Marinas de la Academia de Marina para asistir a la famosa expedición al Perú, que se menciona al hablar de Jorge Juan.

Las Reales Cédulas de 14 y 20 de agosto de 1734 prevenían: "Que se eligiesen dos personas en quienes concurriesen, no sólo las condiciones de buena educación, indispensables para conservar amistosa y recíproca correspondencia con los Académios franceses, sino la instrucción necesaria para poder ejecutar todas las observaciones y experiencias conducentes al objeto, de modo que el resultado fuese fruto de sus propios trabajos, con entera independencia de lo que hicieran los extranjeros."

Es sabido que los franceses empezaron diciendo irónicamente que les habían dado por compañeros unos pigmeos, y concluyeron confesando que eran unos gigantes. Tal fué el concepto que supieron alcanzar, con su meritoria e inteligente labor, admirada

de propios y extraños, en tan famosa expedición. Al publicarse los trabajos realizados y resultados obtenidos en ella, Ulloa tomó a su cargo, principalmente, la parte histórica, e imprimió la "Relación histórica del viaje a la América meridional", Madrid, 1784, obra traducida inmediatamente a casi todos los idiomas de Europa.

Al mismo tiempo que con tanto éxito e inteligencia cooperaba en tan magna empresa científica, también tuvo ocasión de demostrar su iniciativa y valer en trabajos y problemas de índole marinero-militar. Un biógrafo francés anónimo dice a este respecto: "A fines de septiembre de 1740 fué encargado Ulloa por el Virrey de poner, de acuerdo con Jorge Juan, las costas del Pacífico en estado de defensa contra la escuadra inglesa del Vicealmirante Anson. Cumplida esta misión, iban a reanudar sus pacíficos trabajos, cuando se les llamó con toda urgencia a Guayaquil, adonde el desembarco de los ingleses había esparcido el terror. Después de haber adoptado las medidas necesarias para la seguridad de la plaza, regresaron a Lima, y recibieron la orden de cruzar con dos fragatas a lo largo de la costa de Chile. La llegada de algunos refuerzos le devolvió la libertad para proseguir su misión científica."

Una vez terminados sus trabajos, Ulloa embarcó en el Callao, a bordo de la fragata francesa "Delivrance", para regresar a España, llegando a Madrid, como dijimos anteriormente, el 26 de julio de 1746, encontrándose ascendido a Capitán de fragata. Al mismo tiempo, la Academia de Ciencias de París le había nombrado Miembro correspondiente.

El Gobierno de Fernando VI le encomendó muchas y muy distintas comisiones, enviándole a los países más adelantados para estudiar los progresos en las ciencias y en las artes.

Estos viajes fueron de gran utilidad y fruto, en muy diversos aspectos nacionales. Con las noticias y conocimientos que adquirió, e informes consiguientes, se fundó la Real Fábrica de Paños, se mejoró y modernizó la organización de los Colegios de Medicina y Cirugía, se nacionalizó el arte de la relojería, se crearon Jardines Botánicos y se estableció un buen gabinete de Historia Natural, con valiosísimos ejemplares de mineralogía. Es de justicia recordar aquí que a Ulloa se deben las primeras noticias que se tuvieron en Europa del platino, en el año 1748. Trajo a Madrid el primer ejem-

plar de dicho mineral, que llamó platina, por su blancura y semejanza aparente con la plata. Sostuvo, contra la opinión general, que era un metal simple "de tanta resistencia, que no era fácil romperlo ni desmenuzarlo con el golpe del martillo sobre el yunque de acero".

También realizó mejoras y concluyó los Arsenales de El Ferrol y Cartagena.

Proyectó el Canal de Castilla; introdujo los estudios de electricidad y magnetismo en España; dictó instrucciones para levantar el mapa de la Península; modificó y perfeccionó el plan de trabajos en las minas de Almadén, aumentando su rendimiento, etc.

Una vez concluídas sus comisiones científicas y por su especialización en Mineralogía, fué enviado, en 1758, a Guancavelica como Gobernador y Superintendente de su famosa mina de azogue, cuya producción consiguió aumentar extraordinariamente. En 1764 regresó a España, después de sufrir desaires y amarguras sin cuento al tratar de corregir los innumerables abusos que allí existían.

En 1766 fué enviado como Gobernador a La Luisiana, que acababa de cedernos Francia conforme al Tratado de Fontainebleau.

También allí sufrió infinidad de disgustos y tropiezos, e incluso una revolución, que pudo costarle la vida, luchando en vano contra la resistencia de los colonos.

El Rey, estimando mucho sus múltiples, variados y complejos servicios, le ascendió a Jefe de Escuadra en 1769, y en 1772 vino trasladado a la Península. En Sevilla dirigió acertadamente la construcción de los malecones destinados a librar a la ciudad de las inundaciones del Guadalquivir.

Mandó la flota que trajo felizmente del Nuevo Mundo español el último y rico cargamento de caudales de aquellas regiones.

Fué ascendido a Teniente General en 1779. Aún realizó, en 1780, dos cruceros al mando de una Escuadra: uno a las islas Terceras y el otro a cabo Espartel.

En dos ocasiones fué Director General de la Armada, puesto que ocupaba al fallecer en 1.º de julio de 1795; alcanzó, por tanto, la edad de setenta y nueve años.

Al morir era Comendador de Ocaña en la Orden de Santiago, de la Junta de Comercio y Moneda del Reino, Académico de Bellas Artes de Madrid, individuo de la Real Sociedad de Londres,

correspondiente de las Academias de Ciencias de París, Berlín y Estocolmo; del Instituto de Bolonia, de la Sociedad de Leipzig y de las patrióticas de Sevilla y Vizcaya.

En la "Gaceta" del martes 15 de septiembre de 1795 apareció la correspondiente noticia necrológica.

Para terminar este breve apunte, nada más oportuno que transcribir el simpático retrato que de nuestro marino hace el extranjero Townsend, retrato que encontramos en la meritoria e interesante obra que el ilustre Director del Museo Naval, D. Julio Guillén, dedica a Jorge Juan y Ulloa.

Dice así: "Antonio Ulloa es el español cuyo conocimiento más me ha interesado. He hallado en él un verdadero filósofo, perspicaz e intruído, vivo en la conversación, libre y desembarazado en sus modales. Es pequeño de estatura, sumamente flaco y encorvado por los años. Por lo regular viste de paisano y siempre está rodeado de sus hijos. En la sala donde recibe sus visitas hay confusamente sillas, baúles, cajas, libros, papeles, una cama, una prensa, vestidos, útiles de carpintero, instrumentos matemáticos, un barómetro, una péndula, armas, cuadernos, espejos, fósiles, minerales, antigüedades americanas, dinero y, por fin, una curiosa momia de las islas Canarias."

III.—D. ALEJANDRO MALASPINA

Nació este noble y famoso marino el 5 de noviembre de 1754, en Palermo (Sicilia) (como Gravina, que nació en Palermo, de nobilísima familia, en 1756).

Fueron sus padres el Marqués Carlos Morello y Catalina Malipuli, de la familia de los Príncipes de Soragna.

Deseoso de ingresar en nuestra Armada, vino a España y sentó plaza de Guardia Marina en Cádiz, el año 1774, al propio tiempo que se cruzaba caballero de justicia en la Orden de Malta.

Fué promovido a Alférez de fragata en 1776, y con este empleo navegó por el Atlántico, Indico y mar de China.

En 1778 asciende a Alférez de navío y toma parte valientemente en el glorioso, aunque desgraciado, encuentro que sostuvo el Jefe de Escuadra D. Juan de Lángara al mando de 11 navíos y

Alexandro Malaspina

dos fragatas, contra otra escuadra inglesa que mandaba el Almirante Rodney, compuesta de 21 navíos y 10 fragatas, en aguas del cabo de Santa María. Malaspina estaba embarcado en el navío "San Julián", uno de los cuatro buques que sacrificó Lángara para salvar el resto de su escuadra, a la que dió la orden de dispersión; consiguió su propósito, pero los cuatro buques tuvieron, al fin, que rendirse a la enorme superioridad del enemigo, después de sufrir pérdidas enormes. Malaspina cayó prisionero y fué conducido a Gibraltar; después de canjeado, regresó a Cádiz.

Ya de Teniente de navío, en 1780, vuelve a batirse contra los ingleses en el combate que sostuvo la escuadra de D. Luis de Córdova, en el Estrecho de Gibraltar, contra la del Almirante Scrope, conde de Howe, que tuvo que batirse en retirada.

Ascendido a Capitán de fragata, en 1782, toma el mando de la fragata "Asunción" y con ella efectúa una larga e interesante navegación por Asia y Oceanía.

A su regreso a Cádiz, en 1784, se le nombra Teniente de la Compañía de Guardias Marinas, y poco después toma el mando de la magnífica fragata "Astrea", con la que dió la vuelta al mundo, recorriendo la costa oriental y occidental de América del Sur, visitando muchas islas del Pacífico y regresando a Cádiz por el cabo de Buena Esperanza.

Este viaje le sirvió de adecuada preparación para el que luego llevó a cabo con las corbetas "Descubierta" y "Atrevida", viaje de circunnavegación, que duró más de dos años, desde el 30 de julio de 1789 hasta el 21 de septiembre de 1794, pródigo en aventuras y fecundo en enseñanzas. A su regreso, Malaspina pudo presentar al Gobierno de España, como fruto del viaje, además de la relación detallada de él, verdaderos Tratados de cada una de las materias que fueron estudiadas: astronomía, física, hidrografía, historia natural e historia política.

Nuestro marino fué muy bien recibido y agasajado, con muestras de cariño y aplauso, tanto por la Corte como por el Gobierno. En premio a su labor, y como demostración del aprecio que se le concedía, fué ascendido a Brigadier en 1795.

Pero muy pronto cayó en desgracia. Se le sometió a proceso, y después de preso en el cuartel de Guardias de Corps, se le encerró en el castillo de San Antón, de La Coruña, hasta que en 1803, a

petición del Conde de Melzi, Napoleón obtuvo del Gobierno de España su libertad a cambio del destierro.

Cuando llegó a Italia desterrado, le fué ofrecido el cargo de Ministro de la república italiana; no lo aceptó, y se retiró a su casa de Lunigiana, donde murió amargado en 9 de abril de 1809, a los cincuenta y cinco años de edad.

NOTA.—Mucho se ha discurrido respecto a las causas que motivaron la desgracia en que cayó Malaspina. Nos limitaremos a copiar, a título de curiosidad, por creerlo cierto, lo que del caso escribió su contemporáneo D. Joaquín Lorenzo Villanueva, reputado como hombre veraz y enterado.

Dice así: "A todos nos causó sorpresa su arresto, cuando estábamos esperando la relación de su viaje. Por largo tiempo se estuvieron haciendo castillos en el aire sobre este incidente. Atribuíanlo unos a escritos suyos; otros, a su comentario sobre la vida de la Reina María Luisa, que poco antes había aparecido en Francia. Para mí lo más verosímil, y pudiera decir cierto, es que aquel célebre marino fué víctima de una intriga entre la Reina y dos damas suyas, la Matallana y la Pizarro, y el Príncipe de la Paz. En un intervalo de desafecto y resentimiento, en que andaba la Reina a caza de medios para cortar la privanza del valido, fué buscado Malaspina por estas damas para que, a la vuelta de Lombardía, su patria, adonde iba con licencia, trajese realizado el plan de cierta carta que había de influir con el Rey para tan santa obra. Este plan, escrito incautamente por Malaspina y guardado por la Reina en una gaveta, fué revelado a Godoy por la Pizarro, enterada de él por sospechas que le inspiró una indeliberada expresión de la Reina. La Matallana, de quien exigió primero la revelación del secreto, se negó a ello cortésmente. El plan, descubierto y pintado por Godoy a Carlos IV con los colores que le convenían, sirvió de instrumento a su venganza. La Matallana fué presa y desterrada de la Corte. A Malaspina, después de su prisión y confinamiento, se le permitió restituirse a su país, previniéndole, so pena de muerte, que no volviese a territorio ninguno de la Monarquía española. Los achaques contraídos en sus viajes y el encierro deterioraron su robusta salud en términos que, a poco tiempo de llegar a Lombardía, falleció, con el desconsuelo de no haber podido

volver a España, la cual llamaba Patria suya en las cartas a sus amigos."

Y para reflejar las tristes consecuencias de esta desgracia política, nada mejor que transcribir las siguientes líneas, del muy ilustre marino D. Martín Fernández de Navarrete:

"Util para el mundo y honroso para la nación española hubiera sido la publicación de este viaje, coordinado por los Oficiales de la expedición y sabios que les acompañaron; pero, por un trastorno de ideas inconcebible, las resultas de la desgracia, causa y prisión de su Comandante Malaspina, alcanzaron a una empresa que nada tenía que ver con sus supuestos crímenes, y en odio del autor o jefe de la expedición, se sepultaron todos los trabajos propios de los hombres científicos y aplicados que llevó a sus órdenes. Mucho costó sacar de manos de los escribanos y gentes que entendieron en el proceso los diarios, derroteros y descripciones del viaje. El que suscribe tuvo la satisfacción de contribuir felizmente a lograrlo, a reunir cuantos papeles se pudo y depositarlos en la Dirección de Hidrografía que se instituyó entonces, cuyas tareas debían comenzar por las cartas y demás trabajos marinos de esta expedición.

"Quedáronse sin imprimir todos los derroteros y excelentes relaciones del viaje, llenas de luminosas observaciones astronómicas y mineralógicas, de descripciones físicas y políticas y de nociones nuevas sobre la Historia Natural de los países recorridos."

En las "Memorias sobre las observaciones astronómicas" que el Depósito Hidrográfico publicó en 1809, se imprimió una noticia de los descubrimientos y observaciones de Malaspina, única muestra de sus viajes que hasta entonces vió la luz pública.

IV.—D. JOSE BUSTAMANTE

D. José Bustamante y Guerra nació en Ontaneda (Santander) el día 1.º de abril de 1759.

Su decidida afición al mar y su vocación por las empresas de armas le llevaron a sentar plaza de Guardia Marina, en Cádiz, a los once años de edad.

A los quince años, en 1774, inició su carrera militar, peleando

contra los moros en Berbería; demostró pericia y valor y fué ascendido, en 16 de marzo de 1774, a Alférez de fragata, como premio a su conducta.

Después pasó a Filipinas a bordo de la urca "Santa Inés", y en aquellas islas vuelve a tener ocasión de demostrar su temple, batiéndose contra un navío inglés. Herido en el combate, fué hecho prisionero y conducido a Cork. Y como premio a su comportamiento y valor vuelve a ser ascendido a Teniente de fragata en 23 de mayo de 1778.

En 1780, restablecido de su herida y libre, embarca en el navío "Triunfante", de la escuadra que mandaba D. Luis de Córdova. Asiste al encuentro que tiene lugar el 20 de octubre de 1782 en la desembocadura del Estrecho de Gibraltar, entre la Escuadra española y la inglesa, manda por el Almirante Howe, y vuelve a ascender por méritos de guerra a Teniente de navío.

Elegido Oficial de órdenes de aquella Escuadra por sus brillantes dotes, sale en comisión para Veracruz con objeto de traer a España importantes caudales. Cumple su misión a bordo del navío "Septentrión", regresando felizmente a España con su valioso cargamento.

En 1784 asciende a Capitán de fragata, y después de prestar servicios diversos en otros buques, toma el mando de la corbeta "Atrevida". Con ella, y en compañía de la corbeta "Descubierta", realiza el famoso viaje de circunnavegación, en el que se efectuaron las interesantes experiencias de péndulo que se mencionan en este folleto.

Como recompensa a sus servicios asciende a Capitán de navío en 1791 y a Brigadier en 1795.

En 1796 fué nombrado Gobernador político-militar de Montevideo, jefe de las fuerzas navales del Plata.

Desempeñó este cargo con singular acierto, ya que supo defender el comercio español y tener a raya las fuerzas inglesas.

Fué entonces cuando las circunstancias le llevaron a mandar aquella Escuadra que fué agredida por otra inglesa mucho más fuerte, a pesar de que las relaciones entre los Gobiernos inglés y español no podían ser, aparentemente, más cordiales; ocurrió el suceso como sigue:

En abril de 1804 entró en Montevideo, por averías producidas

JOSÉ BUSTAMANTE Y GUERRA.

por los malos tiempos, una Escuadra que, entre otras cosas, debía conducir a España cerca de cinco millones de pesos. La mandaba D. Tomás de Ugarte, que, gravemente enfermo, murió al llegar a Montevideo, y para sustituirle se nombró a D. José Bustamante, que, como hemos dicho, ocupaba el cargo de Gobernador .

La Escuadra se componía de las cuatro fragatas "Medea", "Clara", "Fama" y "Mercedes". Estaban pobremente armadas, lo que no preocupaba, dada la paz existente.

Se abarrotaron las bodegas con los lingotes de plata y cobre, fardos de lana de vicuña, cueros, cascarilla, etc. El pasaje, compuesto en parte por mujeres y niños, se acomodó lo mejor posible, y en las baterías se habilitaron camarotes para los pasajeros de distinción, todo en el plan de emprender un viaje completamente pacífico y sin riesgo alguno de guerra.

La Escuadra dió la vela en Montevideo el 9 de agosto, y efectuó una travesía feliz hasta avistar tierras de Portugal, a los cincuenta y siete días de viaje; creíase terminado éste sin incidentes. Varios buques que se cruzaron en la travesía confirmaron la neutralidad reconocida de España en la guerra que sostenían Inglaterra y Francia; pero el día 5 de octubre, la fragata "Clara" hizo señales de que cuatro fragatas inglesas de gran porte seguían el rumbo de las naves españolas. A las nueve de la mañana, a la vista del cabo Santa María, se aproximó la Escuadra inglesa, formada en línea por barlovento. La de más porte envió un bote con un Oficial para comunicar a Bustamante, de parte del Comodoro Sir Graham Moore, lo siguiente: "que tenía órdenes de S. M. británica para detener la Escuadra española y llevarla a Inglaterra, peleando contra ella si fuese preciso, que sólo para este fin habían venido aquellas cuatro fragatas tan potentes, bien pertrechadas y marineras, en relevo de otra división análoga, que había estado allí hacía tres semanas con la misma misión, y que no estando declarada la guerra entre las dos naciones, ni teniendo orden de hacer presas ni de detener a ningunas otras embarcaciones, entendía el Comodoro inglés que debíamos evitar efusión de sangre y acatar la mencionada resolución de su Soberano, siendo un partido decidido del que no podía prescindir".

Las fragatas inglesas eran: la "Indefatigable", la "Lively", la "Amphion" y la "Medusa". Sólo la primera, o dos cualesquiera de

las otras, tenían tanto poder como todas las nuestras juntas, aunque estuviesen perfectamente preparadas para batirse, mucho más viniendo cargadas y en plan de paz.

Perplejo quedó Bustamante al escuchar tan inesperada declaración, y no porque dudase un segundo la respuesta que había de dar como marino y hombre de honor, sino por las consecuencias que había de traer para el pasaje civil, del que formaban parte mujeres y niños. Como era obligado, consultó el caso con los Jefes y Oficiales de la dotación, y todos estuvieron conformes en defender el honor con las armas, si llegase el caso, aunque no lo creían posible; pero se equivocaron, pues en cuanto se separó el bote inglés del costado de la fragata española, se acercó la Escuadra inglesa y rompió fuego de cañón y fusil, inmediatamente contestado por las armas de los navíos españoles.

A los pocos minutos de combate voló la fragata "Mercedes", pereciendo 249 personas, entre ellas mujeres y niños. La "Clara" pudo batirse un cuarto de hora más. La "Medea", cogida entre dos fuegos, luchó poco tiempo, viéndose en la dura necesidad de arriar bandera, una vez a salvo el honor, desaparejada, con muertos y heridos a bordo y juzgando inútil prolongar la resistencia. La "Fama" intentó escaparse forzando la vela, pero, al fin, fué alcanzada por dos fragatas inglesas.

Al conocerse este atentado de la Gran Bretaña contra el pabellón español la repulsa fué unánime, aun en la misma nación, exaltando en contra a las oposiciones en el Parlamento, a parte de la prensa y a cuantos profesaban sentimientos de probidad.

En España se levantó un imponente clamor, que pedía reparación al ultraje recibido, y ni el hambre, ni la epidemia, ni la consideración de los riesgos que sujetaban al Gobierno, fueron bastante para frenar la indignación popular, y como a este lamentable suceso siguieron otros de la misma índole, no pudo ya prescindirse de la guerra, declarándola el Rey en razonado manifiesto, dado a la publicidad con fecha 12 de diciembre.

Para juzgar la conducta de Bustamante en trance tan difícil, nada mejor que copiar el dictamen de la Junta de Generales reunida en el Departamento de Cádiz, a petición del propio Bustamante, que en Real Orden fecha 10 de enero de 1806 dice así: "Tanto en la navegación a Montevideo, como en el encuentro y combate

con las fragatas inglesas, procedió con el pulso que se requería para evitar el insulto intentado, y cuando fué inevitable la acción, la sostuvo hasta donde le permitieron las circunstancias contra fuerzas tan superiores, aprobando el proceder de este General, declarándole libre de todo cargo y apto para mandos y comisiones sucesivas."

En 1807 fué nombrado vocal de la Junta de fortificaciones y defensa de Indias.

Con fecha 2 de julio de 1808 se le previene de Real Orden: "Que pase a Palacio a prestar juramento de fidelidad a D. José Bonaparte." El General Bustamante, en reto noble e hidalgo al Gobierno del Intruso, contesta así: "Excmo. Sr. Acabo de recibir el oficio de V. E., y en su contestación manifiesto a V. E.: Que los dictámenes de mi honor y mi conciencia no me permiten prestar el juramento que no ha verificado la Nación; y, considerando que acaso el empleo militar que ejerzo haya producido aquella disposición, los mismos motivos me asisten para resignarlo. Dios guarde a V. E. Madrid, a 23 de julio de 1808."

Dos días después se le contesta en nombre de S. M. que sin más réplica preste el juramento mandado.

Firme y leal en su resolución, no le queda otro recurso que ausentarse inmediatamente, abandonando familia e intereses, sufriendo innumerables penalidades, con riesgo inminente de su vida, hasta presentarse en Sevilla a la Junta General que gobernaba el Reino en nombre de Fernando VII. Como recompensa a su leal proceder se le confirmó vocal de la Junta de Indias y fué ascendido a Teniente General.

En 1811 se le envía a América central para encargarse del Gobierno de lo que entonces se llamaba Reino de Guatemala. En aquel puesto, difícil y espinoso, actuó con celo, vigilancia y energía. Fué muy activo en la persecución de los que trabajaban por la independencia, teniendo que reprimir con mano dura las varias intentonas que se llevaron a cabo para proclamarla.

Regresó a España en 1819 para encargarse de la Dirección General de la Armada, que ocupó hasta 1822, que quedó extinguida por crearse el Almirantazgo.

En 1823 se le nombró vocal de la Junta de expediciones de América.

Murió en Madrid en 1825.

Poseía las grandes cruces de Isabel la Católica y San Hermenegildo, y fué caballero profeso de Santiago desde el comienzo de su carrera militar.

Terminaremos esta nota biográfica con las justas palabras que le dedicó el ilustre Vicealmirante D. Francisco de Paula Pavía: "D. Juan Bustamante y Guerra, Teniente General de la Armada, se hizo notable como entendido marino y como honrado y esclarecido patricio; y su nombre es siempre digno de mención en el Cuerpo de la Marina española."

V.—D. GABRIEL CISCAR

Este preclaro español nació el 17 de marzo de 1750 en el pequeño pueblo de Olivas (Valencia).

El 24 de octubre de 1777 sentó plaza de Guardia Marina en Cartagena; desde ese día su vida fué un constante servicio a la Patria en empresas marineras, de guerra, políticas y muy especialmente científicas.

Ninguna síntesis biográfica mejor de este varón ilustre que la expresada en los siguientes renglones, que le dedicó recientemente en uno de sus trabajos el erudito Jefe de la Armada D. Enrique Barbudo y Duarte. Dicen así:

"Perteneció a la categoría de los marinos científicos, lo que no le impidió combatir en Argel y Pensacola; pero desde muy joven destacó por su afición al estudio, escribiendo varias obras de matemáticas destinadas a la enseñanza de los Guardias Marinas. Asimismo representó a España en París en la conferencia de sabios reunida para fijar la unidad fundamental del sistema de pesos y medidas, que luego se llamó metro. Desempeñó también durante mucho tiempo el cargo de Comandante de las Academias de Guardias Marinas. Sin ser un personaje político, ejerció tres veces el cargo de Regente, por su integridad y el extraordinario prestigio de que gozaba en la nación."

Pero Císcar también supo de amarguras y desventuras. Cuando al regreso de su cautiverio volvió Fernando VII a regir la Monarquía, en mayo de 1814, destituyó a Císcar, haciéndole pasar del

GABRIEL CISCAR.

Consejo de la Regencia a un calabozo de la cárcel de Madrid. De aquí salió confinado, primero para Murcia, luego para Cartagena y, por fin, en diciembre de 1815, para Olivas, su pueblo natal. En este calvario le acompañó el respeto y la simpatía general, por la dignidad y entereza con que lo recorrió.

En tan inmerecido confinamiento le sorprendió el cambio político de 1820. Inmediatamente, por Real Orden, vuelve de su confinamiento a Madrid con destino en el Consejo de Estado. En 17 de julio de aquel año asciende a Teniente General, y en 6 de noviembre se le concede la gran cruz de San Hermenegildo.

Permaneció en Madrid cumpliendo con su deber, hasta que se trasladó a Cádiz con el Gobierno, y cuando Cádiz abrió sus puertas al Duque de Angulema, se vió obligado a emigrar, refugiándose en Gibraltar.

Allí hubiera muerto en la miseria sin la generosidad de su ilustre amigo el Duque de Wellington, que consiguió, no sin gran esfuerzo e invocando la estrecha amistad que les unía, hacerle aceptar lo indispensable para vivir.

Acabó sus días el 12 de agosto de 1829, y fué enterrado en el cementerio católico de Gibraltar, donde permaneció hasta que sus restos fueron trasladados al sitio debido, al panteón de marinos ilustres, en San Carlos.

BIBLIOGRAFIA

(1) "Relación histórica del viaje a la América meridional, hecho de Orden de S. M. para medir algunos grados de meridiano terrestre y venir por ellos en conocimiènto de la verdadera figura y magnitud de la Tierra, con otras varias observaciones astronómicas y phisicas", por D. Jorge Juan, Comendador de Aliaga en la Orden de San Juan, socio correspondiente de la Real Academia de las Ciencias de París, y D. Antonio de Ulloa, de la Real Sociedad de Londres, ambos Capitanes de fragata de la Real Armada. Impresa de orden del Rey nuestro Señor, en Madrid, por Antonio Marín. Año de MDCCXLIII.

(2) "Memoria elemental sobre los nuevos pesos y medidas decimales fundados en la Naturaleza", por D. Gabriel Císcar, Capitán de navío de la Real Armada, Miembro de la Comisión de Pesos y Medidas del Instituto Nacional de Francia por parte de S. M. C. Madrid, en la Imprenta Real. Año de 1800.

(3) "Apuntes sobre Medidas, Pesas y Monedas que pueden considerarse como una segunda parte de la "Memoria elemental "sobre las nuevas pesas y medidas decimales, fundadas en la "Naturaleza", publicada en 1800 por D. Gabriel Císcar, Teniente General de la Armada Nacional y Consejero de Estado, Miembro de la Comisión de Pesos y Medidas del Instituto Nacional de Francia, por parte de S. M. C., en los años 1798 y 1799. Madrid, en la Imprenta Nacional. Año de 1821.

(4) "Disputatio Mathematica Inauguralis de Pendulo Ejusque Applicatione Ad Telluris Figuram Determinandam", por Petrus van Galen. Amsterdam, 1830.

(5) "Biografía de D. Gabriel Císcar y Pascual", por el Capitán de

fragata Coronel de Infantería D. Miguel Lobo, escrita para su "Poema físico-astronómico", impreso en Madrid. Imprenta de M. Rivadeneyra, 1861.

(6) "Galería biográfica de los Generales de Marina, Jefes y personas notables que figuraron en la misma desde 1700 a 1868", por el Vicealmirante D. Francisco de Paula Pavía. Madrid, 1873. Imprenta a cargo de J. López. Mayor, 119.

(7) "Introducción al estudio de la intensidad de la gravedad por medio del péndulo", por D. Juan Sánchez Massía, Ingeniero primero del Cuerpo de Minas, antiguo agregado al Instituto Geográfico y Estadístico. Madrid. Imprenta de Fortanet, 1879.

(8) "Discursos leídos ante la Real Academia de Ciencias Exactas, Físicas y Naturales en la recepción pública de D. Joauín Barraquer y Rovira". Madrid. Imprenta de la Viuda e Hijo de D. E. Aguado, 1881.

(9) "Viaje político científico alrededor del Mundo por las corbetas "Descubierta" y "Atrevida", al mando de los Capitanes de navío D. Alejandro Malaspina y D. José Bustamante y Guerra, desde 1789 a 1794", Publicado con una introducción por D. Pedro Novo y Colson, Teniente de navío, Académico correspondiente de la Real de la Historia. Madrid. Imprenta de la Viuda e Hijos de Abienzo. Isabel la Católica, y Paz, 6. 1885.

(10) "Armada española desde la unión de los Reinos de Castilla y de Aragón", por Cesáreo Fernández Duro, de las Reales Academias de la Historia y de Bellas Artes de San Fernando. Madrid. Establecimiento tipográfico Sucesores de Rivadeneyra, impresor de la Real Casa, 1901.

(11) "La Figure de la Terre. Les grandes opérations geodesiques. L'ancienne et la nouvelle mesure de l'arc de méridien de Quito", por el Capitán G. Perrier, del "Service Geographique de l'Armée". Societé anonyme d'Imprimerie de Villefranche-de-Rouergue. 1908.

(12) "Los Tenientes de navío Jorge Juan y Santacilia y Antonio de Ulloa y de la Torre-Guiral y la medición del meridiano", por Julio F. Guillén. Madrid, 1936. Imprenta de Galo Sáez. Mesón de Paños, 6.

Esta Memoria ha sido editada en los Talleres del Instituto Geográfico y Catastral, siendo reproducciones los grabados que figuran en la misma de originales amablemente cedidos por el Museo Naval

Estación de gravedad en Puerto Egmont (Islas Malvinas).

El fondeadero de las Corbetas Descubierta y Atrevida en las Yslas de Vavao visto desde el Observatorio.

DERROTAS

de las

Corbetas DESCUBIERTA Y ATREVIDA, en los años

de

1789 á 1794

_____ Linea de la derrota

REPRODUCIDO EN LOS TALLERES DEL INSTITUTO GEOGRÁFICO Y CATASTRAL

Lit.ª Vda de Roldan. Madrid

LOS FENÓMENOS DE LAROYA

MEMORIAS
DEL
INSTITUTO GEOGRÁFICO Y CATASTRAL

Tomo XVIII

III

SERVICIO DE MAGNETISMO Y ELECTRICIDAD TERRESTRES

LOS FENÓMENOS DE LAROYA

Estudio sobre la posibilidad de combustiones espontáneas en la atmósfera

por el Ingeniero Geógrafo

ILMO. SR. D. JOSÉ CUBILLO FLUITERS

MADRID — Talleres del Instituto Geográfico y Catastral. — 1946.

Este libro es propiedad de quien lo compra.
Toda copia no autorizada será perseguida.

ÍNDICE

Págs.

INFORME SOBRE LOS FENÓMENOS GEOFÍSICOS OCURRIDOS EN LAROYA (ALMERÍA) EN JUNIO DE 1945

Instrucciones recibidas 11
Primer concepto sobre los fenómenos e instrumental con que se realizaron observaciones 11
Descripción de los fenómenos 12
Referencia de los sucesos ocurridos en el término municipal de Laroya 13
Cortijo de Pitango 14
Cortijo de la Fuente del Saz 14
Cortijo de Don Miguel Acosta 15
Cortijo del Cerrajero 15
Cortijo de Estella 15
Cortijo de Franco 16
Primer informe emitido después de la visita de inspección al lugar de los sucesos. 19

ESTUDIO SOBRE LA POSIBILIDAD DE COMBUSTIONES ESPONTÁNEAS EN LA ATMÓSFERA

Preliminares y división del estudio 23

I. — UN CAPÍTULO FÍSICO-QUÍMICO

Estudio de la combustión 27
El oxígeno 28
La llama 32
Catálisis 33
Acción catalítica de contacto 33
Catálisis eléctrica. La chispa 38
Algunas propiedades de la electricidad estática. Capacidad y constante dieléctrica 38
El desplazamiento de electricidad 40
Efluvio eléctrico 43
La chispa eléctrica 45

Págs.

Efectos químicos de la chispa eléctrica 46
Acción química del efluvio oscuro 47
Otras acciones catalíticas 50
El ozono 51
Otros cuerpos 54
Amoníaco 54
Celulosa 56
La ionización 57
Ionización en los líquidos 57
El deuterio. El agua pesada 61
Las reacciones nucleares 62
Ionización en los gases 65
Diferencias con los iones electrolíticos 66
Causas de ionización de los gases 67
Acción eléctrica de la llama 70

II. — LA ELECTRICIDAD EN LA ATMÓSFERA

Preliminares 77
Campo eléctrico normal 77
Intensidad del campo eléctrico normal 82
Variaciones del campo 82
Ionización de la atmósfera 85
Agentes ionizadores de la atmósfera 86
Migración de los iones 90
Turbulencia eléctrica. Fenómenos microceráunicos 92
Modificación del campo por la presencia de cargas eléctricas o de cuerpos 99
Campo eléctrico perturbado 103
Torbellino de polvo 105
Mecanismo de la tormenta 110
Campo eléctrico de la tormenta 115
Descargas luminosas 119

III. — LAS COMBUSTIONES ESPONTÁNEAS

En la atmósfera primitiva de la Tierra 127
La vida en el Planeta 128
Las distintas clases de combustiones espontáneas 129
Las combustiones de origen eléctrico 130
Los incendios del hidrógeno aerostático 130
Los efectos eléctricos en el avión 135
La combustión espontánea de la gasolina 137
Combustiones de origen físico-químico en general 143
Combustiones de origen mixto 145

Págs.

La probabilidad de un suceso 149
Probabilidad de las combustiones espontáneas 153

IV. — Los fenómenos de Laroya

Descripción del lugar en que ocurrieron los fenómenos 161
Orografía 161
Geología 162
Acceso a Laroya 163
Los hechos 164
Primera apreciación sobre los hechos 166
Carácter general del tiempo atmosférico durante los días de los sucesos 167
El tiempo atmosférico en esta época 168
Los movimientos del aire atmosférico 168
El esquema de Bjerknes 170
El frente ecuatorial 171
Los centros de acción metereológica sobre España 173
Resumen y observaciones de Laroya 176
La explicación de los sucesos 180
Otros hechos análogos 184
Conclusión 189

INFORME SOBRE LOS FENÓMENOS GEOFÍSICOS OCURRIDOS EN LAROYA (ALMERÍA) EN JUNIO DE 1945

INFORME SOBRE LOS FENÓMENOS GEOFÍSICOS OCURRIDOS EN LAROYA (ALMERÍA) EN JUNIO DE 1945

Instrucciones recibidas.

«Sección 7.ª Personal.—Número 2.064. En uso de mis atribuciones y accediendo a la petición del Excmo. Señor Gobernador civil de Almería, he tenido por conveniente disponer que se traslade V. I. a Laroya (Almería) para estudiar sobre el terreno los fenómenos geofísicos que vienen ocurriendo en la mencionada localidad. Asimismo he dispuesto que le acompañe el Ingeniero Geógrafo D. Luis de Migue González Miranda, debiendo llevar los aparatos necesarios para esos estudios.—Dios guarde a V. I. muchos años.—Madrid, 7 de julio de 1945.—El Director general.—Félix Campos-Guereta. Rubricado.—Al Ingeniero Geógrafo Ilmo. Sr. D. José Cubillo Fluiters.»

Primer concepto sobre los fenómenos e instrumental con que se realizaron observaciones.

Como consecuencia de la inspección del lugar del suceso que, acompañado por el Jefe de Minas de la provincia, hizo el Ingeniero Geógrafo de la estación Sismológica de Almería, emitió este Ingeniero, con fecha 30 de junio, un informe por el que se tenía ya en este Servicio un conocimiento de los fenómenos ocurridos, así como unas primeras conjeturas sobre cuáles podrían ser sus causas productoras.

Con esta primera idea, y como quiera que quien suscribe este informe «ha vivido» los numerosos incendios espontáneos ocu-

rridos en Aerostación y ha aprendido a conocer la atmósfera, no solamente en los tratados, sino en su propio seno, pues a sus veintiún años había realizado cuatro ascensiones en globo libre, una de ellas con fines meteorológicos, hasta los 4.500 metros de altura, con esa idea, decimos, que por otra parte es la obtenida poniendo en práctica el consejo de que «el mejor medio para saber lo que sucede en un sitio es ir allí a ver lo que pasa», pensó en que la electricidad había de tener gran parte en la explicación de los fenómenos que motivan este informe y que era necesario realizar mediciones de tal elemento.

Pero también hizo reflexionar a quien suscribe una circunstancia de los incendios espontáneos, cual es la de presentarse, las más de sus veces, en materia dividida, como manojos de esparto, haces de mies, etc., y esto hizo pensar en la posible intervención de los fenómenos de *adsorción*, cosa que, de ser cierta, determinaría producción de oxígeno atómico, y entonces se pensó también en que el *ozono* podría ser otra causa concomitante.

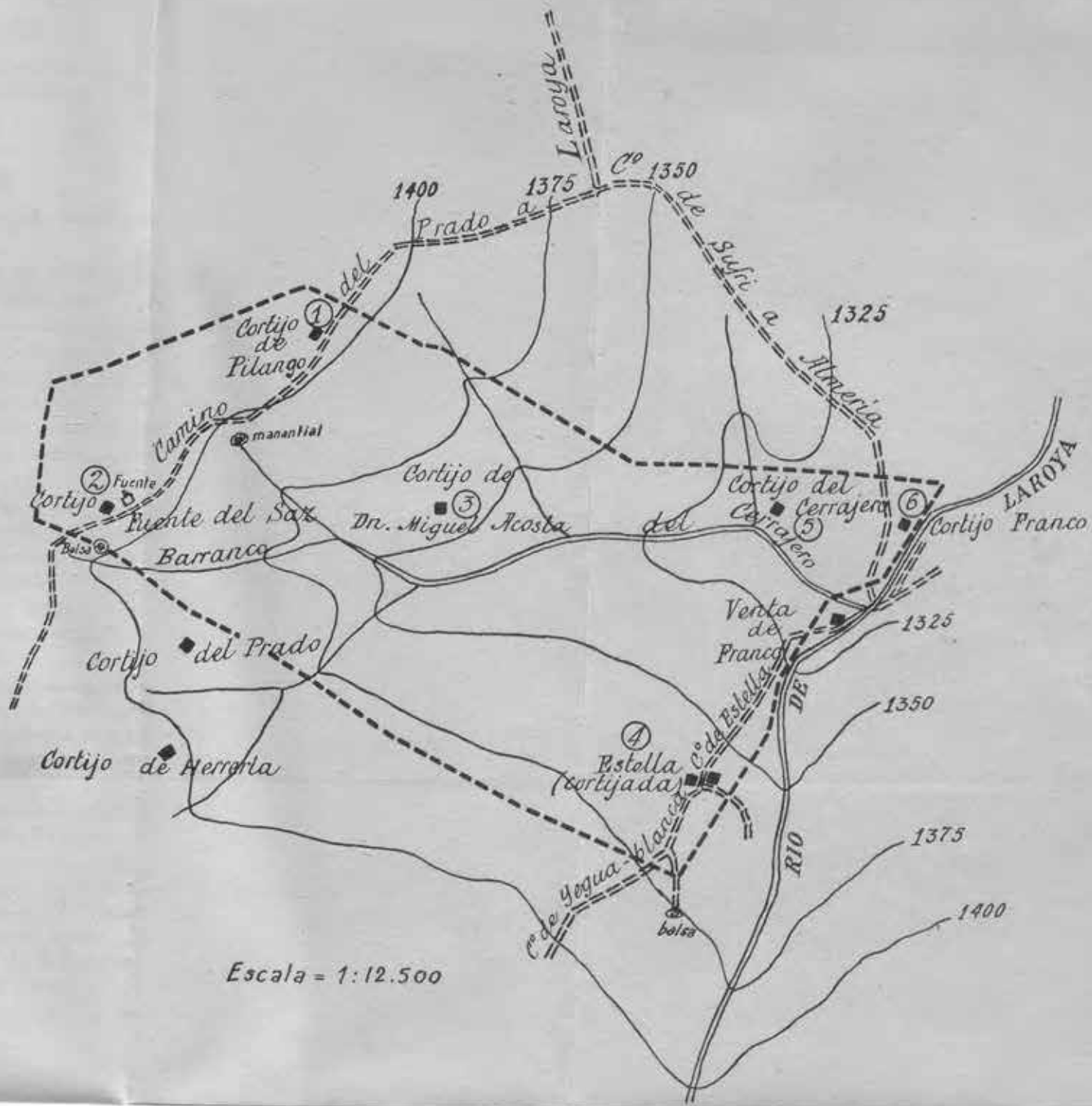
En vista de todo ello se decidió llevar al lugar de los sucesos electrómetros, uno de ellos registrador, y el contador de iones, tipo Gerdien, de aspiración, con que se cuenta; asimismo un reactivo del ozono y termómetros, anemómetro, etc.

Descripción de los fenómenos.

En el informe que antes se cita, hecho con precisión y notable sentido práctico, figura una descripción de los fenómenos ocurridos, que es a la que se atiene este informe; porque aunque se presenciaron dos incendios el día de la visita al lugar de los sucesos, el confusionismo resultante de haberse provocado algunos tal día, nos hace prescindir por completo de estos dos presenciados. Por otra parte se consideró inútil hacer *nuevos* interrogatorios, ya que la verdad se deforma con el tiempo y es preferible tomar como verdad las primeras informaciones recogidas inmediatamente después de ocurridos los sucesos.

Por ello fueron limitadas las preguntas a algunas personas que ya habían sido interrogadas antes, sin más alcance que el de recibir la impresión directa del relato, pero no para obtener nuevos testimonios.

Así, pues, para la debida constancia y como base de los ra-



① Día 16 a 20 h
" 24 a 10 h
" 26 a 11 h
" 26 a 15 h

② " 23 a 20 h

③ " 24 a 5 h
" 24 a 12 h
" 26 a 17 h

④ " 23 a 20 h
" 23 a 23 h 33 m

⑤ " 24 a 22 h

⑥ " 24 a 23 h 30 m

Las fechas están referidas a Junio de 1945

Fig. 1.ª—Croquis de los terrenos afectados por los incendios espontáneos. La línea de trazos marca el límite de los mismos. Se consignan las fechas y horas de los incendios en cada lugar.

zonamientos que han de hacerse, se reproducen aquí las descripciones tomadas del informe del Ingeniero Sr. Rodríguez Navarro.

Referencia de los sucesos ocurridos en el término municipal de Laroya.

«Han tenido lugar en un valle alto al Norte de la divisoria de Sierra de Filabres, con cotas superiores a los 1.600 metros, en el que tiene su nacimiento el río Laroya, que va en dirección Sur-Norte, y al que afluye el barranco del Cerrajero, nacido en el mismo valle, y que va de Oeste a Este, recogiendo otros pequeños arroyos y vaguadas. Las laderas del expresado valle son relativamente suaves, pero el barranco del Cerrajero y la última parte del río Laroya forman profundas grietas con bordes escarpados.

»El terreno pertenece al estrato cristalino, que constituye el núcleo de la Sierra de Filabres, formado, en general, por potentes bancos de esquitos arcillosos, aunque casi en todas partes está recubierto de tierra vegetal procedente de la denudación del mismo terreno y que da lugar a bastante vegetación, e incluso arbolado, que dan un aspecto muy agradable y pintoresco al valle en cuestión.

»Hay corrimientos superficiales de tierras producidos por su carácter arcilloso y la acción erosiva de las aguas, y la uniformidad de la ormación geológica está rota por un pequeño crestón eruptivo de rocas basálticas con inclusiones de minerales oxidados y carbonatados de hierro.

»En el mencionado valle existen varios cortijos, de los cuales los de Buenavista, Yeguablanca, Herrería y el Prado están en la ladera Sur del valle y a orilla derecha del barranco del Cerrajero. Próximo a la orilla izquierda del río Laroya, y también al Norte del barranco del Cerrajero, está la Cortijada de Estella en la que se agrupan varias casas de labor de distintos vecinos, y muy próximos a la confluencia de los expresados río y barranco está la llamada Venta de Franco. Al Norte del barranco del Cerrajero existen otros cortijos que, de Oeste a Este, reciben los

nombres de Fuente del Saz, Pitango, Don Miguel Acosta, del Cerrajero y de Franco, situado al Norte de la Venta de su nombre. Al Oeste del cortijo de la Fuente del Saz, e intermedio entre el mismo y la divisoria de la Sierra de Filabres, está el afloramiento basáltico de que antes hemos hecho mención y que se conoce en la comarca con el nombre de «Piedras Negras».

»Los sucesos ocurridos en este valle, y de los cuales no hay referencia ninguna de que hayan tenido lugar con anterioridad en época alguna en esta región o zona, se dividen en dos etapas.

»La primera tuvo lugar el día 16 del mes de junio y se circunscribió al cortijo de Pitango, no dándosele importancia alguna hasta que tuvo lugar la segunda etapa, ocurrida desde el día 23 al 26 del mismo mes, que empezó el día 23 a las veinte horas en el cortijo de la Fuente del Saz; el 24 a las cinco en el cortijo de Don Miguel Acosta, y el mismo día 24, después de anochecer, en los cortijos del Cerrajero, Franco, Cortijada de la Estella, siguiendo el día 25 en el cortijo del Cerrajero y el 26 en los de Fuente del Saz y Pitango, terminando todo al anochecer del referido día 26, sin que hasta la fecha haya noticias de que hayan vuelto a reproducirse los sucesos.

»Lo ocurrido, con detalle, en cada uno de los cortijos mencionados es lo siguiente:

»CORTIJO DE PITANGO.—Dia 16, a las veinte (H. O.) Se prendió el delantal de una niña de cuatro años, con llamas; se le apagó, la acostaron y volvió a arder el delantal y la sábana. Luego, a los pocos minutos, entraron en otra habitación donde ardía paja de centeno. En seguida se pegó fuego en la cámara a un haz de esparto que ardía con llama. Se apagó, y casi en seguida se incendió algo de paja en el pajar, que apagaron sacando a la calle las cenizas, y casi en seguida volvió a arder intensamente destruyendo la techumbre. El 24, a las diez, se prendió el rastrojo a unos 20 metros al Noreste del cortijo. El 26 ardió trigo sin segar a unos cien metros al Norte, a las once. El mismo día, a las quince, el pesebre, otro, cámara, corral de ganado, chaqueta, silla, cuerda, hasta nueve sucesivamente. Ligero olor a azufre, llama blancuzca, humo azulado.

»CORTIJO DE LA FUENTE DEL SAZ.—El 23, a las veinte, se quemó en la era hacinas de cebada y centeno sin que

hubiera nadie, y se quemó gran cantidad. Se apagó y volvió a prenderse por la punta opuesta. Después se prendió a las ropas de una cama, a otros dos haces de cebada separados de los otros, y a más de un metro uno de otro. Después, en el pajar, unas colleras y mosqueros de esparto. Luego, en la casa cortijo, con la puerta cerrada, otra cama. No han visto el principio de ninguno, y dicen que no pueden ser chispas de unos a otros. El 25 ardió, a las doce, trigo sin segar. El 26 lo mismo, a igual hora.

»CORTIJO DE DON MIGUEL ACOSTA.—El 24, a las cinco, (H. O.), se prendió centeno amontonado en la era, 23 cargas, que se consumieron. Al mediodía se quemó otra hacina separada de la anterior. El dueño dice que la vió sin arder, y de pronto dió una llamarada por encima que, instantáneamente, se comunicó hacia abajo y prendió en la totalidad. A continuación, y en todo el resto de la tarde, hasta las diecinueve, pasaron sucesivamente en el cortijo quema de distintas cosas hasta unos 15 casos: albarda, silla colgada en la pared, escoba de esparto, colgada también, ropa encima de la artesa, llueca empollando, etcétera, en habitaciones distintas. El 26, dos haces de cebada. Al prender la hacina, llama blancuzca sin olor. Viento levante flojo. Mucho calor. Nubes estratos Suroeste.

»CORTIJO DEL CERRAJERO.—Día 24, a las veintidós horas. Viento levante flojo. Se quemó esparto en una estaca. A los dos minutos lana en una jarapa en el suelo. Un minuto después, en la leña, a la puerta del cortijo. Media hora después, en la hacina de trigo, en la era, se encendieron *de pronto* cuatro o cinco haces de trigo, todo como si se encendiera un encendedor. El día 24, a las dieciséis, y hasta las veintidós, hubieron más de 20 casos pequeños, y, además, la hacina de centeno, que tendría 20 fanegas. El cabo de la Guardia civil la vió sin arder, y, de pronto, en tres segundos, ardió por entero, con llama roja y un humo espeso azulado. E 26, nada. Nube blanca en las piedras negras, con ramalazos.

»CORTIJO DE ESTELLA.—Día 23, al atardecer, en el cortijo de Jesús Martínez Morales se prendió fuego en el estiércol y en el techo de la cuadra luego, en una cama, y después en la despensa; se prendió fuego al cordel que sostenía una caña con embutidos. En el cortijo de Alfredo Rubio Sola, el 23, a las vein-

titrés treinta horas, se acostó su mujer en una manta, tapándose con un mantón, y le avisaron los demás vecinos que estaba ardiendo por los pies.

»CORTIJO DE FRANCO.—Día 24, a las veintitrés treinta. De dos eras que tienen, se prendió en la más alta dos haces que sofocaron en seguida. Después, en una tapia del corral, se quemó leña. En seguida, en el interior del edificio, en la cocina, se quemaron los papeles de los vasares y de una alacena, ésta con la puerta cerrada. De ahí pasó a una cama, en el dormitorio contiguo, donde se quemó parte del colchón y la jarapa. Un cuarto de hora después se reprodujo el fuego en la tapia, al mismo tiempo atacó las lentejas que había en la era. El cabo de la Guardia civil vió arder las lentejas, observando una llamarada en un extremo que venía como de arriba, de unos dos o tres metros, que llegó al suelo con un color rojo muy vivo, y al llegar a él se extendió como un par de metros cuadrados, prendiendo a las lentejas que se apagaron seguidamente. Luego nada más. Olor como a pólvora quemada en la paja del trigo y como a azufre en las lentejas. Humo azulado y claro.

»El día 16 hubo llovizna. Del 23 al 25 seco, sin viento y mucho calor. El 26, de madrugada, una ligera lluvia (gotas). El 26, calor mediodía.

»Analizando los sucesos anteriores, y si no hubiera tenido lugar la segunda etapa, y nos circunscribiéramos a lo ocurrido el día 16 en el cortijo de Pitango, podía pensarse que el origen del incendio podía haber sido producido por una niña de corta edad que está en la cocina del cortijo, en la que, en la chimenea, existe un fuego, o por lo menos un rescoldo, que pueda dar lugar a que se quemen sus ropas e incluso a que propague otros pequeños focos que luego dan lugar al resto de los conatos de incendio, e incluso al incendio mismo por el que desapareció totalmente la cubierta del pajar, conforme hemos indicado. Sin embargo, como en la segunda etapa se presentan con caracteres análogos los mismos conatos de incendio sin que haya mediado circunstancia alguna que aparentemente pueda provocarlo, cabe el relacionar la primera con la segunda.

»La Comisión encargada por el excelentísimo señor Gobernador civil de este estudio el día 27, hizo el viaje desde Almería

este mismo día, dedicando todo el 28, desde su madrugada hasta bien entrada la noche, a hacer la investigación y reconocimiento que se le habían encomendado, pero, afortunadamente, para las pobres gentes afectadas por el suceso, éste no se ha repetido desde la noche del 26, por lo que las observaciones proyectadas no pudieron llegar a efectuarse, ya que habían variado las condiciones climatológicas según referencias de los mismos vecinos y de la Guardia civil que, desde los primeros momentos, acudió al lugar del suceso, así como de las autoridades del pueblo de Laroya.

»Del reconocimiento efectuado y de la información recogida, puede deducirse que los sucesos no han sido originados por actividad volcánica reciente, ni por trastornos geológicos que hayan dado lugar al desprendimiento de materias en ignición, ni gases inflamables, y como tampoco la constitución mineralógica del terreno puede dar lugar a desprendimiento de gases ni materias bituminosas fácilmente inflamables, resulta que el origen de los incendios producidos no se halla en manifestaciones internas ni de la superficie del terreno.

»Tampoco es comparable lo ocurrido en este valle a lo sucedido en Almería y sus alrededores, según referencias de Prensa, en el año 1741, pues, por la descripción hecha, parece indicar que el origen de los incendios producidos en Almería pudo ser debido a una lluvia de cenizas procedentes, tal vez, de los volcanes italianos y que, empujadas por un viento favorable, o sea del Este, llegaron hasta Almería, chocaron en Sierra de Gádor y cayeron cerca de la población, conservando su energía calorífica debido a la escasa conductibilidad de las lavas y produciendo los incendios al fragmentarse las mismas en su choque en el suelo. Nada de esto parece haber ocurrido en Laroya, primero, porque sería absurdo suponer una nube cuyos efectos se circunscribieran a una zona tan reducida, que sólo tiene dos kilómetros en dirección Este-Oeste, por uno, aproximadamente, en dirección Norte-Sur, y que esta nube tuviera el capricho de no producir daños en ningún otro lugar, volviendo con intervalos de tiempo a ensañarse sobre la misma zona. Esta hipótesis, por tanto, hay que desecharla.

»Tampoco cabe achacar la causa a fenómenos eléctricos. Es cierto que la superficie afectada constituye un terreno alto, en

días de gran sequía y calor, circunstancias que favorecen la ionización de la atmósfera y el aumento de potencial eléctrico; también parece fuera de duda que no existían nubes tormentosas de carácter ascendente, productoras de grandes perturbaciones en las superficies equipotenciales y de gran aumento de la intensidad del campo terrestre. Es cierto que hablan las referencias de una nube blanquecina de bordes recortados hacia el Este, y continua y lechosa hacia el Oeste, que se situaba más allá de la divisoria, pero el aspecto de esta nube puede ser un estrato, así como de algunos fractocúmulos que algunos indican, no permite deducir grandes perturbaciones eléctricas, dándose, además, la circunstancia de que la nube no está situada en la vertical del lugar, sino bastante más a Poniente. Por otra parte, y aun suponiendo una verdadera perturbación eléctrica, ésta ejercería sus manifestaciones en las aristas y puntos altos de los edificios, en forma análoga al tan conocido «Fuego de San Telmo», que en noches tormentosas puede observarse en los sitios análogos y sobre todo en las puntas de los palos de los navíos, pero no es lógico suponer que sus manifestaciones se hicieran palpables, quemando sombreros, sillas, chaquetas y objetos de esparto colgados en estacas de madera en las paredes internas de los edificios.

»A efectos térmicos de radiaciones solares no es posible achacar los incendios ocurridos de madrugada y a la puesta del Sol. Tal vez hubiera podido justificar pequeñas combustiones espontáneas en las parvas hacinadas en las eras y que éstas, ardiendo en una atmósfera muy seca, y, según dicen, sin viento alguno, subieran sus cenizas y pavesas que, al descender en ignición prendieran en rastrojos, en otras parvas, y aun en objetos de fácil combustión en el interior de las habitaciones. Si sólo se hubiera tratado de un caso aislado se podría admitir esta justificación, pero la repetición a tan diferentes horas y en distintos días, hace temer que no pueda achacarse totalmente a esta causa.

»En resumen, no hay una causa definida a la que pueda achacarse todos los sucesos ocurridos y debe desecharse, desde el primer momento, toda sospecha de que hayan sido provocados por la mano del hombre, bastando para ello el considerar que se trata de una zona muy reducida en que todos los vecinos se co-

nocen y a todos, casi por igual, han llegado los perjuicios del suceso, produciéndoles un verdadero pánico y obligándoles a tener en la calle sus modestos ajuares y vituallas, como se pudo comprobar.

»Es de esperar que el suceso no tenga repetición, pero si la tuviera sería el momento de, a toda prisa, hacer investigaciones de carácter superior por los organismos competentes dedicados a estudios geológicos, de prospección, meteorológicos y geofísicos, que con mayor conocimiento de causa y con instrumentos adecuados, que en esta provincia no existen, podrían emitir hipótesis de gran valor científico y extraordinario interés. Almería, 30 de Junio de 1945.—José Rodríguez Navarro.»

La figura 1.ª representa un croquis del lugar en que se produjeron los incendios, indicándose también las fechas y horas de los mismos, con lo que se puede formar un juicio claro sobre las circunstancias de tiempo y lugar de los fenómenos cuya posible explicación va a intentarse.

Primer informe emitido después de la visita de inspección al lugar de los sucesos.

La visita realizada al lugar de los incendios y las mediciones allí practicadas, así como la impresión recogida de los testigos oculares confirmaron la primera opinión formada acerca de la causa de las combustiones espontáneas que en los lugares de referencia se venían produciendo, y, en su virtud, se emitió, en forma oficial, la opinión citada en escrito, que, copiado a la letra, dice así: «Presidencia del Gobierno.—Dirección General del Instituto Geográfico y Catastral.—Sección 1.ª. Número 15.—Servicio de Magnetismo y Electricidad Terrestres.—Efectuada la inspección de los terrenos del término de Laroya (Almería), que fué ordenada por el ilustrísimo señor Director general en escrito núm. 2.064 de la Sección 7.ª, el Ingeniero que suscribe tiene el honor de poner en el superior conocimiento de V. I. que, sin perjuicio de redactar el correspondiente informe, cuya redacción consumirá algún tiempo, y, sobre todo, con el fin de poder satisfacer la demanda de la autoridad regional que solicitó el estudio que se ha llevado a cabo y poner a los fenómenos geofísicos que en los terrenos citados se presentan, el remedio posible en cuanto a los peligros que entrañan, el Jefe que

suscribe cree que se trata de *fenómenos microceráunicos difusos en combinación con un grado de ozonización atmosférica algo elevado, así como calma y sequedad del aire y otras causas concomitantes que dan a los fenómenos carácter de completa eventualidad.* Todo en el supuesto de la completa veracidad de los hechos, que, desde luego, hay que admitir en gran parte de ellos.

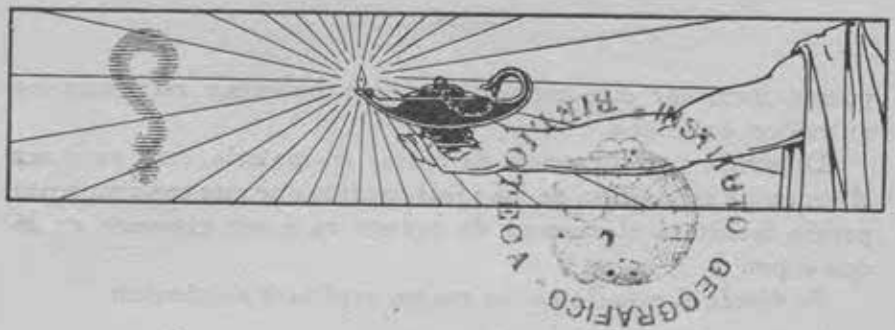
»En tales supuestos, el paliativo más sencillo, económico e inmediato que puede aconsejarse es *encender* y *mantener grandes hogueras que rodeen a conveniente distancia, los lugares más afectados durante las horas en que suelen presentarse los fenómenos,* guardando la debida vigilancia para que estas hogueras no puedan ser causantes de los daños que se pretende evitar.

»Todo lo cual tiene el honor de poner en conocimiento de V. I., cuya vida guarde Dios muchos años.—Madrid, 17 de julio de 1945.—El Ingeniero Jefe del Servicio.—José Cubillo.—Ilustrísimo señor Ingeniero Jefe de la Sección 1.ª»

Este informe fué transmitido seguidamente al excelentísimo señor Gobernador de Almería, quedando satisfecha la petición que motiva este trabajo.

Posteriormente se ha examinado el asunto con la amplitud necesaria y se ha formulado el estudio que figura a continuación, en el que se expresa la opinión del Ingeniero que suscribe acerca de unos fenómenos, que, aunque como se verá, pueden tener una explicación natural, no significan ningún nuevo aspecto de las fuerzas de la Naturaleza.

ESTUDIO SOBRE LA POSIBILIDAD DE COMBUSTIONES ESPONTÁNEAS EN LA ATMÓSFERA



ESTUDIO SOBRE LA POSIBILIDAD DE COMBUSTIONES ESPONTÁNEAS EN LA ATMÓSFERA

Felix qui potuit rerum cognoscere causas.—HORACIO

Preliminares y división del estudio.

CONFESAMOS sinceramente que si la casualidad no hubiese hecho que tuviéramos cierta costumbre de presenciar frecuentes combustiones espontáneas en la atmósfera y, en su consecuencia, también costumbre de meditar sobre ellas, no nos hubiera sido posible llegar a formular el presente estudio que solamente representa para nosotros una ampliación, a otros campos, de ideas poseídas hace mucho tiempo y expuestas oficialmente en el informe que fué emitido, en 1925, sobre el incendio del globo libre «General Vives», que tuvo lugar el 12 de junio de ese año, informe que mereció del excelentísimo señor General Jefe de la Sección de Aeronáutica del Ministerio de la Guerra, un elogio y felicitación que consta en la hoja de Servicios al Ejército del Ingeniero que suscribe.

Y no quiere decir esta cita que se trate de hacer una manifestación de vanidad, sino, como antes se dice, una confesión de la dificultad, tal vez insuperable para nosotros, que hubiese su-

puesto formular este estudio si no se hubieran realizado los anteriores análogos.

Digamos, por fin, antes de entrar en materia, cuál va a ser el orden de exposición de las ideas, puesto que este conocimiento previo facilitará el examen de cuanto va a ser expuesto en lo que sigue.

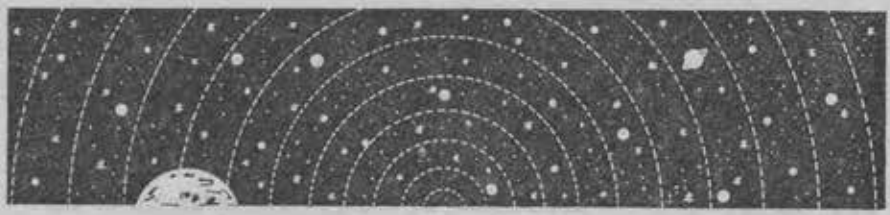
Se divide el estudio en los cuatro capítulos siguientes:

I. Un capítulo físico-químico.
II. La electricidad en la atmósfera.
III. Las combustiones espontáneas.
IV. Los fenómenos de Laroya.

La simple enunciación de estos títulos basta para justificar la necesidad de examinarlos.

Empecemos, pues, por exponer algunas ideas de Física y Química que van a ser necesarias después.

I. UN CAPITULO FISICO-QUIMICO



I. UN CAPITULO FÍSICO-QUÍMICO

El átomo, en su infinita pequeñez, encierra los secretos de la infinita grandeza.

Estudio de la combustión.

Como los fenómenos que han de explicarse consisten en *combustiones*, el primer análisis, el que debe preceder a todo, es el de la combustión; análisis que, aunque naturalmente figura en los tratados de Química, no debe omitirse aquí, porque prescindir de él sería dejar sin continuidad el hilo de nuestros razonamientos.

El concepto más general de *combustión* admitido actualmente es el que corresponde a considerar como tal cualquier reacción química en la que se desprende calor y luz; por ejemplo, la combustión del cobre en el vapor de azufre. En este fenómeno, los dos cuerpos que intervienen reciben nombres diferentes, pues, en el caso citado, el cobre, cuya llama es la rodeada por el azufre, es el *combustible*, y el vapor de azufre, en cuyo seno arde el cobre, es el *comburente;* pero, casi por antonomasia, se refiere el término combustión a la *oxidación* en el aire que presenta los caracteres señalados y, precisamente, las combustiones que aquí interesan son las de este tipo y, como en ellas es el oxígeno el *comburente*, es necesario empezar por recordar las propiedades químicas de tal gas.

*** * El oxígeno. * *** El oxígeno es el primer elemento en el sexto grupo del sistema periódico de Mendeleief y su átomo tiene (fig. 2.ª) ocho electrones fuera del núcleo, de los que *dos* están en la órbita *K*, que es completa como en el helio, y *seis* en la capa *L*, que es incompleta, faltándole los dos que figuran en el inerte gas

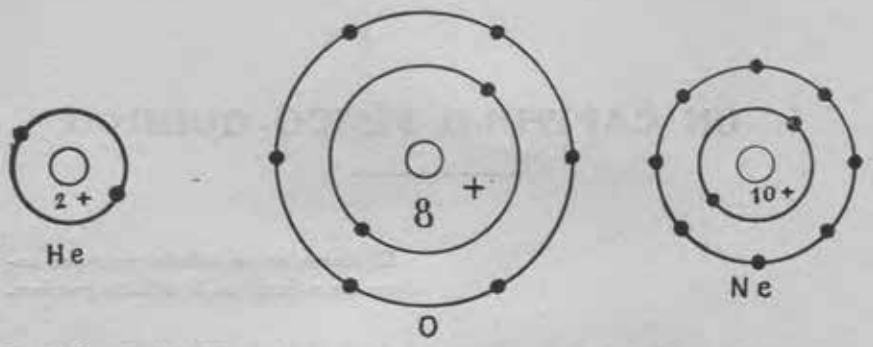


Fig. 2.ª—Constitución del átomo de oxígeno *O*. A un lado y otro los de helio, *He* y neón, *Ne*. Si al *O*, le faltase la capa exterior de electrones sería *He* y si se le añadiesen dos electrones a esa capa, sería *Ne*. En ambos casos resultan cuerpos químicamente inertes.

neón, falta a la que debe su actividad química. La constitución atómica del oxígeno, pues, es la de un cuerpo que tiene una actividad química y precisamente intensa.

Digamos, como complemento, que la órbita más externa de un átomo no puede contener más de ocho electrones, y que ese número representa la estabilidad completa de la capa, por lo que el cuerpo cuyo átomo está así constituído es *inerte* y no tiene actividad química alguna. Si el número de electrones de esta capa externa no es de ocho, el átomo tiene predisposición a ganar o perder electrones, como, por ejemplo, sucede en el grupo de los metales alcalinos: litio, sodio, potasio, etc., cuyo átomo, en su capa exterior, sólo tiene un electrón, y de aquí su gran actividad química por la facilidad con que pierde ese elemento atómico.

Las capas de electrones, por orden de interior a exterior, se denominan: *K, L, M, N, O, P*.

Tal constitución atómica supone el almacenamiento de una cantidad enorme de energía como consecuencia de la fuerza viva

representada por el movimiento orbital de los electrones y, para tener una idea de tal energía, se da el siguiente ejemplo: Una esferilla de bronce de tres milímetros de radio y de un gramo de peso girando con la velocidad tangencial ecuatorial de las partículas α del radio, o sea de 100.000 kilómetros, en el supuesto de que el metal tuviese rigidez bastante para soportar la fuerza centrífuga desarrollada, supone una fuerza viva de 203.873 millones de kilográmetros; trabajo bastante para hacer funcionar, durante una hora, 1.500 locomotoras. Si girase la misma esferilla con la velocidad ecuatorial de la luz, 300.000 kilómetros, o de las partículas γ, su energía es la misma que la consumida en una hora por 13.500 locomotoras.

Las grandes velocidades de rotación son las que dan estabilidad al átomo, como enseña la Mecánica en la teoría del giróscopo y confirma el ejemplo vulgar del peón; pero también resulta que, siendo dinámica la estabilidad, si uno de los elementos componentes se detiene o salta, el edificio se derrumba con estrépito y pone libre la enormidad de energía que tiene en sí almacenada.

Así, pues, el átomo, tal como se concibe hoy, representa un minúsculo sistema solar de acuerdo con la visión de Pascal, cuando en sus célebres «Pensamientos» profetizaba la mayor de las maravillas de la Física moderna, al decir: «veo en los átomos una infinidad de universos, con su firmamento, sus planetas, sus tierras en la misma proporción que en el mundo visible, en esta Tierra de los hombres, de los animales y también de las cresas.....» (1).

Esta comparación llega muy adentro, porque hasta los electrones, los que hacen el papel de planetas, mientras recorren las órbitas atómicas, están dotados de *spin*, es decir, de movimiento giratorio sobre sí mismos. La imaginación del hombre, su poder creador de hipótesis, que es tanto como decir de medios para convertir en cosas reales lo que es desconocido, casi se detiene del todo al llegar al electrón, pues de su estructura íntima apenas si se atreve a decir que es *un torbellino de éter* comparable a un giróscopo. Pero esto no quiere decir nada, porque hasta po-

(1) Las pequeñas larvas de los insectos del queso.

dría ser el electrón otra nueva miniatura increíble de sistema solar, ya que en la infinidad del Cosmos lo grande y lo pequeño sólo tienen valor relativo.

Pero veamos ahora la molécula de oxígeno. Corresponde a la fórmula O_2, es decir, es del tipo de molécula biatómica o compuesta de dos átomos, como es el caso en la mayoría de los cuerpos, y en ella estos dos átomos están unidos por *dos pares* de electrones, formando una unión *no - polar* que corresponde a una molécula que *no puede ser activa*. La figura 3.ª representa el esquema estático de Lewis, de dos átomos de oxígeno que, uno con el par de electrones *a a*, y otro, con el *b b*, se yuxtaponen y forman la molécula de doblete denominada también *homopolar o covalente*, formando un conjunto de gran estabilidad; tanto, que *se puede afirmar que la molécula del oxígeno es inactiva*. Esta es una de las maravillas de la Creación: el oxígeno puede combinarse con la inmensa mayoría de los cuerpos; pero, *en su estado normal no entra en combinación con ninguno:* si entra es en forma tan lenta que no ocasiona reacciones intensas, es decir, vivimos en el seno de un comburente enérgico que es, en realidad, «el león en reposo», como se le dice en Química; hay que excitarle para que «se irrite» y entre en combinación violenta. Así, el sodio en frío apenas si se modifica de modo sensible al aire; en cambio, calentándole, se produce una reacción viva que, elevando más su temperatura, le hace arder con llama amarilla. En el caso del potasio, como más activo que el sodio que es, no basta

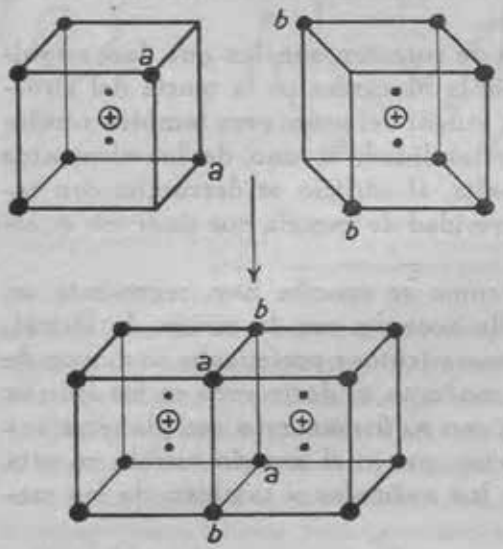


Fig. 3.ª — La molécula de oxígeno en esquema estático de Lewis; los dos átomos neutralizan sus afinidades en la molécula, que es inactiva.

conservarle preservándole del aire en vasijas cerradas, sino que hay que conservarle con hidrocarburos exentos totalmente de humedad, pues expuesto el potasio al aire, en pocos segundos se empaña con una capa de óxido, y con menor calentamiento que el sodio, entra en combinación produciendo el tetróxido al arder con llama de color violeta. Pero en el agua, la combinación del sodio y el potasio con el oxígeno es con inflamación; si se trata de potasio, siempre; pero si es el caso del sodio, ocurre la inflamación cuando no se le deja mover, porque si se le deja libre, el trozo de sodio corre por la superficie del agua sin inflamarse.

En todo caso, cuando se exponen estos metales al aire habiendo estado protegidos por un líquido inerte, su actividad no se manifiesta sino con un cierto retraso; hasta que se evapora o desaparece el agente protector; retraso que, como es lógico, es sumamente variable, y no depende de la actividad del oxígeno sino de la desaparición de la protección del metal.

Consecuencia necesaria de esta inactividad química del oxígeno molecular es que lo más que ocurre en el aire es una combustión lenta u oxidación, es decir, lo que se denomina una *eremacausia*, y así pueden estar en el aire sin arder las materias más combustibles, como son: el papel, la madera, la gasolina, etcétera. Para que entre el oxígeno en combinación es necesario producir una excitación, una agitación molecular que, rompiendo los enlaces de la molécula haga que el gas se encuentre en *estado atómico* o, como antes se decía, en estado de *oxígeno naciente*, dispuesto a emplear, con la materia más apta que tenga a su lado, toda la actividad química de que es capaz. Así, una elevación de temperatura, que es la agitación molecular más fácil de producir por el simple acercamiento de una cerilla, inicia la reacción que luego progresa gracias al propio calor producido.

La temperatura que es necesario comunicar a un cuerpo para que entre en combinación con el oxígeno del aire, es lo que se llama su «punto de inflamación». Por ejemplo: el fósforo blanco tiene un punto de inflamación de 280°; los compuestos usados en los fósforos usuales, requieren 60°, temperatura que es necesario admitir que se produce, aunque en un espacio muy reducido, al frotar una cerilla. El hidrógeno exige 580°.

Cuando de ese modo el oxígeno entra en reacción, sus átomos

se completan ganando dos electrones y se cargan negativamente, es decir, funciona el oxígeno con valencia dos de carácter negativo.

*** * La llama. * *** Es interesante también recordar la constitución del fenómeno característico de la combustión que es el denominado *llama*, que solamente aparece en la combustión de las sustancias gaseosas o de las que pueden tomar ese estado. Está formada por los gases y vapores producidos en la combustión que han llegado a ser incandescentes. Así, el hierro, por ejemplo, y otros cuerpos que ni se volatilizan ni dan productos volátiles a su temperatura de incandescencia, se queman sin llama; otros, en cambio, la dan muy viva, y otros apenas luminosa. El hidrógeno, el sulfhídrico, entre los gases, arden; así como el azufre, el fósforo, el cinc entre los sólidos. Los cuerpos simples dan llama *homogénea*, pero, en cambio, es *heterogénea* la llama de los compuestos, y como ejemplo de estas últimas, que son las más frecuentes, se puede citar la del gas del alumbrado o la de una bujía esteárica (fig. 4.ª).

Fig. 4.ª — La manifestación ordinaria de una combustión: la llama. La zona *a*, o núcleo, es oscura por falta de oxígeno; la *bb'* es brillante por arder en ella gases como el hidrógeno; la zona *ee'* es muy ténue, coloreada de amarillo y con la mayor temperatura; la zona *dd'* es azul porque en ella se queman el óxido de carbono y el metano.

El ácido esteárico, que asciende por capilaridad y se descompone por el calor, da lugar a carbono, carburos de hidrógeno y óxido de carbono, y todos estos cuerpos no pueden arder en la zona oscura *a* o núcleo de la llama por falta de oxígeno, siendo también poco elevada la temperatura de esta zona de la llama. La zona *bb'* es brillante y de mayor temperatura, como corresponde al hecho de que ahí empieza la combustión de los gases, comenzando por la del hidrógeno, siendo debido el brillo de esta parte al carbono que se pone incandescente. Por fin, rodea a todo una cubierta muy tenue, apenas coloreada y, precisamente, de amarillo en la parte superior *cc'* y de azul en la inferior *dd'*; cubierta que es en donde reina la mayor temperatura porque en ella la combustión es completa, tanto del

hidrógeno como del carbono que están ahora en contacto directo con el oxígeno del aire y por eso mismo su brillo es escaso; en la zona inferior *dd'*, que es azulada, se queman el óxido de carbono y el metano, que son los primeros productos procedentes de la descomposición del ácido esteárico.

Las llamas producidas por la combustión general de las sustancias orgánicas combustibles no difieren esencialmente de la descrita.

El poder iluminante de una llama es muy diferente, según el caso, pues depende de que contenga o no partículas sólidas incandescentes y por eso iluminan poco las homogéneas, como las del hidrógeno y del alcohol, y, en cambio, se consigue aumentar su poder iluminante introduciendo en ellas cuerpos sólidos que se pongan incandescentes, como alambre de platino, cal (luz Drummod) o tierras raras, que son las que contienen los mecheros Auer, etc.

Otras propiedades muy notables de la llama son las que presenta desde el punto de vista eléctrico, y de ellas se hablará oportunamente.

*** * Catálisis. * *** Pero no solamente es la temperatura la causa de agitación molecular que puede provocar la combustión: otras muchas causas pueden también determinarla. Entre ellas está la acción de presencia de ciertos agentes; lo que se denomina *catálisis*.

Se entiende por tal la acción de ciertas sustancias que consiste en *aumentar la velocidad de una reacción*.

En el caso de que se trata, como la diferencia entre la simple oxidación y una combustión es principalmente cuestión de velocidad, una acción catalítica puede transformar una oxidación en combustión intensa.

Las acciones catalíticas son diversas, y solamente se mencionarán las que interesan a nuestro objeto, no dejando, sin embargo, de indicar que el asunto está hoy de completa actualidad por ser la base de la Química técnica aplicada a la fabricación industrial por síntesis de los productos de gran consumo.

Acción catalítica de contacto.—Como ejemplo de esta acción se puede citar la reacción entre el oxígeno y el hidrógeno a

la temperatura ordinaria, pues es un hecho que se acelera por la presencia del platino en estado de esponja.

En este fenómeno, las fuerzas que actúan son las que se manifiestan en las llamadas *acciones de contacto*, ya que la esponja de platino, por su constitución, presenta una superficie enorme y las fuerzas de atracción molecular determinan el fenómeno llamado *adsorción*, que provoca la disociación molecular de los cuerpos en presencia, que entonces pasan al estado atómico y se combinan enérgicamente dando lugar al agua. Digamos de pasada que la molécula del agua es dipolar, según representa la figura 5.ª, que manifiesta una constitución molecular covalente muy enérgica, pues los dos hidrógenos toman el estado de helio y el resto forma el oxígeno neutro con los dos polos marcados en la figura. Consecuencia de esto es, entre otras de las propiedades del agua, su gran constante dieléctrica que alcanza el valor de 81, como también sus propiedades electrolíticas.

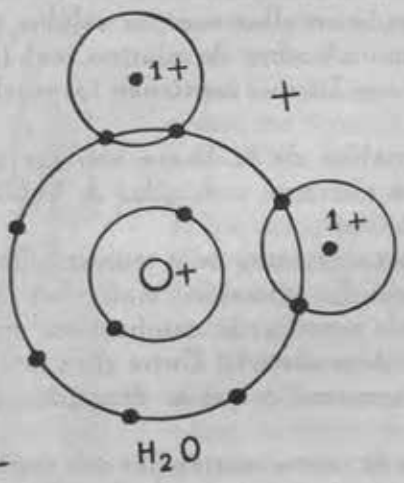


Fig 5.ª—La molécula bipolar del agua, de acción muy enérgica en las manifestaciones electrolíticas.

Permítasenos aquí una reflexión que la imagen de la vida de los astros nos sugiere. El producto de la combustión del hidrógeno es el agua; el agua ocupa en la Tierra los tres cuartos de su superficie; es enorme la cantidad de agua que hay en nuestro planeta.

Pues bien, este agua es el testimonio palpable y fehaciente de que hubo llamaradas de hidrógeno que envolverían a la Tierra primitiva cuando estaba incandescente y, por lo menos, a 3.000°, que es la temperatura de la combustión de ese gas: y el agua ¡apaga el fuego! y, sin embargo, el fuego primitivo y los Océanos de hoy son ¡la misma cosa! ¡Maravilla de la Creación!

Pero, siguiendo con la catálisis, digamos que no hay que ir

muy lejos para encontrar acciones catalíticas de contacto: no hay más que mirar el interior del cuerpo humano.

Imagínese un tejido finísimo de 20 metros de longitud por 10 metros de ancho y perfórese con 50 millones de pequeñísimos orificios: después, córtese en dos pedazos iguales y pliéguense convenientemente hasta que, formando dos paquetes, quepan en la cavidad torácica de un adulto (fig. 6.ª). Se habrá formado su

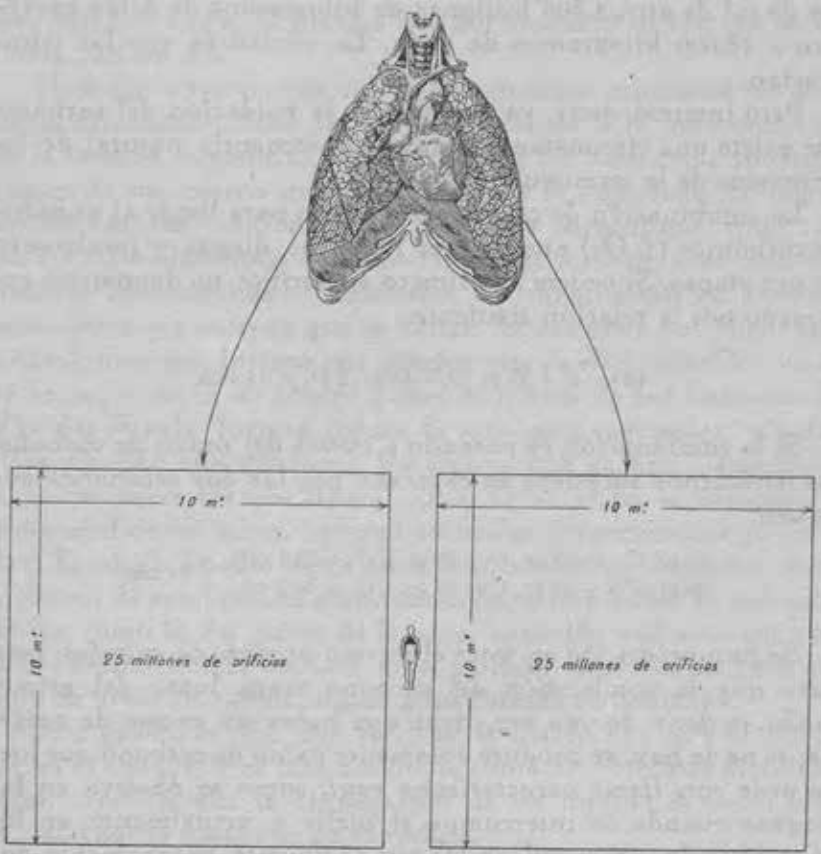


Fig. 6.ª—El aparato respiratorio de un adulto: 200 m² de tejido, con 50 millones de orificios, redoblados hasta reducirse al tamaño de la caja torácica. Por estar dividido el oxígeno del aire a través de tan sutiles agujeros se combina, haciéndole arder, con el carbono de la sangre y los 80 kilogramos de carbón que, en un año, se queman en los pulmones de un ser humano, mantienen la temperatura de su cuerpo.

aparato respiratorio. Por los pequeñísimos orificios no puede pasar la sangre, pero sí el oxígeno del aire que, por *adsorción*

y contacto, toma el estado atómico, y así entra en combinación con el carbono y el hierro de la sangre, sosteniendo una combustión a 37° que proporciona al ser viviente las tres cuartas partes del alimento que necesita para mantener su vida.

De este modo, un adulto quema al año 80 kilogramos de carbono, y en un día, los insaciables pulmones de la Humanidad, hacen pasar a través de sus aparatos respiratorios 12.000 millones de m^3 de aire, 1.300 millones de kilogramos de ácido carbónico y 18.000 kilogramos de agua. La verdad es que las cifras asustan.

Pero interesa decir, ya que se cita la oxidación del carbono, que existe una circunstancia que es consecuencia natural de los principios de la termoquímica.

La combinación de carbono y oxígeno para llegar al anhídrido carbónico (CO_2) puede tener lugar, ya directa y totalmente, ya por etapas. Si ocurre lo primero se verifica un fenómeno expresado por la relación siguiente:

$$12 \text{ gr. } C + 32 \text{ gr. } O = 44 \text{ gr. } CO_2 + 94 \text{ cals.}$$

Si la combinación es pasando a través del óxido de carbono, los fenómenos sucesivos se expresan por las dos relaciones que siguen:

$$\left.\begin{array}{l} 12 \text{ gr. } C + 16 \text{ gr. } O = 28 \text{ gr. } CO + 25{,}8 \text{ cals.} \\ 28 \text{ gr. } CO + 16 \text{ gr. } O = 44 \text{ gr. } CO_2 + 68{,}2 \text{ cals.} \end{array}\right\} 94 \text{ cals.}$$

Se han producido en total el mismo número de calorías; pero para que la combustión del carbono tenga lugar del primer modo, es decir, de una vez, tiene que haber un exceso de oxígeno; si no le hay, se produce solamente óxido de carbono que luego arde con *llama característica azul*, como se observa en las fraguas cuando se interrumpe el fuelle y, actualmente, en los gasógenos de automóvil, en los que se procura, precisamente, que se produzca el gas inflamable sustitutivo del carburante, uno de cuyos componentes es el óxido de carbono.

Entre las maravillas de la Creación, figura esta otra: la adsorción pulmonar está dispuesta de modo que procura el oxígeno necesario para que el carbono de la sangre arda totalmente, pues

si no fuera así, la vida del organismo sería imposible; el óxido de carbono forma con la hemoglobina de la sangre un compuesto estable sobre el cual el oxígeno no tiene acción alguna, y como de ese modo no se podría efectuar la hematosis, la muerte sobrevendría inevitablemente si la combustión en los pulmones fuese por etapas.

Y volviendo al platino, el encendedor de los faroles de gas es una perla de negro de platino que *por contacto* determina la inflamación del gas.

Hay que advertir que no existen fuerzas especiales de contacto; esta acción tiene explicación análoga a la muy conocida de la tensión superficial de los líquidos; los elementos constituyentes de un cuerpo que están cerca de la superficie, no tienen satisfechas sus afinidades en todas las direcciones, como les ocurre a los elementos situados en el interior; entonces esas *afinidades* insatisfechas o *residuales*, se transforman en acciones sobre los otros cuerpos que se hallan en contacto con ellos, manifestándose así, fuerzas que pueden ser, ya electrostáticas, ya de valencia, es decir, de género químico, o bien de las llamadas de Van der Waals, fuerzas físicas de atracción molecular, y todas ellas son las que producen los efectos que se han llamado de contacto, entre los que figura, como se ha visto, la disociación molecular de los gases, con sus naturales consecuencias ya citadas. También figuran entre estos fenómenos los llamados pirofóricos o de combustión espontánea de ciertas materias pulverulentas, como la del polvo de la paja, conocido vulgarmente con la denominación de «tamo»; arde muchas veces por su gran estado de división que da origen a las fuerzas de contacto.

Bien sabido es que para facilitar la disolución de una materia en el agua, que es otra acción de contacto, conviene dividirla, como también que la evaporación de un líquido es tanto más rápida cuanto mayor es su superficie.

Estas acciones de contacto y adsorción pueden producir, pues, efectos insospechados cuando no se para mientes en ellas, y mucho más si se tiene en cuenta que la *adsorción va siempre acompañada de elevación de temperatura* que a veces es muy grande, como ocurre en el caso de la esponja de platino que hasta llega a la incandescencia, así como en otros que se citarán después.

Catálisis eléctrica. La chispa.—Parece innecesario citar el hecho de que la chispa eléctrica hace entrar los cuerpos en combinación, así como que tiene también el efecto contrario de deshacer una molécula compuesta. Y se comprende que sea así, porque la chispa supone la rotura de los enlaces moleculares que existen en las sustancias que son atravesadas por ella a causa de ser excesiva la tensión que en relación con el *desplazamiento* de electricidad sufren entonces los cuerpos, como explicaron los grandes físicos Faraday y Maxwell.

Pero siendo este fenómeno uno de los que han de servir de mayor fundamento a los razonamientos que aquí será necesario hacer, hay que recordar algunas de las particularidades que en él se presentan.

Algunas propiedades de la electricidad estática. Capacidad y constante dieléctrica.

Supóngase el caso sencillo de dos placas paralelas electrizadas entre las cuales está aire interpuesto. Si es V la diferencia de potencial entre ellas, en el aire interpuesto crea un campo eléctrico cuya intensidad es $G = \frac{V}{d}$ la cual es constante, o sea la misma en cualquier punto; por lo tanto, la caída de potencial puede representarse por una recta (fig. 7.ª). Pero si el aire es ionizado, entonces se presenta lo que se llama *efecto electrodo*, en virtud del cual la caída de potencial no es uniforme en la proximidad de las placas, sino que la gráfica toma la forma de la figura 8.ª, en la que se ve que se une tangencialmente a ellas, resultando que el gradiente, que es la pendiente

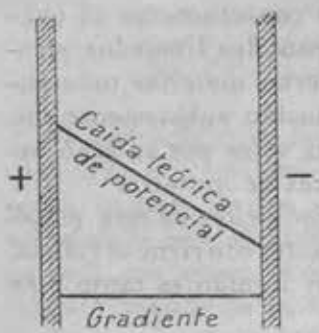


Fig. 7.ª—El campo eléctrico teórico entre las dos placas de un condensador: caída de potencial uniforme; gradiente constante.

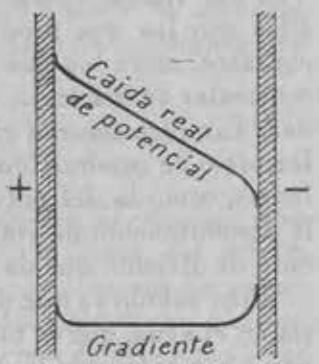


Fig. 8.ª—El campo eléctrico real entre dos placas, modificado el teórico por el efecto electrodo. Junto a las placas, la caída de potencial no es uniforme: el gradiente no es constante: es mayor en la placa negativa. (Caso de la superficie terrestre en la atmósfera.)

de esa gráfica, no es constante sino mayor en las proximidades de las placas, siendo más acusado este efecto en el cátodo, o placa negativa, que en el ánodo.

El primer hecho que viene a modificar el fenómeno en forma cuantitativa es el que resulta de suponer que el cuerpo aislador o *dieléctrico*, interpuesto en las placas, no sea el aire.

Para llegar a expresar este hecho es necesario introducir la idea de *capacidad*. Si es Q la cantidad de electricidad o carga eléctrica de un cuerpo, y es V el potencial a que se encuentra, la experiencia enseña que se verifica:

$$C = \frac{Q}{V},$$

y esa cantidad C, que es la relación constante entre la carga y el potencial, es lo que se denomina *capacidad* del sistema.

Si éste está constituído, como se ha supuesto, por dos placas paralelas, se demuestra que el valor de C es

$$C = \frac{S}{4\pi d},$$

siendo S la superficie de una placa, y d la distancia entre ambas.

Ahora bien: si el dieléctrico es diferente que el aire, hay que introducir un factor ε para expresar que entonces se verifica

$$C = \frac{S\varepsilon}{4\pi d},$$

o sea que la capacidad es ahora ε veces mayor que antes.

Esta cantidad ε es lo que se llama *constante dieléctrica o poder inductor específico* de la sustancia, siendo, no un simple factor de proporcionalidad, sino una cantidad que expresa una propiedad física del cuerpo relacionada con otras propiedades de él, tales como su elasticidad mecánica y su poder refringente, pues, como demostró Maxwell, se verifica la relación

$$\frac{1}{\varepsilon} = n^2,$$

siendo n el índice de refracción de la sustancia.

El valor de ε es sensiblemente 1 para todos los gases, como

para el aire, en condiciones normales; pero para los fenómenos que aquí se han de considerar hay que atender a que varía de unos a otros gases, como se verá después.

Es muy interesante hacer constar lo que sucede cuando el dieléctrico no es uniforme.

En efecto: si la intensidad del campo es $G = \frac{V}{d}$, en el caso de dieléctrico aire, se tendrá

$$\frac{V}{d} = \frac{4\pi Q}{S};$$

y cuando es otra sustancia de constante dieléctrica, ε valdrá,

$$\frac{V}{d} = \frac{4\pi Q}{S\varepsilon},$$

lo cual significa que, para la misma carga Q, el campo *se ha debilitado* y se ha hecho ε veces menor.

Si, pues, se supone el caso sencillo de que el dieléctrico está formado de dos sustancias laminares, como representa la figura 9.ª, la intensidad del campo en las dos sustancias es diferente y precisamente *mayor* en el cuerpo que tiene la *menor* constante dieléctrica.

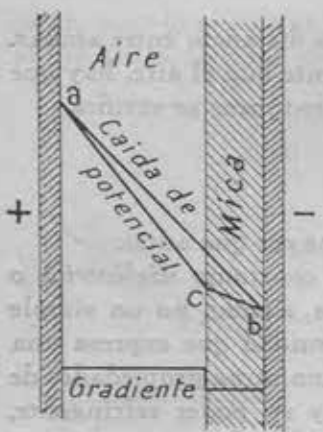


Fig. 9.ª—Campo eléctrico en un condensador con dieléctrico heterogéneo: es mayor el gradiente en el dieléctrico de menor poder aislador.

El desplazamiento de electricidad. La conocida experiencia de que de una botella de Leyden se pueden obtener varias chispas, ha conducido a la idea de que la energía reside en el dieléctrico, y, en su virtud, puede decirse que en la materia, que es sede de un campo eléctrico, pasa *algo* especial; sus moléculas no están lo mismo que cuando no está sometida al campo.

En efecto: el dieléctrico sufre lo que se llama una polarización; los electrones que constituyen las moléculas y átomos de la sustancia recorren órbitas deformadas;

todo tiende a ocurrir como sucede en los cuerpos conductores, en los que los electrones libres que contienen van saltando, de molécula en molécula, a la velocidad de la luz, hasta producir lo que se llama *corriente eléctrica*, que no es otra cosa que un torrente de electrones que van *del punto de menor potencial al de mayor potencial;* al contrario de la corriente flúida que suele emplearse para explicar la corriente eléctrica comparándola con una de agua. Así, lo que se llama un amperio, supone 6.10^{19} electrones por segundo; es decir, que ese número formidable de gránulos eléctricos, formando avalancha, se precipita de un extremo a otro del conductor a la enorme velocidad de la luz, pasando de elemento a elemento del cuerpo, en el sentido del menor al mayor potencial.

Pues bien, en el dieléctrico, lo que ocurre es lo siguiente: considerándole (fig. 10) compuesto de elementos separados por las líneas de fuerza *f*, y las equipotenciales *V*, el flúido eléctrico o electrones de un elemento, tal como el *I*, limitado por *a b d c*, *se desplaza* o experimenta un corrimiento para situarse en *a' b' d' c'*; este movimiento se llama *corriente dieléctrica* o de *desplazamiento*, para distinguirla de la anterior, o corriente de conductividad en los cuerpos buenos conductores, llamados también de primera categoría.

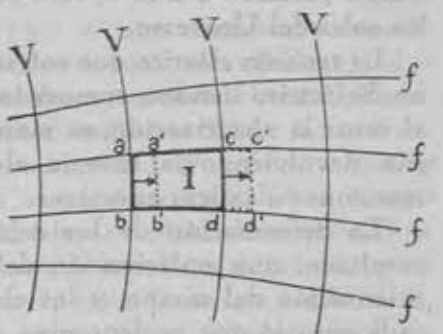


Fig. 10.—El desplazamiento de electricidad estática: el conjunto de electrones del espacio *a b d c* experimenta un corrimiento hasta *a' b' d' c'*, y los elementos materiales, soportes de los electrones, sufren una tensión, que es elástica, mientras no excede la acción de un cierto límite.

Maxwell demostró que la cantidad de electricidad desplazada en un dieléctrico es

$$\sigma = \frac{G\varepsilon}{4\pi},$$

que, como se ve, es tanto mayor cuanto mayor es la constante dieléctrica.

Así, pues, la diferencia entre el dieléctrico y el conductor se

halla en que, en el primero, en cuanto se produce el desplazamiento de la electricidad, aparecen *fuerzas reactivas*, que nacen de las acciones moleculares y atómicas, como si los elementos materiales sufriesen fuerzas que tendiesen a separarlos y ellos reaccionasen elásticamente; mientras que en los conductores no hay elasticidad, sino que la corriente de conducción experimenta solamente una resistencia análoga a una *viscosidad* que representa la energía gastada, en saltar los electrones, los intervalos entre los elementos constituyentes de la materia. Esta idea conduce al hecho, comprobado por la experiencia, de que a los 0°, Kelvin (— 273° C), en donde, según la teoría, habrán desaparecido esos intervalos, *la resistencia eléctrica es nula*, y los cuerpos toman el estado que se denomina de *superconductores*, en el cual *no ofrecen resistencia al paso de una corriente*. Un estado parecido a éste se verá después en la materia que forma los soles del Universo.

La tensión elástica que sufren los elementos de la materia de un dieléctrico tiende a romper los enlaces entre ellos, y es la que, al cesar la electrización, se manifiesta en forma de varias chispas, devolviendo la energía almacenada por medio de varias reacciones elásticas sucesivas.

La deformación de las órbitas electrónicas produce, como resultado, una polarización del dieléctrico en el sentido de la orientación del campo, y los elementos de la sustancia forman cada uno lo que se denomina un *dipolo*, a consecuencia de lo cual, la tensión en el dieléctrico por unidad de superficie normal al campo tiene un valor, según demuestra la teoría, expresado por

$$\tau = \frac{G^2 \varepsilon}{8\pi},$$

y admitiendo con Faraday que las líneas de fuerza no son solamente una imagen, sino la expresión de una realidad material, como si fuesen resortes tendidos, Maxwell demostró que las atracciones y repulsiones eléctricas quedaban explicadas suponiendo el espacio lleno de líneas elásticas sometidas a tales tensiones.

Se termina esta sucinta exposición sobre los dieléctricos con

el cuadro de los valores de ε para las sustancias que han de intervenir en este estudio:

Valores de ε para diversas sustancias, tomadas de la Physikalisch-Chemische Tabellen de Landolt-Börnstein, respecto al vacío:

Aceite de engrase	2,11
Aceite de oliva	3,11
Celulosa seca	6,70
Madera	5,00
Aire	1,000576
Hidrógeno	1,000273
Ácido carbónico	1,000746
Vapor de agua	1,00700
Amoníaco	1,00718
Octano líquido	2,6
Octano vapor	1,00232

Observación: El valor de ε para el aire disminuye cuando contiene agua en estado de emulsión; es decir, con niebla, el valor de ε es menor que sin ella, faltando experiencias cuantitativas.

Efluvio eléctrico.—La tensión eléctrica en el aire junto a un conductor, tiene un valor expresado por $2\pi\sigma^2$, es decir, que es proporcional al cuadrado de la carga superficial. Si el cuerpo tiene una punta o terminación aguda, la densidad superficial va creciendo sin límites y, por lo tanto, la tensión mucho más, y de seguir así resultaría que la fuerza eléctrica llegaría a ser infinita. Si el aire o medio que rodea el cuerpo fuese aislador absoluto, ese resultado se alcanzaría efectivamente; pero en la realidad no ocurre así: cuando la fuerza ha alcanzado un cierto valor, el medio no aisla suficientemente y se hace conductor en el espacio que rodea la punta y, si a cierta distancia de ésta, la fuerza eléctrica ya no es suficiente, la corriente de electrones se detiene y la electricidad se acumula en ese espacio que, en cierto modo, viene a ser una prolongación del cuerpo electrizado. Pero si esa porción de aire o del medio ambiente pudiese ser mantenida en reposo, el estado de cosas creado se mantendría. No es así en la realidad, porque las moléculas de aire electrizadas, libres de moverse bajo la acción de las fuerzas eléctricas, se alejan del cuerpo electrizado, y cuando se han movido son reemplazadas por otras, y así sucesivamente mientras en el cuerpo hay carga eléctrica.

Resulta así que en la punta hay un *efluvio de electrones*, de carácter permanente, que origina lo que se llama el *viento eléctrico*, sensible a la mano, y confirmado por la conocida experiencia del molinete eléctrico (fig. 11), puesto en movimiento por igual causa que el molinete hidráulico.

El efluvio eléctrico es, pues, un torrente oscuro de electrones que se produce en un espacio de aire u otro medio sometido a una tensión elevada.

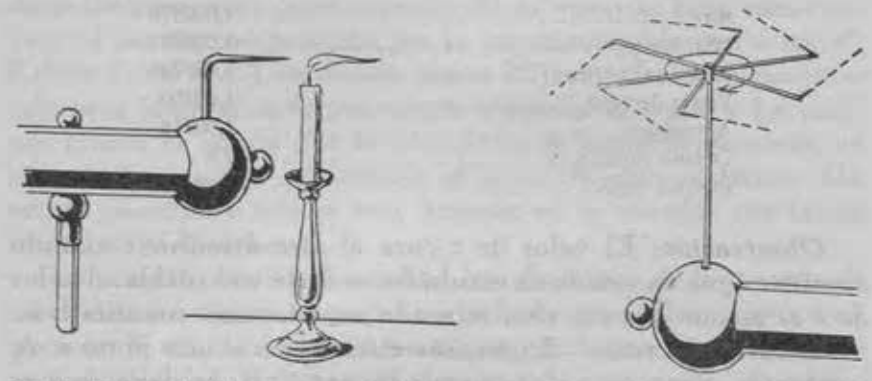


Fig. 11.—El escape de electrones por acumulación en las puntas. El viento eléctrico deforma la llama. La inercia hace mover el molinete eléctrico.

Estos efluvios eléctricos producen luz invisible, o sea rayos ultravioleta que alcanzan a la distancia de cinco metros, como se ha demostrado exponiendo a esta distancia de un efluvio el platino-cianuro de bario y viendo que se hace luminoso.

También hay producción de ondas hertzianas de dos milímetros de longitud de onda, por lo que su alcance es muy pequeño; tan sólo de 40 a 50 cm.; comprendiéndose por los datos aportados que tales investigaciones han sido difíciles de llevar a cabo, pero han podido hacerse en forma que no dejan lugar a la menor duda sobre la realidad de los hechos.

No podemos pasar por alto la cita del efluvio luminoso que cualquiera puede ver sin más que, en un lugar oscuro, desarrollar bruscamente una cinta cauchotada de las empleadas para empalmes del flexible de las instalaciones eléctricas en edificios; es un caso de ionización al alcance de cualquiera. Lo mismo ocurre en el aire que sale de los orificios que dan las notas de una pianola.

Si el efluvio aumenta de intensidad, ya por aumentar la tensión, ya por acercar los electrodos cuando se hace una experiencia, ocurre que no está sólo formado por iones de un signo, sino que llega a establecerse la doble corriente con iones de signos contrarios, y entonces se producen varios efectos: el efluvio disminuye de anchura, o sea, que las acciones mutuas de los electrones de diverso signo concentran las líneas de fuerza, y, además, las ondas electromagnéticas excitadas en el éter son de mayor longitud de onda, y el efluvio se hace *visible* apareciendo luminoso.

Cuando la tensión aumenta se produce el fenómeno que a continuación se describe (fig. 12).

La chispa eléctrica.—Si la tensión es considerable, no en una zona como se ha descrito antes, sino en todo el espacio entre dos conductores, como es el caso de dos esferas cuya separación no es grande en relación a sus radios, la descarga de electrones llega a producirse tomando la forma de una chispa con luz y ruido característicos, mediante lo cual toda electrización desaparece totalmente. El dieléctrico *cede* a la tensión elástica debida al desplazamiento explicada antes, con ruptura de sus enlaces, y convierte en conductor a lo largo de una trayectoria que será la más corta entre los conductores cuando el campo y el dieléctrico sean uniformes.

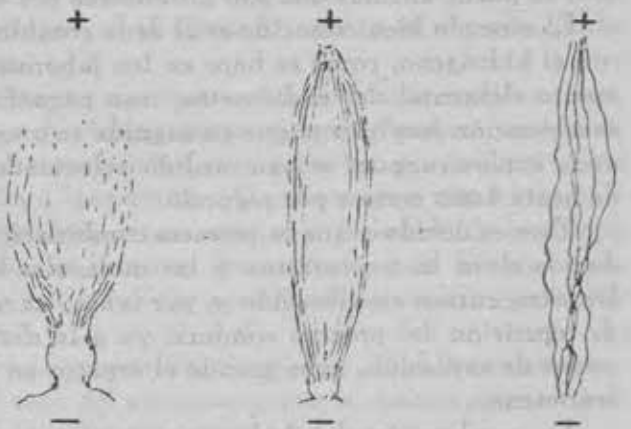


Fig. 12.—Las distintas fases de la descarga eléctrica: el efluvio luminoso o penacho de gran anchura, sólo constituído por electrones negativos; más delgado cuando hay doble corriente electrónica; por fin, la chispa, con rotura de la materia.

La tensión de la chispa, o *descarga disruptiva* como también se denomina, es variable con la sustancia que forma el dieléctrico;

para el aire se ha venido admitiendo la tensión de 30.000 V por centímetro, pero las últimas mediciones acusan el resultado de 23.800 V, cosa que no es de extrañar, porque una de las grandes dificultades de la electrometría es precisamente la medición de tensiones tan elevadas.

Efectos químicos de la chispa eléctrica. Se desprende claramente de lo expuesto que la chispa eléctrica es una causa de agitación molecular que explica perfectamente sus consecuencias químicas, es decir, que puede afirmarse aquí, sin temor al sofisma «post hoc, ergo propter hoc»: después de esto, luego por esto. En efecto, al saltar la chispa se ve que se producen combinaciones y descomposiciones químicas que verificándose a continuación se puede afirmar que son producidas por ella.

El ejemplo bien conocido es el de la combinación del oxígeno con el hidrógeno, como se hace en los laboratorios en el experimento elemental del eudiómetro; una pequeña chispa *inicia* la combinación localmente que en seguida se propaga en forma de onda explosiva, pues se han medido velocidades de propagación de hasta 3.000 metros por segundo.

Esto es debido a que la primera combinación localmente producida eleva la temperatura y las moléculas inmediatas, al calentarse, entran en vibración y, por tanto, en reacción, y la rápida repetición del proceso conduce, ya a la *detonación*, ya a las ondas de explosión, si es grande el espacio en que se produce el fenómeno.

La combustión del hidrógeno, junto con la del carbono, constituyen los pilares de la teoría de los combustibles, pues la base del calor producido por los cuerpos que arden es el que se origina en las combinaciones del hidrógeno y carbono con el oxígeno.

Estudiando por el espectroscopio la llama de un mechero de Bunsen se vió que aparecían bandas complejas cuya interpretación ha conducido a la explicación del modo de formarse el agua que es un tipo de las llamadas *reacciones de cadena*, en las cuales se confirma lo expuesto más arriba acerca de la *necesidad de existir los componentes en forma activa* antes de producirse el compuesto.

Así, en el caso del agua, los componentes activos son: O, H y HO, oxhidrilo, de modo que la teoría de la formación del agua o combustión del hidrógeno que hoy se acepta es la siguiente:

La reacción primaria es

$$H_2 + O_2 = 2\,OH - 11 \text{ cals.},$$

que completa los grupos activos H y O con el HO.

Después se forma la serie expresada por

$$OH + H_2 = H_2O + H + 12 \text{ cals.}$$
$$H + O_2 = HO_2 + 42 \text{ cals.}$$
$$HO_2 + H_2 = H_2O + OH + 62 \text{ cals.},$$

y este OH continúa el proceso en la misma forma.

La reacción definitiva deja libres 57 calorías si el agua queda en estado de vapor.

Todos los fenómenos con llama y explosión se explican como éste, con *reacciones de cadena*, las cuales terminan, o porque se consume una de las sustancias, o porque los grupos activos se unen por adsorción a las paredes del recinto, y se recombinan.

Otro ejemplo también característico de la acción de la chispa es el encendido de los motores de explosión, en los que una chispa de 0,4 mm. y 10.000 V de tensión determina la explosión del aire carburado.

Con igual eficacia se verifican acciones de descomposición, como ocurre en el caso del amoníaco, que se descompone en sus elementos N y H al saltar chispas en su seno.

Pero en los casos señalados la *causa catalítica es visible*, y hasta cierto punto familiar al hombre moderno.

Hay, sin embargo, otros modos no visibles de actuar la electricidad con efectos químicos explicables por el mismo mecanismo de agitación molecular que en el caso de la chispa; entre ellos figura el que se va a citar a continuación.

Acción química del efluvio oscuro.

El efecto del efluvio oscuro es característico en la producción de *ozono*. Este cuerpo, del que después se darán algunas indicaciones, se obtiene de un modo continuo haciendo pasar oxígeno o aire seco por un

doble tubo en el que se produce un efluvio o *descarga eléctrica oscura*, que se distingue de la verdadera chispa en que la corriente de electrones no llega a producir la ruptura del dieléctrico, sino que se limita a hacer que la electricidad pase a través del gas como pasa ordinariamente a través de un conductor de primera categoría o metálico. Los tubos Siemens, dispuestos con carácter industrial trabajan a 10.000 V y corriente alterna de más de 500 períodos.

Pero el fenómeno no es simple, porque las descargas oscuras, además de producir ozono, forman óxido nítrico que descompone el ozono formado, de modo que el rendimiento no pasa de 12 por 100 en volumen.

Este proceso es sumamente significativo y hace recapacitar en que, en efecto, el cuerpo humano, medio por el que el alma se pone en comunicación con el exterior, con el «Umwelt», o *mundo circundante* de Uexkühll, es como un arpa de dos cuerdas solamente; el nervio auditivo y el óptico; el primero no siente sino las vibraciones comprendidas entre 60 y 40.000 por segundo, el óptico entre 400 y 900 billones, en igual tiempo; de modo que nuestros sentidos no nos dan noticia más que de dos órdenes de fenómenos muy limitados, y a nuestro lado pueden estar sucediendo muchas cosas que *ni las oímos ni las vemos*, pero pasan. Y más, a veces *nuestras impresiones directas nos engañan*, pues vemos girar alrededor de nosotros al Sol, la Luna y las estrellas, y es falso; oímos una música armoniosa, y el aire no hace más que transportar ondulaciones que, en sí, son silenciosas.

Si se forma un cuadro de vibraciones en progresión geométrica se obtiene el conjunto siguiente, en el que se indica a cuál clase de fenómeno corresponde cada grupo.

Grados.		
1	2	
2	4	
3	8	
4	16	
5	32	
6	64	
7	128	
8	256	Sonido.

Grados.		
9	512	
10	1.024	
15	32.768	
20	1.048.576	Desconocido.
25	33.554.432	
30	1.073.741.824	Electricidad.
35	34.359.738.368	
40	1.099.511.627.776	Desconocido.
45	35.184.372.088.832	
48	281.474.976.710.656	
49	562.949.953.421.312	Luz.
50	1.125.890.906.842.624	
55	36.028.797.018.963.968	
56	72.057.594.037.927.936	Desconocido.
57	144.115.188.075.855.872	
58	288.230.376.151.711.744	
59	576.460.752.303.423.488	Rayos X.
60	1.152.921.504.606.846.976	
61	2.305.843.009.213.693.952	
62	4.611.686.018.427.387.904	Desconocido.
63	9.233.372.036.854.775.808	

Puede observarse que son muchas las escalas que pasarían desapercibidas para el hombre si no tuviese inteligencia y con ella hubiese ideado sentidos supletorios que le dan noticia de que tales hechos suceden y, aun así, hay todavía muchísimo desconocido.

El equilibrio, pues, será, ni caer en la incredulidad que hizo decir a los hombres ante el estrecho de Gibraltar, «Hic deficit orbis», ni tampoco en la credulidad de un Miguel Chasles, el conocido matemático, que se gastó la bonita suma de 140.000 francos, de los del siglo anterior, en adquirir 27.000 autógrafos, entre los que figuraban cartas de Pascal, de Newton, de Galileo, de Francisco I, y hasta de Carlomagno, que no sabía leer.

La prudencia debe ser quien presida el congreso de nuestros sentimientos, combinándola con la buena disposición de ánimo del modo que aconseja nuestro gran pensador Balmes, cuando dice: «Que la prudencia de la serpiente no destruya la candidez de la paloma.» Con prudencia, pues, es como se pretende hacer este estudio, que empieza tratando de tener presente todo aquello

que haya podido intervenir en los fenómenos cuya explicación se intenta.

Volviendo al tema, se dirá que, de lo expuesto, se deduce la posibilidad de afirmar que el ozono se forma por la previa disociación molecular del oxígeno producida por movimiento de iones *que no llegan a ser visibles;* después, la formación de ese estado alotrópico del oxígeno se explica porque, al ser muy grande la cantidad de oxígeno atómico formado, los átomos, en su ansia de combinación, llegan a disponerse en grupos de tres con arreglo a lo que se ve al tratar del ozono.

Otra acción del efluvio es la encontrada por Berthelot, quien comprobó que los *efluvios disocian el ácido carbónico* y producen óxido de carbono y oxígeno atómico que en seguida forma oxígeno molecular. También el efluvio fija el nitrógeno a los hidratos de carbono y todo confirma que hay muchos casos en que, aun siendo menor la agitación molecular producida por un efluvio que por la chispa, esa agitación es suficiente para determinar una reacción.

Otras acciones catalíticas. — Antes de terminar con este asunto, conviene citar, entre los agentes catalíticos, el agua.

Su papel, acelerando reacciones, está bien claro con su intervención en la descomposición de la materia orgánica, pues, aunque esta descomposición es principalmente una oxidación promovida por bacterias, no se verifica sino en presencia del agua, que desempeña así el papel de catalizador.

Lo mismo puede decirse de las reacciones entre muchos cuerpos, que son más rápidas cuando están disueltos que cuando se ponen en presencia en estado de sequedad; y todo ello queda explicado por la acción de ionización que produce el agua en los cuerpos disueltos, ionización que no es sino consecuencia de que la molécula del soluto es penetrada por la del agua y resulta descompuesta en iones. Otro caso de acción del agua es el del hidrógeno que se combina mejor con el oxígeno cuando hay humedad, y unas mínimas gotas de líquido o partículas de vapor facilitan la combinación.

El hierro no se oxida en el aire si éste está seco. Y todo ello parece probar que es cierta la opinión de Babor al creer que el vapor de agua *disocia la molécula de oxígeno* o, al menos, debi-

lita sus enlaces, y esos átomos procedentes de la disociación, o las moléculas debilitadas, son las que inician la reacción de oxidación que luego continúa por sí sola.

Esta acción catalítica del agua se manifiesta también en la respiración, pues la mucosa que tapiza el aparato respiratorio está siempre húmeda, y la sensación *incómoda* de respirar aire completamente seco es consecuencia de faltar la «ayuda catalítica» del vapor de agua en el proceso químico de la respiración.

El ozono.—Este cuerpo, sospechado desde 1785 por el olor característico en las máquinas eléctricas e identificado por Schönbein en 1840, quien le dió su nombre del griego ὄζω (engendro olor), es una forma alotrópica del oxígeno de fórmula O_3 que fué preparada completamente pura por primera vez por Riesenfeld en 1922.

La molécula del ozono es también no-polar y resulta de agregarse tres átomos de oxígeno de modo que se completen los dos electrones que les falta a cada uno, formando una molécula cerrada por el mecanismo que se ve en la figura 13. Al reaccionar el ozono la molécula se disocia de modo que, primeramente, salta un átomo y quedan otros dos unidos tan sólo por un par de electrones, los cuales acaban por unirse formando la molécula ordinaria de oxígeno; todo como indica la figura 14, que, como la anterior, representa esquemas estáticos de átomos y moléculas.

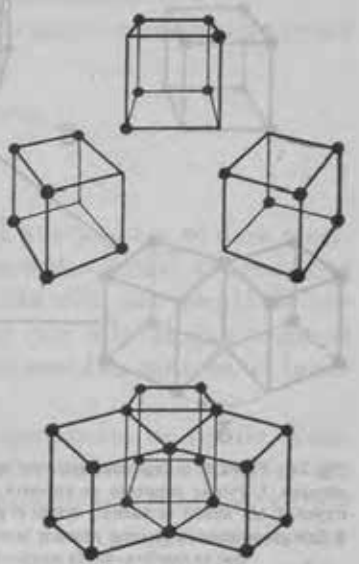


Fig. 13.—Tres átomos de oxígeno dispuestos a reunirse en la molécula triatómica de ozono.

La formación del ozono es endotérmica, absorbiendo 69 calorías según la fórmula

$$3\,O_2 = 2\,O_3 - 69 \text{ cals.},$$

y su percepción es siempre debida a su olor característico; algo así, como de azufre y fósforo fuertes.

Su color es azul, tanto en estado gaseoso como cuando está líquido, así como también es azul su disolución en sulfuro de carbono.

Cuando está puro es muy explosivo, como corresponde a su carácter termoquímico de marcada endotermia, por lo que si está solidificado basta rozar unos cristales con otros para que estalle.

Mezclas de oxígeno y ozono pueden ser explosivas por la acción de la chispa eléctrica.

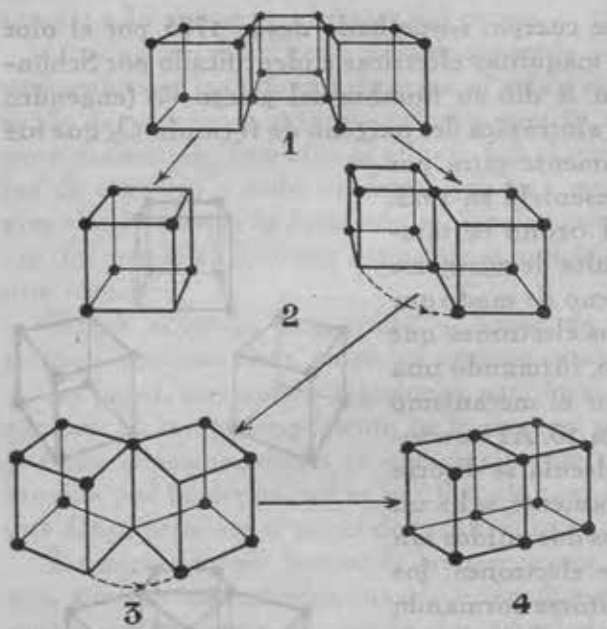


Fig. 14.—Fases de la descomposición del ozono en oxígeno molecular y atómico. 1. Primer momento de apertura de la molécula triatómica de ozono. 2. Un átomo se suelta y queda el grupo abierto de dos átomos. 3. Este grupo tiende a cerrarse y formar la molécula normal, de oxígeno, 4, que es inactiva: queda suelto el átomo liberado.

La descomposición del ozono es acelerada por la luz, como se prueba exponiendo a los rayos solares ozono e hidrógeno, que aunque no reaccionan en la oscuridad, lo hacen a la luz ultravioleta.

El ozono es un oxidante enérgico, como se desprende de cuanto se lleva dicho; tan oxidante es que haciendo llegar una corriente de ozono sobre algodón empapado en trementina, se enciende por el calor desprendido en la oxidación, más rápida ahora por añadirse los efectos de adsorción producidos por el algodón sobre la trementina que forma capa molecular.

La reacción usual del ozono sigue siendo la misma que ideó Schönbein en 1840, que es la separación del yodo contenido en

el yoduro potásico y coloración azul subsiguiente por su unión con el almidón; es decir,

$$O_3 + 2KI + H_2O = O_2 + 2KOH + I_2$$

y este I_2 produce, con el polisacárido almidón, el compuesto

$$I(C_6H_{10}O_5)_5$$

de intenso color azul, siendo tan sensible esta reacción que acusa cantidades de 1/500 de mgr. de yodo.

Respecto a la cantidad de ozono que causa esa reacción, puede decirse que ella empieza a ser sensible cuando el ozono está en la relación $1 : 10^5$ en volumen.

Sin embargo, para el ozono atmosférico es preferible el empleo del aldheido butílico, por su mayor sensibilidad.

La prueba con el yoduro potásico se hace impregnando papel en la mezcla formada por

1 de yoduro potásico.
10 » álmidón.
200 » agua.

En esa mezcla se embebe un papel adecuado y se deja secar, constituyendo el llamado *papel ozonoscópico*, con el que se hacen las pruebas. Se completa esa preparación con una escala de colores azules de modo que, al comparar con ella el que toma el papel de la prueba, se deduce la proporción de ozono en el lugar ensayado.

En la atmósfera existen pequeñas cantidades de ozono. Para formarse idea de la proporción en que se encuentra es el mejor medio reducir toda la atmósfera a homogénea y entonces su altura sería solamente de ocho kilómetros; pues, bien, de estos ocho kilómetros, tan sólo correspondería al ozono tres milímetros. Sin embargo, como la mayor parte de este ozono, el 80 por 100, se halla en los 50 kilómetros de altura, proporciona, según los cálculos de Gowan, una temperatura de 300° K (equivalentes a 27° C) en la altitud de 30 kilómetros, en armonía con los cálculos de Lindeman y Dobson sobre el estallido de los astrolitos; es decir, el ozono juega un papel importante en el régimen de temperatura de la

Tierra, pues al absorber la radiación ultrarroja o calorífica, impide la radiación de calor de la superficie terrestre al Universo, influyendo así poderosamente en los climas. Además, el ozono impide la acción mortífera de la radiación ultrapenetrante cósmica que, de otro modo, sería fatal para los seres que habitan la Tierra.

En las capas bajas, junto a la corteza terrestre, la proporción de ozono es tan sólo de 1.10^{-7} a 1.10^{-8} en volumen contra 1.10^{-6} a los 22 kilómetros de altura. No hay que decir que esta proporción es la media y que, circunstancialmente, puede ser mayor en parajes determinados.

Por fin, digamos que la radiación ultravioleta es la que principalmente determina la formación de ozono en las capas superiores de la atmósfera.

Otros cuerpos.—Como también intervienen, en los fenómenos que se van a explicar, otros cuerpos, entre ellos el amoníaco y la celulosa, conviene mencionar, al menos, algunas propiedades de esas sustancias.

Amoníaco.—La molécula del amoníaco, representada esquemáticamente en la figura 15, muestra una constitución polar parecida a la del agua, aunque con una intensidad menor, lo que explica la gran analogía de estos dos cuerpos en muchas de sus propiedades; el calor específico del amoníaco líquido es superior al del agua, caso casi insólito, pues es quizá el único cuerpo que presenta tal propiedad; en cambio, su constante dieléctrica en ese estado, es inferior a la del agua, pues solamente vale 22.

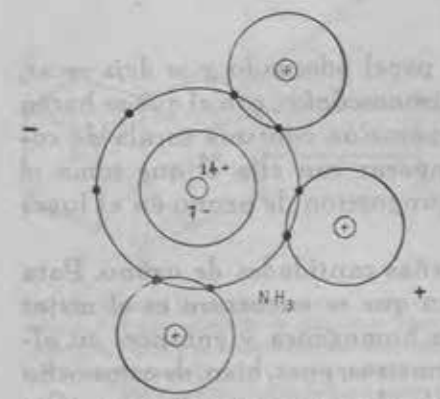


Fig. 15.—La constitución de la molécula del amoníaco. Es polar, como la del agua, pero de menos intensidad. Las propiedades electrolíticas son análogas.

El gran valor de su constante calorífica, cuando está líquido, es la causa de la aplicación del amoníaco para fabricar hielo, y por ello también sea tal vez el amoníaco el cuerpo que, en algún planeta más frío que la

Tierra, se dispute con el ácido carbónico el papel que el agua desempeña en la Tierra.

También el amoníaco líquido tiene, como disolvente, propiedades análogas a la del agua, pues los cuerpos disueltos en él están ionizados.

En su estado normal de gas se disuelve, como es sabido, en el agua, en grandes proporciones, pues tiene gran avidez por ella, circunstancia por la que se empleó para desocupar los pozos negros; pero lo que interesa decir aquí es que, en su disolución acuosa, se comporta como base débil, descomponiéndose en iones, según la ecuación de Kossel

$$NH_3 + H_2O^{\cdot} = NH_4^{\cdot} + H_2O,$$

en la que ha intervenido el ión hidroxonio $H_3O^{\cdot}$, producido en la disociación electrolítica del agua.

Con el aire forma mezclas explosivas cuando la riqueza en amoníaco oscila entre 16 a 25 por 100 en volumen.

Lo interesante es que las combinaciones del amoníaco con los ácidos dan lugar a *sales amónicas*, en las que el radical amonio $NH_4^{\cdot}$ ocupa el lugar de los iones metálicos alcalinos: potasio, sodio, etc. Esta identidad llega a que la movilidad del ión amonio es del orden de la del potasio, y mayor, por tanto, que la del sodio, según se verá después.

Las sales amoniacales desprenden con facilidad amoníaco, como sucede especialmente con el *fosfato amónico*.

A nuestro objeto es interesante citar que esta sal se emplea en los condensadores electrolíticos usados en la radiotelegrafía.

Estos condensadores están constituídos por dos láminas de aluminio, entre las que se encuentra en disolución una sal de ácido débil, como un fosfato o borato. El condensador resulta formado por una lámina de aluminio oxidado, que desempeña el papel de placa, y la otra placa es el líquido, siendo el dieléctrico la delgada capa gaseosa formada entre ambas; capa dieléctrica que, en el caso del fosfato amónico, es de amoníaco, y entonces la tensión crítica es tan sólo de *40 voltios*. En la práctica el líquido se dispone fijándole con una pasta gelatinosa.

Por último, también hay que decir que el amoníaco se pro-

duce, en grandes cantidades, en la descomposición de las materias orgánicas, una de ellas la excreción urinaria, en la que, entre los numerosos compuestos orgánicos que contiene, figura la urea, cuya descomposición por el calor da lugar a carbonato amónico; descomposición que también se origina por la fermentación llamada amoniacal, debida al fermento *torulácea amoniacal* de Van-Tieghem. Digamos, de pasada, que la urea se emplea actualmente en la fabricación de los cristales «Sicurit», que se rompen sin astillarse.

Celulosa.—Otro cuerpo que ha de ser citado en este estudio es la *celulosa* que, químicamente, es un polisacárico de fórmula general $(C_6H_{10}O_5)_n$, incluído en la serie de los hidratos de carbono. Se denomina también *anhidrosa* porque responde a la fórmula $(C_6H_{12}O_6)_n - (n-1)H_2O$ que, cuando *n* es grande, es equivalente a la anterior.

La celulosa representa un complejo estable de condensación del grupo $C_6H_{10}O_5$, a diferencia del almidón, que es muy transformable: en dextrina, maltosa, etc.

Su nombre lo debe a que forma, casi exclusivamente, las paredes de las células de los vegetales jóvenes; pero, después, está asociada con la *lignina*.

La celulosa del algodón y de la madera sólo se diferencian en el grado de pureza, pudiendo decirse que en el algodón hidrófilo y en el papel de filtro sólo existe celulosa casi químicamente pura. Se distinguen tres variantes principales de la celulosa: la *pectocelulosa*, que es la del algodón; la *ligninocelulosa*, que se halla en el yute y la madera, y la *cerealcelulosa*, que forma la paja.

En general, en las plantas, acompañan a la celulosa otras substancias albuminosas, resinosas o amiláceas, que sirven de aglutinante para unir las fibras.

La estructura de la celulosa se conoce mediante los rayos X, que es el único medio de actuar, porque los agentes químicos la alteran.

Se compone de cadenas de glucosa, que contienen de 150 a 200 unidades, y unas 50 de estas cadenas forman un paquete o haz; de modo que lo que se denomina una *micela* de celulosa, tiene un espesor de 50 Å, y una longitud de 500 a 1.000 Å. (Se

recuerda que el *angstrom* vale 10^{-8} cm., o sea es una diezmilésima de *micra*, y su denominación es en memoria del gran físico sueco de igual nombre.)

Esta estructura indica hasta qué punto puede llegar el grado de oclusión de un gas en la celulosa cuando en ella tenga lugar la adsorción.

Las propiedades físicas más importantes son las de ser muy insoluble, pues ni el agua, ni el alcohol, ni el éter ni otros disolventes neutros la disuelven, como era lógico esperar, pues, de lo contrario, la lluvia casi desharía la vegetación. Su disolvente es el líquido cuproamoniacal o reactivo de Schweizer.

Entre las propiedades químicas hay que señalar su combinación con el ácido nítrico, dando lugar a la *nitrocelulosa*, piroxilina o algodón pólvora. Derivado de éste es el *celuloide*.

No hay más mentar estos productos para recordar el intenso grado de combustibilidad de la celulosa, citando también, a este efecto, lo *que ya se ha dicho más arriba*, que el tamo o polvo de paja es pirofórico.

*** La ionización. *** Se cierra este capítulo físico-químico con un resumen sobre *ionización*.

Se ha visto que el átomo es un complejo de electrones, protones y neutrones, de tal modo compuesto, que el núcleo contiene tantas cargas positivas como electrones negativos existen en las diversas capas orbitales. De ahí resulta que, eléctricamente considerado, el átomo es *neutro*. Su facultad de ganar o perder electrones altera su estado; de modo que, si pierde uno o varios electrones, queda electrizado positivamente; si los gana, se comporta como un cuerpo electrizado negativamente; todo lo cual no modifica su naturaleza esencial, que es debida al núcleo, pero sí trae numerosas consecuencias en cuanto a su modo de conducirse. En estos casos se dice que el átomo se ha convertido en un *ión;* vocablo que viene del griego εἰμί (yo voy), cuyo participio de presente es ἰών, ἰοντος (el que va, el caminante), y fué empleado por el sabio sueco Svante Arrhenius en 1887, cuando expuso su célebre teoría de la disociación electrolítica. (En buena ley filológica, el plural de ión debía ser *iontes.)*

Pero expongamos el asunto con la debida clasificación.

Ionización en los líquidos.—Según supuso Arrhenius la mo-

lécula de una sal en estado de soluto, y también de fusión, se descompone, dando lugar a dos iones; la base metálica pierde uno o varios electrones, convirtiéndose en ión positivo, y el radical ácido los toma apareciendo como ión negativo, siendo tanto mayor la proporción de moléculas disociadas cuanto la solución es más diluída.

Tomando, por ejemplo, una solución de cloruro de sodio, cuya fórmula es $NaCl$, se verifica la disociación electrolítica, según la ecuación

$$NaCl = Na^{+} + Cl^{-}.$$

El mecanismo de tal disociación está representado en el esquema de la figura 16. En ese esquema se ven primeramente los átomos; el de sodio, con un sólo electrón en la capa externa, que explica su gran actividad química por la tendencia a perder ese electrón solitario, y el de cloro, en cuya órbita exterior existen siete electrones, por lo que tiene gran actividad hacia los cuerpos que pierden con facilidad un electrón, ya que la ganancia por él de este gránulo eléctrico estabiliza su capa. De ese modo resulta la molécula de cloruro de sodio, cuya disociación origina los iones que se ven en la misma figura: el de sodio, que es el átomo sin el electrón exterior, y el de cloro, con la capa externa completa de ocho electrones.

Esta disociación explica la conductividad eléctrica de una disolución salina, pues, en cuanto se sumergen dos electrodos en la cubeta que la contiene, los iones se ponen en movimiento, es decir, hay una verdadera *migración de iones:* los iones negativos caminan hacia el electrodo positivo *ánodo*, y los positivos se dirigen al negativo o *cátodo;* por esta razón, como los iones negativos aparecen en el ánodo, se denominan *aniones*, mientras que los positivos, por igual razón, se llaman *cationes*.

En este fenómeno están basadas, como es sabido, numerosas aplicaciones de *Electroquímica*.

La teoría, que ha sido la originaria de las modernas concepcepciones físico-químicas, vino a explicar así la descomposición de un electrolito que antes de Arrhenius se concebía de un modo muy distinto al que hoy se admite, pues se creía que era

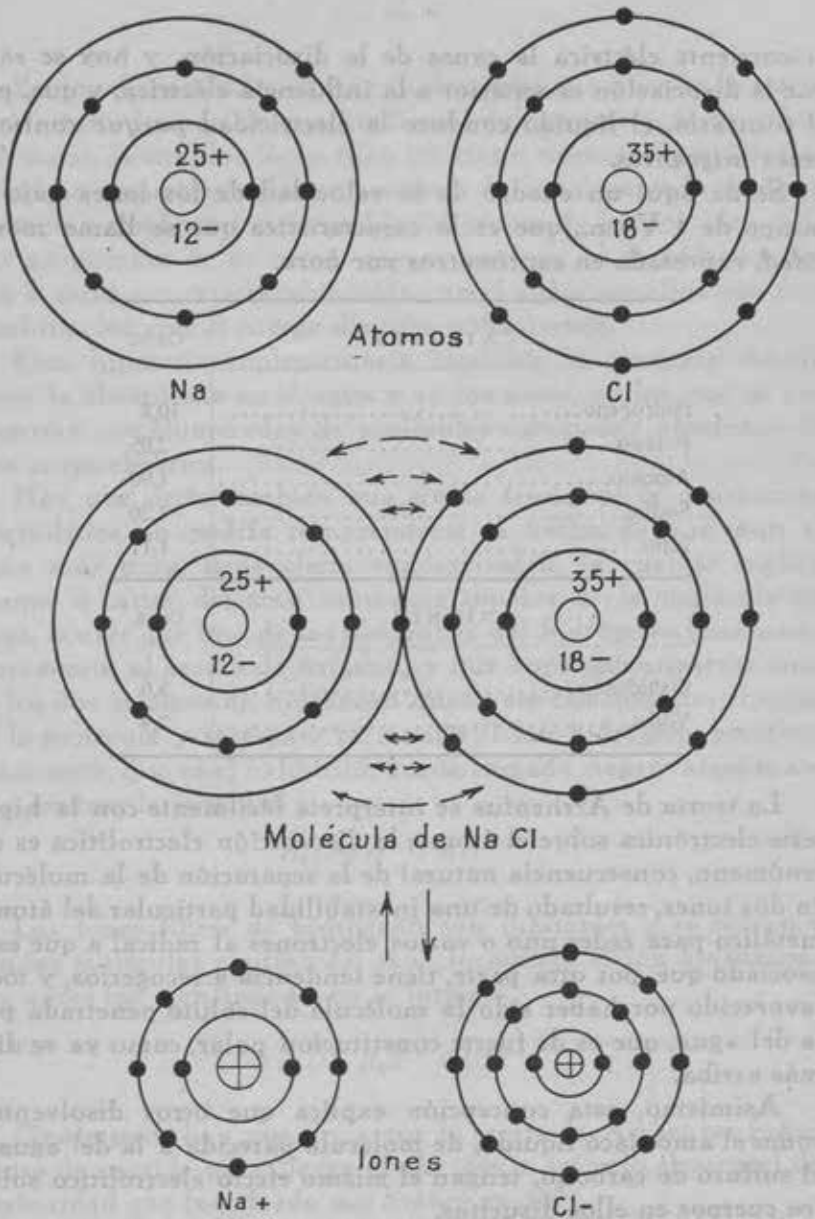


Fig. 16.—La ionización del cloruro de sodio. Los átomos de sodio *Na* y *Cl* tienen, en la capa cortical, un electrón solitario el primero, y siete electrones el segundo. La afinidad química intensa entre ambos átomos proviene de tratar de quedarse ambos con capas corticales de ocho electrones, y se forma la molécula de cloruro de sodio, sobre la que, actuando la molécula polar del agua, llega a penetrarla y se forman los iones, positivos el de sodio, pues ha perdido una carga cortical negativa, y negativo el de cloro porque la ha ganado. Éste aparece en el ánodo, y es un *anión:* el primero en el cátodo, y es un *catión.*

la corriente eléctrica la causa de la disociación, y hoy se sabe que la disociación es anterior a la influencia eléctrica, y que, por el contrario, el líquido conduce la electricidad *porque contiene iones migrantes.*

Se da aquí un cuadro de la velocidad de los iones bajo el campo de 1 V/cm., que es la característica que se llama *movilidad,* expresada en *centímetros por hora.*

CATIONES	Cm./h.
Hidrógeno	10,8
Potasio	2,05
Amonio	1,98
Sodio	1,26
Litio	1,11
ANIONES	**Cm. h.**
Oxhidrilo	5,6
Yodo	2,9

La teoría de Arrhenius se interpreta fácilmente con la hipótesis electrónica sobre el átomo; la disociación electrolítica es un fenómeno, consecuencia natural de la separación de la molécula en dos iones, resultado de una inestabilidad particular del átomo metálico para ceder uno o varios electrones al radical a que está asociado que, por otra parte, tiene tendencia a recogerlos, y todo favorecido por haber sido la molécula del soluto penetrada por la del agua, que es de fuerte constitución polar, como ya se dijo más arriba.

Asimismo, esta concepción explica que otros disolventes, como el amoníaco líquido, de molécula parecida a la del agua y el sulfuro de carbono, tengan el mismo efecto electrolítico sobre los cuerpos en ellos disueltos.

Con esta teoría queda explicado también por qué la migración de los iones es instantánea en cuanto se aplica el campo eléctrico; existían ya los iones, no necesitan ser formados.

En los últimos años Harry C. Jones ha modificado la teoría con la introducción de una hipótesis suplementaria; la de *solvatos*, según la cual los iones fijan un cierto número de moléculas disueltas, constituyendo una especie de conglomerado como si fuese una combinación inestable del género de los coloides, y de ahí su nombre de solvatos, que es análogo al de hidratos, ya que si éstos son una combinación con el agua, aquéllos son una combinación con el cuerpo disuelto o disolvente.

Esta hipótesis suplementaria establece la conexión debida entre la electrólisis en el agua y en los gases, en los que se encuentran conglomerados de moléculas agrupadas alrededor de una carga eléctrica.

Hay que decir también que sin la teoría de la disociación electrolítica no podría comprenderse el hecho de que, aun el agua más pura, tiene cierta conductividad, la cual se explica porque a causa del gran momento dipolar de la molécula de agua, ocurre que uno de los electrones del hidrógeno pasa completamente al átomo de oxígeno, y que consiguientemente uno de los dos núcleos de hidrógeno queda sin relación con el resto de la molécula y se separa formando el ión hidrógeno positivo, y ese resto, que es el oxhidrilo, queda cargado negativamente según expresa la igualdad

$$H_2O = H^+ + HO^-.$$

Los iones libres de hidrógeno son inestables y se solvatan con las moléculas neutras del agua formando el ión *hidroxonio* que antes fué mencionado, en la forma

$$2H_2O = H_3O^+ + OH^-.$$

Finalmente, hay que decir que la teoría de Arrhenius fué el punto de partida para llegar al *electrón* o gránulo elemental de electricidad que fué ideado por Stoney en 1891.

El deuterio. El agua pesada.—En relación con la electrólisis del agua se deben mencionar estos elementos. El isótopo del hidrógeno, el *deuterio* fué descubierto muy recientemente, pues la sospecha de su existencia data solamente de 1931. Sabido es que

se entiende por isótopo de un cuerpo el formado por átomos de igual naturaleza, pero de distinto peso atómico, en virtud de lo cual se explica la circunstancia de que no sea entero el número que representa el peso atómico de un cierto cuerpo, pues ese número resulta ser la media de los diversos pesos atómicos de los átomos isótopos que le forman.

El isótopo del hidrógeno se denomina *deuterio*, como se ha dicho, y su símbolo químico es *D*. En el hidrógeno hay moléculas de formas H_2, HD y D_2.

Si se cita esta existencia, no es sino para decir que los *deutrones* son unos de los *proyectiles* más adecuados para las llamadas reacciones nucleares o de *transmutación de la materia*, así como de *desintegración atómica*.

Lo mismo puede decirse del agua. En efecto, se sabe hoy que el agua se compone de nueve clases de moléculas, de las cuales se han obtenido puras dos: la H_2O^{16}, es decir, la ordinaria conocida, con oxígeno de peso atómico 16 y H_2, y la llamada *agua pesada*, de fórmula D_2O^{16}. La proporción de ésta aumenta mediante la electrólisis continuada del agua ordinaria.

Como el agua ordinaria se evapora más fácilmente que la pesada, la riqueza de ésta aumenta en las aguas expuestas a gran evaporación, como sucede en el Mar Muerto, en donde existe una gran proporción de agua pesada.

Como dato cuantitativo se cita el de la densidad, que es de 0,9980 para el agua ordinaria a 20°, y de 1,1051, a igual temperatura, para el agua pesada.

Es curioso decir que el agua pesada tiene propiedades bioquímicas negativas: el tabaco no germina con ella; los peces pequeños mueren en ella a las pocas horas, y los ratones que la beben mueren en pocos días.

Es difícil obtener cantidades apreciables de agua pesada, que es una de las materias primas necesarias para conseguir la desintegración atómica por el procedimiento que intentó seguir la ciencia alemana.

Las reacciones nucleares.—No es posible dejar de hacer, en un estudio de la naturaleza del presente, en que se habla de materia y energía, siquiera una indicación sobre las llamadas *reacciones nucleares*, citadas más arriba.

La denominación de tales reacciones procede de que, así como en las reacciones químicas propiamente tales, de las que hasta ahora se ha tratado aquí, son los electrones corticales del átomo los que entran en juego, o sea, los que actúan determinando las llamadas *valencias* o afinidades, que se traducen en los enlaces corticales de los átomos para dar lugar a las moléculas de los cuerpos; en las reacciones nucleares son los núcleos de los átomos los que intervienen en las transformaciones que tienen lugar, resultando así una *transmutación de la materia con emisión de energía.*

Los núcleos se desintegran por emisión de partículas α y electrones. Fué Rutherford quien, en 1919, consiguió romper núcleos de nitrógeno bombardeando este gas con partículas α, dando así el primer paso por el camino de la desintegración artificial de la materia.

Los elementos que intervienen en estas reacciones son: el *protón* o núcleo del hidrógeno con masa unidad y carga eléctrica positiva unidad; el *positrón*, que es un electrón positivo, principal componente de las radiaciones cósmicas penetrantes, que se diferencia del electrón en que éste, como se dijo oportunamente, tiene una carga negativa, por lo que, a veces, se le denomina *negatrón* como designación opuesta a la anterior.

Pero existe también el *neutrón*, elemento *sin carga eléctrica* y de masa igual a la del protón y, por eso, el más importante en las reacciones nucleares porque, como en éstas se trata de hacer que el núcleo atómico reciba choques que le conmuevan, los agentes empleados para ello han de tener facilidad para llegar hasta él, y se comprende que este elemento sin carga ha de tener esa facilidad en grado elevado, pues no sufrirá ni la repulsión de los negatones de las zonas corticales del átomo si el agente de bombardeo empleado es negativo, ni la repulsión del núcleo si el agente es positivo.

De aquí la importancia del agua pesada y del deuterio antes citados, pues el *deutrón* es un elemento de masa dos y carga eléctrica unidad que, al reaccionar, se desdobla en protón, que es quien se lleva la carga, y neutrón, con las propiedades indicadas, comprendiéndose así la importancia que la ciencia alemana dió a la fabricación de agua pesada.

¿Cuáles son las condiciones en que se producen la reacciones nucleares? Para que se produzca una reacción de ese tipo es necesario lanzar sobre los núcleos agentes de bombardeo adecuados con gran velocidad, para que no solamente puedan vencer las *defensas* del átomo, sino llevar energía suficiente para el choque directo con el núcleo, y en este sentido, cuando el agente es el neutrón, en algunos casos hay que frenarle para que llegue al choque con la velocidad requerida.

En el laboratorio se consigue el lanzamiento de las partículas de bombardeo, ya sometiéndolas a diferencias de potencial elevado que las acelera, con un potente generador electrostático, ya como en el *ciclotrón* de Lawrence, en donde los iones se someten a un campo magnético que les obliga a describir trayectorias circulares, y luego reciben impulsos periódicos por la acción de un generador de alta frecuencia hasta llegar a la velocidad necesaria para el bombardeo.

En la Naturaleza solamente se encuentran las condiciones necesarias para producirse las velocidades que requieren las reacciones nucleares, en los astros en estado de soles, en los que, según la hipótesis en vigor para explicar su evolución térmica, se supone que la materia tiene estado, estudiado por el físico ruso Gamow, de supercondensación, estado designado en castellano con la palabra *barotríptico* de βαρος (presión) y τριπτος (triturado). En este estado, caracterizado por enormes temperatura y presión, como las que han de reinar en las capas profundas de una estrella, los átomos se hallan *desnudos*, es decir, sin capas corticales de electrones y, además, animados de gran velocidad a causa de la elevadísima temperatura, de modo que los núcleos pueden chocar sin obstáculos y frecuentemente, resultando reacciones nucleares de diversos tipos que no hay por qué analizar aquí.

Pero como en esos choques nucleares de los que resulta transmutación de la materia, como ocurre con el uranio que se desdobla en sodio, potasio, calcio, etc., siempre se produce un desvanecimiento de masa que se convierte en energía de la importancia que se indicó al hablar del átomo, se explica con ello de un modo satisfactorio el origen del calor y demás radiaciones que emiten los astros centrales o soles del Universo.

En la Tierra, las reacciones de tipo nuclear son de proceso lentísimo, de millones de años, pero, hasta ahora, sin manifestaciones intensas localizadas.

Ionización en los gases. — El primer hecho que indujo a pensar en que los gases podían estar ionizados fué el de comprobar que un cuerpo electrizado en ciertas condiciones se descargaba, al contrario de lo que sucede en una esferilla suspendida por un hilo de seda en una atmósfera de gas seco y despojado completamente de partículas de polvo: la esfera conserva su electrización casi indefinidamente.

Pero, si ocurre lo contrario, hay que pensar en que, en efecto, el gas contiene iones de signo contrario al de la electrización de la esfera, y esos iones son los que la hacen perder la carga al recombinarse con los iones que la forman.

Así, pues, un gas, bajo el efecto de ciertas causas, se ioniza en forma análoga a como se ha visto en los electrólitos, o sea, que un cierto número de moléculas pierde un electrón que les es sustraído por la energía que actúa, y quedan cargadas positivamente; y estos electrones, después de una vida libre efímera, se fijan en otras moléculas aún neutras dándoles cargas negativas.

Entonces, el transporte de la electricidad, o paso de la corriente eléctrica por un gas, que es llamado conductor de tercera categoría (1), es un fenómeno análogo al de la electrólisis; los iones negativos caminan hacia el ánodo y los positivos hacia el cátodo. Por lo tanto, según esta hipótesis, es condición indispensable para que el gas conduzca la corriente eléctrica que esté previamente ionizado; lo contrario de lo que se creía primitivamente en los tiempos de Coulomb.

(1) Como habrá podido verse, se han citado los conductores de primera, segunda y tercera categorías. Se aprovecha la ocasión para decir que los primeros, son los metales cuya teoría admite que, además de los electrones de constitución, contienen otros *libres*, para los cuales los átomos y las moléculas son otros tantos obstáculos esparcidos aquí y allá, a distancias considerables en relación con su tamaño, con los que chocan y rebotan una y otra vez, como ocurre en las moléculas de un gas.

Los conductores de segunda categoría son los *líquidos* cuyos iones están ligados a los átomos o radicales.

Los de tercera categoría son los gases que contienen iones en igual disposición que los líquidos, pero más móviles y en cantidad limitada, por lo que la corriente que a través de ellos pasa, tiene un límite.

Diferencias con los iones electrolíticos.—Pero si el mecanismo del paso de la corriente a través de un gas es análogo al mismo fenómeno en un electrólito, no es idéntico a él, pues presenta diferencias esenciales. En primer lugar, en un electrólito no hay límite de la corriente que a través de él pasa: aumenta la diferencia de potencial aplicada y la corriente aumenta también; pero, en un gas, esto no sucede sino hasta un cierto límite, en el cual se alcanza la llamada *corriente de saturación*, a partir de la cual es inútil aumentar el potencial, pues este aumento lo que llega a producir es la chispa disruptiva. El fenómeno, pues, en contradicción con la ley de Ohm, prueba que la cantidad de iones producidos en un gas por el agente que actúe sobre él, es limitada, y así el gas no puede dar paso a una corriente que exceda a la capacidad de transporte de la cantidad de iones producidos, pudiendo servir este hecho como medida de la potencia de ionización de la causa actuante.

El otro hecho diferencial es la movilidad de los iones, pues en un gas es mucho mayor que en el electrólito.

Otro carácter de la ionización de los gases es la propiedad de recombinarse los iones. Cuando el gas está sometido a una ionización acaba por establecerse un estado de equilibrio, en el cual la cantidad de nuevos iones producidos es igual a la de los que se recombinan, de modo que el gas llega, por decirlo así, a un estado de saturación de iones. Si se interrumpe la acción ionizante, la recombinación continúa y el gas acaba por perder la propiedad de ser conductor, y si entonces está bajo la acción de un campo eléctrico, la conductividad desaparece más aprisa, pues los iones se agotan antes por ser consumidos en el paso de la corriente eléctrica: el medio se *ha relajado* eléctricamente.

Así como en un electrólito, si la solución es muy diluída, el tanto por ciento de moléculas disociadas eléctricamente es grande, en los gases no ocurre así, aun empleando un agente poderoso de ionización como los rayos X, caso en el que, según mediciones llevadas a cabo por J. J. Thomson, el número de iones por $cm.^3$ llegaba a 10^5, mientras que el número de moléculas en el mismo espacio es del orden de 10^{20}.

La movilidad de los iones depende, naturalmente, de la naturaleza de los gases, y a continuación se dan las movilidades de

los iones positivos y negativos a 15° y presión normal en algunos gases, bajo el campo de un voltio por centímetro, expresados en centímetro por segundo.

GASES	IÓN POSITIVO	IÓN NEGATIVO
Hidrógeno.....	6,7 cm/s	7,9 cm/s
Aire.....	1,4 —	1,78 —
Ácido carbónico.....	0,79 —	0,87 —
Anhidrido sulfuroso.....	0,44 —	0,41 —

Notemos que, como puede verse, el hidrógeno tiene una conductividad casi *cinco veces* la del aire.

Por último, es interesante decir que ha sido posible *fotografiar los iones* haciéndoles servir de núcleos de condensación de vapor de agua, y a este respecto se dice, que como quiera que los iones son, en ausencia de polvo, los principales núcleos de condensación para formar la niebla, hasta el punto de haberse comprobado que el vapor de agua disuelto en aire seco y sin ionizar, persiste sin condensarse hasta temperaturas muy por debajo de la de condensación, si en estas condiciones se somete el aire a la acción de los rayos X, se produce inmediatamente la condensación, formándose una bruma que puede ser fotografiada y en la cual el centro de cada gota es un ión.

El autor de este trabajo tuvo ocasión de ver la cámara de experiencias para los fines de conseguir medios eléctricos de suprimir la niebla en los aeródromos, usada por el Profesor Wiegand del Instituto Meteorológico de Hamburgo.

Sabido es que en la actual guerra mundial se ha conseguido esa finalidad quemando gasolina y produciendo así, además del calentamiento consiguiente, el efecto que se ve más adelante.

Causas de ionización de los gases.—Los gases se ionizan por diversas causas que en definitiva se reducen a una sola: provocar una agitación atómico-molecular especial que haga perder un electrón a un cierto átomo o molécula.

Entre las causas capaces de producir esa agitación se hallan, en primer lugar, las radiaciones; *rayos ultravioletas, rayos lumi-*

nosos, rayos X, rayos catódicos, rayos emitidos por los cuerpos radiactivos. En otro orden de ideas: la presencia de cuerpos incandescentes y llamas, reacciones químicas, burbujeo del gas en ciertos líquidos, etc.

Para explicar las acciones de ionización conviene recordar que el átomo tiene una constitución análoga a la de un sistema solar, de modo que los electrones hacen el papel de planetas. Pues bien: cada órbita electrónica supone una cierta energía, de modo que para que el electrón que recorre una cierta órbita pase a la siguiente, ha de absorber una determinada energía que en el caso de la órbita mínima u órbita *K*, de las que se citaron oportunamente, es de 16×10^{-12} ergios, con lo cual el electrón pasaría a la órbita *L*.

Así, pues, el átomo de hidrógeno supone la pequeña energía del valor citado, puesto que está formado por un sólo electrón, mientras que los átomos complejos, como los de la familia del uranio, son los que almacenan cantidades grandes de energía que, al tenerla, se encuentran en la posibilidad de devolverla derrumbándose.

Pero es el caso que los átomos poseen para la energía una cierta selectividad, de modo que, si sobre un átomo cae una radiación de onda no apropiada, el átomo no se conmueve. La cantidad de energía que un átomo puede absorber está ligada con la longitud de onda que sobre él incide, por la relación que se establece en la teoría cuántica; es decir, siendo *e* la energía, y *l* la longitud de onda, se verifica, según esa teoría,

$$e \cdot l = h \cdot c,$$

en donde es *h* la constante universal de Planck, de valor $h = 6{,}55 \times 10^{-27}$ ergios, y c la velocidad de la luz. (La designación *c* se ha adoptado universalmente como inicial de *celeritas.)*

Sabido es que Planck estableció su célebre principio, según el cual, la energía de radiación no es continua, sino *discreta*, puesto que sólo puede variar por *múltiplos enteros* de $h\nu$, siendo ν la frecuencia del movimiento periódico ejecutado por el sistema que radia.

La cantidad *e* de la fórmula anterior es el *cuánto* correspondiente a la radiación de longitud de onda *l*. Está ahora claro que la absorción de energía del átomo será aquella cuyo cuánto sea exactamente el necesario para hacer saltar algún electrón de

una órbita a otra, o incluso para que llegue un electrón a ser lanzado al espacio en forma de electrón libre.

Siendo, como se ve, la cantidad *e l* un producto constante, se comprende perfectamente que, cuanto mayor sea la cantidad e de energía necesaria en un átomo para modificar la posición de sus electrones, tanto más pequeña deberá ser la longitud de onda adecuada para que el átomo absorba la energía que representa la correspondiente radiación y se pueda realizar el consiguiente salto de electrones; y todavía más: si se quiere derrumbar un átomo, o simplemente perturbarle, habrá de ser bombardeado por radiaciones de longitud de onda, tanto más pequeña, cuanto más complicada sea su estructura.

Ahora se comprende cómo las diversas acciones, anteriormente citadas, pueden dar lugar a electrones: estos electrones, sujetos a movimientos desordenados o braunianos, encuentran a las moléculas gaseosas, y entonces, según la naturaleza y presión del gas, podrán, o rebotar continuando su camino, o adherirse a la molécula dejándola electrizada, constituyendo un ión negativo.

Si existe un campo eléctrico, el ión acelera el choque contra una molécula; llevando fuerza viva suficiente puede dar lugar al lanzamiento de un electrón, y la molécula se convierte así en ión positivo. El potencial necesario para que este fenómeno se verifique se denomina *potencial de ionización.*

Los valores de este potencial dependen, claro es, de la naturaleza de los gases. Así se ve en el siguiente cuadro:

GASES	Potencial de ionización.
Nitrógeno	7,5 V/cm
Oxígeno	9 —
Hidrógeno	11 —
Argón	12 —
Neón	16 —
Helio	20,5 —

Según se demuestra en la teoría cuantística, a este potencial corresponde la emisión de una radiación de longitud de onda

determinada, que es la que satisface a la relación señalada más arriba, según la naturaleza del gas. Hay que advertir por fin, que si un electrón desplazado vuelve a su órbita, el átomo emite radiaciones, pues el fenómeno es reversible.

En resumen, puede decirse que hay emisión de electrones y, consiguientemente, ionización, como producto general de la *desmaterialización de la materia* que, contrariamente a la opinión de los sabios, no muy antigua por cierto, es algo que se destruye, que se derrumba, no haciendo así otra cosa que seguir su lento camino hacia otro nuevo caos, hacia otra nueva Nada, de la que surgirán nuevas Creaciones. ¡Porque la obra del Creador es eterna!

A la emisión de electrones está ligada la teoría de la válvula iónica de la radiotelegrafía, la de los tubos de Crookes y las de otros muchos fenómenos que se salen del marco de este estudio.

Solamente se hablará, para terminar las cuestiones de ionización, sobre las propiedades que en este aspecto tiene la llama.

Acción eléctrica de la llama.—Si reacciones químicas tan simples como una hidratación pueden dar lugar a emisión de electrones, se concibe, fácilmente, que en las combustiones, que son reacciones químicas intensas, se produzcan abundantemente fenómenos de ionización. En efecto, los cuerpos incandescentes emiten iones como se ha indicado.

Hace más de un siglo que se sabe que las *llamas descargan* los cuerpos electrizados, y, sin embargo, este fenómeno no había sido objeto de estudio a pesar de su importancia, y es a Branly, al inventor de algo que es bien conocido, del cohesor de galena, a quien se debe las primeras investigaciones exactas sobre la acción eléctrica de la llama. Branly, en efecto, demostró que las partes de la llama activas eléctricamente son los gases que emanan de ella.

Estudió también la influencia de la temperatura sobre el sentido de la descarga. Empleó para sus experiencias un hilo de platino, y vió que, al rojo sombrío, la descarga negativa es francamente mayor que la positiva, mientras que, al rojo vivo, las dos descargas se igualan, y esto es prueba indudable de que, a distintas temperaturas, se forman iones diferentes; lo que no es extraño puesto que la temperatura es el síntoma de una determinada agitación molecular.

Las experiencias realizadas por Le Bon con la simple llama de una bujía confirmaron la acción sobre el electroscopio, y probaron que la llama hace al aire conductor de la electricidad, y que aun los gases procedentes de la llama, ya enfriados, siguen descargando los cuerpos electrizados.

Con estas acciones se comprende que se haya conseguido hacer desaparecer la niebla en un aeródromo quemando líneas de gasolina en su contorno.

La niebla, como se dijo más arriba, requiere para formarse núcleos de condensación que, en campo libre, son principalmente iones, ya que, en tal lugar, no hay que pensar en partículas de polvo, difícil además de producir en días de calma, que son aquéllos en que se manifiesta ese fenómeno. Primitivamente se ensayó la calefacción de los aeródromos quemando carbón, y el efecto fué casi nulo. En Alemania se ensayaron también emisiones de arena para neutralizar los iones. El resultado completo se ha obtenido con la gasolina que, al arder, produce llama, originándose los efectos eléctricos explicados, que conducen al fin apetecido.

Digamos, por último, que el estudio de los iones en la llama es el que condujo a Zeemann nada menos que al descubrimiento del magnetismo del Sol, en 1909, una de las grandes conquistas de la moderna Astrofísica. Y es que el Creador lleva al hombre por el lento camino de la verdad, guiándole con los medios más insospechados.

Quizá la rápida revista que se ha pasado a este complejo de fenómenos, tan pronto químicos como físicos, resulte algo fatigosa; pero dado el propósito de citar todos aquellos que tienen posible intervención en la explicación que se intenta hacer, de haber sido estudiado cada uno como digresión, al hacer aplicación de él, este trabajo hubiese resultado demasiado complicado, y así, seguramente, lo será menos, aunque la lectura de este primer capítulo requiera atención sostenida, que redundará en ventaja de la sencillez y claridad, cuando más adelante se intente la explicación de los fenómenos que constituyen la finalidad de este estudio.

Por eso, para aumentar en lo posible esa claridad, se resumen aquí los principales y más destacados hechos y propiedades que se han estudiado.

En la combustión figuran dos términos: combustible y comburente.

El comburente por excelencia es el oxígeno; pero si su átomo es extraordinariamente activo, su molécula es pasiva, y por eso hay que *excitar* al oxígeno, que es el «león dormido», para que entre en actividad.

La llama, resultado de excitar el oxígeno por la temperatura, es la manifestación más común de una combustión; aunque su coloración general es amarillo-rojiza, su base, en donde arde el óxido de carbono, es azul.

Las acciones que avivan o excitan las reacciones químicas constituyen la catálisis, que es, por lo tanto, de muy diversas clases.

La catálisis de contacto, por aumento de la superficie a causa de la extremada división de la materia, es muy activa: la respiración es un ejemplo. En esta catálisis actúan las fuerzas de adsorción.

La catálisis eléctrica es también muy importante.

Se llega a conocer la acción química eléctrica estudiando el campo eléctrico, la capacidad y la constante dieléctrica de los cuerpos.

Si un dieléctrico es heterogéneo, el gradiente de potencial se distribuye desigualmente y es mayor en el dieléctrico menos aislador.

La tensión eléctrica de un medio somete a sus moléculas y átomos a una tensión mecánica elástica.

La electricidad se desplaza en un dieléctrico sin llegar a saltar de un elemento a otro: en los conductores, saltando rápidamente desde el potencial menor al mayor.

El efluvio eléctrico es un movimiento oscuro de electrones; la chispa es un movimiento de electrones, tan vivo, que produce la ruptura del medio con producción de luz.

Tanto el efluvio, como la chispa, son acciones catalíticas por la agitación molecular que producen: el primero, actuando sobre el oxígeno, da lugar a ozono.

En las acciones catalíticas, como sucede típicamente en la eléctrica, la reacción sobre la que actúan se inicia siempre a expensas de *átomos* o *grupos atómicos activos*, es decir, con va-

lencias libres, y esos átomos o grupos son los que entretienen la reacción que se desarrolla con un proceso de *cadena*.

Hay también otras acciones catalíticas, como la del agua, que es muy activa, favoreciendo las oxidaciones.

El ozono es un oxidante más activo que el oxígeno.

El amoníaco tiene mayor constante dieléctrica que el aire y menor que el agua; pero es sustancia electrolítica como ésta.

La celulosa tiene una constitución en micelas sumamente dividida.

Las moléculas se separan en iones por la acción de un disolvente: los iones formados son migrantes y transportan la electricidad.

Hay estados alotrópicos del hidrógeno, entre los que figura el deuterio; los deutrones son proyectiles muy apropiados para las reacciones nucleares de transmutación de la materia o de su desintegración.

Las reacciones nucleares naturales son propias de las estrellas o astros en estado de Sol. En la Tierra las reacciones de tipo nuclear son lentísimas y sin manifestaciones localizadas.

Los gases se ionizan análogamente a los electrólitos, pero con diferencias: los electrólitos dan paso a corrientes eléctricas de cualquier intensidad: en los gases no ocurre esto; hay corriente de saturación; después viene el efluvio y la chispa.

La movilidad de los iones es mayor en los gases que en los líquidos.

El hidrógeno es cinco veces más conductor que el aire.

La llama descarga los cuerpos electrizados; el estado de ionización del aire cesa por la acción de la llama: con la llama se ha suprimido la niebla en los aeródromos.

Quizá haya sido olvidado en este resumen algún detalle importante; pero, al menos, se ha citado lo más saliente y se ha podido ver con ello que la necesidad de conocer las circunstancias todas de la combustión es la que ha llevado al examen de todo lo demás que se ha considerado aquí.

Y si se puede decir que la mayoría de los hechos examinados hasta ahora son de laboratorio, en este momento se va a iniciar el estudio de lo que sucede en el gran laboratorio que ofrece el escenario de la Naturaleza.

II. LA ELECTRICIDAD EN LA ATMÓSFERA

II. LA ELECTRICIDAD EN LA ATMÓSFERA

No hace más de un siglo, lo difícil era encontrar modos de producir electricidad; hoy, lo difícil es hallar un fenómeno en que no se produzca.—Le Bon.

*** Preliminares. ***

La atmósfera, tenue vaho que envuelve nuestro planeta, inmensa máquina que rinde al día el trabajo de muchos millones de caballos de vapor en beneficio de los seres que la habitan, es también sede de fenómenos eléctricos, asiento de manifestaciones de la electricidad, el más maravilloso y más singular de los agentes atmosféricos.

Cómo y por qué este agente se manifiesta, es uno de los más difíciles temas que la Naturaleza plantea al hombre, y como es un hecho que la complicación de las cosas aumenta cuanto más se las estudia, para no hacer el estudio demasiado complejo, se va a limitar esta exposición a un esquema, dividiéndola, además, para mayor claridad, en dos partes: *campo eléctrico normal* y *campo perturbado o de las tempestades.*

Campo eléctrico * * normal. * *

La imagen más sencilla que representa los fenómenos del campo normal es la que proporciona un condensador esférico (fig. 17): las armaduras son la Tierra y la capa conductora superior ionizada, tan conocida por

los fenómenos de la transmisión radiotelegráfica, con el nombre de capa de Kenelly-Heaviside, y que en la Geofísica se designa con la denominación de *ionosfera*. El dieléctrico es el aire inferior: el conjunto, dieléctrico y armadura exterior, es la *atmósfera*.

La separación entre dieléctrico y armadura exterior, no está netamente determinada; lo que ocurre es que a una gran altura

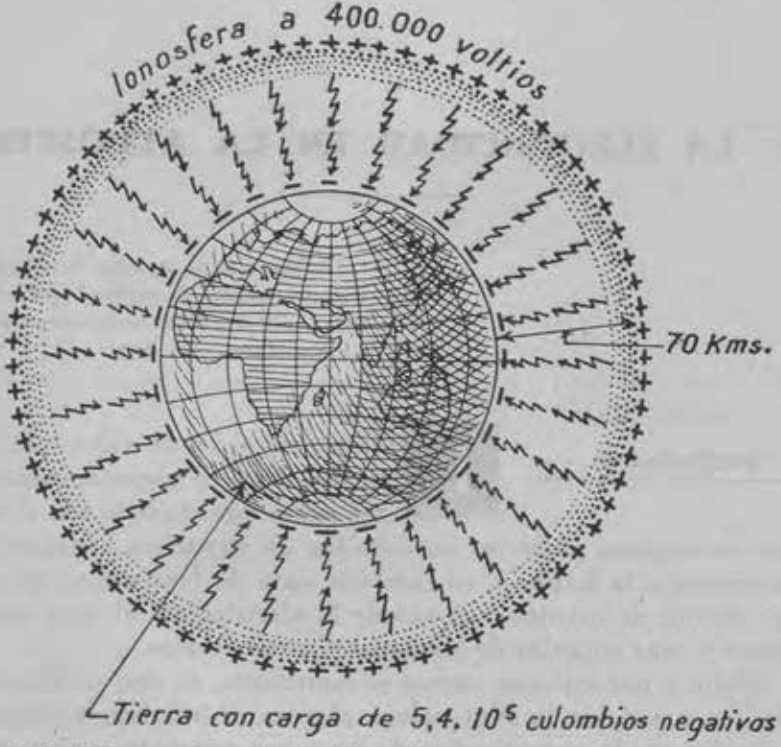


Fig. 17.—La Tierra, con la capa ionizada de la atmósfera superior, forma un gigantesco condensador esférico, a la diferencia de potencial de 400.000 voltios. La armadura negativa es el globo terráqueo; la positiva, la ionosfera. La Humanidad *vive* en el seno de ese condensador donde, además, localmente, y de un modo pasajero, pueden presentarse campos eléctricos centenares de miles de veces más intensos que el normal.

la conductividad de la atmósfera empieza a crecer, por ser más abundante la existencia de iones, y acaba por llegarse a una capa completamente conductora. Siguiendo en la idea de no complicar el fenómeno, se puede uno conformar con asignar a esa capa la altura de 70 kilómetros.

En la realidad, el dieléctrico no es aislador completamente; contiene iones, es decir, hay masas eléctricas en él que están libres, como se demuestra por la llamada ecuación de Poisson, según se verá algo detalladamente después, y, a consecuencia de ello, existe una corriente vertical, por el mecanismo explicado antes en los conductores de tercera categoría, que para toda la Tierra, en su conjunto, supone unos 1.400 amperios.

Si no hubiese causas permanentes que actuasen, la *relajación eléctrica* del medio, consecuencia de la recombinación de iones que más arriba se citó, acabaría por volver todo, en poco tiempo, al estado neutro. Pero, como es un hecho de experiencia que la Tierra manifiesta continuamente un estado eléctrico de características que pueden mirarse como constantes, *hay que admitir* que esas causas existen.

Si la explicación de la existencia de la ionosfera es satisfactoria considerando la acción ionizante de la radiación solar que allá arriba ha de manifestarse en toda su pujanza haciendo saltar electrones y produciendo iones positivos, es, en cambio, muy difícil explicar la carga negativa permanente de la Tierra, tanto que ha habido físicos de talla, como lord Kelvin y Peltier, que han dado la explicación de que la Tierra, en el origen de los tiempos, recibió la carga negativa, que conserva, estando como se halla en un medio aislador; cosa que hoy no puede admitirse por lo que ya se lleva dicho.

Hay otras explicaciones, como la de Lenard, del salpicado de gotas de que más adelante se hablará al tratar de las nubes; pero ninguna hasta la fecha satisface. Tal vez se está encontrando una, en estos momentos, consecuencia de una teoría general cosmogónica que, de ser cierta, daría, a nuestro entender, una gran luz sobre el asunto.

Así, para nosotros, el fenómeno primero es el movimiento general de la burbuja de éter que es el Universo, movimiento que será de doble revolución en la hipótesis de que la burbuja sea una hipersuperficie esférica, como supone nuestro compatriota Herrera, y entonces se han de manifestar fenómenos de inercia análogos a los que en la Tierra se presentan por su simple revolución alrededor de la línea de los Polos, y, por lo cual, si a estos efectos se los denomina *geostróficos*, a aquéllos los

denominaremos *cosmostróficos*. En la Tierra, esos efectos (fig. 18) producen, entre otros, el movimiento del plano de oscilación de un péndulo; el mayor desgaste del carril y pestaña derechos, así como su arrastre en igual sentido, en las vías dobles; la desviación de los ríos a la derecha de su corriente; el movimiento ciclónico en sentido contrario al de las agujas de un reloj en el hemisferio boreal, y contrario en el austral, lo que puede observarse fácilmente; el movimiento vortical sinistrorsum o destrorsum, según el hemisferio, del agua en un recipiente que se vacía por orificio central en su fondo, etcétera, y todo por la acción desviante de la Tierra hacia la derecha del movimiento (figura 18), cuando éste es en el hemisferio Norte.

Fig. 18.—La fuerza desviante, debida a la rotación de la Tierra, actúa transversalmente al movimiento, y precisamente hacia la derecha, en el hemisferio boreal, y hacia la izquierda en el austral.

Pues bien: en nuestro Universo, un efecto cosmostrófico será el *magnetismo*, que representa una fuerza de desviación torsorial análoga a la de desviación rotorial en la Tierra, ya que esta última es de acción lineal y la primera, como corresponde, por simple dualidad, ha de ser de acción circular (fig. 19), o sea que la traslación rápida de una masa hace aparecer en el ambiente inmediato, por inercia torsorial, un campo magnético de forma circular (fig. 20), y, por tanto, aparecerá también su fenómeno concomitante, la *carga eléctrica negativa* de la Tierra, por el efecto Rowland inverso.

Este efecto se denomina así, por haber sido Rowland el primero que demostró que el movimiento de un cuerpo con carga elec-

trostática produce campo magnético lo mismo que la corriente voltaica.

Así, pues, podría decirse, de admitir esta hipótesis, que la Tierra está electrizada negativamente *por efecto de la inercia del movimiento general del Universo.*

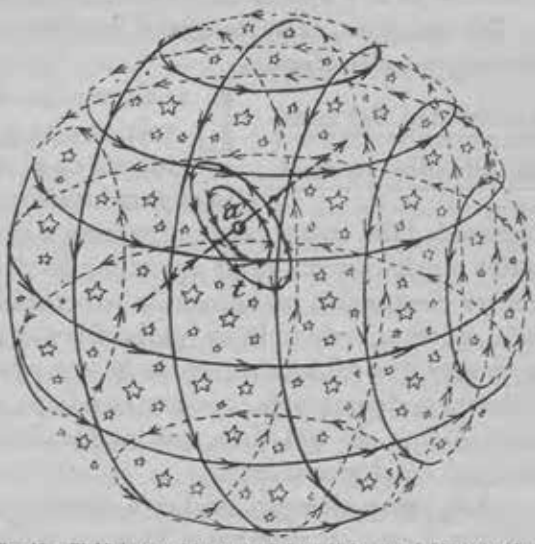


Fig 19.—El Universo, hipersuperficie esférica en doble rotación, produce en el espacio que rodea un astro *a* en movimiento, y por el simple efecto de inercia, una acción torsorial *t* que es lo que se denomina campo magnético.

Sea cualquiera la causa, que esto aquí es secundario, el hecho es que la Tierra es un condensador, cuyas armaduras son el globo terráqueo y la atmósfera superior; que el dieléctrico es el aire, y que en el aire es donde vive la Humanidad, que está así dentro de tan gigantesco condensador, cuyas armaduras tienen una diferencia de potencial de 400.000 voltios, con una carga en la Tierra de $5{,}4.10^5$ culombios, y que, como el dieléctrico no es perfectamente aislador, sino al contrario, es conductor en cierta medida, tal dieléctrico, el aire, es atravesado por una corriente constante de 1.400 amperios, y ade-

Fig. 20.—El movimiento de rotación de la Tierra, lo mismo que el de cualquier astro, ha de dar lugar, como efecto cosmostrófico, debido a la doble rotación del Universo, a una tensión torsorial del éter, que es lo que se designe con el nombre de magnetismo cuyo complemento será la carga eléctrica negativa de la Tierra.

más de esas condiciones medias, hay constantemente, en lugares situados aquí y allá, concentraciones de electricidad enormes.

No es, pues, extraño que el hombre sienta bien de cerca los fenómenos eléctricos.

Intensidad del campo eléctrico normal.

La diferencia de potencial de 400.000 voltios que se ha señalado como actuante en el condensador terrestre *no se reparte uniformemente*. Si así fuese, la intensidad del campo sería la misma a cualquier altura y en cualquier punto con un valor aproximado de 6 V/m. Pero las mediciones efectuadas, no sólo en la superficie terrestre, sino dentro de la atmósfera, subiendo en globo libre, han hecho ver que en los primeros dos kilómetros ya se ha consumido casi la mitad de la diferencia de potencial total, y eso da para el campo la intensidad o *gradiente* de 100 V/m, que puede decirse que es el gradiente normal en el aire inferior.

Así, como ejemplo, se dan a continuación los valores medios del gradiente en diferentes lugares, con la indicación del tanto por ciento de variación anual y el de variación diurna.

	Variación media anual.	Variación anual.	Variación diurna.
Upsala (Suecia)	70 V/m	84 %	56 %
Potsdam (Alemania)	127 —	63 —	36 —
Kew (Inglaterra)	239 —	75 —	41 —
Trieste (Italia)	73 —	34 —	18 —
Tortosa	106 —	35 —	54 —
Buenos Aires	136 —	57 —	74 —
En el Océano	124 —	16 —	35 —

Variaciones del campo.

Por estos datos se ve que influye mucho en el valor del gradiente la situación del lugar, tanto geográfica como topográfica, y, sobre todo, lo que resalta de estos datos es que el gradiente eléctrico de la atmósfera *es sumamente variable*. Un registro acusa variaciones continuas, a veces en proporción casi parecida a lo que se ve en una gráfica de

viento, y esto en días despejados y aparentemente tranquilos en otros aspectos atmosféricos.

En Kew, el gradiente medio de enero es de 409 voltios, que es el máximo anual, mientras que el mínimo, que tiene lugar en junio, sólo es de 207 voltios.

Con la altura, el gradiente de potencial va disminuyendo, como se ha comprobado en numerosas ascensiones en globo libre, pudiendo decirse que a dos kilómetros de altura el gradiente es la cuarta parte del que hay en el suelo, y a cuatro kilómetros es solamente de 10 V/m, hasta llegar a los nueve kilómetros, en que Wiegand encontró escasamente 3 V/m.

Pero esto es al aire libre, sobre terreno llano o muy lejos de él; si es el caso de una montaña la cuestión es muy distinta. En los flancos o laderas el potencial es menor que en el valle; pero al acercarse a la cúspide el gradiente aumenta mucho, pudiendo citar como ejemplo las mediciones realizadas por Exner, que en el valle encontró 68 V/m, y en la cúspide midió 318 V/m. Este aumento depende de lo escarpada que sea la montaña, pues en el caso límite de la torre Eiffel se ha medido en la plataforma superior, a poco más de un metro de separación de la torre, el potencial de 5.000 voltios.

Todo esto queda explicado por la curvatura que las líneas de igual potencial toman por efecto de las montañas, como hace ver claramente la figura 21: las líneas equipotenciales, que son, en general, paralelas al terreno, tienen separación constante en la llanura, mientras que en los flancos de las montañas, en donde empiezan a elevarse, se hallan más separadas entre sí, para acercarse mucho en las cúspides, así como en todos los obstáculos que se hallen sobre el terreno, de modo que ese efecto, combinado con el que se explicó al hablar de las puntas, puede producir localmente campos de valor 30 ó 40 veces el normal o medio de aquel lugar.

El agente eléctrico, pues, es el más sensible de la atmósfera y puede ocasionar diferencias muy grandes de potencial en parajes localizados, pues no es raro que entre dos lugares inmediatos existen diferencias de 600 a 800 voltios, que en determinados puntos pueden ser de miles, y si aún cae una lluvia, esa diferencia de potencial puede ser de 15.000 ó más voltios.

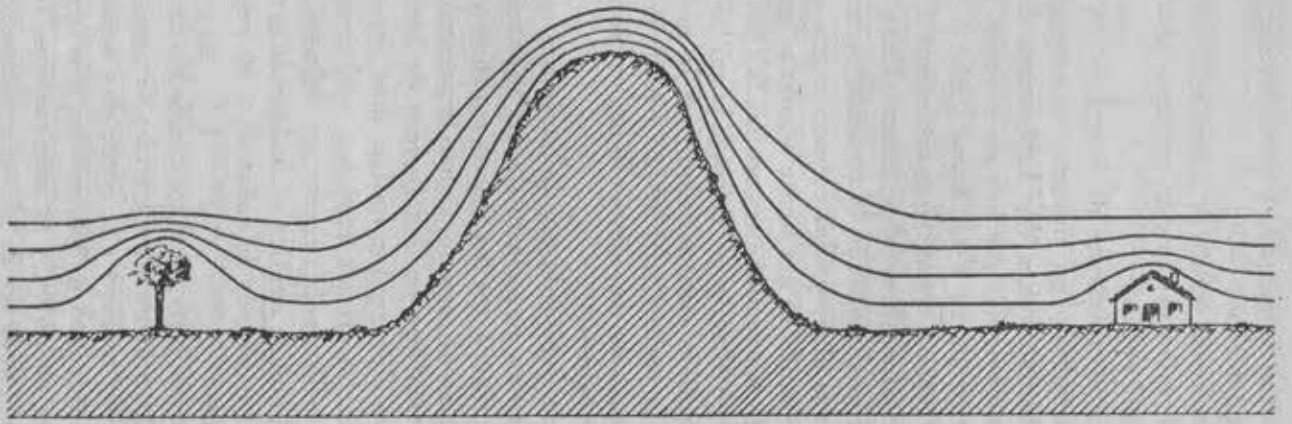


Fig. 21.—Las líneas de igual potencial eléctrico en la atmósfera se inflexan, como si fuesen elásticas, para adaptarse a las irregularidades del terreno.

En días serenos, y terreno de estepa, se han medido hasta 5.000 voltios a un metro del suelo, y los viajeros que han cruzado las estepas arábigas cuentan haber sentido el crepitar de las chispas al rozar sus vestidos o pasar la mano por los matorrales o arbustos que en ellas crecen.

De todas las influencias del tiempo atmosférico sobre la electricidad la que está mejor determinada es la de la turbiedad y turbulencia del aire, de modo que, en general, el aire «envejecido», es decir, que lleva mucho tiempo sin renovarse en una comarca, por ausencia del viento, es donde el grado de ionización es mayor.

Ionización de la atmósfera.

Desde hace largo tiempo se sabe que el aire, aun el más «puro», como el del campo libre alejado de los centros urbanos, no es aislador perfecto, que es tanto como decir que se sabe que el aire está ionizado, pues, en ausencia de otros vehículos que pudiesen explicar la descarga convectiva de un cuerpo electrizado rodeado de aire, no existe otro medio posible que el de la ionización.

Y cosa notable: si se coloca un electroscopio en el aire la velocidad de su descarga es una medida de la cantidad de iones que contiene el ambiente; pues bien: colocando el electroscopio en un sótano, en una cueva o en una gruta, se observa que la descarga del electroscopio es *más rápida* que en el aire libre; luego una primera consecuencia en cuanto se empieza el estudio de este asunto es que, *en los interiores y lugares cerrados es mayor el grado de ionización que al aire libre.*

Los iones que contiene la atmósfera son de muy diferentes clases: electrones libres, iones formados por una sola molécula, iones compuestos por un complejo de moléculas, y, finalmente, partículas o núcleos de condensación, como polvo, cadáveres de insectos microbianos, restos de humo, gotitas de vapor de agua, etcétera. Es mejor no saber lo que entra en nuestros pulmones constantemente.

Con todos esos tipos de iones se hacen dos grandes grupos: *iones pequeños* e *iones grandes*. En la atmósfera inferior y próxima a lugares habitados, y en las llanuras, predominan los grandes iones; en la atmósfera superior y en las montañas predominan los pequeños.

La movilidad de éstos es mucho mayor que la de los grandes, pues mientras que es de 1,8 cm. la de los negativos, y 1,4 la de los positivos, los grandes tienen una movilidad tan escasa que llega a ser tan sólo de 0,035 cm.; todo por segundo y en campo de voltio por centímetro.

La densidad de iones, o número de ellos, contenido en un cm^3 es también variable, pues si como cifras tipo se pueden dar en la atmósfera inferior, y en tiempo sereno, 800 iones positivos, y 680 negativos, en la atmósfera elevada es la densidad muy superior a esas cifras, pudiendo citarse las de 2.300 en montañas de 5.000 metros de elevación y 2.400 en avión a igual altura. En cambio, los iones gruesos, en donde existen, pueden llegar a densidades mucho mayores: hasta 60.000 se han medido en centros urbanos.

Este número ha obligado en algunos casos a variar la ruta de un servicio regular de aviones, como ha ocurrido en la línea París-Berlín, que fué desviada para no cruzar el Ruhr, lleno de humos de las fábricas, que producía nieblas persistentes y defectos en el encendido de los motores.

En el camino de Tetuán a Xauen, antes de llegar al lugar denominado Taranes, quien esto escribe conoció un trozo de la primitiva pista en el que al pasar por él en automóvil siempre tenía fallos el motor, y hasta llegaba a pararse, siendo el paraje bien conocido por todos los conductores.

La relación entre el número de iones positivos y negativos no es la unidad, como en principio debía serlo, sino que en virtud del efecto electrodo, que más arriba se citó, cerca del suelo es mayor el número de iones positivos que el de negativos, variando dicha relación de uno a dos, y siendo, generalmente, 1,3. En las montañas es donde la relación en cuestión adquiere los mayores valores, pues, por ejemplo, en el Teyde se ha medido el valor 2,1.

Esta diferencia entre el número de iones positivos y negativos ha de influir intensamente en los fenómenos, debidos a las colonias de iones de signos contrarios de que después se hablará.

Agentes ionizadores de la atmósfera.

La ionización de la atmósfera puede ser debida a diferentes causas, entre las cuales figuran, en primer término, las emanaciones radiactivas de la corteza terrestre, producto palpable de que la materia se *desmaterializa*,

como debe ocurrir, según se dijo antes, dentro de la hipótesis cosmosgónica de Herrera, ya que, según ella, el sistema solar va camino del solsticio sideral, hacia la entropia infinita y el estado de caos, y la radiactividad, esta respiración que tiene la Tierra, es la señal de un comienzo de agonía lentísima del ente que ya está dejándose devorar por los gusanos humanos que se aprovechan de su principio de descomposición.

Fig. 22.—Una cascada es una máquina electrostánica: produce electricidad negativa en las gotas pequeñas que salpican y se difunden en el aire y electricidad positiva en las gotas gruesas.

En segundo lugar está como causa de ionización la radiación penetrante o radiación cósmica que llega a la Tierra desde todos los puntos del Universo.

Junto a estas causas principales pueden citarse otras que son más bien de carácter local; aunque alguna de ellas, como *la pulverización del agua*, tenga extensión considerable, pero solamente superficial; las *proyecciones de polvo* o de agujas de hielo. La primera causa se conoce con el nombre de «efecto Lénard», y la segunda es el «efecto Rudge».

El efecto Lénard consiste en que si el agua se pulveriza por cualquier causa, como sucede, por ejemplo, en las cataratas o simples caídas de agua (fig. 22), las gotas pequeñas saltan electrizadas negativamente, como lo comprobó Tralles hace ya más

de un siglo. Igualmente ocurre en toda la superficie del mar cuando las olas rompen (fig. 23).

El efecto Rudge es el de electrización del aire por proyección de polvo en él, es decir, que con los vientos violentos que levantan fuertemente el polvo, sucede que la proyección de éste en el aire le ioniza, siendo esta la causa de que la ciencia alemana pretendiese la supresión de la niebla con proyecciones de arena, para, creando otros electrones, neutralizar los que ya tenía el aire.

La primera causa general citada, la de emanación radiactiva,

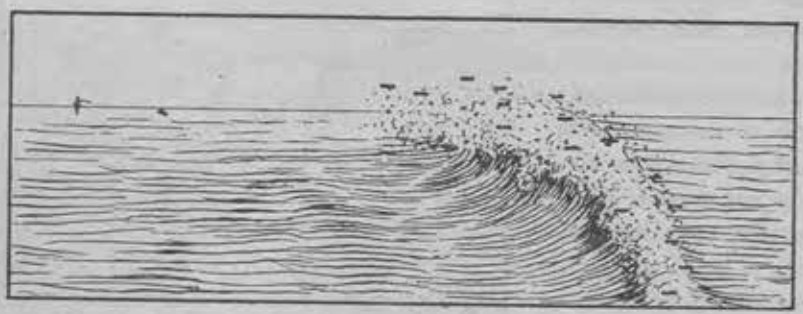


Fig. 23.—Las olas que rompen fabrican electricidad; negativa en las gotas pequeñas y positiva en las gruesas.

es la que hay que considerar como más importante en los continentes hasta los tres kilómetros de altura, mientras que sobre el mar, y a partir de los tres kilómetros de tierra, es la radiación penetrante la causa principal de ionización.

Ya solamente con estas afirmaciones se establece en seguida una consecuencia, y es que, siendo la emanación radiactiva gases radiactivos pesados, será mayor la abundancia de iones cerca del suelo, y, por lo tanto, también será más densa la ionización en sótanos y grutas. Y no solamente en estos lugares, sino en cualquier otro en que el aire esté estancado, como sucede en materias en donde existan lo que puede llamarse *capilaridades*, en las que el aire circula poco, habrá también acumulación de iones, tal como, por ejemplo, sucederá en una hacina de mies.

Si las circunstancias meteorológicas son tales que el aire tiene movimientos convectivos, en su ascendencia llevará consigo los iones y todo el aire se hará más conductor, y ocurrirá lo contra-

rio, es decir, los iones estarán acumulados en la capa inferior, si la situación meteorológica es la inversa, en la que el aire permanece casi estacionario junto al suelo. No hay que decir que habrá diferencias grandes entre la cantidad de iones que contendrán diferentes masas de aire sobre distintos lugares situadas, por las diferencias de intensidad de convección debidas a las distintas propiedades del suelo, en las que se incluyen hasta el color, la existencia o no de pequeños matorrales, hierba, etc., como sabe muy bien el meteorólogo especialista en vuelo sin motor; en días de calma, las nubes, los remates de las chimeneas de aire ascendente, dan en el cielo «la imagen proyectada» del suelo, como decía Humboldt.

Las emanaciones radiactivas que producen los efectos citados son, principalmente, las de *radio*, *torio* y *actinio*, aunque estas últimas influyen muy poco.

Estas emanaciones salen de la Tierra, pero ¿con cuál ritmo? A esta pregunta es difícil contestar; el viento aumenta la emanación, la alta presión la disminuye, como también la helada, la nieve, la lluvia: en la montaña es mayor que en la llanura; asimismo, la emanación dependerá lógicamente de la geología del suelo, siendo mayor allí donde la riqueza en los elementos citados sea más elevada, y, desde luego, esto ocurrirá en lugares en donde exista plomo, ya que éste es el último resto de la serie de los cuerpos radiactivos.

En este mismo orden de ideas hay que citar que la manifestación de la corriente telúrica topográfica, es decir, la que se produce en las montañas por diferencias de nivel, en donde, a partir de la pendiente de 10 por 100, se acusa una diferencia de potencial marcada, en sentido positivo entre la parte superior y la inferior, indica que existe un aflujo de iones negativos desde la base a la cúspide y, por lo tanto, se explica la mayor intensidad de la emanación en la zona superior de los montes.

De todos modos, lo que ocurre es que, al estar en el aire, las emanaciones se rompen y se producen sus derivados, los llamados productos *A*, *B*, *C*, en equilibrio más o menos con ellas, y se origina la ionización del aire, dando lugar a los estados de equilibrio representados por las densidades de iones que más arriba se citaron.

Por último, no hay que decir que, a las causas citadas como ionizadoras del aire, hay que añadir la acción de la luz solar, rica en radiaciones ultravioletas, aunque estas causas solares juegan su más importante papel en la atmósfera superior o *estratosfera*, que aquí no interesa. Sin embargo, conviene hacer constar que, según los trabajos de Lassen y Förstерling, el número de iones producidos por la radiación solar o velocidad de ionización, no depende del tiempo de actuación de dicha radiación, sino solamente del *seno del ángulo de incidencia* de los rayos solares.

Migración de los iones.

Ha sido inevitable enlazar la idea de migración de los iones a la de su producción, como ha ocurrido al hablar de la convección.

Pero no sólo existen esas traslaciones de iones en sentido vertical, que pudieran denominarse de «difusión iónica»: existen también otros hechos sobre los que conviene decir algunos pormenores.

Es lógico que una de las causas más importantes de la migración de iones sea el viento, de acuerdo con lo ya dicho sobre la convección, y también es evidente que la densidad de ionización dependerá de la relación entre la inmigración y la emigración de iones, de modo que esa densidad aumentará cuando la relación citada sea mayor que 1, y ocurrirá lo contrario en el caso inverso.

Si se supone ser n la densidad de iones de la masa de aire que se mueve con la velocidad v, el aflujo de iones por cm^2 de área normal a la dirección del viento será nv y, por lo tanto, si n y v fuesen constantes a lo largo de toda la trayectoria del aire, siendo las mismas la inmigración y la emigración no habría tendencia a los cambios de densidad de iones. Por el contrario, si n ó v, o su producto, se modifican a lo largo del camino seguido por el viento, habrá una tendencia al incremento de la densidad de ionización cuando el producto nv disminuya en el sentido en que sopla el viento, mientras que el incremento en igual sentido del producto nv producirá una disminución de la densidad de iones; lo cual puede aplicarse, tanto a los iones pequeños, como a los gruesos o núcleos. Estos efectos pueden ser

importantes en la proximidad de ciudades o de lugares en donde el aire reciba una considerable polución.

En este caso el valor de nv va disminuyendo con la distancia al centro productor, y durante un cierto recorrido del viento el factor considerable influye de un modo importante en la densidad de iones que resulta en cada lugar al combinarse este efecto con el de la difusión de los iones producidos *in situ*.

Otro caso que está incluído en el de migración de iones es el de la llamada *brisa de montaña*, que ha de producir un efecto

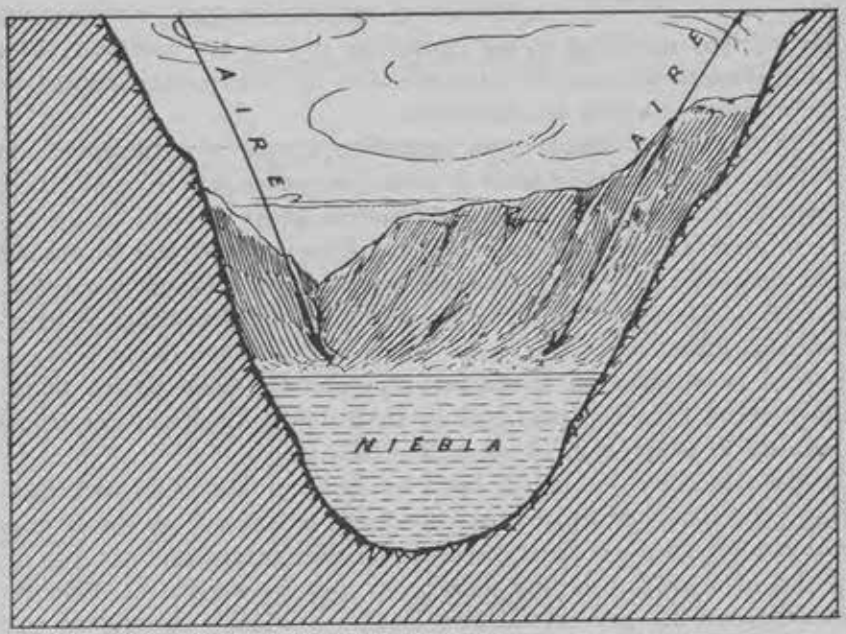


Fig. 24.—Niebla matutina por efecto de acumulación de humedad a causa de la brisa de montaña descendente.

contrario al de la difusión de iones por convección. Efectivamente, es un hecho que, al disminuir la temperatura por ponerse el Sol, el aire enfriado en la cúspide de las montañas *desciende* a lo largo de las laderas (fig. 24) y, acumulándose en el fondo, provoca la condensación del vapor de agua que produce la niebla matutina del valle. Pero es claro que este aire descendente arras-

trará consigo los iones que contenga, y, como la densidad de iones es mayor en la cúspide, siendo el número *n* mayor en ella que en las laderas y en el valle, este descenso producirá un efecto de acumulación de iones o aumento de densidad de ionización, especialmente en los días de calma y a prima noche o a la madrugada.

Turbulencia eléctrica. Fenómenos microceráunicos.

CUANDO se examina un registro de potencial atmosférico se ve que la gráfica obtenida, además de las ondulaciones que corresponden a las variaciones generales y anomalías que se señalaron más arriba, contiene otras pequeñas ondas que indican otras finas diferencias que no corresponden al fenómeno general de periodo de variación del gradiente.

Estas finas ondulaciones, pequeñas grecas o redientes de la gráfica, acusan la existencia de otro fenómeno, análogo al que se presenta en el viento, en el que existen, como es sabido, las rachas y las pausas, consecuencia de los torbellinos que se suman a la corriente general, y que caracterizan su «turbulencia»; por lo cual designaremos aquí este fenómeno con el nombre de «turbulencia eléctrica».

Así se observa en la gráfica reproducida en la figura 25 tomada en el Observatorio que la Institución Carnegie mantiene cerca de Watheroo, en Australia occidental.

En ella se ve que, desde las 8 horas hasta las 17, la turbulencia es intensa, y aunque luego continúa existiendo, es ya de menor cuantía, a pesar de tratarse de un día tranquilo.

La otra gráfica del día 6 de igual mes de agosto de 1936 representa un día perturbado por ligeras lluvias, y en ella se ven claramente las anomalías bruscas que producen las precipitaciones, aunque sean escasas, de acuerdo con lo que más arriba se dijo.

Estas ondulaciones de la gráfica sugieren la idea de que la ionizacion no es uniforme, sino desigual, en diferentes lugares y en diferentes momentos, y las consiguientes variaciones de la densidad ocasionarán las correspondientes modificaciones en la conductividad y en la carga del aire, que se reflejarán en variaciones del potencial atmosférico.

Y esto se comprende; porque es lógico suponer que los fenómenos naturales no ocurren del modo uniforme y simple que el entendimiento humano tiene tendencia a admitir para hacerlos comprensibles; al contrario: la Naturaleza es *Universo, uni* y *verso,* es decir, unidad y variedad en proporciones tales que es-

Electrograma de un dia tranquilo
30 Agosto - 1936 - Watheroo

Electrograma de un dia perturbado
7 - Agosto - 1936 - Watheroo

Fig. 25.—El registro del potencial atmosférico, aun en un dia tranquilo, muestra, durante las horas de luz, un trazado en rediente indicando el paso de las nubes de iones por la sonda de toma de potencial. En dias perturbados eléctricamente, como sucede si hay llovizna, las variaciones de potencial son muy amplias y de signos contrarios.

capan a la imaginación humana, y así, la ionización que se verifica del modo explicado, no será uniforme, como puede admitirse, en general, tomando una extensa capa de aire, sino que tendrá distinto valor en distintos puntos y en distintos momen-

tos, resultando que la uniformidad se pierde cuando se atiende a lo que pudiese llamarse «microscopia» del fenómeno.

Entonces hay que admitir que ocurrirán las cosas en la forma que trata de representar la figura 26, en la que se ven «colonias de iones», allá positivos y acá negativos, colonias cuyos restos, después de la difusión y migración, que serán menores en días de calma que en otros alterados, tenderán a desaparecer recombinándose los iones de signo contrario, dando lugar así a pequeñísimas descargas eléctricas, microdescargas, que son la causa de haberse empleado el vocablo *microceráunico* de μικρος (pequeño) y κεραυνος (rayo) para denominar este fenómeno.

El proceso será continuo puesto que continua es la producción y recombinación de iones.

Pero también esta turbulencia eléctrica puede ser reforzada por la turbulencia cinemática del aire que hará variar el factor *v*, antes señalado al tratar de la migración y, en particular, si esto ocurre entre masas de aire muy diferentes por su procedencia distinta, las descargas serán más intensas y excitarán al éter con vibraciones de mayor longitud de onda y mayor alcance, ocasionándose así los fenómenos llamados *parásitos atmosféricos* tan conocidos en la radiotelegrafía, y designados por el autor de este trabajo en su obra «Proyecto general de la Sección Geoeléctrica» con la denominación de *fenómenos crotoscópicos*, de κροτος (chirriar), figurando también en esa obra esta explicación, que creemos fué en ella la primera vez que aparece en un escrito publicado.

Este fenómeno es también de gran valor para la Meteorología práctica puesto que se presenta abundantemente a lo largo de la línea de invasión de un frente frío, siendo por eso muy frecuente en la entrada del otoño, como saben muy bien los radiotelegrafistas. Aquí se ha visto ahora cómo este fenómeno es continuo y difundido, sobre todo en la capa inferior de la atmósfera. Por todas estas razones es objeto de estudio en los observatorios geofísicos y puede ser calificado, según esta teoría, de *fenómeno microceráunico difuso.*

Lo que interesa hacer constar es que el tal fenómeno *someterá al aire a un continuo efecto de efluvio oscuro* que contribuirá a *aflojar los enlaces*, o hasta, si es más intenso, *disociar moléculas*

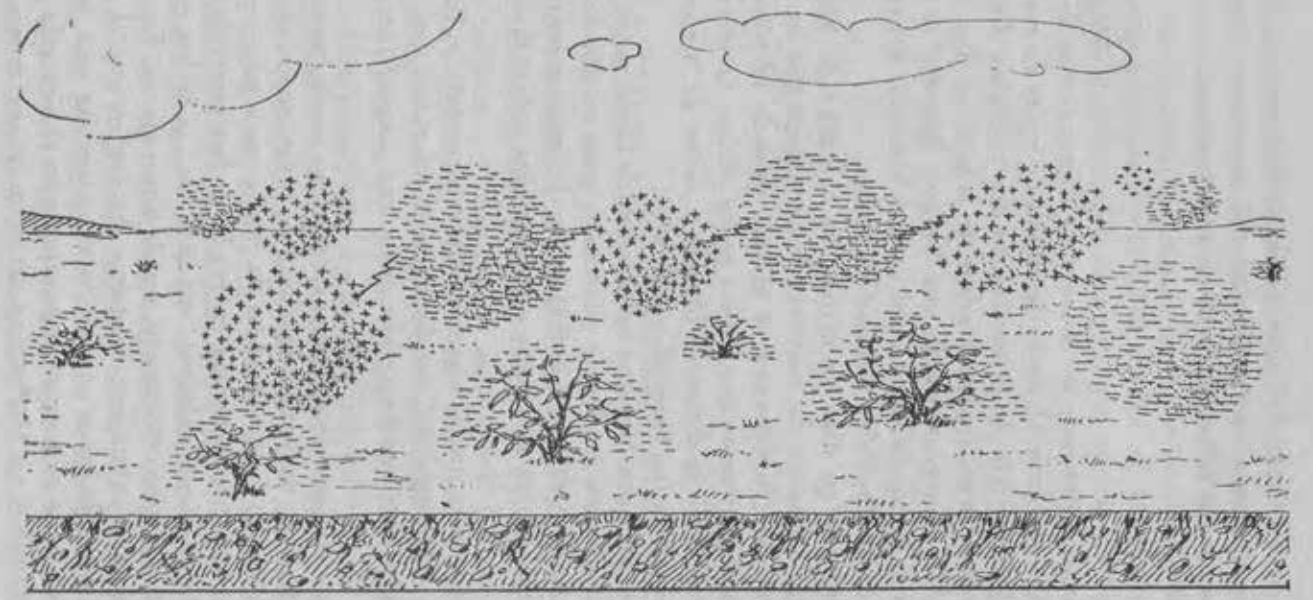


Fig. 26.—La ionización del aire no es uniforme; los iones se van formando en nubes o colonias que tienden a recombinarse y distribuirse por igual. Entre las colonias existe una tensión eléctrica. Si *salta el efluvio*, es el fenómeno llamado «parásito atmosférico».

del oxígeno componente del aire, produciendo *oxígeno atómico.*

En cuanto al grado de intensidad del fenómeno poco es lo que puede decirse; la relación entre carga, capacidad y potencial se vió que era

$$Q = C\,V.$$

La capacidad C depende de la forma y dimensiones de las colonias de iones; la carga Q, de la densidad de iones de esas colonias, y así, la diferencia de potencial de dos colonias dependerá del que cada una haya llegado a adquirir según los dos factores anteriores; todo ello combinado con lo que después se verá, a consecuencia de la modificación del campo eléctrico general por la presencia de cuerpos electrizados en el aire.

Es natural que en días de calma las colonias de iones que pueden acumularse sean de mayores dimensiones que en días de viento, como también ocurrirá lo mismo cuando la convección del aire sea menor, puesto que, como se ha dicho, la convección térmica contribuye a la difusion iónica, y serán de menores dimensiones las colonias formadas entonces.

Así que no siempre hay que interpretar de igual modo la ondulación fina de una gráfica de potencial, pues en día de viento será principalmente debida a la migración de iones, mientras que en día de calma deberá su origen a las grandes colonias de iones formadas.

Quiere decir esto, que el asunto es muy complejo y, llevando muy allá la investigación, perderemos la claridad que hemos intentado mantener no haciendo sino una exposición esquemática.

Pero, aun a trueque de complicar, conviene hacer constar que, siendo en interiores mayor la densidad de iones que al aire libre, también será mayor la producción de fenómenos microceráunicos, y hasta una circunstancia derivada de las propiedades dieléctricas del amoníaco, celulosa, madera, etc., y de los condensadores con dieléctrico compuesto, puede aumentarla. En efecto: teniendo el amoníaco mayor constante dieléctrica que el aire, si entre dos colonias de iones contrarios se interpone una capa de amoníaco, ésta *hará aumentar el gradiente* en el aire y la probabilidad del efluvio y su intensidad serán mayores, como esque-

máticamente quiere representar la figura 27. Lo mismo ocurrirá si entre dos colonias de iones existe madera o algodón.

Si los interiores están habitados, como las ropas usadas tienen siempre cierta impregnación de la excreción cutánea, entre cuyos componentes figura la urea, que al descomponerse da lugar a gases amoniacales, también esa cierta atmósfera, aunque

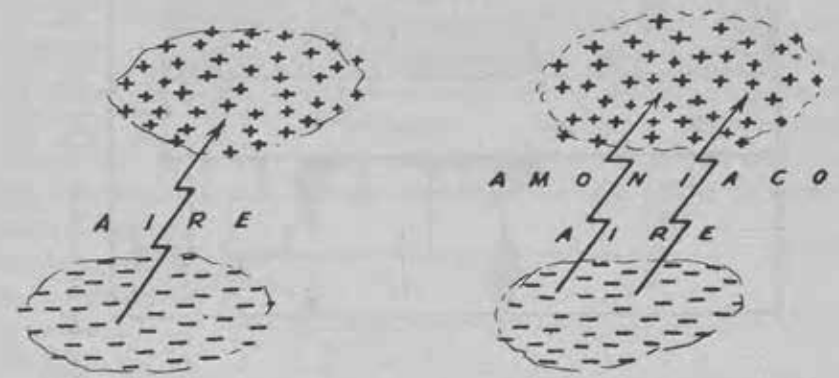


Fig. 27.—Si entre dos colonias de iones se halla interpuesto otro dieléctrico, además del aire, la fuerza eléctrica se distribuye irregularmente y en el aire es mayor que si está solo.

tenue, de amoníaco que envuelve la ropa, facilitará la intensificación del fenómeno microceráunico (fig. 28). Lo mismo ocurrirá en los colchones y más aún si alguna vez fueron impregnados de excreción urinaria. Todos estos casos darán lugar a fenómenos análogos al de los condensadores electrolíticos a base de sales amónicas, en los que se vió que una diferencia de potencial de 40 voltios pone fuera de uso el condensador.

Iguales efectos pueden producir los residuos de las pulverizaciones con insecticidas a base de petróleo o gasolina.

Tal vez se pueda decir, al leer lo que antecede, que se lleva demasiado adelante el análisis haciendo salir al asunto de sus verdaderos límites. Pero a esto se puede contestar, como se haría en cualquier caso análogo, citando el ejemplo de la mesa de Eddington. «Tengo ante mí una mesa—dice Eddington—; pero la Física me enseña que la mesa no es el algo continuo y sólido que la observación de mi yo familiar me dice; es una multitud de cargas eléctricas muy pequeñas danzando en todos sentidos

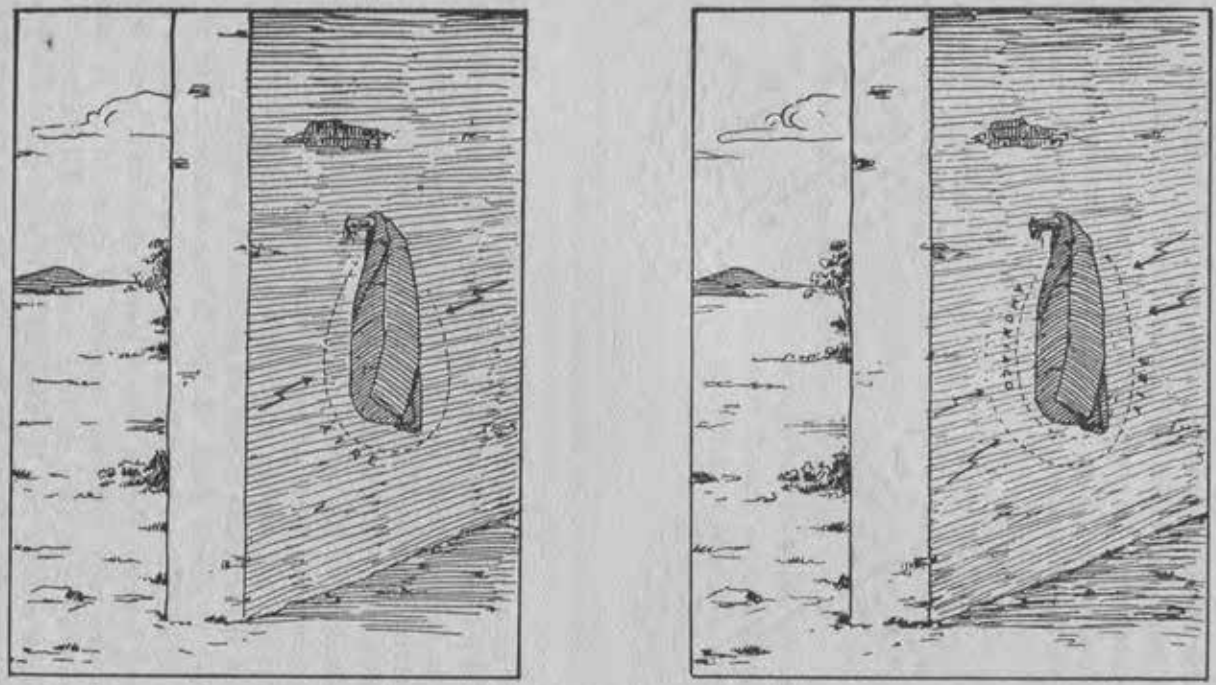


Fig. 28.—La tensión eléctrica alrededor de una prenda de ropa es mayor si la ropa está muy usada, por las emanaciones amoniacales que de ella se desprenden.

con velocidades inimaginables; algo parecido a un enjambre de abejas.»

Y es que para llegar al verdadero conocimiento del mundo exterior hay que descender al minucioso análisis de cuanto en él acontece, pues, a veces, en aquello más ínfimo, es en donde está la clave del fenómeno más grandioso.

Modificación del campo por la presencia de cargas eléctricas o de cuerpos.

En primer lugar, hay que señalar como modificación del campo, el hecho, ya citado, de que el gradiente de potencial disminuye con la altura; es decir, si el potencial se representa gráficamente sobre una llanura, las superficies son planos horizontales, pero no son equidistantes (fig. 29) si se representan conservando constante la diferencia de potencial. De este hecho se deduce necesariamente que existen cargas eléctricas en el aire, pues lo prueba inmediatamente la llamada ecuación de Poisson, que dice:

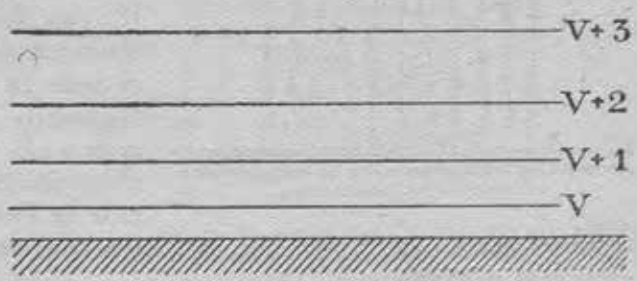


Fig. 29.—Líneas equipotenciales normales de la atmósfera: a diferencia de potencial constante, su separación crece con la altura.

$$\frac{d^2V}{dx^2} + \frac{d^2V}{dy^2} + \frac{d^2V}{dz^2} = -4\pi\rho,$$

y puesto que las superficies son horizontales, ha de ser

$$\frac{d^2V}{dx^2} = \frac{d^2V}{dy^2} = 0,$$

y, por tanto,

$$\frac{d^2V}{dz^2} = \frac{d}{dz}\left(\frac{dV}{dz}\right) = \frac{dG}{dz} = -4\pi\rho.$$

Quiere decir esta igualdad que, como $\frac{dV}{dz}$ es el gradiente, éste varía, puesto que su derivada *no es nula* y, precisamente, su va-

riación es una medida de la carga volumétrica del aire. También se deduce que, siendo $\frac{dG}{dz}$ negativo, puesto que *G disminuye con la altura*, el valor de ρ ha de ser *positivo*, o sea, que las cargas libres en el aire *son positivas*. Estas cargas pueden también acumularse y contribuir a los fenómenos antes descritos.

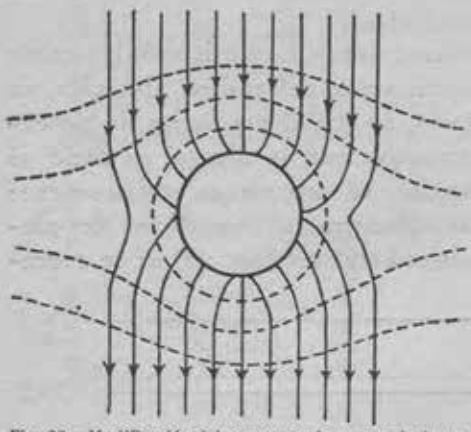


Fig. 30.—Modificación del campo por la presencia de un conductor. Las líneas de trazos son las equipotenciales; las llenas son las líneas de fuerza.

Por otra parte, la simple presencia de un cuerpo en el aire modifica el campo, según la clase de cuerpo y su estado eléctrico. Así, cuando el cuerpo es conductor en estado neutro, las líneas de fuerza se interrumpen en él y el campo es nulo en su interior; es el fenómeno llamado *inducción* o *electrización por influencia:* el interior es la caja de Faraday y el cuerpo toma el estado de dípolo (fig. 30). Pero la electricidad aumenta en la cara negativa hasta llegar a producir efluvio, mediante el cual el cuerpo pierde la electricidad negativa y llega a tomar el estado positivo al potencial medio de la zona en que se halla.

Pero si el cuerpo tiene un campo propio divergente, o sea, con mayor potencial que el dieléctrico tiene en

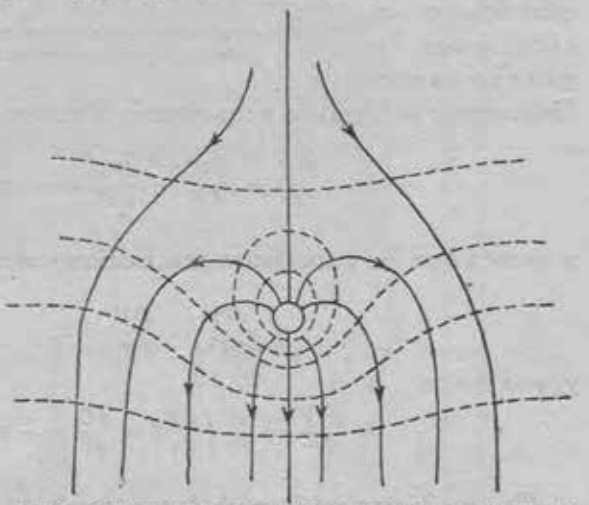


Fig. 31.—Cuerpo electrizado a mayor potencial que el ambiente. las equipotenciales (líneas de trazos) se inflexan; las líneas de fuerza se acumulan en la parte inferior.

la región en que se encuentra (fig. 31), las líneas de fuerza se inflexan y se acercan entre sí, resultando más fuerte el campo en la parte positiva, y ocurre lo contrario si el cuerpo está electrizado negativamente, o sea, a menor potencial que el ambiente (fig. 32).

Estos efectos tienen una realidad inmediata en el caso de un globo aerostático. La figura 33 representa un globo en los tres casos de: navegar horizontalmente (*a*); subir (*c*), y bajar (*b*); viéndose que en estos últimos se verifica lo anteriormente explicado, pues en el caso (*c*) el globo, que viene de zona de menor potencial, actúa como cuerpo cargado negativamente, y en el (*b*) ocurre lo contrario, por proceder el globo de zona de mayor potencial.

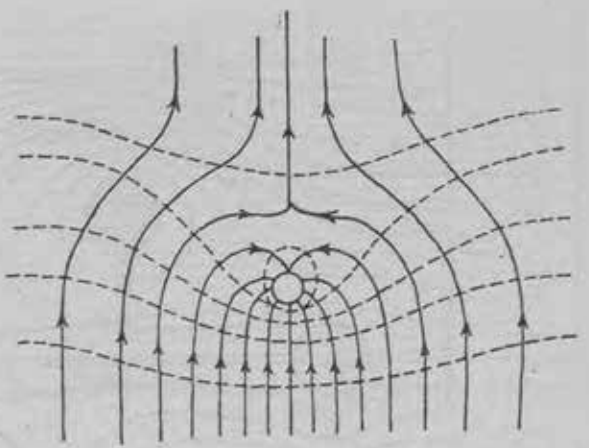


Fig. 32.—Campo eléctrico modificado por un cuerpo con carga negativa; las líneas equipotenciales se inflexan hacia arriba, en donde se acumulan también las líneas de fuerza.

Se ve, pues, que las equipotenciales se flexan como si tuviesen realidad y fuesen elásticas, y la tendencia al efluvio será mucho mayor en la zona superior del globo cuando sube, y en la inferior cuando baja.

Igualmente se producen perturbaciones eléctricas por el movimiento de un aeromóvil, ya que este movimiento puede producir los mismos efectos que se han visto en el caso del globo.

El aire que rodea un avión está fuertemente ionizado a causa de su rápido movimiento, y como estos iones son arrastrados por la capa superficial aerodinámica que lleva consigo al avión, a una velocidad mayor que la natural de desplazamiento del dieléctrico, este movimiento facilitará el paso de las cargas eléc-

tricas si el avión se acerca a una zona de la atmósfera en que sea también grande la carga.

Estos efectos eran más intensos cuando el avión llevaba antena colgante (fig. 34), por cuya punta se vió a veces el fuego de San Telmo, como también se ha visto este fuego salir de las aspas de la hélice, todo lo cual no es sino la defensa propia del avión

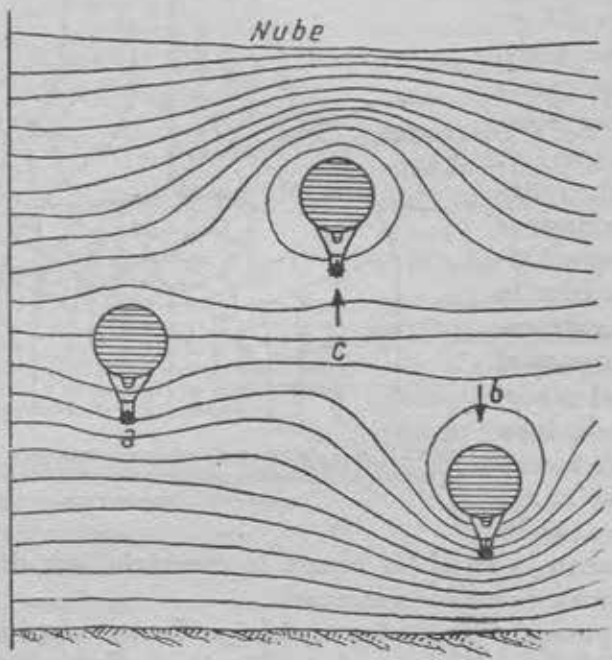


Fig. 33.—El globo libre en la atmósfera modifica el campo eléctrico. Si durante un cierto tiempo no ha cambiado de altura, las equipotenciales se deforman ligeramente, y de modo regular, encima y debajo del globo. Si el globo sube o baja, las líneas de fuerza se inflexan como si, siendo elásticas, sufriesen la presión del movimiento del globo. En ambos casos el campo eléctrico atmosférico resulta de intensidad muy diversa en distintos puntos.

contra los fenómenos ceráunicos, puesto que esas descargas tienden a igualar el potencial del avión con el del ambiente.

Los aviones primitivos, que iban provistos de patín de cola metálico, se descargaban automáticamente en el aterrizaje. Los actuales, como van apoyados sobre ruedas con neumáticos, no se descargan al tomar tierra, y por ello pueden estar a un po-

tencial muy elevado por haber navegado a una cierta altura, de potencial mayor que el del suelo, y si el descenso ha sido rápido, con gases reducidos, pueden conservar este potencial por no haber tenido tiempo de igualarle, a pesar de que los gases del escape realizan la función de igualación de un modo muy completo a la marcha normal del motor, y por eso se toman a veces precauciones especiales para que la masa del avión tenga contacto con el suelo: tales como el empleo de caucho conductor para los neumáticos.

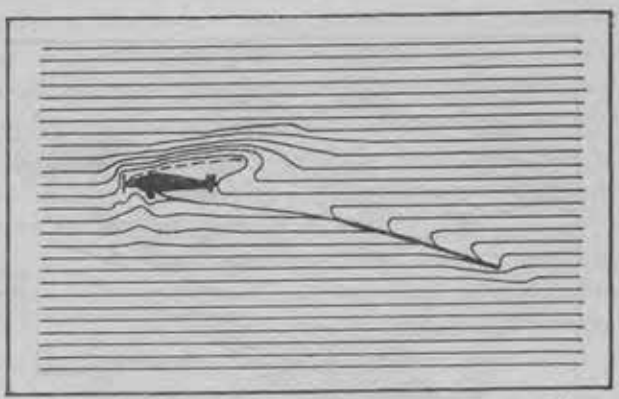


Fig. 34.—La deformación del campo eléctrico atmosférico por un avión provisto de antena.

Campo eléctrico perturbado.

A PARTIR de las pequeñas oscilaciones que presenta una gráfica de potencial, que indican las diferencias constantes que experimenta el gradiente del aire, y que son causadas por el paso de las *nubes* o colonias de iones por el punto en donde el electrómetro de medida toma contacto con la atmósfera, existe una serie indefinida y gradual de perturbaciones que llevan insensiblemente a las grandes diferencias de potencial que supone una tempestad.

En la atmósfera pueden producirse hasta verdaderas descargas eléctricas *sin que exista nube tempestuosa.*

Un modo de llegar a producirse fenómenos de esta clase es el de la modificación de la conductividad del aire por la proyección intensa de vehículos de cargas eléctricas: como el humo de una gran chimenea, el vapor de una locomotora, la pulverización de masas de agua en las grandes cataratas, por el rebote en el suelo de una fuerte lluvia. Esta misma causa es la que determina el verdadero bombardeo de rayos con que la atmósfera recibe las

proyecciones de humos y vapores de un volcán (fig. 35). En el plano de fenómenos, no tan aparatosos como éste, pero sí reales, hay que citar los casos, que especialmente se producen, cuando en un proceso de electrización del aire los vehículos de cargas eléctricas contrarias son de distinto orden de magnitud, ya que entonces, a causa de su diferente velocidad, llegan a separarse,

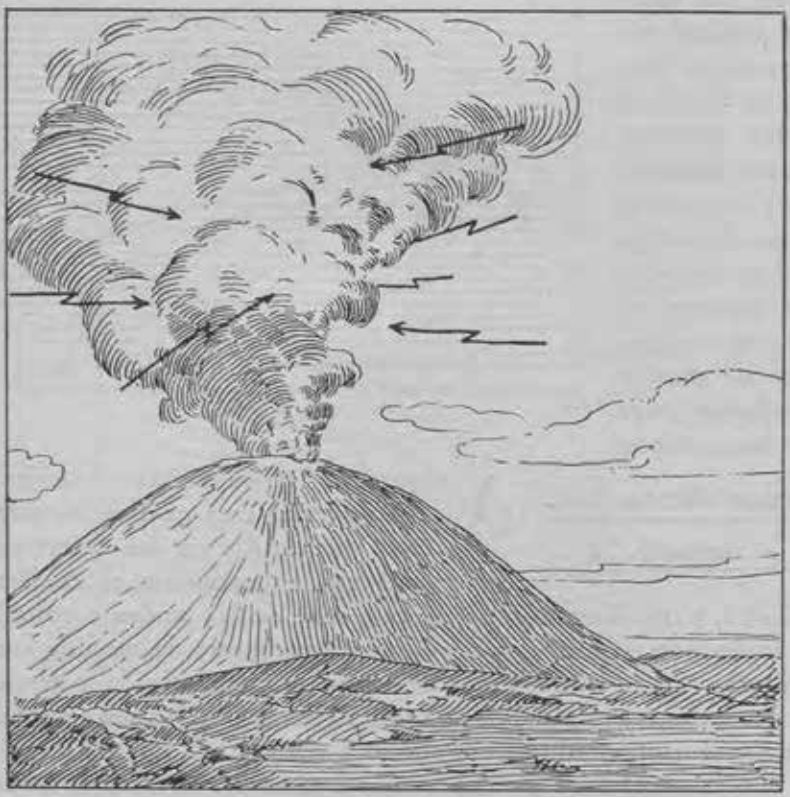


Fig. 35.—Los gases y vapores de una erupción volcánica son recibidos por la atmósfera con abundante bombardeo de descargas eléctricas.

quedando formado un condensador con el aire como dieléctrico.

Esto sucede, por ejemplo, en los remolinos de polvo o de nieve, como lo probó primeramente Rudge (1913), y después Stäger (1925). Ambos físicos establecieron la teoría eléctrica del torbellino vertical, según la cual, en un torbellino que arrastre

un cuerpo pulverizado, ocurre que las partículas pequeñas, arrancadas de las primitivas por la energía mecánica del torbellino, llevan todas electricidad del mismo signo, mientras que las gruesas partículas quedan electrizadas todas con carga contraria a la de las pequeñas, y, en su virtud, como las partículas gruesas caen al suelo con mayor velocidad que las pequeñas, llegan a separarse dos grandes colonias de iones de diferente signo, que pueden determinar una diferencia de potencial entre sí, tan grande, que *se produzca una descarga luminosa*, es decir, un *verdadero rayo*, constituyendo el fenómeno denominado *explosión de polvo* o *tormenta de polvo*.

Igualmente ha demostrado Kähler (1922-1925) que fenómenos análogos ocurren en los torbellinos de nieve.

Torbellino de polvo. Se va a examinar este caso con algún detenimiento, porque se presenta con mucha frecuencia durante el verano en muchos lugares de las tierras de España, tan fuertemente soleadas.

Estos torbellinos, que todo el mundo ha visto muchas veces formarse en un campo arado, y preferentemente sobre un camino, en donde por su color, más claro que el terreno próximo, se refleja mejor el calor y el aire se calienta más, están sujetos a las leyes de la aerodinámica, las cuales, para este caso, dan la siguiente ecuación que relaciona las cantidades que entran en juego:

$$r\left(\frac{d\varphi}{dt}\right)^2 + 2\omega \operatorname{sen} l \cdot r\frac{d\varphi}{dt} = \frac{1}{\rho}\frac{dp}{dr}.$$

Esas cantidades son:

r radio del torbellino.
$\frac{d\varphi}{dt}$ velocidad angular de rotación del torbellino.
ω velocidad angular de rotación de la Tierra.
l latitud del lugar.
ρ densidad del aire.
$\frac{dp}{dr}$ gradiente de presión atmosférica.

El término $\operatorname{sen} l$ es el correspondiente al efecto geostrófico, o sea a la fuerza desviante debida a la rotación de la Tierra por la aceleración complementaria o de Coriolis.

Aplicando esa ecuación al caso de un torbellino de un metro de radio, girando a la velocidad de una vuelta por segundo, y suponiendo la latitud de 38°, aproximadamente la media de España, y que el aire tiene su densidad normal, se obtiene para $\frac{dp}{dr}$ el valor

$$\frac{dp}{dr} = 0{,}5 \text{ mm.}$$

Así, pues, basta la pequeña depresión de 1/2 mm. para que se origine un torbellino de un metro de radio girando a la velocidad de una vuelta por segundo, es decir, con una rotación bastante intensa.

El mecanismo de formación de tal torbellino es fácil de concebir; el calentamiento solar en un lugar del suelo en que, por su color más claro y lisura mayor refleje bien el calor, comunica al aire de ese reducido espacio mayor temperatura, que le hace más ligero, y, en su virtud, asciende rápidamente, creando casi el vacío junto al suelo, por lo que se origina una llamada de aire en todo el contorno. Pero en seguida entra en acción la fuerza desviante de la Tierra, que convierte el movimiento convergente de sumidero en movimiento *vortical sinistrorsum*, y así se origina el torbellino (fig. 36) que, o permanece en el lugar de formación, cuando las circunstancias son de absoluta uniformidad, o se pone en movimiento hacia la zona en que resulte más fácil mantener la depresión. Este torbellino arrastra polvo, y la acción dinámica del arrastre hace que se separen las partículas más finas, que son fácilmente arrastradas por el movimiento ascendente, y las gruesas quedan en la parte inferior; pero, por el efecto Rudge antes citado, las primeras llevan iones negativos, y las segundas positivos, de modo que se producirán fenómenos ceráunicos, cuya intensidad dependerá del grado de ionización, en lo cual se comprende que han de influir muchos factores: constitución del polvo, intensidad del movimiento, etc., de modo que, si las condiciones son extremadas, el efluvio puede convertirse en chispa.

Entre los recuerdos de la niñez figura haber oído a un aldeano de edad decir que era peligroso verse envuelto en un torbe-

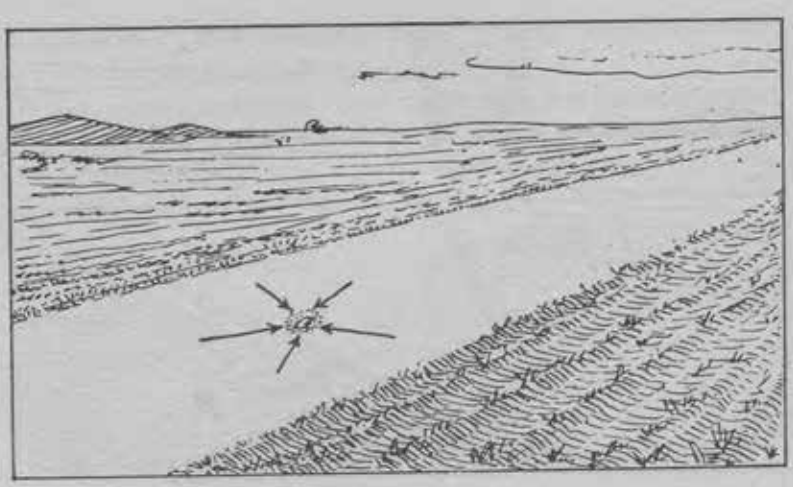
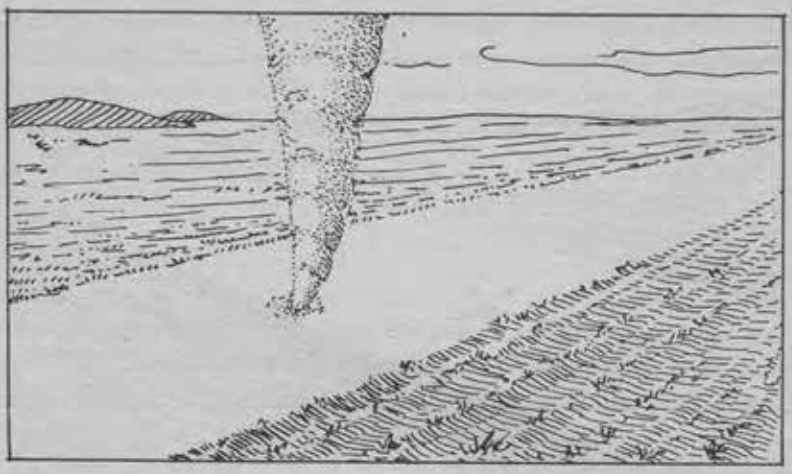
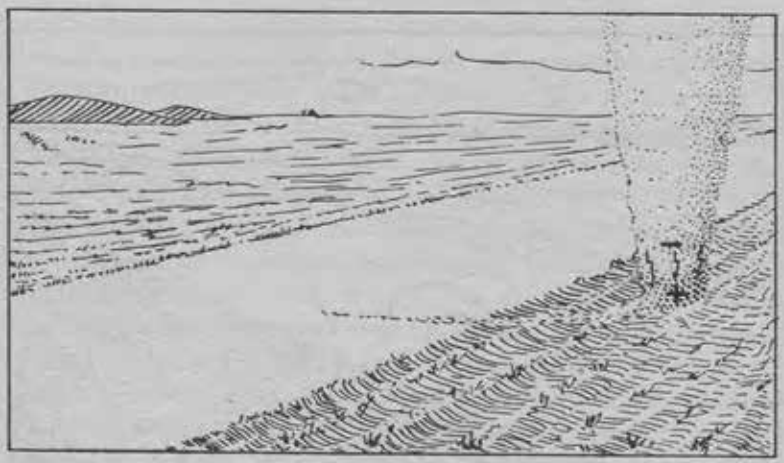


Fig. 36.—Cuatro fases de la formación de un torbellino de calor.
En (1) la zona *a*, calentada, determina una llamada concéntrica de aire.

En (2) se ve el movimiento *vortical* en que se convierte el concéntrico a causa del efecto geostrófico o de rotación de la Tierra.



La fase (3) representa el torbellino en pleno desarrollo, arrastrando polvo.



En (4) el torbellino se mueve, y la separación del polvo fino del grueso, que cae a tierra, determina dos zonas de cargas eléctricas contrarias, que hasta pueden dar lugar a una descarga con explosión del torbellino.

llino de polvo. Tal vez, sin saber por qué, las consejas tenían la intuición del peligro eléctrico.

El fenómeno se amplía y se traslada a los grandes desiertos, y es la *tromba de arena* (fig. 37), que aterroriza a las caravanas,

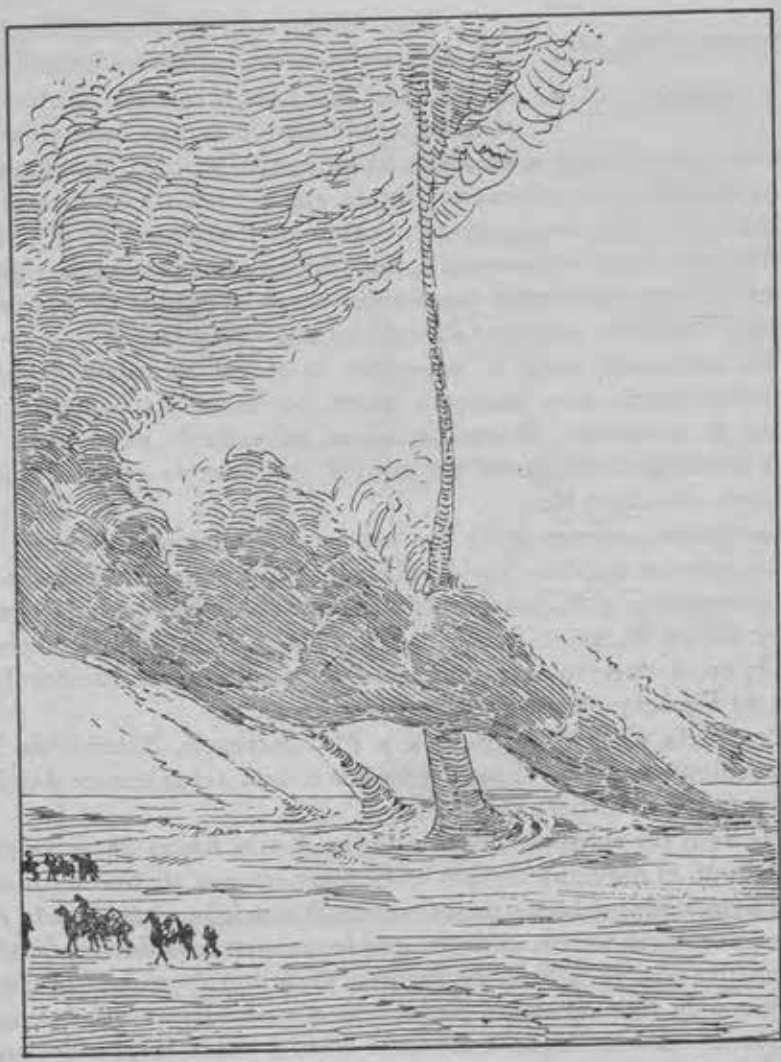


Fig. 37.—Las trombas de arena o tempestades del desierto que elevan la arena hasta las nubes, aterrorizando a las caravanas.

con sus ruidos mecánicos y eléctricos que semejan silbidos de serpientes. Supuesta ser la depresión de una tromba de 15 a 20 mm. de mercurio, la fuerza de absorción que desarrolla es de 200 a 300 kgs. por m^2, más que capaz de elevar la arena hasta las nubes.

Mecanismo de la tormenta.

Se llega ahora a la gran perturbación del campo eléctrico atmosférico producida por una tormenta. Entonces el campo, además de tomar intensidades enormes que obligan a emplear en su medición otro instrumental no tan delicado y de menor escala que el usado para el campo normal, con el fin de que tengan cabida en el registro los grandes valores que ahora se presentan, tiene hasta alternativas de signo, presentándose gradientes negativos, o sea dirigidos de abajo a arriba, y también entonces de valores muy grandes.

No se tratará aquí de presentar la teoría completa de una tormenta, teoría que, por otra parte, se halla actualmente en estado de evolución, bastando, como en toda la exposición se viene haciendo, con hacer un simple esquema de cuanto hasta la fecha está admitido.

La teoría se compone de dos partes: dinámica y eléctrica.

La primera ha sido establecida por el autor de este trabajo y fué presentada al Congreso Internacional de Seguridad Aérea celebrado en París en diciembre de 1930, mereciendo ser reproducida en el número extraordinario de la «Revue de Meteorologie», de Francia, que se dedicó al Congreso.

La teoría eléctrica es debida a Mr. Simpson, director de la Meteorología inglesa, el cual, asimismo, está actualmente dando «retoques» a su propia teoría.

He aquí un resumen de una y otra. En la figura 38 se ve representado el esquema de una nube tempestuosa, de tipo térmico, cuya formación es la siguiente: en un día en que el gradiente de temperatura sea fuerte, es decir, que la temperatura descienda rápidamente con la altura, se forman abundantes nubes de convección o de tipo cúmulos, hasta que, a mediodía en que la convección es mayor, llegan a soldarse unas y otras formando una capa continua; en una zona reducida de calentamiento más intenso, se origina una ascendencia muy rápida, que al llegar a

una cierta altura, cesa, y la masa de aire se derrama en forma de abanico, constituyendo el llamado yunque; reforzándose la ascendencia, sigue acelerándose el aire a medida que atraviesa capas más frías, y las gotas de agua que arrastra, solidificadas ya formando granizo, constituyen la nube que alcanza hasta los ocho o más kilómetros de altura.

Pero la condensación y la ascendencia, a pesar de ser ésta

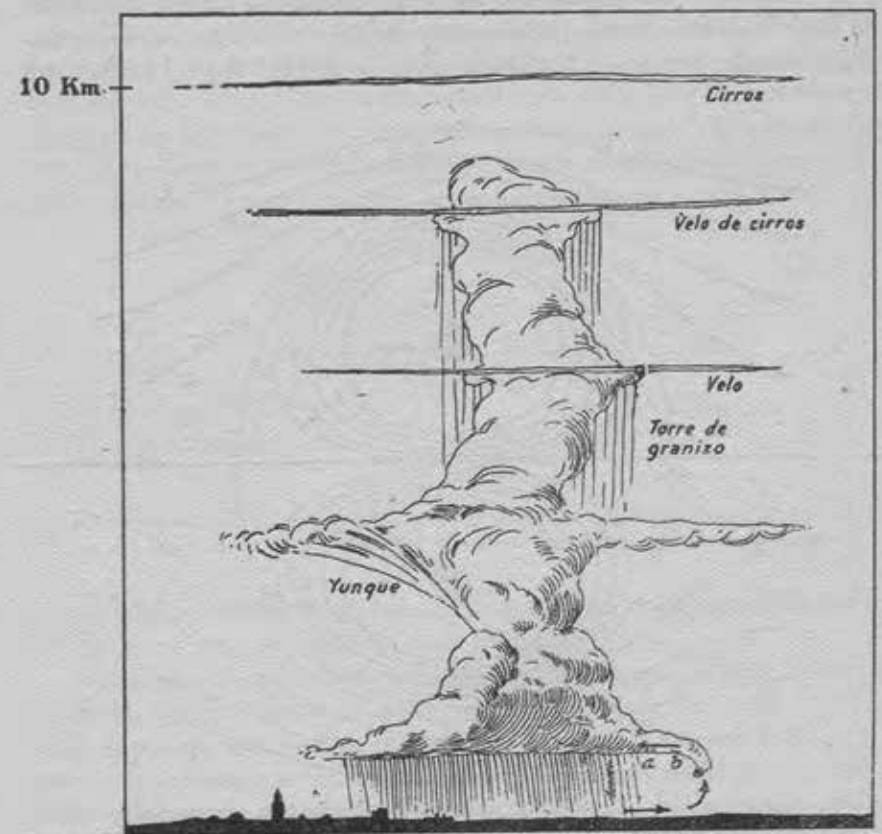


Fig. 38.—Esquema de una nube tempestuosa de tipo térmico. La ascendencia general experimenta un primer frenado a una cierta altura, en la que se produce la expansión llamada *yunque*. Reforzada la ascendencia se forma la *torre de granizo*, que llega a alturas muy grandes. El torbellino frontal es debido a la acción del aire en *a b*, tal como marcan las flechas.

de 60 o más kilómetros por hora, constituyen un equilibrio lábil y llega un momento en que el peso de las gotas formadas es su-

perior al límite que puede ser mantenido por la ascendencia del aire, y la precipitación comienza; precipitación violenta que *arrastra el aire de a, b,* formándose un vacío; la llamada de aire, unida al efecto de rebote del agua en el suelo, acaba por constituir una circulación cerrada, y entonces, formado el torbellino más o menos extenso, según la magnitud de la nube, empiezan a verificarse los fenómenos que explica la teoría de los torbellinos, según la cual, y en virtud del llamado principio de las imágenes de lord Kelvin, ocurre que si un torbellino se forma en un espacio limitado por un tabique paralelo a él (fig. 39), el torbellino

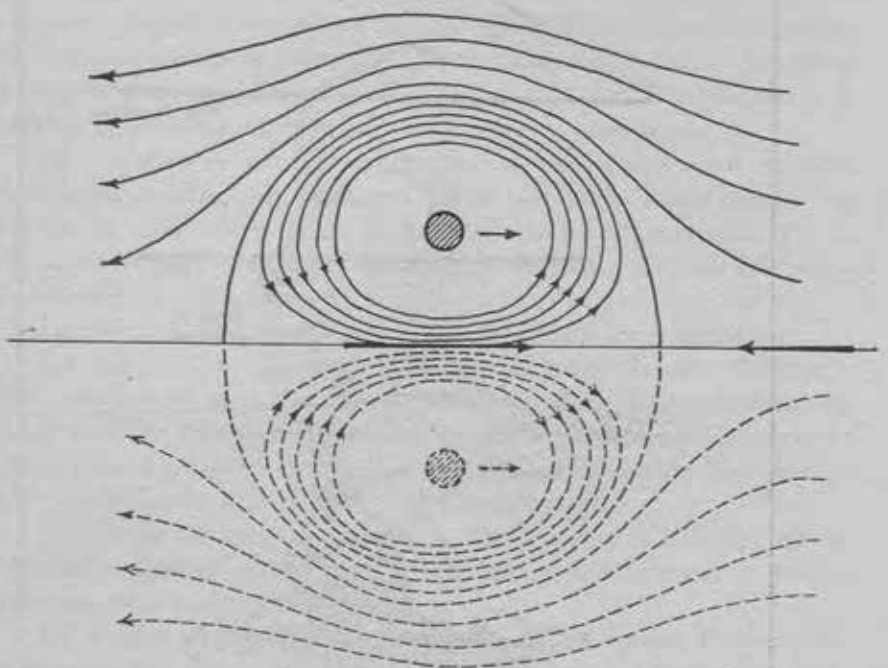


Fig. 39.— El principio de las imágenes en aerodinámica. El torbellino de la nube, por hallarse junto al suelo, recibe de éste una reacción que es la misma que, si debajo del terreno hubiese otro torbellino, «reflejado» en la misma forma que si el suelo fuese un espejo. El torbellino se pone en movimiento.

no permanece estacionario, como ocurre cuando no existe tabique, sino que se pone en movimiento, como si en lugar de existir tabique hubiese otro torbellino igual al realmente existente, pero de sentido contrario a él, es decir, su imagen óptica. Este

par de torbellinos produce, junto al tabique, una velocidad de viento cuádruple de la traslación de ambos torbellinos. Así queda explicado cómo una tormenta se mueve aunque el día sea de calma; cómo el viento en el suelo es de 90 o más kilómetros por hora, y la traslación solamente de 35 a 50, y cómo, por fin, pasada la tormenta y disipado el torbellino, la atmósfera queda otra vez en calma. Otros muchos pormenores contiene la teoría completa que, por lo dicho más arriba, no se mencionan.

La teoría eléctrica de la nube se basa en el efecto Lénard de soplado de las gotas de agua. Ese físico y sus discípulos estudiaron, durante largo tiempo, los fenómenos eléctricos ya citados que ocurren en las caídas de agua, comprobando que, cuando a consecuencia de un choque, la gota se rompe produciendo otras gotas pequeñas, estas resultan cargadas negativamente y el resto

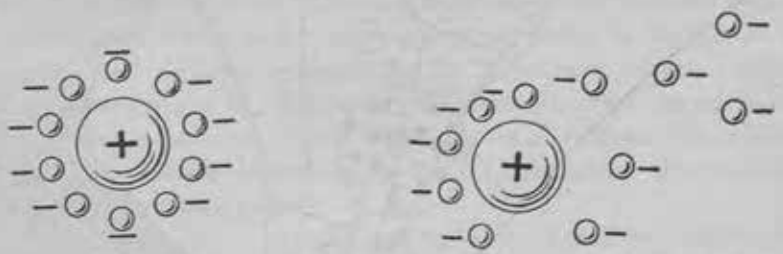


Fig. 40.—El efecto Lénard de soplado de las gotas. El viento, chocando contra la gota, arranca de ésta gotas pequeñas electrizadas negativamente, y el núcleo de la gota queda electrizado positivamente.

que queda, o núcleo más grueso, toma carga positiva; el fenómeno es, pues, una ionización por choque.

Lo mismo ocurre en el proceso de choque que la gota de agua de lluvia va sufriendo de parte del aire durante su caída y también si ocurre lo inverso, es decir, en el caso de una gota de agua que se mantiene por ascendencia del aire, como una bola de celuloide permanece sostenida por un surtidor de agua; entonces la gota recibe el choque del soplo del aire, y de la gota saltan otras pequeñas, como antes, ionizadas negativamente (fig. 40).

Pero, según se ha dicho, en la nube tempestuosa existen ascendencias enormes, de hasta 60 kilómetros por hora; cosa comprobada en los tiempos modernos de un modo «directo» por los pilotos de vuelo sin motor que han penetrado en las tormentas

y han sufrido las consecuencias de la rotura del velero; si llevaban paracaídas automáticos llegaban a encontrarse a seis o más kilómetros de altura, bien a su pesar, sufriendo temperaturas bajísimas sin protección alguna, más el bombardeo del granizo, todo con fatales consecuencias alguna vez, por lo que se decidió que un velero no llevase paracaídas automático, sino voluntario,

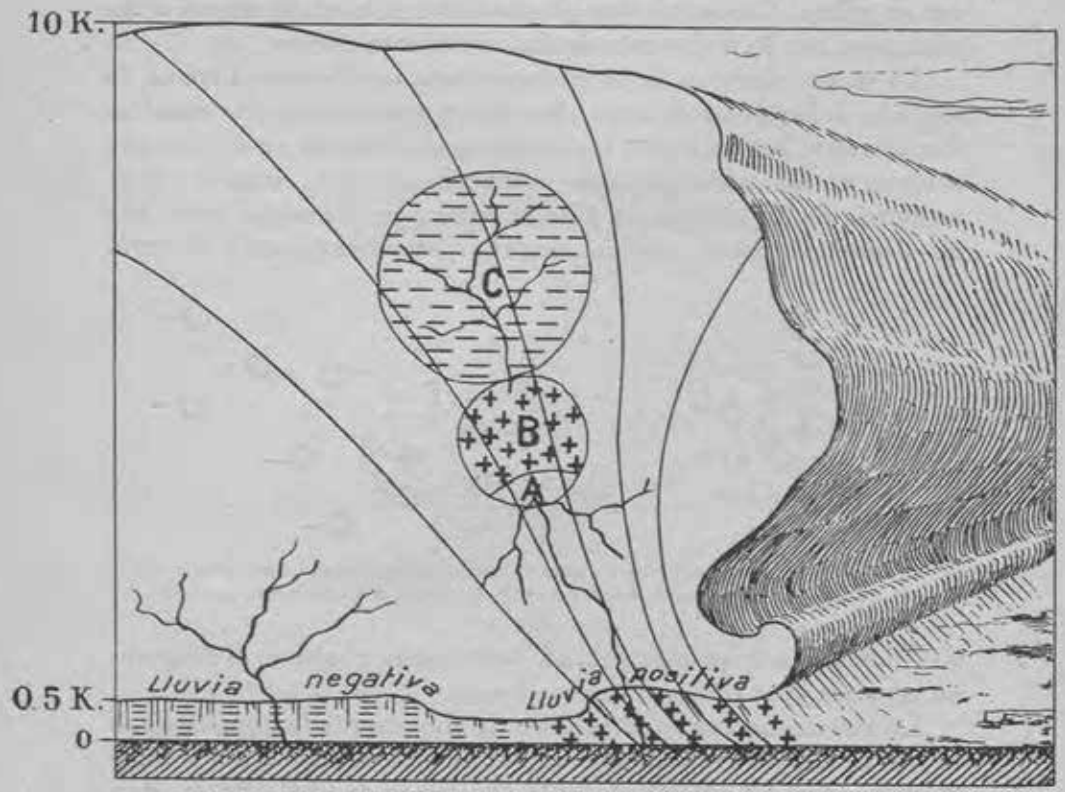


Fig. 41.—Esquema eléctrico de la nube tormentosa. En *A* está la fábrica de electricidad, en donde el efecto Lénard determina las gotas pequeñas negativas y las gruesas positivas, produciéndose las dos clases de lluvia que están indicadas. Las líneas dibujadas representan las trayectorias ascendentes del aire: *B* es el polo positivo y *C* el negativo de la nube, como una primera aproximación suponía que era la constitución de la nube en forma bipolar.

para que el piloto, al verse sin aparato, *se deje caer a cuerpo libre* hasta *atravesar la nube* y ver el terreno, para entonces abrir el paracaídas en donde ya no existe ascendencia.

Estas enormes ascendencias o vientos verticales soplan las

gotas y producen las pequeñas que se desprenden con carga negativa, y que, por ser pequeñas, siguen por más tiempo acompañando al aire, y las gruesas acaban también por caer formando el chaparrón en la parte anterior de la nube.

Así resulta el esquema de nube que se ve en la figura 41: *A* es la fábrica de electricidad, *B*, el polo positivo, *C*, el negativo, siendo generalmente la carga de ambos polos de 100 o más culombios.

El espacio *B* se admite ser de unos dos kilómetros de diámetro y el *C* de seis kilómetros.

Estas cargas, llegando a producir en algún punto el potencial explosivo, dan lugar a chispas que pronto volverían todo al estado neutro sino existiese la fábrica *A* de electricidad que perdura mientras exista ascendencia.

Así han quedado resueltas las dos grandes dificultades que la tormenta presentaba a los meteorólogos: cómo la tormenta se movía sin haber viento general que la arrastrase; cómo, a pesar de los relámpagos y la pérdida de electricidad, ésta no se agotaba, sino que una y otra vez, hasta 1.500 que es el número de relámpagos de una tormenta ordinaria, toda la máquina eléctrica recobraba su primitivo estado.

Campo eléctrico de la * * tormenta. * *

Aun cuando la constitución eléctrica de una nube tempestuosa sea «normalmente» la que se ha esquematizado más arriba, se comprende bien que como la Naturaleza, siguiendo leyes inmutables y rígidas, presenta la más rica variedad en los fenómenos, no habrá esa rigidez de constitución, sino que predominando el carácter de dípolo, existirán también polos secundarios que producirán modificaciones al campo principal; el eje del dípolo tendrá inclinaciones caprichosas, resultando así un campo sumamente irregular; las líneas equipotenciales dejarán de ser horizontales; su separación no guardará la menor relación con la del tiempo sereno, y el gradiente tomará valores muy superiores al normal como se indicó más arriba.

Partiendo, pues, de la constitución esquemática bipolar habrá líneas de fuerza de los cuatro tipos que representa la figura 42, en la cual se ven: líneas de fuerza *a* que van de la zona positiva

de la nube hacia el suelo; las líneas *b* que enlazan en la nube los dos polos; las líneas *c* que van desde la nube, en su parte negativa, al suelo, y, por fin, las líneas *d* que se pierden en la atmósfera superior. Los campos inducidos en el suelo son positivos en *M* y *N* y negativos en *P*.

Estas líneas de fuerza *d* hacen perder rápidamente la carga

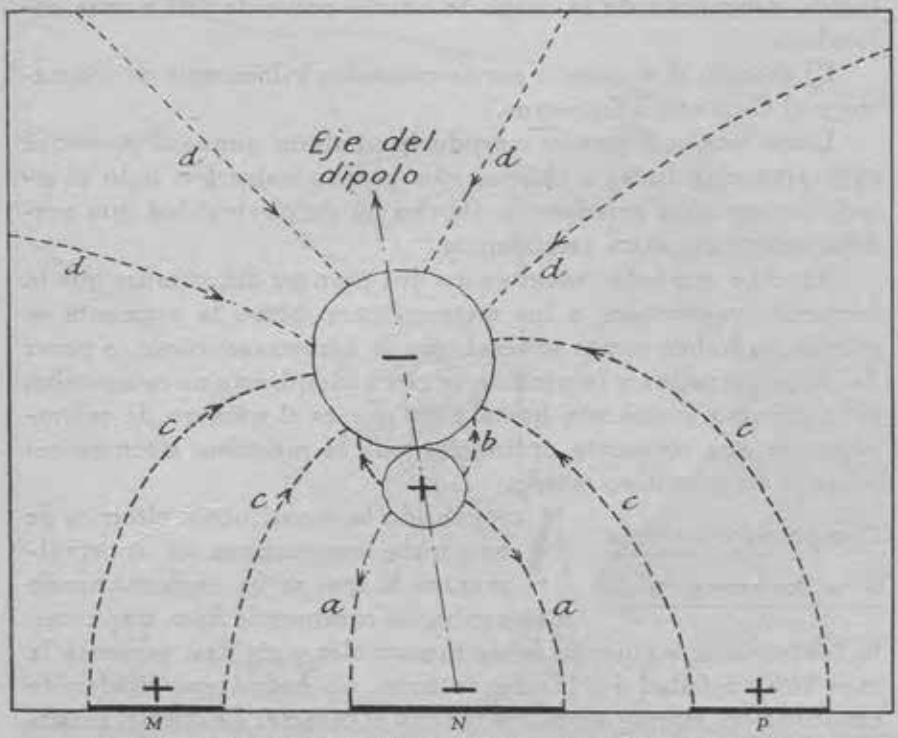


Fig. 42.—Campo eléctrico de la tormenta bipolar con las diversas clases de línea de fuerza:
a que van del polo positivo a tierra.
b de un polo a otro.
c del polo negativo a tierra.
d que se pierden en la atmósfera.
Se ven también los campos eléctricos diversos inducidos en el suelo.

de la nube, pues hallándose en la zona de los 8.000 metros de altura, en la que según las ascensiones de Wiegand, la conductividad de la atmósfera es *40 veces* la del aire junto al suelo, resultaría que en un segundo la nube habría de perder 1/15 de su carga, que aun suponiéndola de 20 culombios, en 20 segundos

habría desaparecido, y si a esto se añade la recombinación de cargas por los relámpagos, se comprende que se fuese un enigma para los físicos el mantenimiento de la carga de la nube hasta que apareció la teoría de Simpson.

El otro sistema de líneas, el de equipotenciales, que según se ha dicho toma formas caprichosas, está representado en la figura 43, en donde, a título informativo, se hacen constar algunas cifras.

Aun cuando según se ha indicado, actualmente evoluciona la forma que se admite para la constitución eléctrica de la nube, tendiéndose al tipo normal tripolar; *positivo, negativo, positivo,* de arriba a abajo, ello no altera esencialmente cuanto se ha expuesto. En este tipo tripolar, también ideado por Simpson, las causas productoras de cargas serían el efecto Rudge para el polo superior positivo, formado a bajas temperaturas, y el efecto Lenard para el grupo inferior.

De cualquier modo que sea, en campos tan intensos, los efectos de inducción son enormes, y las manifestaciones eléctricas numerosas e insospechadas.

El ingeniero Geógrafo, Ilmo. Sr. D. Paulino Martínez Cajén, cuenta que hallándose observando el vértice geodésico de primer orden, Collarada, a unos 15 kilómetros de Canfranc, en un día del mes de julio de 1914, se formó una pequeña nube oscura de carácter tempestuoso y, en estas condiciones, al tocar el aparato con que realizaba las observaciones, saltaban chispas abundantes, así como en el quitasol que mantenía un peón-ayudante, el cual, al darse cuenta de ello, abandonó el trabajo así como los demás ayudantes, y no volvieron hasta que la nube se alejó.

Quien esto escribe, yendo a caballo por la carretera de Madrid a Arganda durante una tormenta, vió saltar un verdadero zig-zag de chispas entre el hilo telegráfico del costado de la carretera y el suelo.

Por fin, a título informativo, se dirá que en cada instante, en toda la Tierra son unas 1.600 las tormentas que se encuentran en distintas fases de su evolución, produciendo enormes cantidades de energía que toda se disipa sin utilidad alguna. Pero, cosa notable, en las costas del Perú jamás se ha producido una tormenta

Una observación curiosa para terminar.

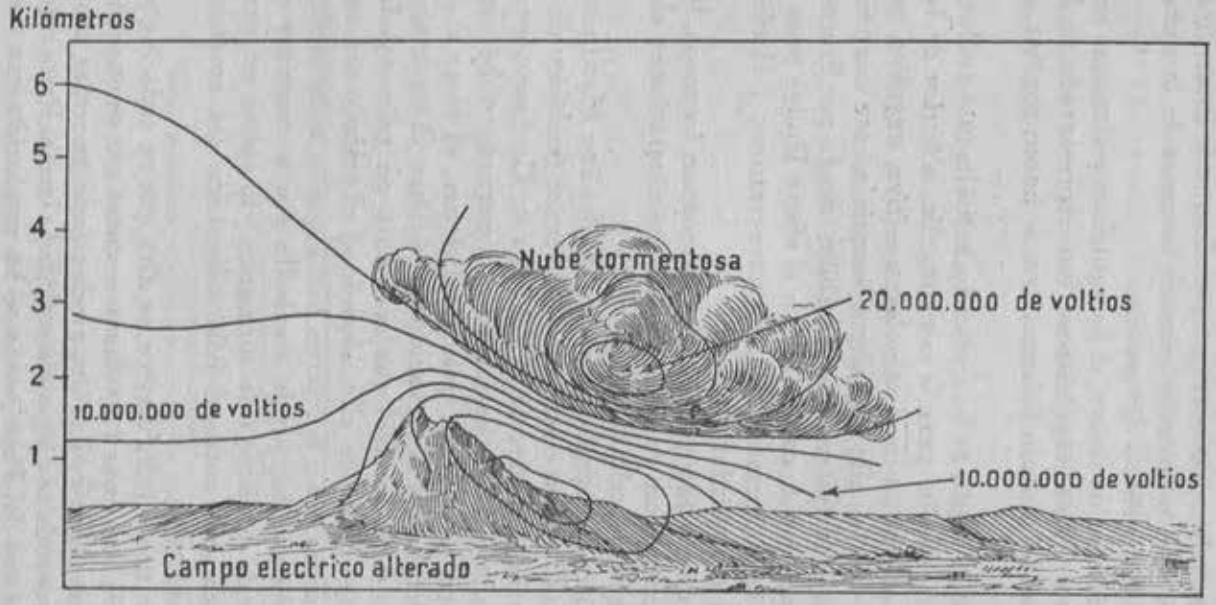


Fig. 43.—Las líneas equipotenciales de una nube tempestuosa, en donde se consignan algunos datos aproximados que dan idea de las cifras a que llega el potencial eléctrico.

El mecanismo dinamo-eléctrico de una tormenta, tal como se ha explicado, es uno de los miles de episodios que vive el agua en su continuo trajinar por la Tierra. Sube del fondo del mar a la superficie por la acción del Sol; se evapora, asciende en el aire; se condensa en las nubes; viaja por encima de los continentes, cae en la lluvia; se filtra o corre; vuelve a la superficie por un manantial o desciende por el arroyo al río y de éste al mar. La gota de agua que escurre del pico de la jarra que tenemos delante ha hecho largos recorridos hasta el momento en que la contemplamos: ha sido bebida millones de veces; ha refrescado el pico de la golondrina que en vuelo rápido roza la superficie de la laguna; se ha estremecido en el huracán y en la tormenta; ha brillado en el arco iris; ha sido fresco rocío matinal en la rosa; ha estado en el cristal de hielo de los cirros más altos que el vuelo del avión; ha dormido en el frío lecho de las nieves perpetuas; ha estado en la bruma, en la niebla, en la tempestad, en los ríos, en el mar y, así, dando la vuelta a la Tierra, ha llegado a nosotros. Y cuando vuelva al mismo lugar habrán transcurrido ¡3.000 años!

Dejando esta digresión sobre el eterno ciclo de las cosas, volvamos a nuestros fenómenos eléctricos.

Descargas luminosas.

Se ha visto que en los gases un campo eléctrico creciente llega a producir sucesivamente tres tipos de descargas o movimiento de electrones mucho más rápido que la corriente de desplazamiento del dieléctrico: *efluvios oscuros, penachos eléctricos* y *chispas.*

Cuando estos fenómenos se producen en la atmósfera reciben los conocidos nombres de *fuego de San Telmo, fuego de los Andes y relámpagos difusos, lineales* y *en bola.*

El *fuego de San Telmo,* que es el efluvio luminoso sin térmica alguna, producido por la vibración del éter excitado por la corriente iónica que, a causa de su mayor intensidad, llega a la longitud de onda de la luz sensible a nuestra retina, como se explicó anteriormente, es análogo a la luz emitida por los gusanos de luz y al ideal de los medios de alumbrado que, para ser económicos, solamente debían producir luz sin acompañamiento de calor alguno.

Generalmente se presenta el fuego de San Telmo en los lugares elevados, pero también en los mástiles de los buques, y en las llanuras, por las puntas de postes, etc. Basta que el campo general de la atmósfera llegue a una intensidad de valor múltiplo por 2 ó 3 al normal para que en los puntos de gran curvatura, como las puntas de la hierba, de las hojas, de tallos secos, etcétera, alcance valor próximo al explosivo, y entonces se inicia la emisión de iones acompañada de luz. Toepler estima la intensidad de la corriente iónica que produce la luz difusa en 10^{-4} amperios por cm^2, y cuando toma la descarga el aspecto de penacho, la intensidad citada corresponde a cada uno de los penachos elementales.

No hay que citar los episodios guerreros que, desde César, fueron acompañados de fuegos de San Telmo en las armas metálicas: hasta se citan casos en que el fuego de San Telmo ha salido de una persona. También se puede citar lo ocurrido en una ascensión aerostática militar nocturna por los años 1909 a 1910, siendo los tripulantes el entonces Comandante Aceytuno y Tenientes Jiménez Millas y Balseyro; se observó que, cada vez que se acercaba la mano a la cabeza descubierta de un tripulante, se le erizaban los cabellos y salía un chorro de chispas, cosa que en la oscuridad de la noche era perfectamente visible. La experiencia fué repetida muchas veces en aquella ascensión por los dos tripulantes jóvenes. El piloto francés Levée vió, en el casquete inferior del globo, un fuego de San Telmo que duró un cuarto de hora. Efecto corona. (El efecto corona en los postes de una línea de fuerza eléctrica es de igual naturaleza.)

El *fuego de los Andes* es un fenómeno análogo, pero así como el de San Telmo es continuo o, al menos, con intermitencias bastante espaciadas, el fuego de los Andes tiene la característica de su intermitencia rápida, a modo de relámpagos difusos que se presentan en los Andes muy frecuentemente, y también alguna vez en los Alpes suizos, aunque en estos parajes nevados el fenómeno eléctrico más frecuente es el de sentirse crepitar de chispas y erizarse los cabellos, comprendiéndose la rareza del fenómeno del fuego en Suiza por la diferencia de latitud, aun cuando en verdad no está establecida de un modo satisfactorio la teoría de tales descargas, precisamente intermitentes.

Los *relámpagos difusos* son descargas luminosas de muy corta duración, que iluminan el cuerpo de la nube tempestuosa por acumulación de efectos, ya que su formación es en cada gota que está rodeada de una descarga luminosa. Esta clase de relámpago, que no es sino exactamente un fenómeno microceráunico intenso, se confunde mucho con la iluminación de la nube a consecuencia del relámpago ordinario lineal que, saltando en el interior de ella, no es visible.

El *relámpago ordinario o lineal* es el tipo clásico de descarga luminosa, que se diferencia de las descritas en los grandes valores que alcanza la corriente iónica.

La dirección de la corriente (sentido del movimiento de los iones positivos) es generalmente la del campo, dirección que no debe ser confundida con aquella en que el relámpago se extiende o propaga; existiendo relámpagos positivos o en sentido del campo, y negativos o en el contrario.

Cuando la descarga es entre tierra y nube, ya en sentido positivo, ya en negativo, es el rayo.

El rayo es como si fuese un espíritu fino, maligno o estúpido, clarividente o ciego, voluntario o indiferente; pero siempre único y asombroso; es como un ser misterioso que obra sometido a leyes superiores e invisibles que se escapan a la percepción humana. Una vez, quita la vida a una persona y deja sus vestidos intactos; otra, deja desnudo a un hombre sin hacerle ningún daño. Y es que el juego de los dieléctricos, de los caminos más fáciles para el rayo, es la consecuencia de condiciones que, si obedecen a leyes conocidas por el hombre, es tal su variedad que no le es posible tenerlas en cuenta por ignorar la verdadera disposición de las cosas, y como la Naturaleza sigue ciegamente el principio del mínimo trabajo, aunque este mínimo difiera solamente en millonésimas de los estados inmediatos, el rayo busca siempre la trayectoria más adecuada a las circunstancias, que resulta así inexplicable para los humanos.

Se compone el relámpago o rayo del canal principal por donde va la corriente, y de sus ramificaciones, que son más abundantes en los relámpagos positivos que en los negativos: el canal es lo que forma el relámpago, que principalmente aprecia el ojo humano.

Las dimensiones transversales del canal alcanzan de 40 a 50 centímetros, aunque la corriente principal va por un camino central de pocos centímetros de anchura.

La corriente llega hasta los 10.000 amperios y a más, según se ha comprobado recientemente con aparatos de medida más perfecta, y la longitud normal es de dos a tres kilómetros, aunque frecuentemente alcanza los 10, y en raras ocasiones 50 kilómetros.

La duración del relámpago oscila entre 1/1.000 y 1/50 de segundo.

El comienzo del relámpago tiene lugar en uno de los ramilletes terminales, en donde se inicia la concentración iónica que determina la descarga que se va *propagando*, puesto que las cargas, al avanzar, van creando en cada punto las mismas condiciones que las iniciales, así que el fenómeno, aunque rápido, es *progresivo:* hoy no se admite que existan las enormes tensiones que exigiría una chispa de tres o más kilómetros de longitud, sino que se supone que en un campo de intensidad grande, por ejemplo, de 10 a 13 kilovatios por centímetro, en el polo de una gruesa gota, se producen los 30 ó 40 kilovatios que requiere la explosión, y allí el relámpago comienza, siguiendo luego el proceso progresivo indicado, y, por ello, a veces, parece como si la descarga estuviese, un momento, dudando del camino que va a tomar, hasta elegir el de mayor gradiente que resulta de la acumulación de cargas y del efecto de los dieléctricos compuestos, que se explicó oportunamente.

El relámpago no consiste en una sola descarga, sino en muchas consecutivas, *aperiódicas* pero *no alternas*, como antes se creía, siendo la principal y más intensa la segunda: es decir, el fenómeno es de mecanismo análogo al microceráunico, del que solamente se diferencia por su intensidad.

Es interesante hacer constar que, entre los fenómenos de movimiento de iones, solamente tienen efectos físicos-químicos moleculares y atómicos, comprobados hasta el momento, el efluvio oscuro y la chispa disruptiva, pero no así los efluvios luminosos del tipo de los llamados fuegos de San Telmo.

A pesar del extenso cuadro de los fenómenos eléctricos terrestres no serán nada si se los compara con los que deben tener lu-

gar en el Sol, en donde nubes incandescentes son proyectadas a 300.000 kilómetros de la superficie solamente por la acción de repulsiones electrostáticas.

Y pasada esta ojeada sobre los fenómenos de la combustión y eléctricos se da por terminado lo que pudiese designarse como *exposición de los fundamentos* en que se apoyarán los razonamientos que se han de hacer en lo que sigue.

III. LAS COMBUSTIONES ESPONTÁNEAS

III. LAS COMBUSTIONES ESPONTÁNEAS

Contra factum non valet argumentum.

En la atmósfera primitiva de la Tierra.

RETROCEDAMOS con la imaginación todos los millones de años que es necesario vivir hacia atrás hasta contemplar el espectáculo de la atmósfera incandescente de la Tierra, aquella atmósfera en la cual los Océanos actuales formaban parte de las llamas que envolvían al Planeta; esas llamas, en aquel remoto entonces, estaban denunciando una oxidación, es decir, eran la muestra de una primitiva combustión espontánea. En aquel tiempo, nuestro astro-habitación tenía «vida propia» y no permitía que nadie se aprovechase de él, ni hacía falta que ningún parásito se valiese de su ingenio para encender un fuego.

Cuando, enfriándose nuestro astro, empezó su decadencia, en aquel infierno que todavía era, llegó a «llover» hierro, níquel y otros metales (2.500°), iniciándose con esas lluvias la formación del núcleo planetario para, más adelante y constituído ya casi del todo tal núcleo, una débil costra empezase a dibujarse aquí y allá, mientras aún, cantidades indescriptibles de gases y vapores libraban gigantescas batallas de las que, por fin, acabó por llover agua hirviente (100°) que, al caer sobre los metales, entre los que predominarían los ligeros, que serían los que principal-

mente formarían la costra que cubría la Tierra, se producirían combinaciones y descomposiciones innúmeras, quedando, como monumento a la memoria de lo pasado, el nitrógeno libre actual en la gran proporción que existe en la atmósfera, ya que sin duda estaría primitivamente combinado con el oxígeno, que existiría en cantidad mucho mayor que la de hoy, y fué gastado en oxidar los metales, formándose la alúmina, la cal, el óxido de hierro, etc. Así, pues, también alguna vez llovió ácido nítrico (86°), que disolvería metales, emitiendo vapores nitrosos y transformando la atmósfera en una mezcla de gases corrosivos, entre los que figuraría el cloro, hoy en forma principalmente de sal marina y tempestades apocalípticas, mantendrían la agitación constante de aquella atmósfera con abundancia de fenómenos eléctricos; el cloro disputaría al oxígeno la captación de hidrógeno, con el que se combinaría por la acción de la luz solar, cuya energía química es tal, que en una atmósfera compuesta solamente de cloro e hidrógeno, en cada minuto, se formaría una capa de gas clorhídrico de 35 metros de espesor.

Pero el enfriamiento seguía su inexorable ley, llevando al Planeta a estados de vejez cada vez más avanzados, y, por fin, las llamas se transformaron en mar, el Panthalasa, que envolvió por poco tiempo toda la Tierra, pues pronto las arrugas formaron los mares y las tierras, y la atmósfera dejó de ser corrosiva para pasar a ser asfixiante por exceso de ácido carbónico, que después, las plantas, que ya habían nacido, redujeron y, fijando el carbono, dejaron libre el oxígeno.

Este cuadro de fenómenos químicos, muy a la ligera descrito, como basta para nuestra finalidad, hace ver que en la infinita variedad de reacciones, de las que la atmósfera ha ido siendo teatro, han predominado o han sido casi, exclusivamente, *oxidaciones*, cuando se fijaba oxígeno, y *reducciones* cuando éste quedaba libre.

Las oxidaciones y reducciones fueron, pues, los modos de transición desde la atmósfera primitiva a la atmósfera actual.

La vida en el Planeta. Y AHORA mismo no se ha interrumpido el proceso: la vida le continúa. La esencia de la vida, el protoplasma, tiene avidez extraordinaria por el oxígeno: se apodera de él con

tal rapidez que no puede existir libre en su proximidad; pero no le absorbe para sí, sino para oxidar las reservas acumuladas; el protoplasma solamente preside y dirige los cambios químicos.

La vida se desarrolla a base de carbono, hidrógeno, oxígeno y nitrógeno; estos cuatro elementos dan, dirigidos por el protoplasma: albúmina, fibrina, caseína y gelatina. Al faltar la vida se convierten a la forma amoniacal y carbónica. Si solamente intervienen los tres, sin nitrógeno, se forma la serie del almidón; azúcar, alcohol, vino, cuerpos grasos, que no hacen más que pasar por el cuerpo del animal para ser oxidados y consumidos por el oxígeno, que entra por la respiración entreteniendo la vida. Los seres no son sino fuelles condenados a soplar, bajo pena de muerte, que, con su incesante funcionar, hacen que entre las criaturas y los gases de la atmósfera se estén realizando continuamente cambios, de modo que los elementos incorporados, un momento, al organismo, a este torbellino que, como dice Cuvier es la vida, vuelven otra vez al flúido aéreo que, así, por un proceso de encadenamiento de infinitas muertes, alimenta y mantiene la vida universal que existe en la Tierra.

Y todo, según se ha dicho, por oxidaciones y reducciones. Pero si la atmósfera tuvo aquellas energías que se han citado, y ahora tiene que contentarse con estas otras, mucho menos intensas, aunque más nobles por ser las que entretienen la vida, no es de extrañar que alguna vez, como triste recuerdo de su virilidad, las manifieste de nuevo, convirtiendo una oxidación lenta en otra rápida, es decir, en una combustión.

Es, pues, una realidad la combustión espontánea que, desde luego, podrá afirmarse que no será de frecuente presentación, porque el hecho de que viva la Humanidad lo prueba así.

Las distintas clases de combustiones espontáneas.

En el desarrollo de esta idea hay que tener presente cuanto se dijo sobre la conducta química del oxígeno y las acciones catalíticas. El oxígeno, normalmente, no se halla en condiciones de actuar químicamente; es el «león dormido»: para que actúe hay que despertarle por una acción catalítica de las muchas que existen, y de las que algunas se citaron. Es lógico que la clasificación

de las combustiones se haga atendiendo a la acción catalítica predominante en cada caso.

Así, pues, se van a considerar las combustiones espontáneas de orígenes:

1.° Eléctrico.
2.° Físico-químico en general.
3.° Mixto.

Examinemos, por tanto, estas tres clases de combustiones.

Las combustiones de * origen eléctrico. *

Dentro de cada grupo son muchos los ejemplos que pueden ser citados; pero, dado el objeto del presente trabajo, es claro que bastará con la cita de algunos casos que, para el presente, van a ser dos: *a)* La combustión del hidrógeno aerostático, y *b)* La combustión de la gasolina.

Los incendios del hidrógeno aerostático.

Los incendios espontáneos del hidrógeno aerostático que, como se dijo al principio de este estudio, fueron los primeros que motivaron que pensase en tales fenómenos quien esto escribe, han sido numerosísimos en la historia de la Aerostación, y mucho más en la Aerostación española, seguramente por razón del clima; tanto, que llegó a idearse una disposición para cortar el fuego iniciado en los tubos en que el hidrógeno iba comprimido a 150 atü., y que no se propagase al globo; disposición que fué copiada por la Aerostación francesa.

Era frecuentísimo, en toda época, que se incendiasen los escapes de gas en las tuberías de serpentín que le daban paso desde los tubos a la manga que le conducía al globo; era reglamentario que uno de los soldados encargados de la maniobra preparase, antes de proceder a abrir los tubos, un cubo lleno de agua que había de estar colocado al pie de los tubos, para apagar, en cuanto se iniciase, el menor incendio, y luego si, a pesar de esta precaución, el incendio seguía, se cortaba el paso del gas por la manga mediante una caja con tapa basculante cargada de arena y maniobrada por un soldado a la voz de ¡fuego! que cualquiera de los presentes diese.

Se ve, pues, que la combustión espontánea del hidrógeno era algo con lo que se contaba siempre.

Pero no era solamente el momento de la inflación el peligroso; si a causa del viento el globo llega a rozar con algún obstáculo y sufría una desgarradura, la masa de gas que salía, casi siempre entraba en combustión. Así ocurrió varias veces; el 20 de mayo de 1924, dos veces en el mismo día; el 25 de septiembre de 1926; el 16 de junio de 1927.

El 10 de agosto de 1915 ocurrió un incendio al inflar el globo, que produjo la muerte de un cabo y numerosos heridos.

En todos estos casos, como se comprende, siendo de 3.000° la temperatura de combustión del hidrógeno, no quedaba resto del globo: sin embargo, algo de cordaje se aprovechaba.

Pero el día 12 de julio de 1925 ocurrió un incendio de otro tipo; el globo «General Vives», al vaciarse en la toma de tierra, hizo explosión, y no sólo «desapareció» el globo sino también el cordaje; no quedó más que restos de la válvula, que era metálica. Y, cosa notable; la tripulación, compuesta de un Comandante y tres Capitanes, no sufrió daño alguno.

Las circunstancias de este caso, poco frecuente, pues de lo contrario hubiese representado un peligro, casi prohibitivo, la toma de tierra de un globo libre, fueron notables. El globo había realizado una ascensión nocturna, permaneciendo toda la noche a alturas que oscilaban entre los dos y los tres mil metros, y a la mañana siguiente, como fuese casi completa la calma, el piloto decide tomar tierra; un tripulante salta de la barquilla y es sustituído su peso con sacos de tierra aportados por los campesinos que al lugar del suceso han acudido. Al rasgar el globo, la pequeña brisa que sopla hace que se abata separado de la barquilla (fig. 44) y toca el suelo, en forma que la abertura de desgarre no queda del todo libre; el tripulante que se hallaba en tierra se acerca al globo para tratar de conseguir que la abertura se dirija hacia la parte superior, y al intentar hacerlo, como el globo representa una cantidad de tela muy grande y de difícil manejo para una sola persona, el primer movimiento fué volverse más la abertura hacia el suelo (fig. 44 a), y en ese momento se produce lo explosión.

Entre estos accidentes, de origen eléctrico, merece también ser

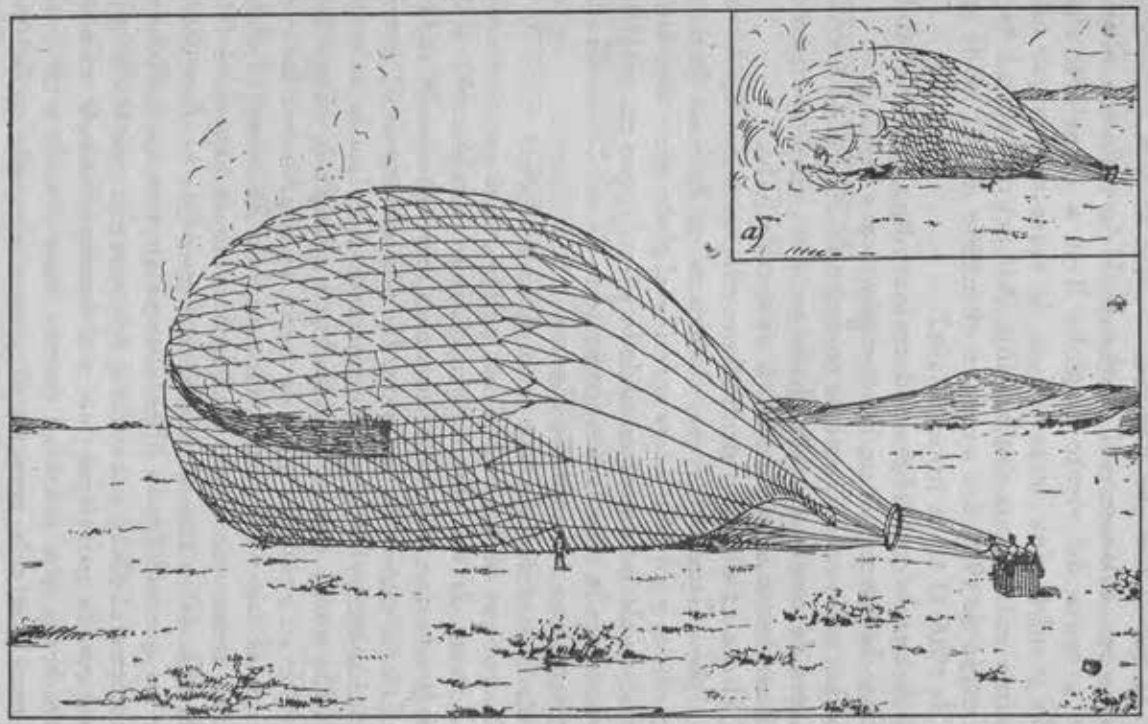


Fig. 44.—Aterrizaje del globo libre «General Vives» el 12 de julio de 1925. Un tripulante que ha saltado de la barquilla intenta mover la tela del globo para conseguir un vaciado rápido. El chorro de hidrógeno choca con el suelo y se produce la explosión *a*).

citado el ocurrido en Bélgica, cerca de Malinas, el día 23 de septiembre de 1923 al globo «Polar» que tripulaban los españoles Peñaranda y Gómez Guillamón, éste último hoy Ingeniero Geógrafo; el globo se acerca a una nube tempestuosa y un rayo salta, resultando muerto el Capitán Peñaranda y el globo ardiendo; el Capitán Guillamón se salva milagrosamente con sólo la rotura de una pierna. Otros dos globos, uno suizo y otro americano, sufrieron igual suerte, con muerte de sus tripulantes.

En los dos casos más graves, el del globo «General Vives» y el del «Polar», la persona encargada de redactar el informe oficial sobre el caso fué quien esto escribe.

Dos grupos pueden hacerse con los incendios enumerados, dejando de lado el del globo «Polar», cuya explicación es inmediata: el rayo salta, y el gas, que va saliendo por el apéndice, ya que el globo iba subiendo, entra en combinación con el oxígeno del aire por la acción catalítica de la chispa eléctrica. Lo que hay que añadir de particular es que el rayo «no encontró por casualidad el globo» a su paso; lo explicado anteriormente (fig. 33) justifica que la perturbación del campo eléctrico producida por el globo, unida a la salida del hidrógeno por el apéndice, facilitó el paso de la chispa.

Los casos restantes pueden reunirse en dos grupos: los producidos al salir el gas de los tubos a presión y en pequeñas cantidades, y los originados al salir sin presión en grandes masas.

Para explicar ambos casos no hay más que una sola teoría aceptable.

En primer lugar, el hecho de que se produzcan incendios, lo mismo cuando el hidrógeno escapa a gran velocidad por proceder de un recipiente a presión, que cuando sale a la pequeñísima velocidad de una gran abertura en el globo, indica que no es la velocidad la causa concomitante que predomina en la producción del incendio.

Sin duda, hay que atender a que la mezcla hidrógeno-oxígeno solamente es explosiva cuando el hidrógeno se halla en proporción superior al 8 por 100 en volumen, y no lo es cuando el oxígeno está a menos del 20 por 100. Pero entre esos límites, para que se produzca la combustión por acción catalítica térmica, hay que elevar la temperatura en algún punto a 580°.

Es evidente que la dinámica de un escape de gas no justifica esa elevación de temperatura por causa mecánica; no hay producción espontánea de calor, porque no puede ni hablarse de choque de dos gases. El hidrógeno, al salir, se rodea, según explica la teoría de los flúidos, de una zona baróclina, en la que en seguida nacen torbellinos de velocidad que difunden el gas rápidamente y la energía es absorbida por tales torbellinos. Pero lo que sí ocurrirá es que, en el proceso de difusión del hidrógeno, alguna zona será de proporciones explosivas, y si entonces hay otra acción catalítica, sobrevendrá la explosión, que se propagará a la velocidad que se señaló, de 3.000 metros por segundo, haciendo arder a la masa de hidrógeno sin dar lugar a su difusión.

Esta causa es la eléctrica. Basta recordar cuanto se ha dicho acerca del campo eléctrico atmosférico y a la perturbación producida por la presencia de un conductor: conductor que en este caso es el propio hidrógeno que, como se dijo, es *cinco veces* más conductor que el aire. Se producirá, pues, una aproximación de las superficies equipotenciales que, en algún punto, llegarán al gradiente explosivo, y si la salida del gas es a gran velocidad, el rozamiento reforzará este efecto, explicándose así la gran frecuencia de los incendios de las fugas de hidrógeno al darle salida de los tubos.

Pero, como la esencia de la acción catalítica, según se explicó en el capítulo I, estriba «no más que en agitación molecular», *sin que el gradiente llegue a ser explosivo, tan sólo el movimiento rápido e invisible* de abundantes cargas eléctricas, en efluvio oscuro, puede producir la agitación molecular suficiente para provocar la disociación, no ya de moléculas de oxígeno, como se explicó en la formación del ozono, sino todavía de hidrógeno, y los dos cuerpos, en estado atómico, se combinan casi instantáneamente, obedeciendo a las características de su afinidad, según el mecanismo de una reacción de cadena que también ha sido explicado.

En el caso del globo «General Vives» que llegó a producir la explosión y volatilización casi instantánea del globo, actuó, sin duda, el efecto de un efluvio oscuro intensísimo o quizá hasta alguna pequeña chispa que no fué apreciada por la tripulación, y todo a causa de la larga permanencia del aerostato a gran

altura, que traería como consecuencia cargarse todo él a potencial mucho más elevado que el del suelo, sin que hubiese tiempo, en el descenso, a que el globo se pusiese al potencial del ambiente.

Los mismos efectos que los descritos para el globo libre se pueden presentar en los dirigibles, por lo que, como es sabido, los americanos emplean para su inflación el gas helio, que, como inerte que es a causa de su constitución atómica, citada en el capítulo I, no puede presentar los peligros del hidrógeno.

A nuestro parecer esta explicación del hecho es la justificación posible de las combustiones espontáneas del hidrógeno que sale a la atmósfera desde un recipiente o un globo. La atmósfera, siempre en acecho, con sus fuerzas ocultas, manifiesta un resto de sus primitivas energías en cuanto se presenta la ocasión.

Una circunstancia curiosa debe ser conocida en este asunto, y es la siguiente: Cuando se trataba de ver los medios que podrían aplicarse para alejar el peligro eléctrico en la válvula del globo donde era más temible, pues al maniobrarla para dar salida al gas, podría saltar una chispa entre el asiento y la propia válvula, se pensaba en proteger la válvula con una materia aisladora, y esto hubiese sido contraproducente, pues según el efecto de los dieléctricos mixtos, la materia aisladora hubiese aumentado el gradiente en el aire y así hubiese sido mayor el peligro eléctrico.

Lo mismo ocurría en las discusiones sobre la ventaja de sustituir la válvula metálica por válvula de madera, pues aunque a primera vista pudiese parecer ésta más conveniente, resulta lo contrario al atender a que la madera no es conductora como lo es un metal, y en ella no habrá repartición uniforme de cargas, lo cual puede ser favorable a la producción de descargas eléctricas.

Con todo lo expuesto se ve la necesidad de meditar profundamente en estos sutiles fenómenos de la Naturaleza, que muchas veces parece que procede como burlándose de la limitada inteligencia humana.

Los efectos eléctricos en el avión.

El año 1935 el avión en que volaba el Jefe del Gobierno italiano Mussolini, sufrió, sin consecuencias importantes, el efecto de una descarga eléctrica, y este hecho, de relevante actualidad en aquel entonces, hizo que quien esto escribe publicase en la Sección de Aeronáutica del

«Memorial de Ingenieros» un estudio sobre los accidentes eléctricos en el avión, y de este estudio, y como complemento a las ideas expuestas, se entresacan algunos datos respecto a asunto tan en relación con el que se va exponiendo.

En la reunión de la Asociación científica Aeronáutica alemana de 1933, H. Koppe presentó una estadística referente a los accidentes eléctricos de aviones que vino a deshacer la creencia de que si el globo aerostático había de tener el peligro eléctrico, en el avión no había que tenerle en cuenta.

Al contrario, las descargas eléctricas pueden producirse en un avión de cuatro modos:

1.° Por diferencia de potencial entre el avión y el ambiente;

2.° Por diferencia de potencial entre dos partes del avión o inducción electrostática;

3.° Por descargas atmosféricas, y

4.° En el aterrizaje por diferencia de potencial entre el avión y el suelo.

A los efectos citados en el capítulo II de este trabajo se añade ahora lo siguiente: Si al recibir el avión la descarga o producirse en él por inducción un *arco*, como quiera que la corriente puede ser muy intensa, puesto que en los casos graves alcanza los 100 KA, pueden producirse también efectos de electrostricción, o sea efectos mecánicos. De este tipo son las grandes presiones del aire a consecuencia de su arrastre brusco por los iones en movimiento rápido, citándose el caso del piloto de un bimotor, que al sufrir una descarga el aire entró con tal violencia a través del puesto de mando que creyó haber chocado con un ave.

Otro efecto grave es alterar la magnetización de los metales del avión y brújulas que quedan así inútiles para la navegación.

Entre los 16 casos en que se observaron efectos eléctricos en el avión a consecuencia de descarga en una nevada, se cita uno en que la única descarga ocurrida fué la que recibió el avión, considerándosela como provocada por éste a causa del *efecto Rudge* o soplado de los copos de nieve por la misma velocidad del aeromóvil.

Finalmente, para evitar los accidentes en el aterrizaje, ya se dijo que se han fabricado neumáticos para las ruedas con caucho

hecho conductor por la adición de carbón pulverizado a los materiales con que se fabrican las gomas.

La combustión espontánea de la gasolina.

La gasolina, como se sabe, es uno de los productos de la destilación de los petróleos y, por lo tanto, es un cuerpo constituído a base de carbono e hidrógeno, que son los combustibles por excelencia. Los petróleos americanos se componen casi exclusivamente de hidrocarburos límites del tipo de los *alcanos* $C_n H_{2n+2}$ de cadena abierta; los de Rusia contienen, por el contrario, casi en su 80 por 100 *naftenos* o hidrocarburos cíclicos de fórmula $C_n H_{2n}$, y, por fin, los de Rumanía y Galitzia tienen una composición que puede decirse intermedia respecto a los americanos y los del Cáucaso. Los hidrocarburos aromáticos de la serie del *benzol* están contenidos en cantidad notable en los petróleos índicos, como los de Borneo.

Todos los petróleos contienen, además, productos oxigenados.

La destilación fraccionada de los petróleos proporciona diferentes productos: entre los 40 y 70° se obtiene el *éter de petróleo* o *gasolina* (PE 40-70°), aunque en América se da este nombre a los productos obtenidos entre los 70 y 200°; la fracción entre 60 y 110° se denomina *bencina ligera* (PE 60-110°), y entre 100 y 150° *bencina pesada* (PE 100-150°), y la *ligroina* es el producto que se obtiene entre 100 y 180°. Más allá, entre los 150 y 300° se produce el llamado *petróleo de alumbrado*; entre los 300 y 350° el *gasoil*. Los residuos que pasan de los 350° son los aceites lubricantes, de los que, por destilación, se obtiene la *parafina*, formada por hidrocarburos sólidos, de molécula muy compleja, por ejemplo: $C_{24} H_{50}$. Por fin, los residuos no volátiles a partir de los 300°, de los petróleos americanos, dan la vaselina.

Se comprende, por esta enumeración, que los primeros productos de la destilación del petróleo, la gasolina y la bencina, sean cuerpos sumamente inflamables, como formados por carbono e hidrógeno, por los que tiene gran afinidad el oxígeno y con molécula poco estable y de fácil ataque químico.

Así, hace muchos años, cuando apenas si balbuceaba el primitivo motor de explosión Otto, en el que precisamente no se empleaba como combustible ningún producto del petróleo, se

empezaron a notar incendios espontáneos de la bencina, que era usada en los quitamanchas, y ello dió lugar a que en Berlín apareciese en 1893 un libro titulado «Benzinbrände», escrito por A. Richter, en el cual se daba a tales incendios una explicación eléctrica que fué comprobada por ensayos de laboratorio.

Actualmente, entre las características industriales que se fijan en las recepciones de productos volátiles del petróleo, figura el *coeficiente de electrización* de la esencia de que se trate.

Fig. 45.—La emersión de prendas de ropa, después de su inmersión en bencina, electriza la ropa positivamente y la bencina negativamente, pudiendo llegarse a la chispa, que determina una explosión.

Los incendios se producen al lavar la ropa en las tinas de bencina (fig. 45); los tejidos, al ser sacados de las tinas, se cargan de electricidad *positiva* y la bencina de *negativa*, de modo que la mano del obrero, o sencillamente ambos cuerpos electrizados, pueden determinar un efluvio intenso o una pequeña chispa que es la acción catalítica determinante del incendio de los vapores y luego de todo el líquido. También influye en el fenómeno el efecto Lénard de salpicado de las gotas.

Como consecuencia del estudio del asunto para evitar los incendios, muy frecuentes, como se ha dicho, en los quitamanchas, se ideó hacer el lavado de las ropas en depósitos cerrados, con buena comunicación eléctrica con tierra, y además añadir a la bencina alguna sustancia para hacerla conductora, como oleato de magnesio

al 1,20 por 100, jabón amonical, o bien un 2 por 100 de alcohol de 96°.

Hay que tener presente que, para que se produzcan campos eléctricos importantes, tienen que concurrir dos circunstancias, a saber: que se produzcan cargas eléctricas y que éstas puedan acumularse por falta de conductividad del cuerpo en el que se producen tales cargas. Así ocurre con la bencina, como también con la gasolina y el éter; el paso de estos líquidos por un tubo, a consecuencia de la viscosidad y de la adherencia con las paredes, produce un rozamiento que electriza el líquido, lo mismo que ocurre en el antiguo experimento del vidrio y la resina, todo explicado hoy por el efecto de ser arrancados los electrones constituyentes de los cuerpos.

Ahora, las gasolinas y bencinas tienen una conductividad pequeñísima: de 10^{-13} a $10^{-15}\,\Omega^{-1}\cdot cm^{-1}$; en cambio, el éter, tiene una conductividad mucho mayor, de valor $10^{-9}\,\Omega^{-1}\cdot cm^{-1}$ y, sin embargo, también se electriza a causa de la viscosidad.

A igualdad de diámetros y presiones en los tubos, el fenómeno es tanto más intenso cuanto mayor es el rozamiento, y, por consiguiente, cuanto mayor es la velocidad de paso del líquido.

El petróleo y los lubricantes se electrizan muy poco o *nada:* sabido es que aquel líquido se emplea como dieléctrico en los transformadores.

Otra influencia en el fenómeno es la del agua: si la gasolina tiene agua, la electrización tiene poca importancia por el efecto conductor del líquido añadido. Así, el fraude de añadir agua a la gasolina, si tiene grandes perjuicios para el funcionamiento de los motores, evita los incendios.

Al atravesar gasolina de tanques a coches, o de tanques a depósitos, etc., deben tomarse las debidas precauciones; las mangueras no deben tener partes metálicas que no estén en comunicación entre sí y con tierra, e igualmente los embudos han de comunicar con el suelo; en una palabra, se debe pensar en el peligro eléctrico.

Aunque cuanto mayor sea la humedad del aire es menor la electrización de la bencina; se van a citar unas cifras para que se juzgue del grado de importancia del fenómeno que se está explicando. Con 80 por 100 de humedad en el aire, en el paso de benzol puro, a la presión de dos atü., llega a marcar el electróme-

tro 3.600 V en tubos de hierro; 3.000 V en tubos de latón; 2.200 V en tubos de aluminio; 1.000 V en cobre, y 800 V en tubos de vidrio.

Al detener el movimiento del líquido la descarga del electrómetro es rápida, si se comunica el tubo con el suelo, cuando se trata de benzol; si es gasolina la que circula ya no es tan rápida la descarga, debiéndose tal diferencia a que el benzol es más conductor que la gasolina.

Se ve que si llegan a producirse tales voltajes, una pequeña discontinuidad, un redondeo de poco radio, puede dar lugar, según se vió al tratar del efluvio eléctrico, a potenciales triples o cuádruples del general del campo, y entonces la chispa es la consecuencia inmediata, puesto que no hay más que recordar el dato citado de que el encendido del motor de explosión funciona con chispas de 0,4 mm. obtenidas a 10.000 V.

Se comprende, por lo descrito, las dificultades que han tenido que vencer, en la última guerra mundial, los ingenieros anglosajones para establecer las tuberías con que han enviado la gasolina a los parques de aprovisionamiento avanzados; no solamente las del problema mecánico sino, muy particularmente, las del problema eléctrico.

Por fin, citamos casos de incendios espontáneos de bencina y gasolina, explicables eléctricamente, ocurridos en España.

Es el primero el sucedido, hacia los años 29 a 30, en Barcelona, en una torre de la Bonanova habitada por la familia Forga, en donde la señora de la casa limpiaba, por sumersión, en recipiente con bencina, una prenda de ropa. De improviso se incendia la bencina; la señora se ve envuelta en llamas, acude una hija en su socorro y ambas sufren quemaduras, resultando muerta la hija.

Otro caso ha ocurrido, aunque sin consecuencias graves, en Madrid, al médico Sr. Moreno, que vive en Fuencarral 15; limpiándose los guantes con gasolina teniéndolos puestos, y frotando una mano con otra, se incendia la gasolina.

Por fin, la explosión acaecida en el Parque Móvil de los Ministerios Civiles, a dieciséis horas del día 7 de noviembre de 1944, es también explicable por causa eléctrica.

Los tanques tienen la disposición que se ve en el croquis (figura 46); el día citado el tanque *A* se llenaba con la descarga de un

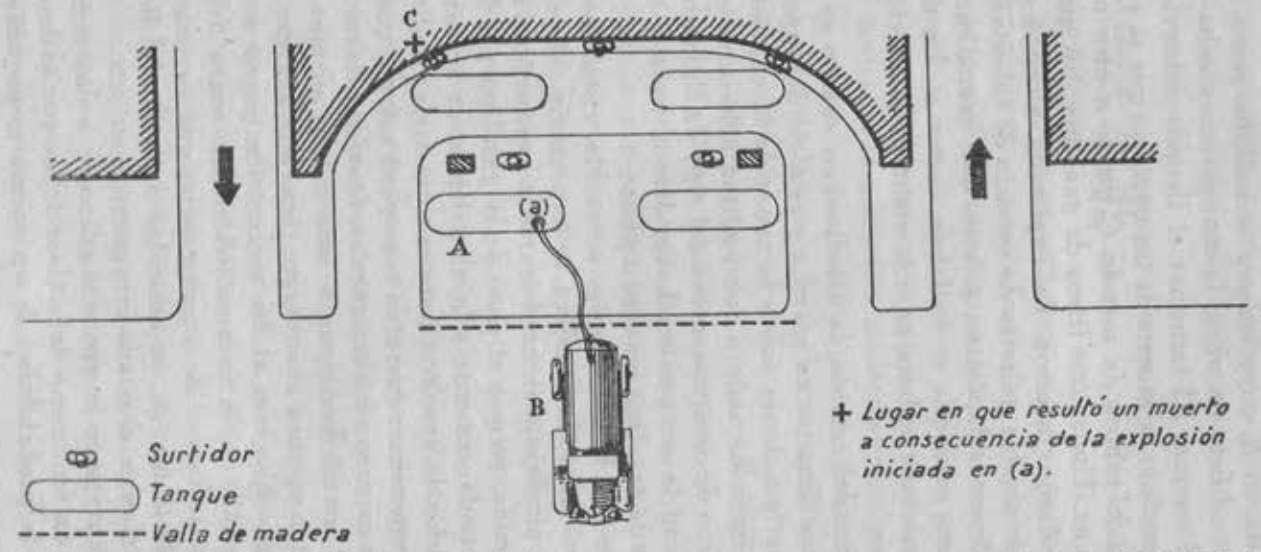


Fig. 46.—Disposición en que se hallaba el camión-tanque que llenaba de gasolina el depósito *A* del P. M. M., el día 7 de noviembre de 1944. Al terminar el llenado sobrevino una explosión, explicable eléctricamente, que produjo una víctima en *C*.

camión situado en *B*, cuya trasera se hallaba junto a la valla que cerraba el edificio en obra; la manga atravesaba la valla y abocaba en el tanque. Al terminar el llenado sobreviene la explosión, que produjo la muerte de un operario que se encontraba trabajando en la cabina de mando *C*, junto a otro obrero que resultó indemne. Los 11.000 litros de gasolina con que se llenó el tanque quedaron intactos. La explosión alcanzó al obrero, comunicándose por las galerías de servicio de tuberías que existen entre los diversos depósitos, galerías que, normalmente, están llenas de arena, pero que se hallaban vacías el día del suceso, como periódicamente se hace para la visita de inspección de tanques y tuberías.

El conductor del camión de gasolina, en cuanto se apercibió del suceso, puso el motor en marcha y se alejó del lugar.

Hechas averiguaciones sobre la causa de la explosión no se tuvo conocimiento de nada a que pudiese achacarse el caso, es decir, no se supo de ninguna causa del tipo de llama o ignición de alguna sustancia que pudiese haber determinado el encendido de los vapores de gasolina en algún punto.

Es evidente que la única causa aceptable, vistos los fenómenos de electrización de la gasolina, es la pequeña chispa o efluvio intenso que se produjo al interrumpirse la continuidad del movimiento del líquido, ya que el paso de la gasolina por la manga la electrizó abundantemente y la electricidad se acumuló, pues, según se ha dicho, la gasolina pura es muy mala conductora.

Se podrá argumentar que, si la cosa pasó así, por qué no pasó siempre que se cargaron los tanques en *igualdad* de condiciones. Es muy difícil, en un fenómeno de esta índole, afirmar la igualdad de condiciones, pues el concepto tiene que abarcar, desde la calidad de la gasolina, que el día en cuestión parece ser que era de gran pureza, hasta la comunicación con tierra del tanque, pasando por la infinidad de circunstancias que supone considerar el estado de la manga, la velocidad del paso del líquido, la posición de la manga, el estado atmosférico, etc., etc.

Véase a este respecto lo que más adelante se dice acerca de la posibilidad de un fenómeno de la clase de los que se describen, y se verá que, si la probabilidad de un suceso es pequeña, no por eso quiere decir que no pueda suceder, y será bueno tomar todo

género de precauciones para asegurar la perfecta comunicación eléctrica de todo aquello que esté en contacto con la gasolina, entre sí y con el suelo.

Combustiones de origen físico-químico en general.

Entre estas combustiones espontáneas figuran, en primer lugar, las de la pólvora, cuyo estudio es de tan fundamental importancia para las entidades que la manejan, emplean y conservan, así como para quienes construyen los almacenes para este fin.

La conocida mezcla de nitrato potásico, azufre y carbón constituye una sustancia cuya explosión se determina ordinariamente mediante la agitación molecular producida por el fulminato de mercurio, que detona por el choque, y la pequeña onda explosiva transmite a la pólvora la agitación molecular necesaria para provocar la reacción.

Otro tanto ocurre con las pólvoras coloidales modernas a base de algodón pólvora o celulosa nítrica.

La circunstancia que aquí interesa citar es la de que las pólvoras entran en combustión espontánea, y ésta se convierte en explosión, si las presiones desarrolladas alcanzan el valor suficiente, por ser la conveniente para ello la relación entre dimensiones del local y volumen de los gases producidos, el cual pasa de las 1.500 veces el de la pólvora de que proceden.

En esta combustión espontánea intervienen varias causas, entre las que figura, en primer término, la oxidación lenta que continuamente se verifica por la acción del oxígeno del aire; en segundo lugar, y como acción característica de catálisis, la absorción del aire por las sustancias pulverulentas o con oquedades. Así, *1 g. de carbón*, cuya estructura conserva los huecos de las sustancias que contenía la madera, volátiles al quemarse con escasez de oxígeno, *tiene 3.000 m² de superficie*, y, por lo tanto, el fenómeno de absorción, aunque de proceso lentísimo, porque solamente hay fácilmente accesibles 150 m², llega a producir la oclusión de oxígeno en proporciones suficientes para que la disociación molecular y estado atómico consiguiente, como acaece en la respiración, sean bastantes para determinar elevaciones de temperatura que, reunidas a la absorción, hacen provocar la combustión.

La acción oxidante del *carbono microcristalino, carbono amorfo* o *activo* es mucho más intensa que la del carbón ordinario, porque su estado de división es mucho mayor, llegando a tener una superficie de absorción hasta de 1 m² por mg., y por ello es posible conseguir efectos tan sorprendentes de absorción como los que produce este carbono.

Se recordará el conocido experimento del vacío obtenido por el simple carbón vegetal en una campana: colocando en ella un trocito de carbón, que previamente se puso incandescente para expulsar los restos gaseosos que tuviese absorbidos, si la campana se llena de ácido carbónico se ve que el carbono absorbe todo este gas, hasta el punto de no poder saltar chispas dentro de la campana por ser absoluto el vacío producido.

Esta *absorción es la causa principal de las combustiones espontáneas.*

El carbón almacenado muchas veces se incendia espontáneamente si no se tiene cuidado de removerle para que se enfríe, o no se riega para producir el mismo efecto.

El carbón de las carboneras de los barcos se incendia espontáneamente, aunque en este fenómeno influyan también los choques debidos a imperfecciones de la estiba, así como la descomposición de las piritas cuando los carbones son piritosos.

Otro caso que se explica por agitación molecular es el de la combustión espontánea de *las pólvoras en los polvorines del Japón,* a consecuencia de los sismos tan frecuentes en ese país.

Del género de absorción con elevación de temperatura por fermentación es la combustión del *heno almacenado,* sobre todo cuando está algo húmedo, pues no hay que olvidar la acción catalítica del agua que se citó oportunamente. Lo mismo puede decirse de los incendios de los almiares de paja.

Igualmente se explica, aunque con alguna diferencia, otra combustión espontánea que puede verse durante el verano en los depósitos de locomotoras: es la de los *trozos de algodón empapados en grasa* que arrojan al suelo los fogoneros cuando ya no sirven por haber limpiado con ellos la máquina; a los pocos momentos de arrojados arden.

Aquí influye, por lo que se refiere a la celulosa que forma los trozos de algodón, la estructura explicada en el capítulo I, la

cual justifica que, por adsorción, la grasa o lubricante, cuya composición se citó más arriba, se halle en estado de *capa molecular*, es decir, de capa cuyo espesor es el de una molécula, y esta circunstancia, combinada con la adsorción del aire atmosférico, que pasa al estado atómico, y la temperatura del ambiente, son tres causas principales que en algún punto producen los 300° de temperatura que requiere la inflamación total de la grasa, y arde todo el trozo de algodón.

Dice muy bien el profesor Jimeno cuando afirma que el *estado de la materia* es una de las condiciones que determinan una reacción química.

Al tipo de estado de materia muy dividida y consiguiente superficie de acceso del aire con adsorción, corresponden las combustiones de los cuerpos llamados pirofóricos, como el *plomo*, el *hierro*, el *cobre*, el *níquel*, el *fósforo*, etc.; en las minas, el *polvo de carbón*; en los molinos harineros, la *harina muy fina*; en las refinerías de azufre, el *polvo fino*; el *tamo* o polvo de la paja, etc.; casos todos en que el mecanismo del fenómeno es el mismo ya explicado.

Veamos, por fin, algunos casos de combustión mixta.

Combustiones de ✶ origen mixto. ✶

Dado el criterio con que se ha hecho la clasificación de las combustiones, se entenderá por combustiones de origen mixto aquellas en las que contribuyen de modo sensible, de una parte, causas eléctricas, y de otra, físico-químicas generales.

Realmente la clasificación es un poco artificiosa, puesto que es difícil afirmar que en una combustión espontánea, cualquiera que sea ésta, no participa en alguna proporción, aunque mínima, la causa eléctrica.

Como tipo de combustión de origen mixto se va a explicar el mecanismo del incendio espontáneo de un montón de haces de mies (fig. 47).

Supóngase un día en el que el estado de la atmósfera es adecuado para que exista una gran turbulencia eléctrica con abundante producción de fenómenos microceráunicos y consiguiente producción de ozono en las capas bajas de la atmósfera. Supóngase también que la ionización es intensa; que el campo general

eléctrico es algo elevado; que no existe viento apreciable, y que el que reina produce acumulación de iones, según el mecanismo explicado más arriba, y que el aire está «envejecido» por la constancia del tipo de tiempo. Considérese, además, que el estado de división de la materia que forma la mies, y todavía con su amontonamiento, es favorable para que actúe la adsorción, y más si se tiene en cuenta que la mies casi es celulosa pura; todo provocará una tendencia a la división del aire con la consiguiente determinación a pasar el oxígeno al estado atómico.

Con todo este cuadro favorable, reforzado por una temperatura ambiente elevada y estado de sequedad atmosférica notable, la emisión de iones de la cúspide del montón, por el efecto explicado oportunamente de las puntas, será muy abundante en un momento dado y se producirá un efluvio oscuro intenso (fig. 47 a) que determinará localmente una producción importante de ozono (figura 47 b), el cual, con su coloración azul, aun en pequeñas proporciones, haría sensible su presencia a un observador que fijase su atención en el caso. Este ozono, con su inestabilidad señalada más arriba, dará lugar en seguida a su disociación molecular en oxígeno, también molecular y atómico, y este efecto, reforzando la disociación molecular del oxígeno producida por la mies y la celulosa que la compone, sumado a las demás circunstancias que se supone existen, llegará a producir la combustión de una brizna de las muchas que sobresalen de un tallo (fig. 47 c), y ya no hace falta más para que el incendio se propague, de arriba abajo, a todo el montón de mies (fig. 47 d). Claro es que durante la primera parte del fenómeno, en la llama producida, predominará la coloración azul por verificarse la combustión con exceso de combustible y defecto de oxígeno, que es tanto como decir con abundancia de óxido de carbono, y ya se sabe que éste al arder lo hace con color azul según se dijo oportunamente.

Con este mecanismo, sin olvidar el refuerzo del campo eléctrico general en las proximidades de una brizna por su forma redondeada de pequeño radio, se explica igualmente el incendio espontáneo de la brizna de esparto que sobresale de una cuerda, de un sombrero; de cualquier otro objeto de análoga constitución dividida, formado de materia que presente grandes posibilidades de adsorción y en todos aquellos casos que fueron citados al tra-

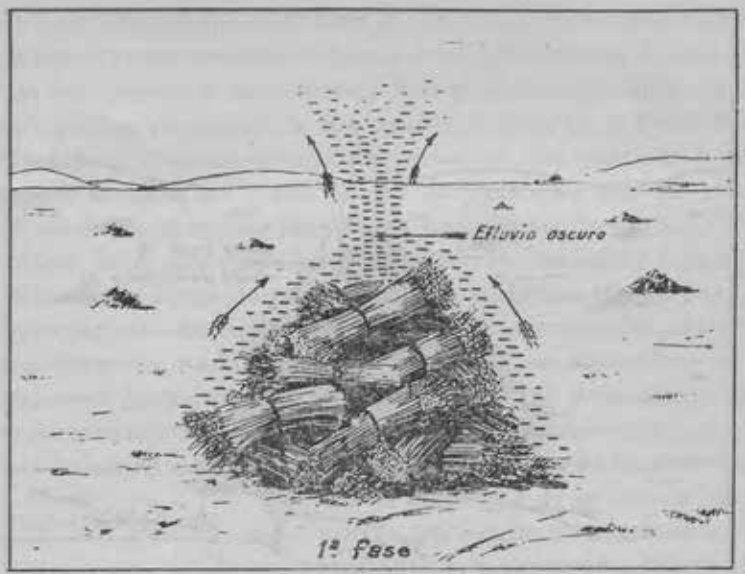
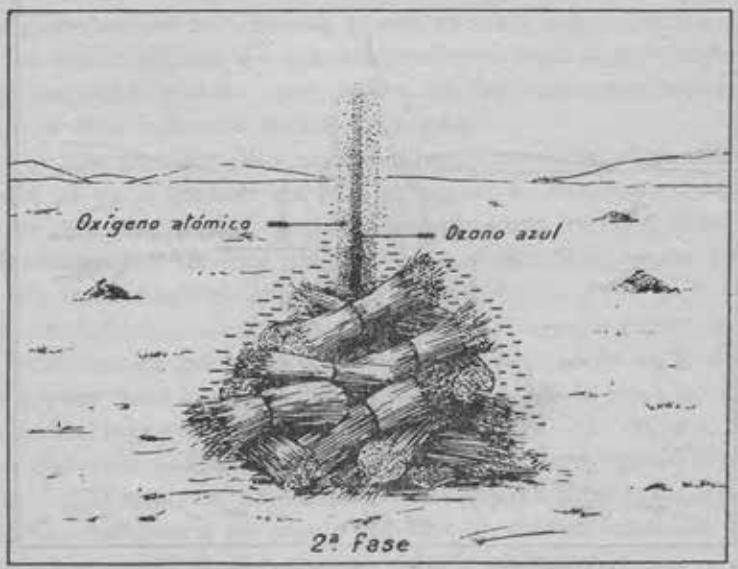


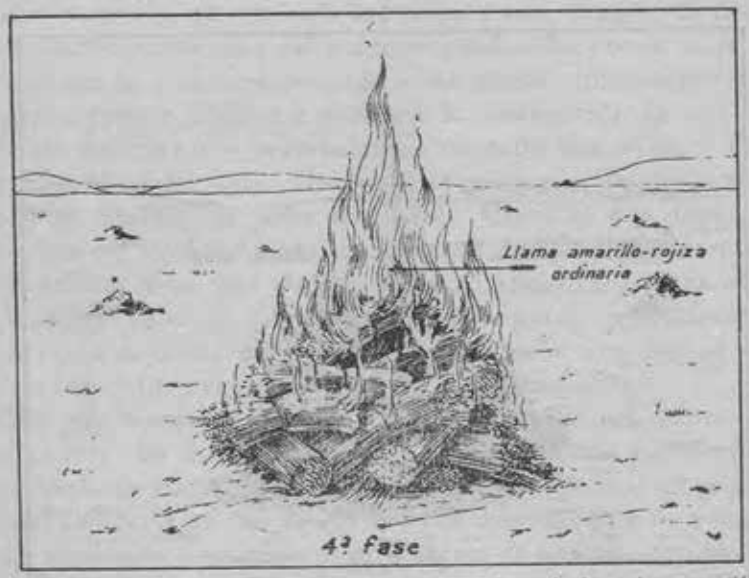
Fig. 47.—Contiene cuatro fases del incendio espontáneo de un montón de mies, explicable por causa mixta: eléctrica y físico-química de adsorción:

a) Condiciones adecuadas del campo eléctrico atmosférico determinan acumulación de cargas eléctricas en la cúspide del montón, de donde llega a salir un efluvio oscuro.



b) El efluvio produce ozono azul y oxígeno atómico, ambos elementos inestables, de gran afinidad química.

c) El oxígeno atómico producido por la doble acción, eléctrica y de adsorción de la celulosa, se combina con ésta, haciendo arder una delgada micela que sirve de cebo para propagar el incendio. El montón inicia el fuego con llama azul, pues se produce óxido de carbono a causa de la falta de oxígeno.



d) El incendio se ha propagado, de arriba a abajo, a todo el montón, forma de propagación que no es la natural de un incendio intencionado, que probablemente sería producido aplicando la causa a la zona inferior del montón.

tar de las anomalías del campo eléctrico terrestre, o sea, en donde causas concomitantes produzcan un refuerzo del gradiente general del campo y más si los objetos afectados están en interiores o grutas en donde la ionización es mayor, y todavía si en los locales no existen causas de agitación del aire como el que supone el cambio de lugar activo de personas que en ellos se hallen, es decir, si en los locales no hay gente.

Nótese bien que en toda la explicación hecha no han aparecido sino fenómenos de pura categoría química simple, es decir, con intervención exclusiva de los electrones corticales, sin asomo de reacciones en nada parecidas a las que se denominaron nucleares, en la breve noticia que sobre este tipo de reacción se dió oportunamente cuando se dijo, además, que tales reacciones son propias solamente de los astros jóvenes en estado de estrellas.

La probabilidad de un suceso.

Ya se ha visto que de la atmósfera primitiva, en estado de combustión permanente, se ha pasado a la atmósfera que hace posible la vida, en la cual rara vez se produce espontáneamente una verdadera combustión, aparte de las eremacausias que constantemente entretienen la vida y evolución del planeta, y esto es tanto como decir, *a priori*, que la probabilidad de que se produzca una combustión será muy pequeña, puesto que, según se dijo más arriba, de otro modo la vida humana no existiría aún.

Aunque este sencillo razonamiento anuncia el resumen de cuanto se va a deducir de lo que sigue, se considera que es de interés poner de manifiesto de un modo cuantitativo, el valor de la probabilidad de que ocurra una combustión espontánea, o sea, sin intervención de la mano humana.

A este efecto conviene empezar diciendo que, a pesar de cuantos progresos ha hecho la ciencia, hay multitud de hechos que el hombre no tiene capacidad para preverlos; de lo cual no se cree necesario citar ejemplos, puesto que la vida los ofrece a diario. La característica de estos fenómenos, que se denominan *fortuitos o debidos al azar*, es la de depender de causas muy complejas que nuestra inteligencia no puede conocer en su totalidad, ni menos saber cómo se combinan en su modo de obrar.

La cita de un caso muy corriente precisará estas primeras

ideas, lo suficiente para justificar que tales clases de fenómenos obedecen a lo que se llama *leyes estadísticas* y no a físicas. Supóngase que se sabe que son 1.000 los nacimientos que han de ocurrir en el mes próximo: si cada uno se considera individualmente, no se puede afirmar que haya de ser el nacido varón o hembra; pero considerándolos todos reunidos estamos completamente seguros de que habrá, entre los 1.000 nacidos, varones y hembras. En cambio, supóngase que se tiran 1.000 piedras hacia lo alto; se está seguro de que las 1.000 piedras caerán al suelo, y que si alguna no cae es por algo explícito que lo ha impedido.

Se ve, pues, que la ley estadística es muy distinta a la ley natural o física; ésta puede prever un fenómeno; la estadística solamente puede enunciar un resultado global relativo a un conjunto de fenómenos análogos.

Así, pues, los juicios que el hombre forma, respecto a los sucesos que han de ocurrir, van siempre acompañados de incertidumbre, y por ello son designados con denominaciones que envuelven ese carácter como *ciertos, probables, dudosos, improbables e imposibles.* Estas denominaciones serían innecesarias y solamente quedarían la primera y la última, que es la misma, si se tuviese conocimiento exacto de las cosas, por lo que se ha llegado a decir que la ciencia de las probabilidades se basa en la ignorancia del ser humano. Rey Pastor, a este respecto, dice: «el cálculo de probabilidades es un coloso con los pies de barro».

El ingenio del hombre ha conseguido dar forma matemática a esos grados de probabilidad, suponiendo la experiencia o prueba que puede producir un suceso determinado, descompuesta en casos igualmente posibles, o sea que, respecto a ellos, no haya motivo para que deba verificarse uno con preferencia a los demás, y entonces es evidente que, cuanto mayor sea la cantidad de casos favorables a la realización del suceso, respecto a la totalidad de ellos, mayor será el grado de posibilidad de que se verifique tal suceso.

Si, pues, es m el primer número y n el último, se podrá expresar por la fracción $\frac{m}{n}$ el grado de posibilidad de verificación del caso, y a este cociente se le llama *probabilidad.* Así, en el ejemplo citado de nacimientos, se sabe que, entre 100.000 nacimientos, son varones 51.200, y, por tanto, será 0,512 la probabilidad de que un nacimiento dé varón.

Digamos, por fin, que la matemática da medios para que esa fracción esté expresada, exacta o aproximadamente, en la forma $\frac{1}{N}$, siendo N un número natural.

Sin embargo, la ciencia moderna se inclina a denominar probabilidad solamente al concepto, es decir, al elemento *subjetivo* del asunto o, como entonces, puede decirse: a la fuerza de convicción del sujeto sobre el caso, y para el número que se ha definido aplica la denominación de *frecuencia*.

Hay que advertir, antes de pasar adelante, que los nuevos derroteros por los que actualmente camina la ciencia son tales, que respecto a la teoría de la probabilidad puede decirse hoy, más que nunca, con Laplace: «es interesante que una ciencia que empezó estudiando los juegos de azar se ha convertido en el objetivo más importante del conocimiento humano». En efecto, la probabilidad se halla hoy entrelazada, como dice Eddington, *con las raíces de la física*. La termodinámica, la teoría de los quantos y, sobre todo, cualquier estudio sobre masa de materia en caso en que no pueda mirarse ésta como un todo, sino como un agregado de partículas; todos estos casos, decimos, tienen por fundamento las leyes del azar. Es más, la moderna mecánica ondulatoria proporciona una imagen del Universo cuya sustancia es la probabilidad.

La probabilidad ha desterrado al determinismo, y así como cuando se decía, con Leibnitz, «el presente, producto del pasado, engendra a su vez lo futuro», se afirmaba también que la Tierra no podía abandonar su órbita; hoy se dice: «es improbable que la Tierra deje de seguir su órbita».

Pero, dejando esta digresión, que es interesante porque señala el papel, quizá exagerado, que hoy ocupa en la ciencia la teoría del azar, y ciñendo el estudio al asunto principal de este trabajo, se recordarán dos principios de la teoría de probabilidades de los que aquí se va a hacer uso.

Es uno, el muy conocido con el nombre de *teorema de Bernouilli*, y el otro, el de la *probabilidad de los sucesos compuestos*.

El teorema de Bernouilli se refiere a la ley de repetición de los sucesos, y dice así: *en una serie de experiencias que pueden dar lugar a un suceso, la relación entre el número de veces que se presente el suceso y el número de experiencias, si éste es muy*

grande, tiende a ser igual a la «probabilidad simple» del suceso en una sola experiencia.

El otro principio aludido, el de la probabilidad de los sucesos compuestos, entendiéndose por tales aquellos que se consideran formados por el concurso de otros varios, cuyas probabilidades aisladas se conocen, dice que tal probabilidad es el *producto de las probabilidades de los sucesos componentes.* Y se añade que, cuando entre estos sucesos existe cierta conexión, de modo que la realización de uno de ellos influya en la de los demás, hay que usar para éstos la llamada *probabilidad modificada*, es decir, la que presenta el suceso en cuestión, supuesto ya realizado el primer componente.

Citemos ahora un ejemplo de probabilidad compuesta. La probabilidad de muerte de un hombre de cuarenta y ocho años es de $\frac{13,5}{1.000}$; si se desea saber cuál es la probabilidad de que ese hombre fallezca en un día determinado del año, se trata ya de dos sucesos que deben coincidir: el de la muerte y el de ser ésta en un cierto día del año, cuya probabilidad es $\frac{1}{365}$, y así la probabilidad compuesta será:

$$\frac{13,5}{1.000} \cdot \frac{1}{365},$$

Si se supone una cita entre dos hombres de tal edad, para un día determinado, la probabilidad de que los dos dejen de encontrarse por el fallecimiento de ambos será de

$$\left(\frac{13,5}{1.000} \times \frac{1}{365}\right)^2.$$

Si se quiere precisar más, y se dice que el plazo de espera era de doce minutos, como este número está contenido 120 veces en las veinticuatro horas, cada probabilidad está afectada de otro factor de valor $\frac{1}{120}$; la probabilidad es entonces

$$\left(\frac{13,5}{1.000} \cdot \frac{1}{365} \cdot \frac{1}{120}\right)^2,$$

es decir, aproximadamente,

$$\frac{1}{10^{11}};$$

de modo que este valor pequeñísimo es el de la probabilidad de que deje de verificarse la cita por el fallecimiento de los dos citados; o, dicho más claramente, de 10 millones de millones de citas entre dos hombres de cuarenta y ocho años para un día determinado, concediéndose un margen de doce minutos de espera, solamente una dejará de verificarse por fallecimiento de los citados.

Y ahora se presenta un razonamiento muy apropósito para los casos que se va a considerar aquí.

Estos dos amigos del ejemplo tienen la *certeza moral* de que ambos no dejarán de acudir a la cita porque lo impida su fallecimiento.

Se puede decir que en *casi ninguno* de los actos de nuestra vida *hay certidumbre;* siempre nos rodea el *poco más o menos,* y, sin embargo, vivimos y actuamos con esa *certidumbre moral* que basta para vivir.

Pero tener la certeza moral *no es tener* la certeza matemática; y si el hombre, sin pensar en las matemáticas, obra con certeza moral, cuando en ellas piensa, debe tener presente que puede realizarse el único caso desfavorable entre los 10 millones de millones de favorables y, entonces, el hombre es *prudente.*

Quiere decir esto que, si la probabilidad de verificarse un suceso es muy pequeña, que le hace entrar en la categoría de *raro* o *extraordinario,* la primera reacción del espíritu ante la noticia de que ha tenido lugar un suceso de esa clase es pensar que se ha verificado por intervención de alguien, porque es humano seguir la máxima de «piensa mal y acertarás», aunque esté condenada por la moral cristiana, como el gran Balmes dice bien explícitamente en su «Criterio»; luego, entra la reflexión, y con ella se tiene presente este prudente consejo, y entonces se piensa que hay una puerta abierta a la posibilidad, aun en contra de los 10 millones de millones de imposibilidades, y se acaba por admitir que el hecho ha podido ser posible de un modo natural.

Probabilidad de las combustiones espontáneas.

Si se trata de aplicar cuanto antecede al caso concreto de las combustiones espontáneas aparecen dificultades invencibles, y solamente se puede llegar vagamente a ciertas conclusiones porque, a pesar de que muchas de estas combustiones han tenido conse-

cuencias trágicas y costosísimas, su remedio no se ha tratado de encontrar por medio de las leyes estadísticas, sino profundizando en el estudio físico y químico del fenómeno para que, en el manejo y conservación de la sustancia peligrosa, se puedan tomar las contramedidas oportunas respecto a la producción del fenómeno.

Han sido citados los siguientes casos de combustiones espontáneas o fenómenos que puedan ocasionarlas:

1.° Hidrógeno aerostático.
2.° Electricidad en los aviones.
3.° Gasolina.
4.° Pólvora.
5.° Carbón almacenado.
6.° Heno y paja almacenados.
7.° Algodón empapado en grasa.
8.° Sustancias pirofóricas.
9.° Hacina de mies.
10.° Diversos.

Pasemos revista a cada caso en lo que concierne a la probabilidad.

En el hidrógeno aerostático se pueden distinguir tres casos bien definidos:

a), al hacer la inflación o recarga del globo abriendo los tubos que contienen el gas;

b), al escaparse el gas por una rasgadura del globo cautivo, y

c), en el aterrizaje de un globo libre.

En este último caso es donde se puede concretar más en cuanto a probabilidad. Desgraciadamente ha desaparecido el archivo de la Aerostación Española, y no es posible contar con una estadística exacta; pero creemos que no se separa mucho de la verdad suponer que en el período desde que la Aerostación había pasado ya del estado de ensayo en nuestro país al de Servicio independiente, que ha durado treinta y seis años, se han realizado 1.000 ascensiones; de ellas solamente en una se registró el incendio del hidrógeno al aterrizar y esto permite aplicar, aunque con cierto error, que siempre será muy pequeño, el teorema de Bernouilli, y decir que la probabilidad de incendio en el aterrizaje de un globo libre es de $\frac{1}{1.000}$. Esta probabilidad es bastante grande si se la compara con lo que sucede en aviación y se

tiene en cuenta los miles de aterrizajes hechos con aviones sin que se haya realizado un suceso análogo; aunque claro es, en el avión, o se evitaba el peligro cuando había patín de cola, o se ha evitado después con el empleo de bandajes conductores como se ha dicho más arriba.

El caso de salida del hidrógeno de un globo cautivo por rasgarse es incendio de gran probabilidad. Es claro que no se cuenta con un número de hechos suficientemente grande para que pueda aplicarse el teorema de Bernouilli, pero en la media docena de casos ocurridos solamente en uno dejó de incendiarse el globo.

Y ahora viene en seguida la pregunta: si la explicación del incendio espontáneo del hidrógeno es la que se ha dicho, ¿cómo no se incendió *casi siempre* también en el aterrizaje, que requiere necesariamente dar salida al gas por la abertura de desgarre? La repuesta es inmediata. Recuérdese esa explicación y en ella se verá que es condición primordial para el incendio que la mezcla hidrógeno-oxígeno esté en determinadas proporciones; cosa que respecto al globo libre puede decirse que será menos probable que ocurra, por salir toda la masa de hidrógeno de una vez por abertura preparada al efecto; mientras que en el globo cautivo la salida por una rasgadura irregular es más lenta y en menor cantidad, y, por lo tanto, es más probable, por no decir seguro, que se formará mezcla explosiva.

En el caso de la gasolina faltan por completo las estadísticas; pero cuando los quitamanchas no contaban con las debidas precauciones, debieron ser incendios de gran probabilidad, ya que llegaron a dar lugar a que se estudiase el fenómeno especialmente, y se publicase un libro sobre todo ello, y si modernamente no ocurren con más frecuencia es por haberse adoptado las debidas precauciones.

Lo mismo puede decirse respecto a casi todos los demás incendios espontáneos citados; el estudio ha hecho que cada vez sean menos frecuentes por afinarse, gracias a ello, los métodos de fabricación de las sustancias y las reglas para su conservación, de modo que queden para el azar cada vez menos casos que considerar, como ocurre, por ejemplo, con la pólvora. En cuanto a los almiares de paja no hay más que recordar que en la zona de

Marruecos español raro era el año en que no ocurrían uno o dos incendios en diversos lugares del territorio. El caso del algodón empapado en grasa se comprende que por su escasa importancia en la vida no ha merecido hacer la estadística pertinente.

El caso de la hacina de mies y los otros varios citados como de origen mixto es el típico de un suceso producido por varias causas o compuesto de varios sucesos parciales, por lo que su probabilidad ha de obtenerse *multiplicando* las probabilidades parciales, ya las simples, ya las modificadas, como seguramente será lo que ocurra en este caso, puesto que, si se admiten determinados caracteres para el tiempo atmosférico, es claro que ya será distinta la probabilidad de otro fenómeno de los concomitantes como, por ejemplo, el valor del potencial atmosférico.

En este caso intervienen muchas causas: la intensidad de ionización; la de formación de colonias de iones; la acumulación de iones; la pequeña difusión de éstos; el gradiente eléctrico general de la atmósfera; la formación eventual de un gradiente elevado por la presencia de otro dieléctrico que el aire en determinadas condiciones; el igual aumento local del gradiente por la forma de determinados objetos; la intensidad y dirección del viento; la temperatura ambiente; el grado higrométrico, etc., y en fin, el estado general del tiempo, sobre todo respecto al grado de envejecimiento del aire que, en mucho, resume causas anteriores y, desde luego, modifica su probabilidad.

Y dada esta complejidad, ¿quién es capaz de calcular, aun a *grosso modo*, la probabilidad compuesta de un suceso de este género? Faltan en absoluto las estadísticas parciales, y no es posible ni siquiera dar una aproximación. Pero solamente el hecho de saber que intervienen más de una docena de causas hace ver que la probabilidad compuesta será de la forma

$$\frac{1}{N} \times \frac{1}{N'} \times \frac{1}{N''} \times \frac{1}{N'''} \times \ldots\ldots,$$

en donde intervienen muchos denominadores, y todavía más si se trata de precisar la probabilidad en una zona determinada de terreno, por ejemplo en 200 Ha.; estando este número contenido unas 2.10^9 veces en la superficie de España que puede producir

mies, uno de esos denominadores sería de ese valor 2.10^9. El producto, pues, de ellos será, desde luego muy grande, y, *por tanto, la probabilidad muy pequeña;* de las que hacen entrar el caso en el grupo de los llamados *raros o extraordinarios,* o sea, de aquéllos cuya imposibilidad puede asegurarse moralmente y gracias a Dios; pues, si así no fuese ¿cómo podría el hombre entregarse al descanso temiendo que sus ropas, sus viviendas, sus frutos, sus bosques, todo cuanto tiene, puede ser pasto de un incendio? Sin embargo, cuando se reflexiona y se piensa en que queda el numerador 1 se ve que puede darse el caso *raro,* y se tiene la certeza matemática de que ha ocurrido naturalmente.

Y es que todavía son muchos los hechos naturales producidos por el conflicto de causas múltiples que se han movido en condiciones *para el hombre casi desconocidas.*

Pero, aunque ello es así, hay que precaverse contra un razonamiento especioso que podría hacerse y que, de ser admitido, llevaría al absurdo de que no podría llegar a tener lugar ningún suceso en el que concurriesen circunstancias análogas a las del que se viene considerando. Se hace referencia a lo que sigue: Borel, con la gran autoridad de su nombre en cuestiones de azar, después de modificar su pensamiento más de una vez, ha llegado a decir que si un suceso tiene una probabilidad de $1:10^{1000}$ se puede decir que es *totalmente imposible,* o sea que la probabilidad que alcance ese valor es rigurosamente despreciable o nula. Pues bien, podría razonarse en sucesos de la índole de los que se vienen considerando, en que figura la localización de los mismos como acto componente, que siempre se está en tal caso de imposibilidad, pues, para que así resulte, basta considerar la limitada extensión de los centímetros cuadrados en que se ha producido realmente un incendio, referida a la totalidad del territorio en que se produce mies, ya que entonces la relación alcanzaría, y aun rebasaría, ese límite de probabilidad nula.

Este modo de razonar es falso, algo así como lo que hizo el marqués de Condorcet cuando tuvo la peregrina ocurrencia de aplicar la teoría de la probabilidad al resultado de los juicios contra los procesados comunes, olvidando que para aplicar el concepto de frecuencia de un suceso hay que abarcar los casos igualmente posibles, o sea aquéllos sobre los cuales se pueda

decir que son homogéneos los datos que se poseen, y de los cuales se parte para establecer la probabilidad.

Resumiendo: creemos suficientemente probado que existen tales hechos *naturales*, con una explicación en correspondencia con el estado actual de la ciencia, que no es más que una *imagen* de la realidad, tal como se refleja en el pensamiento humano en cada momento de su historia; imagen que, desde luego, *no es nunca la cosa en sí*, que esto sólo pertenece a Dios, sino la *cosa para mí;* pero, sin embargo, aunque sólo sea de este modo, aunque el hombre sólo cuente con una imagen deformada, ella nos permite *obrar*, algo así como lo que sucede a diario cuando nos arreglamos el rostro mirándonos en un espejo; éste nos devuelve, tan sólo, una imagen de dos dimensiones de nuestra cara, que tiene tres; y, sin embargo, guiados por esa imagen, que a todas luces no es exacta, llegamos a realizar nuestro propósito. Así, la ciencia de hoy ha conseguido, con sus electrones, aunque sólo sean imagen imperfecta de la realidad, sostener una conversación con el antípoda.

Y con esta preparación de ánimo, fácil será ahora entrar en el examen de los hechos que se intenta explicar.

IV. LOS FENÓMENOS DE LAROYA

IV. LOS FENÓMENOS DE LAROYA

La verdad puede, algunas veces, parecer inverosímil.—BOILEAU.

Descripción del lugar en que ocurrieron los * * fenómenos. * *

PROGRESIVAMENTE se ha ido estableciendo un encadenamiento de ideas, propiedades de las cosas y principios naturales que lleva de modo directo al examen de los fenómenos que se trata de explicar. Si se recuerda cuanto se dice en el informe descriptivo que encabeza este trabajo, se ve que los fenómenos de Laroya ocurrieron en la vertiente Norte de la *Sierra de Filabres*, elemento orográfico el más destacado de la provincia de Almería.

a) OROGRAFÍA.—El croquis que se acompaña en la figura 48 hace ver que, en efecto, esta Sierra que se une a la de Baza en la cúspide «Dos Picos», contiene el monte *Tética de Bacares*, de 2.080 metros de altitud. Más al Norte, en su misma dirección de Este a Oeste, las *Sierras de las Estancias* y de *María*, y, por fin, *La Sagra*, en Granada, con 2.362 metros de altura. Casi en prolongación de la Sierra de Filabres, hacia el Oeste se encuentra la porción de *Sierra Nevada*, de la que aquélla es como la continuación, que pertenece a la provincia de Almería con el pico Chullo, que está en el límite de las provincias y tiene 2.609 metros de altitud. Por el Este se continúa la Sierra de Filabres por

la de Almagrera. Al Sur, y de Oeste a Este, se presentan las *Sierra de Gádor* y la *Alhamilla*, con alturas de 1.445 metros, la primera, en el pico *Piorno*, y sin llegar a los 1.000, la segunda, que continua al Este por *Sierra Cabrera*, y, por fin, la más meridional de todas, se presenta la *Sierra de Gata* con sus formaciones volcánicas.

El carácter que resalta de esta ligera descripción es el de las grandes elevaciones que se presentan a escasa distancia del mar; así, el monte Tética, con sus 2.000 metros, se halla tan sólo a 45 kilómetros del mar y no hay que decir las otras alturas, aunque menores, que se encuentran junto al mismo mar, como, por ejemplo, los 513 metros del cerro del Garbanzal, en la Sierra de Gata.

b) Geología.—*El accidente tectónico más saliente* de la región es la falla por donde corren los ríos *Andarax*, en cuya desembocadura se halla Almería, y luego hacia el Norte, el Fardes que riega Guadix.

La Sierra de Filabres es una prolongación estratigráfica y orográfica de Sierra Nevada, separada de ella por la falla citada; una de las fracturas diagonales debidas a los esfuerzos cortantes causados por las presiones orogénicas que se produjeron en remotos tiempos, y su cumbre coincide con el eje del anticlinal, que llegó a emerger con aquellas presiones. Está formada por estrato cristalino de micacitas granatíferas y calizas cristalinas o mármoles, componiéndose las primeras de micacitas, propiamente dichas, y pizarras micáceas, de las cuales las micáceas son las más profundas y las pizarras más superficiales y, además, muy arcillosas, de colores blanco-azulado y verdoso, con textura y fractura hojosa. Se descomponen por la acción de la atmósfera y forman verdaderas arcillas que constituyen el fondo de los terrenos de cultivo de esta zona. Sobre las micacitas descansan los mármoles, tales como los que dan la riqueza a Macael, y en muchos de esos mármoles aparecen los criaderos de hierro que se presentan en isleos de corta extensión.

El triásico envuelve la sierra como ocurre en Sierra Nevada, y está compuesto de filadios arcilloso-talcosos y calizas y dolomías.

Añadamos, por último, a esta ligera referencia geológica, que la provincia es rica en yacimientos minerales, aunque muchos

Plomo argentífero
Azogue
Plomo
Hierro
Azufre
Lignitos
Zinc
Plata
Turba
Oro (cuarzos)
Oro (aluviones)
Granates
Barita
S Salinas
E Esteatita
P Petróleo ?
Aluminio
A Aguas medicinales
Salitre
Mármoles
Fundiciones (Azogue-Plomo)

PROVINCIA DE MURCIA

GRANADA

Sierra Larga
Sierra de María
Velez Rubio
Sierra de las Estancias
Huercal Overa
Sierra de Almagro
Almanzora
Cuevas de Vera
Vera
Purchena
Río Macael
LAROYA
Tetica aoão
Tahal
Sierra de los Filabres
Dos Picos 1901
Río Almanzora
Gergal
Sierra Nevada
Chullo 2609
Río Nacimiento
Canjáyar
Sierra de Gádor
Morno
Berja
Río Grande
ALMERÍA
Río Andarax
Sierra Alhamilla
Níjar
Sorbas
Río de Aguas
Sierra de Cabrera
Río Alias
Tabernas
La Serrata
Sierra de Gata
Roldan 220

PROVINCIA DE ALMERÍA

MAR MEDITERRANEO

Fig. 48

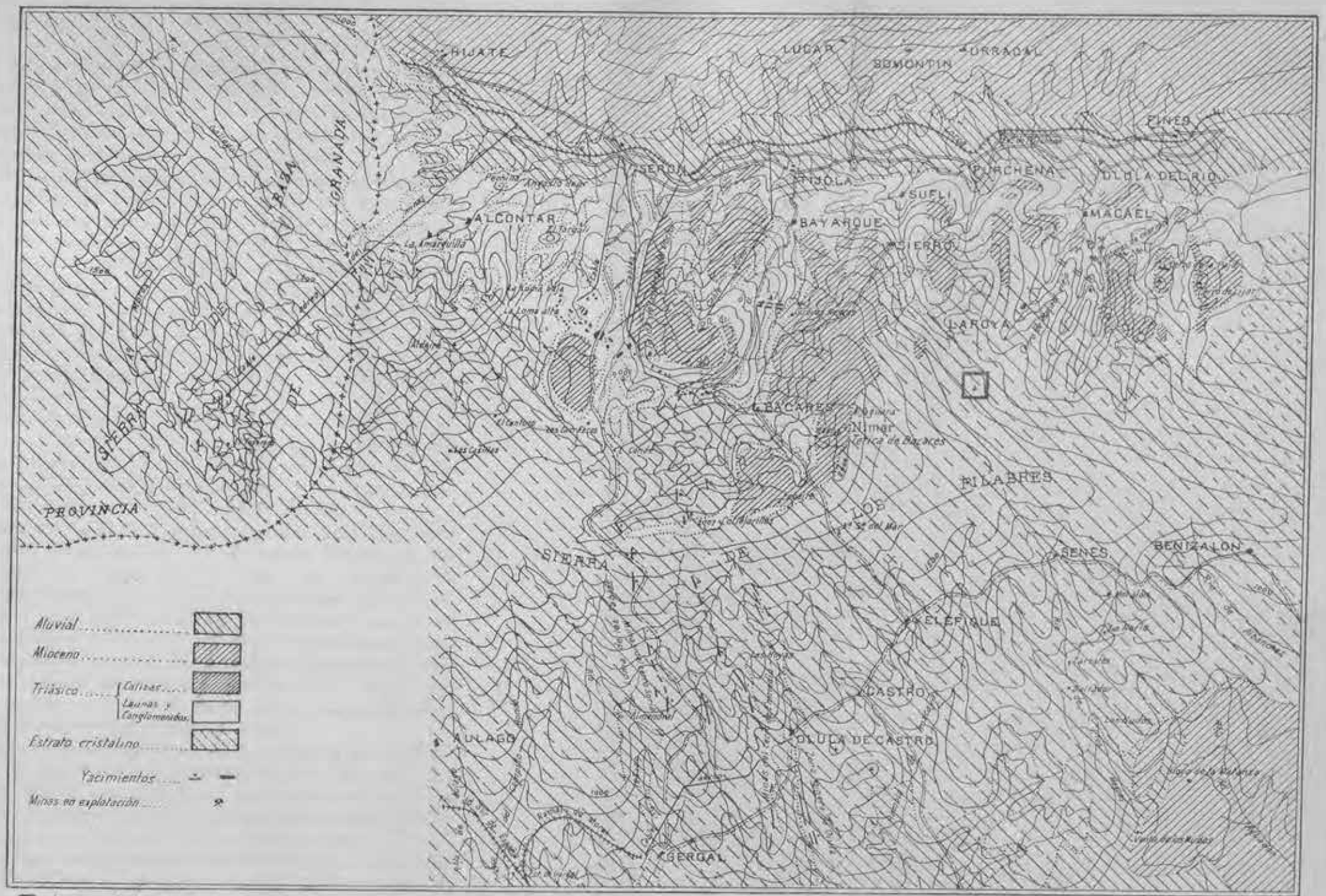


Fig. 49.—Croquis geológico simplificado de la zona de Laroya.

no son de fácil explotación y transporte, y que estos criaderos están indicados en la carta de la figura 48, que expresa, de un modo gráfico y más claro, cuanto pudiese decirse en una descripción que habría de resultar larga y confusa. Se incluye también el croquis geológico de la zona de Laroya (fig. 49).

c) Acceso a Laroya.—Para llegar desde Almería a los terrenos de Laroya hay que cruzar la Sierra de Filabres, siguiendo la carretera de Tabernas, para, antes de Sorbas, torcer a la izquierda, tomando el camino que cruza la sierra, desde el que, por cierto, se disfruta de paisajes imponentes, y llegar a Cantoria, siguiendo después a Olula y de aquí a Macael, donde hay que abandonar la carretera por su mal estado, debido al tránsito con las pesadas cargas de los mármoles que se llevan a trabajar a Macael. La ascensión de los 16 a 18 kilómetros que hay desde Macael a Laroya y cumbres de Filabres, ha de hacerse penosamente en caballería.

Puede también seguirse el camino que arranca desde la carretera que lleva a Cantoria y sigue hasta Tahal, y de aquí en caballería a las cumbres de Filabres, pero la desviación desde la carretera hasta Tahal se encuentra también en mal estado, aunque no tan malo como el de la carretera de Macael.

Añadamos ahora la vista panorámica del lugar compuesta con mucho arte por el Ingeniero Sr. Rodríguez Navarro, y que está reproducida en la figura 50, y se tendrá una idea exacta de cómo es el lugar que tan de actualidad puso al pueblo de Laroya, que se halla a unos ocho kilómetros al Norte del mencionado lugar, en una ladera del estrecho y profundo barranco que forma el cauce de lo que se llama río Laroya, y que sólo es río muy de tarde en tarde, tanto que el camino de Macael a Laroya está constituído por una malísima senda entre los guijarros y enormes bloques de acarreo que contiene el cauce.

Como se ve en la panorámica y en el croquis de la figura 1.ª los cortijos en que ocurrieron los incendios se hallan reunidos en una extensión de unas 200 Ha., y están situados casi todos a media ladera en las vertientes que parten de las cumbres, siendo los más elevados el de Pitango y de la Fuente del Saz.

Conviene notar que el barranco del Cerrajero tiene una orientación de Este a Oeste y que este barranco viene a ser como el

eje de la zona en que se produjeron los incendios, la cual se ve en la panorámica desde el Norte, o sea en sentido inverso a como aparece en el croquis topográfico que, como es natural, está hecho con el Norte en la parte superior.

El tal barranco del Cerrajero corre entre la divisoria de Filabres y un promontorio desprendido de la misma que avanza hacia el Norte.

*** Los hechos. *** Aunque los hechos están relatados con suficiente detalle en el informe que figura al principio hecho por el Ingeniero Sr. Rodríguez Navarro, es de interés presentarlos aquí por orden cronológico.

Los primeros casos ocurrieron el *día 16 de junio del año*

Fig. 51.—El célebre cortijo de Pitango, en el que se iniciaron los fuegos, el día 16 de junio, en que ardió la techumbre del pajar que aparece quemada en la fotografía.

actual de 1945 en el cortijo de Pitango, empezando a las veinte horas (H. O.) al quemarse las ropas de una niña, y después otros incendios de paja y esparto, hasta que por fin arde la techumbre del pajar (fig. 51).

Los siete días siguientes transcurrieron sin que ocurra nada especial, y el día 23 se originan incendios en el cortijo de Fuente

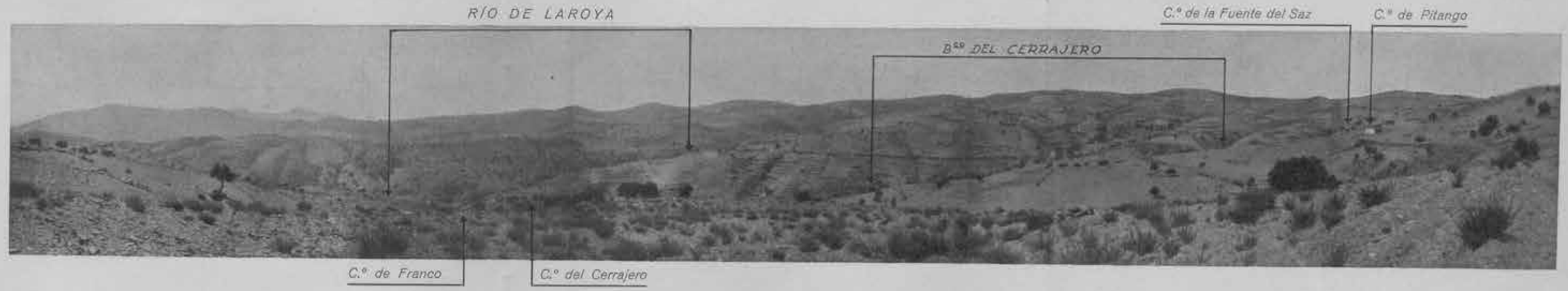


Fig. 50.—Una vista panorámica de los terrenos de Laroya afectados por los incendios. ¿No es cierto que muchas estepas de transición al desierto presentan aspecto parecido?

del Saz, en donde se quemaron hacinas de cebada y centeno en gran cantidad, y luego otros incendios en algunas camas y colleras y mosqueros de esparto. El mismo día, a igual hora y en la cortijada de Estella, al otro extremo de la zona afectada, se prende fuego el estiércol y techo de la cuadra, una cama, en la despensa la cuerda que sostenía una caña de la que penden embutidos; más tarde, el mantón con que se tapaba una mujer que dormía.

El *día 24* es en el que fué mayor el número de casos; a cinco horas empieza el primer incendio en el cortijo de Acosta, con 23 cargas de centeno que se quemaron en la era. A mediodía otra hacina, y luego en la tarde hasta 15 casos; albarda, silla colgada de la pared, escoba de esparto, también colgada, ropa, llueca empollando, etc. A diez horas en Pitango el rastrojo. A veintidós horas, en el Cerrajero, esparto colgado de una estaca en la pared; una jarapa en el suelo y la hacina de trigo en la era. En el cortijo de Franco, a las veintitrés treinta horas, haces de trigo en una era, la leña arrimada a una tapia, una cama y las lentejas de la era; incendio éste visto por el cabo Santos, de la Guardia civil.

El *día 25*, en el Cerrajero, nuevamente desde las dieciséis horas hasta las veintidós, más de 20 casos pequeños y la hacina de centeno de unas 20 fanegas, también visto este incendio por el cabo Santos, de la Guardia civil, desde su comienzo, y del cual se tratará después particularmente.

El *día 26*, en el cortijo de Pitango y en el de Acosta, nuevos casos análogos.

El resumen, por orden cronológico, es el que se incluye a continuación:

Día 16..... Pitango a 20 h.

Día 23..... Fuente del Saz 20 h.
Estella 20 h. 23 h. 30

Día 24..... Pitango a 10 h.
Miguel Acosta a 5 h. 12 h.
Cerrajero 22 h.
Franco 23 h. 30

Día 25. ..... Cerrajero 16 h.

Día 26..... Pitango 11 h. 15 h.
Miguel Acosta 17 h.

Puede decirse, pues, que han sido cinco los días en que el fenómeno se ha presentado con caracteres análogos.

Estos cinco días de casos repetidos fueron los que dieron lugar a que la Autoridad provincial enviase al lugar de los sucesos a los Ingenieros Contreras Vilches y Rodríguez Navarro, Jefe de Minas y del Observatorio Sismológico, respectivamente, que redactaron el informe repetidamente citado, en el cual, reflejando la primera impresión del momento, se desecha, desde luego, la hipótesis de la mano humana como causante de los incendios; asunto al que se volverá oportunamente.

Así, pues, hay que partir de que los hechos relatados en el informe *son ciertos*, puesto que no es posible admitir que tantas personas, tan de diferentes circunstancias, se hubiesen puesto de acuerdo para mentir todas del mismo modo, y más recordando aquella apreciación de Balmes sobre los testimonios de la verdad de que «el hombre más mentiroso dice muchas más verdades que mentiras», y más aún que todas las personas interrogadas por los Ingenieros que redactaron el primer informe mintiesen de acuerdo completo entre sí para que, personas de la categoría de tales Ingenieros, fuesen inducidos a error y no se apercibiesen de la superchería.

Admitida la certeza de los hechos se trata ahora de explicarlos, y este es el problema.

Primera apreciación sobre los hechos.

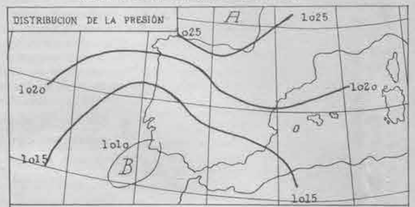
Dos orígenes son los únicos que pueden considerarse: uno, por causas procedentes del terreno en sí; otro, por causas atmosféricas; es decir, aquello vino o del suelo o del cielo.

El primer origen, a nuestro juicio, hay que desecharle por *la falta de continuidad en los hechos*, es decir, si la causa de los incendios hubiese procedido de una emanación del terreno, estos incendios se hubiese producido constantemente tanto *antes* como *después* de las fechas en que se observaron los que motivan este trabajo. Es así que *antes* no ha habido manifestación alguna, luego no pueden pensarse en el origen interno, a *menos que se hubiese comprobado algún fenómeno geofísico que hubiese podido producir un cambio*, como por ejemplo, un *sismo*, y aun así, la naturaleza de los terrenos (fig. 49) no hace presumir que

Ministerio del Aire

Servicio Meteorológico Nacional

Avance del viernes 15 de Junio de 1945 a 8 h.



INFORMACIÓN GENERAL, DEDUCIDA DE LAS OBSERVACIONES DE LAS 8 (HORA DE VERANO)

La nubosidad es abundante en toda España especialmente en la mitad sur donde llueve con intermitencias. En Galicia las nubes son escasas.

Las lluvias fueron de orden de 10 litros en la vertiente norte del Sistema central, bastante más débiles al sur.

TIEMPO PROBABLE, PREDICCIÓN VÁLIDA HASTA LAS 8 HORAS DEL DÍA 16

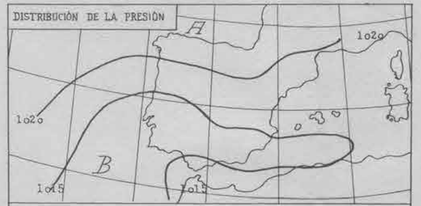
En las cuencas del Tajo, Guadiana y Guadalquivir y en Levante, cielo generalmente cubierto y lluvias intermitentes.

En el Ebro y Duero tiende a disminuir la nubosidad.

En Galicia y Cantábrico no se espera cambio importante.

Vientos del Nordeste y Este en las costas del norte con marejada y del Nordeste con marejadilla de Levante.

Avance del sabado 16 de Junio de 1945 a 8 h.



INFORMACIÓN GENERAL, DEDUCIDA DE LAS OBSERVACIONES DE LAS 8 (HORA DE VERANO)

Durante la noche llovió en las Vascongadas, cuenca del Ebro, Cataluña, Levante y Andalucía.

El cielo está cubierto en el centro y en el litoral mediterráneo.

TIEMPO PROBABLE, PREDICCIÓN VÁLIDA HASTA LAS 8 HORAS DEL DÍA 17

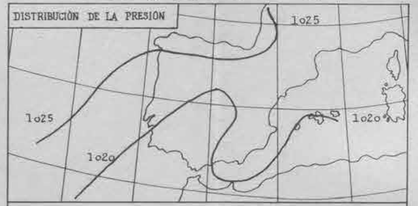
En la mitad sur de España y en las costas de Cataluña se mantendrá el cielo cubierto o casi cubierto.

En Levante son de esperar algunas precipitaciones aunque en muy poca cantidad.

En el Duero y Galicia tiempo mejor, nubes sobre la sierra.

Vientos del Nordeste y Este en el norte de España y marejadilla en todo el litoral.

Avance del domingo 24 de Junio de 1945 a 7 h.



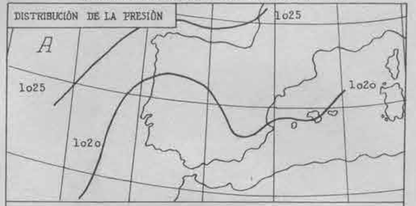
INFORMACIÓN GENERAL, DEDUCIDA DE LAS OBSERVACIONES DE LAS 8 (HORA DE VERANO)

Se registraron por la noche en algunos momentos lloviznas sobre las Vascongadas. Hay nubes bajas en Galicia y la costa de Andalucía, y altas en Extremadura y Centro.

TIEMPO PROBABLE, PREDICCIÓN VÁLIDA HASTA LAS 8 HORAS DEL DÍA 25

Sobre las divisorias se formarán, desde medio día, agrupaciones de nubes de estructura vertical que en algunos puntos de la cordillera Ibérica y de la Península, originarán chubascos de carácter tormentoso. En el litoral, régimen de brisas con alta nubosidad sobre el Cantábrico y marejadilla.

Avance del lunes 25 de Junio de 1945 a 7 h.



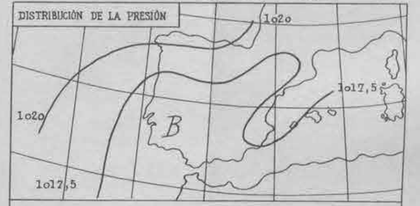
INFORMACIÓN GENERAL, DEDUCIDA DE LAS OBSERVACIONES DE LAS 8 (HORA DE VERANO)

En la vertiente cantábrica ha amanecido con cielo cubierto y en algunos puntos de Asturias y Vascongadas, con lluvia. Hay muchas nubes medias en Cataluña y está despejado o casi despejado el resto de España. Las tormentas de ayer fueron acompañadas de muy escasas precipitaciones.

TIEMPO PROBABLE, PREDICCIÓN VÁLIDA HASTA LAS 8 HORAS DEL DÍA 26

Tiende a disminuir la densidad de nubes en la vertiente Cantábrica. En el interior de la Península habrá formación de grandes cúmulos y algunas tormentas. En Galicia y Asturias seguirán los vientos del NE. mejorando el estado del mar. En las costas del S. y SE. brisas.

Avance del martes 26 de Junio de 1945 a 7 h.



INFORMACIÓN GENERAL, DEDUCIDA DE LAS OBSERVACIONES DE LAS 8 (HORA DE VERANO)

Continuaron de noche las tormentas sobre la cordillera central y alto Duero dando lugar a débiles precipitaciones al amanecer. La nubosidad era escasa en toda la Península excepto en el Cantábrico y Cataluña.

TIEMPO PROBABLE, PREDICCIÓN VÁLIDA HASTA LAS 8 HORAS DEL DÍA 27

Cielo generalmente cubierto en el Cantábrico; nubosidad variable en el litoral mediterráneo; inestabilidad en el interior dando origen a nubes de estructura vertical y tormentas.

Vientos del Nordeste en Galicia.

Marejadilla en el Atlántico; más tarde marejada.

Mar rizada y llana en el Mediterráneo.

Fig. 52

se hubiese llegado a tanto. Pero no hay ni que pensar en ello puesto que tal sismo no ha sido registrado, y nada menos que en la propia ciudad de Almería existe Observatorio Sismológico, para el que no hubiese pasado desapercibido.

Luego, por necesidad, hay que volver los ojos al cielo, es decir, considerar el asunto como perteneciente a la Física atmosférica.

Como al hacer de un modo general la explicación de combustiones espontáneas se ha hecho el supuesto, en algunos casos, de que el carácter y circunstancias del tiempo eran factores que intervenían en la producción de los fenómenos, es necesario lanzar siquiera una ojeada sobre tales extremos en los días y época de los sucesos para saber si el tiempo fué o no fué de los que entran en el grupo que condiciona las explicaciones desarrolladas.

Carácter general del tiempo atmosférico durante los días de los sucesos.

El carácter del tiempo en los días de los sucesos se puede concretar denominándole seco, de temperatura elevada y cielo despejado, a excepción de los días 16 y 26, en los cuales hubo alguna llovizna; el día 16 semicubierto y con lloviznas intermitentes, y el 26 con llovizna solamente de madrugada.

El día 16 puede calificarse de resolutivo de la situación depresionaria del Sudoeste de la Península, indudablemente relacionada con el *frente ecuatorial*, que venía afectando a España en días anteriores con situaciones tormentosas, tal como se ve en el croquis de isobaras del día 15 (fig. 52), tomado del «Servicio Meteorológico Nacional», situación que vino a desembocar en un *dominio de baja presión*, de poquísima intensidad, que se extendía por el Sur de España, como se ve en los croquis de isobaras de los días sucesivos, que también se acompañan.

Este tipo de tiempo, de calma y viento suaves, todos de componente Este, con cielo despejado y como resto de situaciones tormentosas de entrada de verano, es el adecuado para pensar en un *campo eléctrico atmosférico perturbado*, recordando cuanto se dijo acerca del asunto al tratar del tema en el capítulo II.

Pero todavía, si se tiene presente el carácter general del tiempo en estos dos últimos años, que ha venido a culminar en la pro-

longada sequía estival que, como continuación de la empezada a sentir en febrero ha sufrido España, se comprende que la zona meridional de nuestro país, de tantos caracteres comunes con África, haya estado todavía más durante ese tiempo bajo un clima que puede llamarse mejor africano que europeo.

A este fin convendrá hacer algunas consideraciones, aunque breves, en armonía con el carácter de este trabajo, sobre las causas que, a nuestro parecer, determinan las circunstancias que viene presentando en esta época el tiempo atmosférico.

El tiempo atmosférico en esta época.

Se considerará el tema bajo los siguientes aspectos:

a) Los MOVIMIENTOS DEL AIRE ATMOSFÉRICO.—Imagínese el globo terráqueo inmóvil en cuanto a rotación y sometido a la acción de un anillo de fuego ecuatorial, algo así como la forma en que aparecería el Sol y todos los astros del firmamento al habitante de la Tierra, si este habitante estuviese organizado de modo que el *poder de persistencia de imágenes* de su retina fuese superior a veinti-

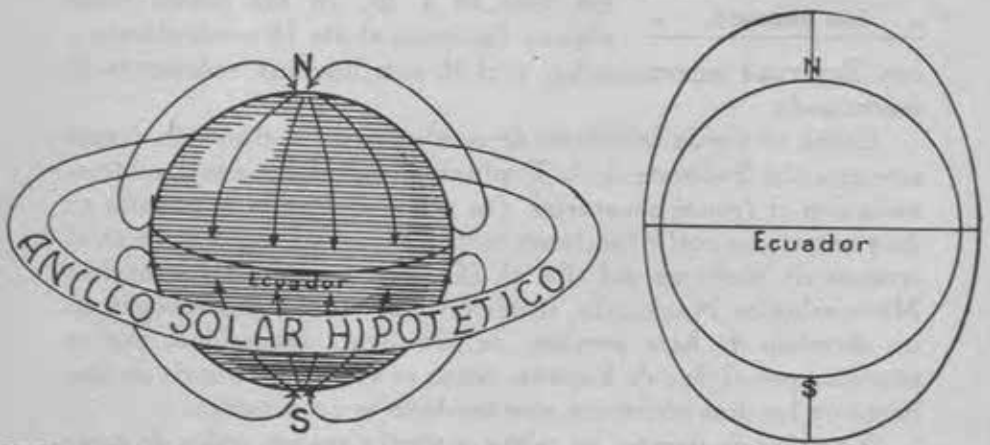


Fig. 53.—Si la Tierra estuviese inmóvil y calentada por un anillo de fuego, en vez de por un disco, el régimen de vientos que se originaría sería el que se ve en esta figura: vientos inferiores de Polos a Ecuador y superiores de Ecuador a Polos.

cuatro horas, con la consiguiente modificación del poder separador de imágenes que para nuestra humanidad es tan solo de 1/15 de segundo, gracias a lo cual es posible el cinematógrafo. En la Tierra, así calentada, la atmósfera sufriría la acción de un

calor constante en todo el Ecuador y nulo en el Polo, de modo que en ese mundo, en el que todo lo existente se entrecruzaría en una vorágine serpentinesca, el aire atmosférico calentado en el Ecuador ascendería, y, a consecuencia de ello, se establecería un tiro de vientos convergentes hacia el Ecuador que irían en cada hemisferio desde sus respectivos Polos, y acabaría por establecerse una doble corriente; de vientos inferiores dirigidos de Polo a Ecuador, y de vientos superiores de Ecuador a Polos, como si en éstos hubiese una alta presión y una baja en el Ecuador (fig. 53).

Supóngase ahora que desaparece el anillo de fuego, y que el Globo entra en rotación: la fuerza centrífuga de esta rotación, máxima en el Ecuador y nula en los Polos, determinará una situación de presiones inversa, es decir, un máximo en el Ecuador y un mínimo en cada Polo, con la diferencia, respecto al caso anterior, de que este esquema sería completamente estático, o sea, sin que se ocasionase movimiento alguno en cuanto se hubiese llegado al estado de régimen permanente (fig. 54).

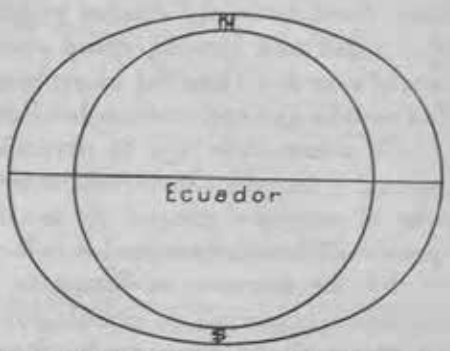


Fig. 54.—El régimen de presiones en la atmósfera ocasionado por la fuerza centrífuga debida a la rotación de la Tierra: establecido este régimen, la atmósfera permanecería en reposo si otra causa no produjese movimientos del aire.

Considérese ahora la *realidad;* ambas causas actúan *simultáneamente,* y aunque el calentamiento ecuatorial no sea simultáneo, sino *sucesivo* en cada punto, se comprende que tal combinación determinará una situación, que puede calificarse de intermedia, con un doble cinturón de altas presiones en ambos hemisferios y mínimos en el Ecuador y en los Polos, y los movimientos del aire serán, en consecuencia, partiendo desde ese cinturón de presiones elevadas, dirigiéndose hacia el Ecuador de una parte y hacia los Polos de otra; como la Tierra está en rotación, actuará constantemente el efecto *geostrófico* de que más arriba se habló, desviando los vientos siempre hacia *su*

derecha en el hemisferio Norte, y hacia su *izquierda* en el Sur con lo que estas desviaciones *tenderán* a *reforzar* y *mantener* el doble cinturón intermedio de presiones elevadas.

Resulta así bien claro, y como primera consecuencia de este examen, que el *manantial primero* y *permanente de energía* que entretiene los movimientos atmosféricos es el calor solar, así como también al desaparecer la quietud y actuar todas las demás causas, evaporación, condensación, electricidad, etc., etc. aparece el asombroso cuadro que al hombre ofrece la meteorología terrestre.

La cantidad de calor que la Tierra recibe del astro centra durante un año es enorme a nuestros ojos; algo así como el que, si estuviese repartido uniformemente por todo el Globo, sería capaz de fundir una capa de hielo de 36 metros de espesor que la cubriese enteramente. Tal como es en la realidad, la capa de hielo fundida en el Ecuador podría ser de 44 metros de espesor, y si el agua está líquida, como sucede realmente, la evaporada en un año podrá alcanzar el espesor de 0,55 metros, que es una de las causas que entretienen las lluvias del Planeta.

Se comprende que la diversidad de repartición de aguas y mares, y sus distintas condiciones para el calor, será causa de que el esquema general de movimientos esté muy perturbado, pero conservará siempre los caracteres que se han dicho.

b) El esquema de Bjerknes.—Actualmente se admite como esquema principal de circulación atmosférica el establecido por el Meteorólogo noruego Bjerknes, que está representado en la figura 55. En extracto, puede decirse que los cinturones de alta presión, cuya latitud es de unos 30°, comprenden el clima ecuatorial, en el que el tiempo es casi uniforme, con nubosidad y lluvias diarias, mientras que las zonas de altas presiones que comprenden la ecuatorial condicionan un cielo de pocas nubes, y de consiguiente, en ellas son escasas o nulas las precipitaciones.

En cambio, desde las zonas de altas presiones hacia los Polos el clima es de caracteres de gran variabilidad; es en donde se realiza constantemente la mezcla del aire polar frío con el subtropical caliente, mediante enormes torbellinos de 2.000 ó más kilómetros de diámetro, que son los que constituyen las borrascas

o depresiones que producen las alternativas, casi semanales, de tiempo, de todo el mundo conocidas.

A veces, el aire polar tiene energía bastante para irrumpir en la zona de alta presión, atravesándola, y llegar al Ecuador, constituyendo gigantesca ola de aire frío; pero las más de las veces las lenguas de aire frío, polar y subtropical, alternan, y en sus bordes es donde se forman los torbellinos de mezcla que son las depresiones, formando lo que Bjerknes denominó «frente polar» (figuras 55 y 56).

En este frente es donde se entrecruzan y mezclan las masas

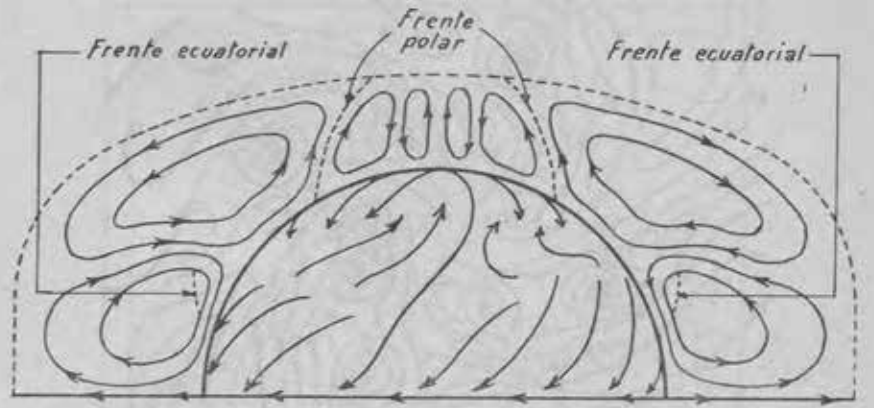


Fig. 55.—Esquema de la circulación atmosférica real con arreglo a las ideas de Bjerknes. Dos cinturones de altas presiones rodean a la Tierra a las latitudes de 30°; entre ellos existe el clima ecuatorial de caracteres permanentes; entre ellos y los Polos los climas tan variables de las zonas templadas; el aire polar frío se mezcla con el subtropical caliente, y los torbellinos de mezcla son las depresiones que recorren constantemente los países de las zonas templadas. A veces una ola de frío rompe el cinturón tropical y llega al Ecuador.

de aire de *origen polar* con las de *origen ecuatorial*, o mejor dicho subtropical, constituyendo así una zona de separación de aires de gran inestabilidad, en la que constantemente reinan perturbaciones que dan al tiempo el carácter de variabilidad ya dicho, con un período que varía de un lugar a otro pero que, por término medio, es de unos seis días para Europa.

c) El frente ecuatorial.—Sin embargo, especialmente para España, situada en el extremo meridional de Europa, es también necesario hacer constar la existencia de otro frente, en donde se separan masas de aire de diferente origen, aunque de caracteres

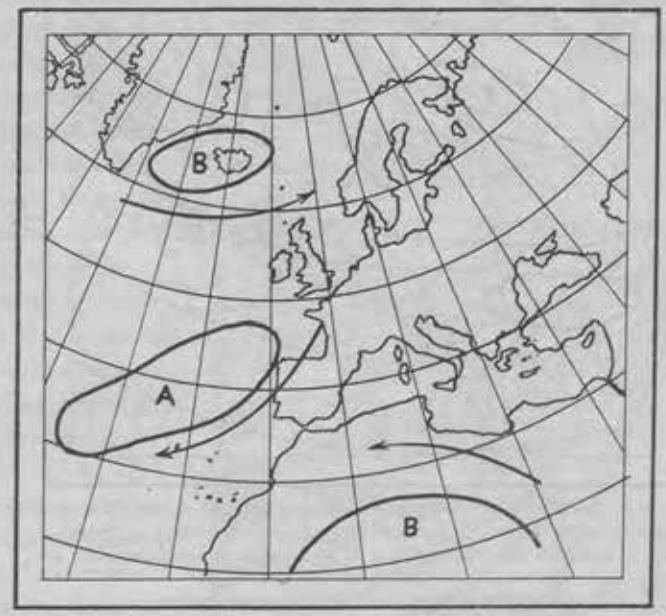
no tan distintos como las que se mezclan en el frente polar; es la zona, a la altura del cinturón de altas presiones, en donde se encuentran las masas de aire que vienen del Sur (hemisferio boreal), con los vientos de retorno del Noroeste que cierran la circulación de las zonas subtropicales. Ahora el aire procedente del Sur, como viene descendiendo de las alturas elevadas ecuatoriales, está *más*

Fig. 56.—La circulación atmosférica extratropical vista en detalle por encima de un Polo. Cuatro masas de aire frío se dirigen desde el Polo al Ecuador, mezclándose con otras tantas, de aire caliente procedentes del trópico. Un rosario de depresiones se desarrolla a lo largo de la separación entre las distintas masas: los anticiclones de buen tiempo (*H*) alternan con las depresiones. Todo el sistema gira alrededor del Polo y va sometiendo a la zona templada a las conocidas alternativas de bueno y mal tiempo.

frío que el aire que procede del Norte, así que el frente se forma entonces con propiedades diferentes que el polar. En éste, las lenguas de aire frío del Polo son las que se enroscan sobre sí mismas, envolviendo al aire caliente para elevarle; mientras que en el frente ecuatorial (Schmauss) es al contrario lo que ocurre;

el aire del Sur, que es el más fresco, es el que se enrosca y envuelve al aire boreal, produciendo depresiones que influyen mucho sobre el tiempo en los países que se hallan cerca de las zonas subtropicales, como es el caso para Marruecos y el Sur de España.

Los centros de acción meteorológica sobre * * España. * * A consecuencia de lo explicado, y refiriéndose a la época de la Meteorología, en que predominaba la imagen explicativa de los fenómenos partiendo de las presiones, en lugar de los movimientos del aire, como ocurre en la Meteorología actual, se puede

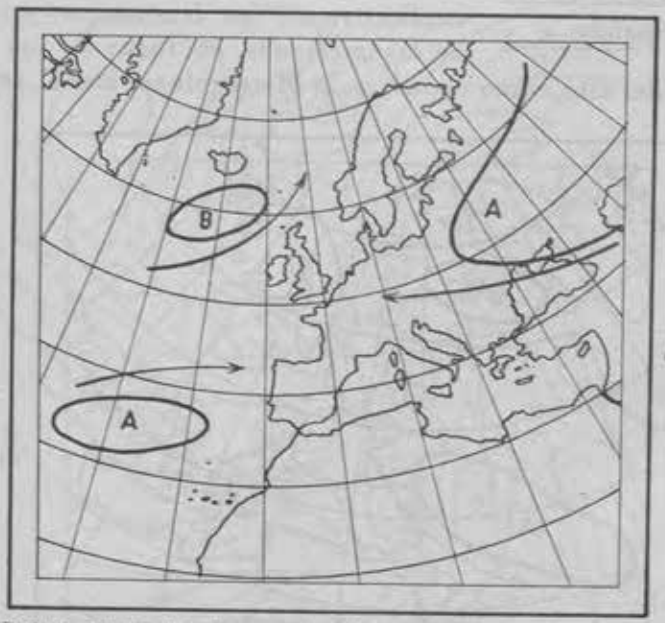


a)

Fig. 57.—Los centros de acción meteorológica sobre España: los anticiclones de las Azores y de Siberia; los mínimos de Islandia y de África.
En *a)* está representada la situación propia de verano: pocos hielos en Islandia, el anticiclón ruso retirado; el de las Azores con latitud elevada; el mínimo de África en plena actuación. España con vientos del Este, alternativamente frescos y abrasadores; sin lluvia.

decir, con Teisserenc de Bort, que son *tres los centros de acción* que actúan sobre el clima de Europa; el *anticiclón de las Azores*, uno de los elementos del cinturón boreal de altas presiones: el *mínimo de Islandia* y el *anticiclón invernal de Siberia* (fig. 57).

Según sea el centro predominante, y según su posición, así es el tiempo de Europa que resulta del paso de las *perturbaciones, depresiones, mínimos barométricos* o *borrascas* que, procedentes del Atlántico llegan, y que entran y recorren el continente por las trayectorias resultantes de la acción de esos centros; trayectorias y rutas que ya señaló Van Bebber (1891) y están repro-



b)

En *b)* la situación de invierno: muchos hielos en Islandia; el mínimo bajo; el anticiclón de las Azores con poca latitud; las depresiones entran en España; si actúa el anticiclón ruso, tiempo frío y de nieves. Vientos alternativamente del Oeste y del Este.
Se comprende la posibilidad de situaciones mixtas.

ducidas en la figura 58, en la cual, la anchura de las rutas es proporcional a su frecuencia, viéndose, cómo en el verano, los mínimos siguen preferentemente los caminos de Suroeste a Nordeste bastante alejados de España.

Pero, para la Península, no basta con esos centros de acción: hay que considerar también las perturbaciones del frente ecuatorial, que es tanto como decir del centro de acción representado por la depresión o *mínimo estival africano*.

Así, los años en que el anticiclón de Azores baja en latitud, y también el mínimo de Islandia, por ser grande la cantidad de hielos polares y, por otra parte, no está muy avanzado hacia el Este el anticiclón de Siberia, por ser relativamente menor la cantidad de hielos en la Nueva Zembla, el clima de Europa es suave y húmedo, y España participa del clima europeo, pues todo el sistema de rutas depresionarias se transporta meridionalmente y alcanza a nuestra Península, sometiéndola a régimen de vientos atlánticos (fig. 57 b). Al contrario; se retira al Norte el mínimo de Islandia, avanza en latitud el anticiclón de las Azores, todo por ser mayor el calentamiento ecuatorial, y, por tanto, el de la corriente del Golfo, que funde los hielos polares de Islandia (fig. 57 a), y entonces España deja de ser europea y queda sometida al centro de acción africano, con las pequeñas y escasas depresiones de pri-

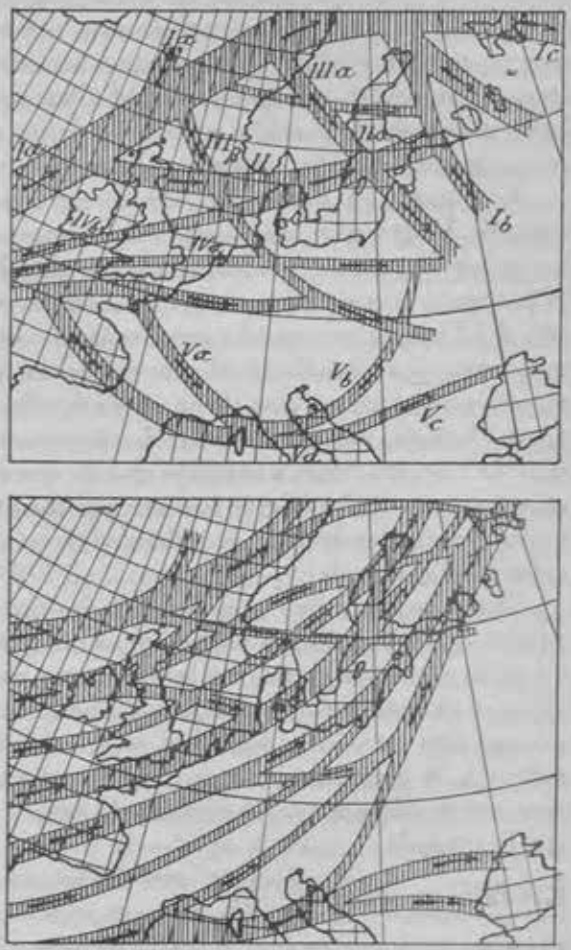


Fig. 58.—Los centros de acción determinan los caminos que siguen las depresiones. Son las rutas que señaló ya Van Bebber en 1891. La anchura de cada ruta es proporcional a la frecuencia con que es recorrida. En la parte superior están las rutas de invierno; en la inferior las de verano que, como se ve, están casi todas alejadas de España.

mavera y otoño que, principalmente, producen lluvias no abundantes en el Sur, y vientos sofocantes del Sureste en el resto de su territorio, especialmente en verano, y tibios en el invierno, y pasa a ser europea solamente en esta estación cuando, al mismo tiempo que se debilita la depresión africana y deja de influir el frente ecuatorial, avanza hacia el Oeste el anticiclón invernal ruso y somete a España a vientos fríos y secos del Nordeste, como de procedencia continental que son.

Así, pues, en estos regímenes, en lugar de predominar en nuestra Península los vientos de componente Oeste, como en los años europeos, predominan los del Este, fríos si son del Nordeste y secos y abrasadores, como procedentes del Sahara, si son del Sureste, y estando por desgracia bien presente este régimen ante los españoles ahora vivientes, queda claramente expuesto que el clima que viene soportando España durante estos años últimos, y especialmente desde el pasado febrero, participa más de los caracteres africanos que de los europeos, y todo como consecuencia de la diferente distribución de los hielos en el casquete polar, fenómeno en último término relacionado con el calentamiento solar.

Digamos, por fin, que el período corto del tiempo, el cual parece depender de las oscilaciones propias de la atmósfera en relación con su tamaño y calentamiento, es de dos a cuatro años, sin que en este sentido pueda hacerse una afirmación categórica, porque aún está la humanidad muy en la infancia por lo que se refiere a la prognosis meteorológica a largo plazo; pero no diferirá mucho de esa cita el período de sequía por el que pasa nuestra Península.

Resumen y observaciones de Laroya.

Se cree haber explicado, sucintamente sí, pero con suficiente claridad, que los caracteres generales del tiempo en la época transcurrida eran semiafricanos, y que, dentro de ellos, el tiempo, durante los días de los sucesos, fué típico de calmas de dominio de baja presión, consecuente a situaciones locales tormentosas, con alguna llovizna, y todo ello lo más adecuado para provocar estado eléctrico perturbado, llegando así el tiempo a los comienzos del régimen *quasimonzónico* de verano, propio de la Península Ibérica en tal estación.

Se comprende que estas afirmaciones pueden hacerse sin observaciones locales, pues, al contrario, para hacerlas, hay que basarse en observaciones generales. Por otro lado, la producción del estado *crítico*, que requiere llegar a determinar una combustión espontánea del género de las ocurridas, tan *parecidas* en sus caracteres a las explicadas al hacer el estudio de tales combustiones, ha de ser el resultado de *coincidencias* que solamente pueden ser *eventuales*, como claramente se deduce también del párrafo dedicado a su probabilidad, por lo que las observaciones locales para comprobar la hipótesis *no han de ser de gran valor*, ya que tales circunstancias son pasajeras y no se encontrarán al hacer observaciones posteriores a los sucesos.

En efecto: supóngase que se tratase de investigar un incendio producido por la acción de las manifestaciones eléctricas de un torbellino de polvo; ¿qué habría de deducirse de observaciones realizadas en el lugar después de ocurrido el fenómeno?, y, aun al mismo tiempo, ¿si no se estaba *dentro* de él?

Hágase la hipótesis de que en un incendio de origen mixto, o sea, por ser grandes las colonias de iones, por ser algo superior a la normal la cantidad de ozono, por ser activo el fenómeno microceráunico, por haber acumulación de iones, por ser pequeña su difusión, por ser algo elevado el campo eléctrico general, por formarse gradientes locales importantes a causa de redondeos de los objetos, por estar el aire envejecido, por estado dividido de la materia, futuro combustible, etc., etc.; hágase la hipótesis, decimos, de que hubiese de tener el valor 5 un cierto índice compuesto que representase el acúmulo de circunstancias determinantes del fenómeno. Supóngase, además, que se pueda saber que una causa determinada contribuye con el sumando 2 a tal coeficiente; otra con 1,5; otra con 1; una cuarta con 0,3; habríase ya llegado al valor 4,8, es decir, estaría en tal límite, que el fenómeno se hallaba a punto de «saltar». Entonces cae una ligera llovizna, por ejemplo, que eleva el valor del campo eléctrico hasta 100 veces el normal, y de sobra se rebasan las 0,2 que se necesitaban sumar para producirse el fenómemo; o, por el contrario, viene un viento cargado de iones y de dirección conveniente para que se verifique acumulación de ellos, y con sólo las 0,2 que se necesitaban, el fenómeno se produce. Por ejemplo:

el barranco del Cerrajero, con viento del Este, puede estar en ese caso, ya que el promontorio, derivado hacia el Norte de las cumbres de Filabres, que le cierra, es obstáculo suficiente para determinar tal acumulación, y la carga de iones podía haberla tomado el aire de los terrenos circundantes a los yacimientos plomíferos que en la provincia de Almería existen. Igualmente, puede haber acumulación vesperal o matinal de iones por el efecto de la brisa de montaña (fig. 24), que lo mismo acumula vapor de agua, para formar niebla, que puede acumular iones para aumentar la carga eléctrica del aire, y si es así, se justifica la posibilidad de los incendios espontáneos a prima noche y a la madrugada.

Y como, por pequeñísimo que sea el efecto supuesto, la Naturaleza lo recoge y lo suma, sin despreciarlo, porque su acción está siempre atenta, y la obediencia al principio de Hamilton, de realizarse los fenómenos con el mínimo de trabajo, es una realidad, se comprende bien que una pequeña causa puede ser la que, en último extremo, produzca grandes efectos. Un gramo de toxina tetánica basta para quitar la vida nada menos que a 75.000 personas.

Así, pues, repetimos que las observaciones locales realizadas no simultáneamente con la producción de los hechos, y en el mismo lugar de éstos, tratándose de un género de fenómenos como los que aquí se consideran, producidos por el concurso de múltiples circunstancias, no han de ser de gran valor; lo contrario de lo que ocurriría si hubiese una causa permanente.

Sin embargo, el día 11 de julio, fecha en que se realiza la visita al lugar del suceso, fueron realizadas algunas observaciones: temperatura ambiente, a las nueve horas de la mañana, 22° a la sombra y 50° al sol; a las trece horas, 35° a la sombra y 55° al sol.

También se hicieron mediciones del potencial atmosférico, encontrándose un valor medio del gradiente de 90 voltios, con una oscilación de un 10 por 100 aproximadamente.

Se hizo igualmente medición de las cantidades de iones, encontrándose en la relación $\frac{n+}{n-} = 2$, muy en armonía con la situación del lugar en altitud.

Otra medición cualitativa fué la reacción con papel ozonoscópico, apreciándose una coloración claramente acusada al cabo de pocos minutos de exposición del papel al aire; tiempo que des-

cendía notablemente al lanzar sobre el papel la corriente que se producía con el ventilador del contador Gerdien, poniéndose así de manifiesto que era un componente de la masa de aire lanzado el productor de la coloración. Si se recuerdan las cifras de proporciones citadas al tratar del ozono, se verá que el simple hecho de reaccionar indica proporción superior a la normal en la atmósfera.

La temperatura de las capas de mies en las eras variaba entre los 30° y los 32°.

Se obsevará que el gradiente eléctrico normal a los 1.500 metros de altitud, en día sereno es de 25 V/m, por lo tanto el que se midió *representa más del triple del normal*, a tal altitud en atmósfera libre, y esto corresponde al efecto de la modificación del campo eléctrico por la presencia de la montaña, con arreglo a lo explicado más arriba (fig. 21), por lo tanto, una llovizna, que puede producir valores triples o cuádruples del valor medio (figura 25), haría llegar el gradiente a los 300 voltios y entonces en un redondeo o en una punta, que pueden dar lugar a valores 10 a 20 veces mayores que el gradiente general, se podría llegar al gradiente explosivo para distancias del tipo de un milímetro o más (últimas mediciones de laboratorio, 4.800 V para un milímetro).

Estos resultados, aunque obtenidos, como se ha dicho, en momentos no simultáneos con los sucesos, no descartan la posibilidad de que puedan aplicarse las hipótesis a que se ha venido refiriendo la explicación anterior, al contrario; la afirman.

Podrían hacerse afirmaciones más seguras, habiendo realizado un completo plan de observaciones con numerosos observadores, sondas eléctricas diferenciales, minucioso estudio de todos los detalles de edificios y demás formas especiales, para puntualizar los lugares en donde redondeos marcados podrían determinar campos eléctricos locales intensos, etc. etc.

Sin embargo, este minucioso y costosísimo plan, aunque permitiría opinar con más elevado grado de certeza, no la podría dar absoluta, con el materialismo de un Lamarck cuando dice: «Salvo los hechos, todo no es otra cosa que opinión; solamente son verdades positivas para el hombre los hechos que puede observar.» Para llegar a este «ver y creer» habría de coincidir la

observación con la producción del suceso. No creemos que los que aquí se examinan sean de tal importancia ni trascendencia que merezcan que un Estado realice los gastos, nada despreciables, a que había de ascender llevar a cabo semejante plan, cuando, por otra parte, tales hechos, como se va a ver en seguida, no suponen ni las más remotas esperanzas de un descubrimiento útil en el campo de la industria, ni siquiera en el de la investigación.

La explicación de los sucesos.

No hay duda al decir que los hechos acaecidos en la Sierra de Filabres, que motivan este estudio, entran dentro de los que pueden denominarse *fenómenos extraordinarios*, y como tales hay que recordar que la primera reacción humana ante ellos es la de atribuirlos a la casualidad, que es lo que suele hacer el hombre cuando no puede explicar un suceso por la acción generatriz de las causas o fuerzas que le son familiares.

Sin duda también «los principios del método científico exigen recibir con circunspección los fenómenos extraordinarios, considerándolos, desde luego, como sospechosos, precisamente por ser extraordinarios y a primera vista inexplicables; pero también es cierto que hay que mirar de frente las dificultades, por grandes que sean, porque el estudio científico de un asunto debe ser, ante todo, franco y leal». Y conste que este párrafo es del gran Balmes en su «Criterio».

En este sentido se va a dedicar una atención especial al incendio de la hacina de mies de centeno del día 25 en el Cerrajero, visto por el cabo Santos de la Guardia civil, de Macael, escogiendo este caso por haber oído personalmente su relato al citado cabo, testigo ocular que no tenía parte en el suceso, sino era para encontrar un culpable, caso de haberlo, y que por lo tanto, no ganaba ni perdía nada en él.

Este testigo relata el incendio diciendo que vió, primeramente, como una «cosa» azul que bajaba desde lo alto y llegaba al montón, y que, en seguida, empezó a arder por la cúspide, con llama también muy azul, para luego, rápidamente, propagarse el fuego a toda la mies de *arriba a abajo*.

Se ve que este relato es casi exactamente la reproducción del

mecanismo de combustión espontánea que se estudió más arriba (figura 47), en el grupo de combustiones mixtas, y, por lo tanto, no se considera necesario añadir nada nuevo a lo explicado allí, si no es hacer constar que la forma de producirse este incendio y el proceso de su propagación, constituye, a nuestro juicio, motivo suficiente para no tener duda alguna acerca de su origen.

Los otros casos, todos de materias divididas, o en estercoleros, o prendas de vestir usadas, caen dentro de las explicaciones hechas en los capítulos teóricos dedicados a este fin, por lo que también se considera inútil repetir los razonamientos anteriores.

Mientras se imprime este libro, el 11 de junio de 1946, se ha producido combustión espontánea, del tipo de adsorción, en los trapos empapados en aguarrás y petróleo con que se limpian las máquinas litográficas de los talleres de este Instituto Geográfico y Catastral. La combustión se produjo el año anterior varias veces, atribuyéndola a descuidos de los operarios. Las circunstancias son análogas a las descritas en general: verano, sótano, quietud del aire por no haber gente en el local, etc.

La *electricidad* es el agente más sutil, maravilloso y singular entre los atmosféricos, dijimos más arriba y al repetirlo aquí añadimos que hay que contar con él en cuanto se estudia algo que ocurra en la atmósfera; las fuerzas de *adsorción* son también maravillosas y provocan reacciones químicas, insospechadas cuando no se las tiene en cuenta.

Por otra parte, es cierto que la probabilidad de la acción coincidente de muchas causas sutiles es muy pequeña, pero no excluye la certeza en algún caso; hay pues motivo fundado para volver a afirmar cuanto se dijo a consecuencia de la impresión recogida en los primeros momentos a raíz de la inspección realizada.

Se trata de fenómenos microceráunicos difusos en combinación con un grado de ozonización atmosférica algo elevado, así como calma y sequedad del aire y otras causas que dan a los fenómenos carácter de completa eventualidad. Estas otras causas son todas las concomitantes que claramente se derivan de cuanto se ha expuesto.

¿Y qué remedio para tales casos? Después de haber visto las

propiedades térmicas y eléctricas de la llama, no hay duda de que una vez más *similia, similibur curantur*; el paliativo más eficaz y económico es *encender* y *mantener hogueras a conveniente distancia de los lugares afectados durante las horas en que suelen presentarse los fenómenos*, guardando la debida vigilancia para que estas hogueras no puedan ser causantes de los daños que con ellas se trata de evitar.

La acción térmica de la llama determinará un braceado enérgico de los gases atmosféricos con la consiguiente igualación de potencial, y la acción eléctrica neutralizará la ionización atmosférica.

No se escapa a nuestra consideración una objeción especiosa que puede hacerse a la explicación dada, y decimos especiosa porque la repuesta está en la misma explicación. La objeción es la siguiente: admitido que los fenómenos hayan sido producidos con arreglo a tal explicación, ¿por qué se han producido en las cumbres de Filabres y no en tantos y tantos lugares, cumbres, valles, laderas y demás formas topográficas que hay en España en condiciones *aparentemente* análogas?, o de otro modo, ¿por qué no ha ardido España entera?

La repuesta, decimos, está en la misma explicación cuando se ha hablado de la contribución de cada causa parcial a un índice que totalice la influencia determinante de la producción del fenómeno; no ya el valor 0,2 puede ser aquél cuya acumulación equivalga a la «gota de agua» que derrama el vaso; tan sólo el valor $0,0^{12}2$ puede ser el determinante, y decir en qué estriba ese $0,0^{12}2$, se escapa a la pequeñez de la inteligencia humana; pero es lo cierto que este $0,0^{12}2$ pudo haberlo en las cumbres de Filabres y no en otros lugares, al menos de los vistos por el hombre, porque no puede negarse la posibilidad de que muchos matorrales, en muchísimos lugares no vistos por ojo humano, han podido ser también incendiados, y hasta quizá los numerosos incendios de este verano en los bosques del Pirineo franco-español han sido naturales y no promovidos, como se ha creído, dando al sabotaje más importancia que la real. Y seguramente muchos incendios de los atribuídos a un descuido no comprobado, caben dentro de la misma explicación que aquí se da.

Pero si la inteligencia no llega a ese detalle, sí puede encon-

trar argumentos de comparación, es decir, citar hechos análogos que tampoco puede explicar.

He aquí uno bien notable y que repetidas veces ocurre en España; nos referimos a la llamada por la leyenda *lluvia de sangre*, fenómeno muy frecuente en Italia, y que, como es lógico, en la época en que la Humanidad ignoraba muchas cosas debió producir efectos terroríficos. En la actualidad se conoce perfectamente en qué consiste el fenómeno, que no es sino la caída de polvo coloreado que ha sido arrastrado por el aire y mantenido en suspensión por su pequeñez y por tener ese aire componente ascendente; se produce después una lluvia en el seno de la misma masa de aire y el polvo cae con la lluvia formando a veces verdadero barro, ya rojo, ya amarillo o de tonalidades intermedias.

Este polvo procede nada menos que del centro de África y es arrastrado por los vientos de Sureste que determina la depresión africana y que son el temible *siroco* en Italia. Por eso es en la Calabria, en los Abruzos, etc., en donde con frecuencia se presenta el fenómeno; pero también se presenta en el Sureste de Francia, a veces en regiones extensas y en el Noreste español, y *precisamente en el Panadés*. ¿Por qué de la masa de aire africano que recorre la Italia y el Mediodía de Francia se destaca un filete de aire que llega exactamente al Panadés y no a otra parte? Es otra pregunta de tan difícil contestación como la que antes se hizo.

Y aun este mismo año, el día 18 de octubre, se produjo en Badajoz el fenómeno de nubes de polvo rojizo-amarillento, sin duda a causa de que las primeras masas de aire ascendente que iniciaron el corto período de lluvias habido después de la persistente sequía, arrastraron consigo grandes cantidades de polvo. ¿Es que no había polvo, después del período estival tan prolongado que ha sufrido España, más que en Badajoz y en sus alrededores? También hubo aquí un sumando de la forma $1:10^n$ determinante del fenómeno que no le hubo en otros lugares.

Pero todavía queda algo que añadir.

Las consecuencias establecidas lo han sido *descartando la mano humana*, es decir, no buscando otra cosa, con el espíritu franco y leal de la ciencia, que la *explicación de la posibilidad natural de los hechos acaecidos*. ¿Quiere esto decir que no hayan

podido ser el producto de una organización secreta y bastante inteligente que haya tratado de *imitar* los hechos naturales con algún fin de lucro despreciando las primeras pérdidas del negocio?

La contestación a esta interrogante no creemos que pertenezca a la ciencia sino a la Administración de Justicia, la cual, en todo caso, habría de tener presente la opinión que aquí se contiene para distinguir entre los hechos espontáneos y los provocados por acción humana, y se vuelve a hacer constar que aquí no se atiende a otros hechos que a los contenidos en el informe oficial que figura al principio de este trabajo.

Otros hechos análogos.

Al hacer el estudio de los distintos tipos de combustiones se han citado casos reales en que los hechos se habían producido tales como se iban explicando; pero la cita a la que ahora se alude se refiere a conjuntos de hechos en un todo análogos a los acaecidos en Laroya, y que podrían haber dado lugar a los mismos problemas científicos y judiciales que éstos, si hubiesen tenido la publicidad que alcanzaron los de Laroya, los cuales, pues, según esto, no son los únicos de tal género que se han producido en España.

Es el primer caso a que se alude el de los incendios ocurridos, hace unos veinte años, en una casilla de guardavía situada a kilómetro y medio del pueblo El Perdigón, a 10 kilómetros de Zamora. El relato está tomado de un recorte del periódico logroñés «La Rioja» y dice así:

«En una casilla del tren se produce fuego todos los días. Los vecinos del pueblo de El Perdigón, inmediato a Zamora, cuentan y no acaban a partir del 19 del pasado junio. En la casilla de la guardabarrera, a muy pocos metros de la estación del ferrocarril, ha hecho su aparición el duende maligno del fuego.

»En el novenario prometedor de San Juan, la simplicidad de unas buenas gentes trabajadoras ha sido confundida por el misterio.

»Todos los días, desde el 19 al 27 de junio pasado, el fuego hizo su aparición en la modesta chabola.

»A horas insospechadas, siempre durante el día, el fuego surge voraz y rebelde, como obedeciendo a un imperativo brujo o al juego encantado y travieso de los dioses menores.

»El capataz de dicha casilla, José Mantecón, ha manifestado lo siguiente:

»El día 19, viernes, a las ocho de la mañana se notó que en la »parte posterior, en un chozo dedicado a gallinero, se había ini- »ciado un siniestro en las maderas de la techumbre. Con unas »herradas de agua se sofocó el fuego sin darle mayor importancia; »pero por la tarde volvió a iniciarse otro fuego en una prenda de »ropa colgada y en el interior de la casilla, en lugar aislado del »chozo y sin posible comunicación.

»Y así el 19 y el 21 y el 22 y el 24 y todos los días sucesivos »hasta el 27.

»El 27 se inició por la mañana, dentro de la habitación, pren- »diéndose un colchón. Se sacaron todas las ropas y se colocaron »encima de una vagoneta, y a las doce de la mañana, ante nume- »rosos testigos obreros de la brigada, volvió a iniciarse el sinies- »tro, que fué sofocado con premura.

»Hay algo que hace más extraño el fenómeno; en otro chozo, »adosado a la izquierda de la casilla, a una altura de unos dos »metros sobre el suelo, se hallaba una sombrilla.

»A las once de la mañana comenzó a arder, y se quemó, empe- »zando a incendiarse el maderamen del chozo.

»En El Perdigón, este extraño suceso ha causado una emoción »superior a todo cálculo.

»Las autoridades, el sacerdote, el médico, el vecindario en masa »han desfilado ante la casilla núm. 161 para presenciar el fenó- »meno, que no se ha presentado ni una sola vez durante las horas »de la noche.

»Y lo extraño es que el 27 del pasado, último día en que apa- »reció con más intensidad el fenómeno, se iniciaron en diversos »sitios tres siniestros, uno de los cuales motivó la destrucción del »chozo gallinero, donde por vez primera se produjo el suceso.

»¿Qué será?»

En su vista, el Ingeniero que suscribe este trabajo se dirigió al Alcalde del citado pueblo en demanda de una información que completase y avalorase el relato periodístico. Este Alcalde, a quien se remitió copia del relato, cumplió su misión de un modo perfecto, consiguiendo todo lo que podía obtenerse, dadas las circunstancias, y respondió con el siguiente oficio:

«Con referencia a sus escritos del 8 de agosto y 30 de julio interesando detalles de los extraños fuegos ocurridos en esta localidad, mejor dicho, término, en una casilla de la vía férrea hace unos veinte años, debo manifestarle que, por cuantos medios han estado al alcance de esta Alcaldía, se ha procurado indagar cuantos detalles pudieran haberse relacionado con dichos fenómenos, tropezando con grandes inconvenientes para hallar algo exacto, pues los funcionarios y personas que más crédito y desapasionamiento pudieran tener han variado en casi su totalidad; los sucesos son ya bastante añejos para recordar detalles y, por fin, la relativa lejanía de este centro urbano hace que muchas personas conozcan la existencia de aquellos fuegos e incluso se personaran en el lugar del suceso, pero siempre tarde, cuando los pequeños incendios se habían sofocado, etc.

»De todo ello parece desprenderse que la existencia de tales pequeños incendios es cierta. En las causas hay opiniones; unos, siempre maliciosos, se inclinan a creer que los dichos incendios fueron provocados por persona interesada en que se cambiaran de casilla por cuestiones personales y pasiones humanas; otros creen que aquello era algo natural y extraño.

»Parece ser que el tiempo era bueno, tranquilo, propio de la estación, sin nubes ni vientos.

»No pudiéndose aclarar ni concretar mayores extremos por las causas apuntadas.

»Por Dios, España y su Revolución Nacional-Sindicalista.

»El Perdigón, 30 de Agosto de 1945.—El Alcalde.—L. Pinilla.»

Se ve, pues, que los caracteres del caso son completamente análogos a los de Laroya y, como muy bien hace notar el Alcalde de El Perdigón, hubo entonces las dos opiniones; la de los maliciosos y la de personas de buena fe.

El otro caso es el sucedido en Málaga con posterioridad a lo ocurrido en Laroya.

La agencia informativa Mencheta dió la noticia en la forma que relata la copia de ella, que se adjunta:

«Misteriosos incendios en Málaga, análogos a los del pueblo de Laroya.—Málaga 6.—Se han producido incendios análogos a los del pueblo de Laroya en la casa núm. 14 del Paseo de Bellavista, de esta capital. Una cortina que tapaba una percha, de la

que pendían ropas de caballero, empezó a arder inopinadamente. En la casa se encontraban los hijos del inquilino, quienes, asombrados, arrancaron violentamente la prenda y, pisoteándola, apagaron las llamas. A los pocos minutos se observó cómo ardía también, sin causa justificada, otra cortina de lana, que quedó convertida en rescoldo. Se pudo comprobar, asimismo, que la parte trasera de una puerta había sufrido los efectos del fuego.

»El pánico fué extraordinario, comenzándose a desalojar el inmueble ante el temor de que continuara su acción el extraño incendio. Cuando los habitantes se dedicaban a la tarea de sacar los muebles, vieron cómo se prendía fuego a los visillos de las cristaleras de uno de los balcones.

»El suceso ha producido los consiguientes comentarios.— Mencheta. Málaga. Septiembre de 1945.»

En vista de ello, considerando que sería interesante hacer constar aquí una información especial de los sucesos, se solicitó fuese hecha por el personal del Instituto destinado en el Observatorio Sismológico de Málaga, y, al efecto, el Topógrafo don Manuel Martín tomó los datos oportunos, que son los que figuran a continuación:

«Incendios en la casa núm. 14 de la Avenida del Pintor Sorolla.—Málaga.

»Situación de la casa: Al Norte, Avenida del Pintor Sorolla, al Este y Oeste, casas, y al Sur, con otra casa más baja que la separa de la línea de los Ferrocarriles Suburbanos de Málaga, y ésta, a su vez, de la playa.

»El primer fuego se inició, aproximadamente, a las catorce treinta horas, en el principal, en una habitación orientada al Sur, habiéndose prendido fuego el colchón que hay en una cama, junto a la ventana. Una parte de ésta, donde van las bisagras, presenta quemaduras, en las que la pintura ha desaparecido.

»A las diecisiete horas, y con intervalos cortos de tiempo, se iniciaron los siguientes fuegos: en el principal, en una habitación cuya ventana da a la calle del Pintor Sorolla, y por consiguiente al Norte, se prendió fuego un butacón. Estas quemaduras son profundas y de forma cónica, presentando en su parte exterior unos cuatro o cinco centímetros de diámetro. En varias

prendas de vestir que vi todas las quemaduras eran circulares y del tamaño de una moneda de 0,10 pesetas.

»Con un período de tiempo corto se produjo otro incendio en un dormitorio que da al patio de la casa, en la parte Sur de la misma. Un colchón que había liado sobre un baúl se prendió fuego, y la puerta de entrada al dormitorio también sufrió quemaduras. Otro fuego en la cocina casi a la misma hora.

»Todos estos fuegos fueron en un mismo día. Al día siguiente, y las mismas horas, se repitió el fenómeno. Tuvieron tres días las ventanas cerradas y no ocurrió novedad. Al siguiente día volvieron a abrir y volvió a prenderse fuego en la cocina, donde ardieron unos paños que había sobre la mesa; a uno de los hijos que se encontraban allí, en la cocina, de espaldas a la ventana, se le prendió fuego por la espalda la camisa que tenía puesta.»

También estos incendios, ocurridos los días 4 y 5 de septiembre último, ofrecen las mismas características que los de Laroya.

Por fin, merece también ser citado el caso que refiere el conocido escritor D. José Martínez Ruiz (Azorín) como ocurrido en Argamasilla de Alba, poco tiempo antes de la visita que dicho escritor hizo a tal ciudad en 1905, con el fin de «respirar» el ambiente de los lugares que comprendió «La ruta de Don Quijote», obra, que, publicada primeramente en «El Imparcial», fué luego impresa y muy leída en España. En ese género literario, tan propio de Azorín, de describir el medio ambiente que había sido el asunto de obras de otros escritores españoles, figura, en primer término, «La ruta de Don Quijote», y así, al hablar del espíritu fantástico y romántico de los habitantes de la Mancha, y en particular de los de Argamasilla de Alba, a la que califica Azorín de «pueblo andante», cita los incendios ocurridos poco tiempo antes de su visita, que se repitieron varios días sucesivos en una casa de tal pueblo y luego en la escuela frontera, cerrando la descripción del caso con el comentario sobre la fantasía manchega que se exalta, hasta el punto de creer en apariciones de ultratumba (que era lo que las comadres del lugar creían), ante la broma del chusco que simula unos incendios. Y nosotros nos permitimos decir: ¿No habrá aquí también una explicación natural de los sucesos sin tener que acudir a la cómoda suposición del bromista desocupado? Tal vez, y ello, no

obstante, no restaría nada al espíritu fantástico, y realista a la vez, de los naturales de la Mancha.

Todo lo citado creemos que sirve de elemento de juicio complementario respecto al objeto principal de este estudio, el cual, aunque terminado en fecha muy posterior al informe que primeramente fué emitido, cosa fácil de comprender si se considera su extensión y que ha sido redactado sin desatender las obligaciones ordinarias del Servicio, no altera en nada lo contenido en tal informe, sino que, como antes se dijo, le corrobora y afirma, apoyándose en deducciones lógicas de teorías que están actualmente en vigor en el mundo científico.

Hablando, pues, en términos de ciencia moderna, que, por otra parte, se acomodan muy bien a la modestia de la que no se quiere salir, se puede decir, que de las hipótesis *A* y *B* que aquí han sido aludidas, la hipótesis *A* tiene un grado de probabilidad mucho mayor que la B para ser considerada como la verdadera causa de los sucesos que se han examinado.

*** Conclusión. *** Al dar más arriba la explicación *A* de los sucesos no se ha olvidado que «errare humanum est», aforismo que podía ampliarse diciendo que errar no sólo es humano, sino científico, y más cuando la ciencia es interpretada por quien está muy lejos de creerse en posesión de ella. La verdad es algo que se escapa constantemente de las manos del hombre; huye de él burlándose de su orgullo, y aunque se la busque de buena fe, siempre llega a través de primas irregulares que la desfiguran, siempre por reflexiones en curvos espejos que la deforman, y, sin embargo, es tal la armonía de la vida, que la imposibilidad de llegar a la verdad es, muchas veces, beneficiosa; porque acaso muchos espíritus no resistirían el horror de ver la verdad desnuda.

Por eso, cuando los problemas objetivos que a nuestro conocimiento se presentan son tales, que no se llega a conseguir descubrir en ellos la verdad segura y positiva, cuando con el ánimo entristecido se piensa en la frase del poeta latino «felix qui potuit rerum cognoscere causas», hay que contentarse, después de quedar con la conciencia tranquila, de haber hecho todo lo que depende de la voluntad para conseguirlo, y, por tanto, de haber

rendido el debido tributo a la colectividad a que se pertenece, contribuyendo a esclarecer esa verdad con todos sus medios; hay que contentarse, decimos, con mirar al cielo, pensar profundamente en la inmensidad del Universo, en el enigma de nuestro destino, y pronunciar, allá dentro de nuestro ser, aquellas palabras litúrgicas que son bálsamo consolador de nuestra pequeñez e impotencia: *Spera in Deo*.....

Madrid, 9 de noviembre de 1945.

El Ingeniero Geógrafo,
Jefe del Servicio de Magnetismo y Electricidad Terrestres,

José Cubillo Fluiters.

PRONTUARIO DE GRAVIMETRÍA PRÁCTICA

MEMORIAS
DEL
INSTITUTO GEOGRÁFICO Y CATASTRAL

Tomo XVIII

IV

PRONTUARIO

DE

GRAVIMETRIA PRÁCTICA

POR

GUILLERMO SANS HUELIN

Ingeniero Geógrafo

INSTITUTO GEOGRÁFICO BIBLIOTECA

Madrid. ——— Talleres del Instituto Geográfico y Catastral. ——— 1946.

PRONTUARIO

DE

GRAVIMETRIA PRACTICA

ÍNDICE

Páginas.

PRÓLOGO 7

CAPÍTULO PRIMERO

Determinaciones relativas pendulares 11

CAPÍTULO II

Investigaciones con la balanza de torsión Eötvös 47

CAPÍTULO III

Las observaciones con el gravímetro electro-mecánico Askania 89

BIBLIOGRAFÍA 115

PRÓLOGO

La finalidad de este trabajo es presentar, reunido en un sólo cuerpo de doctrina, todo lo referente a las determinaciones e investigaciones de índole gravimétrica encomendadas a este Instituto, con el objeto de facilitar la labor previa de aprendizaje al personal técnico que las realice, ya que tanto la descripción y manejo de instrumentos como las fórmulas y procedimientos para el desarrollo de las observaciones experimentales, se encuentran diseminados en distintas *Memorias* de dicho Centro, y no en todos los casos con la debida extensión para constituir una enseñanza práctica.

Por el carácter esencialmente práctico de la obra se prescinde en la misma del estudio de la gravedad desde el punto de vista teórico, y se parte de la idea que el ingeniero posee los conocimientos fundamentales indispensables para poder comprender las fórmulas básicas e imponerse en el principio de los métodos de observación.

* * *

Iniciadas en el Instituto Geográfico y Estadístico las *determinaciones absolutas* de la intensidad de la gravedad por el Geodesta D. Joaquín Barraquer, en 1877, con las observaciones

realizadas con un péndulo de inversión modelo Repsold, en el entonces edificio del Instituto Geográfico, fué considerada dicha primera estación como preliminar para la definitiva que años después (1882-1883) se instaló en la biblioteca del Observatorio Astronómico de Madrid, utilizando cuatro péndulos.

Posteriormente, en el período comprendido entre 1892 y 1897, se observaron con los péndulos Repsold las estaciones de Pamplona, La Coruña, San Fernando, Barcelona, Valencia y Granada, por distintos geodestas.

Por aquella época comenzaban a generalizarse en diversos países las *determinaciones relativas*, gracias al perfeccionamiento alcanzado en la construcción de los péndulos que permitía asegurar la invariabilidad de su longitud. Encargado en 1901 el Ingeniero Geográfo D. José Galbis de estudiar la cuestión, presentó una Memoria en la que propugnaba la sustitución de las determinaciones absolutas por las relativas. Como consecuencia de ella, se propuso la adquisición de un equipo pendular Sternek, que se recibió en el Instituto el año 1903, en cuyo año tuvo lugar la primera campaña de relativas, observada por el Sr. Galbis en varios puntos de la costa sur.

En el primitivo proyecto de observaciones relativas españolas se distribuyeron las estaciones a lo largo de los principales meridianos y paralelos, proyecto que se amplió más tarde a la instalación de estaciones en las islas Baleares, Canarias, región norte de Marruecos e isla Alborán.

Hasta el año 1943 se ha observado anualmente una campaña por el procedimiento de relativas, excepto en los años 1910, 1911, 1913, 1925, 1937, 1938 y 1939, con un número total

de 208 estaciones hasta finales de 1942, en las que van incluídas cuatro observadas en Portugal en el año 1923 y la observada en el Observatorio Astronómico de París en 1933, con ocasión del enlace gravimétrico internacional Madrid-París y París-Madrid, con cambio de observadores.

En el año 1923 fué adquirida por el Instituto Geográfico la primera balanza de torsión Eötvös modificada por el Profesor Schweydar, introducida en España por compra directa a los talleres Bamberg, de Berlín, posteriormente talleres Askania. Con dicho aparato se efectuaron en años sucesivos una serie de investigaciones geofísicas relativas a los posibles desplazamientos de los bloques de la corteza terrestre, producidos por movimientos sísmicos, estudio que se inició en 1927 en la región sísmica andaluza comprendida entre Vélez-Málaga, Archidona y Granada. Alternando con las observaciones con balanza se determinó la intensidad de la gravedad en varios puntos de la mencionada zona.

Por último, en 1943, se comenzó en la provincia de Huelva la determinación rápida de valores de la gravedad, utilizando el gravímetro electromecánico Askania núm. 25, adquirido por el Instituto Geográfico en 1942.

Fué escogida dicha provincia para comenzar las observaciones con gravímetro con arreglo al nuevo plan de observaciones gravimétricas aprobado, en el que se dispone que, pudiendo considerarse como ultimada la red general constituída por las estaciones de péndulo observadas hasta la fecha, los perfiles gravimétricos determinados con el Askania, deben efectuarse, bien en zonas menos tupidas de la red pendular o en

aquellas otras en que se justifique su investigación detallada por el interés minero que presentan, cual es el caso de la provincia onubense.

No obstante la rapidez con que se obtienen las diferencias de gravedad entre estaciones observadas con el gravímetro, *siempre subsistirá el péndulo como aparato fundamental* para conocer los valores de la gravedad de las estaciones que se observen con toda precisión a lo largo de determinados paralelos, y de las que se parte para correr los valores de - *g* - a las estaciones en que sólo se ha observado con el gravímetro.

Hecha esta ligera reseña histórica del desarrollo de las observaciones gravimétricas en el Instituto Geográfico, exponemos a continuación la práctica del empleo de los aparatos correspondientes, comenzando por el péndulo y las determinaciones relativas que con el mismo se efectúan.

CAPÍTULO PRIMERO

DETERMINACIONES RELATIVAS PENDULARES [1]

1. Equipo pendular Sterneck. — Está integrado esencialmente por cuatro péndulos invariables, modelo Sterneck modificado, aparato de péndulos, aparato de coincidencias, reloj Strasser de medios segundos, cronógrafo Favag y un aparato portátil radioreceptor, además de los elementos auxiliares indispensables, como barómetros Tonnelot, psicrómetro, péndulos niveles y péndulo termómetro, etc.

Péndulos. (Fig. 1.ª). — Son de bronce niquelado y van marcados con los números 104, 105, 106 y 107. Su longitud es un poco mayor de 0,25 metros y están constituídos por la lenteja, la varilla y la montura de suspensión. La primera tiene la forma de dos troncos de cono unidos por su base mayor. La varilla, que es cilíndrica, está atornillada y soldada por un extremo a la lenteja y por el otro a la montura de suspensión. En ésta va sólidamente fijada la cuchilla de ágata, y en su parte superior presenta dos espejitos metálicos colocados paralelamente a la arista del filo de la cuchilla.

La cuchilla de ágata (fig. 2.ª) tiene la forma de prisma de cinco lados, presentando la arista del filo tres muescas.

Aparato de péndulos. (Fig. 3.ª). — Una placa *A* forma la base del mismo. Presenta seis salientes, tres de ellos tuercas de los tres tornillos de nivelación *T*, y los tres restantes, soportes de las palancas *Z*.

(1) Para la descripción del equipo pendular Sterneck con sus figuras correspondientes y la exposición de las fórmulas fundamentales, se ha tomado como base el informe publicado en el tomo XIII de las *Memorias* del Instituto Geográfico, por el Inspector jubilado del Cuerpo de Ingenieros Geógrafos, Ilmo. Sr. D. José Galbis y Rodríguez, introductor en España del método de determinaciones relativas de la intensidad de la gravedad.

En el centro de la base, y formando con ella una sola pieza, se levanta perpendicularmente a ella una columna hueca B, con cuatro nervaduras en forma de aletas a, dispuestas en ángulo recto; la columna ter-

Fig. 1.ª

mina en su parte superior en cuatro brazos b (fig. 4.ª), que corresponden a los ángulos diedros formados por las aletas. Sobre las caras

Fig. 2.ª

superiores de dichos brazos están empotrados los cuatro planos de ágata sobre los que se suspenden los péndulos.

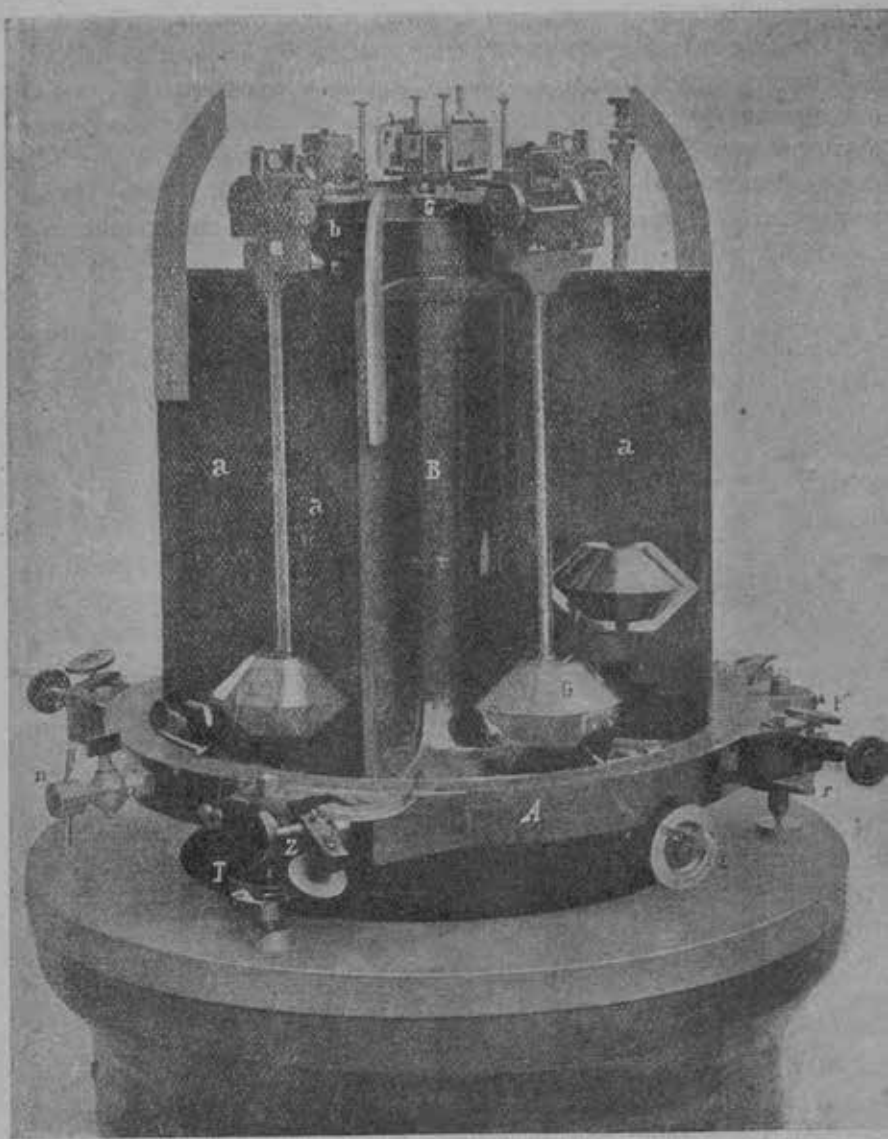


Fig. 3.

Dentro de la columna hueca hay un eje cilíndrico que termina por su parte inferior en rosca y por la superior en una placa *C* (fig. 4.ª), en forma de cruz, con los extremos de los brazos en forma de horquillas que sirven para levantar los péndulos al cesar la observación, con lo que quedan separados los cuchillos de ágata de sus respectivos planos de suspensión. Se consigue esto por medio de la manivela *E* (fig. 3.ª), que al girar transmite su movimiento por medio de un tornillo sin fin a una rueda, tuerca del eje citado, unida a la base, con lo que éste

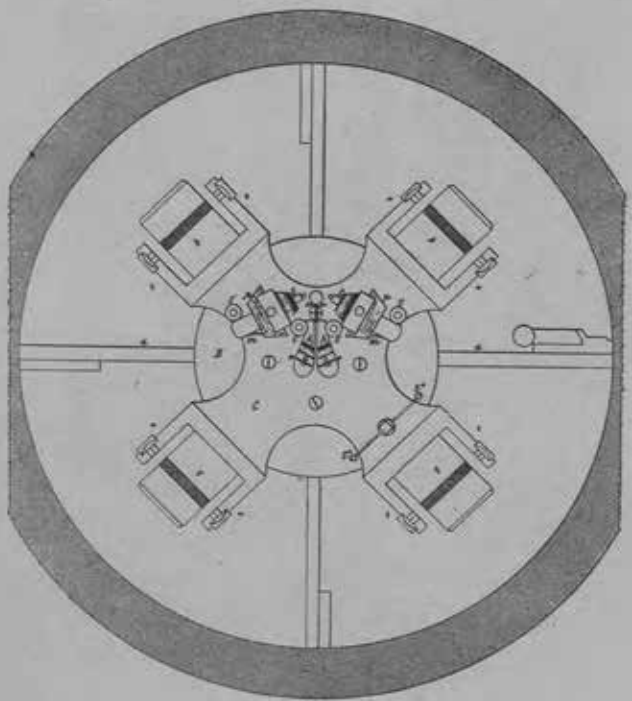


Fig. 4.ª

subirá o bajará según el sentido de giro de la manivela. Colocados sobre la placa en cruz hay dos espejos *e* y dos prismas *p* de reflexión, que, en combinación con los espejos de los péndulos, sirven para la observación de las coincidencias.

Los espejos y primas (fig. 4.ª) van montados en muelles de acero en forma de *U* invertida y tienen los siguientes movimientos:

1.° Por medio de los tornillos de corrección *t*, pueden tomar diferentes posiciones con respecto al plano vertical.

2.° Obligados por los muelles laterales *m*, contrarrestados por los tornillos de superficie exterior cónica *t'*, se varía a voluntad su posición en sentido horizontal, con relación al plano vertical que, conteniendo al eje óptico del aparato de coincidencias, pasa por el centro de cada espejo y prisma, y

3.° Espejos y prismas, junto con la pieza *C*, pueden girar ligeramente alrededor del eje del aparato por medio de los tornillos de corrección *t''*. Una de las cuatro aletas *a* presenta una abertura donde se instala el péndulo termómetro *G* (fig. 3.ª), construído del mismo metal que los péndulos gravimétricos, y con el cual se puede conocer la temperatura de éstos durante el período de las observaciones.

Fig. 5.ª

Los péndulos se ponen en movimiento con una amplitud determinada por medio de las palancas *Z*, cuya amplitud de giro se puede limitar por los tornillos de cabeza graduada *t'''*.

Complemento indispensable del aparato pendular es una campana de latón, de doble pared (fig. 5.ª), que ajusta perfectamente en el borde superior del platillo de la base. Dicha campana tiene una abertura circular *o*, cubierta con un cristal, a través de la cual pasan los rayos luminosos enviados desde el aparato de coincidencias, y otra abertura alargada, también con cristal, para leer el péndulo-termómetro. La campana tiene dos tubos que comunican con su interior, pudiendo hacerse el vacío, en caso preciso, con una bomba neumática que se atornilla en uno de ellos, sirviendo el otro para conocer el grado de enrarecimiento del aire por un manómetro que se conecta al mismo.

La nivelación de los planos de suspensión de los péndulos se consigue con dos niveles en forma de péndulos, provistos con cuchillos de ágata, y que oscilan durante la operación de nivelar.

Aparato de coincidencias. (Figuras 6.ª, 7.ª y 8.ª).—Se compone de una caja rectangular A_1, con un mecanismo interior destinado al envío de rayos luminosos a los espejos de los péndulos, y de un anteojo situado encima de ella para observar las imágenes producidas por dichos rayos luminosos.

Tres tornillos nivelantes T_1 sostienen a la caja. Presenta ésta en su cara anterior una escala de porcelana con divisiones espaciadas de tres en tres milímetros, y en el centro de ella una ventanita cuadrada *c* para la salida de los rayos luminosos; la escala se puede ocultar, cuando se crea necesario, por medio de una puerta *d*, con abertura cuadrada en su centro, que corresponde a la ventanita antes mencionada. En una de las paredes laterales existe una abertura circular O_1, cubierta con cristal esmerilado, a través de la cual pasa la luz enviada por un foco luminoso, generalmente una bombilla eléctrica, aunque primitivamente se empleó un quinqué como el que aparece en la figura.

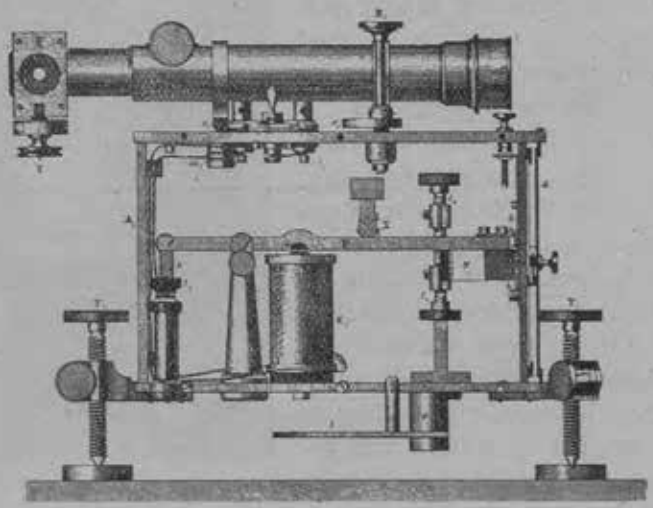


Fig. 6.ª

En el interior de la caja hay un electroimán E_1, que atrae la pieza de hierro dulce *i* de la palanca *P*, que gira en el punto *f*; el extremo posterior de ésta, *g*, está unido a un muelle *k*, antagonista de la fuerza de atracción del electroimán, cuya tensión se puede graduar desde el exterior por medio del tornillo t_1. El extremo anterior de la

palanca termina en la pieza de hierro en forma de escuadra n_1, con una abertura que en su movimiento vertical, por delante de la ventanita, situada en la cara anterior de la caja, dejará pasar los rayos luminosos cada 0,5^s, 1,0^s y 2,0^s, según el período de atracción del electro-imán; los tornillos t_2 sirven para limitar el curso de la citada palanca, y la excéntrica X, movible desde el exterior de la caja, la sujeta cuando se transporta el aparato. Entre la ventanita c y la pieza n_1 existen dos chapas h, h, que, acercadas o alejadas por medio de los tornillos que así unen a la caja, reducen la abertura a una estrecha raya. La corriente eléctrica enviada cada 0,5^s, 1,0^s o 2,0^s por el reloj de observación, antes de llegar a los electroimanes, pasa por los tornillos t_3 en comunicación con el pequeño conmutador que pueda interrumpirla. Un espejito -y-, cuya superficie forma un ángulo de 45° con la línea que une la abertura del centro de la escala y el centro del sistema óptico del aparato pendular, transmite los rayos emanados del foco luminoso.

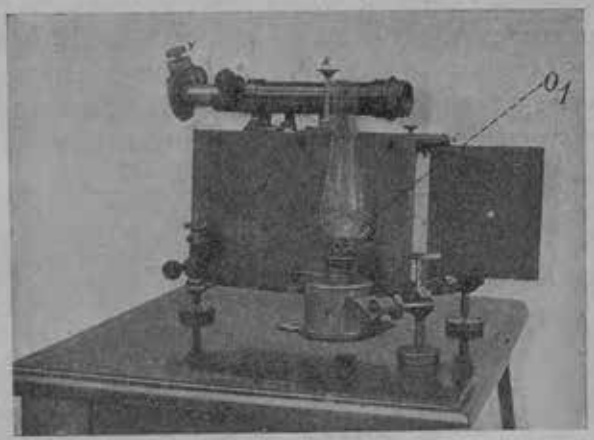


Fig. 7.ª

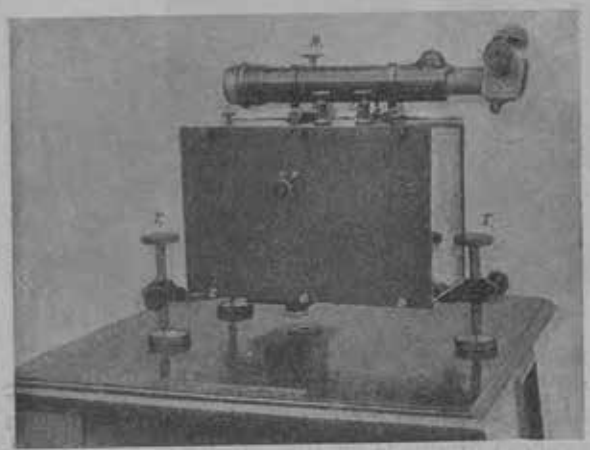


Fig. 8.ª

El anteojo, encima de la caja, puede girar alrededor del eje vertical s, unido al muelle m_1, que le obliga permanentemente a hacerlo de izquierda a derecha, movimiento contrarrestado por la posición de la excéntrica e_1, que se mueve a voluntad mediante el botón B_1.

El ocular del anteojo tiene un micrómetro de tres hilos montado sobre un marco movible, cuya posición se conoce por la del tornillo micrométrico Y que le mueve, y cuyas vueltas se averiguan por medio

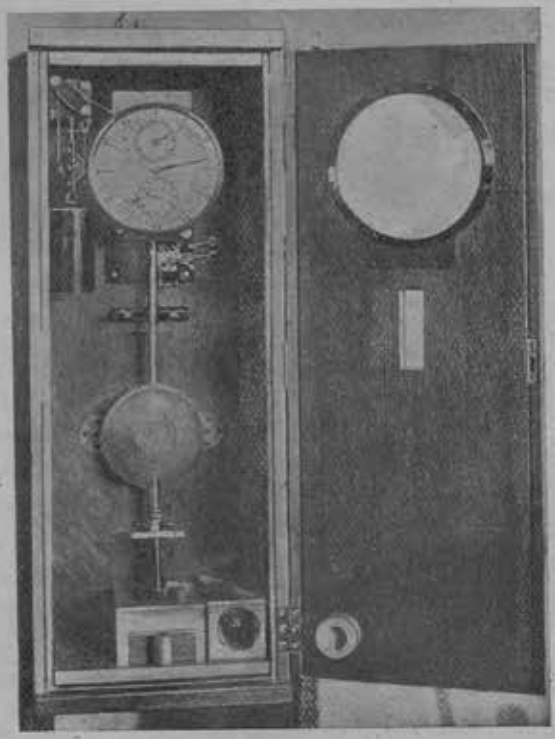


Fig. 9.ª

de un peine, en el cual la distancia entre dos puntas consecutivas mide la magnitud del paso y las fracciones de ellas, por la situación de un índice con relación a la cabeza graduada en 100 divisiones.

Reloj Strasser de 0,5 segundos (fig. 9.ª). — De gran regularidad en su marcha, como se ha podido comprobar en las numerosas estaciones de relativas con él observadas, tiene una péndola construída por Riefler, con varilla compensadora de acero, niquelada. Su longitud se corrige

por medio de la doble tuerca cilíndrica *T*, cuya superficie exterior está dividida en 50 partes, correspondiendo cada división a una corrección del adelanto o atraso del reloj de dos segundos, pudiendo también conseguirse correcciones de 0,5 segundos, colocando unas laminitas en la meseta *m*.

El mecanismo interruptor está constituído por una palanca *p* que gira alrededor del punto *O*, situada lateralmente a la varilla de la péndola, que se coloca en la posición debida, apoyándola en el tornillo *t*. Como en este apoyo se cierra un circuito eléctrico, sucederá que, si la péndola en sus oscilaciones separa la palanca, por intermedio de la lámina *n*, unida a su varilla, se producirá la interrupción de la corriente deseada, y, al contrario, si se retira el tornillo *t* convenientemente, la palanca *p* acompañará la oscilación de la varilla hasta un cierto límite en que volviéndose a apoyar en *t*, cierra la corriente.

Este reloj se prepara para el transporte del modo siguiente: se comienza dando cuerda hasta que un pitón que lleva el soporte de la polea *H* penetra del todo en su alojamiento *b* con objeto de que no pueda moverse; se descuelga el peso *P* colocándolo en el alojamiento *N* (fig. 10); se sujeta la péndola con la pieza *a*, se gira la tuerca fija *d*, con lo que subirá un tornillo que, alojando en su cabeza el extremo de la péndola, la elevará, quedando así protegida de cualquier choque la lámina de suspensión; se cierran después las abrazaderas *e*, que sujetarán la varilla; se colocan los tacos de madera *B* que presentan un alojamiento para la lenteja, sujetándolos a la caja del reloj con los tornillos *WD*, y se pone, finalmente, un hilo que impida el giro de la palanquita del interruptor. Para instalar el reloj en una estación se efectúan las mismas operaciones en orden inverso.

El reloj se monta verticalmente en un soporte de hierro (figura 11), que se desarma para el transporte en tres partes: base triangular *N*, marco *M*, y tirantes *L*.

Cronógrafo Favag. — Es un aparato con regulador de lámina vibrante y doble juego de electroimanes para accionamiento de dos punzones, uno que marca los segundos del reloj de comparación y otro para registrar las señales horarias. Las inscripciones se efectúan en una cinta azul que se desarrolla a la velocidad de 10 milímetros por segundo, lo que permite una precisión en las determinaciones horarias de 0,01 segundos.

Aparato radio receptor portátil. — A partir de la campaña de relativas

de 1924 se acordó efectuar la determinación de la hora para deducir el estado del reloj Strasser, mediante la recepción de las señales rítmico-científicas emitidas por diversas emisoras europeas, especialmente por las estaciones de Rugby, París, Burdeos y Nauen.

Tres han sido los modelos sucesivos de aparatos radio-receptores utilizados. El primero de ellos fué un «Vitus-Europa» adquirido en 1924,

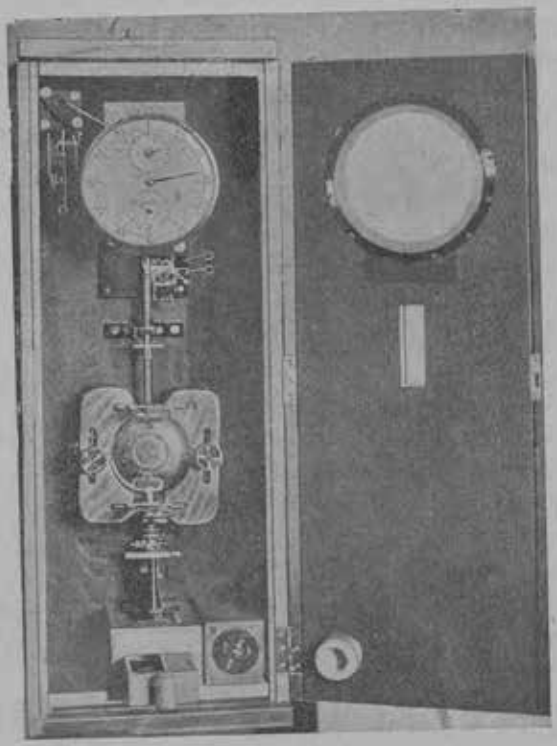


Fig. 10.

de cuatro válvulas, para utilizar las señales rítmicas radiotelegrafiadas por la Torre Eiffel. Sólo se utilizó dicho aparato en las campañas de 1924 y 1926, pues, habiendo sufrido una avería de importancia al final de esta última, se le sustituyó por otro receptor de carácter más adecuado para este género de recepciones, fabricado por la Compañía española Radio Nacional. Posteriormente, se adquirió un modelo más perfeccionado, que se coloca en una maleta para su transporte a mano,

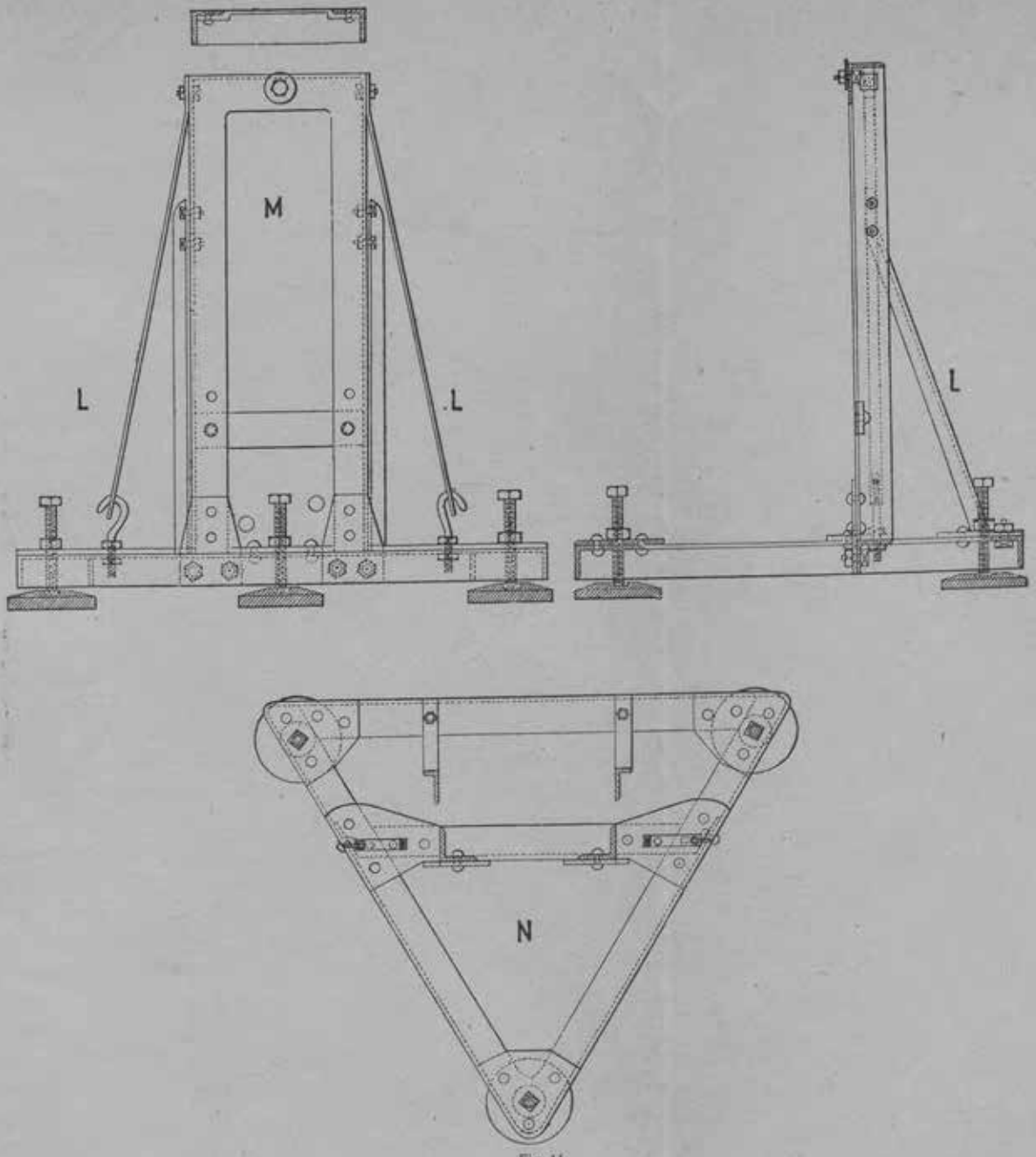


Fig. 11.

d
e
c
r
t

construído bajo la dirección del actual Director del Observatorio Astronómico de Madrid, D. José Tinoco. Dispone este radio-receptor de tres juegos de bobinas intercambiables para captar las ondas del *broadcasting*, las emitidas por la Torre Eiffel y las de Burdeos (Lafayette), Nauen y Rugby, recogiéndose así las ondas comprendidas en 200 y 20.000 metros.

2. Fórmulas fundamentales.—Partiendo de la conocida fórmula

$$S = \pi \sqrt{\frac{l}{g}} \qquad [1]$$

en la que representan:

S, la duración de oscilación, infinitamente pequeña de un péndulo matemático en el vacío;

l, la longitud del péndulo, y

g, la intensidad de la fuerza de gravedad en el vacío, en un lugar de observación, en el siguiente renglón es evidente que si el mismo péndulo oscila en otro lugar en que la intensidad de la gravedad sea g', la duración correspondiente S' será:

$$S' = \pi \sqrt{\frac{l}{g'}},$$

deduciéndose de estas dos fórmulas que

$$\frac{S^2}{S'^2} = \frac{g'}{g}, \qquad [2]$$

lo que quiere decir que si se miden las duraciones de oscilación de un mismo péndulo en dos lugares distintos y se conoce la intensidad de la fuerza de gravedad en el primero de ellos, se deducirá el valor de la gravedad en el segundo.

Tal es el fundamento de las determinaciones relativas de la intensidad de la fuerza de gravedad que suponen el empleo de péndulos llamados *invariables*, o sea que su longitud es siempre la misma a 0° C de temperatura.

En el procedimiento, pues, de relativas, único que actualmente se emplea por los Servicios geodésicos de los distintos países, se parte de la observación pendular en la estación de referencia respectiva, en la que el valor de -g- es perfectamente conocido, bien por una determinación absoluta (medición de S y l) o por enlace con otra estación de referencia en la que se conozca el valor de la gravedad.

La estación de referencia española está en la biblioteca del Observatorio Astronómico, en la que como antes se dijo, determinó Barraquer el valor absoluto de la gravedad. Dicha estación ha sido ligada dos veces con Potsdam (Alemania), estación fundamental para la red mundial de estaciones de gravedad. La primera vez, en 1901, por Hecker, con un aparato del Instituto Geodésico de Prusia, y la segunda vez, en 1903, por Hecker y Galbis, con el aparato de cuatro péndulos español. El profesor Borras, que fué informador de Gravimetría en la antigua Asociación Geodésica Internacional, sólo tuvo en cuenta el primer enlace (1901), obteniendo para Madrid, en el sistema de Potsdam, el siguiente valor para la intensidad de la gravedad:

$$g = 979{,}981 \; gals \pm 0{,}002.$$

La denominación *gal*, abreviatura de Galileo, equivale a dina, y es la unidad adoptada en las determinaciones pendulares, con lo que se ha querido honrar la memoria del gran hombre de ciencia italiano que comprobó experimentalmente por primera vez las leyes fundamentales del descenso de los graves.

La duración de oscilación de un péndulo puede medirse por el método denominado de *pasos* o por el de *coincidencias*. En el primero se cuenta un determinado número de pasos por la vertical del péndulo gravimétrico y se anota el tiempo, medido en el reloj de comparación que invierte en los mismos, deduciéndose el valor en tiempo entre paso y paso, o sea el de la duración de oscilación correspondiente. Este método no se emplea en la actualidad, mereciendo la preferencia el de coincidencias.

Se deduce en este método el valor de la duración de oscilación del conocimiento preciso del tiempo transcurrido desde un instante en que pasan simultáneamente por la vertical el péndulo que se observa y el del reloj de comparación, de marcha conocida, hasta el instante siguiente en que se verifique el fenómeno.

Sea P_r el péndulo del reloj de comparación que supondremos bate $0{,}5^s$ exactos, y P el péndulo que se observa, que suponemos bate $0{,}5^s + \alpha$. A partir del primer momento, en que pasan simultáneamente por la vertical ambos péndulos, sucederá que el péndulo P, en en la primera oscilación siguiente, pasará con un retraso α por la vertical; en la segunda oscilación con 2α, y así sucesivamente hasta el instante n en que por ser $n\alpha = 0{,}5^s$, pasarán a la vez nuevamente por la

vertical ambos péndulos, habiendo dado n oscilaciones el P_r y $n-1$ el P. Designando por c el período transcurrido entre ambas coincidencias, expresado en segundos y por s y s' las duraciones de oscilación del péndulo gravimétrico y de la péndola del reloj, respectivamente, tendremos:

$$n s' = (n-1)\, s = c,$$

o sea

$$s = \frac{c}{n-1} = \frac{c}{\frac{c}{s'} - 1} = \frac{c}{\frac{c}{\frac{1}{2}} - 1} = \frac{c}{2c-1}.$$

Efectuando esta división algebraica, resultará

$$\begin{array}{c|l} c & 2c-1 \\ \hline -c+\frac{1}{2} & \frac{1}{2} + \frac{\frac{1}{2}}{2c-1} = 0{,}5 + \frac{1}{4c-2}. \\ \hline +\frac{1}{2} & \end{array}$$

Podemos, pues, establecer que

$$s = 0{,}5^s + \frac{1}{4c-2}. \qquad [3]$$

Si el péndulo P, por el contrario, batiese menos de medio segundo, la fórmula última se transformaría en

$$s = 0{,}5^s + \frac{1}{4c+2}. \qquad [3']$$

Con el equipo pendular de este Instituto, actualmente en uso, constituído por los péndulos 104, 105, 106 y 107, sólo tiene aplicación la fórmula [**3**], dado que los cuatro son un poco más largos que la péndola del reloj de medios segundos, y, por lo tanto, son más lentos que ésta.

Se ha admitido para la demostración anterior que α es una fracción exacta de $0{,}5^s$, lo que no suele ocurrir en la práctica, siendo, pues, solamente aproximado el cálculo de c, y si a esto se añaden los errores personales que se cometen en la observación de las coincidencias, se comprende la necesidad de deducir el valor de c como promedio de un conjunto de varias observaciones.

En la práctica se ha adoptado la costumbre de observar 10 coincidencias seguidas, 1 a 10, y calcular la aparición de la 21, para observar a su vez las coincidencias 21 a 30, con lo que se obtienen 10 grupos que comprenden en tiempo 20 coincidencias, 1-21, 2-22, etc., deduciéndose el valor de c como promedio de los 10 grupos. Esto permite llegar a la centésima de segundo en el valor promedio de la coincidencia así deducido. De este valor se deduce por la fórmula [**3**] el de la duración de oscilación.

Esta duración de oscilación no puede introducirse directamente en la fórmula [**2**] para el cálculo de -g-, ya que el péndulo no se ha observado con amplitud infinitamente pequeña, ni en el vacío ni a temperatura constante en todas las estaciones, siendo necesario que deduzcamos de ella la que ese mismo péndulo tendría en las condiciones que exige la aplicación de la fórmula del péndulo matemático [**1**]. Esto implica el cálculo de varias correcciones, que se exponen a renglón seguido.

1.ª El péndulo que se observa y, por lo tanto, el matemático equivalente, oscilará con una amplitud finita que llamaremos $2A$. En estas condiciones la duración de oscilación s es

$$s = S\left[1 + \left(\frac{1}{2}\right)^2 \operatorname{sen}^2 \frac{A}{2} + \left(\frac{1 \cdot 3}{2 \cdot 4}\right)^2 \operatorname{sen}^4 \frac{A}{2} + \left(\frac{1 \cdot 3 \cdot 5}{2 \cdot 4 \cdot 6}\right)^2 \operatorname{sen}^6 \frac{A}{2} + \ldots\ldots\right],$$

y dada la pequeñez de A, que en estas observaciones no llega a valer 0,5°, se pueden despreciar los términos que siguen al primero y suponer que $\operatorname{sen}^2 \frac{1}{2} A = \frac{1}{4} \operatorname{sen}^2 A$, resultando

$$s = S\left(1 + \frac{1}{16} \operatorname{sen} A\right),$$

o, dado el valor pequeño de A,

$$S = s\left(1 - \frac{A^2}{16}\right). \qquad [4]$$

2.ª Al no oscilar el péndulo en el vacío perderá una parte de su peso igual al del volumen de aire que desaloja, y, por consiguiente, la intensidad de la fuerza de la gravedad será menor y la duración correspondiente mayor que la verdadera. Mas estudiadas las variaciones de oscilación del péndulo en diferentes condiciones de densidad de aire, estudio en este caso realizado en Potsdam, se dedujo una constante, que, multiplicada por la densidad, proporciona la corrección negativa

que debe aplicarse a la duración de oscilación observada, para calcular la correspondiente a la oscilación en el vacío.

Las constantes de presión λ correspondientes al juego de péndulos del Instituto son:

Péndulo 104	0,0000675
Péndulo 105	0,0000679
Péndulo 106	0,0000665
Péndulo 107	0,0000668

La densidad del aire dentro de la campana, en cuyo interior oscilan los péndulos, se calcula mediante la fórmula

$$D = \frac{B - \frac{3}{8} e}{0 \cdot 760 (1 + 0 \cdot 00367\, T)} ; \qquad [5]$$

en la que representan:

B, la presión atmosférica;

e, la tensión del vapor de agua, y

T, la temperatura.

Esta corrección vendrá expresada por el valor $-\lambda D$.

3.ª Aumentando con la temperatura la longitud del péndulo y con ello la duracion de oscilación, se precisa disminuir ésta en una cantidad, función de la temperatura, para averiguar la duración de oscilación a la temperatura constante de 0°. Mediante la observación del péndulo a diferentes temperaturas se ha determinado, también en el Laboratorio de Potsdam, una constante τ, función principalmente del coeficiente de dilatación del metal de que está construido el péndulo, que, multiplicada por la temperatura del mismo durante el período de observación, proporciona la corrección negativa que debe experimentar la duración de oscilación observada. Será, pues, esta corrección $-\tau T$.

4.ª Las coincidencias y, por lo tanto, las duraciones de oscilación correspondientes se miden en segundos del reloj de comparación, que tendrá una marcha determinada. Si designamos por M su movimiento en veinticuatro horas con relación al tiempo sidéreo, en un segundo adelantará o retrasará $\frac{M}{86400}$, y en el período de oscilación observado s, $s \frac{M}{86400}$, de modo que, según sea M positivo o negativo, así será la corrección que habrá que aplicar a dicha duración para medirla en segun-

dos de tiempo sidéreo, que es el adoptado para la medida del tiempo en las observaciones gravimétricas.

5.ª Al oscilar un péndulo transmite su movimiento a su soporte y éste lo refleja en él, aumentando la duración de oscilación del mismo, por lo que habrá que aplicar a esta otra corrección que se suele designar por ρ.

De los diversos procedimientos ideados para medir esta corrección, el seguido por el Instituto Geográfico es el propuesto por el profesor Borrass, en su día, que se basa en lo siguiente:

Si se tienen dos péndulos suspendidos en el mismo soporte, de modo que presenten un mismo plano de oscilación, siendo ambos de igual duración de oscilación, y se deja en libertad a uno de ellos con una amplitud determinada (péndulo perturbador), se pondrá a su vez en movimiento el segundo péndulo (péndulo perturbado) por efecto del balance del sostén, con amplitudes que irán aumentando a la vez que disminuyen las del péndulo perturbador, hasta el momento en que la amplitud del perturbado alcanza su valor máximo, para empezar a decrecer. Designando por α y α' las amplitudes medidas en el momento t de los péndulos perturbador y perturbado, y s, s', las respectivas duraciones de oscilación, estableció Borrass la siguiente fórmula para cálculo de -ρ-:

$$\rho = \frac{\alpha'}{\alpha} \frac{s' - s}{2} \operatorname{cosec} \frac{\pi (s' - s)}{2 s' s} t . \qquad [6]$$

Calculados, como hemos expuesto, los términos de corrección que se precisa introducir en los valores de las duraciones de oscilación observados, se deducirá la duración del péndulo invariable, en el vacío, a 0° C, con amplitud infinitamente pequeña, y expresada en tiempo sidéreo, por la siguiente expresión:

$$S = s - s \frac{A^2}{16} - \lambda D 10^{-7} - \tau T 10^{-7} + a s M 10^{-7} - \rho , \qquad [7]$$

en la que se ha adoptado por unidad de las constantes λ y τ la séptima cifra decimal del segundo, siendo $a = \frac{10^{+7}}{86400}$.

Una vez calculados los valores de S en la estación de observación, y de S_M en la estación de referencia (Madrid), donde es conocido el valor de g, g_{Mad}, se deducirá el de -g-, aplicando la fórmula [**2**], desarrollada en serie:

$$g = \left(\frac{S_{Mad}}{S} \right)^2 g_{Mad} = g_{Mad} - 2 g_{Mad} \frac{S - S_{Mad}}{S_{Mad}} + 3 g_{Mad} \left(\frac{S - S_{Mad}}{S_{Mad}} \right)^2 + \ldots [8]$$

En la práctica se tienen en cuenta sólo los dos primeros términos de este desarrollo para calcular el valor de -*g*-.

3. Instalación.—En cada campaña se fijan de antemano los puntos donde conviene efectuar la determinación de la gravedad.

Llegado al lugar correspondiente, generalmente una población, se buscará un local adecuado para proceder a la instalación de los aparatos. Es indispensable que dicho local ocupe planta baja, sin sótano, y que reúna buenas condiciones para que las oscilaciones de temperatura dentro del mismo sean las menores posibles. Generalmente se prefieren los edificios de muros gruesos, y, dentro de éstos, una habitación con pocos huecos al exterior. Las dimensiones mínimas de ésta serán tres por cuatro metros. Fijado el emplazamiento del pilar para la base de bronce que sostiene el aparato de péndulos se procede a construir aquél, lo que exigirá la cimentación de un hoyo que se abre en el suelo, por lo general de medio metro cúbico. Llegada la cimentación a ras del piso se levanta un pilar cuadrado, de ladrillos, de 60 por 60 centímetros de lado y de cinco a siete de altura, según el grueso de ladrillo disponible. Una vez secado dicho pilar se centra sobre él la basa y se fija su reborde inferior a la superficie superior del pilar con cemento, echando también una lechada de cemento, de suficiente fluidez, al interior de la basa, que es hueca, para que penetre bien por los huecos de asentamiento del reborde mencionado.

Se monta a continuación el aparato de péndulos sobre la basa, y se procede a la nivelación del mismo, recurriendo a los dos péndulos nivel, que se colocan en dos apoyos contiguos de péndulo, en ángulo recto entre sí. Esta operación se efectúa por el procedimiento ordinario, corrigiendo de antemano los péndulos niveles mediante sus correspondientes tornillos de corrección. Durante la operación de nivelar oscilan los péndulos niveles en las mismas condiciones que los péndulos gravimétricos.

Terminada la nivelación, se desmontan los péndulos niveles y se montan uno a uno los péndulos en las horquillas de descanso, operación que hay que hacer con gran cuidado para evitar cualquier golpe que pudiera modificar el montaje de los cuchillos de ágata. Después se hace descender las horquillas por medio de la manivela *E* (fig. 3.ª), quedando los péndulos suspendidos sobre sus respectivos planos.

Se coloca después el aparato de coincidencias encima de la mesa de observación, de tal modo que la escala que lleva en su parte delan-

tera quede a 1,72 metros de los espejos del aparato de péndulos, e iluminando convenientemente dicha escala se van buscando sucesivamente las cuatro imágenes de la misma que corresponden a las reflexiones en cada uno de los sistemas ópticos constituídos por el espejito de cada péndulo y el correspondiente espejo o prisma instalado en el centro del aparato pendular. Estas imágenes se llevan al centro del retículo del anteojo de coincidencias, accionando convenientemente, en sentido acimutal y cenital, espejos y prismas, para lo que se precisan dos operadores, uno atento al ocular del anteojo y otro en el aparato de péndulos.

Una regla práctica para encajar fácilmente las imágenes de la escala en el campo del anteojo es tirar una cuerda fina que se hace pasar horizontalmente entre los dos espejitos centrales y equidistante de ambos. La prolongación de la misma por encima del anteojo de coincidencias determina la dirección media de su eje óptico.

Montado el reloj Strasser en su soporte de hierro, se nivela aproximadamente éste con los grandes tornillos de nivelación que presenta, y dejada en libertad la péndola, se sigue accionando en los mismos hasta conseguir que el índice que lleva en su extremo inferior señale el 0 de la graduación que mide la amplitud oscilatoria de dicha péndola.

El cronógrafo se sitúa a continuación de la mesa de observación y se establecen los circuitos eléctricos, tanto para éste como para el accionamiento del electroimán del aparato de coincidencias. El aparato de radio se instala sobre una mesa, en sitio adecuado.

Como manantiales de energía eléctrica para los diversos circuitos se emplean pilas secas, de 1,5 voltios, que se acoplan entre sí, en serie o en paralelo, para conseguir las características de voltaje y amperaje necesarias, las que se complementan para el funcionamiento del aparato radio-receptor con un bloque de 90 voltios.

La antena de radio se tiende en alto, en espacio despejado, lo más próximo posible al local de observación, y procurando orientarla en la dirección de la estación emisora de las señales horarias. La toma de tierra se suele hacer uniendo el alambre correspondiente a una masa metálica que se encierra en la masa de hormigón de la cimentación del pilar de péndulos, caso de no disponerse de una cañería de agua próxima.

Por último, el barómetro Tonnelot y el psicrómetro se colocan cerca de los péndulos y en sitio conveniente para su observación cómoda.

4. Observación. — Antes de comenzar la observación de las coincidencias se necesita conocer el movimiento del reloj Strasser en las veinticuatro horas, o sea, averiguar dos estados consecutivos del mismo mediante recepción y registro de las señales horarias.

Como ya dijimos anteriormente, se utilizan para estas determinaciones de hora las señales rítmicas o científicas que por su gran precisión son susceptibles de dar la centésima de segundo.

Consisten en una serie de señales breves, cuyo intervalo es algo diferente de un segundo, por cuya razón, registrando simultáneamente las señales y los segundos del reloj de comparación, se observará que si en un instante dado coinciden ambas series, es decir, se encuentran situadas una señal de cada una en la perpendicular a los bordes de la cinta del cronógrafo, esta coincidencia desaparece en seguida, pues las señales de radio se adelantarán o retrasarán a los batidos del péndulo, según que su intervalo sea menor o mayor en un segundo.

Para precisar más las ideas, supongamos un reloj *A* que bata exactamente el segundo de tiempo medio y dividamos el intervalo de sesenta segundos en 61 partes, recurriendo a otro reloj *B*, regulado convenientemente para que adelante esa cantidad de un segundo por minuto. El intervalo entre cada dos batidos de este reloj *B* valdrá $\frac{60}{61}$ de segundo, o sea $1 - \frac{1}{61}$ segundo. Si los dos relojes empiezan a batir simultáneamente, coincidiendo el golpe correspondiente al cero de *A* con el primer golpe de *B*, cuando *A* llegue a marcar sesenta segundos (para lo cual ha tenido que batir sesenta y uno la péndola), volverá a coincidir con *B*, que habrá batido 62 golpes, comprendiendo 61 intervalos. Al cabo de ciento veinte segundos, coincidirá nuevamente con el 123 de *B* (122 intervalos), y así sucesivamente.

Limitándonos a la recepción de las señales horarias francesas, diremos que este reloj *B*, perteneciente al *Bureau International de l'Heure* (B. I. H.), accionaba, en época normal, anterior a la última guerra desde el Observatorio de París las estaciones emisoras de la Torre Eiffel, Lyon y Burdeos. A una hora determinada, la misma todos los días, empezaba el reloj a enviar sus señales, por hilo directo, a una de las tres estaciones mencionadas, que las transformaba en señales radiadas emitidas por su antena. En el propio Observatorio de París eran recibidas y comparadas con el péndulo que hemos llamado *A*, que se había puesto

previamente en la hora exacta o corregido de su estado. La emisión constaba de 306 señales, es decir, 305 intervalos en trescientos segundos, con unas señales más largas en la que corresponden a la 62, 123, 184, 205 y 306.

El observador de una estación de péndulo recibe o registra las señales, provisto de un tercer reloj *C*, y anota o determina sobre la cinta cuáles coinciden con los batidos de su reloj. De estas coincidencias se puede deducir el instante exacto de las señales primera o última, en tiempo del reloj *C*. El cálculo de la hora se simplifica con el empleo de unas tablas publicadas en el *Anuario del Observatorio Astronómico de Madrid* correspondiente al año 1926, que proporcionan directamente la reducción a tiempo sidéreo del número de intervalos transcurridos desde la señal.

Con dos determinaciones sucesivas de la hora, una por la mañana y otra por la noche del mismo día, se deduce el movimiento del reloj en las veinticuatro horas sidéreas, debiendo corregirse siempre que exceda de cinco segundos como máximo. Esto supone otras dos determinaciones horarias para comprobar si se ha logrado la corrección deseada.

En las diversas campañas observadas desde la adopción de las señales radiadas para averiguar el estado del reloj Strasser se han utilizado indistintamente las emisiones de Burdeos, Torre Eiffel, Rugby y Nauen, que antes de la última guerra transmitían, respectivamente, las señales rítmicas a las $8^h\ 1^m$, $9^h\ 31^m$, $10^h\ 00^m$ y $12^h\ 1^m$, y a las $20^h\ 1^m$, $22^h\ 31^m$, $18^h\ 00^m$ y $24^h\ 1^m$, respectivamente, permitiendo numerosas combinaciones para la determinación de los movimientos del reloj. En el estado I, que se acompaña al final, se presenta el cálculo de una observación de hora.

A partir de la guerra última, se han registrado de ordinario las señales rítmicas emitidas por Rugby, y en los primeros años de aquélla también las de Nauen.

Los péndulos se observan sucesivamente, estando uno sólo oscilando y los otros tres sujetos. El orden de observación establecido por la costumbre es el de la numeración creciente, o sea 104, 105, 106 y 107. Los 104 y 105 se montan en la parte del aparato de péndulos más próxima a la mesa de observación, en tanto que los 106 y 107 quedan colgados en la parte más alejada de aquélla.

En la observación de los 10 grupos que corresponden a intervalos

de 20 coincidencias se invierte de $1^h\ 15^m$ a $1^h\ 20^m$, según el péndulo que se observe, lo que supone una duración de cinco horas, aproximadamente, para el juego de los cuatro péndulos, pudiendo observarse por día 8 o 10 péndulos, según el tiempo de que se disponga, ya que las observaciones de las coincidencias alterna en la práctica con la del balance del sostén y las recepciones horarias.

Antes de comenzar la observación de las series de coincidencias de cada péndulo, y una vez terminadas éstas, hay que observar y anotar la presión atmosférica, temperatura seca y húmeda en el higrómetro y temperatura señalada por el termómetro-péndulo, que se instala en su sitio antes o después de montar los péndulos gravimétricos.

Generalmente se observa cuatro veces cada péndulo, o sea 16 péndulos en total.

En los estados II y III del final se muestra la observación de una serie de coincidencias de un péndulo en una estación, y la del balance — cuatro valores de los ocho que corresponden a cada determinación — con la pareja de péndulos 104-106.

Generalmente se efectúan tres determinaciones totales del balance con los péndulos pareados 104-106 y 105-107, escogidos de modo que coinciden los planos de oscilación de cada pareja.

Cada una de estas determinaciones totales comprende ocho determinaciones parciales del balance, que se calculan para los 10, 15, 20, 25, 30, 35, 40 y 45 minutos transcurridos desde el momento en que se deja en libertad de oscilación al péndulo perturbador. Los valores de Δ que figuran en el estado III, se calculan con arreglo a la fórmula de Borrass, preparada para el cálculo en el estado IX que se inserta más adelante.

La observación del balance requiere el concurso de dos personas, una atenta al anteojo del aparato de coincidencias donde se reflejan las imágenes de la escala proporcionada por cada péndulo perturbado y otra encargada de dejar en libertad, sin movimiento, al péndulo perturbado y de soltar el perturbador en el momento preciso.

En tanto el Ingeniero efectúa la observación de los péndulos, el Topógrafo procede al cálculo de las reducciones con los datos de los resultados inmediatos obtenidos. Para el cálculo de las reducciones se dispone de los siguientes modelos de hojas de cálculo:

1.° Duración de la oscilación observada deducida de la coincidencia (estado IV).

2.° Tensión del vapor de agua (estado V) que se obtiene directamente por medio de unas Tablas, con los datos de temperatura seca y húmeda y de presión atmosférica B.

3.° Corrección por presión (estado VI) en función de B (presión atmosférica), c (tensión), T (temperatura seca) y λ (constante de presión). Están tabulados los valores de $\frac{\lambda}{760\,(1+0{,}00367\,T)}$, con lo que, aplicando el cálculo logarítmico, se facilita mucho el cálculo de esta corrección.

4.° Corrección por temperatura (estado VII).

5.° Reducción a tiempo sidéreo (estado VIII). Con los valores máximos y mínimos de la duración de oscilación observada en cada péndulo, y los movimientos del reloj en las veinticuatro horas sidéreas, se calculan los que corresponden a las duraciones de oscilación, tomando el promedio de las correcciones máximas y mínimas deducidas.

6.° Cálculo de las oscilaciones del soporte (balance del sostén) (estado IX). El mero exámen de este estado excusa toda explicación del mismo, salvo la de aclarar que la práctica ha permitido comprobar que es suficiente prolongar hasta los cuarenta y cinco minutos el cálculo de los valores de Δ con el juego de péndulos 104-105-106-107, por alcanzarse las amplitudes máximas de los péndulos perturbados transcurrido dicho intervalo de tiempo.

Para cada estación se compendian los datos de observación y los resultados inmediatos y reducidos en un doble cuadro (estado X), del que se deducen las duraciones de oscilación reducidas, como promedios de los cuatro valores de las mismas en cada péndulo.

5. Invariabilidad de los péndulos y cálculo de errores.—El fundamento de las determinaciones relativas es la invariabilidad de los péndulos durante la campaña, pero esta circunstancia no siempre se cumple, pues la práctica de las observaciones ha demostrado que no en todas las estaciones se pueden utilizar las duraciones de oscilación deducidas de los cuatro péndulos para el cálculo de la gravedad. Para comprobar la existencia o falta de invariabilidad se vuelven a observar los péndulos en la estación de partida o de referencia, viéndose por la diferencia entre los valores de las duraciones de oscilación de un mismo péndulo, entre la salida y el cierre, si se puede conceptuar de invariable o no. Se precisa más esta averiguación recurriendo a las diferencias entre el promedio de la duración de oscilación de cada

péndulo con los promedios de los restantes en una estación cualquiera, o sea hallando las diferencias 104-105, 104-106, 104-107, 105-106, 105-107 y 106-107, las que, comparadas con las correspondientes diferencias en otras estaciones, mostrarán si hubo o no variación en la longitud de los péndulos durante el trancurso de la campaña.

Para saber la precisión obtenida en las observaciones hay que calcular el error medio total en cada una de ellas, que designaremos por E. Este valor es la raíz cuadrada de la suma de los cuadrados de los errores parciales cometidos en las varias observaciones hechas para deducir las duraciones de oscilación reducidas, o sea:

$$E = \sqrt{e_s^2\,(\text{Madrid}) + e_s^2\,(\text{estación observada}) + e_a^2 + e_v^2 + e_t^2 + e_m^2 + e_b^2}, \qquad [10]$$

En esta expresión significan:

e_s el error procedente de la observación de la duración de oscilación;

e_a el que proviene de la corrección por amplitud;

e_v) los errores que provienen de la inseguridad de la constante

e_t) de reducción al vacío y por temperatura, respectivamente;

e_m el error producido en los valores de la duración de oscilación a consecuencia de los cometidos en la determinación de la hora, y

e_b el error cometido en la determinación del balance del sostén.

En estaciones bien observadas los valores deducidos para E suelen ser mayores de dos y menores de cuatro unidades del séptimo orden, con lo que los correspondientes de E_g oscilan entre uno y dos miligals, siendo

$$E = \pm \frac{2 g_M}{S_M} E .$$

6. Reducción de la intensidad de la gravedad observada al nivel del mar. Corrección topográfica. Término de Faye. Término de Bouguer. Intensidad teórica. Anomalías.—Para que los valores de gravedad observados en un país o región determinada sean comparables entre sí y permitan formarse idea del relieve gravimétrico, necesitan reducirse todos al nivel del mar, sometiéndolos, además, a determinadas correcciones.

Primeramente, el terreno presenta, alrededor de la estación observada, accidentes topográficos, suscitándose el problema de reducir la intensidad deducida al valor que resultaría si la superficie geográfica en la región considerada hubiese sido la superficie de nivel que pasase por

la estación. Esta reducción es la *corrección topográfica*, cuyo cálculo es bastante complicado. Es preciso apreciar, en efecto, la dirección y la intensidad de la atracción de masas perturbatrices en exceso o en defecto, partiendo de la ley de ser la atracción directamente proporcional a las masas e inversamente proporcional al cuadrado de las distancias.

Esto supone la posesión de un mapa topográfico de la región y el conocimiento de la densidad de las rocas superficiales, complicándose aún más el cálculo correspondiente si la estación se encuentra en zona montañosa, por todo lo cual, se prescinde de ordinario de esta corrección, como corrección aislada, por tenerse en cuenta en la reducción isostática de las estaciones que mencionaremos más adelante.

Suponiendo efectuada la corrección topográfica, y designando por g' el valor resultante para la gravedad observada en E (fig. 12),

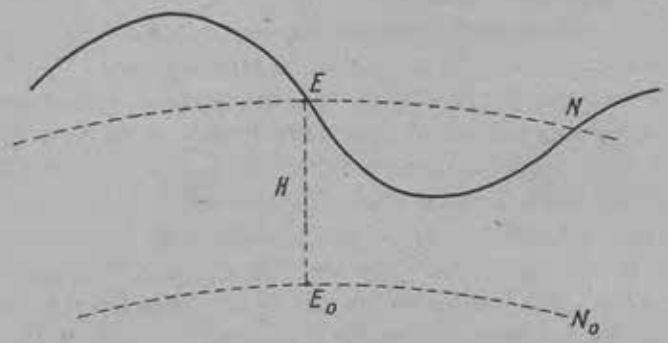


Fig. 12.

propongámonos reducir g' al valor g_0 que se observaría en E_0 al nivel del mar, si la superficie N_0 constituyese la superficie exterior de la Tierra Admitamos, además, que E sea exterior a N_0 que es el caso general Las masas terrestres yacentes por debajo de la superficie de nivel N_0, ejercen evidentemente sobre E una atracción menos fuerte que sobre E_0; por otra parte, las masas comprendidas entre las dos superficies de nivel N y N_0 tienden a aumentar la gravedad en E, mientras se las supone separadas para calcular la gravedad en E_0. Resulta de lo expuesto, que para reducir g' al nivel del mar, hay necesidad de afectarla de dos correcciones: Una C_1, aditiva, cuando E está por encima del nivel del mar representa la diferencia entre las atracciones sobre E_0 y sobre E de las masas comprendidas en la parte de la corteza situada por debajo de

la superficie de nivel N_0. Esta reducción se denomina ordinariamente *término de Faye* o *al aire libre.*

La otra corrección C_2, sustractiva cuando E está por encima del nivel del mar, representa la atracción sobre E de las masas comprendidas entre las dos superficies de nivel N y N_0. Se la denomina corrección, término o *reducción de Bouguer.*

La corrección C_1 se expresa por la siguiente fórmula:

$$C_1 = 2g\frac{H}{R},$$

en la que representan:

H, la altitud de la estación considerada como positiva cuando se encuentra por encima del nivel del mar, y como negativa en el caso contrario;

R, radio medio terrestre, de donde se deduce.

$$C_1 = 0{,}0003086 \times H \text{ (en metros).} \qquad [11]$$

El término de Bouguer se expresa por

$$C_2 = 2g\frac{H}{R}\frac{3}{4}\frac{\delta}{\delta_m}, \qquad [12]$$

siendo:

δ, la densidad de las masas superficiales, y

δ_M la densidad media de la Tierra, para la que se toma el valor 5,52.

De las expresiones [**11**] y [**12**] se deduce que

$$C_2 = C_1\frac{3}{4}\frac{\delta}{5{,}52}.$$

La gravedad teórica se ha expresado por distintas fórmulas, según las épocas, de las que ponemos a continuación las usadas en España:

1. $\gamma_0 = 978{,}030\,[1 + 5302 \times 10^{-6}\,\text{sen}^2\varphi - 7 \times 10^{-6}\,\text{sen}^2 2\varphi]$,
(Helmert, 1901).

2. $\gamma_0 = 978{,}039\,[1 + 5294 \times 10^{-6}\,\text{sen}^2\varphi - 7 \times 10^{-6}\,\text{sen}^2 2\varphi]$,
(Bowie, 1917).

3. $\gamma_0 = 978{,}049\,[1 + 52884 \times 10^{-7}\,\text{sen}^2\varphi - 59 \times 10^{-7}\,\text{sen}^2 2\varphi]$,
(Fórmula de Cassinis o Internacional, 1930).

Como se ve, las tres son funciones de la latitud del lugar de observación.

La comparación de la gravedad reducida por el método de Faye o el de Bouguer con la gravedad teórica proporciona las anomalías de Faye y de Bouguer, respectivamente.

Las notaciones adoptadas internacionalmente para expresar los valores de la gravedad observados y reducidos, son las siguientes:

g, intensidad observada;

g', intensidad corregida de la corrección topográfica,

g_0, intensidad reducida por el método de Faye:

$$g_0 = g + 0{,}0003086\, H \text{ (en metros)}.$$

g''_0, intensidad reducida por el método de Bouguer;

$$g''_0 = g_0 + \frac{3}{4}\,\frac{\partial}{5 \cdot 52}\,(g - g_0) + (g' - g)\,.$$

γ_0, intensidad reducida sobre el elipsoide normal;

$g_0 - \gamma_0$, anomalía Faye, y

$g''_0 - \gamma_0$, anomalía Bouguer.

Las anomalías de la gravedad provienen de irregularidades en la repartición de las masas terrestres, distintas de la repartición teórica realizada en un elipsoide ideal compuesto de capas concéntricas homogéneas; constituyen tales irregularidades los accidentes o asperezas de la superficie geográfica del Globo y los excesos o defectos de masas interiores. Estas anomalías pueden ser positivas o negativas. En el primer caso indican una gravedad observada más fuerte de la que resultaría si las masas situadas por debajo de la estación e interiores al geoide obedeciesen a la ley teórica de repartición de densidades. Habrá, por lo tanto, por debajo de la estación, masas de fuerte densidad anormal, y, al contrario, una anomalía negativa pone de manifiesto una débil densidad anormal de las masas mencionadas.

Unas veces las anomalías son meramente locales, originadas por las masas perturbatrices de densidad anormal, de extensión limitada, y otras presentan el carácter de anomalías generales, del mismo signo para una región de la superficie de la Tierra. Pero todas ellas conservan el mismo sesgo y casi siempre el mismo signo, cualquiera que sea el elipsoide normal adoptado, es decir, cualquiera que sea la fórmula

escogida para calcular γ_0 y cualquiera que sea el modo de calcular las intensidades reducidas al nivel del mar (Bouguer, Faye).

Este hecho ha permitido clasificar las estaciones de intensidad de la gravedad en los tres grupos siguientes:

1.° Estaciones continentales, situadas en el interior de los continentes. Para estas estaciones la anomalía en general es negativa, aumentando su valor absoluto con la mayor altitud y con el alejamiento de la orilla del mar.

2.° Estaciones costeras, sobre el litoral de los continentes o grandes islas. En éstas la anomalía es más frecuentemente positiva que negativa y conserva el mismo signo para un mismo litoral.

3.° Estaciones insulares sobre las pequeñas islas aisladas en pleno mar u océano. Presentan éstas casi siempre fuertes anomalías positivas.

Precisa, pues, admitir la existencia bajo los continentes y bajo los océanos de masas de densidad anormal, débil bajo los segundos. Respecto a las estaciones costeras, los valores de las anomalías dependen de su distancia al litoral, de la profundidad de la mar libre y de la inclinación de la superficie que liga la orilla con el fondo de dicho mar libre.

Entre las teorías lanzadas para explicar las anomalías de la gravedad, las dos principales son las de Airy y la de Pratt, que datan de mediados del siglo último, más en boga, en un principio, la de este último sabio, si bien la de Airy ha reaparecido en nuestros días con el nombre de «Teoría de las raíces de montañas».

Aceptado hoy día universalmente el concepto de la isostasia introducido por Hayford como resultado derivado de la teoría de Pratt estableció éste, secundado por Bowie, la teoría de la compensación isostática, siendo ambos los primeros geodestas que efectuaron la reducción de las intensidades observadas al geoide dentro del marco de dicha teoría.

7. Reducción isostática.—La reducción isostática de una intensidad observada se efectúa afectándola de tres correcciones:

1.ª La corrección de Faye C_1 dada por la fórmula [**11**];

2.ª La corrección *topográfica* C_t debida a la atracción de las masas exteriores al geoide, y

3.ª La corrección *isostática* C_i debida a los defectos de masas compensadoras interiores al geoide.

Las correcciones topográficas C_t e isostática C_i son iguales, respec-

tivamente, a las componentes verticales de las atracciones ejercidas sobre la unidad de masa situada en la estación, por los excesos de masas exteriores al geoide y los defectos de masas compensadoras interiores. Su cálculo está basado en la expresión que da en dinas (unidad de fuerza C. G. S.), la atracción f ejercida sobre un gramo-masa (unidad de fuerza C. G. S.) colocado en la estación por una masa elemental dm situada a la distancia D de esta estación, expresada en centímetros (unidades de longitud C. G. S.). Designando por K el coeficiente de la atracción universal ($6673 \cdot 10^{-11}$), se tendrá

$$f = K \frac{dm}{D^2}, \qquad [13]$$

que constituye la fórmula básica para el cálculo de la reducción isostática.

Para su aplicación se divide la superficie entera de la Tierra por circunferencias de círculo que tengan por centro la estación, en 33 coronas circulares, de las que cada una está dividida en cuadriláteros curvos iguales, por rectas que parten del centro, formándose 317 cuadriláteros en total. Las coronas más próximas a la estación, hasta 6.370 kilómetros, se designan, a partir de ésta, por las letras $A\ B \ldots\ldots N\ O$. Las más alejadas van numeradas 18, 17 ..... 2, 1, estando la *18* contigua a la O y la *1* en los antípodas de la estación.

Se calculan las correcciones c_t y c_l relativas a los diversos compartimientos, que tienen la forma de cilindros de generatrices verticales, cuyas bases son los cuadriláteros curvos antes citados. Estas correcciones son integrales, suma de todos los valores que toma la función [**13**] en los diversos puntos del compartimiento.

El cálculo de estas correcciones sería sumamente laborioso de no existir tablas publicadas en la Memoria de Hayford y Bowie, aparecida en 1912, «The effect of topography and isostatic compensation upon the intensity of gravity», que simplifican extraordinariamente la labor. Por otra parte, durante las sesiones de la segunda Asamblea general de Geodesia y Geofísica celebrada en Madrid en octubre de 1924, surgió la idea de que aquellas naciones adheridas a la Unión Geodésica y Geofísica Internacional que tuviesen hechas observaciones de gravedad en su territorio, sin estar reducidas isostáticamente, y deseasen poseer dichos valores de g reducidos para saber las anomalías resultantes, se dirigiesen al U. S. Coast and Geodetic Survey, que de antiguo posee personal entrenado en los extensos cálculos de la reducción isostática, en deman-

da de que ese mismo personal efectuase las reducciones por topografía y compensación correspondientes a los valores de las estaciones de gravedad en cada país.

Aceptada la propuesta por el Director del Coast and Geodetic Survey, nuestro Instituto Geográfico se adhirió, desde el primer momento, a la proposición citada, toda vez que poseía ya por aquella fecha una red bastante extensa de valores de g observados en toda la extensión del territorio, a la par que carecía de personal de calculadores que poder dedicar a los prolijos cálculos de la reducción isostática.

En tres etapas ha efectuado el U. S. Coast and Geodetic Survey reducciones isostáticas, por el método de Hayford y Bowie, de estaciones de gravedad españolas. En la primera (1925) se redujeron 31 estaciones; en la segunda (1929) 11 estaciones, y en la tercera (1936) otras seis estaciones, con un total de 48 estaciones repartidas por toda la Península, con excepción de la zona NO. y parte de la N., por no disponerse en las épocas en que se realizaron de las hojas del Mapa Nacional en 1:50.000, indispensables para el cálculo de la reducción.

Hay publicados varios trabajos en las Memorias del Instituto Geográfico y en los informes de Gravimetría presentados en las distintas Asambleas de la Unión Geodésica y Geofísica Internacional, a partir de la de Praga, así como al XIV Congreso Geológico Internacional celebrado en Madrid en 1926, todos debidos al autor de este Prontuario, y en donde se exponen los resultados logrados con la reducción isostática en España y las consecuencias que se deducen de los mismos, por lo que juzgamos innecesario insistir sobre los mismos en este lugar, remitiendo al lector interesado a la bibliografía que figura al final, donde se da el detalle de las mencionadas publicaciones.

8. Progresos y tendencias en los procedimientos de las determinaciones relativas de la gravedad.—De los aparatos pendulares introducidos a finales del siglo XIX, el de Sterneck, utilizado por nuestro Instituto Geográfico, es el que principalmente se ha difundido y perfeccionado.

Los principales perfeccionamientos se refieren:

1.º *A la determinación de la influencia que la elasticidad del soporte ejerce sobre la duración de oscilación de los péndulos y al empleo de péndulos que oscilan por parejas sobre el mismo soporte.*—Los italianos Lorenzoni y Silva establecieron fórmulas prácticas para el empleo

del bipéndulo, esto es, de dos péndulos oscilando simultáneamente en el mismo soporte, aplicándolas, en particular, a dos péndulos oscilantes en oposición de fase, disposición que presenta la ventaja de hacer casi nula la influencia de la elasticidad del soporte (balance del sostén). A base de este principio se han construído aparatos mucho más rígidos que los alemanes ($\rho < 10 \times 10^{-7}$ seg), ejemplo seguido posteriormente por la generalidad de los constructores. En el aparato Sterneck el valor de ρ oscila de 30 a 60×10^{-7} seg.

2.° *Al empleo de aparatos de aire enrarecido.*—Haciendo oscilar los péndulos dentro de un recinto de aire enrarecido se presenta la posibilidad de mantener en todas las estaciones una densidad de aire casi igual, y, por lo tanto, de hacer muy pequeño el error de la reducción a una determinada densidad.

3.° *A la utilización de péndulos construídos con material de pequeño coeficiente de dilatación.* — Después de las investigaciones de Benoit y Guillaume relativas a las aleaciones de ferro-níquel, se construyeron péndulos gravimétricos de invar, con el fin de disminuir el coeficiente de temperatura, y, como consecuencia, los errores debidos a la apreciación no suficientemente precisa de la temperatura de los péndulos. Mas, primeramente, la inconstancia molecular del invar y, después, la irregularidad e histéresis térmica presentada por este material, así como sus propiedades magnéticas, hicieron preferir a la mayoría de los experimentadores los péndulos de bronce, amagnéticos, de dilatación perfectamente regular y carentes de histéresis térmica, si bien presenten coeficiente de temperatura cerca de 25 veces mayor que el de los péndulos de invar. En estas condiciones se ha intentado aumentar la precisión de la determinación de la temperatura, empleando termómetros sensibles con el depósito tan largo como la masa pendular (termómetros integradores).

Hasta 1923 no había experimentado modificaciones esenciales el *procedimiento para determinar la duración de las coincidencias*. En el método Sterneck, como se dijo oportunamente, se determinan los tiempos de las coincidencias del péndulo gravimétrico con el reloj de comparación, a vista y oído, sirviéndose de un relais electromagnético que envía rayos luminosos, accionado por el propio reloj. Este método directo para deducir el intervalo de la coincidencia c con la aproximación de $1 \cdot 10^{-3}$ seg. origina un error en la duración de oscilación de cerca de $2{,}5 \cdot 10^{-7}$ seg. Tal precisión resulta suficiente en la genera-

lidad de los casos, y esto explica cómo al sustituir el registro óptico-acústico por el automático, no se pensase en un principio en el aumento de dicha precisión.

El profesor holandés Vening Meinesz aplicó el registro fotográfico a la observación pendular, a base de un rayo luminoso reflejado por el espejito del péndulo en movimiento sobre una lente cilíndrica, detrás de la cual se desplaza con movimiento uniforme una cinta fotográfica. Sobre ésta aparece trazada una curva sinuosidal, y si a cada segundo el reloj interrumpe por breve espacio de tiempo la propagación de la luz, las interrupciones se presentarán en las hondas sucesivas en puntos de ordenadas que van creciendo o decreciendo, lo que permite la deducción de *c*. Vening Meinesz empleó este procedimiento para obtener la duración de oscilación del péndulo ficticio, resultante de dos sustituibles que oscilan en el mismo plano, con el fin de eliminar el efecto de la aceleración horizontal del soporte. Con este objeto, el rayo de luz provinente de una lámpara incide en el espejo del primer péndulo y de éste sale reflejado al espejo del segundo péndulo, que es el que lo envía a la lente cilíndrica. La velocidad de la cinta sensible es regulable, siendo en el aparato de Vening Meinesz de poco menos de un milímetro por segundo en los períodos inicial y final de la observación que sirven para el cálculo de *c*, y reduciéndose a 1/3 del precedente valor en el período central, en el cual las oscilaciones son registradas para fines secundarios. Con dicha velocidad obtiene Vening Meinesz para el valor de *c* la misma precisión que con el relais de Sterneck.

Otros procedimientos de registro fotográfico de las duraciones de oscilación y de las coincidencias han sido ideados por Meisser y Martín, del Instituto Sismológico de Jena, con los cuales se puede lograr mayor precisión. Así, para un péndulo de medio segundo observado durante unos cuarenta minutos, se obtienen errores medios de $2 \cdot 10^{-8}$ seg. en el período, y de $1 \cdot 10^{-4}$ seg. en la duración de una coincidencia. Uno de estos procedimientos se aplica al aparato de cuatro péndulos para medidas de elevada precisión, construido en Jena hacia 1930.

Otro método de registro automático de las oscilaciones se funda en el empleo de una célula fotoeléctrica, sobre la cual se hace incidir un rayo de luz reflejado por el espejito del péndulo en movimiento a cada paso del mismo por el plano vertical correspondiente a la posición de reposo del péndulo. La débil corriente que se produce, se amplifica

convenientemente hasta alcanzar la intensidad necesaria para accionar un relais polarizado y después la pluma de un cronógrafo, sobre el que quedan registrados los pasos del péndulo gravimétrico junto a los segundos del reloj.

Una notable innovación es la que se refiere a la *forma* y *construcción de los péndulos*. Aunque como hemos dicho se desechan, dentro de cada campaña, los péndulos que difieren notablemente entre sí, comparándolos en las estaciones de salida y de cierre, no deja de ser un inconveniente para la precisión del conjunto de observaciones que se realiza en cada estación de gravedad, esa selección de valores pendulares. Este inconveniente que se ha presentado en todos los servicios gravimétricos de los diversos países que usan los péndulos Sterneck, impulsó a los investigadores a proyectar un nuevo modelo de péndulos que pudiesen llamarse con todo rigor *invariables*.

En el Sterneck los desplazamientos inapreciables, pero reales, de la cuchilla, originan notables variaciones en las duraciones de oscilación correspondientes. Las investigaciones para aumentar la invariabilidad de los péndulos de relativas se dirigieron a escoger una distancia tal del centro de gravedad a la cuchilla de suspensión que la duración de oscilación correspondiente al péndulo así construido fuese *mínima*, demostrándose, por consideraciones teóricas, que esto se consigue cuando la distancia del centro de gravedad a la cuchilla de suspensión sea la mitad de la longitud reducida del péndulo. Este tipo moderno de péndulo se conoce con el nombre de *péndulo de mínima*.

Otra causa de irregularidad evitable que se presenta, asimismo, en los péndulos Sterneck, radica en el desigual reparto de la masa. La varilla delgada de estos péndulos experimenta proporcionalmente variaciones de temperatura más rápidas que la maciza masa lenticular. A pesar del empleo del péndulo-termómetro es raro que los péndulos, durante sus oscilaciones, tengan exactamente las temperaturas señaladas por aquél. Para que el péndulo se adapte por igual a las variaciones de temperatura en toda su extensión, se le ha dado la forma de una varilla de igual sección transversal en toda su longitud.

A este tipo pertenecen los péndulos utilizados en el aparato de Jena antes mencionado, que como características esenciales presenta las siguientes: la temperatura de los péndulos se obtiene mediante termómetros eléctricos de resistencias con la precisión de 1/20 de grado C; la presión, sumamente reducida, se aprecia con un manómetro también

eléctrico; se dan las amplitudes iniciales y se ponen los péndulos en movimiento por medio de relais electromagnéticos; para hacer más rígido el sostén, se ha sustituído la forma circular habitual por la cuadrada, haciendo oscilar los péndulos en los planos diagonales, y, por último, durante la observación los cuatro péndulos oscilan simultáneamente estando en oposición de fase los de cada pareja.

Con este aparato se logra obtener la diferencia de gravedad entre las estaciones de la campaña y la estación de referencia con la aproximación de $2 \cdot 10^{-4}$ cm. seg^{-2}. Pero para alcanzar tan elevada precisión es preciso, observando durante las veinticuatro horas, poder determinar la marcha del reloj de comparación con un error de pocas milésimas de segundo, cosa bastante difícil. Mas se puede lograr dicho grado de precisión, aunque la marcha del reloj se obtenga con poca exactitud, recurriendo a las *observaciones diferenciales*. Consiste este procedimiento en operar con dos o más aparatos pendulares; uno fijo, instalado en la estación de referencia, y el otro u otros montados en las diferentes estaciones de la campaña. Un reloj central situado en la estación de referencia funciona como único reloj de las coincidencias en ésta y las restantes estaciones. Si se observan simultáneamente una pareja de péndulos en la estación de referencia y otra pareja en una estación de campo, la diferencia de las duraciones de oscilación obtenidas para los dos péndulos medios resulta independiente de la marcha del reloj. La dificultad que, a primera vista, presenta este procedimiento, a saber, la de observar las dos parejas al mismo tiempo, se salva sirviéndose de señales horarias radiadas para la evaluación de las coincidencias en las diversas estaciones.

En lo que se refiere concretamente a las mejoras realizadas en el equipo pendular Sterneck, se representa en las figuras 13 y 14, el último modelo del mismo, desarrollado por la Casa Askania, de Berlín, en las que puede apreciarse a simple vista las diferencias constructivas más esenciales con respecto al modelo que posee nuestro Instituto.

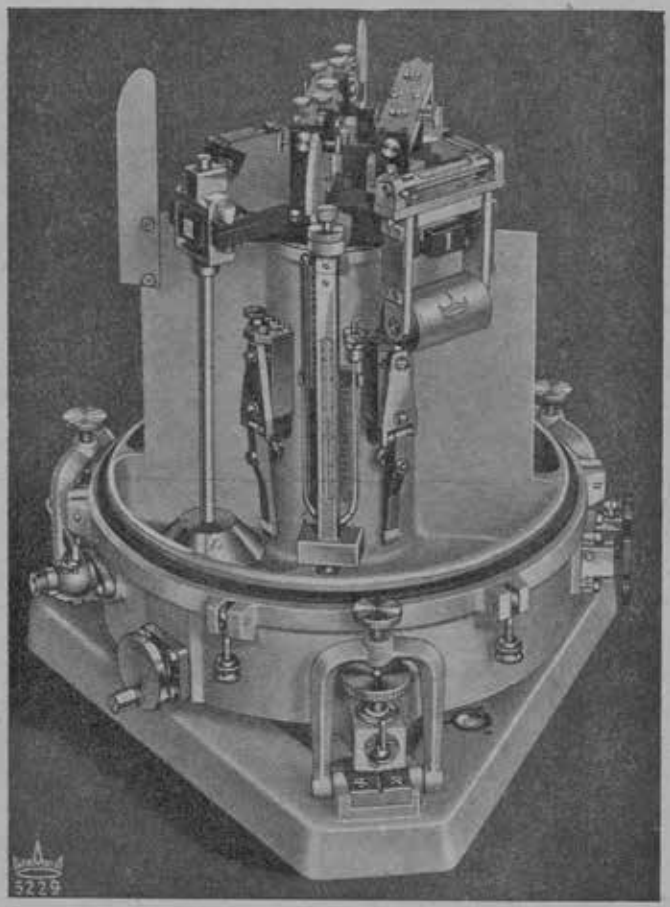


Fig. 13.

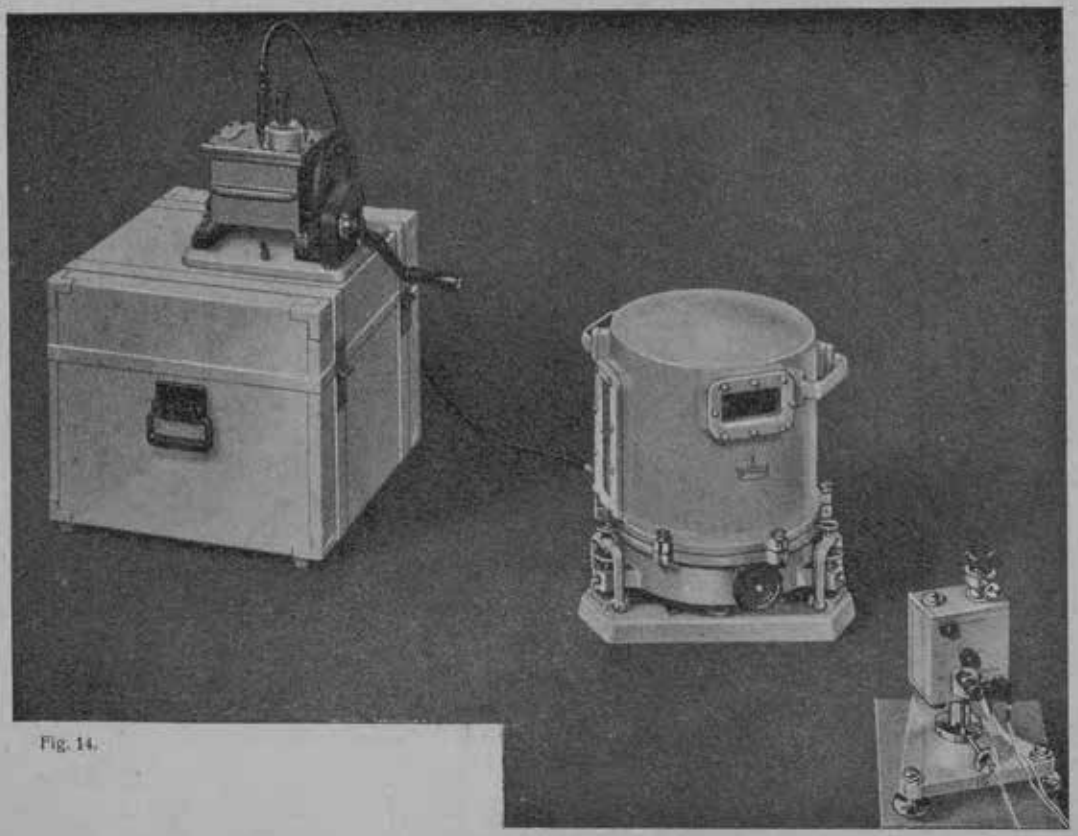


Fig. 14.

CAPÍTULO II

INVESTIGACIONES CON LA BALANZA DE TORSIÓN EÖTVÖS

1. Fundamento. Descripción del aparato de registro automático.—La balanza de Eötvös consiste esencialmente en una varilla P, P_1 (fig. 15) suspendida por su punto medio O de un alambre de platino iridio muy fino, la cual, termina por un peso P en uno de sus extremos, mientras que en el contrario va aquel P_2 suspendido de un alambre delgado de latón, actuando de contrapeso.

El efecto de la gravedad sobre este sistema puede descomponerse en dos acciones parciales: una, debida a la distancia horizontal h_1 que separa los contrapesos, y otra, debida a su separación en sentido vertical h_2.

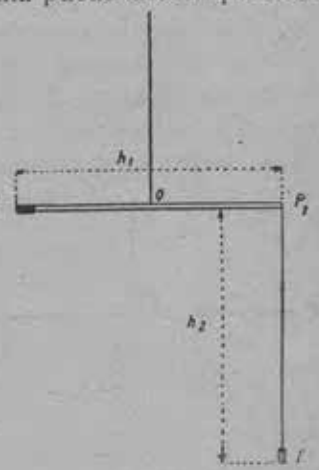


Fig. 15.

Para el estudio del primer efecto puede suponerse al peso inferior P_2, como fijo en la extremidad P_1 de la varilla. Si consideramos la superficie de nivel que pasa por el punto de suspensión O, como en este punto la fuerza de la gravedad actúa en sentido vertical, la varilla será tangente a dicha superficie. Esta es, ordinariamente, una superficie curvada, con lo que la fuerza de la gravedad en los extremos de la varilla no son paralelas entre sí, ni con la que actúa en el centro de la varilla. En la figura 16 se muestran las direcciones de las fuerzas de gravedad g, g', en los extremos de la varilla, cuando la superficie de nivel es convexa hacia arriba, y dichas direc-

ciones g_1 y g'_1 en el caso de ser la superficie cóncava en el mismo sentido. Ahora bien, solamente en casos excepcionales estará orientada la varilla de modo que dichas fuerzas de gravedad estén en el plano vertical que contiene al hilo de suspensión y a dicha varilla, siendo ordinariamente su dirección tal que habrá una componente de la gravedad en el plano horizontal, como se indica en la figura 17. Estas componentes, una en cada extremo, formarán un par de fuerzas que tiende a hacer girar la varilla hasta que el giro quede equilibrado por la fuerza de torsión del hilo. La magnitud del par de fuerzas mencionado, depende del grado de curvatura de la superficie de nivel. Supongamos que, en la figura 18, representan $A\ A_1$ y $B\ B_1$ las tangentes a la superficie de nivel que pasa por O en las direcciones correspondientes a la menor y mayor curvatura de aquélla, que suponemos convexa hacia arriba. Si la varilla estuviese colocada según $A\ A_1$, como en la parte superior de la figura 19, las componentes horizontales de la gravedad, actuando sobre los pesos en los extremos de la varilla, serían menores que si la varilla estuviese orientada según $B\ B_1$, como se ve claramente en la parte inferior de la figura 19.

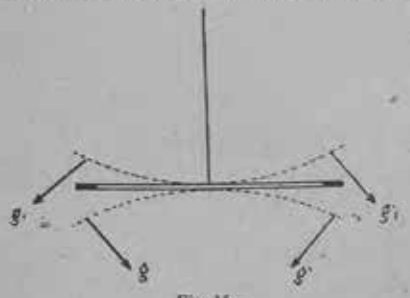


Fig. 16.

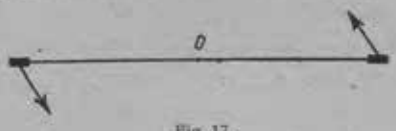


Fig. 17.

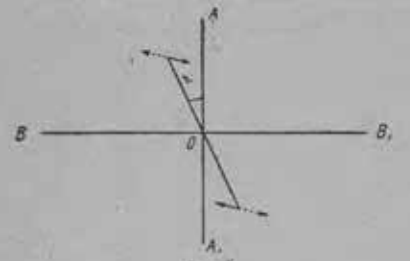


Fig. 18.

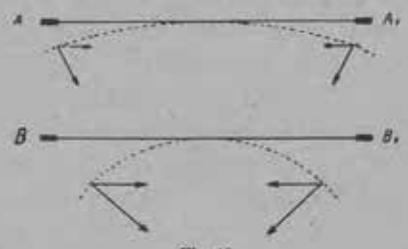


Fig. 19.

Para una posición intermedia entre $A\ A_1$ y $B B_1$, las componentes horizontales tendrán también un valor comprendido entre el máximo y el mínimo, y, por su dirección hacia adentro, tienden a hacer girar la varilla hacia $A A_1$, que será su posición de equilibrio. Análogamente, si

la superficie de nivel fuera cóncava hacia arriba, las componentes horizontales se dirigirían hacia afuera, originándose un par que tendería a hacer girar el sistema hacia BB_1 (flechas de puntos en la figura 18), que sería la posición de equilibrio de la balanza en el caso de una superficie de nivel cóncava hacia arriba.

La magnitud del par de fuerzas varía, en cada caso, con el ángulo de la figura 16, siendo, además, proporcional a la diferencia de las curvaturas en las dos direcciones AA_1 y BB_1.

Como medida de estas curvaturas se ha convenido en tomar los inversos de los radios de curvaturas correspondientes, y la diferencia de ellos, multiplicada por la gravedad, que se suele representar por R, se llama término de curvatura o fuerza directriz horizontal.

Apliquemos las consideraciones acabadas de exponer al caso de un anticlinal o sinclinal en la corteza terrestre, y supongamos primeramente que en la figura 20 *a* se representa, por la línea llena horizontal HH', la sección por un plano vertical de la superficie de nivel correspondiente al caso de un elipsoide homogéneo de gran radio, equiparable a nuestro Globo. Las fuerzas de la gravedad serían entonces iguales a lo largo de dicha línea y dirigidas hacia el centro, no originándose, por consiguiente, par de fuerzas alguno que tendiese a hacer girar la varilla de la balanza en cualquier posición en que se colocase. Si ahora imaginamos quitado el material entre la línea horizontal y la línea convexa de puntos y reemplazado por material menos denso, formándose así un anticlinal con núcleo de rocas pesadas, es evidente que la proporción de materia más densa y, por lo tanto, con mayor fuerza atractiva, se encontrará en ángulo recto con el plano del papel (caso *b* de la figura 20), por lo que la balanza colocada encima de semejante estructura, tenderá a girar buscando una posición perpendicular al plano del dibujo, o sea que se colocará paralelamente con el eje del anticlinal.

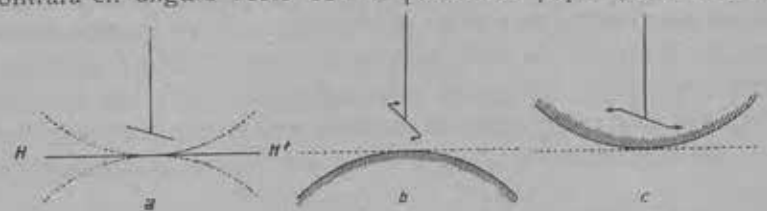


Fig. 20.

Por el contrario, si se añadiese materia a la ya existente, inyectán-

dola, por decirlo así, en el espacio comprendido entre la línea continua y la cóncava de puntos representada en *a*, se formaría un sinclinal relleno de material menos denso que las capas que lo comprenden, y por encontrarse en este caso el exceso de materia en el plano del papel, la varilla tenderá a oscilar hasta que se oriente paralelamente al papel, o sea en dirección normal al eje sinclinal, como se muestra en *c*.

Para estudiar el efecto en la balanza producido por la separación vertical de los pesos h_2, hay que tener presente que las superficies de nivel del campo gravífico terrestre no son paralelas generalmente entre sí, ni aun para puntos próximos, como son los P_1 y P_2 de la figura 15, por lo que las fuerzas de la gravedad en ellos tendrán direcciones y magnitudes distintas, produciéndose una componente horizontal en el punto P_2, cuya magnitud dependerá, naturalmente, de la distancia que hay entre P_1 y P_2.

Consideremos un punto M (fig. 21) distante un centímetro, en sentido horizontal y en sentido vertical, de otros dos N y G.

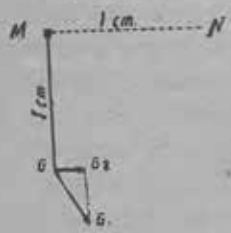


Fig. 21.

La fuerza de la gravedad en G, GG_1, estará inclinada un pequeño ángulo con respecto a la vertical, demostrándose que su componente en la dirección MN, o sea GG_2, es igual al incremento de la gravedad de M a N, que es por definición el gradiente de la gravedad (incremento de dicha fuerza para un centímetro de desplazamiento horizontal).

El gradiente tiene una dirección determinada para cada punto y se dirige siempre hacia la materia más pesada. Cuando el aumento en el valor de la gravedad es debido, por ejemplo, a la elevación hacia la superficie del terreno de rocas pesadas en el núcleo de un anticlinal, el gradiente se dirigirá al encuentro del eje del anticlinal. Por esa razón, cuando se rebasa el eje, cambian de dirección los gradientes que toman la opuesta, deduciéndose que, sobre el eje mismo, el gradiente será nulo.

Si, por el contrario, el anticlinal presentase núcleo de sustancia menos densa, un anticlinal de sales potásicas, por ejemplo, los gradientes se apartarían de él. Lo mismo se verifica en el caso de un sinclinal relleno con sustancia menos densa, pasando también los gradientes por un valor cero sobre éste.

Las desviaciones experimentadas por la balanza en varios azimutes

para cada estación, función como acabamos de exponer de las curvaturas máximas y mínimas de la superficie de nivel y de la magnitud y dirección del gradiente de la gravedad, permiten estudiar este gradiente y la influencia de la curvatura.

En posesión de estos datos, gradientes y términos de curvatura, sobre una zona investigada por la balanza, se puede efectuar la interpretación de los mismos.

El aparato adquirido por este Instituto, marcado con la letra *Q*, está representado en la figura 22. Es una balanza doble de Eötvös, funcionando bajo el principio expuesto y protegida por una triple envolvente metálica.

El aparato consta de tres partes esenciales que se separan para el transporte del mismo en el campo, y que rápidamente pueden acoplarse en el sitio escogido para estación (véanse las figuras 23 y 24 que muestran al instrumento en diversos grados de acoplamiento de las partes integrantes). La parte inferior consiste en una columna hueca *b*, provista de tres tornillos nivelantes *d*, y de un volante *e* que acciona a un manguito de expansión y permite, una vez aflojado, el encaje de la parte media unida al eje general de giro del instrumento.

Sobre esta parte media se monta el cuerpo superior *i* que contiene las balanzas y la disposición óptica para la observación de éstas. A dicho cuerpo se atornillan los tubos de triple envuelta t_1 y t_2 (fig. 25).

Ajustado al extremo superior del eje va un platillo de aluminio *f* (figura 24), y sobre él un aparato de relojería *m*, que por medio de una rueda dentada engrana con una corona dentada fija debajo del platillo sobre un disco, el cual puede, a voluntad, hacerse solidario del platillo accionando unas palancas *p*. El aparato de relojería es, asimismo, susceptible de embragarse o desembragarse de la corona manipulando un botón *n* (fig. 22). Desembragado, se obtiene el movimiento rápido, a mano, del platillo, y embragado, el lento automático. Convenientemente espaciado sobre el disco de la corona aparecen 10 tornillos-topes *h*, que al ser atornillados tropiezan con unos trinquetes accionables que producen la detención del movimiento automática de giro. Los topes están distribuídos en un círculo de menor radio que la corona y pueden combinarse entre sí para producir la parada en tres, cuatro o cinco posiciones. En el interior de la caja *m*, que contiene el aparato de relojería existe, asimismo, un núcleo electromagnético cuya armadura vertical, al ser atraída, suelta al trinquete correspondiente, que por su

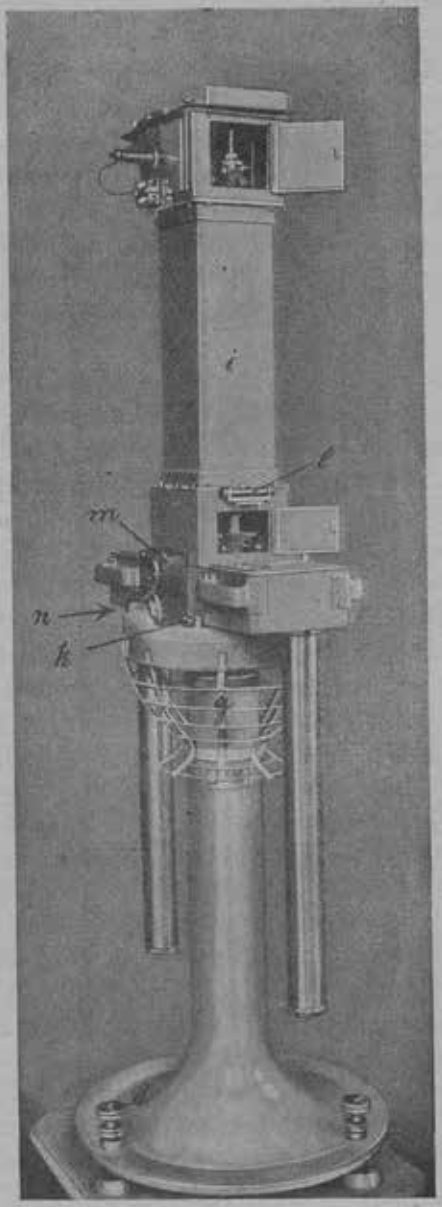


Fig. 22.

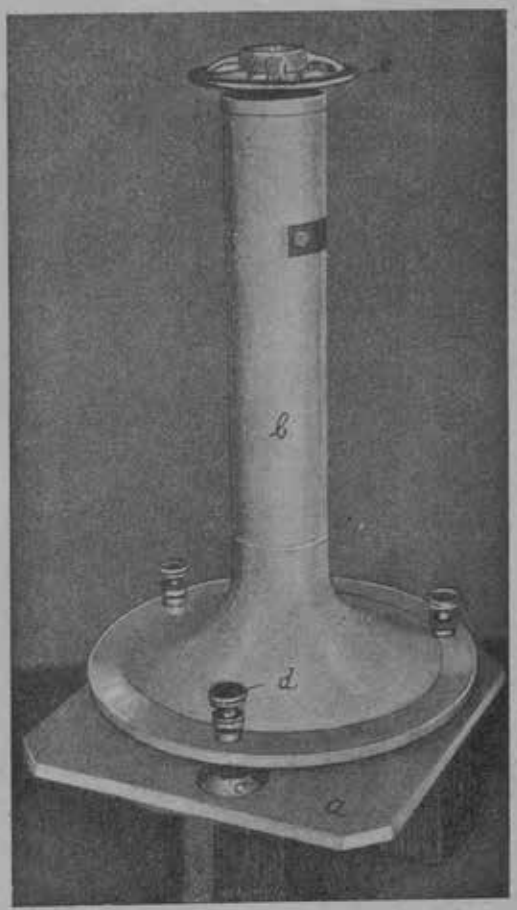


Fig. 23.

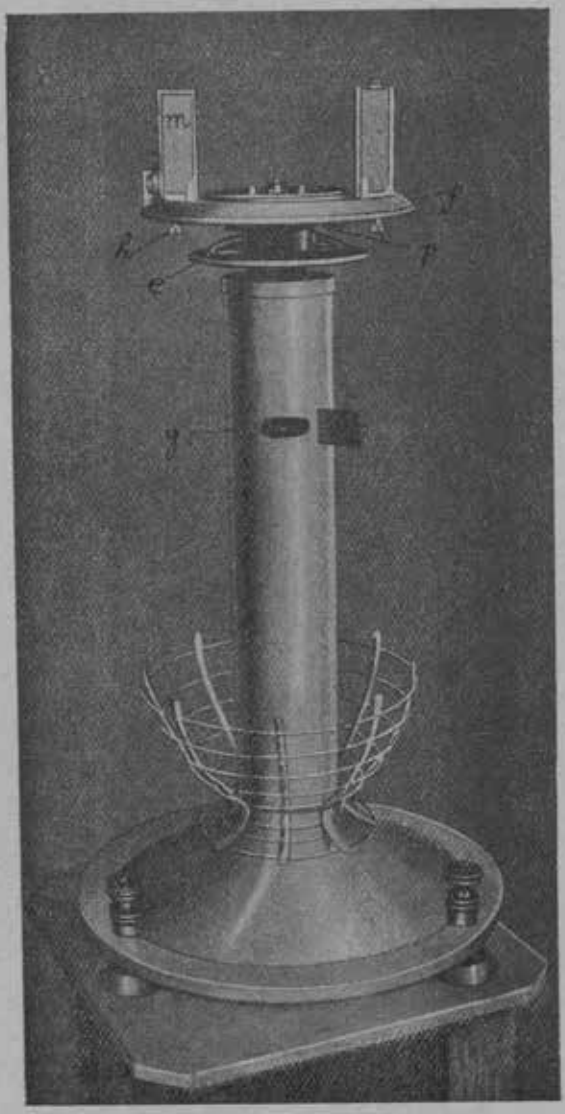


Fig. 24.

agarre producía la parada del instrumento. A cada hora se cierra el circuito del electroimán con el auxilio de un reloj eléctrico de contactos, visible en la figura 25, que permite el paso de la corriente de un acumulador el tiempo suficiente para salvar el obstáculo del trinquete, al cabo del cual se desimanta la armadura y cae por su peso, quedando preparada para engancharse en el trinquete siguiente, y efectuándose mientras tanto un giro suave y lento del instrumento, con lo que las balanzas apenas entran en conmoción, bastando ese período de una hora para que tomen la posición de equilibrio que corresponde a cada azimut.

Los hilos de torsión de platino con 10 por 100 de iridio tienen un diámetro de 0,04 milímetros. Estos hilos se someten a un tratamiento especial, con el fin de envejecerlos artificialmente, pues de este modo se consigue que la tendencia que los hilos adquiridos en fábrica muestran a separarse de su posición de equilibrio, disminuya hasta hacerse inapreciable, efecto que en los hilos nuevos sólo se consigue con el tiempo, al cabo de un año, a veces. El principio del tratamiento consiste en lastrar los hilos con un peso igual al que han de sufrir en el aparato y en someterlos a elevaciones graduales de temperatura y a enfriamientos lentos. De cada hilo *H* pende el brazo de la balanza correspondiente (fig. 26), que es un tubo de aluminio *B* de 40 centímetros de longitud, unido rígidamente por su centro a una varita vertical *V*, donde va fijo un espejito rectangular *S*. Uno de los extremos del brazo lo forma un cilindro horizontal de oro *O*, de 30 gramos, mientras que del extremo opuesto cuelga, al final de un alambre de cobre de 62 centímetros, un contrapeso de latón *C*, relleno de plomo, también de 30 gramos.

Las dos balanzas del aparato adquirido por nuestro Instituto se distinguen una de otra con las letras Q_I y Q_{II}, grabadas sobre las cámaras que contienen los brazos, sobre éstos y sobre los contrapesos de latón respectivos.

El brazo horizontal de cada balanza se mueve dentro de una cámara de oscilación, cuyo fondo, movible en sentido vertical, está constituído por una plancha metálica que apoya sobre dos excéntricas acopladas, que pueden accionarse girando hacia la derecha o hacia la izquierda el botón *r* (fig. 25). A su vez, cerca de los extremos de cada brazo van montadas dos piezas-travesaños, perpendiculares al brazo, de modo que, girando el botón a la derecha, empieza a remontarse el fondo hasta tropezar con los travesaños, deteniéndose entonces la oscilación

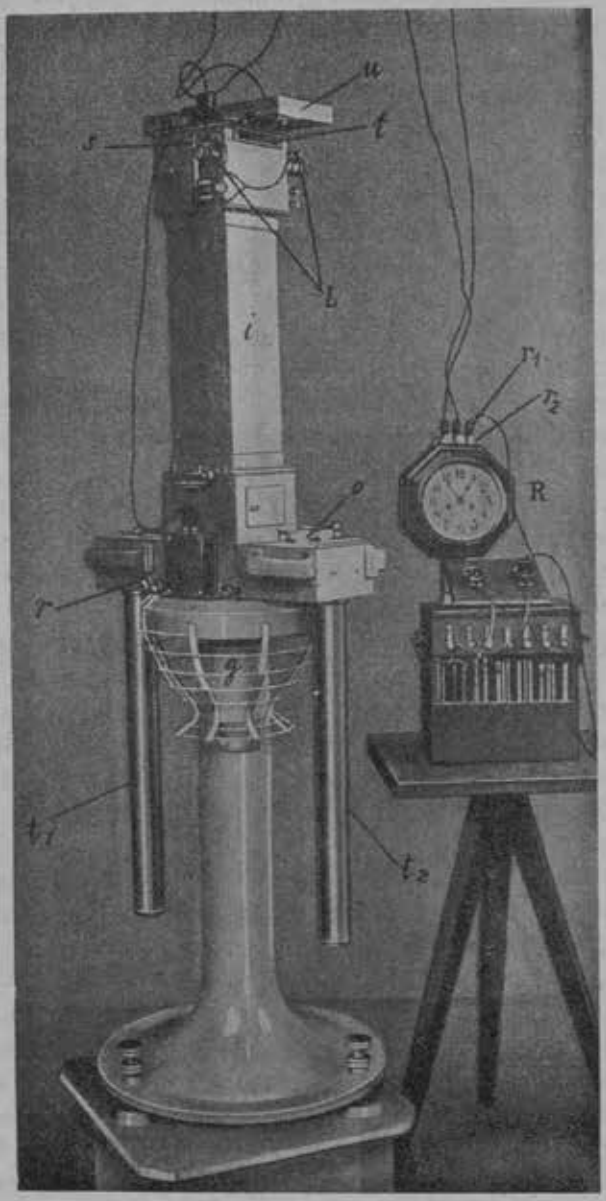


Fig. 25

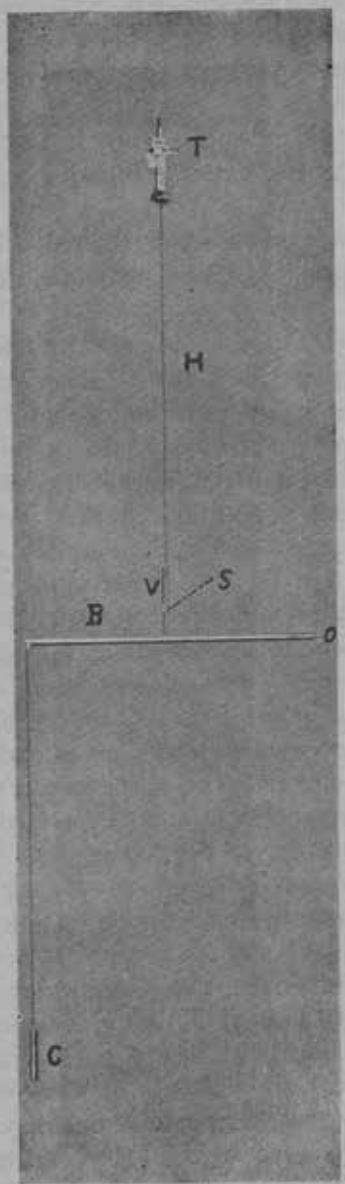


Fig. 26.

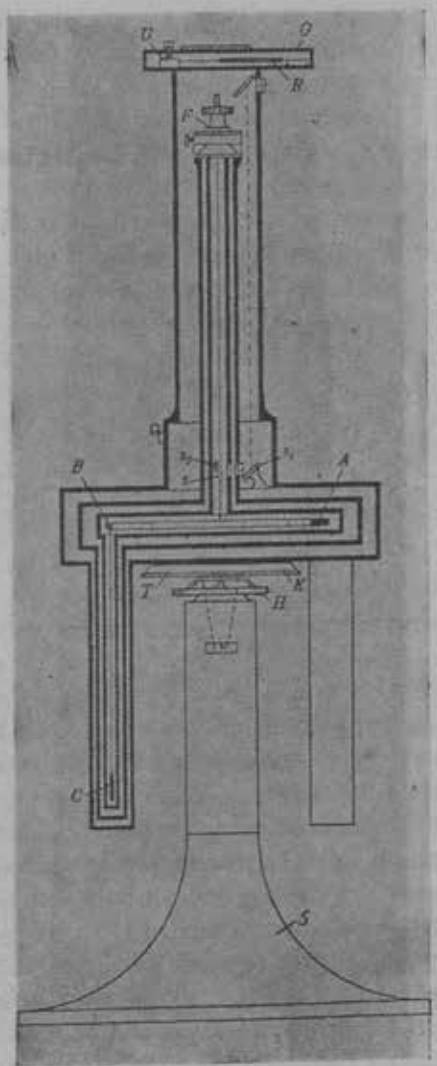


Fig. 27.

del brazo sin basculeos, y continuando el giro se descarga el hilo de torsión, cesando el movimiento cuando los travesaños tropiezan con el techo de la cámara. Esta es la posición de transporte del instrumento, con las balanzas subidas, que se adopta, asimismo, siempre que no esté en funcionamiento.

El hilo de torsión va soldado a dos plaquitas con ranuras, que se fijan con tornillos a una cabeza de torsión y al extremo superior de la varita vertical del brazo.

Las cabezas de torsión gemelas *T* son susceptibles de cuatro movimientos, y sirven para colocar los brazos de las balanzas en la posición inicial debida.

La observación de los ángulos de torsión se hace por registro fotográfico sobre la parte superior del instrumento. Debajo del aparato registrador están dispuestas dos lamparitas eléctricas Osram L (fig. 25), que por el intermedio de prismas de reflexión total envían cada una su luz, filtrada a través de un objetivo circular, de diametro muy reducido a dos espejos planos regulables, que se denominan espejos de caballete por la forma de ir montados, uno de los cuales es el designado con la letra s_1 en el corte de una de las balanzas, representado en la figura 27. Ese espejo envía rayos luminosos, a través de una lente, al espejito *s* del brazo de la balanza y al espejito s_2, fijo a la envolvente más interior. Devueltos esos rayos al espejo s_1, los dirige éste sobre la placa sensible, donde quedan impresionados dos puntos. Análogamente existe para la otra balanza otro espejo similar al s_1, que manda sobre la placa otros dos puntos luminosos, correspondientes a las reflexiones sobre el espejito de la varilla de dicha balanza y sobre otro espejo termómetro fijo a una placa bimetálica de cobre y hierro. Sobre la placa sensible aparecen los puntos espaciados en una misma línea 1, 2, 3 y 4 (fig. 28), una vez hecha la debida corrección de imágenes. Interceptando la marcha de los cuatros rayos reflejados ascendentes, por medio de un espejo que gira a charnela y que se acciona con el botón *s* (fig. 25), se proyectan los puntos sobre una escala graduada

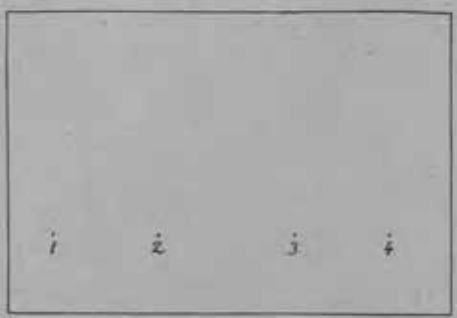


Fig. 28

de cristal deslustrado *t*, que se observa desde el exterior. La placa fotográfica 6,5 × 9, antihalo, está montada sobre un bastidor, que un aparato de relojería hace mover a la velocidad de tres milímetros por hora. Como los registros de los cuatro puntos se hacen de hora en hora, queda así la suficiente separación de una hilera a la siguiente. Cada lamparita va ligada a una resistencia regulable para variar la intensidad del rayo luminoso.

Como elementos complementarios del instrumento existen dos niveles en ángulo recto, uno de ellos designado con la letra *l* en la figura 22, una brújula *o* (fig. 25) para la orientación de las balanzas, y una armadura de alambre *g*, sobre la que se monta una cubierta aisladora, de pluma de ganso, que se fija con presillas alrededor del cuerpo superior *i* y de los tubos t_1 y t_2.

El reloj eléctrico *R* (fig. 25) está dispuesto para enviar corriente a las lamparitas durante el minuto 59-60 de cada hora, impresionándose cuatro puntos sobre la placa. Al llegar el minutero al minuto 60 se corta el circuito de las lamparitas y entra en acción el que produce el movimiento azimutal del aparato. Estableciendo un puente entre los dos reóforos r_1 y r_2 del mismo reloj, se obtiene luz permanente en las lamparitas, necesarias para la corrección de las imágenes. Al aparato acompañan tres dobles enchufes señalados con las letras *B*, *L* y *A*, que ligan entre sí al acumulador, reloj y variómetro, como indica la figura 29.

2. Montura del aparato y funcionamiento.—A continuación expondremos metódicamente la serie de operaciones necesarias para la instalación de la balanza en una estación en el campo.

1.ª Se escoge el punto para estacionar, de modo que en un radio de dos metros el terreno sea aproximadamente llano. Si la pendiente de éste fuese fuerte por necesidad, se remueve la tierra hasta allanar el terreno, teniendo después cuidado de apisonarlo bien

2.ª Se arma la caseta, que sirve para proteger a la balanza de la acción de los agentes atmosféricos durante su funcionamiento. Es de lona fuerte y dobles paredes, relleno el espacio intermedio con sustancia aislante para impedir el paso al interior del calor o del frío. Esta caseta, una vez armada, se cubre con otra lona sostenida por pértigas, cuyo objeto es preservarla de la acción directa de los rayos solares o de los efectos de la lluvia. El ajuste de las diversas partes de la caseta es tan perfecto que se puede efectuar en su interior el revelado de las placas impresionadas en la balanza.

3.ª En el punto *O*, centro de la estación, se coloca una plantilla de aluminio (fig. 30), clavando en su centro un piquete y comprobando la horizontalidad de dicha plantilla con un nivel de carpintero. Se coloca una brújula (la misma del aparato sirve) encima y se orienta la plantilla hacia el Norte astronómico. Se señala el sitio del terreno sobre el que cae cada uno de los agujeros de la plantilla, y, una vez retirada ésta,

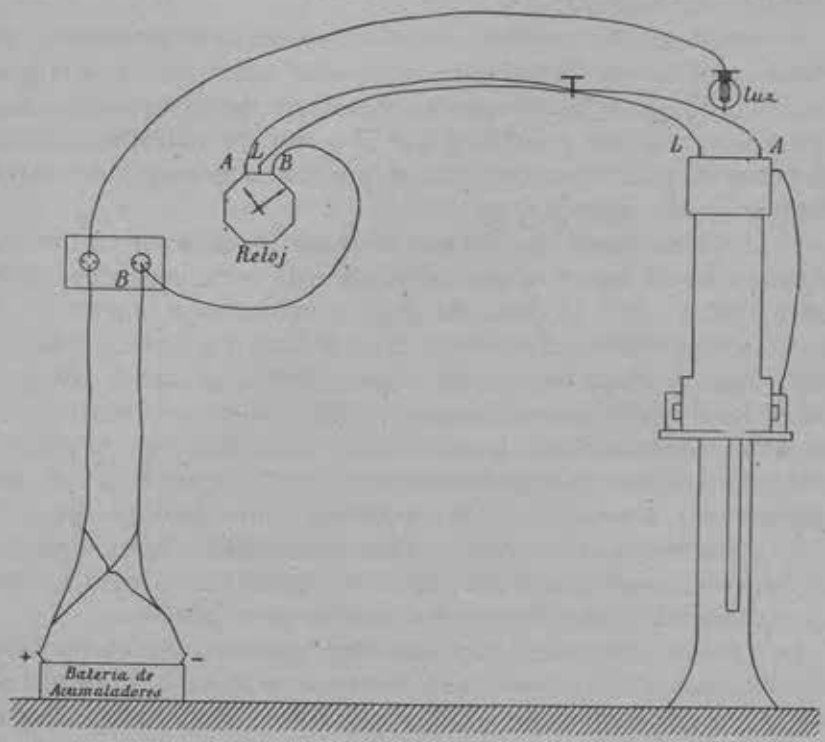


Fig. 29.

se clava en cada uno una estaca, procurando introducirlas de modo que las tres caras superiores de las mismas determinen aproximadamente un solo plano horizontal que quede a unos 25 centímetros del terreno. Las estacas deben ser de sección cuadrada en su mitad superior, y conviene tener juegos de distinta longitud para emplearlos según la consistencia del terreno. Sobre las estacas se coloca la plancha de aluminio *a* (fig. 23) que se acaba de nivelar con el nivel de carpintero.

4.ª Colocación de la columna *b* (fig. 23) sobre la plancha *a*, distri-

buyendo los tejos *c* sobre ésta, de modo que vengan a caer encima de cada estaca.

5.ª Giro hacia la izquierda del volante *e*.

6.ª Montura de la parte media *f* (fig. 24).

7.ª Giro a la derecha del volante *e*.

8.ª Apretar los tornillos topes *h* indispensables para la detención del giro en los azimutes necesarios.

9.ª Colocación del cuerpo superior *i* (fig. 22) y fijación del mismo con los cuatro tornillos *K*.

10. Atornillar los tubos t_1 y t_2 (fig. 25).

11. Probar si el instrumento gira suavemente. Regulación, en caso necesario, de dicho movimiento, accionando a través de la vantanilla *g* (figura 24) sobre un tornillo de graduación de la carga del eje sobre su rangua.

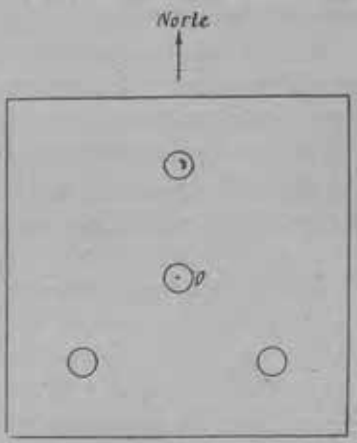


Fig. 30.

12. Nivelación del instrumento con el auxilio de los dos niveles *l* del mismo y los tornillos nivelantes de la base de la columna.

13. Orientación del instrumento. Con este fin se coloca la brújula *O* sobre su alojamiento correspondiente del cuerpo superior, y bajando el botón *n*, una vez dada la cuerda al reloj azimutal, se deja girar el aparato hasta su parada automática al llegar al tope 0°.

Se giran entoces hacia afuera las tres palancas *p* y se orienta al Norte astronómico asiendo con las manos al disco de la corona dentada. Concluída la orientación se vuelven a girar hacia dentro las tres palancas *p*.

14. Colgar los contrapesos de las balanzas. Para esto se quitan sucesivamente las tres cubiertas de las cámaras de oscilación para dejar al descubierto los extremos de los brazos de las balanzas. El alambre de cobre, del que pende el contrapeso, va soldado por el extremo opuesto a una horquilla que se engancha con una palanquita de forma adecuada y se encaja en una ranura que presenta el extremo del brazo de cada balanza.

15. Establecer las conexiones eléctricas y dar cuerda a los tres aparatos de relojería correspondientes al movimiento azimutal, al bas-

tidor de la placa y al reloj de contactos. Respecto a este reloj, conviene advertir que sus agujas deben girarse siempre en el sentido de la marcha. Un giro en sentido contrario estropearía el mecanismo de los contactos.

16. Soltar las balanzas girando lentamente hacia la izquierda los botones *r* correspondientes hasta que encajen en sus seguros respectivos. Durante todo el movimiento de giro deben agarrarse bien los botones, toda vez que en su interior existen unos muelles, que producirían el retroceso rápido de los botones si éstos se soltasen antes de tiempo, originándose fácilmente la rotura de los hilos de platino. La misma precaución hay que tener cuando los botones se giren a la derecha para detener las balanzas.

17. Conectar con un alambre corto los dos reóforos r_1 y r_2 del reloj de contactos (fig. 25), para tener luz permanente en las lamparitas y observar la situación de los puntos luminosos sobre la escala, una vez girado el botón *s* que acciona al espejo hasta la palabra «visual», grabada en la envuelta exterior. La escala está dividida en milímetros y numerada en unidades (1/2 milímetros). Los cuatro puntos deben aparecer sobre las divisiones 53, 96, 144 y 180, contados de derecha a izquierda, mirando a la escala desde el Norte (fig. 31). La corrección de las imá-

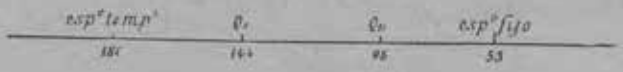


Fig. 31.

genes, caso de no coincidir con estas divisiones, es operación prolija, por lo general, que exige el concurso de dos personas.

18. Detener las balanzas, girar el botón *s* hasta la palabra «Photo» y cortar el circuito que da luz permanente a las lamparitas.

19. Colocar las cubiertas de pluma sobre las distintas partes del aparato, atornillando previamente la armadura de alambre *a*.

20. Comprobar, por última vez, la nivelación y después el buen funcionamiento del instrumento, a cuyo fin se pasa con la mano el minutero del reloj a una hora exacta y se observa si el aparato gira de la posición I (0°) a la II (120°), y con otro giro de otra hora del minutero, de la II a la III (240°). Al pasar el minutero sobre el minuto 59, se enciende la luz de las lámparas durante el tiempo que tarda en recorrerse ese minuto, y conviene retardar un poco la velocidad con que se gire al minutero, al llegar a dicho minuto 59.

Una vez en la posición III se quita la cubierta superior *u* del aparato, se coloca un chasis con placa, se saca la corredera de éste, se vuelve a colocar la cubierta, se quitan las resistencias de las lámparas caso de estar introducidas para la corrección de imágenes, y se bajan, por último, las balanzas. Se vuelve a pasar con la mano otra hora del reloj, con lo que el aparato girará a la posición I, y se anota entonces la hora de un reloj de bolsillo. Durante una hora el aparato estará quieto, necesitándose ese tiempo para que las balanzas, sacudidas por el último giro, queden en reposo, y transcurrida dicha hora, automáticamente pasará el aparato a la posición II, habiéndose marcado sobre la placa cuatro puntos correspondientes, como sabemos, a las dos balanzas, espejo fijo y espejo-termómetro, durante el minuto 59-60. Para distinguir unos de otros los puntos señalados por cada balanza, que pueden entrecruzarse con fuertes gradientes, pueden seguirse dos procedimientos. Uno consiste en introducir un poco de resistencia a una de las lámparas, con lo que los puntos correspondientes sobre la placa serán más débiles. Otros operadores emplean un diafragma en el objetivo con taladro de mayor diámetro para una de las balanzas, obteniéndose así puntos más gruesos. Es más recomendable el primer sistema.

Para desmontar el aparato se procede en orden inverso.

3. Desarrollo del cálculo.—Designemos por n y n' (fig. 32) las distancias (en milímetros y décimas de milímetro) de los puntos marcados de hora en hora por las balanzas Q_I y Q_{II} a los puntos de referencia correspondientes al espejo fijo. Situado el observador al Norte del aparato en su posición inicial, mirando hacia la escala la balanza Q_{II} cae a su derecha, y la Q_I a su izquierda, de modo que a no ser para fuertes ángulos de torsión, las distancias n, traducidas con una escala de cristal que construye Fuess, serán mayores que las n'.

Fig. 32.

Llamemos n_0 y n'_0 las distancias (incógnitas) que corresponden a la posición de ambas balanzas *sin torsión* de los hilos. La fórmula para el cálculo deducida Eötvös, es

$$n - n_0 = a \operatorname{sen} 2\alpha \left(\frac{d^2 U}{dy^2} - \frac{d^2 U}{dx^2} \right) + 2a \cos 2\alpha \frac{d^2 U}{dx\,dy} - \\ - b \operatorname{sen} \alpha \frac{d^2 U}{dx\,dz} + b \cos \alpha \frac{d^2 U}{dy\,dz}. \qquad [14]$$

En esta fórmula designa α el azimut, contando desde el Norte hacia el Este (fig. 33). Hay que efectuar medidas de n y de n' en tres posiciones de las balanzas. Sobre una de las cubiertas de las cámaras de las balanzas va grabada la letra *N*. El cálculo se desarrolla como sigue:

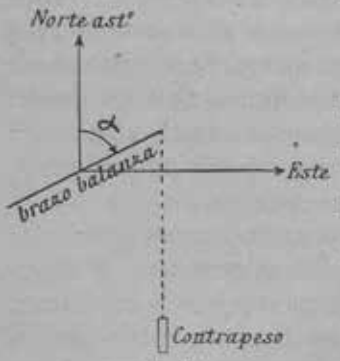


Fig. 33.

	Balanza Q_I	Balanza Q
Posición I *N* en el Norte astronómico.	$\alpha_1 = 180°, n_1$	$\alpha_1 = 0°, n'_1$
Posición II *N* en azimut 120°.....	$\alpha_2 = 300°, n_2$	$\alpha_2 = 120°, n'_2$
Posición III *N* en azimut 240°.....	$\alpha_3 = 60°, n_3$	$\alpha_3 = 240°, n'_3$

$$n = \frac{1}{3}(n_1 + n_2 + n_3),$$

$$n'_0 = \frac{1}{3}(n'_1 + n'_2 + n'_3),$$

$$\left.\begin{aligned} n_1 - n_0 &= \Delta_1 \\ n_2 - n_0 &= \Delta_2 \\ n_3 - n_0 &= \Delta_3 \end{aligned}\right\} \left.\begin{aligned} n'_1 - n'_0 &= \Delta'_1 \\ n'_2 - n'_0 &= \Delta'_2 \\ n'_3 - n'_0 &= \Delta'_2 \end{aligned}\right\} \begin{aligned} \Delta_1 + \Delta_2 + \Delta_3 &= 0 \\ \Delta'_1 + \Delta'_2 + \Delta'_3 &= 0 \end{aligned}$$

$$\left.\begin{aligned} 10^{+9}\frac{d^2U}{dxdz} = U_{xz} = \frac{dg}{dx} &= \frac{a'}{2\,\mathrm{sen}\,60°\,(a'b + ab')} \times \left[\Delta_2 - \Delta_3 - \frac{a}{a'}(\Delta'_2 - \Delta'_3)\right] \\ 10^{+9}\frac{d^2U}{dydz} = U_{yz} = \frac{dg}{dy} &= \frac{a'}{a'b + ab'}\left[\Delta_2 - \Delta_3 - \frac{a}{a'}(\Delta'_2 + \Delta'_3)\right] \\ 10^{+9}\left(-\frac{d^2U}{dy^2} + \frac{d^2U}{dx^2}\right) = U_\Delta &= -\frac{b'}{2\,\mathrm{sen}\,60°\,(ab' + a'b)} \times \left[\Delta_2 - \Delta_3 + \frac{b}{b'}(\Delta'_2 - \Delta'_3)\right] \\ 10^{+9}\frac{d^2U}{dxdy} = U_{xy} &= -\frac{b'}{2\,(ab' + a'b)}\left[\Delta_2 + \Delta_3 + \frac{b}{b'}(\Delta'_2 + \Delta'_3)\right]. \end{aligned}\right\} \quad [15]$$

Las constantes a, b, a', b', se calculan por las fórmulas

$$\left.\begin{aligned} a &= \frac{D}{\tau}K \\ b &= \frac{2D}{\tau}mlh \end{aligned}\right\} \left.\begin{aligned} a' &= \frac{D}{\tau'}K' \\ b' &= \frac{2D}{\tau}m'lh' \end{aligned}\right\}. \quad [16]$$

en las que representan:

K y K' los momentos de inercia de las balanzas;

τ y τ' los momentos de torsión de los hilos de platino;

m y m' los gramos que pesan los contrapesos;

l la distancia del eje de giro de cada balanza al punto de suspensión de los contrapesos;

h y h' las distancias de los centros de gravedad de los contrapesos a sus puntos de suspensión, y

D la distancia del espejo de cada balanza a la placa fotográfica.

Todas estas cantidades se expresan en el sistema C. G. S. (centímetros, gramos, segundos).

A su vez, las cuatro magnitudes U_z, U_{yz}, U_Δ y U_{xy} y que se determinan con la balanza se calculan con la aproximación de 1×10^{-9} C. G. S. Esta unidad se denomina *Eötvös*, en recuerdo del inventor del aparato.

4. Ejemplo práctico.— Adjunta reproducimos una placa (fig. 34)

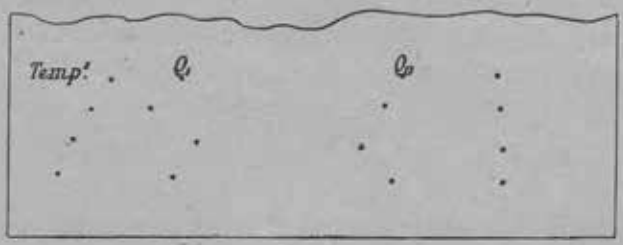


Fig. 34.

obtenida con la balanza Q del Instituto Geográfico, convenientemente instalada dentro de su caseta desmontable. Traducidas las distancias n, n' sobre la placa con una escala Fuess, se dispuso el cálculo como sigue:

Estado I

HORA	POSICIÓN	BALANZA Q_I					BALANZA Q_{II}					TEMPERATURAS	
		Unidades	n_0	Δ_1	Δ_2	Δ_3	Unidades	n'_0	Δ'_1	Δ'_2	Δ'_3	Unidades	Grados
1,10	1	100,0	(100,8)	— 0,8			31,6	(34,1)	— 2,5			126,6	10,0
2,10	2	95,0	100,7		— 5,7		38,9	34,1		+ 4,8		125,3	9,35
3,10	3	107,0	101,0			+ 6,0	31,9	34,1			— 2,2	124,2	8,80
4,10	1	100,9	(100,3)	+ 0,1			31,5	(34,1)	— 2,6			123,5	8,45

$$-0,3-5,7+6,0 \qquad -2,6+4,8-2,2$$

$$\Delta_1+\Delta_2+\Delta_3=0 \qquad \Delta'_1+\Delta'_2+\Delta'_3=0$$

$$\left.\begin{aligned}\Delta_2-\Delta_3&=-11,7\\ \Delta'_2-\Delta'_3&=+\ 7,0\end{aligned}\right\}\ \Delta_2+\Delta_3=+0,3 \qquad \left.\begin{aligned}\Delta'_2+\Delta'_3&=+2,6\end{aligned}\right\}$$

$$\Delta_2-\Delta_3-(\Delta'_2-\Delta'_3)=-18,7 \qquad -2,3=\Delta_2+\Delta_3-(\Delta'_2+\Delta'_3)$$

$$\Delta_2-\Delta_3+(\Delta'_2-\Delta'_3)=-\ 4,7 \qquad +2,9=\Delta_2+\Delta_3+(\Delta'_2+\Delta'_3)$$

$$\Delta_2-\Delta_3-(\Delta'_2-\Delta'_3)\times\ 1,31=-24,5\times10^{-9}=U_{xz}$$

$$\Delta_2+\Delta_3-(\Delta'_2+\Delta'_3)\times\ 2,27=-\ 5,2\times10^{-9}=U_{yz}$$

$$\Delta_2-\Delta_3+(\Delta'_2-\Delta'_3)\times-3,83=+18,0\times10^{-9}=U$$

$$\Delta_2+\Delta_3+(\Delta'_2+\Delta'_3)\times-3,32=-\ 9,6\times10^{-9}=U$$

Para deducir estos valores de las U se ha prescindido de corregir las distancias n y n' de la variación que experimentan por la variación de temperatura durante el funcionamiento de la balanza; ordinariamente, y para cambios bruscos de temperatura, puede prescindirse de esta corrección. Conviene, sin embargo, indicar la manera de calcular dicha influencia de la temperatura para cuando convenga tenerla en cuenta.

Los valores de n y n' en cada posición se reducen a la temperatura inicial. Para esto hay que tener en cuenta que por cada grado de aumento o disminución que experimenta en su temperatura la placa bimetálica, el punto marcado por el espejo correspondiente se corre una división a la izquierda o a la derecha de su posición inicial, 180, sobre la escala. Se puede, pues, establecer la equivalencia siguiente:

1.° 1 división escala o 2 unidades.

Por otra parte, los coeficientes térmicos para los alambres de torsión montados en el aparato son:

Balanza $Q_I = -0{,}52$ unidades; balanza $Q_{II} = -0{,}48$ unidades.

Estos coeficientes indican la corrección de las n y n' por variación de 1° en la temperatura.

En la experiencia antes mencionada puede observarse que los puntos sucesivos de temperaturas correspondientes a cada hora no están en la misma vertical, sino que se inclinan hacia la derecha, indicando una disminución sucesiva de temperatura. Para la reducción a la temperatura inicial, o sea la correspondiente a los puntos señalados en la primera hora, que en dicho día fué de 10° C., se procede como sigue:

Estado II

TEMPERATURAS		BALANZA Q_I						BALANZA Q_{II}					
Unidades	Grados	Unidades	Corregidas	n_0	Δ_1	Δ_2	Δ_3	Unidades	Corregidas	n'_0	Δ'_1	Δ'_2	Δ'_3
126,6	10°,00	100,0	100,0	(100,4)	— 0,4			31,6	31,6	(33,7)	— 2,1		
125,3	9 ,35	95,0	94,7	100,4		— 5,7		38,9	38,6	33,8		+ 4,8	
124,2	8 ,80	107,0	106,4	100,4			+ 6,0	31,9	31,3	33,6			— 2,3
123,5	8 ,45	109,0	100,1	(100,4)	— 0,3			31,5	30,8	(33,7)	— 2,9		
					— 0,3	— 5,7	+ 6,0				— 2,5	+ 4,8	— 2,3
					$\Delta_1 + \Delta_2 + \Delta_3 = 0$						$\Delta'_1 + \Delta'_2 + \Delta'_3 = 0$		

La primera columna del estado indica las distancias en la placa de los puntos señalados por el espejo-termómetro a los puntos de referencia del espejo fijo.

La segunda columna se deduce estableciendo las siguientes proporciones:

$$\left.\begin{array}{l}\text{Si a 2 unidades corresponde 1° de variación, a}\\ \text{1,3 unidades} = \text{126,6-125,3 corresponderá } x\end{array}\right\} x = 0°,65,$$

luego la temperatura correspondiente será $10° - 0°,65$ o sea 9°, 35.

Análogamente se tendrá para la III y la I posición repetida:

$$\left.\begin{array}{l}\text{2 unidades.....} \quad 1°\\ \text{1,1.....} \quad x\end{array}\right\} x = -0°,55 \qquad \left.\begin{array}{l}\text{2 unidades.....} \quad 1°\\ \text{0,7.....} \quad x\end{array}\right\} x = -0°,35.$$

Teniendo ahora en cuenta los valores de los coeficientes térmicos se establecerán otra serie de nuevas proporciones:

$$\begin{matrix} 0^u,52 \ldots\ldots & 1^\circ \\ x \ldots\ldots & 0^\circ,65 \end{matrix} \Big\} x = -0^u,34 \qquad \begin{matrix} -0^u,48 \ldots\ldots & 1^\circ \\ x \ldots\ldots & 0^\circ,65 \end{matrix} \Big\} x = -0^u,31,$$

que son las cantidades en que hay que corregir las distancias 95,0 y 38,9 deducidas para las dos balanzas en la posición II.

Análogamente para 8°,80 y 8°,45, las correcciones serán, respectivamente:

$$\begin{matrix} \text{Balanza } Q_I \ldots\ldots & -0,62 \\ \text{Balanza } Q_{II} \ldots\ldots & -0,58 \end{matrix} \Big\} \qquad \begin{matrix} \text{Balanza } Q_I \ldots\ldots & -0,81 \\ \text{Balanza } Q_{II} \ldots\ldots & -0,74 \end{matrix}$$

Aplicando estas correcciones se obtienen las columnas encabezadas con la palabra «Corregidas» del estado II. El cálculo se prosigue después del mismo modo que en el estado I, pudiendo apreciarse que en este caso se obtienen los mismos valores para las Δ y Δ', se tenga en cuenta o no la temperatura.

5. Cálculo de la acción del terreno.— Con los valores de las U así deducidos con auxilio de la balanza podrían calcularse el gradiente gravífico, radio de curvatura, etc., que corresponden al sitio de observación, pero las magnitudes gravíficas que así se dedujesen no interesan al geodesta, toda vez que son perturbadas por la acción de las masas próximas a la estación. Precisa, pues, calcular dicha influencia que Eötvös denomina *acción del terreno*. Llamando *valor total* de las U el que resulta de las observaciones y en el que se reflejan todas las acciones, se denomina *valor topográfico* el que resulta de restar del valor total la acción del terreno.

Para el cálculo de dicha acción hay necesidad de efectuar en cada estación una serie de nivelaciones radiales en ocho direcciones, colocando la mira en círculos que distan 5, 20, 50 y 100 metros de la estación, como se indica en la figura 35. En la práctica, una vez orientada la plantilla que fija la separación de las estacas en cada estación, se clava a cinco metros del centro de dicha plantilla, y en la dirección Norte, un piquete, a partir del cual se empieza la nivelación.

Para ello se quita la plantilla colocando en su lugar un teodolito y anotando la altura del aparato. Sucesivamente se sitúa la mira en los puntos 1, 2, 3, 4, 5, 6, 7 y 8 de cada círculo. Las diferencias de altura de los puntos 1, 2, 3 ..... 8 respecto a la estación, se designan con las letras ξ_1, ξ_2, ξ_3, ξ_4 ..... ξ_8, que se consideran positivas cuando el terreno es más alto que la estación, y negativas en caso contrario. Se necesita llevar dos cuadros en cada estación, de esta forma:

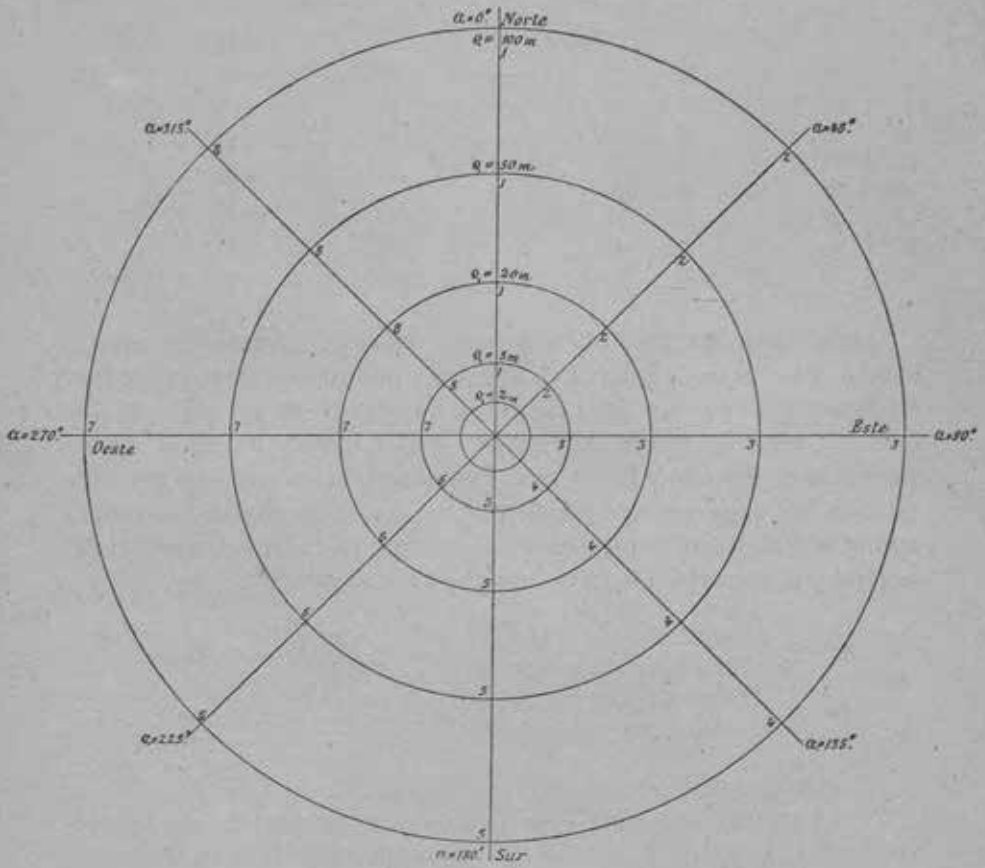

α=0° Norte
Q= 100m
α=315°
α=45°
Q= 50m.
Q= 20m.
Q= 5m
Q= 2m
α=270°
Oeste
Este
α=90°
α=225°
α=135°
α=180° Sur

Fig. 35.

Cuadro I

ALTURA. TEODOLITO = 55 cm.				
	LECTURAS DE MIRA			
	$\rho = 5$ m.	$\rho = 20$	$\rho = 50$	$\rho = 100$
0°	68	41	22	33
45°	80	43	46	27
90°	25	52	38	44
135°	23	68	56	57
180°	24	33	58	59
225°	25	45	70	33
270°	40	66	68	45
315°	52	70	44	63

Cuadro II

	Azimut	$\rho = 5$ m.	$\rho = 20$	$\rho = 50$	$\rho = 100$
		cm.			
ξ_1	0°	— 13	+ 14	+ 33	+ 22
ξ_2	45°	— 25	+ 12	+ 9	+ 28
ξ_3	90°	+ 30	+ 3	+ 17	+ 11
ξ_4	135°	+ 32	— 13	— 1	— 2
ξ_5	180°	+ 31	+ 22	— 3	— 4
ξ_6	225°	+ 31	+ 10	— 15	+ 26
ξ_7	270°	+ 15	— 11	— 13	+ 10
ξ_8	315°	+ 3	— 15	+ 11	— 8

En las fórmulas que Eötvös da para calcular la acción del terreno figuran, además de la ξ, las cantidades ε y $\varkappa$ que representan: inclinación en dirección Norte-Sur de la superficie de terreno en un radio de dos metros a partir del punto de estación, y $\varkappa$ la inclinación de la misma superficie en dirección Este-Oeste. Prácticamente se deducen en cada estación los valores correspondientes de ε y $\varkappa$, apoyando horizontalmente la mira sobre la plancha de aluminio y midiendo el desnivel del terreno con respecto a la mira, como indica la figura 36.

$$N - S \begin{cases} 2 \text{ m.} \ldots\ldots & 7 \text{ cm.} \\ 2 \text{ m.} \ldots\ldots & 0 \text{ cm.} \end{cases} \quad \operatorname{tg} \varepsilon = -\frac{7}{400} \quad \varepsilon = -1^{\circ},00$$

$$E - W \begin{cases} 2 \text{ m.} \ldots\ldots & 5 \text{ cm.} \\ 2 \text{ m.} \ldots\ldots & 11 \text{ cm.} \end{cases} \quad \operatorname{tg} \varkappa = \frac{11 - 5}{400} \quad \varkappa = +\,51' - 30''$$

Los valores de ξ y k no deben exceder de 1°.

Las fórmulas propuestas por Eötvös para terrenos donde la pendiente no exceda de 7° a 8°, y que aparecen publicadas en la pág. 24 de su folleto *Bestimung der Gradienten der Schwerkraft und ihrer Niveauflächen mit hülfe der Drehwage*, fueron ligeramente modificadas por el profesor Schweydar. Son como siguen:

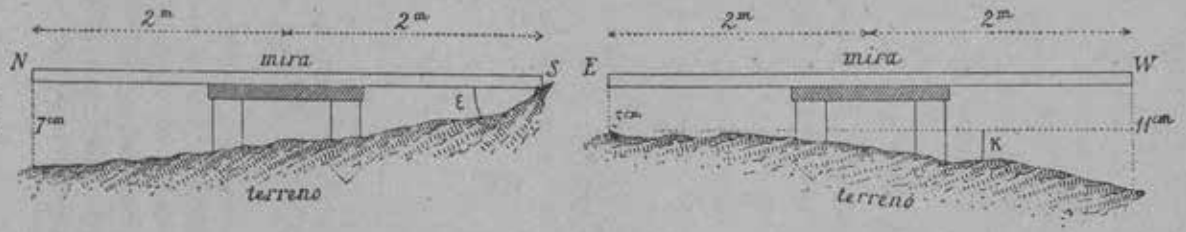


Fig. 36.

$$
\begin{aligned}
U'_{xz} \times 10^{+9} = \frac{\sigma}{1{,}8}\,[\,&5{,}79\,\varepsilon^0 + \{0{,}0379\,\varepsilon\,(\xi_1+\xi_5) + 0{,}0061\,\varepsilon\,(\xi_3+\xi_7) + \\
&+\ 0{,}0221\,\varepsilon\,(\xi_2+\xi_4+\xi_6+\xi_8) + 0{,}016\,k\,(\xi_2+\xi_6-\xi_4-\xi_8)\}_{\rho=5\text{ m.}} \\
&+ \{0{,}1305\ (\xi_1-\xi_5) + 0{,}0922\ (\xi_2+\xi_8-\xi_4-\xi_6)\}_{\rho=5\text{ m.}} \\
&+ \{0{,}0117\ (\xi_1-\xi_5) + 0{,}0083\ (\xi_2+\xi_8-\xi_4-\xi_6)\}_{\rho=20\text{ m.}} \\
&+ \{0{,}0011\ (\xi_1-\xi_5) + 0{,}00077\,(\xi_2+\xi_8-\xi_4-\xi_6)\}_{\rho=50\text{ m.}} \\
&+ \{0{,}00028\,(\xi_1-\xi_5) + 0{,}00020\,(\xi_2+\xi_8-\xi_4-\xi_6)\}_{\rho=100\text{ m.}}\,]
\end{aligned}
$$

$$
\begin{aligned}
U'_{yz} \times 10^{+9} = \frac{\sigma}{1{,}8}\,[\,&5{,}79\,k^0 + \{0{,}0379\,k\,(\xi_3+\xi_7) + 0{,}0061\,k\,(\xi_1+\xi_5) + \\
&+\ 0{,}0221\,k\,(\xi_2+\xi_4+\xi_6+\xi_8) + 0{,}016\,\varepsilon\,(\xi_2+\xi_6-\xi_4-\xi_8)\}_{\rho=5\text{ m.}} \\
&+ \{0{,}1305\ (\xi_3-\xi_7) + 0{,}0922\ (\xi_2+\xi_4-\xi_6-\xi_8)\}_{\rho=5\text{ m.}} \\
&+ \{0{,}0117\ (\xi_3-\xi_7) + 0{,}0083\ (\xi_2+\xi_4-\xi_6-\xi_8)\}_{\rho=20\text{ m.}} \\
&+ \{0{,}0011\ (\xi_3-\xi_7) + 0{,}00077\,(\xi_2+\xi_4-\xi_6-\xi_8)\}_{\rho=50\text{ m.}} \\
&+ \{0{,}00028\,(\xi_3-\xi_7) + 0{,}00020\,(\xi_2+\xi_4-\xi_6-\xi_8)\}_{\rho=100\text{ m.}}\,]
\end{aligned}
$$

[17]

$$
\begin{aligned}
U'_{\Delta} \times 10^{+9} = &-0{,}4826\ (\xi_1-\xi_3+\xi_5-\xi_7)_{\rho=5\text{ m.}} \\
&-0{,}0819\ (\xi_1-\xi_3+\xi_5-\xi_7)_{\rho=20\text{ m.}} \\
&-0{,}0318\ (\xi_1-\xi_3+\xi_5-\xi_7)_{\rho=50\text{ m.}} \\
&-0{,}0308\ (\xi_1-\xi_3+\xi_5-\xi_7)_{\rho=100\text{ m.}} \\
&-0{,}00403\,(\xi_1-\xi_3+\xi_5-\xi_7)_{\rho=1.000\text{ m.}}
\end{aligned}
$$

$$
\begin{aligned}
2U'_{xy} \times 10^{+9} = &+2413\ \ (\xi_2-\xi_4+\xi_6-\xi_8)_{\rho=5\text{ m.}} \\
&+0{,}0410\ (\xi_2-\xi_4+\xi_6-\xi_8)_{\rho=20\text{ m.}} \\
&+0{,}0159\ (\xi_2-\xi_4+\xi_6-\xi_8)_{\rho=50\text{ m.}} \\
&+0{,}0154\ (\xi_2-\xi_4+\xi_6-\xi_8)_{\rho=100\text{ m.}} \\
&+0{,}0021\ (\xi_2-\xi_4+\xi_6-\xi_8)_{\rho=1.000\text{ m.}}
\end{aligned}
$$

En estas fórmulas representa ρ la densidad del terreno deducida del examen de rocas, arenas, etc., que aparecen en la superficie. Puede deducirse el valor de ρ consultando las tablas de Gauss.

6. Gradiente máximo horizontal, determinación del Δg y deducción del valor de la gravedad. — Supongamos que aplicadas las fórmulas a una estación determinada se obtienen los siguientes valores:

$$
\left.\begin{aligned} U'_{xz} &= -28{,}2 \\ U'_{yz} &= -\ 2{,}2 \end{aligned}\right\rangle\ U'_{\Delta} = -3{,}5 \qquad U'_{xy} = -6{,}7
$$

Sean las U que corresponden a la misma:

$$U_{xz} = -24{,}5 \quad U_{\Delta} = +18$$
$$U_{yz} = -\ 5{,}2 \quad U_{xy} = -\ 9{,}6$$

Restando las U' de las U se obtienen los siguientes *valores topográficos*:

$$U_{xz} - U'_{xz} = +\ 3{,}7$$
$$U_{yz} - U'_{yz} = -\ 3{,}0$$
$$U_{\Delta} - U'_{\Delta} = +21{,}5$$
$$U_{xy} - U'_{xy} = -\ 2{,}9$$

Con estos valores topográficos se representa gráficamente el gradiente. Como escala para el mismo se adopta 1 mm. $= 1 \cdot 10^{-9}$, con lo cual los valores de $U_{xz} = \frac{dg}{dx}$ y de $U_{yz} = \frac{dg}{dy}$ se pueden construir con una regla graduada en milímetros. En el ejemplo que consideramos, el gradiente estará representado en magnitud y dirección por la flecha dibujada en la figura 37. Numéricamente vale $\sqrt{3{,}7^2 + 3^2}$ y se denomina, como dijimos, *gradiente máximo horizontal*.

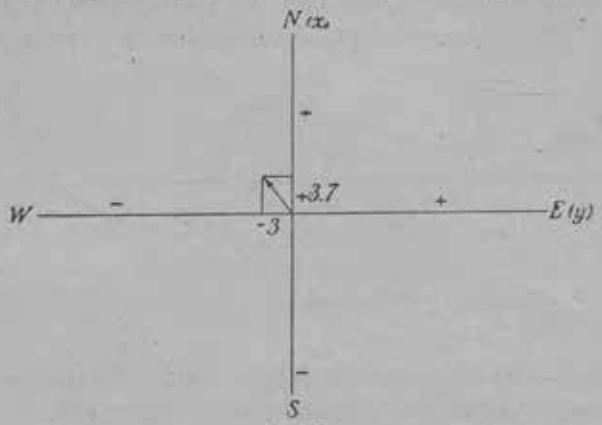


Fig. 37.

Estos gradientes máximos, deducidos en cada estación, nos permiten calcular, *subconditione*, el valor de g en cada una, partiendo de una estación donde se haya determinado previamente la gravedad por observaciones pendulares.

En teoría es evidente que si se determinase el gradiente para cada uno de los puntos de una superficie de nivel, las diferencias de la gra-

vedad Δg de uno a otro punto, cantidades de naturaleza finita, se calcularían por integración. Como no es humanamente posible estacionar con la balanza en todos y cada uno de los puntos de una superficie de nivel, dichas diferencias Δg sólo cabe calcularlas aproximadamente cuando estén lo suficientemente próximas una de otra las estaciones, para que el gradiente entre dos consecutivas pueda considerarse como función lineal de las coordenadas. El Δg entre dos estaciones consecutivas será igual entonces al producto de la semisuma de las proyecciones de los gradientes en dichas estaciones sobre la recta que las une por la distancia entre ambas.

Supongamos, por ejemplo, que partimos de Madrid, donde g es conocido, y determinamos una serie de estaciones 1, 2, etc., con la balanza (fig. 38). Como no se puede estacionar con este aparato en el

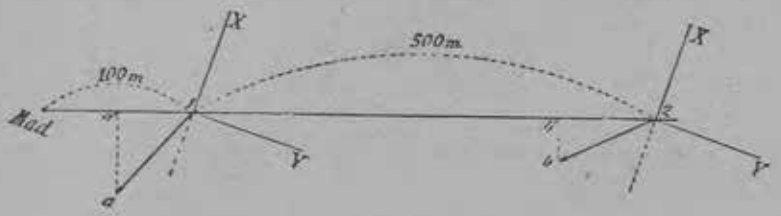


Fig. 38.

mismo local del péndulo, pues su empleo exige alejarse de todo edificio, la primera estación de la balanza estará a una cierta distancia de la pendular, aceptando para ésta el valor del gradiente en aquélla. Unamos con una recta las estaciones 1 y 2 y proyectemos con una escuadra los extremos de los gradientes a y b sobre aquélla. Los valores de las proyecciones $1—a'$ y $2—b'$ se determinan con la misma regla de milímetros que sirve para dibujar los gradientes máximos. Sean $1—a' = -18$ y $2—b' = -22$. Admitamos para la estación 3 el valor $3—c' = -35$. Tendremos entonces:

	S = distancia	Gradientes	Valor medio	Δg
Estación..... 1 ⟶ 2	500 m.	− 18 − 22	− 20	− 0,001
Idem..... 2 ⟶ 3	500 m.	− 22 − 35	− 28	− 0,001

Δg entre las estaciones 1 y 2 se obtiene multiplicando el valor medio de los gradientes en 1 y 2 por la distancia en centímetros. $\Delta g = -20 \cdot 10^{-9} \times 50.000$ centímetros $= -10^{-3} = -0{,}001$ cm./seg. Análogamente se deduce Δg entre 2 y 3.

Deducidos los Δg se pueden calcular las g. La fórmula corrrespondiente es:

$$g_{est.\,1} = g_{Mad.} + s^{cm.}_{Mad.\,1} \times \text{grad}_{est.\,1} + \Delta h_{cm.} \times \frac{dg}{dz} \qquad [18]$$

en la que g es la gravedad observada;
s representa la distancia entre Madrid y la estación 1;
Δh es la diferencia de altura entre Madrid y la estación 1 y $\frac{dg}{dz} = 3086 \cdot 10^{-9}$.

Para la estación 2, la fórmula es:

$$g_{est\,2} = g_{est\,1} + {}^1/_2(\text{grad}_{est\,1} + \text{grad}_{est\,2}) \times s_{1\,.\,2} + \Delta h_{1\,.\,2} \times \frac{dg}{dz}, \qquad [19]$$

en la que $s_{1\,.\,2}$ indica la distancia entre las estaciones 1 y 2 y $\Delta h_{1\,.\,2}$ al diferencia de alturas entre ambas estaciones.

Ejemplo: Considerando las tres estaciones sucesivas (fig. 39) Ma-

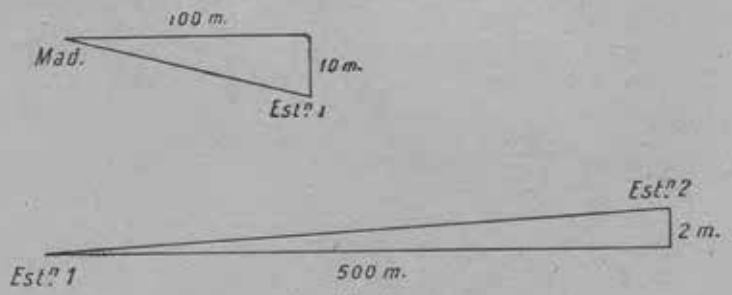


Fig. 39.

drid (pendular) y las 1 y 2 con la balanza, cuyos perfiles longitudinales se representan adjuntos con los valores de los gradientes que quedan consignados más arriba, se calcularán las g como sigue:

$$g_{est\,1} = 979{,}981\ (g\ \text{Madrid}) + 10000^{cm} \times -18 - 9 + 1000^{cm} \times \times 3086 \cdot 10 - 9 = 979{,}984;$$

$$g_{est\,2} = 979{,}984 - 0^{cm}{,}001\ (\Delta g) - 200 \times 3086 \cdot 10 - \quad 979{,}982.$$

La distancia normal entre dos estaciones es de unos 500 a 1.500 metros. Cuando se trate de ligar por medio de las observaciones con la balanza dos puntos en los que se haya determinado g con el péndulo, aconseja Schweydar cerciorarse en las primeras estaciones del paralelismo de los gradientes, mediante estaciones repetidas con intervalos de 50 a 100 metros. Si resultase dicho paralelismo partiendo de una primera estación doble, se efectuará la siguiente, también doble, a 500 metros de la primera y se calcula el resultado. Si siguiesen paralelos los gradientes puede ya seguirse con estaciones sencillas a la distancia corriente. Pero si en la estación resultase un gradiente en la dirección a y el otro en la b (fig. 40), debe buscarse un terreno mejor para operar

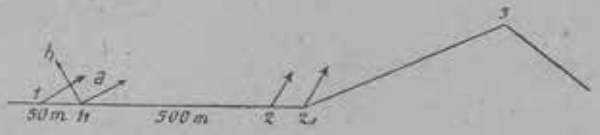


Fig. 40.

con la balanza. Supongamos que se conozca el valor de la gravedad en las estaciones A y B (fig. 41) que se ligan entre sí por seis estaciones de

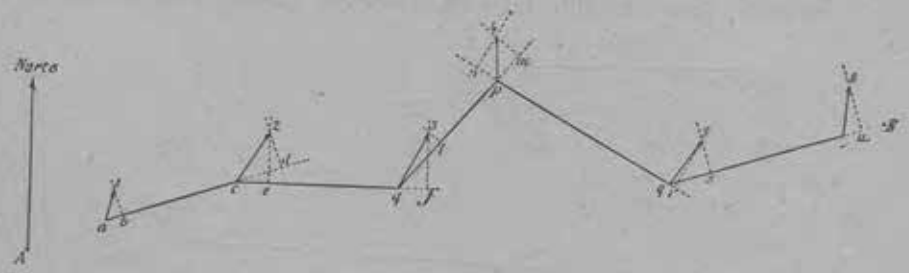


Fig. 41.

balanza. Sean a 1, c 2, g 3, p 4, q 5 y t 6 los valores topográficos de los gradientes máximos.

Las proyecciones de estos gradientes sobre la recta que une cada dos estaciones consecutivas son:

para las estaciones a y c $\begin{cases} ab \rightarrow \\ cd \rightarrow \end{cases}$; para las c y g $\begin{cases} ce \rightarrow \\ gf \rightarrow \end{cases}$; para las g y p $\begin{cases} ge \rightarrow \\ pm \rightarrow \end{cases}$,

y para las q y t $\begin{cases} qs \rightarrow \\ tu \rightarrow \end{cases}$.

Con estas proyecciones, así tomadas, se calculan los Δg.

El valor que se deduzca para B, como consecuencia de las observaciones con la balanza, debe ser igual al que dé para B la observación pendular. Generalmente, habrá una diferencia entre los dos valores, debido a la acumulación de errores. Cuando se trate de una diferencia o error admisible se repartirá por igual entre los Δg, lo mismo que en una nivelación.

Se puede seguir también el procedimiento de cálculo, desde luego más exacto que el gráfico, para deducir los valores de los Δg.

La dirección del gradiente gravimétrico respecto al meridiano astronómico, se deduce de la fórmula

$$\operatorname{tang} \omega = \frac{U_{yz} - U'_{yz}}{U_{xz} - U'_{xz}}, \qquad [20]$$

resultando determinado el cuadrante de ω por las relaciones

$$\cos \omega = \frac{U_{xz} - U'_{xz}}{G_m} \quad \text{y} \quad \operatorname{sen} \omega = \frac{U_{yz} - U'_{yz}}{G_m}, \qquad [21]$$

en las que G_m indica el gradiente máximo horizontal, determinado, como antes se dijo, por la fórmula

$$G_m = \sqrt{(U_{xz} - U'_{xz})^2 + (U_{yz} - U'_{yz})^2}. \qquad [22]$$

El valor del Δg o diferencia de la gravedad en sentido vertical entre dos estaciones sucesivas A y B, se obtiene por la expresión

$$\Delta g = g_B - g_A = \frac{d}{2}\left[\left\{(U_{xz} - U'_{xz})_B + (U_{xz} - U'_{xz})_A\right\}\cos\theta + \left\{(U_{yz} - U'_{yz})_B + (U_{yz} - U'_{yz})_A\right\}\operatorname{sen}\theta\right], \qquad [23]$$

en la que A denota la estación origen, d la distancia en centímetros entre A y B y θ el azimut del lado AB en A, contado a partir del meridiano astronómico.

La condición deducida como necesaria para que puedan averiguarse los Δg, limita el campo de esta aplicación geodésica en una región determinada, pues precisa que su constitución geológica sea lo suficiente-

mente uniforme a lo largo del itinerario determinado por las estaciones sucesivas con la balanza, para que los gradientes varíen proporcionalmente a las coordenadas entre estación y estación. El barón von Eötvös sacó mucho partido de su aparato en Hungría, a causa de las excepcionales condiciones favorables de la llanura en que principalmente operó.

7. Representación gráfica de las magnitudes.

$$\frac{d^2U}{dy^2} - \frac{d^2U}{dx^2} \text{ y } \frac{d^2U}{dxdy}.$$

Si ρ_1 y ρ_2 designan, respectivamente, el menor y mayor de los radios principales de curvatura y establecemos la relación

$$g\left(\frac{1}{\rho_1} - \frac{1}{\rho_2}\right) = R,$$

en la que R es una cantidad siempre positiva, resultará:

$$\left.\begin{aligned} \frac{d^2U}{dy^2} - \frac{d^2U}{dx^2} &= -R\cos 2\lambda \\ \frac{d^2U}{dxdy} &= \frac{1}{2}R\,\text{sen}\,2\lambda \end{aligned}\right\} \quad [24]$$

en la que λ es el ángulo que forma con el meridiano el plano normal correspondiente al radio ρ_2.

De estas dos ecuaciones se deducirán los valores de R y λ. Calculados los valores de R' y λ', correspondientes a la acción del terreno por medio de las U'_Δ y U'_{xy} dados por las fórmulas [17] deduciremos los valores topográficos de estas dos magnitudes que se prestan bien para una interpretación gráfica que dé una imagen clara de los términos de curvatura.

8. Acción cartográfica y normal. — Para las aplicaciones de carácter geofísico de la balanza no bastan los valores topográficos. Precisa deducir de éstos los valores correspondientes a la acción que ejercen las elevaciones y depresiones del terreno, no ya próximas a la estación sino a mayores distancias de ésta, y que exigen para su determinación el conocimiento cartográfico, razón por la que se denominan *valores cartográficos.*

Estos valores se deducen por fórmulas que inserta Eötvös en su citada obra *Bestimmung der Gradienten der Schwerkraft und ihrer Niveauflächen mit Hülfe der Drehwage,* dividiendo el terreno en seg-

mentos radiales como en el cálculo de la acción del terreno próximo, explicado anteriormente, sólo que a distancias mucho mayores. Se necesitan utilizar mapas con curvas de nivel en diferentes escalas; de mayor escala para distancias más próximas a la estación, y de menor escala para distancias mayores. Así, por ejemplo, Eötvös utilizó en sus observaciones en la llanura de Hungría los siguientes mapas: 1:25.000 para distancias menores de 12 kilómetros, 1:75.000 hasta 30 kilómetros y 1:900.000 para las distancias superiores a 30 kilómetros. Las equidistancias de las curvas de nivel correspondientes a esos mapas eran, respectivamente, de 40, 100 y 400 metros. El número de segmentos considerados fué el de 36. Las fórmulas aplicadas son:

$$\left.\begin{aligned}
\frac{d^2U}{dy^2} - \frac{d^2U}{dx^2} &= -3G\sigma\xi \times \frac{d\rho \cos 2\alpha\, d\alpha}{\rho^2} \\
\frac{d^2U}{dxdy} &= +\frac{3}{2} G\sigma\xi \times \frac{d\rho \operatorname{sen} 2\alpha\, d\alpha}{\rho^2} \\
\frac{d^2U}{dxdz} &= -\frac{3}{2} G\sigma\xi^2 \times \frac{d\rho \cos\alpha d\alpha}{\rho^3} \\
\frac{d^2U}{dxdz} &= -\frac{3}{2} G\sigma\xi^2 \times \frac{d\rho \operatorname{sen}\alpha d\alpha}{\rho^3}
\end{aligned}\right\} . \qquad [25]$$

En estas fórmulas representan: G, la constante de gravitación, igual a 66×10^{-9}; σ, la densidad de la masa perturbadora; ξ, la altura de la misma sobre el plano horizontal que pasa por el pie de la balanza, considerada positiva hacia arriba; ρ, la distancia horizontal del punto de estación al centro del segmento considerado; α, el ángulo que la recta que une la estación con el centro del segmento forma con el eje de las x, dirigido hacia el Norte; $d\alpha$, la amplitud angular de la masa comprendida dentro de un segmento, y $d\rho$, la longitud de la misma masa.

La acción cartográfica ejerce poca influencia sobre el gradiente, siendo mayor su influjo sobre las magnitudes

$$\frac{d^2U}{dy^2} - \frac{d^2U}{dx^2} \text{ y } \frac{d^2U}{dxdy} .$$

Calculando para el elipsoide de Bessel, por medio de la fórmula debida a Helmert, los valores de la acción normal, valores que presenta Eötvös tabulados para las diversas magnitudes gravíficas en su obra antes mencionada, correspondientes a diversos valores de la latitud,

tendremos elementos suficientes para calcular las siguientes *perturbaciones:*

Perturbación total igual a la diferencia entre el *valor total* deducido directamente por la observación y el *valor normal.*

Perturbaión topográfica igual a la diferencia entre el *valor topográfico* y *valor normal.*

Perturbación subterránea o diferencia entre la *perturbación topográfica* y el *valor cartográfico.* Es decir: que el valor de la perturbación subterránea, refiriéndonos al gradiente, se obtiene restando del valor proporcionado directamente por la balanza los siguientes factores: acción terreno, acción cartográfica y acción normal.

Si nos fuesen conocidas la densidad, forma, extensión y profundidad de una masa perturbadora en un cierto lugar de la Tierra, se podría, desde luego, calcular la perturbación de la gravedad sobre la superficie terrestre. Pero la recíproca no es tan fácil de resolver. De la diferencia entre el valor observado de la gravedad en un punto y su valor teórico o de las diferencias de las fuerzas de la gravedad en varios puntos, no se pueden sacar conclusiones definitivas sobre las masas perturbadoras por entrar en función cuatro factores: la diferencia de densidad, la forma, la extensión y la profundidad. Sin embargo, en casos determinados, puede ser de gran valor el conocimiento de las perturbaciones de la gravedad cuando, por ejemplo, la geología general de un trozo de territorio sea conocida y se trate de averiguar los límites o forma de las masas perturbadoras que están en íntima relación con las magnitudes que proporciona la balanza. Así, ésta es apropiada para indicar pliegues de estratos rocosos bajo los aluviones de una llanura y los límites de acumulaciones de determinadas masas, como sal y filones metálicos. Una principal ventaja de la balanza radica en que por medio de la dirección del máximo gradiente horizontal señala el camino para encontrar y estudiar cualquier perturbacion que exista, aunque siempre será misión del geólogo el traducir los resultados de las mediciones con la balanza.

Si en una región determinada se han efectuado un número crecido de observaciones con la balanza y se han deducido los valores de los Δg, tomados todos ellos con respecto a una estación de origen donde se conozca el valor de g por observación pendular, se podrán unir por una línea continua las estaciones en que sea igual el valor de g deducido de los Δg. Las curvas que así resultan se denominan *isóga-*

mas. Si los Δg están calculados con los valores de las perturbaciones subterráneas del gradiente, se obtendrán, al trazar las curvas, las *isógamas de las perturbaciones subterráneas*, que pueden dar indicaciones acerca del nivel de las masas rocosas subterráneas, en la hipótesis de ser éstas más densas que el terreno que las rodea.

La fórmula que empleó Eötvös para este fin es

$$\Delta g = 2\pi G (\sigma' - \sigma) h, \qquad [26]$$

en la que G es la constante de gravitación; σ', la densidad de la masa rocosa; σ, la del terreno circundante, y h la profundidad buscada.

Hagamos aplicación de la anterior fórmula a un caso concreto, al de la llanura húngara en la región de Arad, estudiada por Eötvös, que aparece limitada en su parte oriental por una cadena montañosa. La dirección de los gradientes en las proximidades de ésta hacia el borde de la cadena demostró que en dicha dirección había una masa subterránea más densa que el terreno aluvial que constituye la llanura, o sea que la masa rocosa de la montaña se prolonga con cierta pendiente por debajo de la superficie. Admitiendo para la capa aluvial la densidad $\sigma = 2{,}0$ y para la masa rocosa $\sigma' = 2{,}7$, la fórmula [**26**] nos dice que para un decremento Δg de la gravedad de 0,001 C. G. S., la profundidad será de 38 metros. Si las isógamas están trazadas de 0,002 en 0,002 C. G. S., como lo están en la región de Arad, dichas líneas pueden asimilarse a curvas de nivel cuya equidistancia sea de 76 metros y pueden dar idea del nivel subterráneo de la masa perturbadora.

La balanza puede ser prácticamente útil cuando al Ingeniero de Minas le interese conocer los límites de una masa subterránea, como la de un yacimiento de sal, por ejemplo, que hasta ahora sólo podían determinarse por medio de barrenados costosos. Suponiendo en un distrito determinado limitada una masa perturbadora, de naturaleza desconocida, por medio de la dirección y magnitud de los gradientes, bastará un solo taladro para conocer su naturaleza.

9. Relación entre las anomalías de la gravedad y las del magnetismo terrestre.—Una de las aplicaciones geofísicas de la balanza es el estudio de las zonas donde existen perturbaciones magnéticas. Está comprobado que éstas pueden ser debidas, aun en grandes extensiones de terreno, a la presencia de masas de rocas magnéticas. Ahora bien; la fuerza magnética ejercida por una masa es proporcional al gradiente de la fuerza atractiva de la misma. El barón von Eötvös

publicó en su Memoria sobre la balanza presentada al Congreso Internacional de Geodesia, de 1906, las fórmulas que ligan las componentes de la fuerza magnética con las segundas derivadas del potencial atractivo proporcionadas por la balanza.

Representando por X, Y, Z las componentes de la fuerza magnética que produce una masa, por α, β, γ sus componentes de magnetización que se suponen constantes, por U el potencial atractivo, por σ la densidad y por G la constante de gravitación, estableció Eötvös las siguientes ecuaciones:

$$\left.\begin{aligned} X &= \frac{\alpha}{G\sigma}\frac{d^2U}{dx^2} + \frac{\beta}{G\sigma}\frac{d^2U}{dxdy} + \frac{\gamma}{G\sigma}\frac{d^2U}{dxdz} \\ Y &= \frac{\alpha}{G\sigma}\frac{d^2U}{dxdy} + \frac{\beta}{G\sigma}\frac{d^2U}{dy^2} + \frac{\gamma}{G\sigma}\frac{d^2U}{dydz} \\ Z &= \frac{\alpha}{G\sigma}\frac{d^2U}{dxdz} + \frac{\beta}{G\sigma}\frac{d^2U}{dydz} + \frac{\gamma}{G\sigma}\frac{d^2U}{dz^2} \end{aligned}\right\} \quad [27]$$

Estas ecuaciones sólo pueden aplicarse a espacios infinitamente pequeños de la masa magnética, caso de no ser homogénea la magnetización. Si la masa está encerrada en otra, hay que substituir los valores de α, β, γ y σ por las diferencias correspondientes a ambas clases de masas.

Combinando las ecuaciones anteriores de dos en dos por suma o resta, después de multiplicar sus dos miembros por dos de los coeficientes α, β, 2γ, y teniendo presente la ecuación de Laplace:

$$\frac{d^2U}{dx^2} + \frac{d^2U}{dy^2} + \frac{d^2U}{dz^2} = 0$$

obtendremos el siguiente sistema de ecuaciones:

$$\left.\begin{aligned} X\beta - Y\alpha &= \frac{\alpha\beta}{G\sigma}\left(\frac{d^2U}{dx^2} - \frac{d^2U}{dy^2}\right) + \\ &+ \frac{\beta^2-\alpha^2}{G\sigma}\frac{d^2U}{dxdy} + \frac{\beta\gamma}{G\sigma}\frac{d^2U}{dxdz} - \frac{\alpha\gamma}{G\sigma}\frac{d^2U}{dydz} \\ 2\gamma X + \alpha Z &= \frac{\alpha\gamma}{G}\left(\frac{d^2U}{dx^2} - \frac{d^2U}{dy^2}\right) + \\ &+ \frac{2\beta\gamma}{G\sigma}\frac{d^2U}{dxdy} + \frac{2\gamma^2+\alpha}{G\sigma}\frac{d^2U}{dxdz} + \frac{\alpha\beta}{G\sigma}\frac{d^2U}{dydz} \\ 2\gamma Y + \beta Z &= -\frac{\beta\gamma}{G\sigma}\left(\frac{d^2U}{dx^2} - \frac{d^2U}{dy^2}\right) + \\ &+ \frac{2\gamma\alpha}{G\sigma}\frac{d^2U}{dxdy} + \frac{\alpha\beta}{G\sigma}\frac{d^2U}{dxdz} + \frac{2\gamma^2+\beta^2}{G\sigma}\frac{d^2U}{dydz} \end{aligned}\right\} \quad [28]$$

en las que aparecen ligadas las acciones magnéticas de una masa perturbadora y las segundas derivadas del potencial, que se hallan por medio de la balanza.

Cuando las investigaciones se refieren a líneas magneto-tectónicas, es decir, cuando las masas magnéticas están distribuídas uniformemente en línea recta, por ejemplo, en dirección paralela al eje de las Y o formando escalones, Eötvös reemplaza el anterior sistema de ecuaciones por otro más sencillo, a saber:

$$\left.\begin{aligned} X &= \frac{\alpha}{G\sigma}\frac{d^2U}{dx^2} + \gamma\frac{d^2U}{dxdz} \\ Y &= 0 \\ Z &= -\frac{\gamma}{G\sigma}\frac{d^2U}{dx^2} + \varepsilon\frac{d^2U}{dxdz} \end{aligned}\right\} \qquad [29]$$

Como en este caso $\frac{d^2U}{dy^2} = 0$, se obtendrá directamente con la balanza el valor $\frac{d^2U}{dx^2}$.

Demostrada la proporcionalidad de la fuerza magnética derivada de una masa con el gradiente gravimétrico de la misma, se deduce que presentando éste sus máximas anomalías sobre los bordes de la masa, sobre éstos debe alcanzar también su mayor valor la perturbación magnética, es decir, a lo largo de la línea tectónica, como, por otra parte, del conjunto de muchas observaciones y estudio comparado de las mismas dedujo Naumann.

Teniendo en cuenta las anteriores ecuaciones es posible deducir indicaciones sobre la calidad de las masas subterráneas perturbadoras en estudio.

En las investigaciones de esta índole realizadas en Hungría por el Barón Eötvös y sus auxiliares, en cada estación hecha con la balanza se han determinado además las tres componentes de la fuerza magnética. Los resultados de estos estudios fueron en parte expuestos por Eötvös en el Congreso de la Asociación Geodésica Internacional de 1909.

Como consecuencia de aquéllos puede afirmarse que en las zonas de perturbación que se extienden longitudinalmente, resultan sensiblemente paralelas las fuerzas magnéticas horizontales que la originan y la dirección del gradiente gravífico deducido. Pueden presentarse tres clases de paralelismo:

1.ª Las fuerzas magnéticas y el gradiente gravífico son paralelos y siempre dirigidos en el mismo sentido.

2.ª Las fuerzas magnéticas y el gradiente son paralelos y siempre dirigidos en sentido contrario.

3.ª Continuando paralelas las fuerzas y el gradiente, las primeras están unas veces dirigidas en el mismo sentido y otras en sentido contrario del gradiente. Estos tres casos están representados en las figuras 42, 43 y 44, en las que están dibujadas con flechas de línea llena las anomalías magnéticas horizontales y con flechas de trazos las perturbaciones subterráneas del gradiente.

Admitiendo la existencia de una roca magnética cuya influencia origine la perturbación magnética, debemos aceptar que esta misma

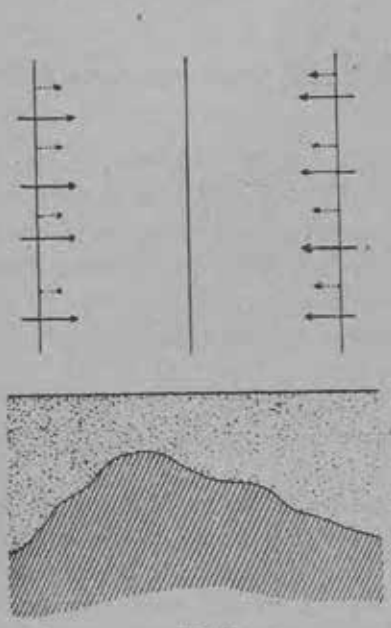


Fig. 42.

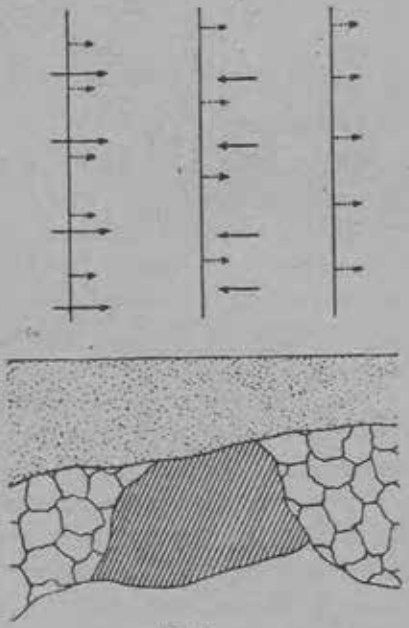


Fig. 43.

roca es la que produce la perturbación gravífica en el caso de la figura 42 (roca magnética alargada). En el de la figura 43, sobre la roca magnética existe otra no magnética que, dada la dirección de los gradientes, tiende a aflorar de Oeste a Este, y en el de la figura 44 la masa magnética aparece incrustada entre otras dos no magnéticas, de den-

sidad aproximadamente igual, y que también tiende a aproximarse a la superficie en la dirección Oeste-Este.

El barón von Eötvös cita en su «Memoria», antes mencionada, como ejemplo del primer tipo de paralelismo, el trozo de la llanura húngara situada entre Makó y Szeged, donde las observaciones con la balanza habían demostrado la existencia de una masa rocosa subterránea en la dirección SE.-NW., seguida en una longitud de 50 kilómetros. El cálculo de la intensidad magnética de la masa perturbadora permitió deducir que la susceptibilidad magnética de aquélla era de 0.0035, valor que corresponde ordinariamente a rocas eruptivas. Vemos, pues, que la combinación de las observaciones gravimétricas con las magnéticas permitió, en este caso, descubrir una masa rocosa eruptiva no citada en el mapa geológico de la región.

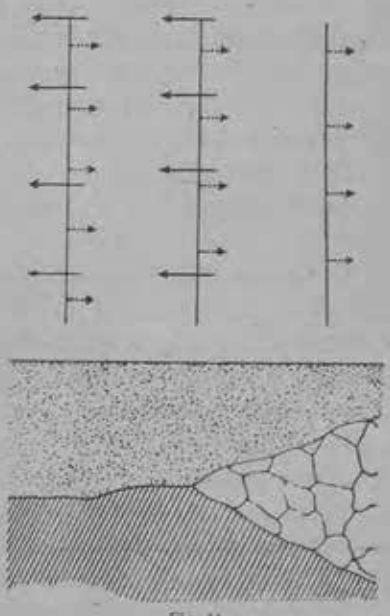


Fig. 44.

Resumiendo lo que antecede podemos afirmar que las observaciones combinadas con la balanza y aparatos de medida magnéticos en las mismas estaciones, contando con número suficiente de éstas, permiten determinar los bordes y, por lo tanto, la anchura, así como la longitud de masas perturbadoras que se extiendan longitudinalmente y definir las condiciones más probables de emplazamiento de cada masa (si está en contacto con otra o encajada entre dos) y la susceptibilidad magnética de la misma.

10. Desarrollo del sistema de la balanza de torsión Askania.—Con la colaboración técnica del profesor Dr. W. Schweydar se empezó a construir en 1920 el primer modelo de balanza de torsión Eötvös, con registro automático fotográfico de las observaciones, si bien en ese primer modelo el reloj eléctrico de contactos que se utiliza para el accionamiento de las lámparas y los cambios de azimutes figuraba separado de la balanza, en forma de reloj de pared, de construcción robusta. A este tipo pertenece la balanza *Q* del Instituto Geográfico.

A poco, se ideó instalar dicho reloj eléctrico de contactos en la propia balanza, encima del platillo de aluminio *f* y enfrente del mecanismo de relojería *m* (fig. 24).

Como consecuencia del empleo de la balanza de torsión en terrenos dificultosos surgió la necesidad de desarrollar la construcción de un modelo más pequeño, más ligero y, sobre todo, que abreviase el período de las mediciones. A éste respondió la «balanza en *Z*», construída por primera vez en 1925, denominada así, por tener dicha forma la varilla que lleva los contrapesos, unidos, ambos, rígidamente a la varilla. Con esta disposición se consiguió que el centro de gravedad del sistema de suspensión quedase a dos centímetros de la varilla, en vez de a 30 centímetros por debajo de la misma, como sucede en el primer modelo, lo que permitió disminuir la altura del instrumento.

Otra ventaja de este modelo en *Z* es que no se precisa desmontar los tubos protectores que rodean los contrapesos durante el transporte.

La sensibilidad de este modelo pequeño es de $2{,}10^{-9}$ eötvös que se consideró suficiente para la investigación de yacimientos minerales, a la que esencialmente se destina este modelo. Esta reducción de sensibilidad permitió disminuir el peso de los contrapesos y la distancia vertical entre los mismos.

Por último, para reducir más la altura total del instrumento y su peso se le dió a los hilos de torsión solo 28 centímetros de longitud, y mediante el aumento de la amortiguación se redujo el tiempo necesario para alcanzar la posición de reposo de las varillas a 40 minutos, contra los 60 necesarios en el modelo grande.

En el deseo de abreviar aún más la duración del registro y aligerar aún más el peso, se construyó en 1934 el modelo denominado «de varillas inclinadas». En este último y más reciente modelo, el tiempo necesario para la estabilización de las varillas es sólo de 20 minutos, y el peso de la balanza de 37,5 kilómetros contra 47,4 en el modelo en *Z*, y 57,7, en el modelo grande.

Respecto a la elección del modelo, pues los tres citados se construían en serie en los talleres Askania antes de la guerra, pueden darse las siguientes normas: Cuando haya que trabajar en terreno de topografía accidentada y se espera que los gradientes correspondientes a la perturbación subterránea sean pequeños, debe elegirse la balanza de torsión modelo grande. La balanza de torsión en *Z* se prefiere, como

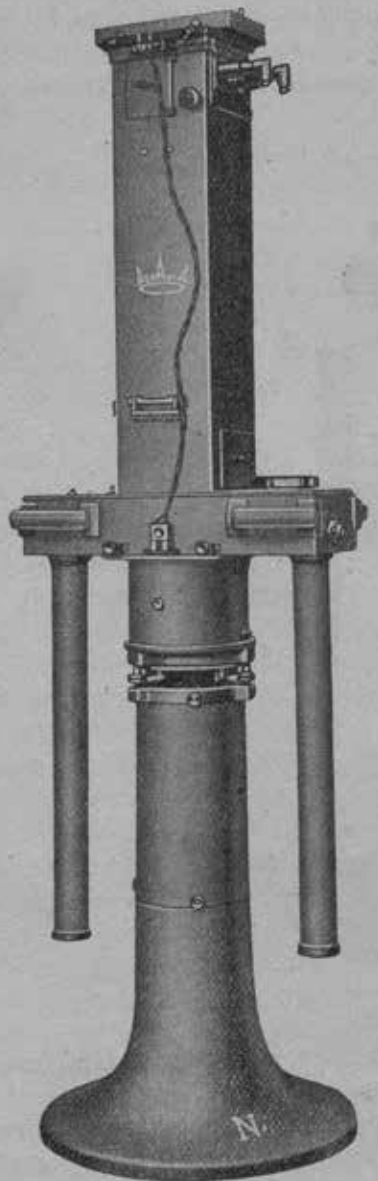


Fig. 45.

modelo más adecuado, para descubrir estructuras, resolver problemas tectónicos, hallar cúpulas de sal y anticlinales. En cambio se emplea en los últimos tiempos, la balanza de varillas inclinadas, sobre todo en América del Norte, para lograr una idea general en terreno descono-

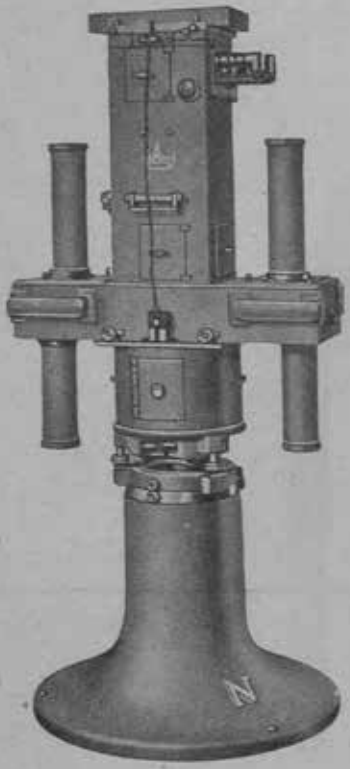


Fig. 46.

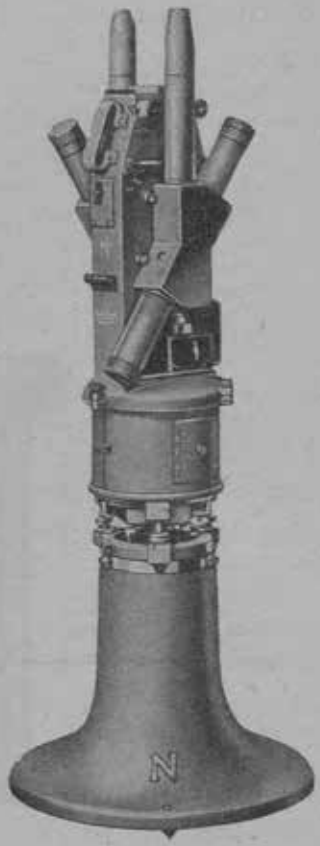


Fig. 47.

cido de las perturbaciones de la gravedad, habiéndose logrado observar con ella en Texas 210 estaciones en un mes.

Como complemento de lo expuesto se muestran en las figuras 45, 46 y 47 los tres modelos de balanza Askania acabados de citar.

CAPÍTULO III

LAS OBSERVACIONES CON EL GRAVÍMETRO ELECTRICO-MECÁNICO ASKANIA

1. Principio básico de los gravimetros estáticos.—Los denominados gravimetros estáticos han adquirido gran importancia a partir del año 1934, destacándose entre ellos, por su precisión, el ideado por el Dr. Graf, de los Talleres Askania.

El principio básico que ha hecho factible la construcción de los gravímetros estáticos radica en la evaluación de las variaciones de la gravedad por medio de las variaciones en la posición de equilibrio de un cuerpo cuyo peso se mantiene equilibrado con auxilio de una fuerza elástica. Ahora bien; según la naturaleza de la fuerza elástica empleada, variará el tipo del gravímetro, distinguiéndose los tres casos siguientes:

1.° Utilización de la presión atmosférica como fuerza antagónica,

2.° Aprovechamiento de la fuerza elástica resultante de una masa de gas confinada, y

3.° Producción de la fuerza elástica antagonista por medio de muelles.

A este último tipo de gravímetro pertenece el gravímetro Askania, adquirido el año 1941 por el Instituto Geográfico. Se combinan en este aparato, en grado sobresaliente, la indispensable seguridad en el manejo del instrumento y en su transporte con la gran exactitud en las mediciones, posibilitándose así la máxima rapidez en las observaciones y un considerable rendimiento por jornada de trabajo. Estas cualidades hacen que el nuevo gravímetro tenga un gran campo de aplicación que no excluye el de la geofísica aplicada en aquellas zonas, que por sus

características superficiales limitan el empleo de las investigaciones sísmicas o con la balanza de torsión. Tal sucede en las regiones de fuertes relieves topográficos o cubiertas de espesos bosques o de sedimentos modernos flojos. En estos casos, así como en los distritos montañosos, presenta este gravímetro la ventaja respecto a la balanza de torsión de resultar menos afectado por las masas laterales del terreno y poder proporcionar rápidamente un primer esquema de las estructuras subterráneas o de la fisonomía gravimétrica de la zona investigada.

Se reduce en su esencia este aparato a una masa pesada *M* (fig. 51) suspendida libremente de un muelle vertical *R*. Toda variación del campo gravífico terrestre se traduce en una variación de la longitud del muelle, siendo proporcional el acortamiento o alargamiento de éste al decremento o incremento de la gravedad. Se ha podido conseguir que una diferencia de gravedad de 1 miligal produzca una variación en la longitud del muelle de $\pm$ 0,2 micrón y que pueda apreciarse la décima parte de este valor en la escala de lectura del gravímetro amplificada a 1 milímetro. Esto supone una amplificación de 1:50.000. Esta gran amplificación se consigue mediante un *sistema de transmisión fotoeléctrico*, por el cual se transforman los desplazamientos verticales de la masa *M* en desviaciones de un galvanómetro, el cual refleja sobre la escala de medida del gravímetro un índice en forma de flecha.

Desde el punto de vista de rendimiento del aparato no serviría para nada tan elevado grado de sensibilidad de no disponerse simultáneamente de un campo de medida suficientemente grande para poder utilizar el gravímetro en regiones con marcada diferencia de latitud o altitud, factores que influyen principalmente en la variación de la gravedad. Para responder a esta exigencia está provisto el aparato de un sistema de compensación mecánica de la desviación del galvanómetro, originada por la variación de la gravedad. Este sistema está integrado principalmente por un husillo que, al ser girado a mano, ocasiona el ascenso y descenso de la masa suspendida del muelle y la desviación en el sentido correspondiente del índice del galvanómetro que sirve para las lecturas. De esta manera se puede llevar siempre al cero de la escala o a sus proximidades el índice en cuestión, leyéndose directamente en un disco dividido en cien partes, montado en el extremo superior del eje del husillo, los miligals y fracciones de miligals compensados. Este ingenioso dispositivo compensador permite disponer de un campo de medida muy grande, que llega hasta 1.000 miligals.

Como el muelle es muy sensible a los cambios de temperatura se necesita establecer un régimen de temperatura muy constante en el interior del gravímetro, regulado automáticamente de tal manera que las variaciones de la temperatura ambiente se eliminen lo mejor posible. Con este fin está montado en la parte interna del aparato un termostato eléctrico rodeado de triple envoltura metálica. Un sensible termómetro de contactos ligado con un relais, efectúa la regulación de temperatura, la cual puede mantenerse a voluntad a 15, 25, 35 y 45° C., según la temperatura que domine en el exterior.

En la posición de observación del gravímetro apoya éste sobre una basa metálica cuadrada (fig. 48) provista de tres zapatas circulares que se hacen descansar sobre el terreno. En el centro de dicha basa se levanta una parte semiesférica sobre la que apoya un anillo de sustentación situado en la parte inferior del gravímetro. Este dispositivo de apoyo permite una primera nivelación rápida, aunque grosera, del aparato, haciendo resbalar el anillo sobre la superficie esférica con los movimientos a mano que se imprimen al gravímetro, provisto para este objeto de unas asas situadas en su parte superior. La nivelación exacta se efectúa posteriormente por medio de unos tornillos de pie y dos niveles de burbuja en ángulo recto.

Va suspendido el gravímetro, para su transporte, en el interior de un automóvil por intermedio de suspensión elástica, resultando de este modo preservado contra las sacudidas y protegido a la vez de la influencia de los agentes atmosféricos. En el piso del coche hay una abertura cuadrada de la misma sección que la basa, en la que se encaja ésta durante los transportes, y por cuya abertura se hace descender el gravímetro al suelo, actuando en un torno que se maneja desde el exterior del coche.

Con práctica suficiente del observador sólo se precisan pocos minutos para realizar las lecturas de niveles y órganos de medir del aparato.

2. Descripción del gravímetro Askania.— En la figura 48 se han numerado los órganos principales del aparato, que son los siguientes:

(1) *Basa.*

(2) *Zócalo* de forma esférica, sobre el que asienta el gravímetro por medio del

(3) *Anillo.*

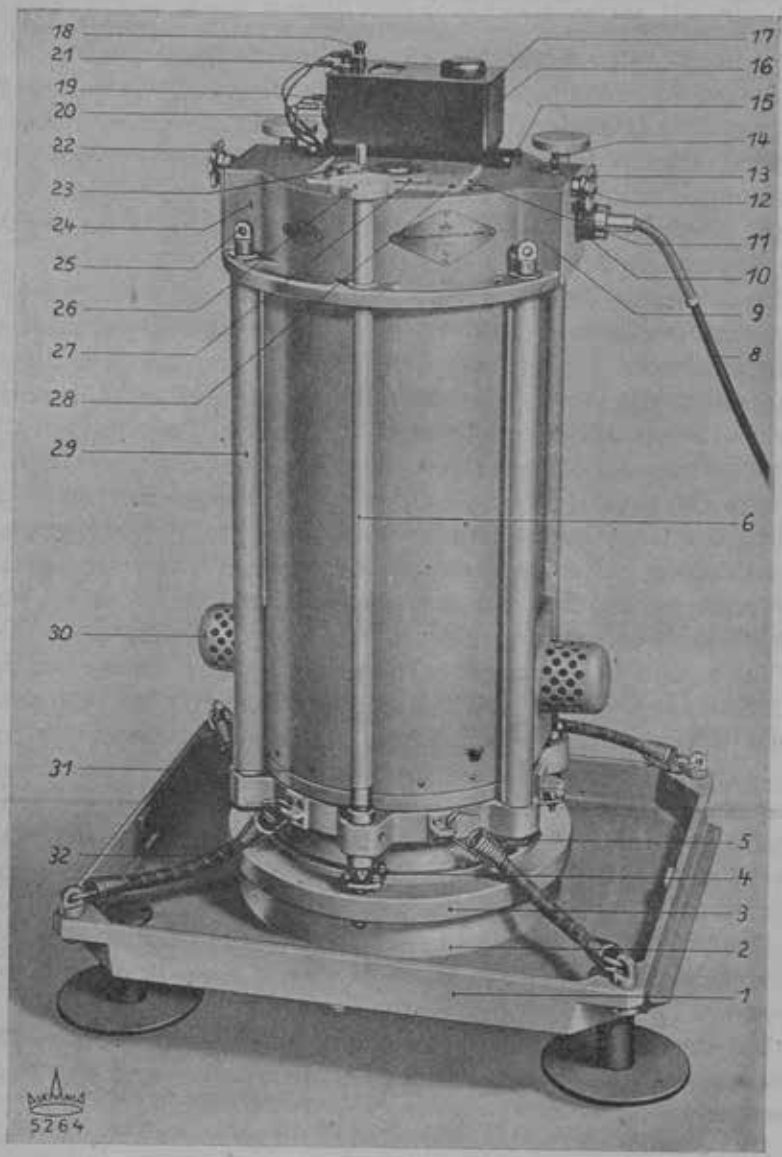

18
21
19
20
22
23
24
25
26
27
28
29
30
31
32
17
16
15
14
13
12
11
10
9
8
6
5
4
3
2
1
5264

Fig. 48.

(4) Uno de los tres *tornillos nivelantes.*

(6) Una de las tres *varillas* para actuar en los tornillos nivelantes.

(8) *Cable* para todas las conducciones de corriente que se utilizan en el aparato.

(9) *Caja de conmutación.* En el interior de ésta va colocado un conmutador variable que permite la instalación a voluntad de las cuatro temperaturas de conmutación del termostato, antes indicadas, de 15, 25, 35 o 45° C.

El mecanismo de regulación de temperatura del termostato consiste en lo siguiente (fig.49) :

El termostato presenta dos circuitos eléctricos 1 y 2. En el circuito 1

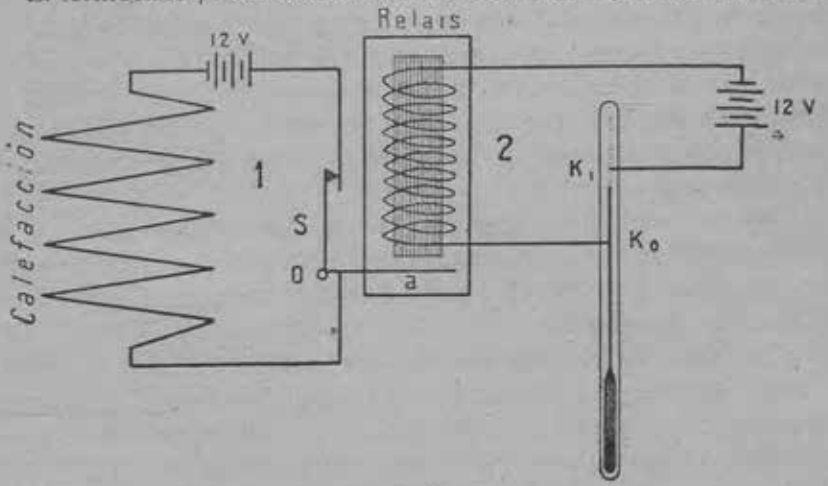


Fig. 49.

está el arrollamiento calorífico y un conmutador *S*, que es accionado por un electroimán. El conmutador y el electroimán forman el relais. En el circuito 2 están el electroimán y un termómetro de contacto. Este termómetro constituye el conmutador del circuito 2. Es un termómetro ordinario de mercurio con dos contactos de platinos como mínimo, situados en la superficie interior de la columna capilar (en el dibujo, K_0 y K_1). Cuando la temperatura en el espacio que rodea el termómetro de contacto se eleva tanto que la columna de mercurio alcanza el contacto superior de platino K_1, se cierra el circuito 2 y pasa corriente por el electroimán. La fuerza magnética de éste atrae la armadura de hierro *a* unida en ángulo recto al conmutador *S*, con lo que

resulta éste desconectado por giro alrededor del punto O, y se corta la corriente en el circuito 1 y, por consiguiente, en el arrollamiento calorífico. Al disminuir la temperatura como consecuencia de este proceso, baja la columna termométrica, y ésta deja de tocar en el contacto K_1, abriéndose en este momento el circuito 2 y cerrándose el conmutador S por la acción de un muelle antagonista, no representado en el dibujo. El termostato se calentará de nuevo.

El termómetro de contacto se instala en la práctica en el interior del arrollamiento calorífico y mantiene, como se comprende fácilmente por la manera de trabajar del termostato, al espacio próximo que le envuelve a la temperatura que corresponde a la posición del contacto K_1. Por razones de simetría radial conserva entonces toda la superficie de la envuelta del termostato y, por consiguiente, la totalidad del espacio interno de esta superficie envolvente, la temperatura K_1. (En realidad es algo complicada la distribución de temperatura en el interior del termostato a causa de los gradientes de temperatura que se presentan en dicho espacio.)

El termómetro de contacto del gravímetro Askania presenta, en vez de un contacto K_1, cuatro contactos que corresponden a las temperaturas de 15, 25, 35 y 45° C. Siguiendo con la descripción general del gravímetro, representan:

(12) *Botón de trinquete* combinado con la

(13) *Rueda* que actúa en el mecanismo de sujeción de la masa. Durante el transporte hay que sujetar la masa para impedir que las sacudidas, aun amortiguadas por la suspensión elástica dentro del automóvil, produzcan una deformación o rotura de las partes sensibles del sistema de medida. El botón de trinquete (12) impide que la masa pueda quedar en libertad involuntariamente. Para efectuar una medición se deja en libertad la masa mediante el giro de la rueda a izquierdas, habiendo necesidad para ello de oprimir el botón (12), con lo que hay posibilidad de efectuar el giro mencionado. Para la sujeción de la masa se girará la rueda (13) a derechas hasta que salte hacia fuera el botón (12).

(16) *Disco del mecanismo contador.*—El mecanismo contador está unido al sistema de compensación mecánica. Una vuelta completa del disco contador, dividido en cien partes, compensa en el gravímetro adquirido por el Instituto Geográfico y Catastral, ocho miligals de aceleración de la gravedad, aproximadamente, con lo que una división del mismo corresponde a 0,08 miligal.

La compensación mecánica de las desviaciones del galvanómetro (17) se consigue del modo siguiente:

A la corredera (6), (fig. 50) de un tornillo micrométrico vertical (7), va unido un fino muelle heliocoidal (8), cuyo extremo superior libre agarra en la masa del gravimetro. Mediante el giro del tornillo micrométrico (husillo de medida) se varía la tensión del pequeño muelle (8). De este modo puede siempre llevarse exactamente la masa, y en un recorrido suficientemente grande, a la posición normal (indicador del galvanómetro en el cero). El husillo de medida está acoplado directamente con el eje del disco del mecanismo contador, que de este modo cuenta el número de revoluciones o fracciones de las mismas del tornillo micrométrico.

(17) *Galvanómetro.*—Se utiliza, según ya dijimos, como aparato de indicación a cero, esto es, que se lleva a la graduación cero de su escala. Es un aparato de bobina móvil, de suspensión de cinta, que presenta, en vez de una aguja indicadora, un espejo que refleja sobre la escala graduada una señal en forma de flecha. La utilización del galvanómetro como instrumento que se lleva a cero permite que presente una gran sensibilidad a las variaciones, aun las más pequeñas de la corriente que por él pasa, toda vez que el campo de medida del galvanómetro no tiene importancia en este caso. Una variación de la gravedad y el desplazamiento consiguiente de la masa se acusa, desde luego, por una desviación sobre la escala de la flecha reflejada sobre la misma. Mediante el giro de una pequeña manivela (23) que actúa sobre el mecanismo compensador, se lleva la flecha al cero de la escala o a sus inmediatas proximidades, dentro de un par de divisiones en uno u otro sentido a partir del cero, si el estado de intranquilidad de la flecha indicadora, consecuencia de las oscilaciones verticales de la masa al dejarla en libertad, hacen imposible la puesta en cero. En el primer caso basta leer directamente en el disco (16) del mecanismo contador los miligals compensados. En el segundo habrá que combinar dicha lectura con la de la escala galvanométrica, para lo que se necesitará determinar previamente la calibración de la misma en miligals.

(21) *Conmutador para poner en cortacircuito el galvanómetro.*—Para preservar éste, que es muy sensible, durante el transporte es indispensable ponerle en cortacircuito. Se consigue con un giro del botón (21), de 90°, que coloca en cortacircuito, con 40 ohmios, el sistema de medida del galvanómetro.

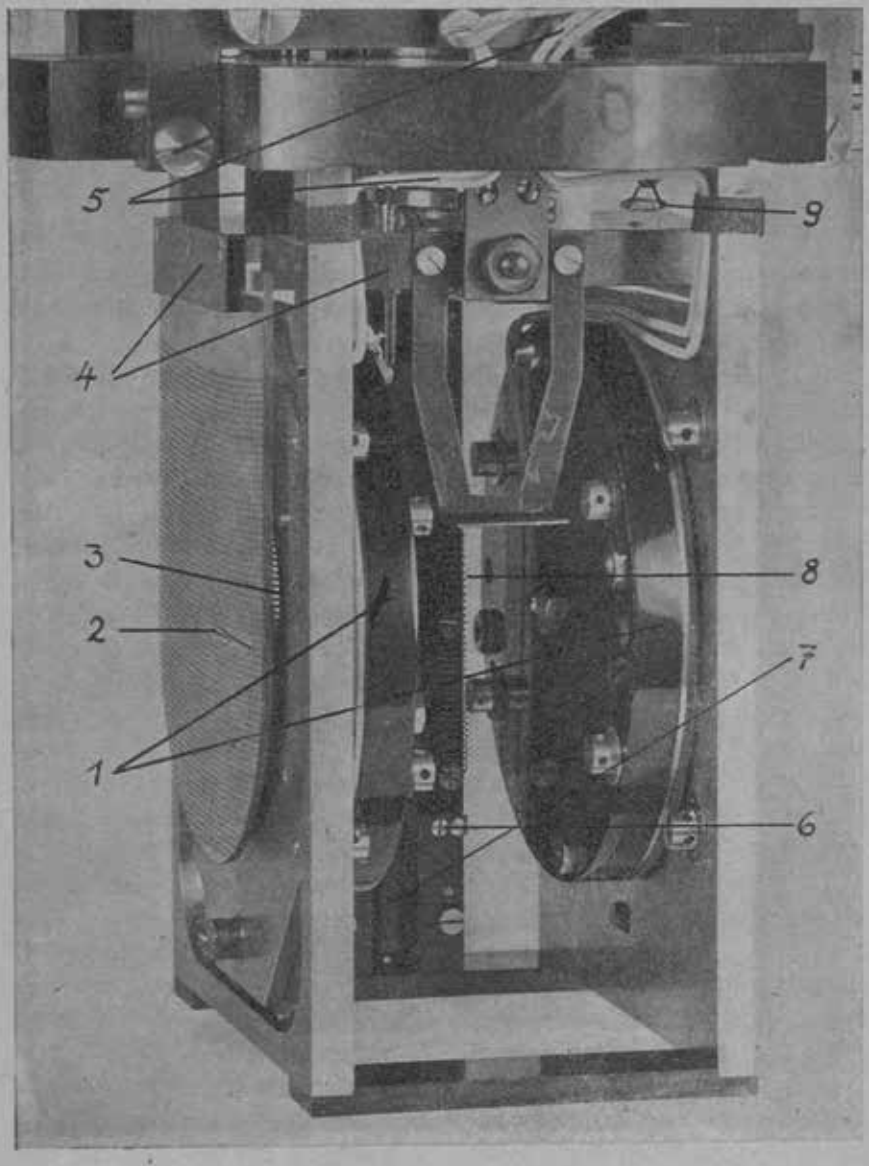


Fig. 50.

(22) *Rueda para el manejo del peso calibrador.*— Dispone el aparato de un peso calibrador, de forma anular y unos 30 milígramos de peso, que, como su nombre indica, sirve para controlar una variación de gravedad constante, indispensable a su vez para la determinación de la *sensibilidad* del gravímetro. Esta viene definida por el *número* de miligals que se compensan con una revolución del disco contador, dividido, como dijimos, en cien partes. El efecto del peso calibrador al quedar situado sobre la masa, para lo cual basta con girar la rueda (22) en el sentido conveniente, se traduce en un aumento determinado de la gravedad, pudiendo expresarse directamente dicho peso calibrador en miligals. Así, por ejemplo, en el gravímetro núm. 25, su valor es de 78,20 miligals, deducido por el Ingeniero de los Talleres Askania, Haalck, y el que suscribe, en las experiencias realizadas en Bad Harzburg y Torfhaus, localidades, ambas, situadas en el Harz.

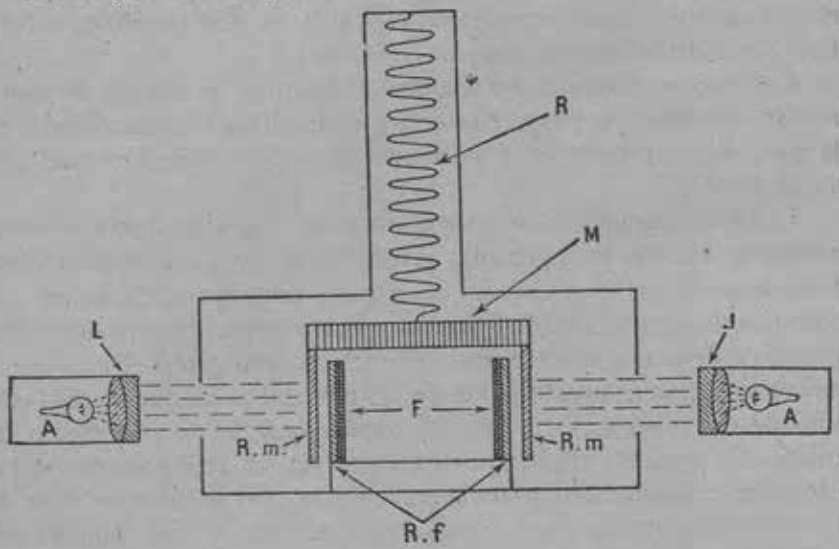
La parte más esencial del aparato la constituye el *sistema de transmisión fotoeléctrico*, por el cual se transforman los desplazamientos de la masa del gravimetro en desviaciones de la flecha indicadora del galvanómetro.

La adjunta figura 50 muestrala constitución de este sistema de transmisión en tamaño muy próximo al natural. Se compone de dos fotocélulas de selenio (1) y dos pares de cristales estriados (2, 3), de los que sólo son perceptibles en la figura el par izquierdo. Los cristales están provistos de estrías de 0,5 mm. de anchura, transparentes a la luz, y cuya separación es precisamente de 0,5 mm. Mientras que en cada par, uno de los cristales estriados está sólidamente unido por medio de mastic a la masa (4) del gravímetro (cristal (2) = «rejilla movible»), los otros dos cristales están atornillados sobre la capa sensible a la luz de las fotocélulas (cristal (3) = «rejilla fija»). La luz de cada lámpara del gravímetro—después de atravesar un sistema de lentes—pasa, antes de alcanzar a la fotocélula, por el par de cristales rejillas. Las dos rejillas de cada par están dispuestas entre sí con respecto a las estrías oscuras de modo que éstas resulten paralelas, y de tal suerte ajustadas que en la posición normal de la masa del gravímetro, las estrías transparentes de las rejillas fijas resultan cubiertas en un 50 por 100 de su anchura por las estrías oscuras de las rejillas movibles. Para igual sensibilidad de ambas fotocélulas e igual iluminación de las lámparas, se originan en las fotocélulas dos corrientes de igual magnitud, que son conducidas directamente por el cable (5) al galvanómetro. Puesto que ambas

corrientes, por razón de la manera como están conmutadas, circulan por el galvanómetro en direcciones contrarias, se compensan en su acción, y el galvanómetro marcará cero.

Al ascender o descender la masa, varía, a consecuencia del movimiento transmitido a ambas rejillas movibles, la cantidad de luz que penetra a través de los pares de rejillas, y por razón del *ajuste de ambos pares* de rejillas, la cantidad de luz en uno de los lados aumenta, mientras disminuye en el otro. La diferencia de las corrientes de las fotocélulas deja entonces de ser nula y adquiere un valor igual al doble de la magnitud de la corriente modificada. Esta variación de corriente queda registrada por la desviación de la flecha indicadora del galvanómetro.

En la figura 51 se representa esquemáticamente el sistema de trans-



R. — Muelle.
M. — Masa.
A. A. — Lámparas.
L. — Condensadores.
R. m. — Rejillas movibles.
R. f. — Rejillas fijas.
F. — Fotocélulas.

Fig. 51.

misión fotoeléctrico y la marcha de los rayos luminosos procedentes de las lámparas de medida *A*. Estas lámparas van rodeadas de un casquete protector, uno de los cuales está señalado con el núm. 30 en la figura 48.

(29). *Columna de muelle.*—En su interior está dispuesto un muelle en espiral para la suspensión elástica del gravímetro dentro del coche.

En la figura 52 se representa el interior del gravímetro una vez separadas la envuelta exterior y la intermedia, viéndose el tubo cilíndrico (42) provisto de orificios y en cuyo interior se aloja el muelle del gravímetro, visible parcialmente a través de dichos orificios. También se distingue una de las rejillas movibles (50) del sistema de transmisión fotoeléctrico anteriormente detallado y la masa (40).

En las figuras 53 y 54 está representado el automóvil Stoewer que se adquirió por el Instituto Geográfico y Catastral al mismo tiempo que el gravímetro núm. 25, y que sirve para el transporte del mismo y del personal encargado de efectuar las observaciones. Se trata de un coche fuerte, susceptible de rodar por toda clase de terreno y de remontar fuertes pendientes, disponiendo en su interior de un asiento giratorio desde el que el observador efectúa las lecturas en el gravímetro una vez descendido y apoyado sobre el suelo. Delante del asiento mencionado y a la altura conveniente hay un tablero fijo que sirve de mesa para las anotaciones en el cuaderno de observación.

Por último, en la figura 55 aparece el gravímetro suspendido por medio de sus muelles en el interior del coche, y en la figura 56 apoyado sobre el suelo en disposición de ser observado.

3. Instalación eléctrica.—Para la alimentación del termostato, de las dos lámparas del sistema de medida y las de iluminación del galvanómetro y niveles, se dispone de cuatro baterías de acumuladores «Wartha» (dos de ellas de repuesto), de 12 voltios y capacidad de 120 amperios-hora. El termostato, la iluminación y las lámparas de medida funcionan a dicha tensión de 12 voltios, estando ligados entre sí el termostato y la iluminación. El consumo de corriente del termostato e iluminación es aproximadamente de 5,5 amperios, y el de las lámparas de medida de 0,8 a 0,9 amperios. En todo momento se conoce el voltaje de los dos circuitos y el amperaje del circuito del termostato mediante un voltímetro y un amperímetro montados juntos en una pared del coche, del lado del observador.

El consumo de energía del termostato es aproximadamente de 2,5 vatios para 1° de temperatura sobre la ambiente. La corriente del termostato no debe en ningún caso ser inferior a 4,5 amperios, ya que entonces el acumulador resultaría bastante agotado, existiendo el peligro de un enfriamiento del instrumento.

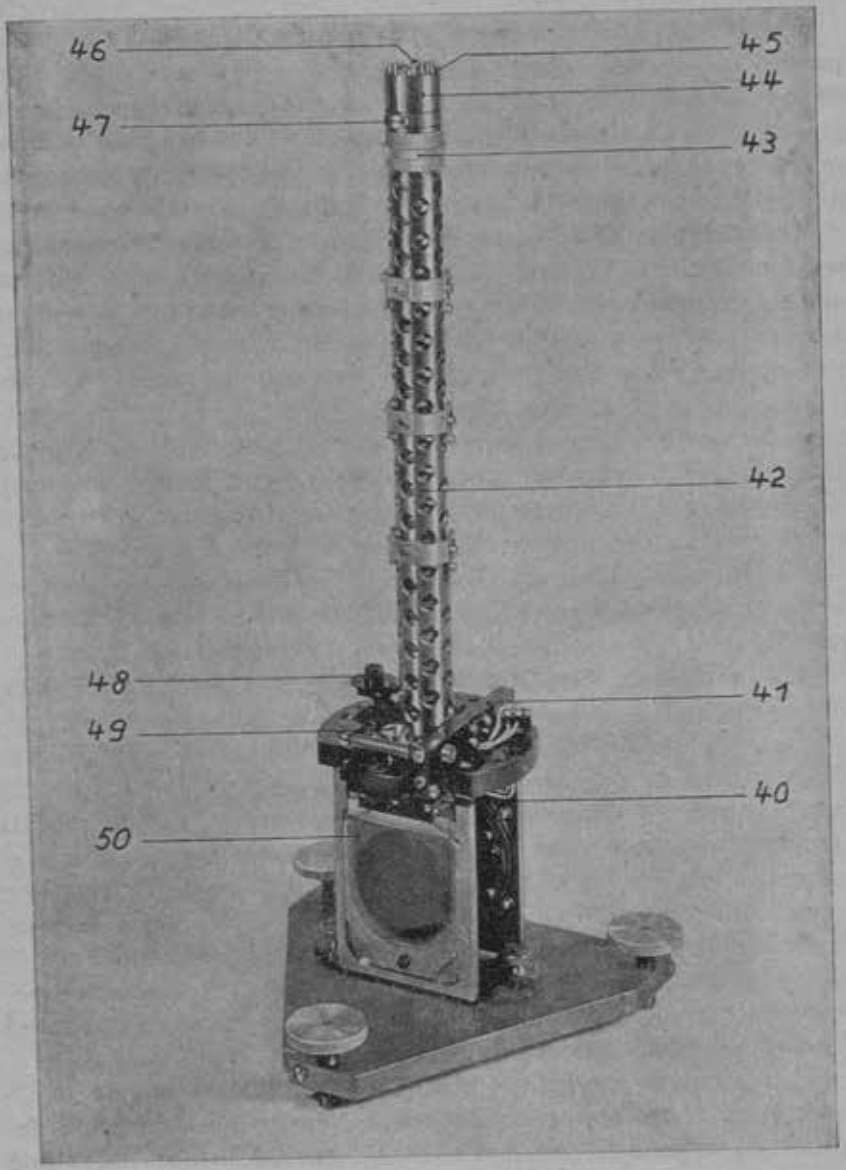


Fig. 52

Fig. 53.

Fig. 54.

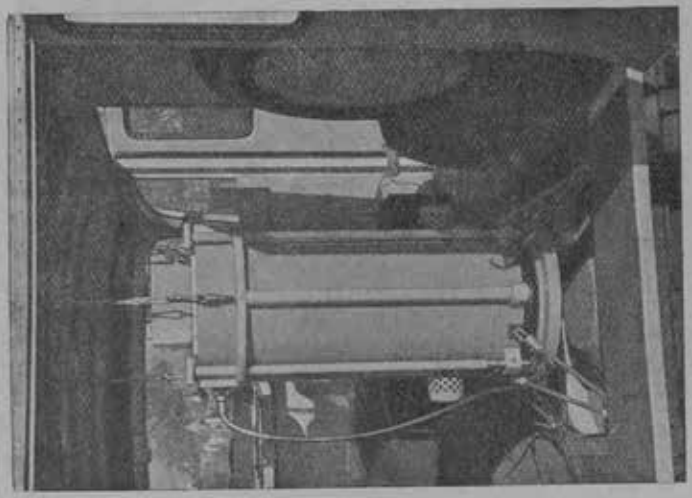


Fig. 55.

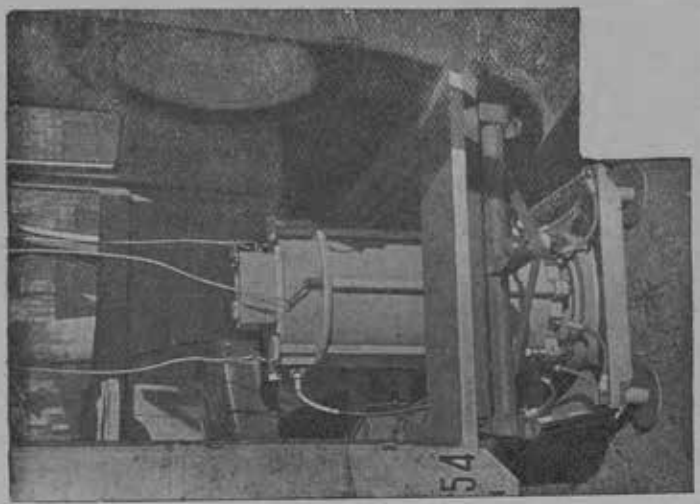


Fig. 56.

El acumulador del termostato debe recargarse a diario durante el período de las observaciones en el campo, debiendo conectarse siempre al gravímetro la víspera del día de observación, de modo que transcurran nueve o diez horas de calentamiento del aparato antes de empezar la observación de un perfil gravimétrico.

Entre los accesorios eléctricos se incluye un rectificador para la carga de los acumuladores. Este rectificador se puede conectar en cualquier red de corriente alterna, de 110 a 220 voltios, y transforma, con poco gasto de energía, la corriente alterna en corriente continua a baja tensión.

Fig. 57.

4. Determinación de datos susceptibles de ajuste. *Sensibilidad de inclinación.*—La sensibilidad de inclinación es distinta en los dos niveles en ángulo recto montados en el gravímetro (fig. 57). Para el nivel II tiene un valor constante y vale 0,0 — 02, mgal/Pars. Se nivela el aparato para la observación de modo que el extremo de la burbuja más cercana al observador, sentado en el interior del coche, quede en cero.

La sensibilidad de inclinación en dirección del nivel I presenta una

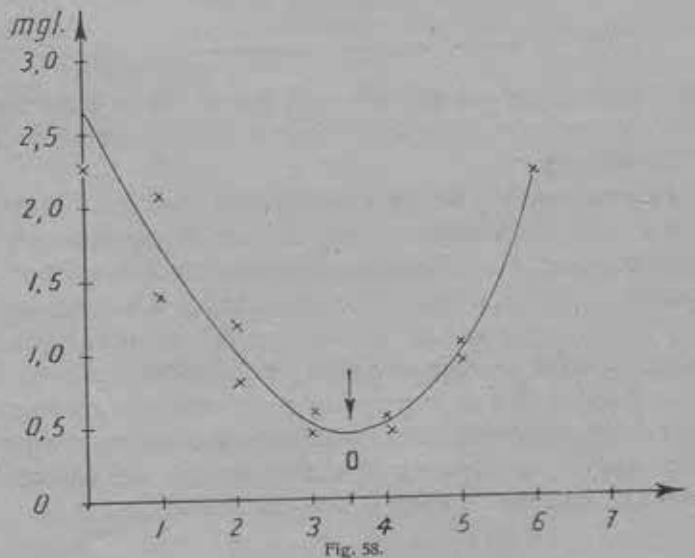


Fig. 58.

dependencia de sentido parabólico con respecto a la posición del nivel, según se muestra en la figura 58. La sensibilidad de inclinación es nula

en el punto *O* del nivel. Para encontrar este punto mínimo *O*, se efectuarán lecturas del galvanómetro en función de la posición del nivel y se determinará gráficamente el mínimo. Una variación periódica del gravímetro durante las lecturas del galvanómetro falsearía la posición del mínimo, y por eso hay que efectuar una medición en los dos sentidos y promediar la curva. A continuación exponemos un ejemplo de determinación de mínimo, al que corresponde el gráfico de la figura 58.

Nivel I.	Escala galvanómetro.	Miligals.
0	+ 24,0	+ 3,0
1	16,8	2,1
2	9,6	1,2
3	5,4	0,6
4	5,2	0,55
5	8,2	1,05
6	17,6	2,2
5	7,8	0,95
4	4,0	0,5
3	3,8	0,45
2	6,4	0,8
1	11,2	1,4
0	18,4	2,3

Para el cálculo de los miligals que figuran en la tercera columna del cuadro anterior, se tendrá en cuenta que la división de la escala = 0,125 miligals.

5. Determinación de la sensibilidad del gravímetro por medio del peso calibrador.—Se efectúa del modo siguiente: Puesto el aparato en estación, se efectúan las lecturas del disco contador y del galvanómetro con el peso calibrador suspendido, o sea, sin apoyar en la masa. A continuación se hace descender el pesito calibrador hasta que descanse en la masa, se vuelven a efectuar ambas lecturas y para tener en cuenta la posibilidad de una variación del cero del gravímetro por influencia de los pequeños cambios de temperatura, no compensados por el termostato, se vuelven a tomar las lecturas del contador y del galvanómetro, después de subir el peso calibrador.

Ejemplo:

	LECTURAS	
	Contador. — Revoluciones.	Galvanómetro. — Divisiones escala.
1.º Sin peso calibrador	70,15	— 2,6
2.º Con peso calibrador	79,90	— 1,0
3.º Sin peso calibrador	70,15	— 1,8
Promedio primera y tercera lectura	70,15	— 1,9
Diferencia de segunda lectura con promedio	9,75	+ 0,9

Tendremos, por lo tanto, que

9,75 revoluciones + 0,9 división escala = peso calibrador = 78,20 miligals.

Para poder deducir de la igualdad anterior el valor de una revolución en miligals hay que reducir antes la lectura del galvanómetro, 0,9 en este caso, a fracción de revolución del disco contador, reducción que se consigue anotando la desviación que experimenta el índice de indicación del galvanómetro para media revolución (50 divisiones) del disco. Supongamos que en este caso 0,9 división de escala corresponde a 0,025 revolución contador. Resultará:

(9,75 + 0,25) revoluciones = 78,20 miligals.
1 revolución = 78,20 : 9.775 = **8,0 miligals.**

6. Observación de una estación.—El gravímetro se suspende en el interior del coche, tensando los muelles de suspensión, por medio de los cables sobre los que actúa el torno hasta que las varillas de los muelles sobresalgan unos cinco centímetros de las columnas donde van éstos alojados.

Al llegar a una estación se sitúa el gravímetro sobre el terreno, accionando el torno en sentido conveniente y guiando el observador al gravímetro para que efectúe el apoyo sobre la basa, que es la primera que descansa en el suelo, sin golpe brusco. Se efectúa, entonces, la nivelación aproximada hasta que jueguen ambos niveles y a continuación la nivelación exacta, por medio de los tornillos de pie hasta que el nivel I quede en la posición que corresponde al mínimo de sensibilidad de in-

clinación, y el nivel II, en cero. Después se deja en libertad la masa mediante manipulación lenta de la rueda correspondiente y se quita el shuntado del galvanómetro.

Cuando el observador posee la práctica suficiente se consigue dejar en libertad la masa pesada sin que se presenten oscilaciones por torsión. Las oscilaciones verticales, que son las normales, son fáciles de amortiguar presionando con un dedo sobre el gravímetro al ritmo de las oscilaciones. Por el contrario, no se pueden amortiguar las oscilaciones por torsión. Si su amplitud es pequeña (hasta 10 divisiones de la escala) se espera a que desaparezcan, lo que exige de dos a cuatro minutos, y en caso de amplitudes grandes se sujeta y se suelta de nuevo la masa.

No se lee el galvanómetro en situación de tranquilidad absoluta del mismo, sino que se observa siempre con el indicador del galvanómetro oscilando. Mediante el giro en sentido conveniente del disco del mecanismo contador, se consigue que el indicador quede promediado en sus oscilaciones a uno y otro lado del cero de la escala, y se espera para efectuar la lectura del mecanismo contador a que la amplitud de oscilación sea de $\pm$ 1 división.

En el momento de efectuar estas lecturas (contador y galvanómetro sobre la escala) se comprobará que los niveles I y II siguen ajustados; pues suele suceder que el gravímetro, después de nivelado se incline lentamente en uno u otro sentido, especialmente sobre pavimento de asfalto o suelo húmedo.

Al mismo tiempo que las lecturas se anotará la hora del reloj en minutos, y antes de izar el gravímetro no debe olvidarse shuntar el galvanómetro y sujetar la masa pesada.

7. Corrimiento del cero del gravímetro y precisión de la medida.—Las oscilaciones diarias de la temperatura exterior se propagan con un retraso de algunas horas y en proporción reducida, gracias al termostato, al interior del gravímetro. Estas oscilaciones de temperatura originan una variación del punto cero del gravímetro que abreviadamente se designa por «corrimiento del gravímetro».

El corrimiento carecería de importancia para las medidas si se conociese «a priori» o pudiese determinarse con exactitud independientemente de aquéllas. Pero el hecho real es que sólo se reconoce en el resultado de las mismas, y, con tanta más exactitud cuantas más observaciones se posean en una estación, repartidas en lo posible a intervalos iguales en el período de duración total de un perfil.

La curvatura de la línea del corrimiento depende de la variación temporal de la temperatura ambiente, siendo una característica de cada gravímetro y una función de la estación del año en que se efectúen las observaciones.

Resulta de esto que según el grado de precisión que se exija en las medidas habrá que escoger el método de hacer las observaciones. Para medidas regionales, con distancia media entre estaciones de 10 kilómetros, en las que deba alcanzarse una precisión de 0,2 a 0,3 miligal, basta, en general, con una repetición sencilla de las observaciones.

La investigación de peculiaridades estructurales en el subsuelo exige, a veces, mediciones con precisión de 0,1 miligal en pequeñas extensiones de terreno. La práctica ha demostrado que con el «método de la superposición» se puede alcanzar dicha precisión. Se obtiene con este sistema de hacer las observaciones reflejadas en las mismas las ondas de período relativamente corto del corrimiento, cuyo conocimiento es indispensable para lograr la citada precisión de 0,1 miligal.

8. Sistema de perfiles.

a) Perfil con reiteración de las estaciones. Se observan sucesivamente las estaciones 1, 2, 3..... *n* a lo largo del perfil escogido, y al llegar a la estación *n*, se vuelven a observar las estaciones en sentido contrario hasta 1 (fig. 59).

b) Observaciones en estrella. Se ligan a una estación central *A*, varias estaciones o pequeños perfiles con agrupamiento de estaciones (figura 60). Los valores correspondientes a las observaciones reiteradas en la mencionada estación central, espaciadas en el tiempo que dura la observación de todas las estaciones, proporciona el corrimiento. Este procedimiento es ventajoso para mediciones de territorios, ya que primeramente se ligan entre sí de una manera directa algunos puntos centrales del territorio que se investiga, cuyos valores relativos de gravedad deben considerarse como definitivos. A estos puntos centrales se conectan las estaciones intermedias por mediciones en perfil o en estrella.

c) Método de superposición para distancias pequeñas entre estaciones (hasta un kilómetro).

En una dirección dada se miden cuatro estaciones (1-4); después se comenzará una segunda serie de observaciones en la estación 2 hasta la 5; la tercera serie abarca desde la 3 a la 6, y así sucesivamente. En el curso de este procedimiento de medida se consigue una triple instala-

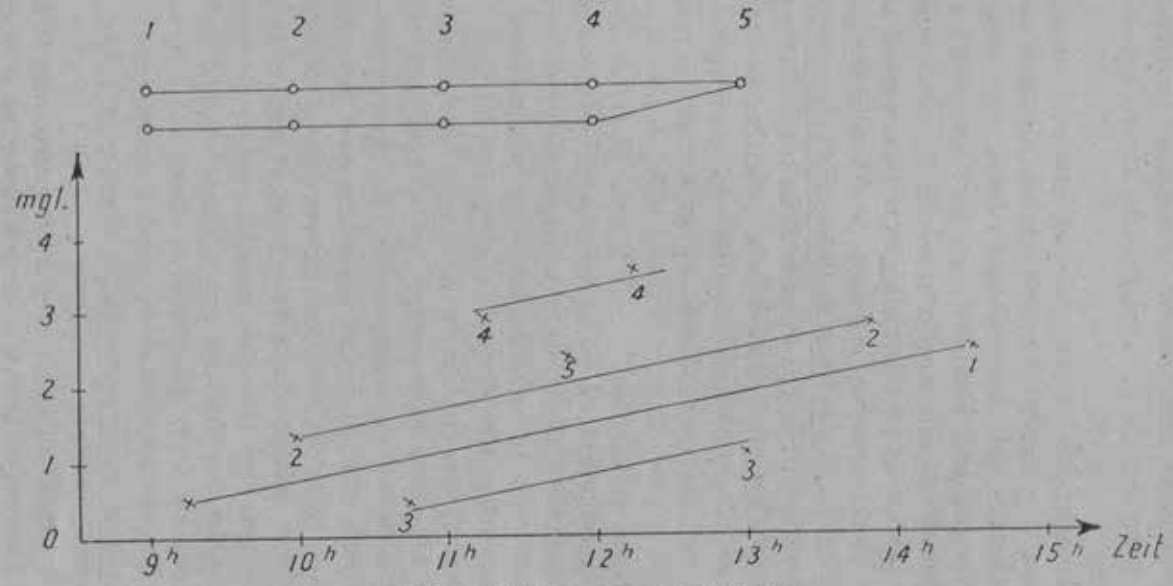


Fig. 59.—Perfil de observaciones repetidas una vez.

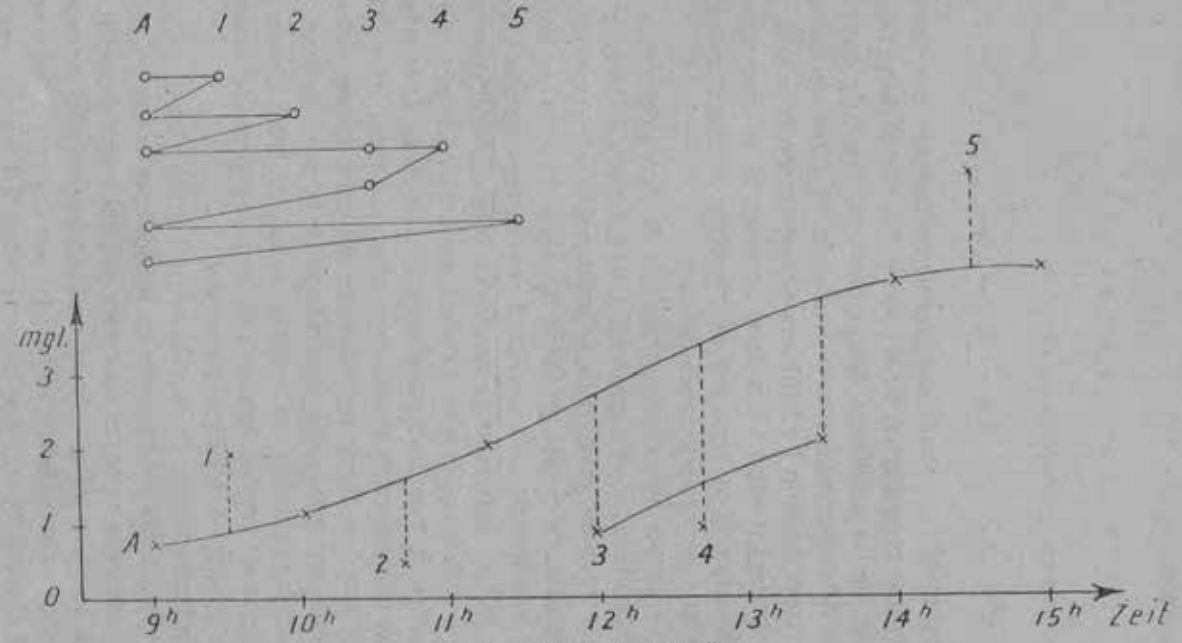


Fig. 60.—Observaciones en estrella.

ción en todas las estaciones, para lo que hay que combinar las series del siguiente modo (fig. 61):

$$1;\ 1, 2, 3;\ 1, 2, 3, 4;\ 2, 3, 4, 5;\ 3, 4, 5, 6.....;$$

terminándolas en sucesión inversa:

$$n-3, n-2, n-1\ n;\ n-2, n-1, n;\ n-1.$$

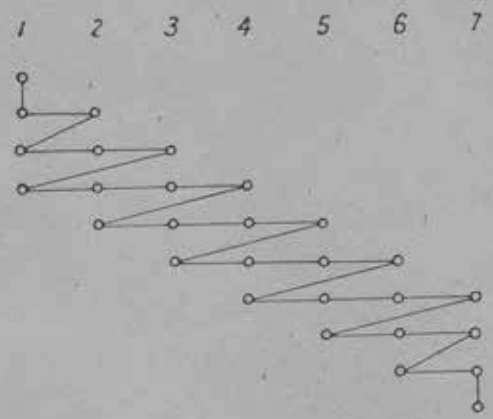
El corrimiento se calcula sucesivamente, método que lleva en sí el peligro de una propagación de errores y con ello el de un falseamiento permanente de los resultados. Para evitar esta fuente de error se aplica el método de superposición a la medición de lazos cerrados, con lo que la primera estación 1 y la última estación *n* son la misma, y la diferencia de gravedad entre 1 y *n* debe ser cero. Si la diferencia en cuestión no fuese cero, se repartirá ésta por vía de compensación y por igual a lo largo de las estaciones del lazo.

Como ejemplo del cálculo gráfico de la curva de corrimiento del cero, se reproduce a continuación (fig. 61) la curva del cero correspondiente a un trozo del perfil Bailén-Guadalquivir, observado con el gravímetro Askania en el mes de mayo de 1943, así como la hoja con los datos que han servido para su trazado en la investigación gravimétrica efectuada por el Ingeniero geógrafo D. José María Espinosa de los Monteros y el que suscribe en la zona minera de Linares, tomados de la «Memoria» de este Instituto Geográfico titulada *Determinación de perfiles con el gravímetro electro-mecánico «Askania» núm. 25.*

En este perfil se siguió una variante del método de superposición antes descrito con cuádruple observación de la estación base.

En las cinco primeras columnas de la hoja de datos correspondiente al trozo de perfil citado, figuran anotados los datos de campo, cuyo cálculo se desarrolló del siguiente modo:

Se tomó como valor de partida convencional para el contador en la columna VI el de 95 vueltas, que es menor que todas las lecturas de contador obtenidas en todas las estaciones del trozo de perfil. Los valores de la columna VI se obtuvieron multiplicando las *diferencias sucesivas* de los valores de la columna IV con respecto a 95, o sean 0,49, 0,36, 0,52, 0,46, 0,28, etc., por la sensibilidad 7,9 mgls. /1 rev. Los valores de la columna VII resultaron de multiplicar los de la V (lecturas del galvanómetro en las proximidades del cero) por 0,194 miligals



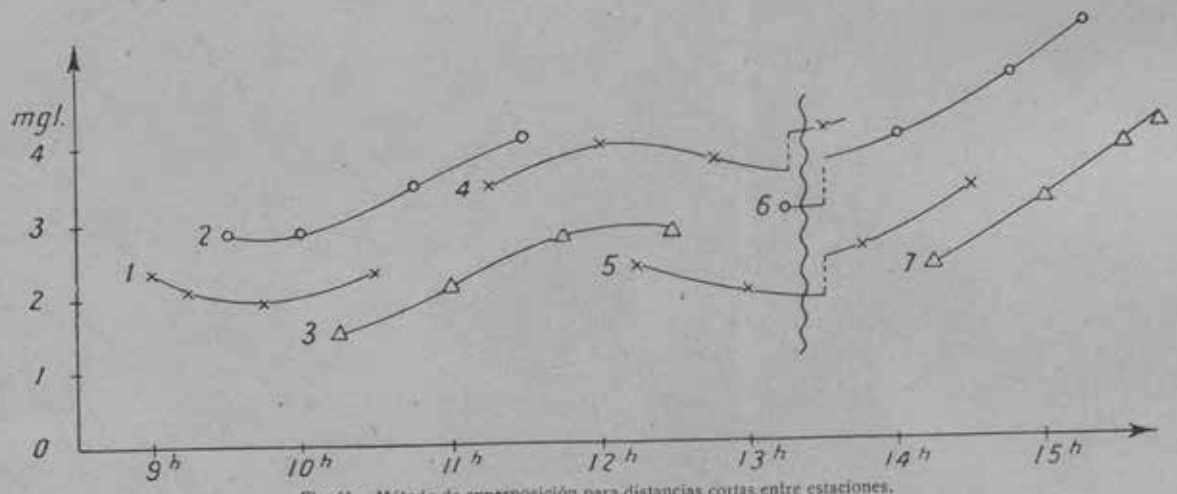


Fig. 61.—Método de superposición para distancias cortas entre estaciones.

igual al valor de 1 división del galvanómetro, determinada antes de comenzar la observación de las estaciones. Se dedujo después la columna VI + VII.

Sobre una hoja de papel milimetrado (fig. 62) se marcaron con los tiempos como abscisas (cada milímetro 1 minuto) y los miligals y fracciones de miligal observados como ordenadas (cada milímetro 0,02 miligal), los cuatro valores obtenidos para la estación 47, que se tomó como estación base para este trozo de perfil señalados con la marca.

A continuación se marcaron en el papel milimetrado los tres valores correspondientes a las restantes estaciones, 48 a 55, del trozo, señalada cada una con una marca distinta, después de corregir convenientemente sus ordenadas a fin de poder trazar la curva del cero, calculando posteriormente sobre esta curva, en centésimas de miligal los valores de las 28 estaciones observadas en este trozo del perfil.

9. Práctica de la observación en el caso del transporte a mano del gravímetro.—Cuando hay que investigar con el gravímetro zonas de terreno privadas de caminos adecuados para la circulación del coche automóvil en que va aquél instalado, no hay más remedio que recurrir a su transporte a mano.

Para estos casos se dispone de una parihuela metálica, en la que se monta el gravímetro en suspensión elástica. El traslado del gravímetro de una estación a la siguiente, se efectúa del siguiente modo: dos hombres se encargan del transporte del gravímetro, seguidos de otros dos que llevan en otra parihuela de madera las dos baterías de acumuladores que se precisan para el funcionamiento del aparato. Estas baterías son distintas de las instaladas en el coche y mucho menos pesadas. Por último, una quinta persona, generalmente un chico joven, tiene por cometido llevar de un sitio al siguiente la basa de apoyo del gravímetro.

Para observar al aire libre hay que tomar la precaución de preservar el aparato de la acción directa de los rayos solares, mediante un quitasol de campaña, especialmente la parte superior del mismo, donde está montado el galvanómetro, pues de lo contrario no se distinguiría, por exceso de luz, el indicador luminoso del mismo, y aun así hay necesidad de colocar sobre el cuerpo del galvanómetro una caja cerrada por cuatro caras y abierta por las dos restantes, haciéndose las lecturas de la escala a través de estas dos últimas.

En los días de viento fuerte la observación al descubierto puede

Gravimetro núm. 25.	Mediciones con gravimetro.	Fecha: 14 de mayo de 1943.
		Perfil: Bailén-Guadalquivir, trozo 6.º
Sensibilidad:	Zona de trabajos:	Hoja única.
7,9 mgls./1 revolución.	Linares-Bailén-Jabalquinto.	Observador: José María Espinosa de los Monteros.

I Número de la estación	II Situación de la estación	III Hora	IV Lecturas contador	V Lecturas Galv.	VI Contador (95 mgls.)	VII Galv (1 div= 0,194 mgls)	VI + VII Miligals	VIII OBSERVACIONES
47	Km. 305,4	17 : 10	95,49	0,00	3,87	0,00	3,87	Estación base del trozo.
48	» 305,6	17 : 16	95,36	+ 0,50	2,84	+ 0,10	2,94	
49	» 305,8	17 : 26	95,52	+ 0,60	4,11	+ 0,12	4,23	
47		17 : 33	95,46	— 1,60	3,63	— 0,31	3,32	
48		17 : 40	95,28	+ 0,30	2,21	+ 0,06	2,27	
49		17 : 48	95,50	0,00	3,95	0,00	3,95	
50	Km. 306,0	17 : 56	95,72	0,00	5,69	0,00	5,69	
51	» 306,2	18 : 05	95,98	+ 0,60	7,74	+ 0,12	7,86	
47		18 : 13	95,35	+ 0,40	2,76	+ 0,08	2,84	Marcada en la fig. 1.ª con ✱.
48		18 : 21	95,26	— 0,50	2,05	— 0,10	1,95	» » » ✻.
49		18 : 28	95,47	+ 0,10	3,71	+ 0,02	3,73	» » » ▲.
50		18 : 35	95,72	+ 0,10	5,69	+ 0,02	5,71	» » » ⊕.
51		18 : 41	96,01	+ 0,40	7,98	+ 0,08	8,06	» » » ⋀.
52	Km. 306,4	18 : 48	96,26	— 0,20	9,95	— 0,04	9,91	» » » ⏀.
53	» 306,6	18 : 55	96,61	— 0,50	12,72	— 0,10	12,62	» » » ∞.
50		19 : 04	95,79	— 0,20	6,24	— 0,04	6,20	
51		19 : 09	96,07	— 0,20	8,45	— 0,04	8,41	
52		19 : 15	96,28	0,00	10,11	0,00	10,11	
53		19 : 22	96,62	— 0,20	12,80	— 0,04	12,76	
54	Km. 306,8	19 : 29	96,73	+ 0,50	13,67	+ 0,10	13,77	Marcada en la fig. 1.ª con ⋓.
55	Km. 307,0	19 : 36	96,90	0,30	15,01	— 0,06	14,95	» » » ⏃.
52		19 : 47	96,29	+ 0,60	10,19	+ 0,12	10,31	
53		19 : 53	96,62	+ 0,60	12,80	+ 0,12	12,92	
54	Carretera Bailén-Jaén.	20 : 00	96,75	+ 0,30	13,82	+ 0,06	13,88	
55		20 : 06	96,92	+ 0,40	15,17	+ 0,08	15,25	
54		20 : 12	96,75	+ 1,00	13,82	+ 0,19	14,01	
55		20 : 18	96,93	+ 0,50	15,24	+ 0,10	15,34	
47		20 : 28	95,52	+ 0,60	4,11	+ 0,12	4,23	

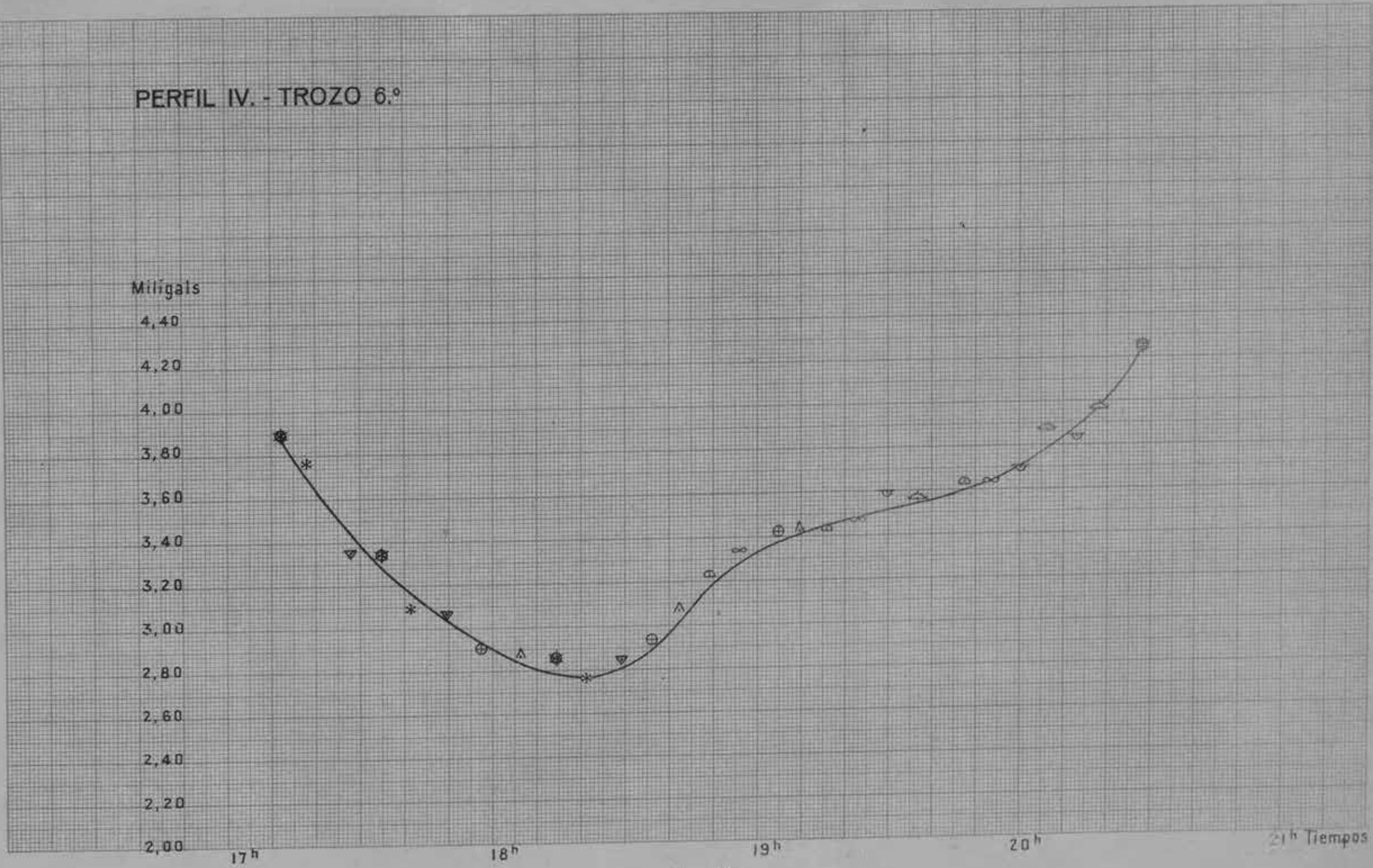

PERFIL IV. - TROZO 6.º
Miligals
4,40
4,20
4,00
3,80
3,60
3,40
3,20
3,00
2,80
2,60
2,40
2,20
2,00
17h
18h
19h
20h
21h Tiempos

Fig.62

verse perturbada por el choque de las rachas de aire contra la envuelta exterior del gravímetro, ya que la conmoción producida se traduce en un vaivén bastante acentuado del indicador del galvanómetro, imposibilitando una lectura precisa de escala. Para eliminar este inconveniente se colocan los propios peones que se utilizan para el transporte delante del gravímetro, y de espalda al viento, con una lona fuerte extendida verticalmente, que actúa de tabique protector.

En las dos campañas realizadas con el gravímetro transportado a mano en las zonas mineras del Castillo de las Guardas (Sevilla) y San Platón (Huelva), en 1943 y 1944, respectivamente, se pudo comprobar que el gravímetro no acusa mayores corrimientos del cero que cuando se le observa dentro de su coche, compensándose, en general, la mayor velocidad que proporciona el coche para el transporte de una estación a la siguiente, con la mucho menor distancia entre los puntos en que se estaciona en el caso de prospecciones gravimétricas como las citadas.

10. Ultimo modelo de gravímetro Askania.—En el año 1942 construyó la Casa Askania un modelo pequeño de gravímetro. Este nuevo tipo, proyectado especialmente para su utilización en terrenos impracticables a coche automóvil, se caracteriza por su poco peso (15 kilogramos), no excediendo el del aparato con sus dos baterías de unos 30 kilogramos.

Las principales ventajas conseguidas por el Dr. Graf, inventor de este modelo y autor, asimismo, del modelo grande, que data del año 1938, son las dos siguientes:

1.ª Construcción más sencilla del aparato, y con ello un ajuste más cómodo y rápido, y

2.ª Mejoramiento del termostato, a consecuencia del menor volumen.

Por lo demás, el principio de la medida se basa, como en el modelo grande, en la indicación fotoeléctrica con compensación mecánica de la desviación producida y lectura, por consiguiente, en cero.

Madrid y agosto de 1945.

Guillermo Sans.

BIBLIOGRAFÍA

1. ANSEL, E. A.—«Theorie der irdischen Schwerefeldes.» (Teoría del campo gravitatorio terrestre.) Berlín, Borntraeger, 1934.
2. ASKANIA-WERKE, A. G.—«Drehwage nach Eötvös-Schweydar.» (Balanza de torsión Eötvös-Schweydar.) Berlín, Friedenau, 1931.
3. ASKANIA-WERKE, A. G.— Beschreibung und Bedienungsanweisung des elektromechanischen Schweremessers der Askania-Werke.» (Descripción e instrucciones para el manejo del gravímetro electro-mecánico Askania.) *Geo.* 790; Berlín, Friedenau, 1940.
4. BARANDICA, M.—«Estudio acerca de la intensidad de la gravedad.» *Boletín del Instituto Geológico de España*, tomo XXXII; Madrid, 1912.
5. BARTON, D.—«Gravity Measurements with the Eötvös Torsion Balance.» (Mediciones de gravedad con la balanza de torsión Eötvös.) *Bul. Nat. Res. Counc.*, número 78, 1931.
6. BERGER, E.—«Drahtlose Fernsteurung von Koinzidens apparaten bei relativen Schweremessungen.» (Accionamiento radio-eléctrico de aparatos de coincidencias en las determinaciones relativas de la gravedad.) *Ztsch. f. Instr.*, tomo XLVIII, número 8, 1928.
7. BOWIE, W.—«Investigations of gravity and isostasy.» (Investigaciones sobre gravedad e isostasia.) *Spec. pub.* núm. 40. Coast and Geodetic Survey-Washington, 1917.
8. CASSINIS, G.—«Sur l'adoption d'une formule internationale pour la pesanteur normale.» *Bul. géod.*, 1930.
9. CASSINIS, G.—«Questioni di gravimetria.» C. R. Río. *Cat. Serv. tec.*, 2º an., núm. 6, 1935.
10. «Determinaciones relativas de la intensidad de la gravedad.» Bajo este título común se comprenden las «Memorias» publicadas en los tomos XIV, XV, XVI y XVII (fascículo II) de las del Instituto Geográfico, en las que se da cuenta de las observaciones gravimétricas españolas realizadas por los Ingenieros Geógrafos D. José Galbis, D. Arturo Mifsut, D. Manuel Barandica, D. Guillermo Sans y D. José María Espinosa de los Monteros.
11. FRANCOIS, CH.—«La balance de torsion de von Eötvös et la prospection gravimetrique.» *Bul. Soc. belg. Ing Ind.*, tomo VIII, 1928.
12. GALBIS, J. «Determinación relativa de la intensidad de la fuerza de gravedad en San Fernando, Duque, Baños y Granada.» *Memorias del Instituto Geográfico y Estadístico*, tomo XIII; Madrid, 1905.
13. GRAF, A.—«Groszeneutfernungsmessungen mit den Askania Gravimeter in Texas.» (Mediciones a largas distancias con el gravímetro Askania en Texas.) *Zeit. f. Geoph.*, 1939.
14. GRAF, A.—«Ein neuer Kleiner Schweremesser.»(Un nuevo gravímetro pequeño.) *Geo.*, 820, 1942.
15. HAALCK, H.—«Ein Statischer Schweremesser». (Un gravímetro estático.) *Zeit. f Geoph.*, 1932.
16. HAALCK, H.—«Der neu statischer Schweremesser des Geodätischen Instituts

in Potsdam.» (El nuevo gravimetro estático del Instituto Geodésico en Potsdam.) *Zeit. f. Geoph.*, 1936.

17. HAALCK, H.—«Bericht über den gegenwärtigen Stand der Entwicklung der statischen Schweremesser.» (Informe sobre el estado actual del desarrollo de los gravímetros estáticos.) *Zeit. f. Geoph.* 1936.

18. HAALCK, H.—«Der statischer (barometrische) Schweremesser für Messungen auf festem Sand und auf See.» (El gravímetro estático barométrico para las mediciones en tierra firme y en mar.) *Zeit. f. Geoph.*, 1939.

19. HAYFORD, J. Y BOWIE, W.—«The effect of topography and isostatic compensation upon the intensity of gravity.» (El efecto de la topografía y compensación isostática en la intensidad de la gravedad.) *Special publications*, núms. 10 y 12; *Coast and Geodetic Survey-Washington*, 1912.

20. HECKER, O.—«Bestimmung der Schwerkraft auf dem Atlantischen Ozean sowie in Rio de Janeiro, Lissabon und Madrid.» (Determinación de la fuerza de gravedad en el Océano Atlántico, así como en Río de Janeiro, Lisboa y Madrid.) *Ver. des Königl. Preuszichen Geodätischen Instituts*; Berlín, 1903.

21. HEISKANEN, W.—«Untersuchungen über Schwerkraft und Isostasie.» (Investigaciones sobre gravedad e isostasia.) *Mem. 4*, 1924.

22. HEISKANEN, W.—«Tables isostatiques pour la reduction dans l'hypothese d'Airy des intensités de la pesanteur observées.» *Bul. geod.*, 1931.

23. HEISKANEN, W.—«Über die finnischen Arbeiten zum Problem der Isostasie.» (Trabajos finlandeses relativos al problema de la isostasia.) *Geol. Rund.*, volumen XXXII; 1941.

24. HOLWECK, F. y LEJAY, P.—«Un Instrument transportable pour la mesure rapide de la gravité.» *Compt. rend. des seances de l'Académie des Sciences*, 190; París, 1930.

25. HOLWECK, F. y LEJAY, P.—«Perfectionements á l'instrument transportable pour la mesure rapide de la gravité.» *Compt. rend. des seances de l'Académie des Sciences*, 192; París, 1931.

26. ISING, G.—«Use of astatized pendulums for gravity measurements.» (Empleo de péndulos astáticos para las mediciones de gravedad.) *The Amer. Inst. of Min. and Met. Eng., Technical*, pub. núm. 828.

27. INGLADA, V.—«Las observaciones gravimétricas.» Talleres del Instituto Geográfico; Madrid, 1923.

28. INGLADA, V.—«Nota acerca de las isanómalas de la gravedad en las regiones central y meridional de España.» Talleres del Instituto Geográfico; Madrid, 1927.

29. INGLADA, V.—«Los procedimientos geofísicos de prospección.» II, III, IV y V (método gravimétrico). *Ing. y Const.*, tomo VI, núms. 65, 66, 68 y 70; Madrid, 1928.

30. INGLADA, V.—«Resultados de las investigaciones isostáticas. *Revista de Geofísica*, núm. 14; Madrid, 1945.

31. JUNG, H.—«Über isostatische Schwereanomalien.» (Sobre las anomalías isostáticas de la gravedad.) *Ztsch. f. Geoph.*, 1931.

32. KOHLSCHÜTTER, E.—«Die Invariabilität und Abstimmung von Minimumpendeln.» (La invariabilidad y sintonización de los péndulos de mínima.) *Ztsch. f. Geoph.*, 1930.

33. LAMBERT, W.—«The Reduction of observed values of Gravity to Sea Level.» (La reducción de los valores observados de la gravedad al nivel del mar.) *Bul. geod.*, 1930.

34. LEJAY, P.—«Recherches sur les pendules elastiques.» *Bull. Geod.* núm. 25; París, 1930.

35. LEJAY, P.—«Determination précise de la durée d'oscillation d'un pendule. Methode d'enregistrement et comparaisons de haute précision sans chronographe.» *J. obs.*, núm. 11, 1928.

36. LEJAY, P Y COSTES, G.—«Sur l'emploi du gravimetre a grande distance des stations de reference; application a l'etablissement de bases de gravité en Indochine.» *C. R. Acad. Sci.*, tomo CXCVI, 1933.

37. MARTÍN, H.—«Das photographische Koinzidenzverfahren und das Pendel

als Zeitmesser.» (El procedimiento de coincidencias fotográfico y el péndulo como medidor del tiempo.) *Veröff, d. Reichsanstalt f. Erdbebenforschung in Iena*; número 17, 1931.

38. MEISSER, O.—«Pendel und Schwingungsdauerverfahren.» (Péndulo y procedimientos para las duraciones de oscilación.) *Veröff, d. Reichsanstalt f. Erdbebenforschung in Iena*, núm. 17.

39 MEISSER, O.—«Die Jenaer Pendelapparaturen und Beobachtungsverfahren für genaue relative Schweremeszungen.» (El equipo pendular de Jena y procedimiento de observación para determinaciones relativas precisas de la gravedad.) *C. R. Comm. geod. balt.*, 5 sesión, Copenhague, 1930.

40. NORLUND, N. E. Y SCHNEIDER, A.—«Observations de l'intensité de la pesanteur avec le nouveau modèle de pendule Holweck-Lejay.» *Inst. Geod. Dan. Mem.*; serie 3, tomo I, 1934.

41. PERRIER, G.—«Les raisons geodesiques de l'isostasie terrestre.» *Ann. du Bul. des Long.*; París, 1926.

42. SANS HUELIN, G.—«La balanza de torsión Eötvös-Schweydar y sus aplicaciones.» Talleres del Instituto Geográfico y Catastral; Madrid, 1924.

43. SANS HUELIN, G.—«Dos campañas de ensayo con la balanza de torsión Eötvös-Schweydar.» Talleres del Instituto Geográfico y Catastral; Madrid, 1926.

44. SANS HUELIN, G. – «Las anomalías de la gravedad en España y la profundidad de compensación isostática más probable.» *Boletín del Instituto Geológico de España*, tomo XLVII, VII de la 3.ª serie; Madrid, 1926.

45. SANS HUELIN, G.—«La gravedad en el mar.» Instituto Español Oceanográfico. Not. y Res., tomo II, núm. 25; Madrid, 1928.

46. SANS HUELIN, G. – «Observaciones geofísicas en el Cerro de Mulhacen.» *Boletín de la Sociedad Geográfica*, tomo 71; núm. 11-12; Madrid, 1931.

47. SANS HUELIN, G.—«Invariabilidad de los péndulos gravimétricos.» Asociación española para el progreso de las Ciencias. Congreso de Lisboa, 1932.

48. SANS HUELIN, G.—«Nuevas investigaciones gravimétricas sobre los mares.» *Memoria del Consejo Oceano Ibero-americano*; Madrid, 1932.

49. SANS HUELIN, G.—«Enlace gravimétrico de España con Francia.» *Boletín de la Sociedad Geográfica Nacional*, tomo LXXIII, núm. 8; Madrid, 1933.

50. SANS HUELIN, G.—«Pruebas realizadas y ensayos con el gravímetro electro mecánico Askania, núm. 25.» Talleres del Instituto Geográfico y Catastral; Madrid, 1943.

51. SANS HUELIN, G.—«Consideraciones relativas a la determinación del gradiente vertical de la gravedad.» *Revista de Geofísica*, núm. 10; Madrid, 1944.

52 SANS HUELIN, G.—«La gravimetría y su desarrollo actual.» *Revista de Geofísica*, núm. 13; Madrid, 1945.

53. SANS HUELIN, G.—«La determinación de la figura de la Tierra y el teorema de Stokes.» *Revista de Geofísico*, núm. 14; Madrid, 1945.

54 SANS HUELIN, G.—«Determinaciones de la longitud del péndulo que bate segundos efectuadas por marinos de la Real Armada Española en el transcurso del siglo XVIII.» Talleres del Instituto Geográfico y Catastral, Madrid, 1946.

55. SANS HUELIN, G. Y ESPINOSA DE LOS MONTEROS, J. M.—«Determinación de perfiles con el gravímetro electromecánico Askania, núm. 25, en la zona Linares - Bailén - Jabalquinto.» Talleres del Instituto Geográfico y Catastral; Madrid, 1943.

56. SANS HUELIN, G. Y ESPINOSA DE LOS MONTEROS, J. M.—«Investigación gravimétrica en la zona minera del Castillo de las Guardas.» Talleres del Instituto Geográfico y Catastral; Madrid, 1944.

57. SANS HUELIN, G. Y ESPINOSA DE LOS MONTEROS, J. M.—«Investigación gravimétrica en las Concesiones mineras de la Corrida de S. Platón.» Talleres del Instituto Geográfico y Catastral; Madrid, 1945.

58. SCHMEHL, H.—«Ein Beitrag zum Zweipendelverfahren bei relativen Schweremessungen.» (Contribución al sistema de dos péndulos en las determinaciones relativas de la gravedad.)» *Ztsch. f. Geoph.*, 1932

59. SOLER, E. — «Su alcune formule ordinariamente adoparate per la riduzione della gravitá osservata al geoide e sulla lore verifica sperimentale.» *Bul. geod.*, 1929

60. SOLER, E.—«Progetto per rilegamento delle stazioni gravimetriche di riferimento nazionali.» Tip. del Seminario; Padua, 1930.

61. SOLER, E.— «Stationes de reférence nationales pour les mesures de l'intensité de la pesanteur.» *Bul. geod.*, núm. 37, 1933.

62. SOMIGLIANA, C. — «Sulla determinazione delle constanti del geoide mediante misure di gravitá.» Atti. R. Accad. Tor., tomo LXII, 1929.

63. VENING MEINESZ, F. A.—«Determination de la pesanteur en mer.» Rijkscomm, Graadm. Waterp., 1928.

64. VENING MEINESZ, F. A.—«Theory and practice of pendulum observations at sea.» (Teoría y práctica de las observaciones pendulares en el mar.) Rijkscomm Graadm. Waterp., 1929.

65. VENING MEINESZ, F. A.—«Gravity expeditions at sea 1923-30.» Vol. I: «The Expeditions, the Computations and the Results.» (Expediciones gravimétricas en el mar, 1923-30.) Vol. I: (Las expediciones, los cálculos y los resultados.) J. Waltman Jr.; Delft., 1932.

66. VENING MEINESZ, UMBGROVE, J. H. F Y KUENNEN, PH, H. «Gravity expeditions at sea, 1923-32.» Vol. II: «Report of the Gravity Expedition in the Atlantic. of 1932 and the interpretation of the Results.» (Expediciones gravimétricas en el mar, 1923-32.) Vol. II: (Informe de la expedición gravimétrica de 1932 en el Atlántico y la interpretación de los resultados.) J. Waltman Jr.; Delft., 1934.

67. VENING MEINESZ, F. A.—«La réduction isostatique selon l'hypothèse de Airy.» *Bul. geod.* núm. 38, 1933.

ESTADO 1

BRIVIESCA 4 DE JUNIO DE 1940

Hora de la primera señal de París	22h	34m	41s,93
Hora sidérea a m. n. m.	16	49	7 ,82
Hora Greenwich	15	23	49 ,75
Diferencia de longitudes		13	18 ,00
Hora local	15	10	31 ,75
Hora Strasser	15	10	45 ,34
Estado Strasser			13 ,59

COMPARACIONES

Coincidencias	Intervalos	Señal coincidente	Intervalos	Tiempos	Hora primer top.
15h 11m 10s		26	25	24s,65	15h 10m 45s,35
12 21	71	98	97	1m 35 ,65	45 ,35
13 32	71	170	169	2 46 ,67	45 ,33
14 44	72	243	242	3 58 ,68	45 ,32
				Promedio.	15 10 45 ,34

Día 4 = — 13s,59
Día 3 = — 13 ,82

Movimiento en 24 h. = + 0 ,23

ESTADO 2

BRIVIESCA 4 DE JUNIO DE 1940

Observador G. Sans.—Péndulo núm. 104

HORA		Barómetro	Temperatura	Higrómetro	AMPLITUD Arriba	AMPLITUD Abajo	Temperatura del péndulo
Principio.	7,35	703,9	15,0	10,5	5,0	5,0	15,2
Fin.....		704,1	15,0	10,5	3,0	2,1	15,2
Medias...		704,0	15,0	10,25	8,0	7,1	15,20
					7,55		15,13
					11,3		

1	23	07	47	21	00	01	47	54 — 00	3240 + 00,5 = 3240,5
2		10	33	22		04	33	00	
3		13	10	23		07	12	02	$C = 162^s,025$
4		15	56	24		09	57	01	
5		18	35	25		12	36	01	
6		21	21	26		15	21	00	
7		23	58	27		18	00	02	
8		26	45	28		20	44	53 — 59	
9		29	22	29		23	22	54 — 00	
10		32	10	30		26	10	54 — 00,5	
11	23	34	47						
12		07	47						
13		27	00						
14			× 2						
15		54	00						
17	23	07	47						
18	00	01	47						

ESTADO 3

Principio de la oscilación: 12h, 36m, 30s.

Péndulo	HORA	AMPLITUD Arriba	AMPLITUD Abajo	Amplitudes deducidas
104	12 45	5,0	4,7	9,7
106	46	0,36	0,09	0,27
106	47	0,40	0,09	0,31
104	48	0,5	4,5	9,5
	Amplitudes.....			19,2 0,58

Valor de $\alpha = 19{,}2$ Valor de $\alpha' = 0{,}63$

$$\varepsilon = \frac{\alpha'}{\alpha}\,\Delta = \frac{0{,}63}{19{,}2} \times 0{,}000134 = 0{,}0000044$$

Péndulo	HORA	AMPLITUD Arriba	AMPLITUD Abajo	Amplitudes deducidas
104	12 55	4,0	4,9	8,9
106	56	1,37	0,75	0,62
106	57	1,37	0,75	0,62
104	58	4,0	4,7	8,7
	Amplitudes.....			17,6 1,24

Valor de $\alpha = 17{,}6$ Valor de $\alpha' = 1{,}35$

$$\varepsilon = \frac{\alpha'}{\alpha}\,\Delta = \frac{1{,}35}{17{,}6} \times 0{,}000067 = 0{,}0000051$$

Péndulo	HORA	AMPLITUD Arriba	AMPLITUD Abajo	Amplitudes deducidas
104	12 50	5,0	4,3	9,3
106	51	1,43	0,95	0,48
106	52	1,43	0,94	0,49
104	53	5,0	4,1	9,1
	Amplitudes.....			18,4 0,97

Valor de $\alpha = 18{,}4$ Valor de $\alpha' = 1{,}06$

$$\varepsilon = \frac{\alpha'}{\alpha}\,\Delta = \frac{1{,}06}{18{,}4} \times 0{,}000089 = 0{,}0000051$$

Péndulo	HORA	AMPLITUD Arriba	AMPLITUD Abajo	Amplitudes deducidas
104	13 00	4,0	4,5	8,5
106	01	1,60	0,83	0,77
106	02	1,60	0,83	0,77
104	03	4,0	4,3	8,3
	Amplitudes.....			16,8 1,54

Valor de $\alpha = 16{,}8$ Valor de $\alpha' = 1{,}68$

$$\varepsilon = \frac{\alpha'}{\alpha}\,\Delta = \frac{1{,}68}{16{,}8} \times 0{,}000054 = 0{,}0000054$$

ESTADO 4

ESTACIÓN DE BRIVIESCA

Cálculo de la duración de la oscilación observada.

FECHA	Número del péndulo	Valores de c.	$4c-2$	$s=\frac{1}{2}+\frac{1}{4c-2}$
4 junio 1940	104	162.025	646.100	0.5015477
»	105	154.250	615.000	6260
»	106	159.685	636.740	5705
»	107	152.945	609.780	6399
»	104	161.745	644.980	5504
»	105	154.080	614.320	6278
»	106	159.315	635.260	5742
»	107	152.700	608.800	6426
5 junio 1940	104	161.455	643.820	5532
»	105	153.800	613.200	6308
»	106	159.025	634.100	5770
»	107	152.450	607.800	6453
»	104	161.140	642.560	5563
»	105	153.535	612.240	6333
»	106	158.775	633.100	5795
»	107	152.255	607.020	6474

ESTADO 5

ESTACIÓN DE BRIVIESCA

Cálculo de la tensión del vapor de agua.

FECHA	Péndulos	Temperaturas	B	$e = f' - \frac{0{,}480\,(T - t')}{610 - t'} B$
4 junio 1940	104	$T =$ 15,00 $t' =$ 10,25 $T - t' =$ 4,75	704,00	Tensión correspondiente. = 6,45 Corrección..... = 0,19 $e = 6{,}64$
»	105	$T =$ 15,25 $t' =$ 9,75 $T - t' =$ 5,50	740,05	Tensión correspondiente. = 5,69 Corrección..... = 0,22 $e = 5{,}91$
»	106	$T =$ 15,50 $t' =$ 10,25 $T - t' =$ 5,25	703,85	Tensión correspondiente. = 6,14 Corrección..... = 0,21 $e = 6{,}35$
»	107	$T =$ 15,50 $t' =$ 11,00 $T - t' =$ 4,50	703,60	Tensión correspondiente. = 7,07 Corrección..... = 0,18 $e = 7{,}25$
»	104	$T =$ 15,75 $t' =$ 11,25 $T - t' =$ 4,50	702,90	Tensión correspondiente. = 7,23 Corrección..... = 0,18 $e = 7{,}41$
»	105	$T =$ 16,25 $t' =$ 11,50 $T - t' =$ 4,75	702,55	Tensión correspondiente. = 7,24 Corrección..... = 0,19 $e = 7{,}43$
»	106	$T =$ 16,50 $t' =$ 11,50 $T - t' =$ 5,00	702,40	Tensión correspondiente. = 7,09 Corrección..... = 0,22 $e = 7{,}31$
»	107	$T =$ 16,50 $t' =$ 11,50 $T - t' =$ 5,00	702,35	Tensión correspondiente. = 7,09 Corrección..... = 0,22 $e = 7{,}31$

ESTADO 6

ESTACIÓN DE BRIVIESCA

Cálculo de la corrección por presión.

Fecha	Péndula	B	e	$B-\frac{3}{8}e$	T	$\log\left(B-\frac{3}{8}e\right)$ $\log\frac{\lambda}{D}$ $\log N+\log\frac{\lambda}{D}$	$\varphi=\frac{B-\frac{3}{8}e}{760\,(1+0{,}00367\,T)}$
4 jun. 1940	104	704,00 2,48	6,64	701,52	15,13	2,8460401 $\bar{1}$,9250663 2,7711064	$\varphi=590$
»	105	704,05 2,21	5,91	701,84	15,18	2,8462381 $\bar{1}$,9274813 2,7737194	$\varphi=594$
»	106	703,85 2,40	6,35	701,45	15,18	2,8459967 1,9184331 2,7644298	$\varphi=581$
»	107	703,60 2,70	7,25	700,90	15,28	2,8456561 $\bar{1}$,9202371 2,7658932	$\varphi=583$
»	104	702,90 2,78	7,41	700,12	15,47	2,8451725 $\bar{1}$,9244625 2,7696350	$\varphi=588$
»	105	702,55 2,78	7,43	699,77	15,57	2,3449553 $\bar{1}$,9268778 2,7718331	$\varphi=591$
»	106	702,40 2,74	7,31	699,66	15,72	2,8448870 $\bar{1}$,9176789 2,7625659	$\varphi=579$
»	107	702,35 2,74	7,31	699,61	15,87	2,8448560 $\bar{1}$,9193325 2,7641885	$\varphi=581$

ESTADO 7

ESTACIÓN DE BRIVIESCA

Cálculo de la corrección por temperatura.

FECHA de la observación	PÉNDULO 104 $\tau = 48{,}11$		PÉNDULO 105 $\tau = 47{,}38$		PÉNDULO 106 $\tau = 47{,}91$		PÉNDULO 107 $\tau = 47{,}30$	
	T	τ T	T	τ T	T	τ T	T	τ T
4 junio 1940	15,13	728	15,18	719	15,18	727	15,28	723
»	15,47	744	15,57	738	15,72	753	15,87	751
5 junio 1940	15,92	766	15,97	757	16,07	770	16,17	765
»	16,32	785	16,37	776	16,47	789	16,52	781

ESTADO 8

CORRECCIÓN POR EL MOVIMIENTO DE RELOJ

$$\alpha = \frac{s \times u}{86.400} \times 10^{-7}$$

FECHA	s	u	α	α (promedio)
4 junio 1940	Máximo: 0,5016426 Mínimo: 0,5015477	+ 0,28	+ 13.3 + 13.3	13×10^{-7}
5 junio 1940	Máximo: 0,5016474 Mínimo: 0,5015532	— 0,14	— 8.1 — 8.1	-8×10^{-7}

ESTADO 9

ESTACIÓN DE BRIVIESCA

Cálculo de las oscilaciones del soporte

Método de Borrás $\Delta = \frac{s'-s}{2}\ cosec\ \frac{\pi(s'-s)}{2ss'}\ t$

Péndulo 104		Péndulo 106	
	0,5015477		0,5015705
	504		42
	532		70
	563		95
Promedio $= s =$	0,5015519	Promedio $= s' =$	0,5015753

$s' = s = 0{,}0000234 \qquad \frac{s'-s}{2} = 0{,}0000117 \qquad s' \times s = 0{,}25157$

$$\text{Log}\ \frac{\pi}{2} = \log 5.400 = 3.7323938$$
$$\text{Log}\ s' - s = \bar{5}.3692159$$
$$\Sigma = \bar{1}.1016097$$
$$\text{Log}\ s' \times s = \bar{1}.4006588$$
$$\text{Log}\ \frac{\pi(s'-s)}{2s's} = \bar{1}.7009509 \qquad \frac{\pi(s'-s)}{2s's} = 0{,}50229$$

	Grados	Minutos	Segundos
$t = 10^m$	5	01	21
$t = 15^m$	7	32	01
$t = 20^m$	10	02	42
$t = 25^m$	12	33	21
$t = 30^m$	15	04	02
$t = 35^m$	17	34	41
$t = 40^m$	20	05	24
$t = 45^m$	22	36	01

Valores de Δ *para los diversos de* t

$t = 10 \quad \Delta = \ + \ = 0{,}000134$
$t = 15 \quad \Delta = \ + \ = 89$
$t = 20 \quad \Delta = \ + \ = 67$
$t = 25 \quad \Delta = \ + \ = 54$
$t = 30 \quad \Delta = \ + \ = 45$
$t = 35 \quad \Delta = \ + \ = 38$
$t = 40 \quad \Delta = \ + \ = 34$
$t = 45 \quad \Delta = \ + \ = 30$

ESTADO 10

ESTACIÓN DE BRIVIESCA

Observador: Sans Huelin.

FECHA — 1940	Péndulo — Número	Hora media local	Hora de observación	Presión atmosférica reducida	Tensión del vapor de agua	Temperatura del péndulo	Amplitud de oscilación	Estado del reloj	Período de las coincidencias	Duración de la oscilación observada	REDUCCIONES ×10⁻⁷ A la amplitud infinitamente pequeña	Al vacío	Por temperatura	A tiempo sidéreo	Por balance del sostén	Duración de la oscilación reducida
		h m	h m	mm	mm	°	′	s	s	s						
4 junio	104	7 35	23 08	704,00	6,64	15,13	11,3	0,23	162,025	0,5015477	— 3	— 590	— 728	13	— 45	0,5014124
	105	9 25	0 58	704,05	5,91	15,18	11,6	0,23	154,250	6260	— 4	— 594	— 719	13	— 48	4908
	106	10 45	2 16	703,85	6,35	15,18	11,5	0,23	159,685	5705	— 4	— 581	— 727	13	— 45	4361
	107	12 05	3 40	703,60	7,25	15,28	11,6	0,23	152,945	6399	— 4	— 583	— 723	13	— 48	5054
	104	14 15	5 54	702,90	7,41	15,47	11,6	0,23	161,745	5504	— 4	— 588	— 744	13	— 45	4136
	105	15 40	7 14	702,55	7,43	15,57	11,5	0,23	154,080	6278	— 4	— 591	— 738	13	— 48	4910
	106	16 55	8 30	702,40	7,31	15,72	11,6	0,23	159,315	5742	— 4	— 579	— 753	13	— 45	4374
	107	18 15	9 51	702,35	7,31	15,87	11,6	0,23	152,700	6426	— 4	581	— 751	13	— 48	5055
5 junio	104	8 00	23 40	703,00	7,57	15,92	11,3	— 0,14	161,455	5532	— 3	— 588	— 766	— 8	— 45	4122
	105	9 40	1 18	702,15	7,59	15,97	11,6	— 0,14	153,800	6308	— 4	— 590	— 757	— 8	— 48	4901
	106	11 00	2 35	701,90	7,76	16,07	11,5	— 0,14	159,025	5770	— 4	— 577	— 770	— 8	— 45	4366
	107	12 15	3 54	702,05	7,79	16,17	11,5	— 0,14	152,450	6453	— 4	— 580	— 765	— 8	— 48	5048
	104	14 55	6 23	701,25	7,65	16,32	11,3	— 0,14	161,140	5563	— 3	— 585	— 785	— 8	— 45	4137
	105	16 15	7 53	701,65	7,65	16,37	11,6	— 0,14	153,535	6333	— 4	— 589	— 776	— 8	— 48	4908
	106	17 35	9 12	702,20	7,79	16,47	11,5	— 0,14	158,775	5795	— 4	— 577	— 789	— 8	— 45	4372
	107	18 55	10 31	702,60	7,91	16,52	11,6	— 0,14	152,255	6474	— 4	— 580	— 781	— 8	— 48	5053