LIBRO II.

DE LA TIERRA.

CAPITULO I.

§ 1.

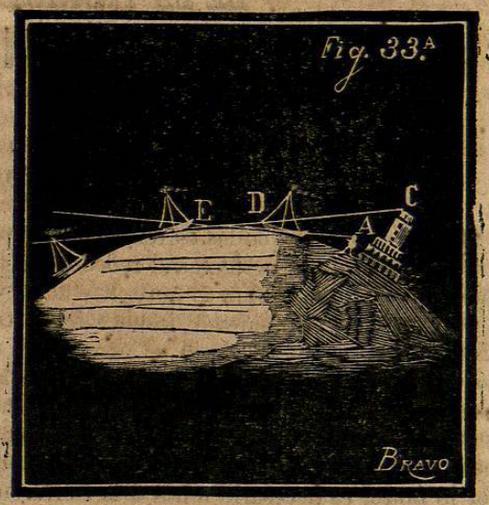
Posicion de la Tierra en el espacio.—Su forma.

48. Hemos visto que las estrellas circumpolares describen aparentemente círculos perfectos al rededor del polo, y que las más lejanas del polo salen sobre el horizonte al E. y se ponen debajo de él al O. para volver á aparecer despues de un tiempo fijo al Oriente. Ahora bien, es muy natural el pensar que estas estrellas tambien describen, como las circumpolares, círculos perfectos y paralelos al rededor del polo, continuando su movimiento debajo del horizonte. Esto, sin embargo, no podria tener lugar si la tierra no fuese limitada, y si tuviera que descansar sobre algun fundamento. Por lo tanto, es necesario mirar á la tierra como un cuerpo aislado en el espacio y rodeado por todas partes de las estrellas. De aquí es fácil reconocer su forma sensiblemente esférica. En un país cualquiera despejado de montañas, y sobre todo en alta mar, la línea que limita la vista, ó sea la línea del horizonte, es siempre un círculo cuyo centro ocupa el observador. Cuanto más se eleva uno sobre la superficie, más se agranda este círculo. Puesto que se verifica dicho fenómeno en todos los puntos de la tierra, y sabiéndose por la geometría que la esfera es el único cuerpo que puede verse bajo una forma circular por cualquier punto que se le mire, se deduce que la tierra es sensiblemente esférica. Otra razon más nos convencerá de la redondez de la tierra.

49. Supongamos un buque (fig. 33) que sale del puerto; á medida que vá alejándose, se le verá disminuir progresivamente; muy luégo parecerá que toca con su quilla la línea del horizonte, poco á poco se perderá de vista el casco, despues las velas, y al fin desaparecerá del todo, pues la visual del observador es solo tangente en un punto de vista fijo D, de la superficie que representa el límite de la vista, ó el horizonte sensible. Pero si el observador desde el punto A sube á la altura de una torre C, la visual será tangente en otro punto E más lejano que el primero, y de consiguiente, por la depresion del horizonte, aumentará el círculo límite de la vista, y vol-

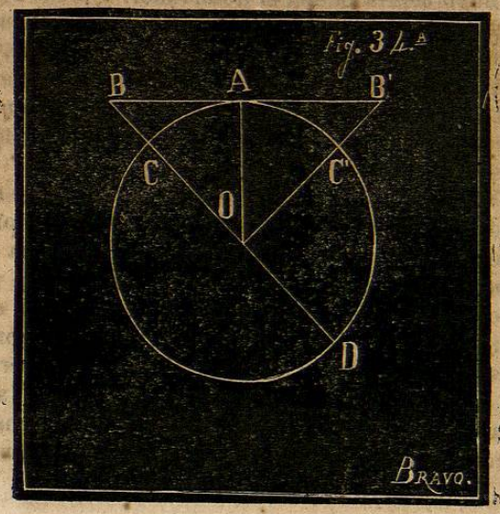
verá á verse enteramente el buque, el cual en corto tiempo desaparecerá como antes: fenómeno imposible si la tierra no fuera esférica.

50. Esta forma convexa de la tierra no es alterada sensiblemente por las montañas, pues la altura de las montañas más elevadas con relacion al diámetro terrestre (1) podria ser representada por la relacion de un granito de arena de un cuarto de milímetro sobre un globo de cuatro decímetros de diámetro.



51. La prueba más irrefragable de la redondez de la tierra son los viajes al rededor del globo. Cualquiera que haya emprendido largos viajes, puede

(1) Podemos hallar fácilmente la longitud del diámetro terrestre, por el método siguiente: sabemos por experiencia que poniendo dos piquetas que tengan una altura de metro y medio sobre el suelo á la distancia de dos leguas una de otra se pierden de vista, pues la visual que une los puntos extremos BB', es tangente á la superficie en el punto A (fig. 34). Enseña la geometría que la tangente de un punto es media proporcional entre la secante entera y la parte exterior de la misma secante. Supuesto esto, sean las dos piquetas BC, B'C' situadas á la distancia de dos leguas, y cuya altura sea igual á un metro y medio, tendrémos la siguiente proporcion: $\frac{BD}{BA} = \frac{BA}{BC}$. La relacion



dar fé de ello. Cook, D'Urville, Franklin, Colon, Magallanes, que han descubierto nuevas tierras y nuevos mares en la superficie del globo, en cualquier punto en que se hallaban, se veian siempre como en el centro de un círculo cuya circunferencia era el límite del horizonte, mientras tanto iba variando sobre su cabeza la posicion de las constelaciones en la esfera celeste. El último especialmente, que intentó el viaje entero al rededor del globo, salió de España el 20 de Setiembre de 1519, se dirigió al Oeste, pero impedido para seguir su viaje en dicha direccion por el continente Americano, bajó al Sur hasta que encontró paso por el estrecho que lleva su nombre, y entró en el Pacífico; pero llegando á la isla de Zebú, fué muerto por los indígenas. Su lugarteniente Sebastian del Cano, continuó el viaje al Oeste, pasando al S. de la India, y doblando el Cabo de Buena Esperanza, llegó al puerto de Sanlúcar de Barrameda en la provincia de Cádiz, de donde habia salido tres años antes el 6 de Setiembre de 1522.

52. Estos hechos dan un argumento irrefragable de la redondez de la tierra y de su aislamiento en el espacio, por lo cual se la puede considerar como un globo situado en el centro de la esfera estrellada.

En vista de esto, podemos suponer que los centros de estas dos esferas coinciden; en este caso todos los círculos máximos y menores de que hemos hablado tratando de las estrellas, podrán imaginarse proyectados sobre el globo terrestre. Así los dos polos celestes determinarán los polos de la tierra, el eje de la tierra coincidirá con el eje del mundo, y el plano del ecuador terrestre será determinado por la direccion del ecuador celeste. Perpendicularmente á este ecuador podrán imaginarse tantos meridianos cuantos círculos horarios hemos imaginado para las diferentes estrellas, y los círculos paralelos corresponderán á los paralelos de la esfera celeste. Suele, sin embargo, dividirse el globo terrestre más generalmente en cinco zonas: la ecuatorial que abraza una extension de 23°, 27′ por uno y otro lado del Ecuador, determinada por los círculos tropicales; las templadas entre los trópicos y los círculos polares que se hallan á los 67°; finalmente las dos glaciales en cuyo centro se encuentran

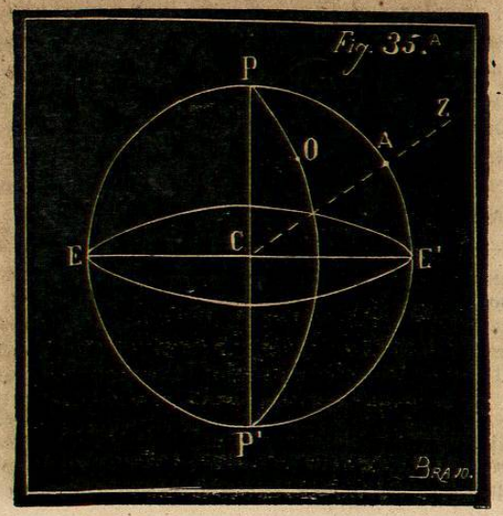
pues entre BD y BA es la misma que entre BA y BC. Ahora bien, si dividimos BA por BC, hallarémos que una legua (ó sea 4,444ᵐ) es casi igual á 2962 veces BC, siendo $\frac{4,444}{1,5} = 2962$; por consiguiente toda la longitud BD será tambien igual á 2962 veces BA. Mas siendo BA = 1 legua = 4,444ᵐ, será BD = 2962 leguas, ó sea = 2962 × 4,444ᵐ. De aquí resulta CD = BD — — BC = 2962 + 4,444ᴹ 1ᴹ5 = 13.163,128ᴹ. Este es, pues, aproximadamente el valor del diámetro terrestre. He dicho aproximadamente, pues siendo el cálculo anterior deducido de la depresion del horizonte, no es susceptible de grande exactitud; á más de que se supone en dicho cálculo que la tierra es perfectamente esférica, lo que probaremos despues no ser cierto (§ 5).

los polos. Los círculos meridianos se llaman tambien *círculos de longitud*, y los paralelos que determinan las diferentes distancias en grados del ecuador á los polos, se llaman *círculos de latitud*. Llámanse *coluros* dos círculos máximos que, pasando por los polos, determinan los meridianos de los dos puntos equinocciales, y otros dos puntos diametralmente opuestos situados á 90° de los equinoccios que se llaman *coluros de los solsticios*, así como los primeros se llaman *coluros de los equinoccios*.

§ 2.

Coordenadas geográficas.

53. Las coordenadas geográficas son un sistema de dos ángulos, por los cuales se determina la posicion de un punto cualquiera de la superficie terrestre, á semejanza de las coordenadas celestes. Estos dos ángulos son la *latitud* y la *longitud;* el primero corresponderia á la declinacion de una estrella, el segundo al ángulo horario ó á la ascencion recta. Si se concibe el centro de la esfera celeste coincidiendo con el centro de la tierra, segun hemos dicho antes, y el eje del mundo con el eje de la tierra, el plano del ecuador cortará al globo en un círculo máximo que es el *ecuador* terrestre; y el plano de un meridiano cualquiera, supuesta la tierra perfectamente esférica, la cortará en otro círculo máximo que es el *meridiano* terrestre. Con estos dos círculos tendrémos las dichas coordenadas. Llámase *latitud* el ángulo formado por la vertical de un punto cualquiera A (fig. 35) con el plano ecuatorial, ó sea la distancia del punto A al ecuador, contada sobre el meridiano desde el ecuador al polo, ó sea de 0° á 90°. La *longitud* es el ángulo diedro PEP'P que el meridiano de un punto determinado A forma con el meridiano de otro lugar O, ó sea POP', el cual se toma como orígen de la graduacion, y es arbitrario, ó de otro modo: la longitud es la distancia del meridiano de un lugar, al meridiano que se toma por orígen. Segun esto, el arco del ecuador interceptado por dos meridianos, dará la diferencia de longitud entre los dos puntos extremos. Ordinariamente se toma por primer meridiano el que pasa por París [el punto exacto es el Observatorio]; los ingleses y norte-americanos tienen por primero el que pasa por el observatorio de Greenwich; otras veces lo ha sido el que recae sobre la isla de "Hierro". De todos modos cualquiera que sea el primer meridiano, la *longitud* toma las denominaciones de *oriental* y *occidental*, segun que el lugar de que se trata se halla al E. ú al O. del primer meridiano, y se cuenta de 0° á 180° por uno y otro lado; así como la latitud toma las denominaciones de *boreal* y *austral* segun que el lugar en cuestion se halla en el hemisferio boreal ó austral; por abreviacion suele ponerse el signo + para indicar la latitud boreal, y el signo — para la austral. Tratándose de los diferentes meridianos que se toman arbitrariamente como primeros, fácilmente se encuentra la longitud de un lugar con relacion al uno ú al otro. Así v. gr. la longitud de un lugar que cuenta por primer meridiano el de Greenwich se reduce á la de París, añadiendo ó restando la diferencia de longitud entre los dos lugares, que es 2°, 20′, 09″ segun que el punto de que se trata se halla al O. ó al E., advirtiendo que Greenwich está al O. de París. En las fórmulas se suele denotar la longitud con la letra L, y la latitud con la letra λ. Así tendrémos:



Constantinopla	L =	26°, 38′, 50″ E.
New York	L =	73°, 35′, 32″ O.
París	λ =	+ 48°, 50′, 11″ N.
México	λ =	+ 19°, 28′, 20″ N.
Santiago de Chile	λ =	— 33°, 26′, 28″ S.

§ 3.

Medidas de las coordenadas geográficas.

54. Siendo la longitud el arco del ecuador interceptado por dos meridianos extrémos, puede medirse por la diferencia de horas en un mismo instante de tiempo absoluto, del mismo modo que la ascension recta se reduce á ángulo horario y viceversa. Así v. gr.: verificándose el principio de un eclipse de Luna para el hemisferio en que pueda observarse al mismo tiempo, este podrá ser notado por dos observadores en horas diferentes en dos lugares distan-

tes entre sí por la diferencia de meridiano. La diferencia de tiempo entre las dos observaciones simultáneas reducidas á grados, dará la diferencia de longitud. Si el eclipse se verifica en París á la 1^h, 32^m, 40^s de la mañana, y en Washington á las 8^h, 15^m, 08^s de la noche, la diferencia de 5^h, 17^m, 34^s multiplicada por 15, dará la longitud en grados = 79°, 23′, 00″. Este método, sin embargo, tan en uso entre los antiguos, ya no se emplea como lo veremos despues, por no ser exacto.

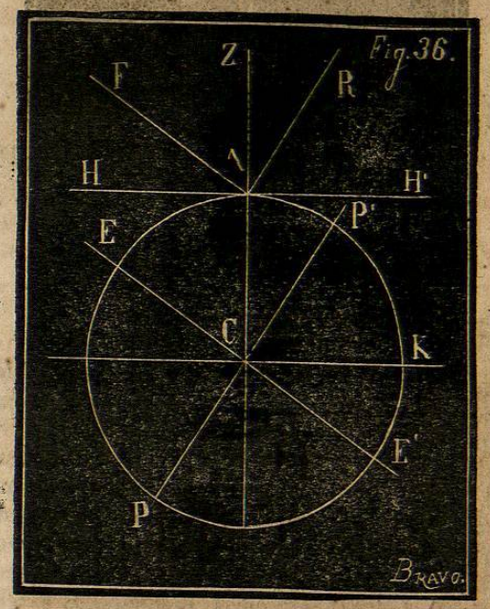
55. Actualmente en los continentes se hace uso del telégrafo para conocer la diferencia de longitud; siendo la señal dada por el telégrafo sensiblemente simultánea en los dos lugares, las diversas horas indicadas por los cronómetros bien arreglados por el paso del sol por el meridiano en cada una de las estaciones, darán la diferencia de tiempo, la que reducida á grados, dará la diferencia en longitud.

56. Los marinos usan otro método: llevan consigo uno ó más cronómetros arreglados sobre el meridiano principal, que ordinariamente es el de París, ó el de Greenwich. Estos dan á cada instante la hora del primer meridiano; de consiguiente, determinando la hora del lugar en que se hallan por la observacion de la altura del sol, la diferencia de dicha hora con la que marca el cronómetro les dá la diferencia de longitud. La diferencia de horas en dos lugares determinados, depende del atraso ó adelanto del paso del sol por el meridiano. Dijimos que Sebastian del Cano, volviendo á Europa despues de su viaje al rededor del globo, llegó el 6 de Setiembre al puerto de Sanlúcar, sin embargo el libro de cuentas de á bordo, marcaba el 5 del mismo mes: se hallaban, pues, con un dia de atraso. Fácilmente puede darse razon de este fenómeno, si se considera que cuando salieron la primera vez, marchando hácia el O, el curso del navío se adelantaba cada dia al curso del sol, de modo que el dia para los que viajaban era mas largo que para los que quedaban en tierra: todos estos excesos de cada dia correspondientes á los 360° recorridos en toda la vuelta, suman 24 horas exactas, y por lo tanto dan un dia de atraso. Para un lugar que tuviera 180° de longitud occidental habria un retraso de 12 horas; el sol para ese lugar se levanta en el mismo instante en que se pone con respecto al lugar del primer meridiano. Tratándose de longitudes orientales se verificaria lo contrario, pues habria un adelanto en el cómputo de los dias. Si se hiciera el viaje al rededor del mundo dirigiéndose al E, resultaria un dia de más, pues en este caso los dias serian más cortos que en el lugar de donde se salió.

57. Hay tambien otro método que se llama de *señales*, y sirve para cortas distancias. Desde la altura de una montaña diríjase la vista á un punto dado: hágase una señal convenida como la de encender una pequeña cantidad de pólvora etc: anótese la hora de los dos lugares en que se verificó y percibió la señal; la diferencia de horas convertidas á grados, dará la diferencia en longitud.

58. Los astrónomos se sirven, especialmente en la actualidad de la observacion de los eclipses de los satélites de Júpiter para averiguar las longitudes, pero de estos hablarémos más tarde.

59. Para hallar la *latitud* de un lugar, basta averiguar la altura del polo sobre el horizonte, pues los dos ángulos son iguales por ser complementos de la distancia zenital del polo. En efecto, sea PP′ (fig. 36) el eje de la tierra, EE′ el ecuador, PAP′ el meridiano, A un lugar cualquiera. La latitud del punto A será el ángulo ACE =ZAF por ser ángulos correspondientes; y el ángulo P′CK=RAH′ por la misma razon. Estando el polo celeste á una distancia infinita, las dos rectas AR y CP′ y sus perpendiculares FA y EC irán respectivamente á dirigirse al mismo punto del cielo, de manera que el punto A podemos considerarlo trasladado al punto C. Supuesto esto, resultan las siguientes ecuaciones:



$$ACE = 90° - ACP'$$
$$P'CK = 90° - ACP'$$

Siendo iguales los segundos miembros, será tambien ACE=P′CK; pero por lo dicho ACE=ZAF, P′CK=RAH′, luego ZAF′=RAH′, es decir, que la la latitud del punto A, representada por la distancia zenital del ecuador ZAF, es igual á la altura del polo sobre el horizonte, representada por el ángulo RAH′.

60. Podemos hallar la latitud de un lugar por otro método, á saber: por la distancia zenital del sol ó de una estrella cualquiera, cuando se conoce su declinacion. En efecto, la distancia zenital de

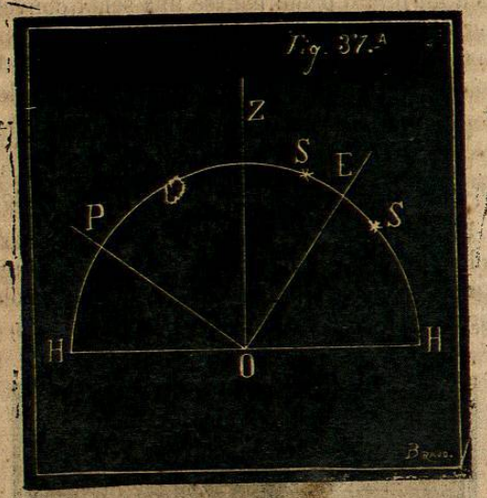
011181

la estrella S (fig. 37) es siempre igual á la latitud más ó menos la declinacion: pues tenemos

$$ZS = ZE - ES$$
$$\text{y } ZS' = ZE + ES'$$

de donde

$$ZE = ZS + ES$$
$$\text{y } ZE = ZS' - ES'.$$



Llamando λ la latitud, Z la distancia zenital del astro y D la declinacion, será en general $\lambda = Z \pm D$: la cual fórmula vale aun cuando D tenga un valor negativo, pues en este caso tendrémos $-Z = \lambda \pm (-D)$ $= \lambda \mp D$, de donde $\lambda = Z \pm D$.

§ 4.

Medida de un arco de meridiano.

61. La distancia entre dos puntos lejanos sobre la superficie del globo segun lo dicho, podrá ser representada por un arco, cuyas extremidades son determinadas por las verticales de los dos puntos. Si dichas verticales prolongadas interceptan en la esfera celeste un arco de un grado, y en el interior de la tierra forman un ángulo de un grado en su punto de encuentro, interceptarán tambien un arco de un grado sobre la superficie terrestre. Si la tierra fuese perfectamente esférica, una vez hallada la longitud ó la dimension de este arco, seria esta la unidad de medida de la cual podria deducirse la extension de la circunferencia entera. Pero, aunque esto pueda hacerse con exactitud respecto al ecuador y á los círculos paralelos, no deja de ser bastante inexacto con respecto á los meridianos sobre los cuales se miden los arcos de latitud. El ecuador y los paralelos son círculos perfectos y aunque estos vayan siendo siempre más pequeños segun que se acercan á los polos, sin embargo, averiguada la longitud de un arco de un grado en cada uno de ellos, bien podrá ser esta la medida para todo el círculo correspondiente. En cuanto á los meridianos, las operaciones geodésicas que se han hecho han dado á

conocer que no son círculos perfectos, y que la extension lineal de un arco de un grado cerca de los polos, es bien diferente de la que corresponde al arco de un grado cerca del Ecuador. Dichas operaciones se han hecho en el Perú, en la India, en la Laponia, en Francia, y especialmente en Pensilvania en los Estados Unidos á fines del siglo pasado [1768], en donde se pudo trazar un arco de meridiano y medir su longitud por medio de reglas en una llanura muy extensa y cerca del mar. Este método seria muy sencillo si no tuviese que tropezar con la dificultad de las desigualdades del suelo; por esto, en otros lugares se ha usado más bien el método de triangulacion, el cual consiste en medir los diferentes ángulos que forman las alturas con los llanos, y por medio del cálculo se ha deducido la longitud del arco. Los resultados á que se ha llegado en algunas medidas son los siguientes:

Estaciones.	Latitud.	Arco medido.	Longitud en metros	Observadores.
Laponia.	66°, 20′, 10″	1°, 37′, 19″	111. 488	Swamberg.
Francia.	46°, 52′, 02″	8°, 20′, 00″	111. 211	Lacaille.
Pensilvania.	39°, 12′, 00″	1°, 28′, 45″	110. 880	Dixon.
India.	16°, 08′, 32″	15°, 57′, 40″	110. 653	Lambton.
Perú.	1°, 31′, 00″	3°, 07′, 03″	110. 583	Lacondamine.

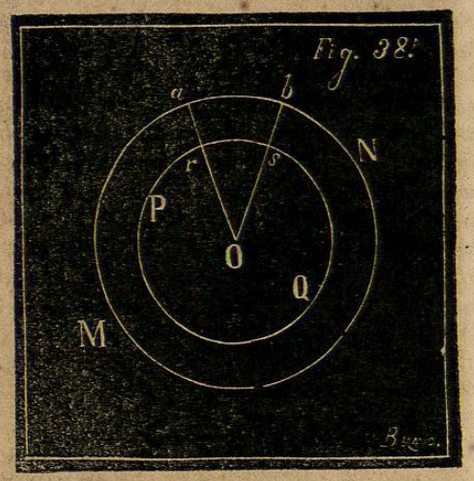
De dichas medidas resulta que los arcos de un grado en el Ecuador, tienen una longitud en metros menor que los arcos de un grado cerca de los polos.

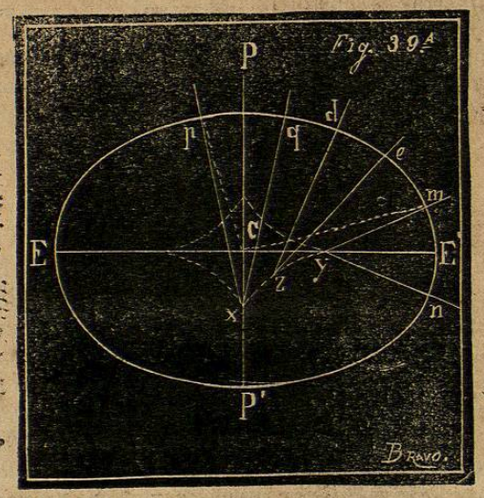
§ 5.

Forma de la tierra.

62. Supuesto que bajo un mismo meridiano, los arcos que miden un grado en la esfera celeste, no tienen la misma longitud sobre el globo, sino que abrazan cierto número de metros menor en el Ecuador que en los polos, debemos admitir que la forma de la tierra, no solo no es esférica en el sentido de los meridianos, sino que es algo aplanada por los polos y elevada en el ecuador, y por tanto los radios terrestres no son iguales entre sí. Propongámonos demostrarlo. Es necesario advertir que, segun enseña la geometría, los arcos de diferentes círculos medidos por el mismo ángulo en el centro son proporcionales á sus radios. Sean dos círculos concéntricos MN y PQ

[fig. 38]: fórmese al centro O un ángulo de un grado; los arcos correspondientes *ab*, *rs*, iguales á un grado, serán proporcionales á los radios *ao*, *ro*; es decir, que siendo *ao* > *ro*, será tambien *ab* > *rs*. Supuesto esto, por lo dicho anteriormente sabemos que el arco *mn* [fig. 39] del Ecuador correspondiente á un grado en la esfera celeste, es más pequeño que el arco *pq* medido en el polo, y que corresponde tambien á un grado en el cielo [la curva *pq m n p*, representa la seccion de la tierra segun un meridiano cualquiera]: por lo tanto, si suponemos que el arco *mn* es igual al arco *rs* [fig. 38] del círculo PQ, y *pq* = *ab* del círculo MN, hallaremos que los radios correspondientes deben tambien ser iguales á los arcos respectivos; además, como los arcos *mn* y *pq* corresponden á un arco de un grado en la esfera celeste, deben tambien interceptar en el interior del globo un ángulo de un grado. Pero para que esto se verifique es necesario que los radios *xp*, *xq* correspondientes al arco *pq* sean iguales á los radios *oa*, *ob* correspondientes al arco *ab* (= *pq*) del círculo MN, y que los radios *ym*, *yn* á su vez sean iguales á los radios *or*, *os*. Los arcos, pues, en cuestion deben considerarse como arcos de diferentes círculos descritos desde varios pun-





tos en el interior del globo, y que sin embargo midan un ángulo del valor de un grado. Siendo esto así, las intersecciones de las verticales de los puntos *m*, *n*, *p* y *q* no se verificarán como en la esfera, en un punto central, sino en *x*, verbi gratia, más allá del centro para un arco de un grado en el polo, y en *y* fuera del centro, antes de llegar á él, para un arco de un grado en el ecuador. Para otro arco cualquiera la interseccion de las verticales caeria en *z*. Si se unen todos estos centros, que se llaman *centro de curvatura*, resultará una figura cerrada por las cuatro líneas imaginarias, como se vé en la figura 39, los radios *xp*, *ym*, *zd* se llaman radios de curvatura. Si ahora comparamos la distancia de la superficie terrestre al centro de la figura, que es lo que se llama radio terrestre, claro aparece que la distancia *m* C es mayor que *p* C, luego el radio ecuatorial es mayor que el radio polar; esta diferencia de radios dá á la tierra una forma de elipsóide.

Habiéndose calculado la longitud de los radios terrestres, se han obtenido los resultados siguientes:

		kil.		leg. de 25 p. grado.
Diámetro ecuatorial	=	12.754,863	=	2870.1
Diámetro polar	=	12.712,251	=	2860.5
Aplanamiento	=	42,612	=	9.6
Diámetro medio á 45°	=	12.733,557	=	2865.3

La relacion de los diámetros es sensiblemente $= \frac{298}{299}$; de suerte que su diferencia es $\frac{1}{299}$ más grande, es decir, poco más de $\frac{1}{300}$. Es muy probable que el error del cálculo en averiguar el valor de estos diámetros no pase de 8,000 metros, y que el aplanamiento real de la tierra no esté equivocado en 0,1 de su valor.

§ 6.

Longitud del metro.

63. La medida de un arco de meridiano dió lugar á fines del siglo pasado (1790), á una reforma muy importante. Para evitar la confusion de pesos y medidas que existía en el comercio en Francia, quiso la Asamblea Nacional de Paris sustituir un sistema que fuera la base de las medidas y que tuviera relacion con la magnitud de la tierra. Al efecto, nombró una comision compuesta de varios astrónomos, especialmente de los Señores Delambre y Mechain, encargándoles midiesen el arco de meridiano entre Dunkerque y Barcelona, que abraza casi 10 grados. Por el método de triangulacion hallaron que la longitud de un cuarto de meridiano era = 5.130,740 toesas.