LA INCREÍBLE HISTORIA DE LA MALENTENDIDA FUERZA DE CORIOLIS

Autor: PEDRO RIPA

- COMITÉ DE SELECCIÓN
- EDICIONES
- DEDICATORIA
- EPÍGRAFE
- INTRODUCCIÓN
- I. GALILEO... ma non troppo
- II. ¿EXPLICACIONES?
- III. REALIDAD Y APARIENCIA
- IV. SOBRE NAVES DE AQUÍ Y ALLÁ
- V. LAS GRANDES MASAS
- VI. UNA CUBETA EN ROTACIÓN
- VII. NUEVO DIÁLOGO DE VIEJOS PERSONAJES
- VIII. LA FORMA DE LA TIERRA
- IX. LAPLACE Y LOS GEÓMETRAS
- BIBLIOGRAFÍA
- COLOFÓN
- CONTRAPORTADA

COMITÉ DE SELECCIÓN

Dr. Antonio Alonso

Dr. Juan Ramón de la Fuente

Dr. Jorge Flores

Dr. Leopoldo García-Colín

Dr. Tomás Garza

Dr. Gonzalo Halffter

Dr. Guillermo Haro †

Dr. Jaime Martuscelli

Dr. Héctor Nava Jaimes

Dr. Manuel Peimbert

Dr. Juan José Rivaud

Dr. Emilio Rosenblueth †

Dr. José Sarukhán

Dr. Guillermo Soberón

Coordinadora Fundadora:

Física Alejandra Jaidar †

Coordinadora:

María del Carmen Farías

Inicio

EDICIONES

Primera edición, 1996

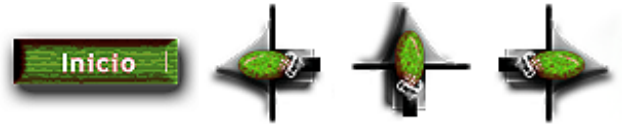
La Ciencia desde México es proyecto y propiedad del Fondo de Cultura Económica, al que pertenecen también sus derechos. Se publica con los auspicios de la Subsecretaría de Educación e Investigación Científica de la SEP y del Consejo Nacional de Ciencia y Tecnología.

D. R. © 1994, FONDO DE CULTURA ECONÓMICA, S. A. DE C. V.

Carretera Picacho-Ajusco 227; 14200 México, D.F.

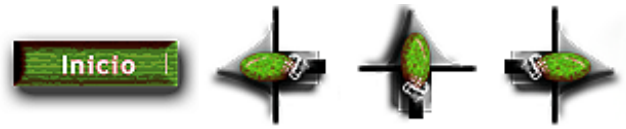
ISBN 968-16-4780-7

Impreso en México



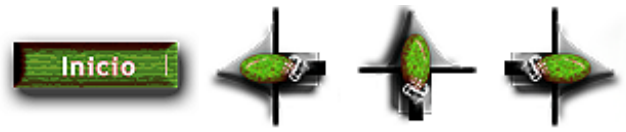
DEDICATORIA

Para ANDREA, con todo el amor de un terrícola.



EPÍGRAFE

El cambio de la posición del Sol y la Luna respecto al mar, no es el único efecto de la rotación de la Tierra. P. S. LAPLACE (1778)



INTRODUCCIÓN

> Ninguna publicación es tan conservadora como un libro de texto; los errores son copiados de generación en generación y parecen ganar apoyo por pura repetición. Nadie va hacia atrás a descubrir la fragilidad de los argumentos originales.
>
> S.J. GOULD

Es bien sabido que uno de los que (más) aprende en los cursos es el propio maestro. Cuando vine a vivir a México, hace ya más de quince años, dicté por primera vez un curso sobre ondas oceánicas y, al llegar al tema de la rotación terrestre, cometí un error muy común (pero no por eso menos grave): presentar al así llamado *efecto de Coriolis* como algo aparente. Ciertamente las fuerzas de Coriolis y centrífuga son aparentes —o *ficticias*— en el sentido de que aparecen al escribir la ecuación de movimiento de Newton en un sistema en rotación, que es un marco de referencia para el que no fue originalmente escrita esa ley. Pero muchos efectos de la rotación terrestre no tienen nada de aparentes, son bien reales. Hay aquí una paradoja, o al menos un problema conceptual parte de cuya solución sería precisar los conceptos de *aparente y real.*

Comencé entonces el proceso de buscar una mejor explicación del efecto de Coriolis. Al hacerlo, fueron saltando en mi camino anécdotas curiosas o graciosas y referencias confusas o grotescas. (Un ejemplo que raya en lo absurdo, sin que por supuesto sea esa su intención, es el artículo sobre Coriolis del número del mes de mayo del año 1952 de *Scientific American.*) Poco a poco fue naciendo la necesidad de plasmarlo en una plática, la que di por primera vez en la Universidad de Quilmes —a media cuadra de donde me crié— ante un público de parientes y amigos; luego la presenté frente a colegas y estudiantes, quienes tampoco me entendieron. Este libro es resultado de esa búsqueda de una mejor explicación del efecto de Coriolis y de la historia tras la formulación de este concepto.

Aquí se presenta una demostración acerca de los efectos de la rotación terrestre, principalmente en la dinámica oceánica y atmosférica, mientras que las pruebas de lo que aquí se afirma están en los libros citados en la bibliografía técnica citada al final del libro. De acuerdo con Mark Kacy, este libro, entonces, va dirigido a las personas de "buena voluntad" —los que tienen que *creer* lo que digo—mientras que las publicaciones lo están a los cabezas duras —los que deben *dudar* de mis afirmaciones. Este libro va acompañado de un diskette con programas —como los utilizados para hacer las gráficas— que facilitará el entendimiento de los conceptos desarrollados. Se recomienda utilizarlos a menudo, explorando más casos que los aquí ilustrados.

El siguiente es un compendio de algunos hechos históricos que iremos viendo ligados al tema de este libro; la cronología está en años después de Cristo y en años después de Galileo, para todos los gustos.

Después de Galileo	***Fecha***	***Personajes***	***Hecho histórico***
0	1632	Galileo	Principio de la inercia. Composición de velocidad
55	1687	Newton	Mecánica. teoría de las mareas. Forma de la tierra.
103	1735-1739	Bouguer y Condamine	Miden el arco de meridiano en Perú
104	1736	Maupertuis y Clairaut	Miden el arco de meridiano en Laponia
108	1740	D. Bernoulli	Teoría de las mareas
110	1742	Maclaurin	Forma de un elipsoide de revolución
123	1755	Euler	Hodrodinámica
155	1778	Laplace	Teoría de las mareas: Deriva la fuerza de Coriolis ! Corrige a Newton y Bernoulli
203	1835	Coriolis	Aceleración en un sistema en rotación; fuerzas aparentes

213	1845	Airy	Corrige a Laplace (según él)
219	1851	Foucault	Rotación plano oscilación de un péndulo
242	1875	Kelvin	Corrige a Airy; Laplace tenía razón después de todo (Trabajo muy complicado)

Quiero dejar sentado mi agradecimiento a Jean-René Donguy, que me consiguió en París copias de los artículos originales de Laplace y Coriolis, a Antoine Badan Dangon, quien tuvo la gentileza de traducirme el segundo de ellos, a José Luis Ochoa por su lectura crítica del texto, y a Guillermo Velázquez por su ayuda en la elaboración de las gráficas. El programa Planeta se debe a Carlos Cabrera. Se escribió este libro con el apoyo del Consejo Nacional de Ciencia y Tecnología, México, mediante una cátedra patrimonial de excelencia nivel III y el proyecto 1282-T9204.

Inicio

I. GALILEO... *ma non troppo*

Si he podido ver lejos fue porque me paré sobre hombros de gigantes.

I. NEWTON

GALILEO GALILEI (1564-1642) fue un grande entre los gigantes. Se le suele recordar como el fundador del método experimental de la física; su imagen va asociada con la del telescopio y el plano inclinado, con los instrumentos que diseñó y armó para observar y medir. También es famosa su polémica con los aristotélicos de su tiempo que se limitaban a citar a los clásicos y pensar cómo debían ser los movimientos de los cuerpos, en vez de observarlos. Por último, ¿quién no conoce la anécdota del atrevido maestro arrojando dos cuerpos de diferente peso desde la Torre de Pisa? (Anécdota probablemente apócrifa pero, como dicen los italianos, *Se non è vero... è ben trovatto!)*

Galileo y el péndulo

Pero, además de señalar la importancia que Galileo dio a la observación, creo que es igualmente justo destacar su capacidad para extrapolar los resultados de los experimentos hacia casos ideales, estrictamente inalcanzables. Galileo fue también un maestro de lo que Ernst Mach llamaría, muchos años después, los *Gedankenexperimente*, los "experimentos pensados". Voy a referirme enseguida a dos de estas generalizaciones: las que en términos modernos conocemos como el *principio de inercia* y la *ley de composición de velocidades:*

DIALOGO
DI
GALILEO GALILEI LINCEO
MATEMATICO SOPRAORDINARIO
DELLO STVDIO DI PISA.
E Filosofo, e Matematico primario del
SERENISSIMO
GR. DVCA DI TOSCANA.
Doue ne i congressi di quattro giornate si discorre
sopra i due
MASSIMI SISTEMI DEL MONDO
TOLEMAICO, E COPERNICANO;
Proponendo indeterminatamente le ragioni Filosofiche, e Naturali
tanto per l'vna, quanto per l'altra parte.
CON PRI VILEGI.
IN FIORENZA, Per Gio:Batista Landini MDCXXXII.
CON LICENZA DE' SVPERIORI.

En su primera versión del libro de *Dialoghi*,[1] publicado en 1632, Galileo representa su eterna controversia con los aristotélicos de su época por medio de un diálogo entre Salviati y Simplicio, nombre éste por demás significativo ¡no necesito decir quién es quien! Salviati le hace conducir a Simplicio, sin demasiada dificultad, que un móvil en una superficie inclinada hacia abajo se acelera (es decir, aumenta su velocidad), mientras que en una inclinada hacia arriba se frena. Habiendo llegado a esto, le pregunta:[2]

SALVIATI.- [...] Ahora dime, *¿qué le pasaría al mismo móvil en una superficie sin pendiente hacia arriba o hacia abajo?*

SIMPLICIO.- [...] Ya que no hay pendiente hacia abajo, no hay tendencia natural al movimiento; y ya que no hay pendiente hacia arriba, no hay resistencia a ser movido, de manera que habrá una indiferencia entre la tendencia y resistencia al movimiento... *va a permanecer estable.*

Como Simplicio no parece darse por aludido, debe insistir:

SALVIATI.- [...] Pero, ¿qué pasaría si se le diera un ímpetu en una dirección?...

SIMPLICIO.- [...] No veo causa para aceleración o deceleración...

SALVIATI.- ¿Cuán lejos se movería la bola?

(Acorralado, Simplicio concede.)

SIMPLICIO.- ... *Tanto como continuara la superficie.*

De esta forma, Galileo enuncia entonces el principio de la inercia: En ausencia de fricción (ésta es la gran generalización del maestro) o de otra fuerza que actúe en la dirección horizontal, un cuerpo impulsado sobre una superficie plana se mueve tanto como se extienda ésta.

Algo que es muy interesante para nuestros propósitos es que la imaginación de Galileo no se limita a una superficie

plana, a algo pequeño, que pueda caber en un laboratorio. Por lo contrario, enuncia así su idea de una "superficie sin límites";

SALVIATI.- Si la superficie fuera sin límites, el movimiento sería también sin límites... perpetuo. *Para que una superficie no esté* [inclinada] *hacia arriba o hacia abajo, todas sus partes deben estar igualmente distantes del centro.* [de la Tierra].

Un barco, cuando se mueve sobre un *mar calmo*, es uno de esos móviles que va sobre un superficie que no está inclinada hacia arriba o hacia abajo, y si todos los obstáculos externos [fricción con el aire y el agua] y accidentales fueran removidos, seguiría moviéndose en forma incesante y uniforme por el impulso que recibió.

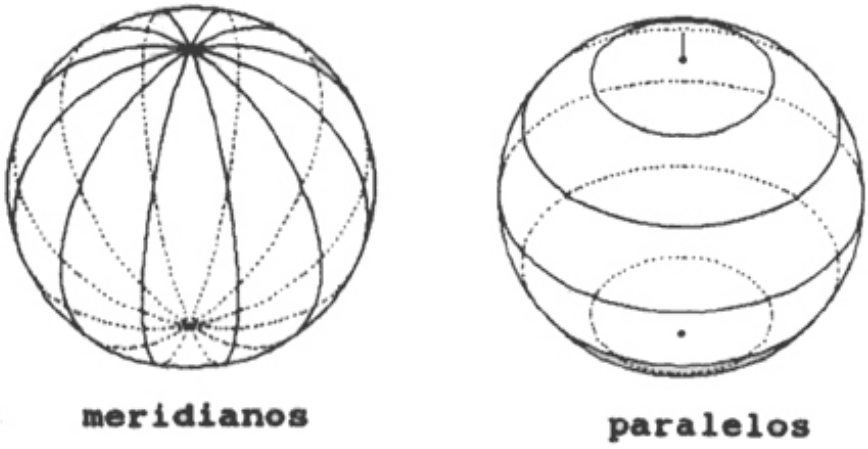
Cuarenta años después de la traumatizante llegada de los europeos a América, Galileo está pensando en una esfera, en el globo terráqueo. Es más, está pensando en el mar y le asigna forma esférica al océano en reposo. Esto es lo que llamamos "nivel del mar" cuando nos referimos a la altura de una montaña o a la en que se mueve un satélite artificial.

Punto clave de esta idealización de Galileo es la ausencia de toda fricción, ni con el agua ni con el aire; para ilustrar mejor esta situación, podemos imaginarnos que la superficie perfectamente lisa del mar en reposo esté congelada (¡quien haya caminado sobre el hielo sabrá muy bien de su escasa fricción!). Según Galileo, un cuerpo que se mueva sobre esta esfera ideal, sin fricción (ni ninguna otra fuerza externa), lo hace sin cambiar ni de rapidez, ni de dirección.

Que no cambie de rapidez, es un concepto fácil de entender: recorre espacios iguales en tiempos iguales. En cuanto a que no cambie su dirección, no significa que la bola se mueva en línea recta, ya que de hacerlo abandonaría la superficie de la Tierra; lo que sí quiere decir es que el móvil se traslada a lo largo de un círculo máximo de la esfera. ¿Y qué es un *círculo máximo*? Al cortar una rebanada de alguna fruta, el tajo es aproximadamente un círculo; cuanto más esférica sea la fruta y más recto vaya el cuchillo tanto más cierto será esto. Los matemáticos enuncian solemnemente lo anterior diciendo que "la intersección de una esfera con un plano es un círculo". Estos círculos pueden ser tan pequeños como uno quiera (basta cortar, casi rozando, la fruta); pero no pueden ser tan grandes como uno quiera: los mayores se obtienen con cortes (o, la intersección con un plano) que pasen por el centro de la esfera. Este es un círculo máximo.

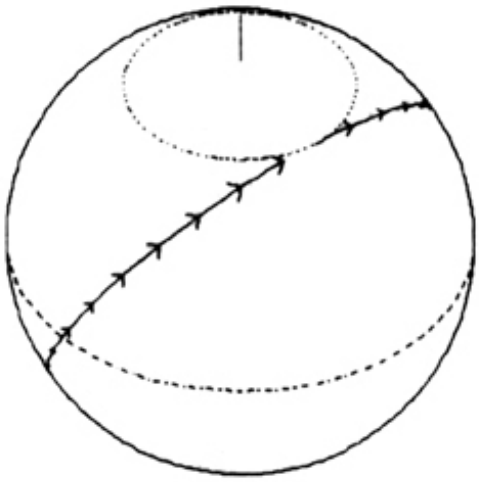
Hay una infinidad de círculos máximos, porque hay una infinidad de planos que pasan por el centro de una esfera.

Dos círculos máximos diferentes se cruzan en dos puntos: en la esfera no hay "paralelas" (ya que los círculos máximos son en ella el equivalente de las líneas rectas). Pensando en nuestro planeta, sus meridianos (que unen a ambos polos) son la mitad de un círculo máximo, pero los paralelos no son círculos máximos, salvo el ecuador.



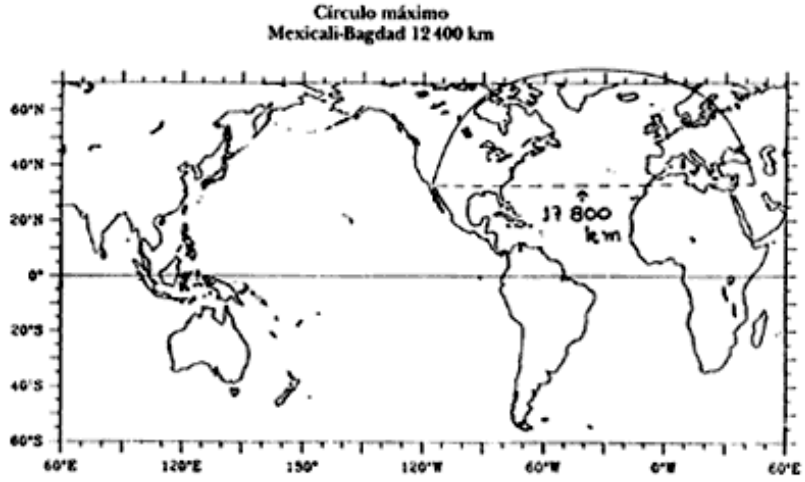
Por lo tanto, de acuerdo con Galileo, si el móvil es impulsado hacia el Norte —o hacia el Sur— en este mar congelado idealizado, seguirá sobre el meridiano en que estaba en un principio (es decir; no cambiará su longitud geográfica), dando una vuelta a la Tierra en el tiempo que le lleve recorrer los 40 000 000 de metros de la circunferencia terrestre. Algo similar ocurriría si se le impulsara hacia el Este —o hacia el Oeste— desde algún punto en el ecuador: esta vez seguiría en el ecuador; no cambiaría su latitud geográfica

Pero los otros paralelos terrestres no son círculos máximos (de hecho, tienen un perímetro menor que el del ecuador) y, por lo tanto, el movimiento inercial de Galileo no puede darse a una latitud fija diferente de cero, o sea, sobre un paralelo. Si, por ejemplo, se diera a la bola un impulso hacia el Este desde una latitud de 60°N y una longitud 0° (punto inicial en la figura siguiente), se vería —de acuerdo con Galileo— que iría acercando al ecuador, cruzándolo a los 90°E, alcanzando luego las antípodas del punto inicial (60°S & 180°E en la parte oculta de la trayectoria), para volver a cruzar el ecuador en los 90°O y finalmente llegar al punto inicial. En todo ese tiempo, el móvil se habrá estado moviendo —además de sobre la esfera— a lo largo de un plano que tiene una inclinación de 60° en relación con el plano ecuatorial. Para hacer la figura, se le otorgó una velocidad de 1 389 km/h, lo que implica que le toma al cuerpo 28.8 h dar una vuelta completa; cada flecha corresponde a una hora de recorrido (la última está a las 28 h de su salida).

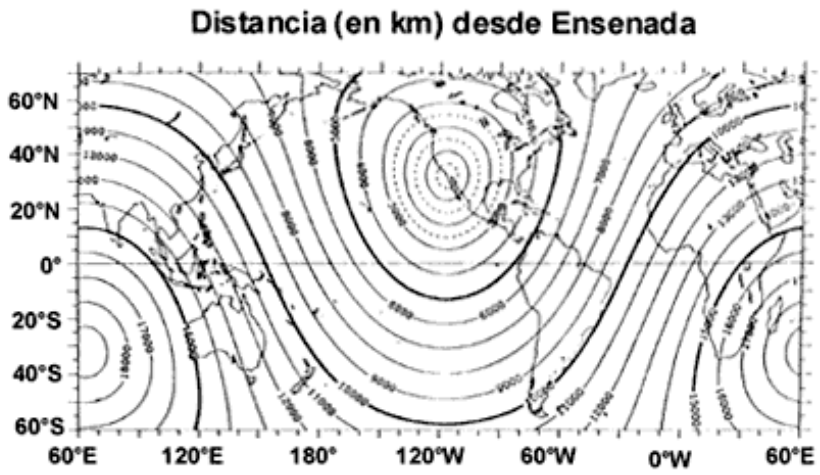


Es importante darse cuenta de que el recorrido sobre la esfera tiene la misma extensión que de aquella sobre el ecuador o a lo largo de los dos meridianos en los ejemplos anteriores. Los geómetras demuestran que el recorrido más corto entre dos puntos y sobre la superficie de una esfera es sobre un círculo máximo. Es por eso que a veces las rutas de los aviones se ven raras sobre un mapa (plano) pero no lo son sobre el globo. Por ejemplo, para ir por el camino más corto desde Mexicali (en Baja California) a Bagdad (en Irak), ambos a aproximadamente 33°N, hay

que desplazarse bastante hacia el norte: el punto medio de la trayectoria se encuentra a los 75°N y 37°O. La distancia mínima entre estas dos ciudades es de 12 400 km; mientras que la ruta entre ambas ciudades a lo largo del paralelo 33°N (que parece recta en un mapa) tiene de longitud 17 800 km. (Quien tenga un globo terráqueo puede verificarlo tensando un hilo entre los dos puntos, o entre otro par; para encontrar la ruta más corta entre ellos.) En el diskette que acompaña este libro pueden encontrar el programa **Planeta,** con el que pueden experimentar sobre distancias y círculos máximos en la esfera.



Círculo máximo. Mexicali-Bagdad 12 400 km



Distancia (en kilometros) desde Ensenada. Nótese la deformación de estos circulos al proyectarlos sobre un mapa plano

Distancia (en Kilometros) desde Ensenada. Nótese la deformación de estos círculos al proyectarlos sobre un mapa plano.

Posteriormente, Galileo formuló el otro concepto que quiero mencionar aquí: el que actualmente conocemos como la *ley de adición de velocidades.* Para esto, pone en manos de Salviati la tarea de hacer deducir a Simplicio el lugar donde aterriza una piedra dejada caer desde la punta del mástil de un barco en movimiento uniforme (nuevamente despreciando toda fricción con el aire). Simplicio, por supuesto, está convencido de que la piedra debe caer hacia atrás, hacia la popa; sin embargo su amigo le hace ver que...

SALVIATI.- *Aquella piedra en la punta del mástil se mueve también en una circunferencia* [...] tan rápido como el barco.

SIMPLICIO.- [Entonces] la piedra no va a abandonar el barco, [...] sino que **va a caer en el mismo lugar** que lo hizo cuando la nave estaba quieta.

Galileo imagina al barco y a la piedra realizando el mismo movimiento horizontal, es decir; en una circunferencia alrededor del centro de la Tierra. La piedra tiene además un movimiento vertical, de caída hacia el centro de nuestro planeta, que se combina con el anterior de manera que llegue exactamente a la base del mástil. Es interesante ver cómo Galileo razonaba de acuerdo con una geometría esférica, fue posteriormente que se cambió sus superficies horizontales de esféricas a planos; aquí respetaremos la imagen original del maestro.

Habiendo recordado estos dos grandes resultados de Galileo (el principio de la inercia y la ley de adición de velocidades) voy ahora a hacerles una corrección debida a la rotación de la Tierra: en primer lugar; la bola que es impulsada sobre el mar sin fricción, no se mueve "sin cambiar su dirección" (es decir, a lo largo de un círculo máximo), sino que es *desviada* hacia la derecha si está en el hemisferio septentrional o hacia la izquierda en el hemisferio austral. En segundo lugar, la piedra que es dejada caer desde la punta del mástil, sin ningún impulso horizontal, no aterriza exactamente en la base de aquél, sino lo hace un poco hacia el Este. Estas dos correcciones corresponden a lo que ahora se denomina el efecto de Coriolis.

El párrafo anterior no debe ser tomado como una crítica al gran maestro: ambas correcciones son ridículamente pequeñas para el caso de los experimentos que realizó Galileo, por lo que es imposible que él las hubiera detectado, mucho menos predicho ¡todavía no existía la mecánica! De hecho, no fue sino hasta 1851 —219 años más tarde— que el físico francés Juan Bernardo León Foucault (1819-1868) demostró la realidad de la rotación terrestre mediante el péndulo que ahora lleva su nombre.

El péndulo que construyó Foucault tenía unos 60 metros de largo y fue colgado, en el Panteón de París, de un soporte bien diseñado de modo que no ejerciera fuerzas laterales. Foucault utilizó un cordel auxiliar para sujetar la masa del péndulo en posición inclinada respecto de la vertical. Luego de esperar el tiempo suficiente para que todo el sistema estuviera en reposo, Foucault quemó el cordel con el objeto de que el péndulo empezara a oscilar sin darle ningún impulso lateral; la dirección de oscilación era fácilmente observable porque la punta del aparato marcaba su trazo sobre arena fina en el piso.

Uno esperaría que bajo estas circunstancias el péndulo, tan cuidadosamente preparado, siguiera siempre oscilando en el mismo plano vertical. No fue así: se observó que este plano giraba muy lentamente, 11.3° por hora, en la dirección horaria (la de las manecillas del reloj).[3] Al cabo de unas ocho horas estaba oscilando en un plano perpendicular al inicial. Para comparar ambos movimientos, nótese que el periodo de ese péndulo es de tan sólo unos 16 segundos; al llegar a un plano de oscilación perpendicular al original, el péndulo había realizado ya unas mil ochocientas oscilaciones: El efecto de Coriolis es muy pequeño, pero se va acumulando poco a poco con el tiempo.

Este experimento causó gran sensación, tanto en los medios científicos como entre el público en general, logrando que se terminara por aceptar la realidad de la rotación terrestre. Todavía en la actualidad nos maravillamos con este fenómeno, ya que hay péndulos de este tipo en muchos museos científicos. En vez de mostrar su precesión con un trazo en arena, lo hacen generalmente volteando unos postecitos colocados en el piso formando un círculo de radio inferior a la máxima desviación del péndulo. El efecto se manifiesta tan lentamente que uno normalmente no tiene la paciencia de esperar a que caiga el siguiente postecito: le *cree* a los encargados del museo cuál era la dirección de oscilación del péndulo a la hora en que se abrió el edificio.

Lo anterior no quiere decir que el efecto de Coriolis sea tan sólo una curiosidad, sin importancia práctica. Como veremos más adelante, este fenómeno es en realidad fundamental para la física de los océanos y las atmósferas planetarias. Es, en consecuencia, importante explicarlo, decir por qué, en ausencia de fuerzas horizontales —de fricción u otras— un cuerpo tiende a desviarse de la dirección en que es impulsado, hacia la derecha en el

hemisferio septentrional, o hacia la izquierda en el austral. Hay tres preguntas interesantes que contestar: ¿cómo es que esta desviación de la horizontal se relaciona con la rotación terrestre? ¿Por qué un cuerpo que se deja caer en forma vertical se desvía hacia el Este? y ¿por qué gira el plano de oscilación del péndulo de Foucault? A responder estas preguntas —y a otras cosas más— está dedicado este libro.

[Nota 1]

1 Llamado, en realidad, *Dialogo di Galileo Galilei Linceo, Matemático sopraordinario dello studio di Pisa. E. Filosofo, e Matemático primario del Serenissimo Gr. Duca di Toscana. Doue ne i congressi di quattro giornate si discorre sopra i due Massimi Sistemi del Mondo Tolemaico e Copernicano; proponendo indeterminantemente le ragioni Filosofiche, e Naturali tanto per l'una, quanto per l'altra parte.* La longitud del título sorprende mucho en esta época, en la que Hollywod se complace nombrando a algunas de sus películas, *E. T.* o *J. F. K.*, que son tan sólo siglas.

Inicio

[Nota 2]

2 Traducción y cursivas del autor.

Inicio

[Nota 3]

3 Estrictamente, la fricción con el aire hace que el movimiento no se dé en un plano sino que se desarrolla siguiendo una elipse muy excéntrica.

Inicio

II. ¿EXPLICACIONES?

> Muchos están satisfechos [...] de aceptar la idea de una fuerza de Coriolis, más o menos con una fe ciega, confiados de que ha sido derivada con rigor.
>
> STOMMEL y MOORE

UNO de los fenómenos más populares debidos al efecto de Coriolis tiene que ver con el sentido en que gira el agua al vaciarse un fregadero, o de cualquier recipiente al que se le hace un agujero en el fondo: en el hemisferio norte lo hace en el sentido de las agujas del reloj, o sentido *horario*, y en el hemisferio austral lo hace en el opuesto, el *antihorario*. (¿Hacia qué lado gira en la ciudad de Quito?) Este es un ejemplo de la tendencia de desviarse hacia la derecha o la izquierda, en cada uno de los hemisferios, que es la primera de las tres preguntas que prometimos responder en el capítulo anterior. Este fenómeno tan conocido ayuda a la popularidad del efecto de Coriolis, pero no a entender sus causas. Concretamente, nos preguntamos:

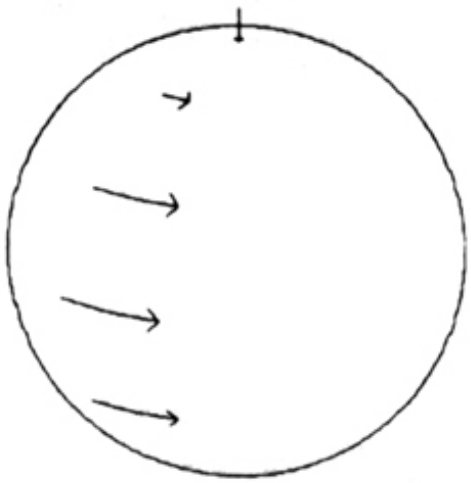
1) ¿Por qué los cuerpos que se deslizan sobre una superficie horizontal —sin fricción— se desvían de su curso?

2) ¿Por qué al soltar un cuerpo sin darle ningún impulso en la dirección horizontal, cae hacia el Este de la dirección vertical? y

3) ¿Por qué cambia el plano de oscilación del péndulo de Foucault?

Es posible que no todos los lectores estén familiarizados con estos tres fenómenos, pero son bastante comunes, al menos en el sentido de estar descritos en la mayoría de las enciclopedias y muchos libros de divulgación (además de los libros de ciencia, claro está). Las siguientes tres explicaciones respectivas son también muy comunes:

1) *Desviación en la horizontal.* Este fenómeno es debido a que no todos los puntos de la Tierra se mueven con la misma velocidad: la Tierra gira alrededor de su eje dando una vuelta completa aproximadamente cada 24 horas. Como su perímetro es de unos 40 000 000 m, cualquier punto del ecuador (fijo al globo) se mueve con una velocidad de 1 670 km/h). Otros puntos fijos a la Tierra se mueven más despacio, tanto más despacio cuanto más cerca estén de un polo, ya que su distancia al eje de rotación terrestre es menor.[4]



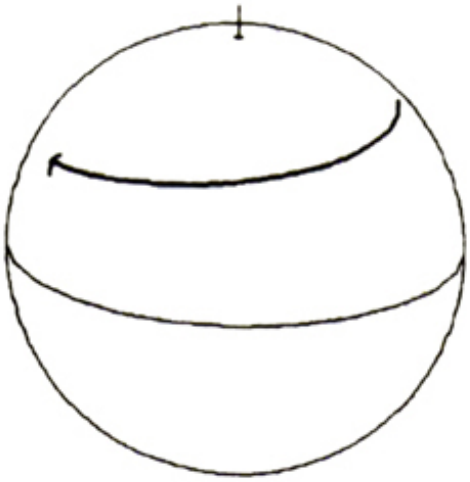
La velocidad (tangencial) de un punto sobre la tierra depende de la latitud

Por ejemplo, en las latitudes de 30°N y 45°N esta velocidad es de 1 440 km/h y 1 180 km/h respectivamente. Supónganse que a 45°N se envía una bola hacia el Sur (sobre el mar galileano congelado, es decir, sin fricción) a una velocidad de 4 km/h. Analicemos la situación al llegar a los 30°N: la Tierra tiene en ese punto una velocidad hacia el Este (respecto del espacio absoluto) de 1 440 km/h, pero la del móvil es de sólo 1 180 km/h (con la que partió). Es decir; la bola ha "adquirido" una tremenda velocidad lateral —de unos 260 km/h— que la desvía hacia

el Oeste, es decir, hacia la derecha.

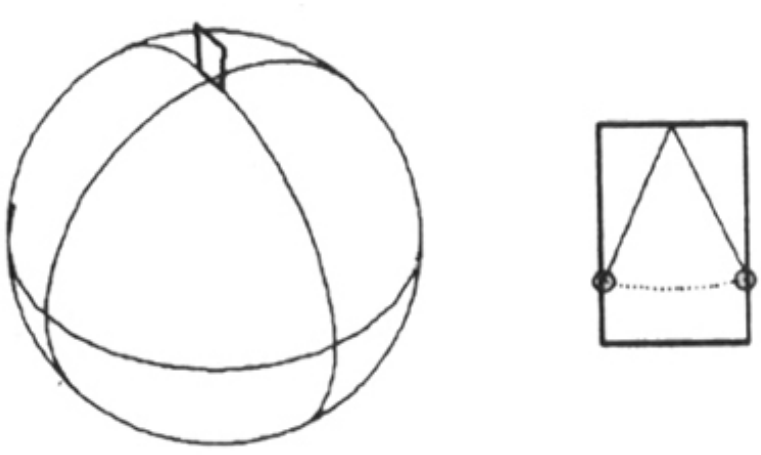
Es muy fácil ver que ocurre lo mismo si el móvil va de los 30°N a los 45°N: nuevamente se observa, desde la Tierra, un fabuloso desvío hacia la derecha. El mismo análisis en el hemisferio meridional predice un desvío hacia la izquierda. Esta es la explicación del efecto de Coriolis en la horizontal.

2) *Desviación de la vertical.* Este fenómeno es mucho más fácil de entender y explicar: en el corto tiempo que la piedra tarda en caer desde la punta del mástil, la Tierra ha girado un poco y por lo tanto el objeto no aterriza exactamente en la base del mástil.



3) *Péndulo de Foucault* Para entender este tercer fenómeno, imaginémonos al mencionado péndulo colgado de un soporte ideal situado exactamente sobre el Polo Norte. En la figura siguiente, se indica a la derecha su plano de oscilación con un rectángulo dibujado sobre el globo terráqueo en la parte izquierda. Que el soporte sea "ideal" quiere decir que no le imprime al péndulo el movimiento de rotación de la Tierra. Luego, una observadora que no gire con la Tierra (es decir, que esté fija al espacio absoluto) ve oscilar el péndulo siempre en el mismo plano. Es la Tierra la que gira bajo el péndulo y es por eso que, para una persona fija al planeta, el plano de oscilación parece estar girando lentamente (hacia el otro lado).

Las tres explicaciones anteriores tienen varias cosas en común: en primer lugar son clásicas, sobre todo la 1 y la 3; pueden ustedes consultar su enciclopedia o texto de (geo)física o geografía, y lo más probable es que encuentren una explicación muy similar. (Las aquí expuestas para los casos 1 y 3 fueron tomadas, casi literalmente, de un libro de texto de oceanografía física; la del 2, apareció en un libro de divulgación de mecánica.) En segundo lugar, las tres explicaciones muestran el efecto de Coriolis como algo *aparente*, producto del hecho que hacemos observaciones desde un planeta en rotación, de nuestro carácter de terrícolas. En tercero y último lugar —pero no por eso menos importante— las tres explicaciones expuestas arriba *son incorrectas*; más precisamente, las dos primeras son totalmente erróneas, mientras que la tercera es una "no explicación".



Puede parecer una pérdida de tiempo haber presentado estas tres "explicaciones" para inmediatamente derribarlas, pero tuve un par de razones para hacerlo. Por un lado son muy frecuentes y por lo tanto estoy corrigiendo un error común. Por el otro, la razón por lo que estas tres explicaciones —y algunas similares— fallan es precisamente porque insisten en presentar el fenómeno como algo *aparente;* la confusión entre realidad y apariencia tiene una historia muy larga, como veremos más adelante. Uno de los motivos que me llevó a escribir este libro fue contar esta historia y tratar de aclarar esa confusión.

Con el fin de poder criticar estas explicaciones —y entender el resto de este libro— es importante hacer una distinción precisa entre la experiencia de una observadora fija al espacio absoluto newtoniano (que ve girar la Tierra) y la de un observador fijo a nuestro planeta (que lo percibe quieto, y ve, en cambio, girar todo el firmamento a su alrededor). Para distinguirlos, llamaré a la primera observadora inercial y al segundo terrícola; es importante recordar esta nomenclatura en lo que sigue. Invito al lector a regresar a las tres explicaciones anteriores y determinar cuándo se habla de una observadora inercial y cuándo de un terrícola.

Asimismo, a lo largo de este libro diré que un fenómeno es *aparente* cuando es percibido por un terrícola en su carácter de tal, pero no por una *observadora inercial.* La denominación de *real,* por el contrario indicará un fenómeno que es percibido tanto por terrícolas como por observadores inerciales. Por ejemplo, la rotación del Sol alrededor de la Tierra es un fenómeno aparente, mientras que el invierno y verano son reales (¡y vaya si lo son!). El cambio de luminosidad y temperatura entre la noche y el día ¿es real o aparente?

Paso a argumentar por qué son erróneas las tres explicaciones.

1) *Desviación en la horizontal.* La explicación 1 "predice" correctamente el sentido de la deflexión, hacia la derecha en el hemisferio septentrional y hacia la izquierda en el meridional; sin embargo, es incorrecta pues falla en lo que se refiere a la forma de la trayectoria y a la rapidez con que la recorre.

Si una partícula es impulsada hacia el Sur; desde los 45°N, con una velocidad de 4 km/h (como el ejemplo), la desviación hacia la derecha es tan fuerte que se mueve en un círculo de 11 km de radio (una décima de grado de meridiano); ¡está muy lejos de llegar a los 30°N, que queda unos 1 700 km al sur! Además, lo que es muy importante, *la rapidez con que se mueve es siempre la misma,* es decir, sigue moviéndose a 4 km/h, sin alcanzar velocidades absurdas como 260 km/h.

Este comportamiento se llama *oscilación inercial* y es resultado exclusivo del efecto de Coriolis, en ausencia de fuerzas horizontales, de fricción u otras. La trayectoria tiene —para los terrícolas— la forma de un círculo en todos los casos en que el impulso sea suficientemente débil para que el móvil no se acerque demasiado al ecuador.

El tiempo en que el móvil recorre este "círculo inercial" es igual a medio día dividido por el seno de la latitud. En el ejemplo anterior; este periodo es igual 12 horas/sen (45°) = 17 horas; a una velocidad de 4 km/h en este tiempo el móvil recorre una circunferencia de 68 kilómetros, correspondiente a un radio de 11 km. En el capítulo IV presentaré una descripción más completa de las oscilaciones inerciales, incluyendo dibujos de las trayectorias sobre la Tierra.

Entonces un terrícola ve al objeto moverse en un círculo de 11 kilómetros cerca de 45°N. Si el efecto de Coriolis fuera sólo aparente, ¿cómo lo vería una observadora inercial? lo debería ver seguir un círculo máximo, ya que ésta es la trayectoria en ausencia del efecto de Coriolis, como bien predijo Galileo. Esto *no ocurre,* ya que si se moviera en un círculo máximo debería cruzar el ecuador: el efecto de Coriolis es real, no aparente. Los demás capítulos de este libro están dedicados a explicar sus causas y narrar la historia de quién fue el que realmente lo descubrió; la explicación de los puntos 2 y 3 estará en cambio limitada a lo que resta del presente capítulo.

2) *Desviación de la vertical.* No resistí a la tentación de presentar la explicación 2, porque es errónea no sólo cuantitativamente sino también cualitativamente: ¡incluso el signo que lleva no está bien colocado! (La 1 "al menos" lo tiene bien puesto, aunque de todos modos sea incorrecta.) Según 2, una observadora inercial ve a la piedra moviéndose sólo en dirección al centro de la Tierra. Si esto fuera cierto, un terrícola la vería aterrizar hacia el Oeste del lugar donde fue arrojada (no al Este, como predice el efecto de Coriolis) y ¡a una distancia enorme!

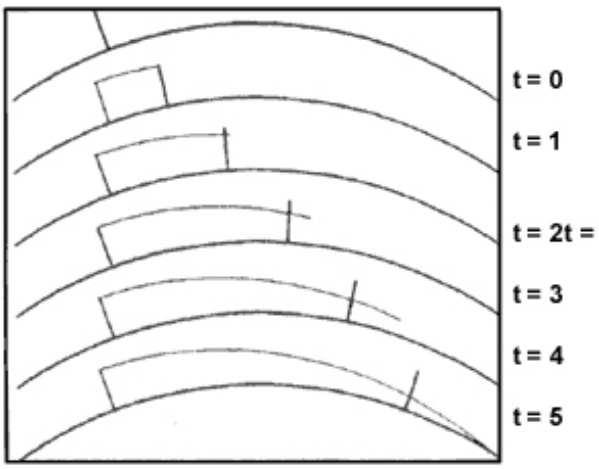
Por ejemplo, supóngase que la piedra es arrojada desde unos 50 metros de altura. Esto significa que tardará unos

tres segundos en llegar al suelo,[5] tiempo en el cual un punto del ecuador ha recorrido un kilómetro y medio. Si fuera cierta la "explicación" 2 ¡sería bastante diferente jugar al tenis! (entre otras cosas). En realidad, la ausencia de este resultado absurdo —el hecho de que los cuerpos dejados caer no llegan al suelo a cientos de metros del lugar donde fueron arrojados— fue invocado durante muchos siglos por los defensores de la cosmología de Ptolomeo —o sea, los opuestos a la de Copérnico— como un argumento *en contra* de la rotación terrestre.

Newton fue aparentemente el primero en conjeturar —no demostrar— que la piedra debía caer un poco hacia el Este, con base en el siguiente razonamiento: consideremos una torre, su base y su cúspide junto con todo lo demás fijo a la Tierra) se mueven hacia el Este, pero la punta lo hace un poquito más rápido que la base, ya que está un poquito más lejos del eje de rotación de la Tierra. Por ejemplo, en el caso de la Torre de Pisa[6] la diferencia de velocidad es igual a tres milímetros por segundo (unos escasos diez metros por hora o aproximadamente el doble *de la velocidad de crucero* de un caracol) en los tres segundos y fracción que tarda en llegar al suelo una piedra dejada a caer en la punta, este impulso horizontal representa un desplazamiento de un centímetro hacia el Este.

Newton le sugirió a Robert Hooke[7] hacer el experimento de dejar caer bolas desde una torre, sin darles ningún impulso y, verificar que cayeran un poco hacia el Este de la posición original. Con este experimento se convencería a los escépticos que no creían todavía en la rotación terrestre. En respuesta a la sugerencia de Newton, Hooke señaló correctamente que debía haber también una deflexión hacia el Sur (como fue explicado más arriba) y dijo haber hecho exitosamente el experimento. Sin embargo, no es posible que lo haya logrado en forma decisiva, ya que la desviación predicha, como se señaló más arriba, es demasiado pequeña.

El razonamiento de Newton corresponde a la curva discontinua en la figura anterior... y es incorrecto; la verdadera trayectoria es la de la curva llena. Para entender este resultado teórico curioso (aunque difícil de medir) hay que primero darse cuenta de que, mientras cae, la piedra no es afectada por la rotación terrestre: se halla en órbita alrededor del centro de masa de la Tierra, del mismo modo que los planetas están en órbita alrededor del Sol. Si el lector conoce la segunda ley de Kepler[8] sabrá que al acercarse al centro de la Tierra, la piedra debe aumentar la velocidad angular *total*, es decir; la combinación de la observada por un terrícola y la debida a la rotación terrestre. Al acercarse al centro de la Tierra —es decir, al caer— la piedra gira cada vez un poquito más rápido que el planeta sobre su eje, y es por eso que cae un poquito hacia el Este. Se puede ver que el desplazamiento respecto de la base de la torre es 2/3 del predicho por el razonamiento de Newton. En la siguiente figura se puede apreciar el movimiento de la torre y el objeto desde el punto de vista de una observadora inercial en diferentes instantes, hasta que éste llega a la Tierra. La línea de puntos indica la posición original de la torre y la curva fina la trayectoria recorrida por el objeto hasta ese instante.

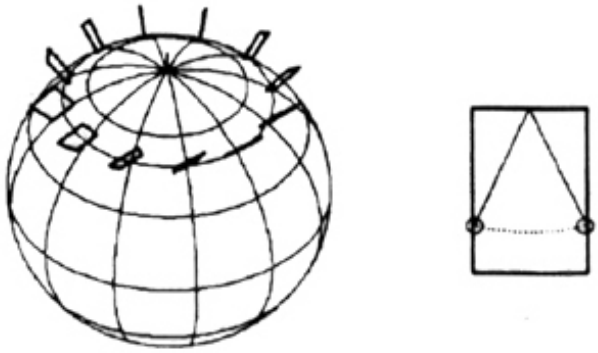


Movimiento de la torre y el objeto en caída libre, vistos por una observadora en reposo

3) *El péndulo de Foucault.* El punto 3 es una "no explicación" porque presenta al fenómeno *precisamente en el único lugar donde no hay ningún efecto real* (un polo). Imagínense que deseo explicarles a los habitantes de Planolandia (los que, como es bien conocido carecen de la dirección vertical) el "fenómeno de la caída de los cuerpos", es decir, la observación de que si suelto un objeto desde una cierta altura, luego de un cierto tiempo (que

depende de dicha altura) llega al piso. Si "por ser más fácil" eligiera para ilustrar el fenómeno, el caso particular en que la altura es nula (es decir, cuando apoyo el cuerpo en el suelo) estaría cometiendo un error similar de "no explicación"; al igual que, en el punto 3, el caso límite corresponde a una situación ¡donde no ocurre el efecto a explicar!

El hecho de que *en los polos* la rotación terrestre no afecte al péndulo de Foucault, no explica en absoluto por qué su plano de oscilación gire —para un terrícola— como lo hace en los museos de ciencia. Por ejemplo, la rapidez con que gira el plano es igual a una vuelta diaria por el seno de la latitud del lugar donde esté montado el péndulo. ¿Es esto un efecto aparente? No; una observadora inercial *no ve* al plano de oscilación fija (salvo en el caso muy especial del polo), sino que lo ve girando alrededor de la vertical local, la cual a su vez rota en torno al eje terrestre. Esto no es un movimiento aparente sino real y complicado, producido por fuerzas reales. Más adelante regresaré al péndulo de Foucault y a discutir cuáles son las fuerzas que producen su curioso movimiento.



Precesión del plano del péndulo de Focault en París (48.8°N), visto por un observador inercial, cada 2 horas.

La desviación de la vertical —en la caída libre— es un efecto demasiado pequeño y difícil de observar.[9]

También es ínfimo el efecto con respecto al péndulo de Foucault, sólo que en este caso hay más tiempo para que se acumule un resultado tangible: se necesitan cientos de oscilaciones del péndulo para que pueda observarse un cambio de la orientación del plano. La caída libre, en cambio, ocurre demasiado rápido para que la corrección sea apreciable.

Las oscilaciones inerciales constituyen otro ejemplo donde transcurre el tiempo suficiente para que el efecto de Coriolis sea apreciable. De hecho, este tipo de movimiento es observado muy frecuentemente en el océano, sobre todo tras un cambio brusco de la dirección del viento.

Por otra parte, otro fenómeno —como el de la caída libre— donde tampoco hay tiempo suficiente para que se pueda observar normalmente el efecto de Coriolis es el del vórtice del desagüe, con el que comencé este capítulo.[10]

Allí, el sentido de giro es determinado por las peculiaridades del recipiente. El que el agua rote siempre en la misma dirección (y que ésta sea diferente en cada hemisferio) es sólo un mito sin fundamento, que demuestra la escasa capacidad de observación de la agente.

Espero haberlos convencido de que las tres "explicaciones" presentadas dos son incorrectas y una insuficiente. Todavía no he dado la explicación correcta; para hacerlo, tengo antes que platicar de otros temas. Empiezo insistiendo en el tema de la realidad y la apariencia.

[Nota 4]

4 Esta velocidad tangencial varía como el coseno de la latitud.

Inicio

[Nota 5]

5 La relación entre la altura h que cae y el tiempo t en que tarda en hacerlo, descubierta también por Galileo, está dada por $h=1/2gt^2$, donde g ($=9.8\ m/s^2$) es la aceleración de la gravedad.

Inicio

[Nota 6]

6. 57 m de altura y una latitud de 44°N; la velocidad de la base, respecto del espacio absoluto, es unos 330 m/s.

Inicio

[Nota 7]

7 Hooke, de escasos recursos, trabajó durante cuarenta años en la *Royal Society*, donde debía hacer tres o cuatro experimentos por semana demostrando nuevas leyes de la naturaleza" *(sic)*.

Inicio

[Nota 8]

8 En términos más modernos se conoce como la ley de conservación del momento angular: el producto de la velocidad angular —de rotación— por el cuadrado distancia al centro de fuerzas (el centro de la Tierra, en nuestro caso) es una constante. Esta ley, formulada aquí para una partícula, es la que explica que un patinador o un clavadista gira más rapidamente al encogerse: sus partes se acercan al centro de rotación y por tanto la velocidad angular debe aumentar.

Inicio

[Nota 9]

9 Para medirlo se necesitaría, entre otras cosas, asegurarse que al dejarlo caer, el impulso lateral que se le dé al móvil sea nulo, con una precisión de un milímetro por segundo. Hay referencias de quienes *sí* lo midieron en "Caída libre y la figura de la Tierra", *Revista Mexicana de Física* vol. 41, pp.106-127, 1995.

Inicio

[Nota 10]

10. Sin embargo, fue posible medir este efecto en experimentos muy delicados: la primera vez lo hizo Perrot, en 1859, quien dejó reposar el agua un día entero, para evitar cualquier vorticidad inicial a la hora de abrir el orificio. Ver también el notable libro del profesor Enzo Levi, *El agua según la ciencia* (CONACYT, México, 1989, pp. 364 *ss*).

Inicio

III. REALIDAD Y APARIENCIA

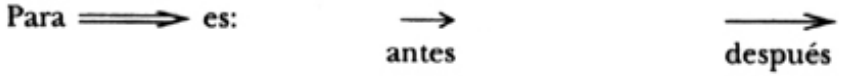
> Ya sean físicos o médicos, para poder trabajar eficientemente, los científicos usan herramientas que no entienden.
>
> D. RUELLE

ISAAC NEWTON (1642-1727) plasmó las bases de la mecánica en su célebre obra *Philosophiae Naturalis Principia Mathematica*, publicada en 1687, a la que generalmente se conoce como los *Principia*. En ella Newton establece que la *velocidad* de un cuerpo no es proporcional a la *fuerza* total que actúa sobre él (como creía Aristóteles), sino que es proporcional al cambio de velocidad, a lo que llamamos aceleración.

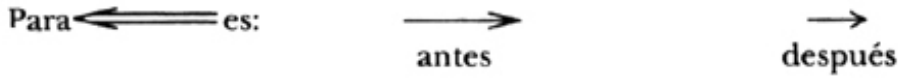
Para entender esta ley; es muy importante tener en cuenta que velocidades y fuerzas no sólo tienen magnitud sino también dirección y sentido: no sólo importa qué tan rápido va un cuerpo y qué tanta fuerza se ejerce sobre él, sino también hacia dónde va y hacia dónde se le empuja. Para simbolizar esto representamos a las velocidades y las fuerzas con flechitas (lla- madas *vectores*); usaremos una flecha sencilla (à) para las velocidades, y una doble (Þ) para las fuerzas. El largo de la flecha indica qué tan grande es la velocidad o la fuerza; su punta señala hacia dónde va el cuerpo o en qué dirección es aplicada la fuerza.

Busto de Isaac Newton

La ley de Newton (el cambio de velocidad —o aceleración— es proporcional a la fuerza aplicada) tiene diversas consecuencias, de acuerdo a la orientación de ambos vectores. Por ejemplo, si la fuerza actúa en la misma dirección que la velocidad y apunta en el mismo sentido, la rapidez (o magnitud de la velocidad, sin importar su dirección) aumenta:



mientras que si apuntan en sentido opuesto, la rapidez disminuye:



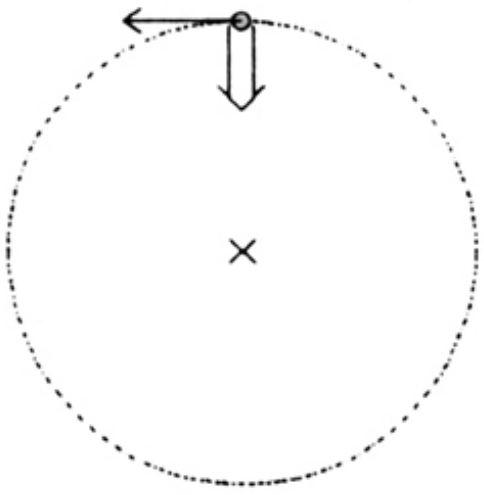
Pero si la fuerza actúa en una dirección perpendicular al movimiento, la velocidad cambia de dirección sin que su rapidez aumente o disminuya:

En estos diagramas (⇒) indica la *fuerza total* es decir, si actúan varias fuerzas entonces (⇒) es la *resultante* de ellas; cómo encontrar a la resultante —*o suma*— es algo que también determinó Newton.

Un ejemplo de los dos primeros casos corresponde a arrojar una piedra hacia arriba: mientras sube, la fuerza (que es su peso) actúa en sentido opuesto a la velocidad y el cuerpo se frena;

luego, en la bajada, la fuerza tiene la misma dirección que la velocidad y la rapidez aumenta.

Un ejemplo del último caso (fuerza perpendicular a la velocidad) es el de un objeto moviendose en un círculo con rapidez constante. Para que cambie continuamente la dirección de la velocidad, se necesita de una fuerza perpendicular a ésta, dirigida hacia el centro del círculo; a esta fuerza se le llama *centrípeta.*



Fuerza centrípeda en una honda

En el caso de una honda, la fuerza centrípeta es transmitida por las correas que sujetan a la piedra. En el caso de un planeta girando alrededor del Sol, esta fuerza es la atracción gravitatoria de nuestra estrella favorita.

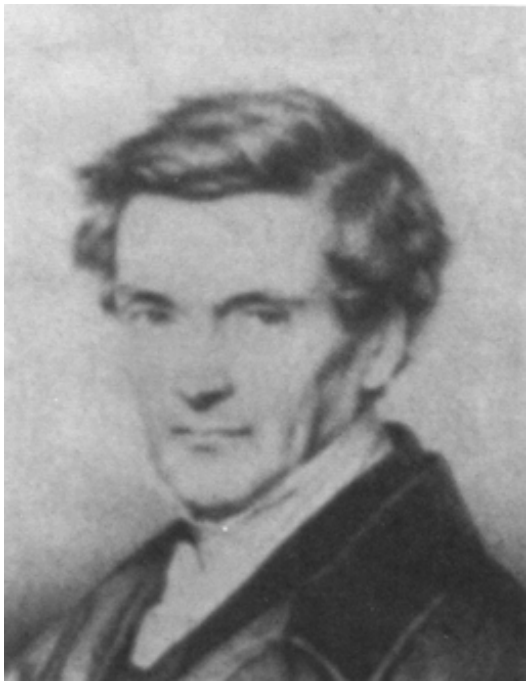
Digamos que la masa y rapidez del cuerpo son *m* y *v*, y que el radio del círculo es *r*, entonces la magnitud de la fuerza centrípeta es igual a mv^2/r. Si la Tierra no rotara, un objeto sobre el mar ideal galileano se movería en un círculo máximo y con rapidez constante; debe haber entonces una fuerza hacia el centro de la Tierra, con magnitud mv^2/R_T, donde R_T es el radio terrestre (unos 6.4 millones de metros). ¿Quién ejerce esta fuerza? El cuerpo tiene un peso mg ($g = 9.8\ m/s^2$) que debe ser contrarrestado por una fuerza *normal* a la superficie donde se apoya, de manera que no se hunda. Cuando el cuerpo está en movimiento, la fuerza normal es un poco menor a mg; la diferencia es exactamente la fuerza centrípeta necesaria para que se mueva en un círculo (máximo) de radio R_T.

Si la velocidad del cuerpo es de unos 100 kilómetros por hora (28 *m/s*), entonces esta diferencia entre la fuerza normal y el peso es unas 80 000 veces más pequeña que cualquiera de las dos. ¿Qué velocidad debería tener un satélite artificial que viajara casi rozando la Tierra? (recuérdese que en estos experimentos pensados no hay fricción con la superficie del mar galileano o con el aire) Como no toca a la Tierra, la fuerza normal es nula y *mg* debe ser la totalidad de la fuerza centrípeta mv^2/R_T, de donde resulta $v = \sqrt{(gR_T)} = 8\ km/s$ (este satélite, que ya imaginó Newton, daría una vuelta a la Tierra en 1.4 horas).

Al incluir la rotación terrestre, el satélite artificial del ejemplo hace este mismo movimiento respecto del espacio absoluto, indiferente a que la Tierra gire a sus pies. Por otra parte, un cuerpo sobre el mar galileano hace algo muy diferente, una oscilación inercial. ¿Por qué?

Una dificultad muy grande con la ley de Newton consiste en que es válida siempre y cuando la velocidad y aceleración sean las medidas por un observador inercial, no por un terrícola. Nosotros vemos al Sol dar una vuelta diaria a nuestro alrededor, pero no pensamos que sufra la acción de una fuerza centrípeta (hacia la Tierra) que lo obligue a hacer esto. Por supuesto que sí hay un par de fuerzas de atracción mutua entre la Tierra y el Sol; esta fuerza gravitatoria es responsable de la traslación alrededor del Sol, con una vuelta completa por año y no de la rotación aparente del Sol a nuestro alrededor, con un giro diario.

La ley de Newton con la que empecé este capítulo es, entonces, sólo válida para un observador inercial. ¿Qué puede hacer para usar esta ley un observador que esté rotando respecto al espacio absoluto?, es decir, uno que describe el movimiento (posición, velocidad, aceleración, etc.) desde un *sistema de referencia no inercial*. Es aquí donde aparece al nombre de Coriolis (aunque voy a cuestionar su prioridad en el caso del océano).



Gaspard Gustave Coriolis

Gaspard Gustave de Coriolis (1792-1843), de familia noble y salud frágil (razón por la que, aparentemente, no se casó), era hijo de un oficial leal a Luis XVI refugiado en Nancy. En 1816 aceptó el cargo de tutor en análisis en la napoleónica *Ècole Polytechnique*, donde había estudiado. Más que a la investigación, se dedicó a la docencia, en la que se destacó por la claridad de sus conceptos. Sostenía que la *mecánica* debía enunciar principios generales aplicables a la operación de los motores y al análisis del funcionamiento de las máquinas; eran éstas las que le interesaban, no los océanos y la atmósfera. En términos modernos diríamos que Coriolis era más un ingeniero —o un profesor de ingeniería— que un científico.

Fue precisamente pensando en las máquinas que se interesó en el problema de los movimientos relativos y de los cambios de sistema de referencia. En 1835 publica su articulo "Mouvement relatif des systèmes de corps", donde analiza cómo debe escribirse la ley de Newton para un sistema de referencia cualquiera, en particular, para observadores en rotación respecto de un sistema inercial. Dice Coriolis

> Para establecer una ecuación cualquiera del movimiento relativo de un sistema de cuerpos [...] basta con agregar a las fuerzas existentes dos especies de fuerzas suplementarias; las primeras son [...] opuestas a aquellas capaces de mantener los puntos materiales invariablemente ligados a los planos móviles: *las segundas están dirigidas perpendicularmente a las velocidades relativas y al eje de rotación de los planos móviles; ellas son iguales al doble del producto de la velocidad angular de los planos móviles, multiplicada por la cantidad de movimiento relativo proyectada sobre un plano perpendicular a este eje.*

Es decir, el cambio de velocidad, la aceleración medida por un observador inercial, es también proporcional a la "fuerza total", sólo que en ésta hay que agregar a las fuerzas reales (producidas por la atracción gravitatoria, resortes, cordeles, etc.) dos fuerzas ficticias, que no estarían presentes si el observador fuera inercial. *La primera fuerza* ficticia corresponde a la aceleración absoluta de un punto fijo a los nuevos ejes coordenados; dentro de ésta se incluye la fuerza centrífuga, a la que haré mención inmediatamente. La *otra fuerza ficticia* que hay que agregar, tiene una dirección perpendicular a la velocidad observada en el sistema en rotación; ésta es la que hoy se conoce como fuerza de Coriolis, quien concluye

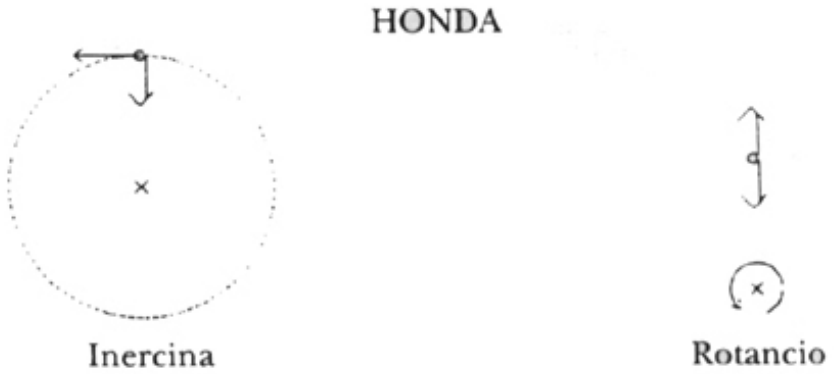
> Estas fuerzas últimas poseen la mayor analogía con las fuerzas centrífugas ordinarias [... por lo que] he creído [conveniente nombrarlas] "fuerzas centrífugas compuestas".

Éste es un pésimo nombre (lo que no habla en favor de la claridad didáctica de G. Coriolis), que por suerte no perduró, ya que la fuerza de Coriolis y la centrífuga apuntan en direcciones independientes.

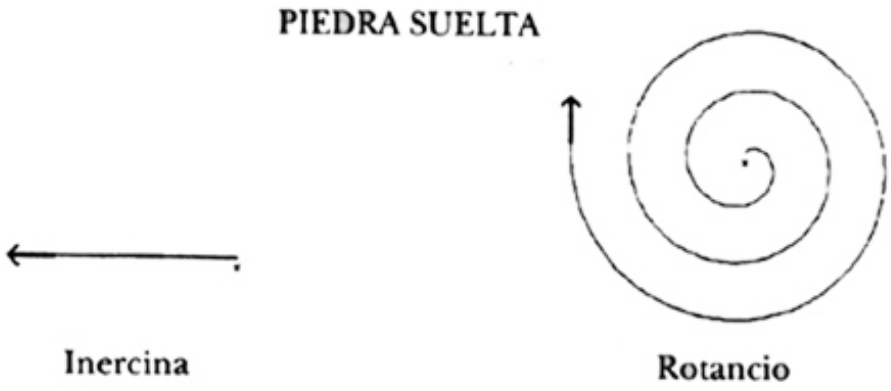
Voy a distinguir entre las fuerzas centrífuga y de Coriolis (mostrando, además, su carácter de "ficticias") mediante el análisis de tres ejemplos. El primero corresponde a un objeto que está rotando relativo al espacio absoluto (digamos, la piedra de una honda) pero se le ve quieto en un cierto sistema no inercial. El último es el caso simétrico, un objeto que está quieto en el espacio absoluto, pero que en un sistema no inercial parece estar rotando.

Para presentar los dos puntos de vista de cada fenómeno, voy a presentar un diálogo entre dos personajes, *Inercina* y *Rotancio*. La primera observa el movimiento desde el espacio absoluto,[11] y aplica directamente la ley de Newton usando únicamente fuerzas reales. Rotancio, en cambio, ve y mide desde una plataforma en rotación; para aplicar la ley de Newton debe agregar, a las fuerzas reales, la centrífuga y la de Coriolis.

> INERCINA.- He aquí un experimento que demuestra la validez de la ley de Newton. Una piedra atada a un cordel gira en forma uniforme. Aunque su rapidez no varía, la velocidad está cambiando continuamente de dirección, por lo que se necesita una fuerza (real) dirigida hacia el centro de rotación. Esta fuerza la ejerzo yo, con mi mano, por intermedio del cordel.



ROTANCIO.- Yo en cambio veo la piedra quieta. Me doy cuenta que la estas jalando porque el cordel se ve tenso; esa fuerza que tú haces está exactamente equilibrada por la centrífuga y es por eso que su velocidad no cambia.



Nótese que Rotancio no habla de la fuerza de Coriolis ya que la piedra, desde su punto de vista, no se mueve y por lo tanto dicha fuerza es nula. Luego siguen...

INERCINA.- ¡Caray! se acaba de romper el cordel. La piedra sigue ahora una trayectoria recta; su velocidad no cambia porque ya nadie ejerce una fuerza sobre ella.[12]

ROTANCIO.- En el momento en que se cortó el cordel, vi que la piedra se empezó a mover. Está realizando un movimiento en espiral muy curioso, girando a mi alrededor y alejándose de mí. Acabo de verificar que estos cambios de velocidad corresponden a la acción conjunta de las fuerzas centrífuga y de Coriolis; no hay otras fuerzas actuando sobre la piedra.

Finalmente veamos una experiencia muy sencilla pero poco analizada: cómo observan, a una "estrella fija", Inercina y Rotancio (quien para estos efectos puede ser cualquier terrícola que haya leído a Coriolis).

INERCINA.- Esa estrella solitaria está quieta y aislada; no experimenta la acción de ninguna fuerza y su velocidad (nula) permanece inalterable. Este es un ejemplo trivial de la validez de la ley de Newton.

ROTANCIO.- Veo a esa estrella girar alrededor del eje terráqueo, es decir, tiene una aceleración centrípeta, dirigida hacia dicho eje. Si Newton y Coriolis están en lo cierto, esa aceleración debe ser igual a la suma de todas las fuerzas —reales y aparentes— que actúan sobre la estrella.

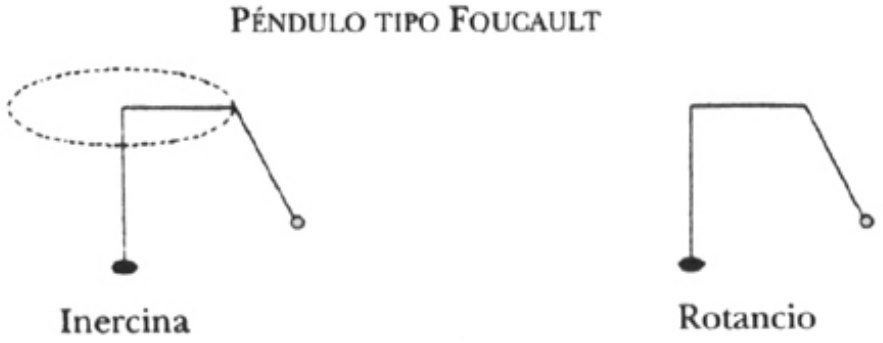
Ese astro se halla demasiado lejano para que la Tierra lo pueda atraer; no hay fuerzas reales. La fuerza centrífuga tiene la magnitud deseada, ¡pero apunta en la dirección opuesta a la aceleración! Afortunadamente como veo moverse a la estrella, debo agregar la fuerza de Coriolis. Esta debe ser perpendicular a la velocidad; de hecho, en este caso apunta en la dirección centrípeta.

Haciendo cuidadosamente los cálculos, veo que la fuerza de Coriolis es igual a *dos* veces la que necesito, mientras que la centrífuga es igual a *menos* la aceleración: la suma vectorial de ambas fuerzas ficticias me da exactamente la aceleración que observo [2-1=1]. ¡Newton y Coriolis han sido reivindicados!

La diferencia de experiencias entre Inercina y Rotancio es entonces explicada mediante las dos fuerzas adicionales que utiliza el segundo. La primera, es la centrífuga que es tanto mayor cuanto más lejos está el móvil del eje de rotación y actúa hacia afuera de él (de ahí su nombre). La otra, es la de Coriolis que es proporcional a la velocidad con que Rotancio ve moverse al objeto y actúa en dirección perpendicular al movimiento. Sobre el carácter *aparente* de estas dos fuerzas no queda ninguna duda, sobre todo con el último ejemplo (diagrama derecho en la última figura) donde se muestra que las estrellas giran alrededor nuestro "debido" a la acción conjunta de las fuerzas centrífugas y de Coriolis.

¿Cómo explican Inercina y Rotancio el comportamiento del péndulo de Foucault? Para Inercina, un péndulo funciona debido a dos fuerzas, reales, que actúan sobre su masa: el peso y la tensión del cordel. A diferencia del peso, el valor de la tensión no es conocido *a priori*, sino que sólo se sabe su consecuencia: el cordel no se estira. En un péndulo "normal", el punto de apoyo está fijo respecto del espacio absoluto, mientras que en el péndulo de Foucault, ese punto obligado a moverse en un círculo alrededor del eje terrestre; no debe sorprender que la forma de la tensión que resulta en el segundo caso sea más complicada.

En la figura se muestra un péndulo tipo Foucault, construido en el laboratorio. Y se determina que el punto de apoyo del péndulo se mueva en círculo, en forma tal que el tiempo que tarda en dar una vuelta completa es mucho mayor que el periodo de oscilación del péndulo. La posición de equilibrio del péndulo está un poco inclinada hacia afuera.



No es éste el lugar para repetir el cálculo que haría Inercina (pueden creerme que da el resultado correcto), sólo quiero destacar que, para él, la *forma de la Tierra* carece de importancia; sólo interesa que el punto de apoyo es obligado a moverse en círculo. Al oscilar el péndulo, se acerca o aleja.

El cálculo que debe hacer Rotancio es mucho más sencillo (recuerden que ambas descripciones son equivalente, G. Coriolis dio las reglas precisas para pasar de una a otra), ya que él ve al punto de apoyo fijo (parte derecha de la

figura o un péndulo sobre la Tierra). Claro que Rotancio, por su condición de no inercial, debe usar cuatro fuerzas: el peso, la tensión del cordel, la centrífuga y la de Coriolis. La primera es bien conocida; de la segunda se sabe su efecto (la longitud del cordel no varía); la tercera y cuarta dependen de la posición y velocidad medidas por

Rotancio, respectivamente. El efecto de la centrífuga es cambiar la dirección de reposo del péndulo.[13] En cuanto el péndulo oscila alrededor de esta posición de equilibrio, la fuerza de Coriolis lo desvía poco a poco, provocando que el plano de oscilación rote lentamente, tal y como se observa en los museos de ciencia.

Las explicaciones que dan Inercina y Rotancio acerca de las oscilaciones inerciales, tema que es central para este libro, son presentadas en el siguiente capítulo.

[Nota 11]

11 Un terrícola puede en realidad ser considerado un observador inercial, durante un tiempo suficientemente pequeño. Por ejemplo, en los experimentos de la caída libre o del fregadero, expuestos más arriba.

Inicio

[Nota 12]

12 La escala de esta figura es mucho mayor que la de la anterior.

Inicio

[Nota 13]

13 Ésta es la dirección de la plomada, o vertical, por lo que este cambio es localmente imperceptible, como veremos más adelante.

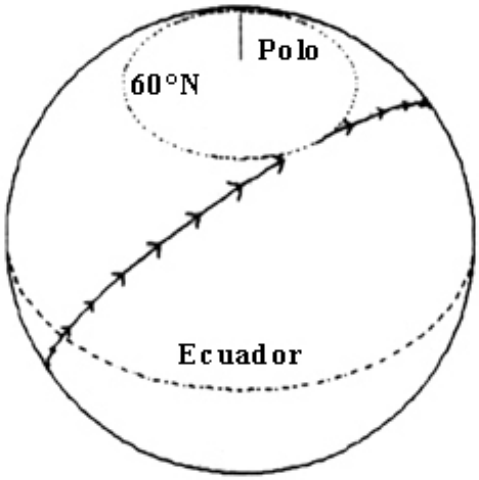
Inicio

IV. SOBRE NAVES DE AQUÍ Y ALLÁ

Es más fácil viajar en un avión, incluso pilotearlo, que entender por qué puede volar.

J. VON NEUMANN

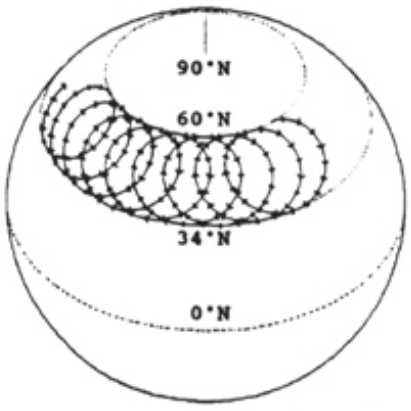
CON el fin de ilustrar la acción del efecto de Coriolis en ausencia de fricción u otras fuerzas horizontales, voy a mostrar cómo es que aquél modifica la predicción de Galileo ilustrada en la segunda figura del capítulo 1, es decir, la trayectoria seguida por una partícula que recibe un cierto impulso en el mar congelado galileano.



Movimiento inercial, predicho por Galileo Galilei

Vamos a comparar los resultados con y sin efecto de Coriolis, pero sin incluir la acción de otras fuerzas horizontales. Claro que dentro del laboratorio de Galileo —¡de dimensiones inferiores a los cientos de kilómetros! —ambas trayectorias coincidirían. El movimiento horizontal dentro de un laboratorio es como el caso del fregadero no hay tiempo suficiente para que se acumule un efecto tangible de la rotación terrestre (el péndulo de Foucault logra esta acumulación porque no se sale de su pequeño territorio durante un tiempo lo suficientemente grande).

Para fijar ideas, repetimos la figura del capítulo 1, suponiendo que el cuerpo es arrojado hacia el Este desde los 60°N con una velocidad de 1 389 km/h, lo que implica que tarda 28.8 h (6/5 d) en dar una vuelta completa; las flechas están dibujadas cada hora y la última es a las 28 h de haber partido. ¿Es éste el movimiento sobre la Tierra en rotación pero sin fricción? No, sobre la Tierra, para la *misma* velocidad absoluta y posición inicial, el movimiento es el siguiente:

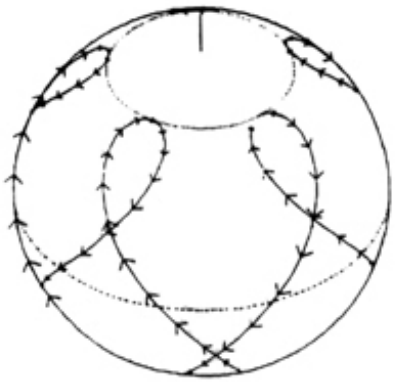


Movimiento de un cuerpo sobre la tierra

El movimiento se realiza con rapidez constante y es principalmente circular (son las oscilaciones inerciales a que hacía alusión más arriba) al que se añade una suave deriva hacia el occidente. Para velocidades inferiores, el círculo resulta menor y la deriva mucho menor, ya que aquél es proporcional a la rapidez y ésta es proporcional al cuadrado de la rapidez. Si el cuerpo es lanzado desde el hemisferio sur, el círculo inercial es recorrido en el sentido opuesto, pero la deriva es también hacia el occidente: se puede representar esto colocando un espejo imaginario en el ecuador.

Voy a tratar de convencerlos de que la diferencia entre esta trayectoria y la galileana, de la figura anterior, representa un efecto real, que debe ser producido por una fuerza real. Ningún observador inercial puede ver este cuerpo recorriendo un círculo máximo, como si fuera un fenómeno aparente; estrictamente hablando, la predicción de Galileo no es correcta. Esto no es una crítica al gran maestro, ya que era imposible que imaginara fenómenos de escalas mayores que las de sus experimentos de laboratorio, medio siglo antes de que Newton enunciara la mecánica, un siglo y medio antes de que Laplace publicara su teoría de las mareas, dos siglos antes de que Coriolis presentara su trabajo, y más de dos siglos antes del experimento definitivo de Foucault.

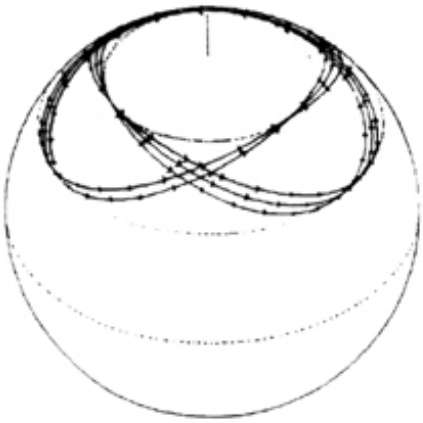
Para aclarar las ideas, desde nuestra perspectiva moderna podemos pensar en la primera figura como el trazo sobre la superficie terrestre de la posición de un satélite artificial en órbita circular. El satélite es indiferente a la rotación del planeta. La segunda figura sí corresponde a la trayectoria de un cuerpo sobre el mar ideal galileano, sin fricción, pero incluyendo los efectos de la rotación terrestre. Para distinguir entre ambos casos, podemos llamar al primero "satélite" y al segundo "barco". No hay que olvidarse que el segundo es un caso altamente idealizado, por la ausencia de fricción u otras fuerzas horizontales. La primera figura muestra la órbita del satélite vista desde el espacio absoluto, o sea, por una observación inercial. Para poder compararla con la trayectoria del barco en la segunda gráfica, debemos conocer la órbita del satélite tal y como la observa un terrícola, lo que se logra simplemente agregándole una rotación a la trayectoria de la primera figura, como se muestra aquí.



Órbita de un satélite vista por un terrícola.

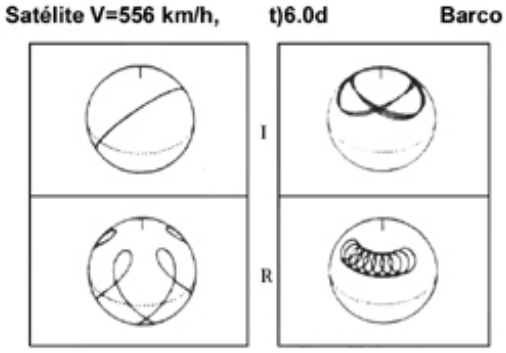
Se eligió la velocidad del satélite de manera que tarde 6/5 d (= 28.8 h) en dar una vuelta completa. Desde el punto de vista terrícola, mostrado en esta figura, cada 6/5 d, el satélite ha ido de 60°N a 60°S y regresado, avanzando 360° de longitud, mientras que la Tierra ha girado (en dirección contraria) (6/5) x 360° = 432°. El resultado neto es que el satélite parece haber retrocedido 72° (= 432° - 360°). En seis días regresa al lugar de partida luego de cinco bajadas y subidas. (Sin embargo, la órbita vista por un terrícola no es por lo general, cerrada; aquí se eligió una velocidad muy particular para que fuera así.)

La diferencia entre esta figura y la primera es un efecto *aparente* de la rotación terrestre. El hecho de que las oscilaciones inerciales de la segunda figura no se parezcan en nada a esta trayectoria (nótese que ambas son vistas desde el *mismo* sistema de coordenadas) es lo que nos permite afirmar que constituyen un efecto real de la rotación de nuestro planeta. Para completar la descripción de ambos movimientos, satélite o barco, y desde ambos sistemas de observación, espacio absoluto (inercial) o terrícola (en rotación), falta señalar como se ven las oscilaciones inerciales del "barco" desde el espacio absoluto. Esto se muestra en la figura siguiente



Movimiento de un cuerpo sobre la tierra, pero visto desde el espacio absoluto

En la siguiente gráfica facilitamos la comparación poniendo los cuatro casos juntos.



En esta gráfica y las siguientes hay cuatro cuadros, correspondientes a dos fenómenos diferentes y a dos formas distintas de observarlos. Los dos cuadros superiores (etiquetados con *I*) muestran cómo ve las trayectorias una observadora inercial, fija al espacio absoluto, mientras que los dos inferiores (etiquetados con *R*) hacen lo propio para un terrícola en rotación respecto del espacio absoluto. Como ya dije antes, el "satélite", cuya trayectoria se muestra en los cuadros de la izquierda es indiferente a la rotación terrestre. En cambio, el "barco" (cuadros de la derecha) sufre evidentemente los efectos reales de la rotación terrestre.

De arriba abajo hay un cambio de sistema de coordenadas; de izquierda a derecha se cambia de fenómeno físico. Si los efectos de la rotación terrestre fueran aparentes, como pretenden algunos autores, no habría diferencia entre izquierda y derecha. Nótese que es más sencillo describir al satélite en el sistema inercial (cuadro superior izquierdo) y al barco en el sistema en rotación (cuadro inferior derecho). Como es de imaginarse, esto no solo es cierto para la *descripción* de la trayectoria sino también para la formulación y resolución de las ecuaciones que la gobiernan.

El programa *Galileo* en el diskette que acompaña a este libro sirve para reproducir éstos y otros casos. Recomiendo usarlo extensivamente hasta familiarizarse con las diferencias de los cuatro cuadros, con los tipos de soluciones que ocurren con diferentes condiciones iniciales y la enorme distorsión que sufren las trayectorias presentadas sobre un mapa plano.

Es necesario hacer un par de aclaraciones sobre las velocidades del barco y el satélite. La velocidad V indicada en la parte superior de la gráfica es la del barco medida por un terrícola (cuadro inferior derecho), la cual se observa que no cambia con el tiempo. La rapidez del satélite medida por un observador inercial (cuadro superior izquierdo) tampoco varía con el tiempo; su valor V' *sobre la superficie terrestre* es la suma de V más la velocidad de un punto de la Tierra a la latitud inicial. (Ya que en el instante inicial el barco va hacia el oriente, se pueden sumar ambas velocidades sin necesidad de hacer una suma de vectores.)

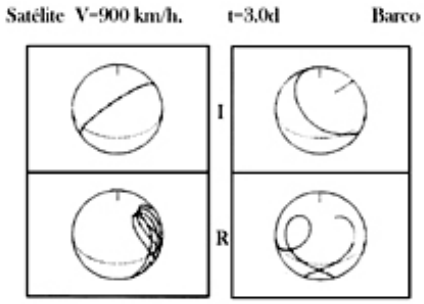
Por ejemplo, para el caso anterior elegimos V= 556 km/h y la latitud inicial de 60°N. La velocidad, respecto del

espacio absoluto, de un punto del ecuador es de (40 000 km) / (24 h)= 1667 km/h y por lo tanto los puntos a 60°N se mueven con una velocidad igual a esta última multiplicada por el coseno de 60°, que es igual 0.5, o sea a 833 km/h. Por lo tanto la velocidad de la proyección de la órbita del satélite sobre la superficie de la Tierra (es decir, la del trazo del cuadro superior izquierdo) es V'= 556 km/h + 833 km/h = 1389 km/h, es por eso que le toma (40 000 km)/(1 389 km/h) = 28.8 h en dar un vuelta completa.

Esta es la forma correcta de relacionar, en general, las velocidades del barco V y la del satélite sobre la superficie terrestre V'; pues están medidas en distintos sistemas de coordenadas. Las velocidades del barco, medidas desde el sistema inercial, cuadro superior derecho, y del satélite, medida desde el sistema en rotación, cuadro inferior izquierdo, no son constantes sino que varían con el tiempo: la primera disminuye y la segunda aumenta al acercarse al cuadro. Finalmente, la verdadera rapidez del satélite en el espacio absoluto no es V' sino mayor, ya que no se mueve pegado a la superficie terrestre, sino a una cierta altura sobre ella.[14] Por ejemplo, para el caso anterior el satélite requeriría estar a unos 6.5 radios terrestres de altura y su verdadera velocidad sería 7.5 xV' =10 389 km/h.

El lector sin demasiado gusto por las matemáticas puede hacer a un lado todos estos detalles y simplemente notar que V es la velocidad del barco medida por un terrícola, ya que los parámetros del satélite son tales que si el efecto de la rotación terrestre sobre el barco fuera aparente, que no lo es, los cuadros de la izquierda y de la derecha deberían coincidir, que no lo hacen.

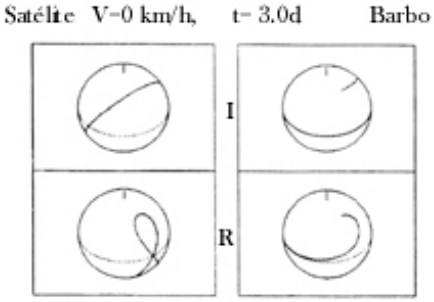
Veamos otros casos: si se arroja el cuerpo desde el mismo lugar pero con una velocidad mucho mayor se obtiene lo siguiente.



La proyección de la órbita del satélite sigue siendo, por supuesto, un círculo máximo (cuadro superior izquierdo) sólo que lo recorre más rápido que el caso anterior: le lleva menos de 18 h dar una vuelta completa. Esto lo observa un terrícola en el hecho que el satélite barre más la superficie del planeta (cuadro inferior izquierdo). Para el barco la situación es bien diferente (cuadro inferior derecho): la velocidad es suficientemente alta para que la oscilación inercial sea tan grande que el barco llega a cruzar el ecuador. En el instante en que lo cruza el sentido de giro cambia de horario a antihorario.

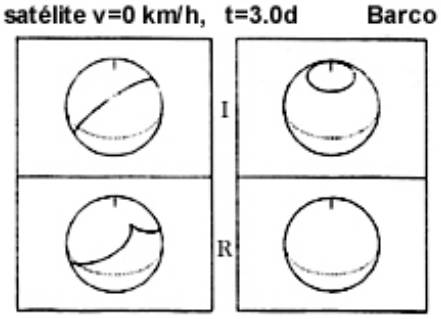
Comparando las dos últimas figuras, podemos pensar que hay una velocidad intermedia en la que el barco casi cruza el ecuador, pero no lo logra. Para una latitud original de 60°N (que estamos usando en todas estas figuras para facilitar la comparación) eso ocurre para una rapidez de 833 km/h, como se muestra en los cuadros de la derecha de la gráfica siguiente.

Fíjense qué curiosa es la órbita del satélite sobre la superficie del planeta observada por un terrícola (cuadro inferior izquierdo): es cerrada con forma de ocho. Esto es así porque al satélite le lleva exactamente un día recorrer su órbita (para esto se necesita que esté a una altura de 5.6 radios terrestres). Ese ocho puede ser reducido a un punto sobre el ecuador, es decir, el satélite se ve estacionario desde la Tierra; éste es el caso de los satélites de comunicaciones, que han hecho posible que en vez de tener acceso a unos diez canales de televisión, con programas malos, en muchos hogares se puedan ver ahora cientos de canales, con programas igualmente malos.



El último ejemplo es muy ilustrativo; corresponde a lo que pasa si se apoya un cuerpo sobre la superficie terrestre, es decir, V=0.

En el cuadro inferior derecho hay tan solo un punto (que puede ser difícil de ver) a 60°N: si se apoya un objeto sobre una superficie horizontal allí se queda, por pulida que esté ésta, indiferente a la rotación terrestre. Un observador inercial ve a ese objeto moverse a lo largo de un paralelo (cuadro superior derecho) que no es un círculo máximo; de esa forma se ve mover a las ciudades y montañas terrestres desde el espacio absoluto. En los cuadro de la izquierda se ve la trayectoria correspondiente a un satélite que para un terrícola (cuadro inferior izquierdo) parece detenerse en 60°N y 60°S un instante, para volver a oscilar, como un péndulo, alrededor del ecuador.[15]



Como ya dije anteriormente, mi objetivo es no sólo convencerlos de que el efecto de Coriolis es real, sino también tratar de explicarles cuál es su causa y quién lo descubrió (que no fue G. Coriolis). Quizás algún lector ya se esté preguntando cómo puede ser que los solemnes físicos (a los que por el siglo de Mozart se les llamaba *geómetras*, en recuerdo de Euclides quien dedujo toda la geometría a partir de tan sólo cinco postulados), repito, cómo puede ser que los físicos hagan buen trabajo sin necesariamente entender sus bases, confundiendo lo real con lo aparente.

[Nota 14]

14 La velocidad del satélite en el espacio absoluto no es V' sino V' $(R_T + h)\ R_T$, donde R_T es el radio terrestre y h la altura sobre la superficie del planeta a la que está el satélite. Igualando la aceleración centrípeta del satélite, $[V'(R_T + h)/R_T]^2/(R_T + h)$, a la atracción gravitatoria a esa altura $g[R_T/(R_T + h)]^2$, se obtiene $(h/R_T + 1)^3 = gR_T/V^2$, que no es más que la tercera ley de Kepler, la que permite calcular h en función de V.

Inicio

[Nota 15]

15. V=0 y 60° de latitud inicial corresponden a V'= 833 km/h. El periodo del satélite es de dos días, para lo que debe estar a una altura de 9.5 radios terrestres.

Inicio

V. LAS GRANDES MASAS

> Podemos considerarnos afortunados de vivir en una sociedad y en una época en que en realidad nos pagan por explorar el Universo.
>
> H. STOMMEL

EN VENECIA hay un instituto de oceanología —u oceanografía, como prefieren algunos— con un nombre muy simpático: *Istituto per lo Studio della Dinamica delle Grandi Masse;* nombre donde la propiedad distintiva de los océanos es su gran masa, hecho indudable, por cierto. Sin embargo, pienso que es más importante destacar al efecto de Coriolis, ya que su presencia es lo que distingue fundamentalmente la dinámica de los océanos y las atmósferas planetarias de la mecánica de fluidos en escalas menores de la física de albercas y alambiques.

Poetas y físicos nos complacemos con situaciones como las de las figuras del capítulo anterior, que son estrictamente irrealizables; no sólo ayudan a entender un fenómeno, aislándolo, sino que también son bellas. Pero si el lector es un economista o un comerciante puede inquietarse y preguntar ¿para qué sirve todo esto? Para satisfacer un poco esta curiosidad voy a platicar un poco sobre la importancia del efecto de Coriolis en el océano (en la atmósfera de la Tierra o de otros planetas, se dan fenómenos similares).

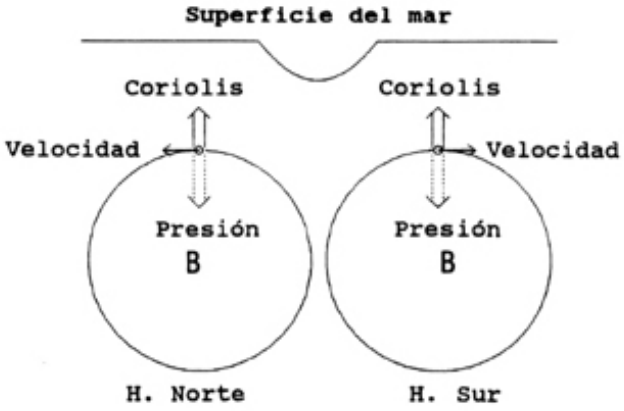
No es común que se observen oscilaciones inerciales "puras" como las de la segunda figura del capítulo anterior, sin embargo, uno de los fenómenos más habituales en el océano es que el agua ejecute una oscilación en un círculo inercial superpuesta a la deriva producida por las grandes corrientes oceánicas. Es decir, una trayectoria similar a la de aquella figura, pero en escala mucho más pequeña y además donde la deriva no se da necesariamente hacia el occidente, sino hacia donde se dirige la corriente en ese lugar del océano. Este fenómeno se observa, sobre todo, luego de un cambio en el viento, en flotadores que siguen al agua superficial o subsuperficial o en los registros de corriente en un punto fijo. En este último caso, lo que se ve es una marcada acumulación de energía en la frecuencia inercial (correspondiente a un periodo de doce horas dividido por el seno de la latitud local). Estas oscilaciones horizontales de grandes masas de agua son lo más cercano que hay a la acción sola de la fuerza de Coriolis, pero más interesante es la situación donde esta fuerza actúa junto con la fuerza de presión, como paso a descubrir.

Los ciclones no sólo se producen en la atmósfera terrestre y la de otros planetas, sino que también son muy comunes en el océano. Un ciclón corresponde a una depresión de la superficie del mar aparentemente insignificante pero de dimensión horizontal considerable para lo que constituye nuestra experiencia diaria. Por ejemplo, un hundimiento máximo de diez centímetros en el centro, pero con un radio de cientos de kilómetros. La pendiente de la superficie del mar es pequeñísima, del orden de una diezmilésima de grado, pero por su gran extensión horizontal resulta fundamental para la dinámica oceánica. Tal hundimiento implica una fuerza de presión dirigida hacia el centro del ciclón; si el agua estuviera en reposo, este hueco sería rápidamente llenado en unos cuantos días. No es eso lo que se observa, por lo que hay que agregar más elementos.

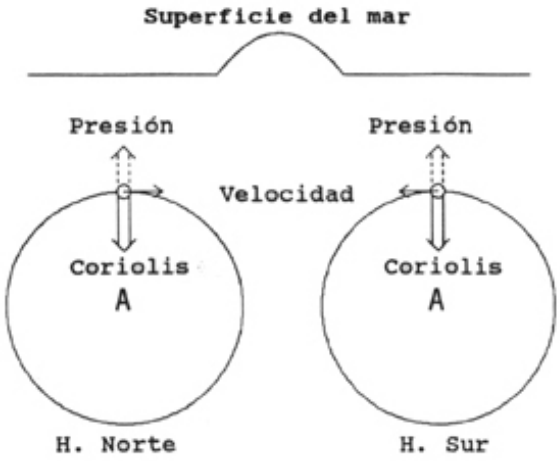
Una posibilidad es que la fuerza de presión produzca una aceleración centrípeta que haga girar al agua alrededor de ese centro, tal y como gira la piedra de una honda gracias a la tensión de las correas. Esta hipótesis lleva a dos conclusiones que no corresponden en absoluto a lo observado: primera, el agua podría rotar en uno u otro sentido, al igual que la misma tensión en las cuerdas sirve para que la piedra de la honda gire en cualquier dirección.

Segundo, la rapidez del agua sería del orden de un metro por segundo,[16] lo que es mucho mayor que las velocidades observadas.

Falta un elemento fundamental, la fuerza de Coriolis. Está equilibrada en gran parte a la de presión (lo que se llama *balance geostrófico*); la pequeña diferencia entre las fuerzas de Coriolis y la de presión es la que provoca la aceleración centrípeta del movimiento circular. Recuérdese que la dirección de la fuerza de Coriolis depende de la dirección de la velocidad: de hecho es tal que tiende a hacer girar un cuerpo hacia la derecha de la dirección de su movimiento en el hemisferio norte y hacia la izquierda en el hemisferio sur. Luego, para que (casi) exista un equilibrio entre las fuerzas de presión y de Coriolis, se necesita que el fluido en un ciclón gire en sentido antihorario u horario en los hemisferios norte y sur, respectivamente (véase las figuras siguientes).



Estructura vertical y horizontal de un ciclón (centro de baja presión).



Estructura vertical y horizontal de un anticiclón (centro de presión alta)

Un caso aún más interesante es el de un *anticiclón,* es decir, un remolino con la estructura de una colina —en vez de una depresión— en la superficie del mar, es decir, un centro de alta presión. En este caso, también muy frecuente en el océano, la fuerza de presión que apunta hacia afuera del centro, tendería a aplastar rápidamente la colina desparramándola en todas direcciones. No ocurre eso, sino que el remolino gira de manera tal que la fuerza de Coriolis casi equilibra a la de presión. (Más precisamente, aquella es un poquito más fuerte que ésta, mientras que para los ciclones debe ser un poquito más débil.) Para que se pueda producir este balance (parcial), el agua debe girar en el sentido horario si el remolino está en el hemisferio septentrional y, en el antihorario si está en el austral.

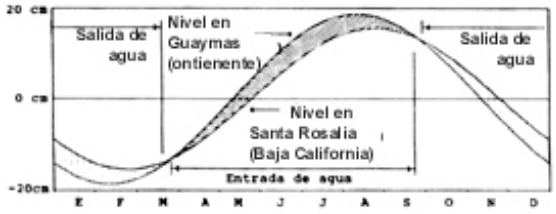
Si miran una carta meteorológica de esas que aparecen en los periódicos o la televisión, verán que la dirección del viento es alrededor de los centros de baja (B) y alta (A) presión y en el sentido que se muestra en las dos figuras anteriores. Que el sentido de giro esté determinado por la dirección de la fuerza de Coriolis indica la importancia fundamental de la rotación terrestre para estos fenómenos oceánicos y atmosféricos.

Es tal nuestra confianza en el balance geostrófico, que es más común medir la fuerza de presión, de ella inferir la de Coriolis —suponiendo, con toda justeza, que están prácticamente en equilibrio— y, finalmente, de esta última, calcular la velocidad que es proporcional en magnitud y perpendicular en dirección a la fuerza de Coriolis. Medir presión es más fácil que medir velocidades. Dados dos puntos a la misma profundidad, la presión en cada uno de ellos es esencialmente el peso de la columna de agua (y aire) que está por encima; por eso es que una elevación de la superficie del mar (con dimensiones horizontales lo suficientemente grandes) es un centro de alta presión y una depresión lo es de baja presión, es decir, los anticiclones y ciclones que he mencionado.

A lo largo de las costas de los mares del mundo existen estaciones mareográficas que miden la variación, con el paso del tiempo, del nivel del mar. El objetivo original de estas mediciones es determinar la marea, es decir, las oscilaciones periódicas de la superficie con periodos de aproximadamente medio día y un día. (Como está

compuesta de partes realmente periódicas, que se repiten exactamente cada cierto tiempo fijo, sí es posible predecirla, del mismo modo que es posible predecir dentro de cuántas horas va a amanecer o va a haber un eclipse.) Si se promedian los datos de nivel del mar de todo un mes se eliminan las oscilaciones de la marea, del mismo modo que si se promedia un mes de datos de temperatura de algún lugar desaparece la oscilación correspondiente al día y la noche.

El promedio mensual del nivel del mar no es igual de un mes al otro, como tampoco lo son las temperaturas medias mensuales que reflejan la variación estacional de invierno, primavera, verano y otoño. Si se analizan los promedios mensuales de los datos de las estaciones mareográficas en el Golfo de California, se verá que, a fin de año, el nivel del mar es unos cinco centímetros más bajo en la costa continental que en la península de Baja California; lo opuesto ocurre seis meses más tarde (véase figura). Esto significa que hay una fuerza de presión que empuja el agua de la superficie hacia el continente hacia fin de año, para ir cambiando suavemente hacia la situación contraria seis meses más tarde y luego regresar a la original en seis meses más.



Variación anual del nivel del mar y corriente superficial

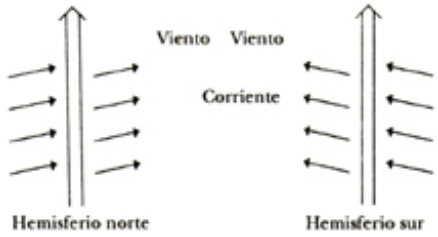
Si la Tierra no rotara, este desnivel mandaría el agua de una costa a la otra. No es eso lo que ocurre, el agua superficial se mueve fundamentalmente *a lo largo del Golfo,* saliendo entre octubre y marzo (cuando la fuerza de presión la empuja hacia el continente) y entrando el resto del año (cuando esa fuerza presiona hacia la península); de esta forma la fuerza de Coriolis está en equilibrio con la de presión, al igual que ocurre en los ciclones y anticiclones anteriormente descritos. Ambas fases están sombreadas con puntos y rayas inclinadas en la figura. Nótese que el nivel promedio entre ambas costas (no el desnivel) aumenta cuando entra agua el Golfo y disminuye cuando sale, lo que tiene sentido.

La máxima velocidad de entrada y salida, calculada a partir del máximo desnivel, es de unos cinco centímetros por segundo. Puede parecer un poco absurdo preocuparse de velocidades tan pequeñas y de elevaciones del nivel del mar de tan sólo decímetros; después de todo el oleaje y la marea son responsables de cambios mucho más grandes en la superficie del mar. Sin embargo, esta comparación no es válida porque los cambios del nivel del mar a que me refiero ocurren en una escala temporal, la anual, mucho más grande que la del oleaje, y la dinámica asociada a este fenómeno es bien diferente, como paso a explicar.

Mencionaba que la presión en un punto se puede calcular, con cierta facilidad, midiendo el peso de toda el agua que hay por encima de él. Lo que importa es esta diferencia de presión entre dos puntos a la misma profundidad; esta diferencia representa la fuerza horizontal en esa parte del océano. Hasta el momento me he referido a las diferencias de presión en dos puntos cercanos a la superficie debidas a la inclinación de ésta. Para calcular diferencias de presión a mayor profundidad, se debe tomar en cuenta los cambios de peso del agua de mar con la temperatura: cuanto más caliente es menor la densidad, o sea el peso por unidad de volumen.[17] Lo que se encuentra es sorprendente: bajo el lugar donde la superficie del mar se halla elevada, el agua está más caliente, y más fría debajo de donde se hunde la superficie. En otras palabras, el agua es, en promedio, más liviana donde se eleva la superficie del mar, o más pesada donde está hundida.

Consecuencia de lo anterior es que la diferencia de presión entre dos puntos disminuye con la profundidad, llegando incluso a cambiar de signo; esto significa —de acuerdo al balance geostrófico— que a fin de año, cuando el agua cercana a la superficie está saliendo del Golfo de California, el agua más profunda está de hecho entrando a él y viceversa seis meses después. La cantidad de agua que entra y sale prácticamente se compensan, por eso es que el nivel del mar no varía tanto, pero en lo que no hay compensación sino un flujo neto muy importante es con el calor: en otoño e invierno el agua que sale es la superficial, la cual está más caliente que la que entra, la profunda; por lo tanto se produce una pérdida neta de calor del Golfo, el cual se enfría.[18] Lo contrario ocurre en primavera y verano, cuando el sentido de la corriente superficial y profunda se revierte. ¿Qué tan grandes son la

ganancia y la pérdida de calor en el Golfo de California? Los valores máximos son del orden de decenas de billones de watts, lo que es unas mil veces mayor que el consumo de electricidad en todo México. La señal escondida en esos centímetros de variación de nivel del mar es por cierto muy importante; he aquí una "punta de témpano", sólo que de calor y no de hielo. Dada la dificultad de medir corrientes durante intervalos de tiempo tan grandes, no podríamos haber llegado a estas conclusiones con sólo los datos de elevación de la superficie y los cambios de temperatura, si no fuera por nuestra confianza en el balance geostrófico, donde la fuerza de Coriolis desempeña papel fundamental.



A diferencia de las oscilaciones inerciales, en los ejemplos de los remolinos y de la circulación anual en el Golfo de California la fuerza de Coriolis no actúa sola sino que está en equilibrio con la fuerza de presión. Un último ejemplo importante en el campo de la dinámica oceánica es el de la acción simultánea entre la fuerza de Coriolis y el esfuerzo del viento. No es difícil entender que el viento empuja el agua en la dirección en que sopla. ¿Cómo responde ésta? En principio, aparecen oscilaciones inerciales, pero luego de cierto tiempo lo que queda es una circulación donde el esfuerzo del viento está prácticamente en equilibrio con la fuerza de Coriolis. Esto significa que el agua se mueve en dirección diferente a la del viento: casi perpendicular a éste y hacia la derecha en el hemisferio norte, o hacia la izquierda en el austral.

Por ejemplo, los vientos preponderantes en el Atlántico norte o el Pacífico norte soplan desde el Oeste, por lo que el agua fluye lentamente hacia el Sur, para regresar mucho más rápidamente en la costa occidental en la forma de una corriente angosta: la del Golfo, en el caso del Atlántico, y la de Kuroshio, en el caso del Pacífico. Por otra parte, en la zona tropical los vientos preponderantes —los alisios— soplan desde el Este, jalando agua a cada lado del ecuador hacia el polo correspondiente; como este agua debe venir de alguna parte, en una franja angosta centrada en el ecuador hay un afloramiento de aguas profundas (parte del agua que se desparrama hacia las latitudes superiores, sin embargo, viene del Este).

El mismo fenómeno de afloramiento es experimentado cuando el viento sopla a lo largo de la costa oceánica, en la *dirección adecuada*. Efectivamente, si mirando hacia donde sopla el viento, la costa queda a la izquierda, en el hemisferio septentrional (o a la derecha en el austral), entonces el efecto combinado del viento y la fuerza de Coriolis forma un flujo de agua superficial mar adentro, que, cerca de la costa, produce un afloramiento de aguas profundas. En cambio, si el viento sopla en la dirección contraria, entonces se produce el hundimiento del agua superficial. En el primer caso, cuando hay un afloramiento de aguas profundas, ocurre no sólo un cambio físico importante, pues estas aguas están frías, sino también químico y biológico, pues las aguas profundas son ricas en nutrientes. A este fenómeno de afloramiento, el cual es parcialmente causado por el efecto de Coriolis, se debe, por ejemplo, la notable riqueza pesquera de lugares como, por ejemplo, Perú.

Ya que el efecto horizontal de Coriolis es real —no aparente— y además importante para la física y biología de los océanos, ¿cuál es su causa? En las siguientes secciones veremos que la existencia de este curioso fenómeno está ligada a ¡la forma de la Tierra!

[Nota 16]

16 Si el hundimiento de la superficie representado por el ciclón es η y su radio es R, entonces la fuerza hacia el centro, o sea la proyección de la gravedad sobre la superficie, es del orden de $g\eta/R$. Si v, es la rapidez típica del agua, e igualamos esa fuerza con la aceleración centrípeta v^2/R, obtenemos $v \sim V(g\eta) \sim 1$ m / s.

Inicio

[Nota 17]

17 Esto es cierto en lo que respecta a temperaturas lejanas a la de congelamiento ¡lo que es siempre válido en el Golfo de California!

Inicio

[Nota 18]

18 También hay una contribución importante del flujo de calor a través de la superficie del Golfo (el cual depende de la época del año y de las condiciones atmosféricas). Esta contribución es, sin embargo, menor que la de intercambio de calor con el Océano Pacífico, a través de la "boca" del Golfo.

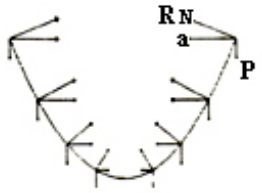
Inicio

VI. UNA CUBETA EN ROTACIÓN

El sistema del mundo sólo oscila alrededor de un estado medio del que nunca se aparta salvo por una cantidad muy pequeña.

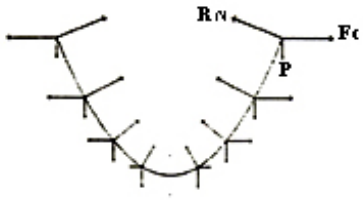
P. S. LAPLACE (1788)

A FIN de poder explicar mejor la causa de que se produzca el efecto de Coriolis en la superficie terrestre, permítaseme empezar por un caso más sencillo: sea una cubeta de agua a la que se obliga a rotar en forma uniforme en dirección antihoraria y, una vez que la forma de su superficie alcanza el equilibrio, se la congela; la idealización que estamos haciendo es que esta superficie no ejerce ninguna fuerza de fricción sobre cuerpos que se mueven sobre ella. Vamos primero a analizar las fuerzas que actúan sobre una partícula que gira con la cubeta y luego haremos otro tanto con un objeto que se mueva respecto de ella. Las descripciones se harán desde dos puntos de vista: el de una observadora fija al laboratorio y el de uno que está fijo a la cubeta: Inercina y Rotancio, a quienes ya conocimos en el capítulo III.



Partículas en la superficie: Sistema inercial

En la figura se representan las fuerzas que actúan sobre un cuerpo que gire con la cubeta, en un punto de la superficie. Desde el punto de vista de Inercina, la resultante del peso del cuerpo P (que es vertical) más la reacción del hielo RN (que es normal a la superficie, ya que no hay fricción) es una fuerza horizontal proporcional a la distancia al eje de rotación; ésta es la fuerza que produce la aceleración centrípeta a, es decir, que mantiene la rotación. (Nótese que estoy usando flechas sencillas para representar todos los vectores.) De hecho, de esta construcción y la suposición de rotación uniforme *se deduce* la forma de la superficie, que en este caso es un *paraboloide de revolución* (es decir, la sección mostrada en la figura es una parábola).



Partículas en la superficie: sistema no inercial

En esta figura se muestra el equilibrio de fuerzas desde el punto de vista de Rotancio, quien gira con la cubeta y por lo tanto ve al cuerpo en reposo. Según Rotancio hay tres fuerzas que están en perfecto equilibrio (o sea, que su resultante es nula): el peso P la reacción del hielo R_N y la fuerza centrífuga F_{CF}. En resumen:

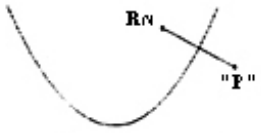
Inercina: Peso + Reacción normal = Aceleración centrípeta

Rotancio: Peso + Reacción normal + Fuerza centrífuga = 0

donde la suma se realiza teniendo en cuenta no sólo la magnitud, sino también la dirección y sentido de las fuerzas (es decir, "+" indica el proceso de calcular la resultante). Matemáticamente tan sólo se ha dicho que la aceleración centrípeta = fuerza centrífuga, pero las experiencias de ambos observadores son bien diferentes: uno ve al cuerpo girar y el otro lo ve en reposo; no es difícil percibir la analogía con el caso de la piedra de la honda (segunda figura

del capítulo III) que también analizaron nuestros personajes.

Antes de estudiar movimientos más interesantes sobre la superficie congelada, supongamos que existe gente muy chiquita, de manera que lo que vemos como un simple punto girando con ella es toda una ciudad, Cubetópolis, con todo y su Universidad con su correspondiente laboratorio de física.



Definición de "peso" y "vertical" local

Para los cubetícolas, "vertical" y "horizontal" significan perpendicular y tangente a la superficie, respectivamente. Al igual que en la Tierra, estas direcciones dependen del lugar donde se esté; —usó las comillas para no confundirlas con la dirección del eje (de rotación) de la cubeta que es la dirección del peso (tal y como lo mide Inercina, por ejemplo)—. En cambio, para los buenos albañiles cubetícolas, "vertical" es la dirección de la plomada; es más, ellos llaman "peso" a una fuerza igual en magnitud y dirección, pero de sentido contrario, a la reacción del hielo, es decir

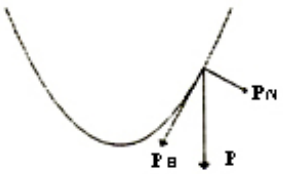
Cubetícola: "Peso" + Reacción normal + 0.

Los físicos cubetícolas luego de mucho estudiar (y de viajes a tierras extranjeras, esto es, a otros puntos de la cubeta), descubren que "vertical" y "peso" son conceptos locales, es decir, que constituyen una función de la distancia al centro de la cubeta, al que llaman "polo". Más precisamente, enuncian que "peso" = peso + centrífuga, donde peso, sin comillas, es la atracción gravitatoria de una tortuga gigantesca sobre la que gira la cubeta congelada; la "vertical" es la dirección del "peso". Los terrícolas tenemos por supuesto más en común con los cubetícolas que con Inercina.

En Cubetópolis vive un físico cuyo nombre es Bonifacio Ordóñez, pero que insiste en ser llamado Newtonius Coriolensis (nadie le hace caso). Bonifacio se dedica a estudiar el movimiento de los objetos sobre la superficie de Cubetópolis, la cual, como sabemos, no ejerce ninguna fuerza de fricción. Ha descubierto que siempre que le da impulso a un pequeño objeto, éste se mueve aproximadamente en un círculo, como si existiera una fuerza que lo desviara continuamente hacia la derecha. El tiempo que tarda el cuerpo en recorrer el círculo es el mismo en todos los experimentos (aproximadamente igual a la mitad del periodo de rotación de la cubeta). Por lo tanto, el diámetro de cada círculo es proporcional a la rapidez con que se mueve el cuerpo en cada experimento, la cual permanece constante.

Voy ahora a analizar como explica Inercina el movimiento de los objetos de Bonifacio. Para ella todo cuerpo en la superficie de la cubeta congelada está sujeto a la acción de dos fuerzas reales. Una es la fuerza normal R_N ejercida por la superficie del hielo, la que se halla dirigida en la dirección "vertical" local y no puede influir el movimiento "horizontal". La otra, en cambio, es el peso P que sí tiene una componente horizontal, dirigida hacia el centro de la cubeta P_H Esta fuerza central, la componente "horizontal" de P, es la clave que tiene Inercina para explicar los experimentos de Ordóñez.

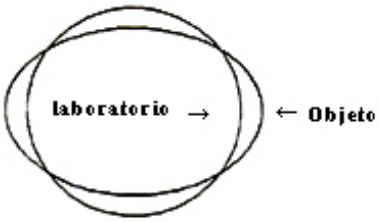
El peso real tiene una componente "horizontal"



Inercina aplica la ley de Newton y descubre que los movimientos posibles bajo la acción de esta fuerza central son

siempre oscilaciones alrededor del centro de la cubeta. Algo así como las órbitas de los planetas alrededor del Sol, con la diferencia importante que en el último caso, la fuerza aumenta al acercarse al astro rey, mientras que en el caso de la cubeta esta fuerza disminuye al ir hacia el centro. Esta diferencia se refleja en el hecho que el tiempo en que tarda cada planeta en girar alrededor del Sol varía; desde tres meses en el caso de Mercurio a 250 años en el de Plutón, mientras que todos los cuerpos que orbitan en la cubeta tardan lo mismo en dar una vuelta. En particular todas las microciudades que están en la cubeta (una de las cuales es Cubetópolis) lo hacen al unísono; que las distancias entre ellas permanezcan constantes es lo que permite establecer el concepto de un país en la superficie de la cubeta (obviamente, *Cubetolandia*).

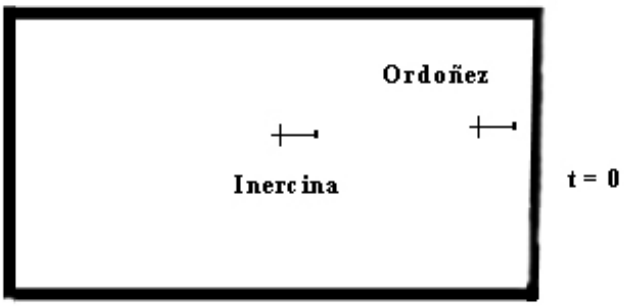
Vistas desde arriba, las trayectorias que calcula Inercina con la información exclusiva de la forma de la superficie, varían en forma desde un círculo a una línea recta, pasando por elipses con todas las excentricidades posibles. (Estoy suponiendo que estas trayectorias se encuentran cerca del centro de la cubeta; luego trataré el caso más general.) En la siguiente figura se muestra dos de esas órbitas. La circular es nada menos que la trayectoria del laboratorio del doctor Ordóñez, mientras que la elíptica es la de uno de los objetos cuyo movimiento estudia Bonifacio, tal y como lo observa Inercina.



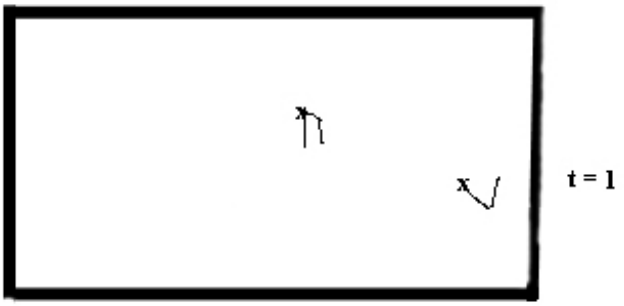
El experimento de Ordóñez visto por Inercina

Nuestro interés está puesto en describir los movimientos absolutos de Bonifacio Ordóñez y de su objeto y de ahí, deducir el movimiento relativo de este último, visto por el científico en rotación. En las siguientes figuras se puede apreciar cómo se van desarrollando ambos movimientos, en intervalos de 1/16 del tiempo necesario para dar una vuelta completa. Del lado izquierdo está lo que registra Inercina (movimiento absoluto) y del derecho lo que observa Bonifacio (movimiento relativo).

Inicialmente, t = 0, ambos observadores coinciden en la posición en que está el objeto:



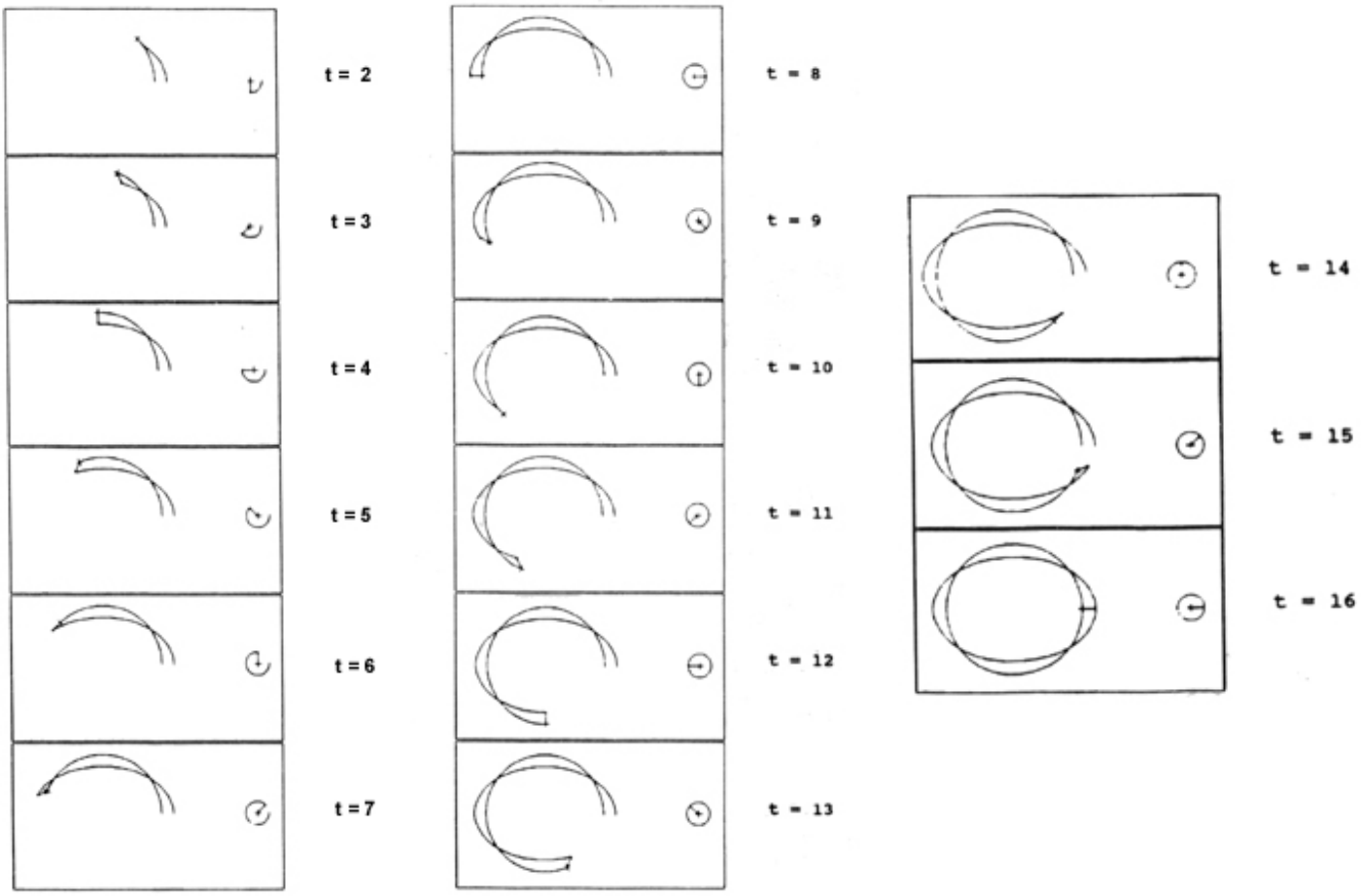
En ambas partes, la flecha va desde Ordóñez al objeto, es decir, indica la posición de este último relativa a la del científico. Un tiempo después, esta es la situación



Nótese que, para Inercina, Ordóñez no sólo está girando, sino que su orientación también varía (como varía también la de nosotros, los terrícolas, a lo largo del día, respecto de las estrellas fijas). La orientación del laboratorio de Ordóñez está indicada por una pequeña cruz (símbolo de los problemas presupuestarios por los que pasan los científicos de Cubetópolis). Del lado derecho, que es el laboratorio de Ordóñez, la cruz está obviamente fija.

A medida que pasa el tiempo, se observa lo siguiente:

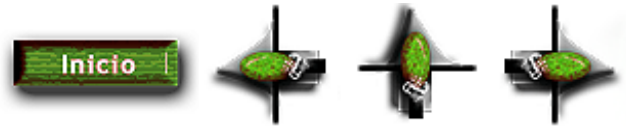
Inercina verifica que el objeto se mueve más despacio que Ordóñez cuando está más alejado del centro que él, y más lento cuando se halla más cerca,[19] es decir, el objeto se retrasa en los puntos lejanos del eje y se adelanta en los cercanos. Don Bonifacio lo percibe como una rotación relativa del objeto, en el sentido opuesto al que gira la cubeta y al *doble* de velocidad angular. Por ejemplo, para t = 4 tanto Bonifacio como el cuerpo han girado 90° en el sentido antihorario respecto del espacio absoluto (lado izquierdo) pero aquél registra que éste ha girado 180° y en el sentido horario (lado derecho). Este movimiento relativo es lo que llamamos una oscilación inercial; el factor dos (que aparece por ahí en el texto de G. Coriolis) se debe a que no sólo la posición relativa del objeto cambia, sino que también lo hace la orientación del laboratorio (indicada por la cruz).



La explicación anterior es válida siempre y cuando Cubetópolis se halle cerca del centro de la cubeta, lo que en nuestro caso equivale a estar cerca de un polo, lugar donde el periodo de una oscilación inercial es de medio día. En lo que toca a puntos alejados del centro de la cubeta (o del polo, en el caso de la Tierra), el movimiento es un poco más complicado en el sentido de que el periodo de oscilación inercial es mayor y, desde el punto de vista de Inercina, la órbita del objeto no forma una elipse cerrada. De todos modos, la conservación de momento angular implica que el objeto gira más rápido que Cubetópolis cuando está más cerca del eje y más lento cuando se aleja lo que es percibido por Rotancio como una oscilación en sentido contrario al de la cubeta.

Lo anterior constituye una explicación sencilla de la oscilación inercial desde el punto de vista de Inercina, es decir, sin poner en juego fuerzas ficticias. La clave de la explicación es la componente en el plano "horizontal" local del peso (cuarta figura) debida a la forma de la superficie de la cubeta. La existencia del efecto de Coriolis en la Tierra está también ligada a su forma, más precisamente, a la deformación de su superficie respecto de una esfera perfecta,

lo que constituye el tema del capítulo VIII.



[Nota 19]

l9 Lo cual no es sino la verificación de la segunda ley de Kepler (o de la conservación de momento angular): el área barrida, en un tiempo t cualquiera por el radio vector que une al objeto con el centro, es proporcional a t.

Inicio

VII. NUEVO DIÁLOGO DE VIEJOS PERSONAJES

La cortesía es el veneno de toda buena colaboración en la ciencia.

F. CRICK

CUANDO parecía que estaba todo claro —para Inercina— aparecen dos viejos conocidos, Salviati y Simplicio, discutiendo el experimento del capítulo anterior:

SALVIATI.- ¡Qué placer volver a verlo después de tantos siglos! Supongo que estará enterado que la filosofia natural [física] ha cambiado bastante en todo este tiempo.

SIMPLICIO.- ¡Claro que sí! Aunque veo que los principales descubrimientos han estado ocurriendo un poco más al norte que en nuestra época. Me refiero principalmente al trabajo de un inglés y un francés: Isaac Newton (que por cierto nació el mismo año en que murió nuestro querido doctor Galilei) y el noble Gaspard de Coriolis (quien nació, hace dos siglos, al año de morir Mozart).

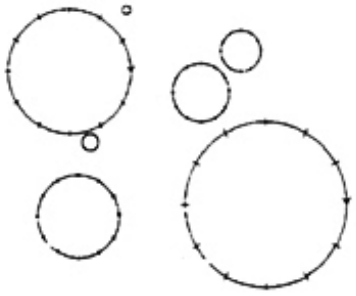
SALVIATI.- De manera que ha leído a Newton y a Coriolis; luego ya sabe cómo calcular aceleraciones relativas tanto a un sistema inercial como a uno rotando ¡siento que ya no hay nada que pueda yo explicarle!

SIMPLICIO.- ¡Muy agradecido! Acabo de estar platicando con el doctor Ordóñez, quien me ha mostrado unos experimentos muy ingeniosos que demuestran lo interesante de los fenómenos aparentes producidos por fuerzas ficticias.

SALVIATI: ¡A ver, a ver! Esto suena más a ficción que a física.

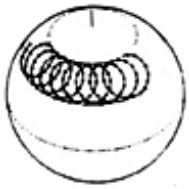
SIMPLICIO.- Pues es muy sencillo. El piso del laboratorio está tan bien pulido que los objetos sobre él se mueven sin cesar, no hay fricción que los detenga. Lo interesante es que todos lo hacen en círculos, todos girando en el mismo sentido y todos completan una revolución en el mismo tiempo.

Las marcas de la figura señalan cada "hora" de Cubetolandia, donde un "día", una rotación de la cubeta, tarda 24 "horas". Se supone, por simplificar, que Cubetolandia está cerca del centro de la cubeta, que es el equivalente a un polo terrestre.

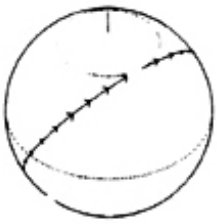


SIMPLICIO.- Los círculos tienen diámetros y centros de lo más variado; algunos objetos [como el de la serie de figuras del capítulo anterior] rotan alrededor del doctor Ordóñez, pero no todos. Entre paréntesis, creo recordar que hace 270 años tuvimos plática en la que usted predecía otro tipo de movimiento...

Simplicio se mofa de Salviati porque las experiencias de Ordóñez corresponden a las oscilaciones inerciales:



(claro que sin la deriva hacia el poniente) y no a la predicción original de Galileo:



Sin embargo, hay que ver si es que Simplicio ha entendido o no los experimentos.

SALVIATI.- ¡No hablemos de cosas tan antiguas! Mejor, dígame cómo explica ese comportamiento tan curioso de los objetos libres, en el laboratorio de Ordóñez.

SIMPLICIO.- Pero, ¡me extraña! Se trata de la fuerza de Coriolis. Como ésta es siempre perpendicular al vector velocidad y proporcional a la rapidez, el movimiento que resulta es circular uniforme, con igual periodo para todos los objetos. Por supuesto que esta fuerza ficticia es sólo un artificio que usan los cubetícolas para tener en cuenta el hecho de que su mundo [la cubeta] rota respecto del espacio absoluto; estoy seguro que un observador inercial ve a esos objetos moverse en línea recta. ¡Nunca pensé que yo le iba a enseñar física!

SALVIATI.- ¡Tal parece que ha regresado a su antigua manía de citar a los antiguos como sustituto a pensar! ¿Qué fue lo que encontró Coriolis?

SIMPLICIO.- No se exaspere, por favor. Lo que se conoce muy bien es que la ley de Newton, al emplearse para una partícula en un sistema inercial [*aquí Simplicio saca, muy orgulloso, una tarjeta*]

Aceleración (observada por Inercina) = FUERZA / masa

se transforma, para en un sistema no inercial, en [*Simplicio saca, triunfante, otra tarjeta*]

Aceleración (observada por Rotancio) = (FUERZA+entrifuga+Coriolis)/masa

SALVIATI.- ¿Por qué ha escrito usted "FUERZA", todo con mayúsculas?

SIMPLICIO.- Porque allí están agrupadas todas las fuerzas *reales*, y solamente ellas: las producidas por atracción gravitatoria, por cordeles, por resortes, etc. En "FUERZA" no están incluidas las fuerzas aparentes o ficticias que aparecen porque Rotancio (¡que nombre!) está girando con respecto al espacio absoluto.

SALVIATI.- Veo que ha leído bien a Newton y a Coriolis, pero ¿qué tiene que ver esto con los experimentos de Ordóñez? ¿Qué fue lo que me dijo que había verificado Bonifacio?

SIMPLICIO.- Que sus objetos eran acelerados por la fuerza de Coriolis [...] pensándolo bien, no mencionó la fuerza centrífuga, o sea [*Simplicio escribe apresuradamente otra tarjeta*]

Aceleración (observada por Ordoñez) = Coriolis/masa

Es más, en otra plática que tuve con Ordóñez (me gustaría que no le siguiera llamando Bonifacio) sobre plomadas y péndulos, me mostró que el único efecto de la centrífuga era cambiar al peso por el "peso", es decir, redefinir algo

el valor de la gravedad y de la vertical local [véase la tercera figura del capítulo anterior]. Este es un efecto muy pequeño, ¡no veo que tenga que ver con lo que tratamos!

SALVIATI.- Qué curioso que le moleste que llame Bonifacio a Ordóñez. Yo a veces me pregunto por qué a Galileo Galilei y Dante Alighieri se les conoce como Galileo y Dante, mientras que nadie se refiere a Isaac Newton y a William Shakespeare como Isaac y Willy [...] pero, ¿en qué estábamos?

SIMPLICIO.- En que siendo la fuerza centrífuga sólo una corrección menor a la gravedad local, es correcto decir que los experimentos de Ordóñez —que son bien descritos por la tercera tarjeta— corresponden a hacer "FUERZA" = 0 en la segunda.

Aceleración (observada por Rotancio) (Centrífuga + Coriolis) / masa?

Es decir, no son otra cosa que una partícula libre vista desde un sistema en rotación; estoy seguro que Inercina ve a estos objetos moverse en una línea recta. Los cubetícolas los ven moverse en círculos por encontrarse en un laboratorio en rotación.

Aceleración (observada por Inercina) = 0?

SALVIATI.- Fíjese que esta explicación del efecto de Coriolis en la Tierra la he visto en muchos lados; sin ir más lejos en una enciclopedia científica muy bonita que acabo de adquirir. Sin embargo, cuando oigo hablar de plataformas en rotación pienso en un tocadiscos: uno ve la aguja moviéndose casi en línea recta [parte izquierda de la figura] y en forma uniforme, sin embargo, un observador en rotación no la ve recorriendo un círculo, sino un espiral [parte derecha].

SIMPLICIO. Pues un arco de circunferencia y un trozo de una espiral se parecen bastante [...] quizás la pequeña diferencia entre ambos es el efecto de la fuerza centrífuga; el de Coriolis es el principal de todos modos.

SALVIATI.- ¿Cuál fue su observación acerca del centro de las trayectorias circulares que observaba Bonifacio?

SIMPLICIO.- Que podían estar en cualquier lugar [...] ya veo adonde me quiere llevar. La espiral [de la figura anterior] siempre tiene por centro al eje de rotación. ¡Son dos fenómenos diferentes!

SALVIATI.- Efectivamente, la espiral es un fenómeno totalmente aparente que, desde el punto de vista de Rotancio [derecha], es debida a la acción conjunta de las fuerzas centrífuga y de Coriolis; para Inercina [izquierda] el movimiento es rectilíneo y uniforme, o sea FUERZA = 0 [de ahí el nombre de aparente].

Los círculos inerciales, en cambio, son debidos —nuevamente de acuerdo a Rotancio— exclusivamente a la fuerza de Coriolis [véase la tercera tarjeta], lo que significa que hay una fuerza neta, tal que FUERZA + centrífuga = 0. Inercina reconoce la existencia de esta fuerza real —con dirección centrípeta— y la atribuye *correctamente a la forma de la superficie del hielo de la cubeta.*

Ésta es la verdadera explicación —desde el punto de vista de un observador inercial— del efecto de Coriolis de

desviación en la horizontal; debemos entonces entender cuál es la forma de nuestro planeta. Nótese —antes de pasar al siguiente capítulo— que esta explicación no se aplica al péndulo de Foucault, a quien (al péndulo, no a Foucault) la forma de la Tierra lo tiene sin cuidado. Como ya dije, en lo que toca al péndulo, lo que interesa es que el punto de apoyo es obligado a girar en círculo. La diferencia es, con respecto a la explicación de Inercina, que sólo reconoce fuerzas reales; Rotancio, en cambio, en ambos casos calcula correctamente el movimiento usando tan sólo la fuerza de Coriolis y no la centrífuga.

VIII. LA FORMA DE LA TIERRA

Lo felicito: ha aplastado a los polos y a los Cassini.

VOLTAIRE (a Maupertuis)

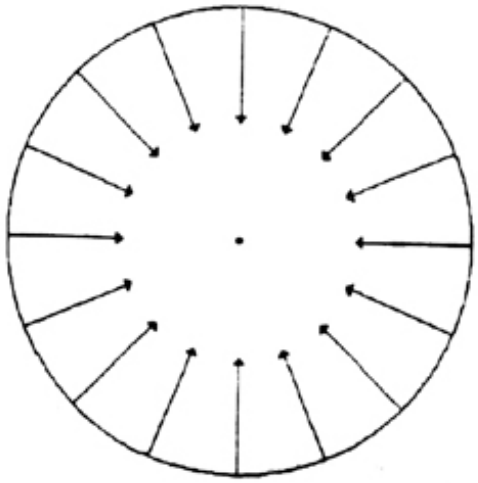
AL IGUAL que en el caso de la cubeta, la explicación del efecto de Coriolis en la Tierra se halla ligada a su forma, tema que ha apasionado a la humanidad desde tiempos inmemoriales. "Sabemos" que la Tierra es, en muy buena aproximación, una esfera; si ésta fuera exactamente su forma y la atracción gravitatoria estuviera dirigida hacia el centro de la Tierra, entonces un cuerpo apoyado sobre una mesa bien pulida se iría hacia el ecuador, ya que desde el punto de vista de un observador inercial, tiene una velocidad diferente de cero. (De hecho, como comentaba más arriba, éste era uno de los argumentos esgrimidos en contra de la existencia de la rotación terrestre.) Lo que es importante en la forma de la Tierra es su desviación de una esfericidad perfecta; éste es otro tema que también apasionó —y lo sigue haciendo— si bien no a toda la humanidad, al menos a los científicos.

La medida más antigua de la esfericidad terrestre data del siglo III antes de nuestra era y fue hecha por Eratóstenes, entonces director de la Biblioteca de Alejandría. Eratóstenes tuvo conocimiento de que cuando el Sol estaba perfectamente vertical al mediodía sobre Siene (hoy Asuán, Egipto), en Alejandría la sombra tenía un ángulo mínimo de 7.2° con la dirección de la plomada. Como el Sol está tan lejos que sus rayos nos llegan prácticamente paralelos, la diferencia del ángulo de la sombra respecto a la vertical local sólo se puede deber a la curvatura de la superficie terrestre. Este ángulo puede ser usado para medir indirectamente al radio terrestre. Al respecto, Eratóstenes necesitaba saber la distancia entre Alejandría y Siene; se dice que la midió multiplicando la velocidad promedio de un camello por el tiempo que le llevaba hacer ese viaje. Si así lo hizo, es un ejemplo bellísimo del ingenio científico para hacer una medida difícil. La distancia es de unos 800km. Como 7.2° es igual a 1/50 de 360°, entonces un círculo máximo terrestre (una vuelta completa a la Tierra) debe tener 50 x 800 km = 40 000km; es decir, el radio terrestre es de unos 6 400 kilómetros.

Mapa de Laponia, obra de Maupertuis

Mapa de laponia, obra de Maupertuis

En términos modernos, lo que hizo Eratóstenes fue utilizar al Sol para tener una medida de la diferencia entre las latitudes de Siene y Alejandría[20] y mediciones sobre la Tierra para saber la distancia entre ambas ciudades. De geometría elemental sabemos que un arco de circunferencia es proporcional al ángulo y al radio, con lo que la diferencia de latitudes y la distancia son suficientes para determinar este último siempre y cuando, ambas ciudades estén sobre el mismo meridiano (una al norte de la otra) lo cual es prácticamente cierto para Alejandría y Siene. (Se dice también que el resultado de Eratóstenes difería en tan sólo 1% del valor moderno lo cual, de ser cierto, debe tan sólo ser una casualidad, ya que al no estar Siene exactamente al sur de Alejandría —hay una diferencia de unos tres grados de longitud— la distancia entre ciudades es más bien de unos 850km.)



Diecinueve siglos más tarde, el abad Jean Picard (1620-1682), uno de los fundadores de la Academia de Ciencias de París, midió un grado del meridiano que pasa por París, obteniendo una medida del radio terrestre con tan sólo 0.1% de error. Este resultado fue fundamental para los cálculos de Newton.

Para explicar el efecto de Coriolis no basta saber que la forma de la Tierra es, aproximadamente, la de una esfera, sino que es necesario conocer las pequeñas desviaciones de ella. Hace tres siglos había dos escuelas que rivalizaban acerca del tema: la de quienes pensaban que nuestro planeta está achatado en los polos y los que argumentaba que está alargado. La primera idea era de Newton, quien llegó a esta conclusión (y a una primera predicción del valor del achatamiento) a partir de la observación de que el agua de los mares no se va hacia el ecuador (como tampoco se va un objeto apoyado sobre una mesa pulida, observación a la que he hecho mención varias veces). La idea contraria se debía a Descartes y la mantenían ardientemente los Cassini, una dinastía de astrónomos y topógrafos franceses que proveyó a los cuatro primeros directores del Observatorio de París.

El hecho de que una de las hipótesis proviniera de Inglaterra y la otra de Francia no facilitaba precisamente las cosas. Sin embargo, un hecho fortuito abrió paso para que los franceses confirmaran la idea del científico inglés. Francois Marie Voltaire luego de una segunda temporada en La Bastilla (por haber ofendido a un noble) tuvo que exiliarse a Inglaterra en 1726. Allí conoció a Newton, al que desde entonces admiró tanto como a Descartes. De regreso a Francia, Voltaire se constituyó en uno de los defensores de las ideas de Newton en "el Continente" —como llaman los ingleses al resto de Europa— (Su amante, de Voltaire se entiende, la marquesa de Chatêlet escribió el primer libro de divulgación sobre los *Principia*). Años más tarde, Voltaire y su —entonces— amigo Pierre-Louis Moreau de Maupertuis (1698-1759) fueron los principales impulsores de las expediciones francesas a la actual República de Ecuador y a Laponia (en Finlandia) para medir la longitud de un grado de meridiano y confirmar la predicción de Newton. Probablemente a Voltaire le importaba menos si la Tierra está o no achatada en los polos que el triunfo de las ideas nuevas sobre las actitudes antiguas (¡que le habían, en particular, significado la cárcel!), pero su entusiasmo era, de todos modos, sin par.

Pierre-Louis de Maupertuis

La misión de ambas expediciones fue en cierta forma similar al trabajo de Eratóstenes, sólo que con métodos mucho más refinados, pues lo que interesaba era las pequeñas diferencias entre las medidas hechas en distintas latitudes (al norte o sur de París, donde ya se conocía la relación entre cambio de latitud y distancia). "Un grado de meridiano" se refiere a un cambio de latitud o, si se quiere, de la orientación de la vertical local (a una hora fija del día) respecto de las estrellas. La distancia requerida para este cambio debe ser mayor hacia los polos (donde está más curvada). Pero las diferencias son minúsculas, inferiores a un kilómetro. Concretamente, un grado meridiano cerca del ecuador representa 110.6 km, en París 111.2 km y en Laponia 111.5 kilómetros.

La primera expedición partió hacia la ciudad de Quito en 1735, bajo la dirección de Charles Marie de La Condamine (1701-1774). La componían diez franceses, dos españoles (que, en parte, eran espías de su rey) y un criollo. La expedición sufrió una serie de inconvenientes desde el comienzo, en parte por la gran rivalidad entre La Condamine (que era aristócrata y protegido de Voltaire) y Bouguer (que no poseía ninguna de esas dos "virtudes"). De los franceses, uno murió de fiebres tropicales, otro apuñalado en una corrida de toros y un tercero al caer de la torre de una iglesia (que había ayudado a diseñar); dos se casaron con ecuatorianas y otro perdió momentáneamente la razón cuando su colección botánica fue arrojada a la basura.

Mientras tanto en París, Maupertuis cada vez más impaciente, decidió organizar la segunda expedición a Laponia, a donde viajó rodeando de un grupo de "científicos jóvenes". Aunque les tomó tres meses llegar, en seis semanas ya tenían terminada la triangulación. Debieron esperar el buen tiempo para medir con precisión la posición del extremo norte; casi no lo logran antes del congelamiento del río Tornea. Los resultados confirmaron la predicción de Newton y Maupertuis fue calurosamente felicitado por Voltaire ya que había "aplastado a los polos y a los Cassini". Los de la expedición a Perú quedaron en cambio muy deprimidos.

La Condamine terminó su misión años más tarde (ocho después de haber llegado a América del Sur) confirmando el ensanchamiento terrestre en el ecuador. Jaques Cassini (1677-1756), el segundo de la dinastía, renunció deprimido al puesto de director del Observatorio de París (lo sucedió su hijo y luego su nieto). De los franceses de la expedición a Perú, no todos regresaron a Europa, dos o tres se establecieron en Sudamérica. La Condamine tenía un espíritu siempre curioso e insatisfecho, fue promotor de la variolización (precursora de las vacunas) y experimentó en carne propia (a propósito) los bastonazos por robo. Terminada su misión en Quito, se fue a explorar el Amazonas y finalmente murió al dejarse operar mediante un procedimiento novedoso.

A Maupertuis no le fue mucho mejor. Voltaire, quien había sido su gran amigo, se enemistó con él y lo atacó ferozmente: "Usted ha confirmado en lugares aburridos lo que Newton sabía sin salir de casa." La sorna de Voltaire no tuvo límites, burlándose despiadadamente de Maupertuis en varios escritos; en *Micromegas* satiriza la expedición a Laponia y que Maupertuis se haya enamorado de una joven lapona (que llevó a París). La reputación

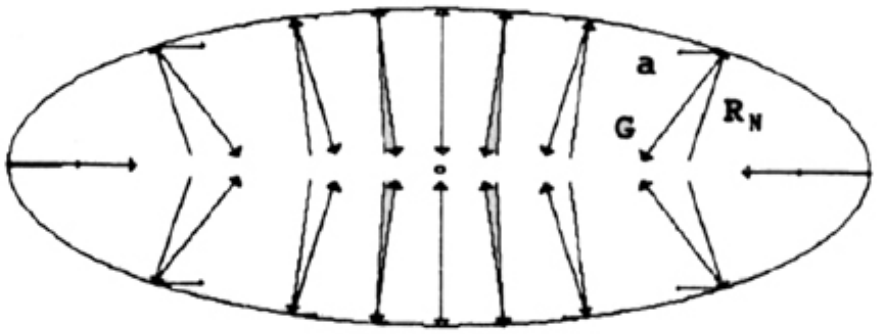
científica de Maupertuis no volvió a recuperarse y murió olvidado el que fuera un gran científico, que demostró el principio ("universal") de la acción mínima y que, razonando sobre la teoría de la herencia, llegó a intuir la idea de la genética y la posibilidad de la evolución natural, ¡antes de que se conociera la célula!

En los dos últimos capítulos vimos de qué manera las oscilaciones inerciales de la cubeta giratoria constituyen un efecto real debido a la forma de su superficie. Para un observador inercial —que no rota con la cubeta— la forma cóncava de la superficie hace que todos los cuerpos experimenten la acción de una fuerza hacia el centro de la cubeta, fuerza que los mantiene en rotación. En cambio, para un físico como el doctor Ordóñez, que hace sus cálculos en el sistema en rotación —fijo a la cubeta— se deben agregar dos fuerzas "ficticias" la de Coriolis y la centrífuga, pero la segunda es equilibrada por la fuerza real recién mencionada y por lo tanto sólo queda la de Coriolis, que es la que produce esos cambios continuos de dirección.

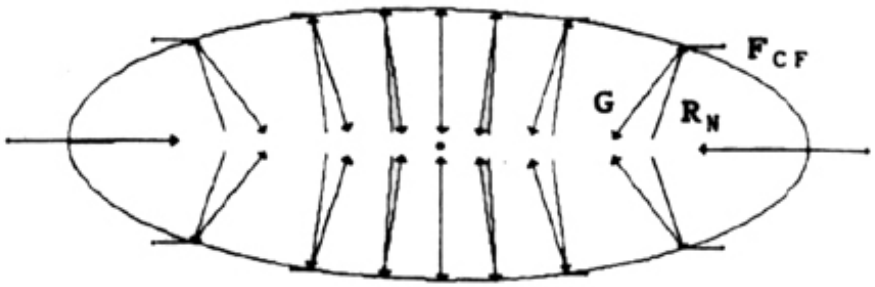
Otro tanto ocurre sobre la Tierra. Es la deformación de su superficie, respecto de una esfera perfecta, la responsable de una fuerza horizontal dirigida en cada hemisferio hacia el polo correspondiente. Si dibujáramos el caso de la Tierra con fidelidad no se podría apreciar esto, porque la deformación es muy pequeña (el achatamiento es de tan sólo una parte en 300). Sin embargo, podemos mostrar la solución correspondiente a un planeta hipotético que girara mucho más rápido, gracias a la solución encontrada en 1742 por Colin Maclaurin (1698-1746), matemático y filósofo natural escocés.

Maclaurin fue uno de los especialistas en el "cálculo de fluxiones" de Newton; de hecho, es conocido por los estudiantes de cálculo por su *serie*. También resolvió el problema de la atracción gravitatoria en un punto interior a un elipsoide obloide de revolución, con lo que pudo generalizar el razonamiento de Newton a valores arbitrarios de la excentricidad. Lo asombroso es que lo logró ¡antes de que se inventara la hidrostática! Por lo tanto pudo demostrar que su solución satisfacía las condiciones suficientes de equilibrio, pero no tenía forma de saber que eran también necesarias, es decir, que había encontrado la solución. Por todo esto fue nombrado profesor de matemáticas en Edimburgo *ipso Newtono suadente* (por recomendación de Newton).

Las figuras siguientes muestran la solución de Maclaurin al problema de un planeta líquido que rote lo más rápido posible (correspondiente a un "día" de 2 1/2 horas en el caso de la Tierra). La primera figura muestra la descripción hecha por Inercina: la acción conjunta de la atracción gravitatoria G y de la fuerza normal a la superficie (o sea, en la dirección de la vertical local) R_N producen la aceleración **a,** dirigida hacia el eje de rotación (y proporcional a la distancia a éste).



Desde el punto de vista de un terrícola —figura siguiente— la resultante de G y RN es equilibrada por la fuerza centrífuga FCF; claramente ambas descripciones son equivalente ya que A=-FCF.



Nótese que G tiene, en cada hemisferio, una componente horizontal dirigida hacia el polo correspondiente. Según Inercina, algunos cuerpos giran exactamente con la misma rapidez que la Tierra y por lo tanto no se mueven con respecto a ella. Tal es el caso de un cuerpo apoyado sobre una mesa bien pulida, que no se va hacia el ecuador sino que gira a la misma rapidez que lo hace la mesa y todo el edificio, es por eso que nosotros los vemos quietos. Regresando a Inercina, ella ve a otros cuerpos girar con rapidez variable, distinta a la de la Tierra; más lentamente al acercarse al ecuador y más rápidamente al alejarse, consecuencia de la conservación de momento angular. Estas diferencias de rapidez de rotación hacen que un observador de la Tierra vea al cuerpo hacer oscilaciones en el sentido opuesto de giro, como se ilustró en el capítulo IV (o en el capítulo anterior, en el caso de la cubeta).

Un terrrícola no incluye la fuerza centrífuga al calcular el movimiento de los cuerpos y por lo tanto se queda con una sola de las fuerzas ficticias: la de Coriolis. El efecto de la fuerza centrífuga se refleja en el hecho de que el peso varía (aunque muy poco) con la latitud y en que la vertical local, la dirección de la plomada, no está dirigida hacia el centro de la Tierra, sino que es, exactamente, perpendicular a su superficie. Aunque la fuerza centrífuga es muy pequeña, incluirla o no en las ecuaciones da por resultado una diferencia muy grande. De no hacerlo los cuerpos libres "se irían" hacia el ecuador, lo que no ocurre.

[Nota 20]

20 La de Alejandría, 31°N, es por casualidad la misma de la ciudad donde estoy escribiendo este libro, Ensenada de Todos Santos, México.

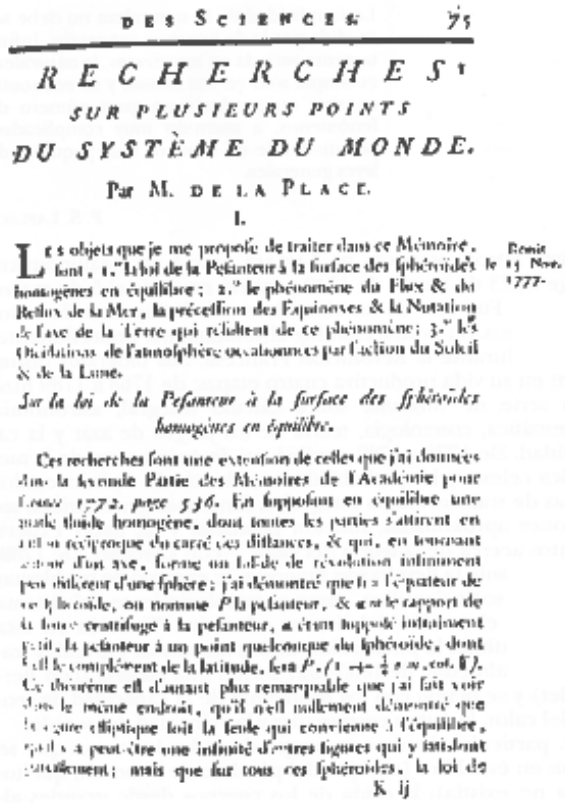
Inicio

IX. LAPLACE Y LOS GEÓMETRAS

> La simplicidad de la naturaleza no debe ser medida por la de nuestros conceptos. Infinitamente variada en sus efectos, la naturaleza es simple sólo en sus causas y, su economía consiste en producir un gran número de fenómenos, a menudo muy complicados, por medio de un número muy pequeño de leyes generales.
>
> P.S. LAPLACE

PIERRE SIMON, MARQUÉS DE LAPLACE, nació en Beaumont-en-Auge el 23 de marzo de 1749 y murió en París el 5 de marzo de 1827. Fue uno de los científicos más influyentes de todos los tiempos. Su producción fue absolutamente impresionante, antes y durante la Revolución Francesa. Sus biógrafos distinguen en su vida productiva cuatro etapas: de 1768 a 1789 hizo una serie de *Memorias* sobre cálculo integral, astronomía matemática, cosmología, teoría de los juegos de azar y la casualidad. De 1778 a 1789 escribió sus *Tratados* acerca de la mecánica celeste y las probabilidades, además de dedicarse a los temas de transformadas integrales, funciones generatrices, soluciones aproximadas, función potencial y de hacer experimentos acerca de la teoría del calor —con Lavoisier. De 1789-1805, durante la Revolución Francesa, se encargó de problemas de orden sociocientífico, como el establecimiento del sistema métrico y el cambio del sistema educativo. También en esta época, continúa la publicación de sus memorias y grandes tratados. Finalmente, de 1805-1827 formó una escuela (con Berthollet) y se ocupó con los problemas de la capacidad, la teoría del calor, la óptica corpuscular y la velocidad del sonido.

En particular, Laplace se ocupó de todos los temas que se tratan en este libro (excepto del péndulo de Foucault, que todavía no existía): la caída de los cuerpos desde grandes alturas, la variación del peso de un cuerpo con la latitud, la forma de la Tierra (y de los esferoides fluidos en general) y la teoría de las mareas. En 1778 publica un trabajo definitivo, *Plusieurs points du système du monde*, que trata los tres últimos temas; es allí donde presenta las llamadas *Ecuaciones de marea* de Laplace, que no sólo son las que se utilizan actualmente para modelar la marea, sino que constituyen también un paradigma de los modelos de circulación en los océanos terrestres y las atmósferas planetarias; son de hecho un paradigma de modelos de lo que se ha dado en llamar *dinámica de fluidos geofísicos.* La gran importancia de sus *ecuaciones de marea* radica en que en ellas Laplace introduce lo que hoy conocemos como fuerza de Coriolis, que es lo que más fundamentalmente distingue la dinámica de océanos y atmósferas de la física de cuerpos fluidos de dimensiones más reducidas, como albercas, tuberías y alambiques.



DES SCIENCES. 75

RECHERCHES[1]
SUR PLUSIEURS POINTS
DU SYSTÈME DU MONDE.

Par M. DE LA PLACE.

I.

Les objets que je me propose de traiter dans ce Mémoire, sont, 1.° la loi de la Pesanteur à la surface des sphéroïdes homogènes en équilibre; 2.° le phénomène du Flux & du Reflux de la Mer, la précession des Equinoxes & la Nutation de l'axe de la Terre qui résultent de ce phénomène; 3.° les Oscillations de l'atmosphère occasionnées par l'action du Soleil & de la Lune.

Remis le 15 Nov. 1777.

Sur la loi de la Pesanteur à la surface des sphéroïdes homogènes en équilibre.

Ces recherches sont une extension de celles que j'ai données dans la seconde Partie des Mémoires de l'Académie pour l'année 1772, page 536. En supposant en équilibre une masse fluide homogène, dont toutes les parties s'attirent en raison réciproque du carré des distances, & qui, en tournant autour d'un axe, forme un solide de révolution infiniment peu différent d'une sphère; j'ai démontré que si n = l'équateur de ce sphéroïde, on nomme P la pesanteur, & α = le rapport de la force centrifuge à la pesanteur, α étant supposé infiniment petit, la pesanteur à un point quelconque du sphéroïde, dont ζ est le complément de la latitude, sera $P.(1 + \frac{1}{2}\alpha\, m.\cos.\zeta)$. Ce théorème est d'autant plus remarquable que j'ai fait voir dans le même endroit, qu'il n'est nullement démontré que la figure elliptique soit la seule qui convienne à l'équilibre, qu'il y a peut-être une infinité d'autres figures qui y satisfont pareillement; mais que sur tous ces sphéroïdes, la loi de

K ij

Primera página del artículo de Laplace.

No sólo Laplace introdujo la fuerza de Coriolis unos 60 años antes del trabajo del propio Coriolis (de hecho, ¡14 años antes de su nacimiento!) sino que, al hacerlo, critica a los grandes científicos que le precedieron en este tema *por haber considerado los efectos de la rotación terrestre como aparentes;* Laplace demuestra que estos efectos son reales, detalle que, aùn 200 años más tarde, desconoce un gran número de libros de texto y enciclopedias.

Pierre Simon de Laplace.

En su trabajo de 1778; Laplace comienza exponiendo:

> Los temas que me propongo tratar en esta *Memoria* son, 1º la Ley de Pesos en la superficie de esferoides homogéneos en equilibrio y 2º el fenómeno de flujo y reflujo de la marea, la precesión de los equinocios y la nutación del eje terrestre que resultan de tal fenómeno, las oscilaciones de la atmósfera [debidas a] la acción del Sol y la Luna.

El problema de la variación del peso con la latitud se remontaba al viaje de Jean Richer a la Guayana Francesa (1671) con el objeto de medir la distancia de la Tierra a Marte. Richer logró su propósito (con un error inferior a 10%) y también notó que un péndulo oscila más lentamente cerca del ecuador. Newton explicó este fenómeno atribuyéndolo a la rotación terrestre y es allí donde surgió su idea sobre la forma de la Tierra, ya que ambos fenómenos están ligados. Laplace afirma:

> I.- Supóngase en equilibrio una masa de fluido homogéneo...al rotar alrededor de un eje, forma un sólido de revolución infinitésimamente diferente de una esfera...si en el ecuador de ese esferoide P es el peso y ε es la razón entre la fuerza centrífuga y el peso[21] ... el peso en un punto cualquiera [de latitud υ] está dado por P $(1+5/4\ \varepsilon\ \text{sen}^2\upsilon)$.

Laplace deriva esta relación a partir de la ley de la gravitación universal y, lo que es muy importante, demuestra que el esferoide no es necesariamente un elipsoide de revolución, sino que la deformación puede también ser función de la longitud. La variación del peso con la latitud, válida para el caso general, es debida a la rotación terrestre a través de dos contribuciones: la componente vertical de la fuerza centrífuga y el cambio de la atracción gravitatoria causado por la redistribución de masa implicada en la deformación de la Tierra.

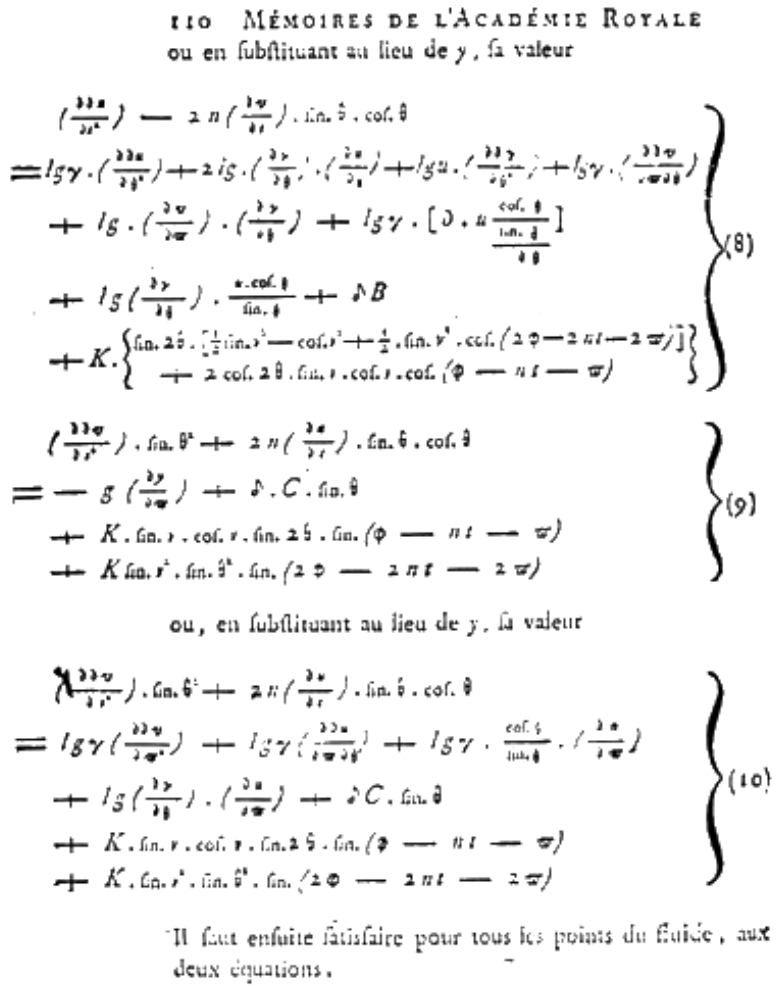
Jean le Rond d'Alembert (1717-1783) ya se había percatado de que un elipsoide de revolución no es la única figura de equilibrio. En un acto inexplicable en su carrera, desechó esta posibilidad que luego recogió Laplace. Lagrange (1811) consideró la posibilidad de tres ejes diferentes pero luego se redujo al problema del elipsoide de revolución. Finalmente, el matemático alemán Carlos Jacobi (1804-1851) retomó y resolvió el caso general, en 1834, luego de ver en un "conocido libro de texto" que tomar dos ejes iguales era un paso *necesario* de Lagrange (¡véase cita al comienzo de la Introducción!). La solución de Jacobi es válida en el caso de excentricidades tan grandes como se

quiera, como también lo era la de Maclaurin.

Regresando al texto de Laplace, más adelante presenta su segundo tema:

> II.- No buscamos una causa nueva del flujo y reflujo del Mar [que es sabido se debe a] la diferencia de peso [específico] del agua del mar y del centro de la Tierra, respecto del Sol y la Luna. Yo me propongo de hacer un análisis más riguroso de los efectos de esta diferencia y de las oscilaciones que resultan.

Para entender lo que había propuesto Newton, voy a citar, no a los *Principia* sino al artículo con el que Edmond Halley explica este aspecto de la obra. Halley era gran amigo de Newton, primero lo presionó para que escribiera los *Principia,* luego le ayudó a publicarlos (en muchos sentidos, incluso con dinero de su propia bolsa) sirvió de intermediario en la disputa entre Newton y Hooke y finalmente, con artículos como el que estoy mencionando, fue de los primeros en explicar los *Principia*, que aparentemente fueron tan admirados como poco comprendidos.



110 MÉMOIRES DE L'ACADÉMIE ROYALE

ou en substituant au lieu de y, sa valeur

$$\left(\frac{\partial\partial u}{\partial t^2}\right) - 2n\left(\frac{\partial v}{\partial t}\right).\text{sin.}\,\phi.\cos.\theta$$
$$= lg\gamma.\left(\frac{\partial\partial u}{\partial\theta^2}\right) + 2lg.\left(\frac{\partial\gamma}{\partial\theta}\right).\left(\frac{\partial u}{\partial\theta}\right) + lgu.\left(\frac{\partial\partial\gamma}{\partial\theta^2}\right) + lg\gamma.\left(\frac{\partial\partial v}{\partial\varpi\partial\theta}\right)$$
$$+ lg.\left(\frac{\partial v}{\partial\varpi}\right).\left(\frac{\partial\gamma}{\partial\theta}\right) + lg\gamma.\left[\partial.u\,\frac{\cos.\theta}{\sin.\phi\,\partial\theta}\right]$$
$$+ lg\left(\frac{\partial\gamma}{\partial\theta}\right).\frac{u.\cos.\theta}{\sin.\phi} + \partial B$$
$$+ K.\left\{\begin{array}{l}\sin.2\phi.\left[\frac{1}{2}\sin.^2\theta - \cos.^2\theta + \frac{1}{2}.\sin.^4\theta.\cos.(2\varphi - 2nt - 2\varpi)\right] \\ + 2\cos.2\theta.\sin.^2\theta.\cos.^2\phi.\cos.(\varphi - nt - \varpi)\end{array}\right\} \quad (8)$$

$$\left(\frac{\partial\partial v}{\partial t^2}\right).\sin.\theta^2 + 2n\left(\frac{\partial u}{\partial t}\right).\sin.\phi.\cos.\theta$$
$$= -g\left(\frac{\partial\gamma}{\partial\varpi}\right) + \partial.C.\sin.\theta$$
$$+ K.\sin.^2\theta.\cos.^2\phi.\sin.2\phi.\sin.(\varphi - nt - \varpi)$$
$$+ K\sin.^2\theta.\sin.^2\phi.\sin.(2\varphi - 2nt - 2\varpi) \quad (9)$$

ou, en substituant au lieu de y, sa valeur

$$\left(\frac{\partial\partial v}{\partial t^2}\right).\sin.\phi^2 + 2n\left(\frac{\partial u}{\partial t}\right).\sin.\phi.\cos.\theta$$
$$= lg\gamma\left(\frac{\partial\partial v}{\partial\varpi^2}\right) + lg\gamma\left(\frac{\partial\partial u}{\partial\varpi\partial\theta}\right) + lg\gamma.\frac{\cos.\phi}{\sin.\phi}.\left(\frac{\partial u}{\partial\varpi}\right)$$
$$+ lg\left(\frac{\partial\gamma}{\partial\theta}\right).\left(\frac{\partial u}{\partial\varpi}\right) + \partial C.\sin.\theta$$
$$+ K.\sin.^2\theta.\cos.^2\phi.\sin.2\phi.\sin.(\varphi - nt - \varpi)$$
$$+ K.\sin.^2\theta.\sin.^2\phi.\sin.(2\varphi - 2nt - 2\varpi) \quad (10)$$

Il faut enfuite fatisfaire pour tous les points du fluide, aux deux équations.

Fórmula donde aparece la "fuerza de Coriolis"

En Francia hubo también un movimiento muy importante de difusión de la obra de Newton, por parte de Maupertuis y la marquesa de Chatêlet, esta última, digno exponente de la tradición francesa de divulgación científica (*haute vulgarization*). De Chatêlet y Alexis Claude Clairaut tradujeron los *Principia* al francés, entre 1745 y 1748.

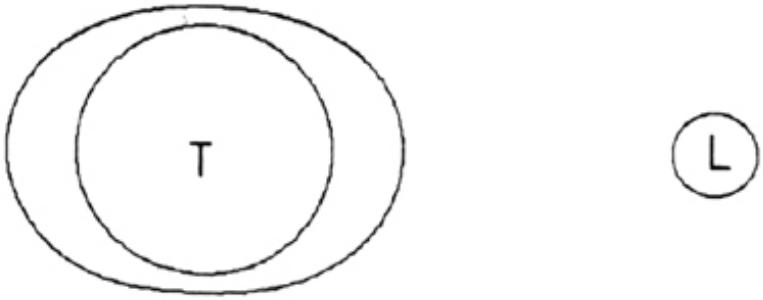
El título del trabajo de Halley, *"The true theory of the tides, extracted from that admired treatise of Mr. Isaac Newton, intituled Philosophiae Naturalis Principia Mathematica"*, muestra la admiración que, con justicia, tenía por la obra de su amigo.

Dice Halley:

> El único Principio con el que este Autor [Newton] pasa a explicar la mayoría de los grandes y sorprendentes aspectos de la Naturaleza, no es otro que el de *Gravedad,* por el que la Tierra y todos los cuerpos tienen una tendencia [fuerza] hacia su Centro... [que] decrece como aumenta el cuadrado de la distancia.
>
> ...el Autor, con gran Sagacidad, indaga sobre las necesarias consecuencias de esta Suposición; encuentra la Causa genuina de varios Aspectos en la Teoría de la Luna y los Planetas, *y descubre* las hasta ahora desconocidas Leyes del Movimiento de los cometas, y *del Flujo y Reflujo del Mar.*

Es la teoría de mareas de Newton la que Laplace —también con justicia— criticaría cien años más tarde. Así la explica Halley:

> Si la tierra estuviera sola, es decir, no afectada por las Acciones del Sol y la luna, no puede dudarse que el Océano, siendo igualmente presionado por la fuerza de gravedad hacia el centro, continuaría en estancamiento perfecto, siempre a la misma altura, sin Fluir o Refluir jamás; pero [...] la tierra está dentro de la actividad de las atracciones [del Sol y la luna] ...el Océano que es el fluido, cede a la fuerza más débil, levantándose donde es menos presionado y hundiéndose donde es más presionado... donde la luna está perpendicular, ya sea arriba o abajo del horizonte... [es donde] la fuerza de gravedad es más disminuida... el Océano debe hincharse...con Agua de aquellas partes donde la presión es mayor, viz. de aquellos lugares donde la Luna está cerca del Horizonte... el Mar, que de lo contrario sería Esférico, bajo la Presión de la Luna debe tomar forma Oval, con el diametro mayor allí donde la Luna está vertical.



Y aquí viene la parte clave, cuando introduce la rotación terrestre:

> *la Luna al cambiar su Posición al girar alrededor de la Tierra una vez por día, [ya que el] Oval de Agua gira con ella, ocasiona así dos Flujos y dos Reflujos observables cada 25 horas.*[22]

Es decir, se puede calcular la forma de un océano sobre una Tierra que no rota sobre su eje y *luego* agregar la rotación con lo cual aparecen dos mareas altas y dos bajas por día.[23] Esto es lo que llamamos un cambio de coordenadas; el flujo y reflujo de la marea es, según esta teoría, un fenómeno *aparente* (en el sentido definido en el segundo capítulo); un observador inercial no vería efectos de la rotación terrestre (por supuesto que sólo en este caso idealizado en que no hay costas). Esto es lo que criticó Laplace, y tuvo razón. Dice Laplace:

> todos los Geómetras que se han ocupado de [el problema de la marea] han supuesto de entrada un Astro inmóvil encima de un Planeta inmóvil y recubierto de fluido; han buscado la figura que el fluido debe tomar para estar en equilibrio; considerando luego el caso de un Astro en movimiento real o aparente en torno al planeta, ellos han supuesto que la figura del fluido en equilibrio, que habían determinado en el caso de un astro inmóvil, no era alterada por este movimiento, por lo tanto todo el efecto consistía en cambiar en cada instante la posición de esta figura relativa al Planeta, de manera que conserve siempre su [relación con] el Astro.
>
> Es así que los *Sres. Newton, Daniel Bernoulli, y Maclaurin,* han determinado los efectos de las atracciones del Sol y de la Luna sobre el mar; pero es fácil ver que, poco se conforman estas suposiciones con lo que se da lugar en la Naturaleza y se debe a los grandes Geómetras que acabo de citar, la justicia de observar que ellos mismos reconocieron la inexactitud y la insuficiencia para explicar muchos fenómenos de las mareas.

> [...] pero reflexionando con atención sobre la naturaleza del problema, se observa pronto que el cambio de la posición del Sol y la Luna respecto al mar, no es el único efecto de la rotación de la Tierra.

Luego Laplace pasa a desarrollar su propia teoría; la forma en que lo hace es digna de ser comentada. Considera movimientos pequeños con respecto a un océano que rota como un cuerpo sólido con la Tierra. Para eso, trabaja con coordenadas "polares" en la Tierra (longitud, latitud y distancia al centro), pero las utiliza para escribir la posición de un pequeño paralelepípedo ("elemento de fluido") desde un sistema que no rota con la Tierra (o sea, un sistema inercial). La ecuación de Newton (a=f/m) la escribe en este sistema, donde es válida pero expresa el resultado final en las coordenadas fijas a la Tierra. De esta forma se evita tener que escribir la ecuación de Newton en el sistema de rotación (fórmula que derivaría Coriolis 60 años más tarde) y anticipa la flexibilidad de la mecánica ante cambios de coordenadas, incluso aquellos dependientes del tiempo, procedimiento que formalizarían Lagrange (1788) y Hamilton (1834) años después.

Luego de derivar la ecuación de incomprensibilidad. Laplace obtiene las fuerzas que actúan sobre el elemento de fluido: 1) la que ahora llamamos "de Coriolis", 2) la centrífuga, 3) la de atracción gravitatoria de todas las "moléculas" de la Tierra (incluyendo las del propio océano) y de otros astros (Luna y Sol), y 4) la depresión. En primer lugar Laplace considera al océano en equilibrio y todavía no incluye la atracción gravitatoria de otros astros. En la superficie del mar, la presión es uniforme y por lo tanto en ambas direcciones horizontales debe haber equilibrio entre la atracción gravitatoria de todas las moléculas de la Tierra y la fuerza centrífuga. De esta manera determina "el nivel del fluido", el cual es un elipsoide que difiere de una esfera en una cantidad del orden de $\varepsilon=\Omega^2 R_T/g=1/290$, que es la "fuerza centrífuga en el ecuador" (relativa a la de atracción gravitatoria). Argumenta entonces que la velocidad vertical es despreciable, calcula la presión debajo de la superficie (ya ha desaparecido la fuerza centrífuga, absorbida en la forma de equilibrio de la superficie) e incluye la atracción gravitatoria de los otros astros.

Las ecuaciones de la marea de Laplace no tuvieron una aceptación inmediata. El astrónomo inglés George Biddell Airy (1801-1892), en su obra *Tides and Waves* (1845) critica fuertemente a Laplace y al mismo tiempo curiosamente opina que:

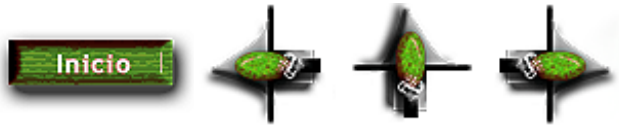
> debe reconocerse que [la teoría de mareas de Newton] es una de las teorías más despreciables (*contemptible*) que se hayan jamás empleado para explicar una colección de hechos físicos importantes. Es completamente falsa en sus principios y completamente inaplicable en sus resultados. Sin embargo, por extraño que parezca, esta teoría ha sido de gran utilidad.

William Thompson (1824-1907), mejor conocido como Lord Kelvin defendió la teoría de mareas de Laplace en 1875... pero fue muy difícil entender su trabajo. De todos modos, no es mi intención tratar en este libro los resultados de Laplace sobre el problema de la marea (de hecho, para obtenerlos a partir de sus ecuaciones tuvo que hacer algunas simplificaciones no del todo justificadas). Mi propósito es, en cambio, destacar que fue el primero en descubrir la ahora llamada fuerza de Coriolis que lo hizo en un contexto oceanográfico y, sobre todo, que insistió desde un principio en el carácter no aparente —sino real— de los efectos de la rotación terrestre, ligándonos a la forma que toma la superficie del mar con la rotación terrestre. Las ecuaciones de marea de Laplace son hoy en día un paradigma de los modelos de dinámica oceánica o atmosférica, en los que no se incluye necesariamente las fuerzas generadoras de la marea, y en cambio, normalmente se agregan otras fuerzas externas, como el empuje del viento, o internas, como la flotabilidad debida a los cambios de densidad con la profundidad.

Como ya mencioné más arriba, la realidad de la rotación terrestre no fue aceptada por el público en general hasta mediados del siglo pasado, con motivo del experimento de Foucault. Ocho años más tarde (1859) Perrot realizó el experimento de la generación de vorticidad al vaciar un recipiente (para poder medir de la manera más precisa este efecto en un experimento, fue necesario utilizar un recipiente muy simétrico y también, dejar reposar el agua durante todo un día, con el fin de eliminar cualquier posibilidad de vorticidad inicia por pequeña pequeña que fuera). Posteriormente, la idea de la importancia de la fuerza de Coriolis en la hidráulica y la meteorología fue adquiriendo peso, hasta que se formalizó la idea del balance geostrófico. En los océanos y la atmósfera existe, en muy buena aproximación, este equilibrio entre las fuerzas de Coriolis y la de presión, la última es por tanto casi perpendicular a la dirección de movimiento.

Si la Tierra no rotara, si no actuara la fuerza de Coriolis, la dinámica de los océanos y la atmósfera sería tan diferente que, por ejemplo, el clima terrestre no tendría nada en común con el actual. De hecho, la vida —al menos

tal como la conocemos— no sería posible en nuestro planeta.



[Nota 21]

21. N. A. ε=0.003 en la Tierra

Inicio

[Nota 22]

22 Cursivas del autor.

Inicio

[Nota 23]

23 La explicación de Halley de por qué el agua sube, no sólo en la dirección en que está la Luna, sino también en la opuesta, no es correcta. No es porque allí esté "menos presionada" por la fuerza gravitatoria sino que es una combinación de la acción de esta fuerza y la centrífuga del sistema en rotación Tierra-Luna. Esta es una rotación de una vuelta por mes lunar, diferente de la que es el tema de este libro, de una vuelta por día. Esta aclaración no es importante para el tema de este capítulo, y es por eso que no se incluye en el texto principal, donde podría causar confusión.

Inicio

BIBLIOGRAFÍA

TEXTOS HISTÓRICOS

Galileo Galilei Linceo, *Dialogo di Galileo Galilei Linceo, Matematico sopraordinario dello studio di Pisa. E Filofofo, e Matematico primario del Serenissimo GP: Duca di Toscana. Doue ne i congressi di quattro giornate si discorre sopra i due Massimi Sistemi del Mondo Tolemaico, e Copernicano; proponendo indeterminatamente le ragioni Filosofiche, e Naturali tanto per l'una, quanto per l'altra parte;* también conocida por *Dialoghi della Nouve Scienze* (1632).

Isaac Newton, *Philosophiae Naturalis Principia Mathematica* (1687). Edmond Halley, "The true theory of the tides, extracted from that admired treatise of Mr. Isaac Newton, intituled, Philosophiae Naturalis Principia mathematica", en *Royal Soc. Londres Philos. Trans.*, 19: 445-457 (1697).

Pierre Simon, marqués de Laplace, "Recherches sur plusieurs points du système du monde, *Mém. Acad. R. Sci.* (París) 75-182 (1778). "Memoire sur le mouvement d'un corps qui tombe d'une grande hauteur", en *Bull. Soc. philomathique*, París 3:109-115 (1803).

Gaspard Gustave de Coriolis, "Sur les équations du mouvement relatif des systèmes de corps", en *J. Éc. Roy. Polyt.* (París), 15:142-154 (1835).

G. B. Airy, "Tides and Waves", en *Encyclopedia Metropolitana*, 5: 241-396 (1845).

LA FORMA DE LA TIERRA

S. Chandrasekhar, *Ellipsoidal figures of equilibrium*, Yale Univ. Press, New Haven y Londres (1969).

Desmond King-Hele, "The shape of the Earth", en *Science*, 192:1293-1300 (1976).

H.Bentley Glass. "Maupertuis, a Forgotten Genius", en *Scientific American.*

J P. Maury, Newton. *The father of modern astronomy*, Discoveries, H. Abrams Inc., Nueva York (1992) (traducción del francés).

P. Ripa, "Caída libre y forma de la Tierra", *Revista Mexicana de Física*, vol. 41, pp. 106-127 (1995).

EL EFECTO DE CORIOLIS Y SUS APLICACIONES

Benoit Cushman-Roisin, "Motion of a Free particle on a Beta-Plane", en Geophys. Astrophys. Fluid Dyn., 22: 85-102 (1982).

Henry M. Stommel y Dennis W. Moore, *An Introduction to the Coriolis Force,* Columbia Univ. Press, Nueva York (1989).

P. Ripa, "Seasonal Circulation in the Gulf of California", *Annales Geophysicae*, 8: 559-564.

BIBLIOGRAFÍA

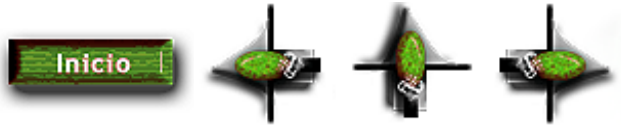
I. Grattan-Guinnness, "Laplace", en *Dictionary of Scientific Biography*, Vol. XV. Charles Scribner's sons. Nueva York (1971).

P. Costabel, "Coriolis", en el mismo diccionario.

OTROS

R. A. Lyttleton, *The Stability of Rotating Liquid Masses*, Cambridge Univ. Press (1953).

V. I. Arnol'd, *Huygens and Barrow, Newton and Hooke: pioneers in mathematical analysis and catastrophe theory from evolvents to quasicrystals*, Birkhäuser (1990), (traducción del ruso).

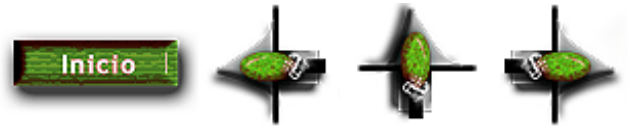


COLOFÓN

Este libro se terminó de imprimir y encuadernar en el mes de septiembre de 1996 en la Impresora y Encuadernadora Progreso, S. A. de C. V. (IEPSA), Calzada de San Lorenzo, 244; 09830 México, D.F. La formación y tipografía se hicieron en el Taller de Composición del FCE y estuvo a cargo de *Angelina Peña Urquieta.*

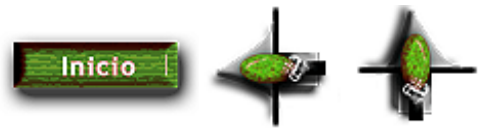
Se tiraron 7 000 ejemplares.

La Ciencia desde México es coordinada editorialmente por MARCO ANTONIO PULIDO y MARÍA DEL CARMEN FARÍAS



CONTRAPORTADA

Antes de emprender la lectura de este libro, conviene hacer un poco de ejercicio, atendiendo las siguientes instrucciones. Primero, diríjase al fregadero más próximo —no para lavarse las manos, como el irresponsable de Poncio Pilatos, sino para hacerse cómplice de uno de los factores clave y más interesantes para descifrar el "acertijo" y el efecto de Coriolis— enseguida, abra la llave y observe cómo gira el agua, al vaciarse, en el sentido de las manecillas del reloj. Ahora bien, si por algún motivo se viera obligado al día siguiente, o unas horas después, a repetir esta misma rutina en el hemisferio austral, notará que el agua, en esta ocasión, se retira de manera inversa a como, según usted, indican las buenas costumbres. Es seguro que, después de repetir este hecho tantas veces como ha ido al espejo para cerciorarse de la correcta posición de los ojos en sus órbitas, decida demandar al dueño del hotel donde se hospeda. Sin embargo, en estos casos, es preciso guardar la tranquilidad antes de llevar a los tribunales la demanda de intento de volverlo loco con un fregadero tan extraño, agua tan caprichosa e incluso un agujero deschavetado. Es preciso, entonces, respirar profundo, e iniciar la lectura de *La increíble historia de la malentendida fuerza de Coriolis.* Notará cómo el miedo a ingerir agua o bañarse se va disipando a medida que Ripa elucida este fenómeno que pensaba pesadilla o complot.

El autor, ocupado desde hace más de quince años en investigar este *real* misterio, valga la paradoja, hace una aguda revisión de conceptos tales como el principio de la inercia y la composición de velocidades, ideados por Galileo, la mecánica de Newton, hasta experimentos como el péndulo de Foucault, que han contribuido a explicar esta fuerza que, aparte de curiosa, es fundamental para la física de los océanos y las atmósferas planetarias.

Pedro Ripa nació en Quilmes, Provincia de Buenos Aires, Argentina y trabaja actualmente en el CICESE de Ensenada, Baja California. La foto muestra al autor en la sala giratoria "Coriolis" del Museo de Ciencia de París. La pelota que hace rodar se desvía a la derecha; ocurriría lo mismo si la lanzara por el aire.