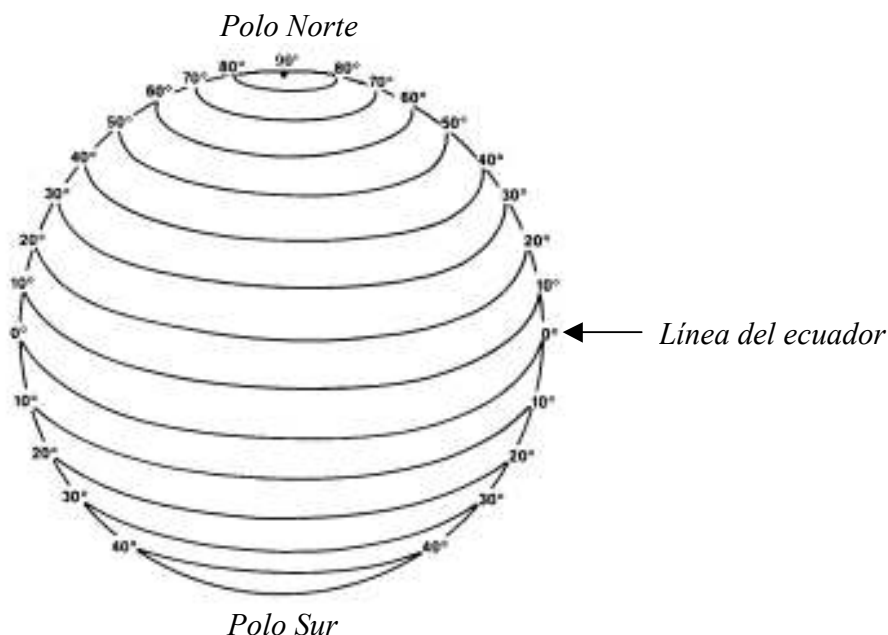


La física de los records olímpicos

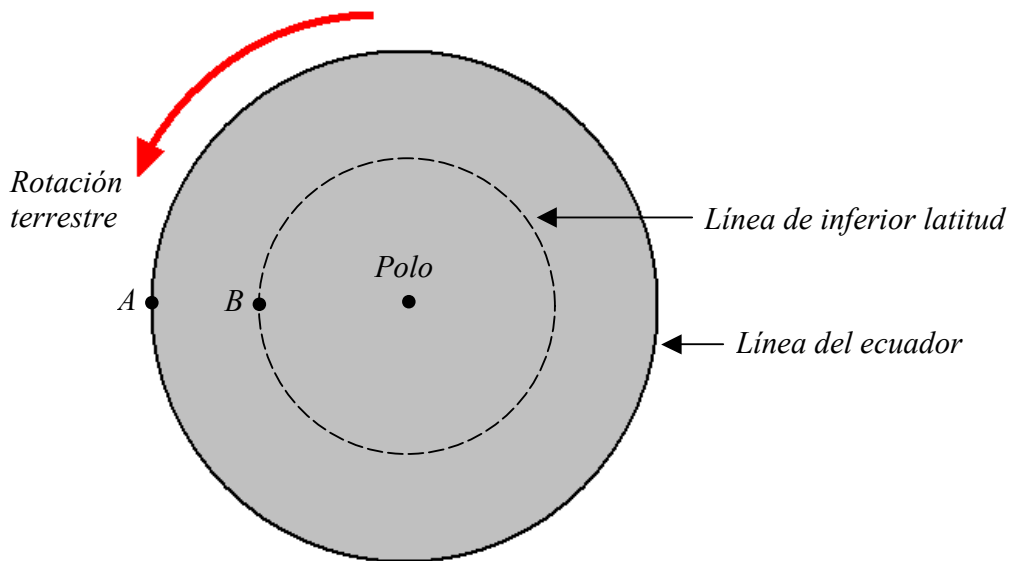
Si usted fuese un atleta deseoso de imponer un nuevo récord olímpico, por ejemplo, en el lanzamiento de la bala, el disco, el salto largo o la jabalina, y tuviese que escoger entre Beijing y Santiago como sede de las próximas olimpiadas, ¿cuál de estas ciudades escogería? Mientras su mente busca afanosamente una respuesta, le cuento que yo no dudaría en escoger Santiago. Para evitar suspicacias debo aclarar que esta elección no se debe al natural afecto que siento por mi ciudad natal, ni tampoco a que me encuentre imbuido de un profundo espíritu patriótico. Nada de eso, mi elección obedece a razones de índole estrictamente científica, pues un deportista ubicado en Santiago tiene un peso aparente menor que en Beijing, de modo que con el mismo esfuerzo puede dar saltos de mayor longitud o altura, lanzar la bala, el disco o la jabalina más lejos, etc. ¿Le sorprende que mi ciudad natal posea tan notables características? A decir verdad no debería sorprenderse pues, en lo que respecta al problema que nos ocupa, Santiago no tiene nada especial salvo que su latitud es menor que la de Beijing.

¿Qué se entiende por peso aparente? ¿Cómo se relaciona la latitud donde se desarrolla una olimpiada con el rendimiento de los deportistas? Espero que se encuentre en forma, porque para dar respuesta a estas preguntas tendremos que realizar un poco de ejercicio mental, comenzando con algunas nociones básicas de geografía. Como se ilustra en la siguiente figura, el globo terráqueo puede ser dividido imaginariamente en un conjunto de circunferencias de diferente tamaño, denominadas *paralelas*.



La mayor de estas circunferencias, cuya latitud se define como cero (0°), se denomina *línea del ecuador*, y en la medida que nos alejamos de ella, ya sea hacia el norte o hacia el sur, la latitud aumenta y el tamaño de las circunferencias disminuye, hasta que se transforman en puntos cuando nos situamos en los polos. En otras palabras, cuanto más alejada está una circunferencia de la línea del ecuador, mayor es la latitud de un punto geográfico ubicado sobre ella. Para distinguir la latitud de puntos situados en uno u otro hemisferio terrestre, es costumbre hablar de

latitud norte (N) cuando nos situamos sobre una paralela que se encuentra en el hemisferio boreal, y de latitud sur (S) cuando se trata del hemisferio austral. También se observa en la figura que la latitud se mide en grados, aunque para nuestros propósitos no es necesario profundizar sobre este punto. Lo que si tiene gran importancia es recordar que la Tierra gira sobre su propio eje, efectuando una rotación completa en un periodo de 24 horas. Por lo tanto, la rapidez con la que gira un punto geográfico depende de su latitud. Para comprender esto último, observemos la siguiente figura, donde aparece un esquema de la Tierra vista desde uno de los polos, de modo que la línea del ecuador coincide con la circunferencia mayor. También vemos una circunferencia más pequeña, que corresponde a una línea de inferior latitud.



Como es bien sabido, la Tierra gira a través de un eje que pasa por los polos, de modo que en la figura adjunta, dicho eje sale de la página. Ahora bien, si centramos nuestra atención en los puntos *A* y *B*, que supondremos se encuentran fijos sobre la superficie terrestre, notaremos que tanto la línea del ecuador, como la línea de inferior latitud, corresponden a las trayectorias de giro seguidas por cada uno de estos puntos. Por otra parte, el tiempo que demoran ambos puntos en completar un vuelta es el mismo (24 horas). Sin embargo, dado que la trayectoria seguida por *A* es mayor que la de *B*, se concluye que *A* se mueve más rápido que *B*. Más aun, es fácil deducir que la mayor rapidez de giro corresponde a aquellos puntos ubicados sobre la línea del ecuador y la menor rapidez a aquellos puntos situados en los polos.

¿A dónde nos conduce todo esto? Bien, imagino que mis lectores habrán experimentado en más de una ocasión la denominada *fuerza centrífuga* que aparece cuando nos encontramos girando, por ejemplo en un carrusel, o cuando nos desviamos de una trayectoria recta, algo que ocurre cotidianamente a bordo de un vehículo que toma una curva. En los parques de diversiones existen muchos juegos donde es posible experimentar los ingratos efectos de la fuerza centrífuga, además de los tradicionales carruseles. Sin embargo, más allá del origen de aquella fuerza, lo esencial es recordar que ella se manifiesta como un tirón que tiende a alejarnos del eje de giro, y dicho tirón será tanto mayor cuanto más grande sea la rapidez de rotación. En otras palabras, la magnitud de la fuerza centrífuga crece en la medida que aumenta la rapidez de giro, cosa que también puede ser captada de forma intuitiva apelando a nuestras propias experiencia con

carruseles, automóviles, etc. Ahora bien, si en vez de pensar en carruseles o automóviles nos imaginamos de pie sobre la línea del ecuador, o en cualquier otra latitud que sea de nuestro agrado, es fácil concluir que debido al movimiento de rotación terrestre experimentaremos el mismo efecto que en un carrusel, con la pequeña gran diferencia que ahora el carrusel es nuestro planeta. Por tanto, existe una fuerza que tiende a alejarnos del eje de rotación de nuestro planeta y también de su centro, es decir, la fuerza centrífuga generada por el movimiento de rotación hace que tendamos a elevarnos por sobre su superficie de la Tierra¹. Por otro lado, sabemos que la fuerza de gravedad actúa en dirección radial, tirando de los cuerpos hacia el centro de nuestro planeta, de modo que sin pretender ser muy rigurosos podemos decir que ambas fuerzas actúan en sentidos opuestos. En otras palabras, mientras la gravedad nos tira hacia el centro de la Tierra, la fuerza centrífuga nos tira en sentido contrario, tendiendo a alejarnos de dicho centro.

Para comprender adecuadamente las implicancias de este fenómeno, imaginemos que nuestro planeta carece de movimiento de rotación, y que usted se traslada hasta algún lugar en tierra firme ubicado sobre la línea del ecuador. Una vez ahí, se para sobre una pesa y observa que ésta registra un valor P' . Supongamos ahora que la Tierra empieza a girar lentamente sobre su propio eje, como si fuese un enorme carrusel, hasta alcanzar la rapidez que caracteriza al movimiento de rotación (una vuelta completa en 24 horas). Si usted permaneciera estoicamente de pie sobre la pesa mientras ello ocurre, constataría que el registro de la pesa disminuye gradualmente conforme la Tierra adquiere su movimiento de rotación, hasta alcanzar un valor P que será ligeramente menor que P' (en la práctica, la diferencia entre P' y P es sumamente pequeña, de modo que estamos asumiendo que disponemos de una pesa de gran precisión). ¿Cómo se explica esta disminución en el registro de la pesa? Siguiendo con la analogía con el giro de un carrusel, resulta sencillo concluir que debido al movimiento de rotación, el valor indicado por la pesa debe disminuir en relación al valor registrado suponiendo que no existe dicho movimiento. En efecto, la medida P' (sin rotación) será menor que P (con rotación), pues mientras la gravedad nos hace ejercer una fuerza sobre la pesa que está dirigida hacia el centro de la Tierra, el efecto carrusel nos tira en sentido contrario, haciendo disminuir la fuerza que ejercemos sobre la pesa, y en consecuencia su registro disminuye.

Resulta de suma importancia señalar que el valor P' (sin rotación) corresponde al *peso real*, mientras que P (con rotación) corresponde al *peso aparente*. Quizá considere un tanto paradójico que el peso real equivalga al registro de la pesa en condiciones irreales (sin rotación) mientras que el peso aparente equivalga al registro en condiciones reales (con rotación). Para intentar dilucidar esta presunta paradoja debemos empezar recordando que, por definición, el peso (real) no es otra cosa que la fuerza de gravedad, cuyo valor permanece constante para un cuerpo situado en una posición fija sobre la superficie de la Tierra. Sin embargo, como ya sabemos, la rotación de nuestro planeta provoca que el registro de la pesa disminuya debido a la acción silenciosa del efecto carrusel, haciéndonos creer que estamos midiendo nuestro peso (real) cuando en verdad estamos determinando un peso aparente. En otras palabras, la pesa registra la acción combinada de la fuerza de gravedad, cuya magnitud no se modifica, y de la fuerza centrífuga, que disminuye el registro debido a la rotación terrestre, de modo que en ausencia de esta última, la pesa señalaría exactamente nuestro peso.

En conclusión, y tal como anticipamos al comienzo, cuanto menor sea la latitud donde nos encontremos ubicados, menor será el registro de una pesa al posarnos sobre ella, y por lo tanto nuestro peso aparente también será menor. Después del ejercicio mental que hemos debido hacer

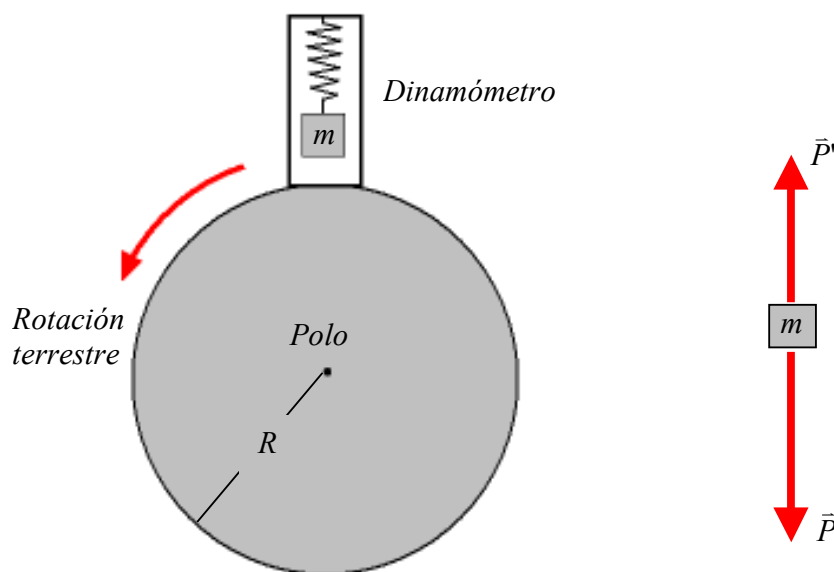
¹ Este efecto carrusel es bastante pequeño para ser percibido directamente por nosotros, lo cual no impide que pueda ser medido con precisión.

para llegar hasta aquí, permítame tenderle una mano resumiendo el razonamiento desarrollado hasta ahora: *mientras menor sea la latitud donde se encuentre un cuerpo (lo que implica más cercanía a la línea del ecuador) mayor será su rapidez de rotación, y mayor será también la fuerza centrífuga que actúa sobre él. Dicha fuerza tiende a alejar los cuerpos de la superficie de la Tierra, pues actúa en sentido contrario a la gravedad, razón por la cual una pesa registrará un valor tanto menor cuanto mayor sea la fuerza centrífuga. En consecuencia, a menor latitud, menor resulta también el peso aparente.*

Ahora bien, sucede que la latitud de Santiago en números redondos es de 33° S, mientras que la de Beijing es mayor y tiene un valor de 40° N. Por tanto, un atleta y todos sus implementos deportivos (jabalinas, discos, balas, etc.), tendrán un peso aparente menor en Santiago, de modo que con el mismo esfuerzo, un competidor puede dar saltos más altos o largos, lanzar el disco, la bala o la jabalina a mayor distancia, etc. Quizá esta lectura no le ayude mucho en su empeño por alcanzar el podium olímpico, pero al menos espero que su mente se haya ejercitado lo suficiente como para hacerle sentir intelectualmente en forma.

¿Quiere saber más?

La siguiente figura representa esquemáticamente a la Tierra vista desde uno de los polos. Un cuerpo de masa m se encuentra suspendido de un dinamómetro que se encuentra en el ecuador. Designemos por R el radio de la Tierra y T su periodo de rotación. Tal como se ilustra a continuación, las fuerzas que actúan sobre m son la que ejerce el dinamómetro, que corresponde al peso aparente \vec{P}' , y el peso (real) $\vec{P} = m\vec{g}$ que actúa en sentido contrario.



Al aplicar la segunda ley de Newton en la dirección radial obtenemos,

$$\sum F = ma_c \rightarrow ma_c = P - P' \quad (1)$$

donde a_c es la aceleración centrípeta que viene dada por,

$$a_c = \frac{v^2}{R} = \frac{(2\pi R / T)^2}{R} = \frac{4\pi^2 R}{T^2}$$

A partir de (1) se obtiene,

$$P' = mg - ma_c$$

Definamos el peso aparente P' como:

$$P' = mg' \tag{2}$$

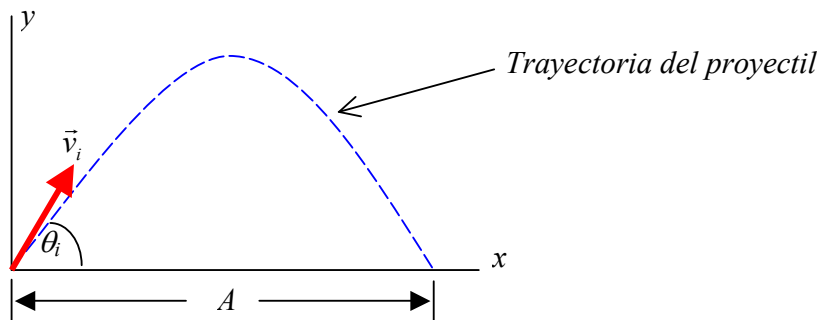
Introduciendo (2) en (1) resulta,

$$g' = g - a_c \tag{3}$$

Vemos claramente que $g' < g$ a condición que $a_c > 0$. Para poner un ejemplo concreto, pensemos en el lanzamiento de la bala, que bien podemos considerar como un proyectil. De acuerdo a una fórmula bastante conocida, el alcance A de un proyectil viene dado por:

$$A = \frac{v_i^2 \sin 2\theta_i}{g} \tag{4}$$

donde v_i es la velocidad inicial del proyectil, que forma un ángulo θ_i con la horizontal, tal como se ilustra en la siguiente figura:



De acuerdo a la ecuación (4), el alcance de un proyectil varía en razón inversa a la aceleración de gravedad. Por lo tanto, si en (4) introducimos g' en reemplazo de g , concluimos fácilmente que un atleta enviará la bala, la jabalina o el disco más lejos, cuanto mayor sea la aceleración centrípeta a_c , cuyo valor aumenta en la medida que la latitud disminuye.

*Jorge Pinochet I.
Licenciado en física, Universidad Católica de Chile*