

LA FUERZA DE CORIOLIS: MITOS Y EVIDENCIAS

GARCÍA-VERDUGO DELMAS, Andrés *; ALGARABIDE MARÍN, Cristian;
GIL MARTÍNEZ, Guillermo; SAN JOSÉ PÉREZ, Miguel Teseo

Profesor() y alumnos del I.E.S. Tomás Mingot, LOGROÑO (LA RIOJA)*

INTRODUCCIÓN

Se presenta aquí el resultado de una serie de investigaciones, demostraciones y experiencias sobre el origen y los efectos de la aceleración de Coriolis, que fueron realizadas durante los dos cursos de bachillerato por un equipo de alumnos del Instituto, coordinados por su profesor y al margen de su horario lectivo.

Este proyecto que partió de un trabajo de investigación teórico-experimental (1), generó una buena cantidad de materiales y experiencias, y participó en varios concursos y exposiciones. A lo largo de esta comunicación se presentarán algunos de estos productos.

En este proyecto se investigó y se intentó mostrar al público qué es la “fuerza” de Coriolis, cuál es su origen y por qué se puede notar su presencia en la Tierra. Entre sus efectos más conocidos se encuentran la desviación lateral de los lanzamientos de proyectiles a larga distancia, la circulación de las grandes masas de aire de la atmósfera, o la desviación del péndulo de Foucault. Pero también se hizo un esfuerzo en analizar y desmontar algunos mitos, como la arraigada creencia de que todos los remolinos que se forman en el hemisferio norte giran en un sentido y en el sur en el contrario.

LA “FUERZA” DE CORIOLIS Y EL MOVIMIENTO DE LA TIERRA

La fuerza, o más propiamente, la aceleración de Coriolis debe su nombre al ingeniero y matemático francés Gaspard G. de Coriolis (1792-1843), y es el efecto que un observador en movimiento de rotación aprecia sobre cualquier cuerpo que se mueve con respecto a él, y que se traduce en una desviación lateral de su trayectoria.

Se trata de una fuerza de inercia y tanto la aceleración como la desviación que produce sólo la detecta el observador en rotación, debido a su propia aceleración normal.

El efecto de Coriolis aparece en cualquier sistema en rotación, pero resulta especialmente interesante cuando observamos un movimiento desde nuestra posición ligada a la Tierra, ya que ésta se mueve girando lentamente a razón de una vuelta por día. Se producen de este modo sorprendentes efectos como los que se citan a continuación:

- Los cuerpos que se desplazan horizontalmente en el hemisferio norte se desvían hacia la derecha independientemente de su rumbo, tanto más cuanto más alejados estén del ecuador, mientras que en el sur se desvían hacia la izquierda. Por este motivo los

(1) - San José Pérez, M.T.; Algarabide Marín, C.; Gil Martínez, G.; García-Verdugo Delmas, A. Trabajo de investigación: “La aceleración de Coriolis: Mitos y Evidencias”.

- Primer Premio en la modalidad de Bachillerato en la IX edición de los “Premios Jóvenes Investigadores” de la C.A. de La Rioja, (2011).
- XXVII Encuentro de Jóvenes Investigadores (Salamanca). Cuadernos de I.N.I.C.E. Investigación Juvenil N°100, 215-220. (2011). I.N.I.C.E.
- Proyecto participante en la V exposición Divulgaciencia (Logroño-2011).

péndulos tienden también a girar su plano de oscilación en el mismo sentido, los vientos alisios son permanentes y dirigidos siempre hacia el oeste, y se forman ciclones que en el hemisferio norte que giran siempre en sentido antihorario, al contrario que en el sur.

- Los cuerpos que viajan horizontalmente en la dirección de un paralelo experimentan un aumento aparente de su peso si van rumbo Oeste, y una disminución si es hacia el Este, tanto mayor cuanto más cerca del ecuador.
- Si el movimiento es en vertical, aparece una desviación lateral, máxima en el ecuador, y que los desvía hacia el Este si el movimiento es de caída, o hacia el Oeste si es de ascensión.

El desarrollo matemático de la aceleración de Coriolis justifica y permite cuantificar estos efectos y explica que resulten despreciables en movimientos cortos y a pequeña escala, y que sin embargo sean muy evidentes para movimientos más prolongados. El procedimiento que nos permite deducir y calcular estos efectos se describe en el siguiente apartado.

DEDUCCIÓN DE LOS EFECTOS DE LA ACELERACIÓN DE CORIOLIS SOBRE CUERPOS QUE SE MUEVEN EN LA TIERRA

1- Aceleración de un móvil en movimiento relativo. Aparición del término de Coriolis.

Sea un punto material P que se mueve por el espacio observado desde un sistema de referencia móvil. Derivando la expresión de su posición absoluta $\mathbf{r} = \mathbf{r}_o + \mathbf{r}_r$, se obtiene su aceleración absoluta \mathbf{a} , en la que se distinguen varias contribuciones:

$$\mathbf{a} = \mathbf{a}_o + \mathbf{a}_r + \boldsymbol{\alpha} \wedge \mathbf{r} + \boldsymbol{\omega} \wedge (\boldsymbol{\omega} \wedge \mathbf{r}) + 2(\boldsymbol{\omega} \wedge \mathbf{v}_r) \quad \Rightarrow \quad \mathbf{a} = \mathbf{a}_r + \mathbf{a}_a + \mathbf{a}_c$$

- *Aceleración de arrastre* $\mathbf{a}_a = \mathbf{a}_o + \boldsymbol{\alpha} \wedge \mathbf{r} + \boldsymbol{\omega} \wedge (\boldsymbol{\omega} \wedge \mathbf{r})$, que es la aceleración que tendría el móvil P si no tuviera movimiento relativo, es decir, ligado al sistema de referencia móvil. ($\boldsymbol{\alpha}$ y $\boldsymbol{\omega}$ son su aceleración y velocidad angulares)
- *Aceleración relativa* \mathbf{a}_r , que es la que se observa para P desde el sistema de referencia móvil.
- *Aceleración complementaria o de Coriolis* $\mathbf{a}_c = 2(\boldsymbol{\omega} \wedge \mathbf{v}_r)$, donde \mathbf{v}_r es la velocidad relativa de P observada desde la referencia móvil.

La aceleración de Coriolis $\mathbf{a}_c = 2(\boldsymbol{\omega} \wedge \mathbf{v}_r)$ es muy significativa cuando el sistema de referencia móvil tiene movimiento de rotación, como por ejemplo los que están ligados a la superficie terrestre, y solamente aparece cuando el móvil tiene una velocidad relativa con respecto a dicho sistema.

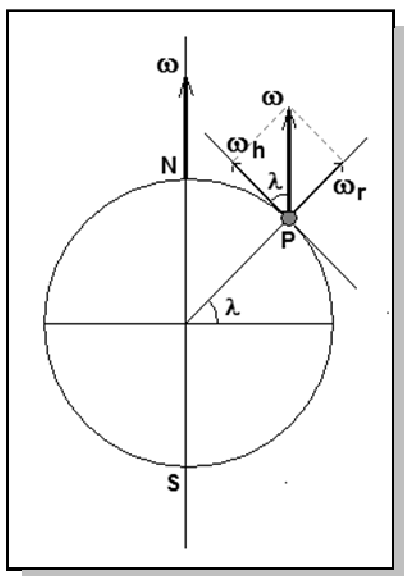
2- Aplicación al movimiento relativo de un móvil observado desde la Tierra en rotación

Un observador fijo en un punto P de la superficie terrestre observará para un cuerpo que se mueva en sus cercanías una aceleración que será su aceleración relativa $\mathbf{a}_r = \mathbf{a} - \mathbf{a}_a - \mathbf{a}_c$, en donde:

- $\mathbf{a} = \mathbf{g}_o$ es la aceleración de la gravedad en dirección al centro de la Tierra.
- $-\mathbf{a}_a$ es la aceleración centrífuga, perpendicular al eje de la Tierra hacia el exterior.
- $\mathbf{a} - \mathbf{a}_a = \mathbf{g}$ definen la gravedad efectiva en ese lugar, y es la parte de la aceleración del móvil independiente de su movimiento sobre la Tierra.

- \mathbf{a}_c es la aceleración extra que se observa en el cuerpo cuando éste se mueve con una velocidad relativa \mathbf{V} respecto al observador ligado a la superficie de la Tierra en rotación, y es igual y opuesta a la aceleración de Coriolis \mathbf{a}_c en ese punto. Esta aceleración es la que provoca las desviaciones y otros efectos aparentemente extraños en la trayectoria de los cuerpos que se mueven sobre la Tierra, como proyectiles, péndulos y grandes masas de aire o agua, y que se conocen como “efecto de Coriolis”.

En conclusión, Aparte del valor fijo de la gravedad efectiva \mathbf{g} , la aceleración adicional \mathbf{a} observada desde un punto P de la Tierra para un móvil que se desplaza con velocidad relativa \mathbf{V} , es igual y opuesta a la aceleración de Coriolis. Esta aceleración a su vez puede expresarse en función de las componentes horizontal y radial de la velocidad angular de la Tierra:



$$\mathbf{a} = -\mathbf{a}_c = -2\boldsymbol{\omega} \wedge \mathbf{v} = -2(\boldsymbol{\omega}_h + \boldsymbol{\omega}_r) \wedge \mathbf{v}$$

$$\mathbf{a} = (-2\boldsymbol{\omega}_h \wedge \mathbf{v}) + (-2\boldsymbol{\omega}_r \wedge \mathbf{v})$$

- P – Posición de la Tierra desde donde se observa el móvil
- a – Aceleración del móvil observada desde P debida a su movimiento relativo.
- \mathbf{a}_c – Aceleración de Coriolis en P
- v – Velocidad relativa con la que se desplaza el móvil respecto a P
- $\boldsymbol{\omega}$ - Velocidad angular de la Tierra
- $\boldsymbol{\omega}_h$ - Componente horizontal de la velocidad angular de la Tierra
- $\boldsymbol{\omega}_r$ - Componente vertical (radial) de la velocidad angular de la Tierra
- λ - Latitud de P

Analizando los dos términos de esta aceleración y teniendo en cuenta las leyes del cálculo vectorial, se deduce que se van a producir varios efectos en el movimiento del móvil según cómo sea la dirección de su velocidad relativa \mathbf{V} .

1. Desviación lateral derecha-izquierda de la trayectoria horizontal.

Si el móvil se mueve horizontalmente, el término $(-2\boldsymbol{\omega}_r \wedge \mathbf{v})$ de la aceleración tiene dirección horizontal y perpendicular a la velocidad \mathbf{V} e implica una desviación lateral de su trayectoria, hacia su derecha si está en el hemisferio Norte y hacia su izquierda en el Sur.

2. Variación del peso efectivo del cuerpo en movimiento horizontal.

Si el móvil se mueve horizontalmente, el término $(-2\boldsymbol{\omega}_h \wedge \mathbf{v})$ de la aceleración tiene dirección vertical (radial) e implica una variación en la gravedad efectiva que se traduce en un incremento de su peso si se mueve en dirección Oeste y una disminución si es hacia el Este.

3. Desviación lateral Este-Oeste de la trayectoria vertical.

Si el móvil se mueve verticalmente, el término $(-2\boldsymbol{\omega}_r \wedge \mathbf{v})$ de la aceleración es nulo, y no produce ningún efecto en el movimiento. Sin embargo, el término $(-2\boldsymbol{\omega}_h \wedge \mathbf{v})$ de la aceleración es perpendicular a la velocidad \mathbf{V} y en la dirección del meridiano e implica una desviación lateral de su trayectoria vertical, hacia el Este si baja, y hacia el Oeste si sube.

3- Efectos concretos más importantes. Deducción de las de las leyes que los rigen

A continuación se describen los principales efectos que la aceleración de Coriolis produce en cuerpos que se mueven en las inmediaciones de la superficie terrestre. Partiendo de la expresión general de la aceleración adicional, $\mathbf{a} = -\mathbf{a}_c = (-2\boldsymbol{\omega}_h \wedge \mathbf{v}) + (-2\boldsymbol{\omega}_r \wedge \mathbf{v})$, se deduce en cada caso la fórmula que permite hallar la magnitud del efecto según sea la velocidad y las condiciones en que se produce, y los casos particulares para los que el efecto es máximo o nulo. El desarrollo detallado que conduce a la obtención de estas fórmulas se puede ver en el trabajo original. Los efectos concretos analizados y las fórmulas obtenidas se muestran en el siguiente cuadro:

Dirección de la velocidad \mathbf{v}	Componente de la \mathbf{a}_c	Efecto general observado	Algunos efectos particulares	Fórmula que describe el efecto
Horizontal	$-2\boldsymbol{\omega}_h \wedge \mathbf{v}$	Incremento de la gravedad efectiva: - Aumento si va hacia el W y disminución si va hacia el E. - Máximo en la dirección del paralelo ($\alpha=90^\circ$) y nulo en la del meridiano ($\alpha=0^\circ$). - Máximo en el ecuador y nulo en los polos.	Variación aparente Δg de la aceleración de la gravedad y del peso	$\Delta g = \pm 2\omega \cos \lambda \sin \alpha$ $\Delta P = m \Delta g$
	$-2\boldsymbol{\omega}_r \wedge \mathbf{v}$	Desviación lateral: - A la derecha en el hemisferio N y a la izquierda en el S. - Independiente de la dirección. - Máxima en los polos y nula en el ecuador.	Desviación lateral x de un movimiento uniforme horizontal	$x = \omega t^2 \sin \lambda$
			Desviación $\Delta \theta$ del plano de oscilación de un péndulo simple de periodo T y amplitud A	$x = \omega T A \sin \lambda$ $\Delta \theta = \omega t \sin \lambda$
Vertical (radial)	$-2\boldsymbol{\omega}_h \wedge \mathbf{v}$	Desviación lateral: - al W si sube y al E si baja. - Máxima en el ecuador y nula en los polos.	Rotación de los ciclones	L en hemisferio N D en hemisferio S
			Desviación lateral x de un movimiento uniforme vertical	$x = \omega t^2 \cos \lambda$
			Desviación lateral x al Este en una caída libre desde altura h	$x = 2/3 \cdot \omega \cos \lambda (2h^3/g)^{1/2}$

4- Ejemplos de predicción de efectos de Coriolis

A continuación se presentan algunos ejemplos de predicción de varios efectos de la aceleración de Coriolis en el movimiento de cuerpos en la superficie terrestre. Las predicciones se han hecho con una hoja de cálculo EXCEL preparada para este proyecto con las ecuaciones teóricas deducidas anteriormente, y los valores de las magnitudes relacionadas, que también fueron calculadas. Los ejemplos se muestran en el mismo formato en el que se presenta la hoja.

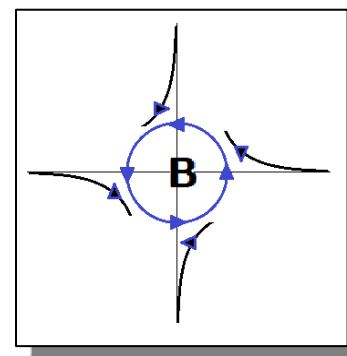
Ejemplo 1: Desviación de un disparo de fusil en un blanco a 100 m. El efecto es que se desviaría poco más de 1 mm a la derecha.

Ejemplo 2: Desviación de una bolita de acero en caída libre desde lo alto de la torre Eiffel de 300 m. Se desviaría unos 7,5 cm al Este de la vertical.

Movimiento del cuerpo:	Movimiento con velocidad horizontal constante	
Efecto observado:	Desviación lateral hacia derecha o izquierda	
Causa (aceleración):	$2 \omega_r \times v_h$	
Ley:	$x = \omega v t^2 \text{sen} \lambda$	
Datos:	Latitud (+ en N, - en S)	$\lambda = 42^\circ$
	Velocidad horizontal	$v_h = 400 \text{ m/s}$
	Tiempo en movimiento	$t = 0,25 \text{ s}$
Resultado:	Desviación lateral	$x = 0,0012 \text{ metros a derecha}$

Movimiento del cuerpo:	Caída libre vertical	
Efecto observado:	Desviación lateral en dirección del paralelo	
Causa (aceleración):	$2 \omega_h \times v_v$	
Ley:	$x = 2/3 \cdot \omega \cos \lambda (2h^3/g)^{1/2}$	
Datos:	Latitud (+ en N, - en S)	$\lambda = 49^\circ$
	Altura de caída	$h = 300 \text{ m}$
Resultado:	Desviación lateral	$x = 0,0749 \text{ metros al Este}$

A medida que se van haciendo estos cálculos, se hace evidente que los efectos de la aceleración de Coriolis terrestre son insignificantes para movimientos de poca trayectoria y corta duración, pero pueden llegar a ser muy significativos cuando se trata de movimientos continuos y prolongados. Así, una bala de fusil apenas se desvía, pero un disparo de obús de 8 km de alcance ya se desvía unos 5 m; y las masas de aire empujadas hacia un centro de bajas presiones desde mil kilómetros de distancia, se desviarán lo suficiente como para originar unos vientos permanentes como los alisios o un ciclón cuyo sentido de giro queda determinado por el signo de su latitud.



Formación de un ciclón en el hemisferio Norte por el efecto de desviación lateral



Huracán Irene en hemisferio Norte, giro antihorario



Ciclón Yasi en hemisferio Sur, giro horario

“LOS MITOS DE CORIOLIS”

Se han citado algunos fenómenos y anomalías en movimientos sobre la Tierra en los que la aceleración de Coriolis es su causa evidente. Sin embargo, pese a lo que afirman algunos, Coriolis no tiene la culpa de todo lo que aparece en la Tierra retorcido sobre sí mismo o desgastado asimétricamente. La dificultad para explicar algunas de estas observaciones y la tendencia a sobrevalorar la magnitud del efecto de Coriolis hacen que popularmente se le atribuyan más efectos de los que verdaderamente le corresponden.

Recurriendo tanto a simulaciones teóricas como a pruebas experimentales y documentales, se ha investigado la responsabilidad que pudiera tener la fuerza de Coriolis en los principales efectos que le son atribuidos tanto en ámbitos vulgares como científicos. Como resultado de ello se han confirmado algunas evidencias y se han desmontado algunos mitos.

Se ha confirmado el efecto de Coriolis, como era de esperar, en movimientos libres a gran escala, con largas distancias y tiempos prolongados, como es el caso de proyectiles, aviones, péndulos, y movimientos de grandes masas de fluidos como vientos, ciclones y corrientes marinas.

Las anomalías en los cauces de muchos ríos se explican atendiendo a otras causas que les afectan mucho más que lo que pudiera hacerlo la fuerza de Coriolis.

En otros fenómenos que popularmente son atribuidos a Coriolis, como el desgaste desigual de los zapatos o las vías del tren, la asimetría en los órganos de insectos voladores, o el sentido del arrollamiento helicoidal de las caracolas y algunos árboles y frutos; aparte de no haber podido encontrarse ninguna correlación entre el efecto y su presunta causa, la estimación teórica de ésta es tan insignificante que no merece la pena ser tenida en cuenta.

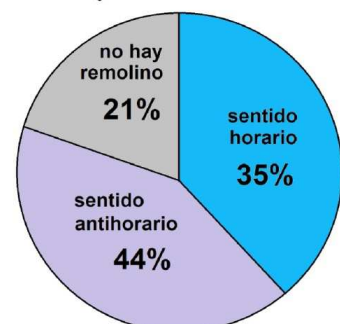
Mención aparte merece el caso de los remolinos que supuestamente giran para un lado u otro según el hemisferio en que se encuentren, que por su especial interés fue investigado en profundidad y se relata en capítulo aparte.

EL MITO DE LOS REMOLINOS EN LOS SUMIDEROS

Este tal vez sea el mito sobre el efecto Coriolis más arraigado no solo en la cultura popular sino también en medios científicos. Son muchos quienes afirman que el sentido de giro de los remolinos del agua en un desagüe lo provoca la aceleración de Coriolis del mismo modo que los ciclones, siendo siempre antihorario en el hemisferio norte y horario en el hemisferio sur. Vamos a comprobar que en este caso la aceleración de Coriolis es totalmente despreciable en comparación con otras variables como el movimiento residual inicial del agua, la geometría del depósito o las irregularidades del tubo de desagüe. Para verificar este hecho, este equipo llevó a cabo una serie de experiencias que se relatan a continuación, y finalmente comprobó, que los remolinos se distribuyen aleatoriamente en uno u otro sentido, si es que aparecen.

Experiencias realizadas para comprobar el supuesto efecto de Coriolis en el sentido de giro del remolino de un sumidero

1. Investigación experimental del sentido de giro del torbellino de los sumideros



Para investigar si la aceleración de Coriolis es la responsable de forzar un sentido de giro determinado de los remolinos del agua en los sumideros, unos 40 voluntarios realizaron un total de 143 experiencias, en 62 sumideros diferentes, anotando si el giro era en sentido horario, antihorario o inapreciable. Como se ve en el gráfico, los resultados obtenidos demuestran que la idea arraigada de que cualquier torbellino del hemisferio Norte tiene que ser antihorario es totalmente falsa.

2. Estimación teórica del efecto de Coriolis

Se podría estimar para partícula de agua en una pileta que se vacía por un sumidero, que recorre horizontalmente unos 20 cm hacia el centro en un tiempo de unos 20 s. La ecuación que nos da la desviación lateral debida al efecto Coriolis arroja un resultado de 0,0002 m a la derecha, desviación que es aparentemente despreciable, pero tal vez no tanto si millones de partículas de agua estuviesen haciendo exactamente lo mismo al mismo tiempo (la teoría cinética de la materia ya nos dice que esto no es así). De todos modos, para despejar la duda de si este pequeñísimo efecto de Coriolis pudiera influir algo en el sentido de giro del torbellino, se planteó una experiencia complementaria con un sumidero ideal.

3. Ensayo del desagüe de un sumidero en condiciones ideales.

Nuestro “sumidero ideal” se diseñó de tal manera que quedasen anuladas las influencias de la geometría del depósito, del movimiento inicial del agua y del sesgo del observador. El resultado fue que de cinco experiencias, con varios diámetros del orificio de salida y de uno a 8 minutos de desagüe, no se observó la aparición de torbellino en ningún caso. De esto se puede inducir que el efecto de Coriolis es indetectable a esta escala e insuficiente para forzar la aparición del torbellino o para determinar su sentido de giro, por lo que la pequeña diferencia del 9% observada en el experimento anterior a favor de los sentidos de giro antihorarios no puede ser causada por la fuerza de Coriolis.

4. Conclusión final

Un análisis más fino de los resultados obtenidos, agrupándolos por sumideros en los que se habían hecho tres o más experiencias, mostró que el 70% de los sumideros mostraban una tendencia clara a repetir el resultado tanto en uno como en otro sentido (30% en sentido horario y 40% antihorario), lo que hace pensar que eran las condiciones del binomio sumidero-experimentador quienes básicamente determinaban el resultado de cada experiencia.

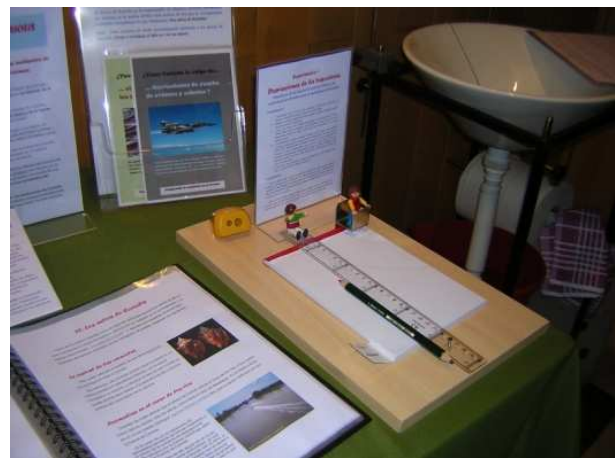
En conclusión, es falso que el sentido del torbellino de un sumidero sea siempre el mismo y que la aceleración de Coriolis tenga una influencia significativa. El resultado obtenido al vaciarlo es aleatorio o está condicionado por otros factores que tienen que ver con las circunstancias en que se realiza o se observa el vaciado.

EXPERIENCIAS Y MATERIALES ELABORADOS PARA EL PROYECTO

Con el objetivo no solo de investigar sino también de mostrar y explicar al público los diferentes aspectos relacionados con este tema, se elaboraron experiencias y materiales de todo tipo. Estos recursos, que se citan y describen brevemente a continuación, se mostrarán durante la exposición oral de esta comunicación.

- Trabajo de investigación: “La aceleración de Coriolis, mitos y evidencias”. Este trabajo incluye el desarrollo formal que permite calcular todos los efectos de Coriolis para movimientos sobre la Tierra, así como la investigación experimental que demuestra que el sentido de los remolinos no está determinado por Coriolis.

- Láminas de Información general: Carpeta con láminas divulgativas sobre diferentes aspectos de la fuerza de Coriolis y sus efectos.
- Calculador de efectos de Coriolis: Hoja de cálculo con la que se puede hallar el valor numérico de los distintos efectos de Coriolis en cualquier situación concreta.
- Vídeos: Selección de vídeos editados de uno o dos minutos de duración relacionados con el efecto Coriolis, dos de los cuales fueron realizados por el equipo.
- Juego de fichas: “¿Tiene Coriolis la culpa de esto?”: Donde se mezclan efectos verdaderos con algunos falsamente atribuidos a la fuerza de Coriolis. El objetivo es que el jugador los asigne correctamente.
- Experiencia:” Observa la fuerza de Coriolis” (chorros de agua en rotación): Montaje sencillo en el que por medio de dos chorros de agua giratorios muestra en qué consiste el efecto de Coriolis y que éste sólo aparece desde el punto de vista de un observador acelerado en rotación.
- Experiencia: “Desviaciones de la trayectoria” (simulación del efecto de desviación lateral): Una base con un bloc giratorio, lápiz y regla permiten comprobar la desviación lateral de la trayectoria de un móvil que se mueva en línea recta hacia cualquier dirección.
- Experiencia: “¿Hacia donde gira el remolino?” : Montaje con un lavabo y desagüe en el que quien quiera puede observar y anotar hacia qué lado aparece el remolino. La estadística convence de que el sentido del remolino, si lo hay, está indeterminado, y que el efecto de Coriolis es tan insignificante que no puede influir en el resultado.



Fotos:

Arriba: Stand preparado para mostrar el proyecto en la exposición de Divulgaciencia, y detalle de la mesa con algunos de los materiales y experiencias que se elaboraron.

Abajo: Los alumnos del equipo accionando el montaje de los chorros en rotación y un detalle del mismo.



