RAM Revista del Aficionado a la Meteorología

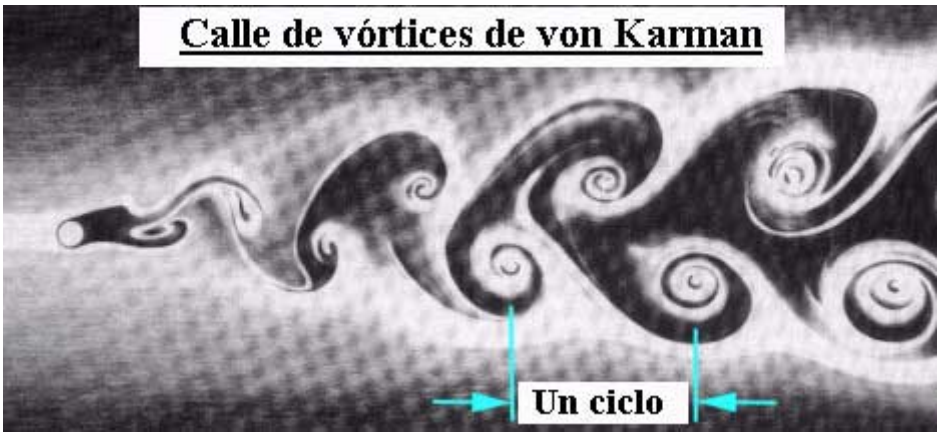
Nº 8- Febrero del 2003

Calle de remolinos o vórtices de von Karman

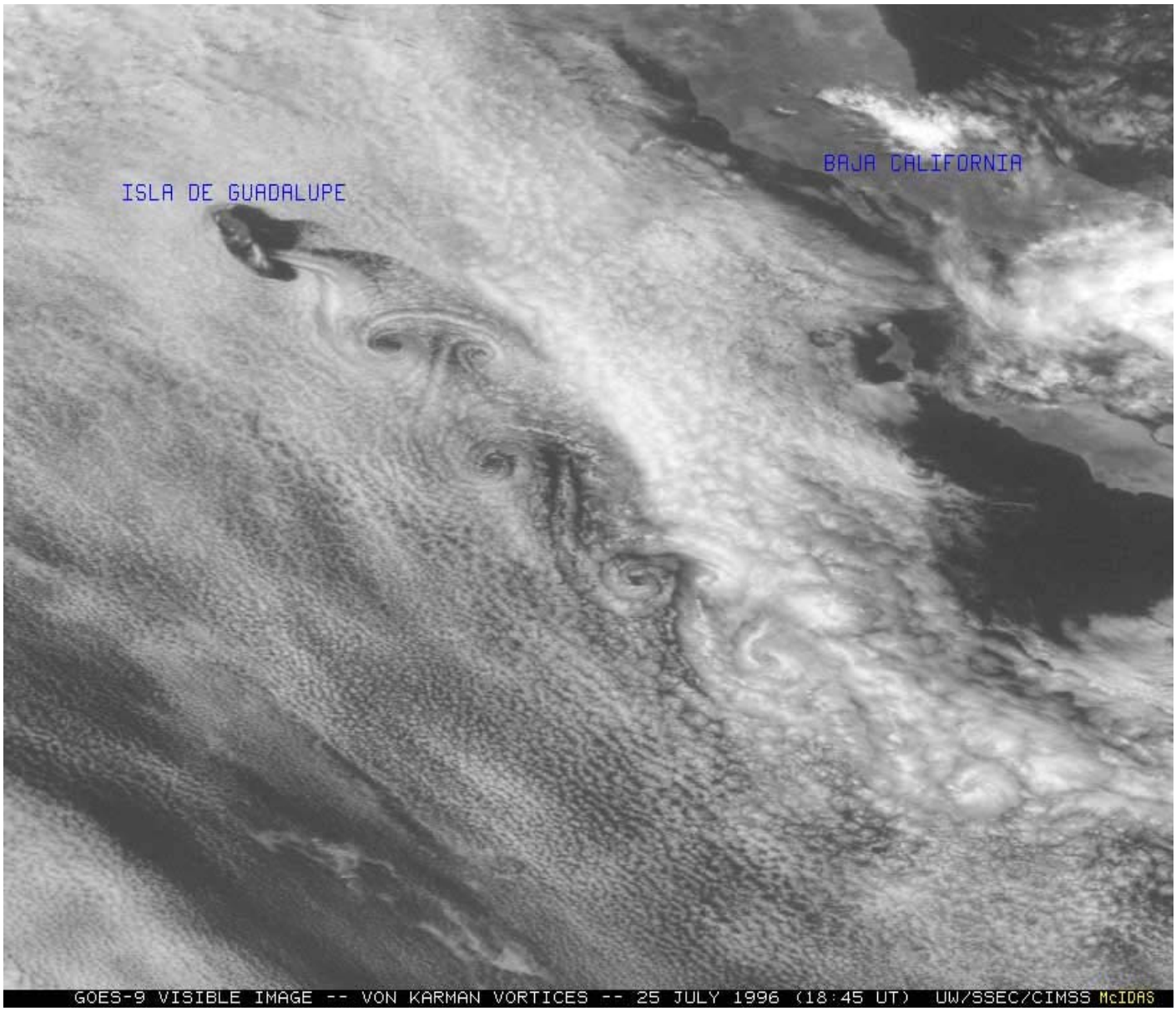
Fenómenos atmosféricos nubosos a sotavento de Islas (I - a)

RAM

Nota de la RAM. *Este trabajo nace a petición de un lector de la RAM. Con objeto de no hacerlo muy largo lo hemos dividido en varias partes. En la primera respondemos, parcialmente, a su pregunta. En la segunda parte (que saldrá en el próximo número de la RAM) hablaremos de otro tipo de fenomenología y daremos algunas explicaciones cualitativas más, sobre las calles de vórtices. Por la extensión el presente apartado es, a su vez, dividido en parte a y b.*



Calle de vórtices de von Karman generados en un tanque de laboratorio donde un fluido incide sobre un obstáculo cilíndrico, a la izquierda de la figura. El flujo va de izquierda a derecha



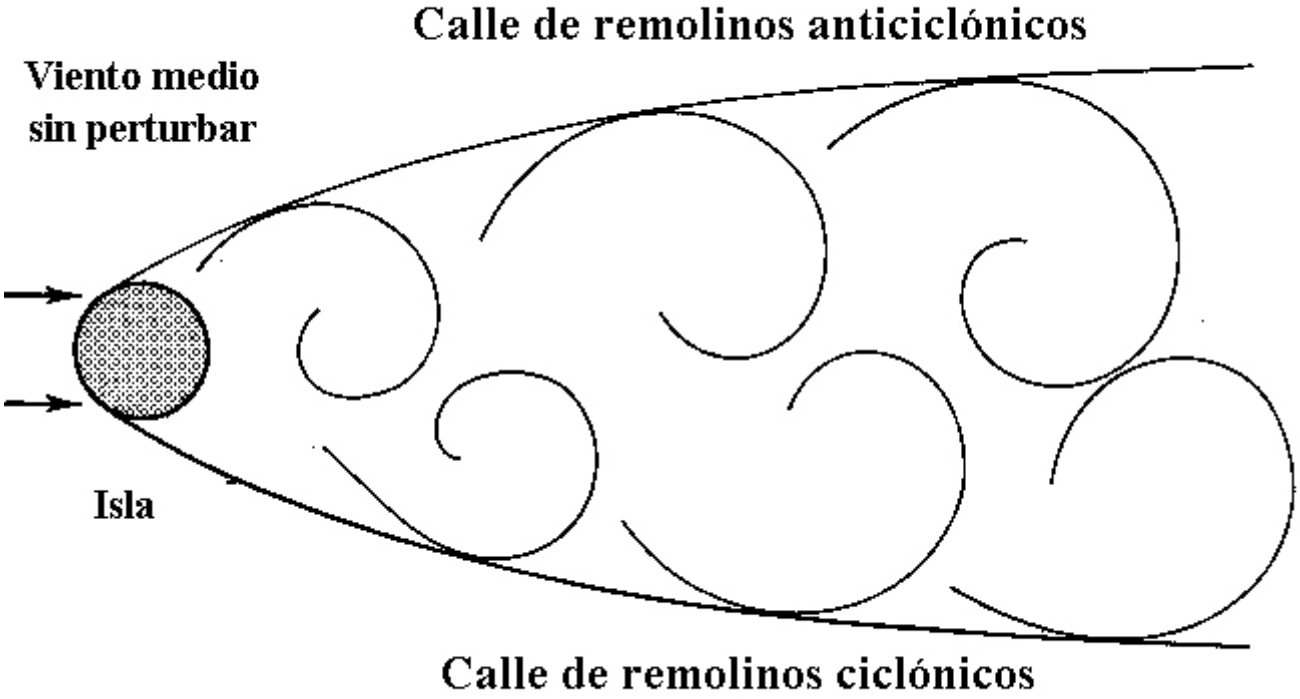
Calle de vórtices generados por al isla Guadalupe, frente a las costas californianas, tomada por el satélite GOES-W en el canal VIS. La capa de estratocúmulos se ve alterada por la isla. El flujo es de componente norte

Introducción

Una de las estructuras más llamativas que se observan en las imágenes de satélites en zonas marítimas subtropicales, entre otras zonas, son los remolinos de von Karman. Estas estructuras se generan cuando el flujo aéreo incide sobre un obstáculo orográfico, como puede ser una isla. En determinadas condiciones atmosféricas se forman una familia de vórtices ciclónicos y anticiclónicos a sotavento del obstáculo, extendiéndose hasta varios cientos de km corriente abajo del obstáculo. Estos vórtices no recuerdan a la estructura nubosa en la que están embebidos, normalmente estratocúmulos. A medida que nos alejamos del obstáculo, los vórtices crecen en dimensión espacial a la vez que se disipan o debilitan, hasta desaparecer. En determinadas ocasiones los remolinos situados en las dos líneas o calles contrarias pueden interaccionar entre ellos. Otras veces, los vórtices no se hacen aparentes a nuestra vista, por ausencia de nubes o por entorno muy seco, pero existen como perturbaciones del campo de viento.

La presencia de obstáculos orográficos, sobre todo islas pequeñas y elevadas, puede generar otras estructuras nubosas que nada tienen que ver con estas calles de vórtices. Los analizaremos el próximo mes.

La presencia de remolinos de Von Karman se aprecia en muchos fluidos donde el obstáculo inmóvil se opone pasivamente al flujo que incide sobre él. Se han detectado vórtices de este tipo en las propias zonas marinas a sotavento de islas.



Modelo conceptual de familia de vórtices de von Karman generados en un fluido bajos unas condiciones dadas al obstaculizar su movimiento por una isla en forma de cilindro

Algunos autores se refieren a las calles de vórtices de von Karman que se generan en la atmósfera como calles de vórtices o remolinos atmosféricos. Nosotros hemos mantenido la primera denominación en honor a la persona que explicó y formuló su existencia. De hecho es la más conocida y popular.

Antecedentes históricos: perspectiva atmosférica

La estructura de calles de vórtices era ya conocida a principios del siglo XIX. Stroubal fue el primero que la describió en 1878. Von Karman, en 1911, explicó y formuló matemáticamente el desarrollo y amplificación de tales estructuras, a las que se la había dedicado gran cantidad de tiempo y estudios. El trabajo de von Karman llevó a los científicos a bautizar las calles de remolinos con su nombre. Hay que hacer notar que los trabajos de Karman se llevaron a cabo en el laboratorio, utilizando cilindros colocados en fluidos que incidían sobre dicho obstáculo.

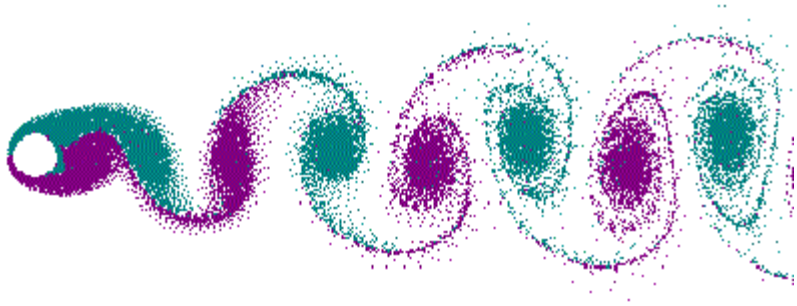
Ciertos científicos sugirieron la posible existencia de dichos remolinos en la atmósfera y los océanos (1934) pero los métodos y herramientas de observación no eran las mejores para identificarlos en aquella época. No fue hasta 1962 cuando Hubert y Kruger, observaron dichos vórtices a sotavento de las islas mediante imágenes de satélites.

Chopra y Hubert (1964,1965) realizaron estudios utilizando los satélites polares TIROS-VI de dichas estructuras generadas en las cercanías de las Islas de Madeira: las estructuras observadas recordaban la forma y generación de los vórtices alineados de von Karman. Analizaron las características, periodos, amplitud, desplazamiento,... Ellos observaron que los vórtices generados detrás de las islas en forma de estelas no se mezclaban con el flujo aéreo que le rodeaba y que la transferencia de momentum o disipación de energía de esta estela de vórtices y el flujo básico de fondo era mínima. La consecuencia era inmediata: los vórtices agrupados en calles tenían una vida relativamente larga y persistían durante mucho tiempo. Chopra y Hubert (1965) también observaron que el tamaño de los remolinos se incrementaba con el tiempo y corriente abajo, mientras que la intensidad en su zona central decrecía. Con el tiempo los vórtices opuestos en giro interaccionaban corriente abajo del obstáculo, momento en que las calles de vórtices se destruían a si misma.

Pronto se demostró que las teorías originarias de von Karman podían explicar la presencia de dichas estructuras.

La llegada de los satélites geostacionarios puso de manifiesto la existencia más general de los vórtices y se pudo estudiar con mas detalle sus ciclos de vida.

La generación de estructuras a sotaventos de obstáculos sumergidos en fluidos es parte importante en la aerodinámica, atmósfera, oceonografía, etc.



Simulación por ordenador de vórtices de von Karman. El flujo que va de izquierda a derecha incide sobre un cilindro en blanco. Vórtices ciclónicos en magenta, anticiclónico en verde oscuro

Condiciones generales para su generación en la atmósfera: visión desde satélite

Von Karman, que no era meteorólogo, explicó físicamente porqué se forman dichos remolinos desde el punto de vista aerodinámico. En su época, no existían evidencias de estructuras nubosas que recordaban la forma de dichas perturbaciones. Fue con la llegada de los satélites meteorológicos cuando se comprobó su existencia. Nos centraremos en el caso de vórtices generados por islas en la baja troposfera, por razones obvias.

Cuando se analizan las imágenes de estas estructuras desde satélite se tiene que se forman, predominantemente, en zonas donde existen nubes de tipo estratocúmulos o cúmulos de escaso desarrollo vertical, zonas dominadas por anticiclones subtropicales (caso de las Canarias, Madeira,..). Esto conlleva gran estabilidad y la presencia de una fuerte inversión térmica sobre el tope de los estratocúmulos. Veamos y expliquemos estos hechos, cualitativamente.

Una capa de aire donde la temperatura se incrementa con la altura es llamada capa de inversión térmica. Se efecto es como la de una “tapadera” atmosférica. Esta capa es síntoma de estabilidad. En las zonas sometidas al influjo de los anticiclones subtropicales la subsidencia o descensos generalizados son muy comunes y generan estas capas o inversiones térmicas. El flujo aéreo, por debajo de dicho nivel o capa, se ve obligado a moverse horizontalmente y los movimientos verticales por debajo de ella son muy débiles permitiendo el desarrollo de nubes cumuliformes pero organizada en estratos.

Su una isla o montaña se sitúa en este flujo con las cimas por encima de dicha capa, el flujo aéreo, que se encuentra debajo de la inversión, se ve obligado a rodearla sin pasar sobre ella. En determinadas condiciones se pueden generar dichos vórtices, cuyas dimensiones son relativamente pequeñas si la comparamos con las de las borrascas o huracanes de tipo sinóptico. Estamos hablando de vórtices de tipo mesoescalar, con un tamaño del orden de decenas de kms.

El par de meso vórtices giran en sentido contrario y se generan en cada uno de los flancos de la isla. Para el hemisferio norte, y colocándonos detrás del obstáculo y cara al viento, el de la izquierda lo hace ciclónicamente y el de la derecha, anticiclónicamente. Si la capa donde se desarrollan posee nubosidad, por ejemplo estratocúmulos, los vórtices se hacen visible desde satélite.

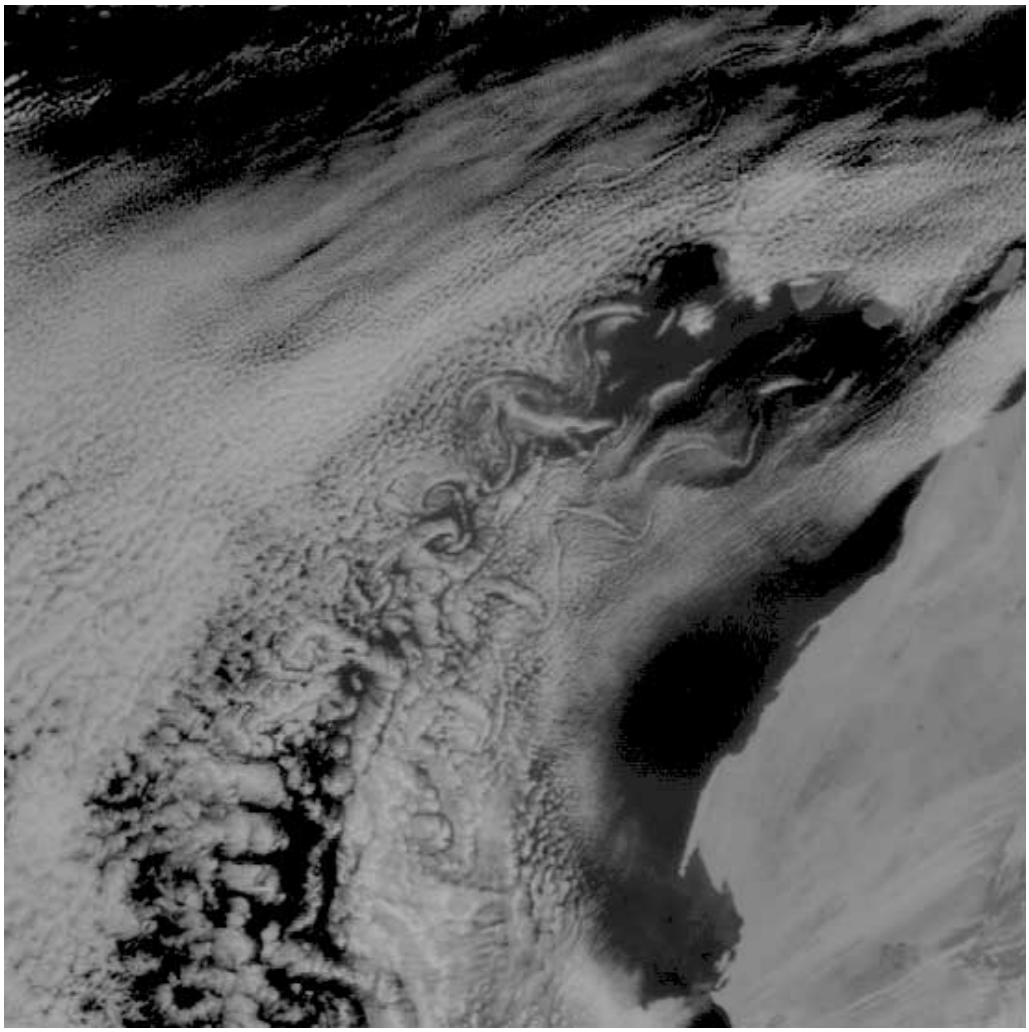
Las calles de vórtices de von Karman o atmosféricos no se generan siempre que existan condiciones de estabilidad, también depende de la intensidad del viento para su formación y de la altura del obstáculo. Si el viento en la capa estable es muy débil o intenso, los vórtices de calle no se formarán. Tampoco se forman cuando la inversión se rompe o desaparece, por ejemplo con la llegada de una onda en altura, borrasca, etc.. . Debe ser un régimen anticiclónico el que garantice su existencia. Hay que observar que si la altura de la inversión es superior al propio obstáculo o isla, el aire que incide sobre el sistema podrá ascender y superar la barrera, los vórtices desaparecen o se atenúan rápidamente.

Se han analizado las condiciones de formación y se ha observado que se debe cumplir unas condiciones determinadas. Lógicamente debe existir un obstáculo orográfico, :

- Presencia de una inversión en capas bajas
- La altura de la inversión respecto a la altura del obstáculo/isla debe ser tal que impida que el flujo aéreo de debajo de la inversión sobrevuele el obstáculo, obligándole a rodearlo.
- El viento debe ser estacionario y superior a 10 m/s, pero no muy intenso
- Las isobaras debe ser mas o menos rectas sobre una amplia zona.

Un par de vórtices se pueden crear en periodos del orden de horas, y pueden tener una duración o ciclo de vida de hasta 30 horas. Todos los vórtices en una calle tienen la misma circulación y opuesta a la otra línea o calle de remolinos. Estos remolinos se espacian corriente abajo en dos zonas alineadas o calles.

Los centros de cada vórtice se encuentra sobre dichas calles como muestra la figura adjunta. Islas aisladas o conjunto de islas orientadas perpendicularmente al flujo aéreo tienden a generar estructuras mejor definidas que aquellas alineadas en dirección al flujo. Un caso típico es el de las Islas Canarias.



Calles y familia de vórtices de von Karman generadas por algunas de las islas Canarias por los vientos aliseos. La capa de estratocúmulos se rompe por las islas. Foto VIS del satélite Meteosat, del 4 de Abril del 2001 a mediodía. (*)

Estrictamente, los remolinos de von Karman son fenómenos que se desarrolla dentro de la capa límite planetaria. Las ondas generadas pueden tener hasta 50 km de longitud de onda y quedan atrapadas en la capa estable baja y apenas se disipan por viscosidad. La anchura de la isla obstáculo es la que determina el espaciado de los remolino. El ahondamiento de la superficie del centro de rotación de los remolinos evapora la delgada capa de las nubes que se encuentra en su centro, apareciendo sin nubes, a la vez que decrece en tamaño al disminuir la rotación corriente abajo.

Aunque los remolinos de von Karman se dan con mucha frecuencia en las zonas marítimas subtropicales, se han observado también por los satélites polares en zonas de latitudes altas.

Imagen de la isla de Jan Mayen, situada entre Islandia y Groenlandia, generando remolinos para un viento de componente norte en latitudes altas. Foto NOAA

Los satélites medioambientales y naves espaciales nos ponen de manifiesto la existencia de dichas estructuras con sus sistemas nubosos asociados. Al ser un fenómeno de capas bajas es recomendable utilizar los canales visibles. Los canales IR también nos ponen de manifiesto dicha existencia ya que las nubes dan tonalidades blanquecinas sobre los mares y océanos más cálidos.

Deberemos buscar, preferentemente, zonas con obstáculos orográficos significativos o islas en zonas subtropicales donde los vientos aliseos lleven asociados capas de nubes bajas (estratocúmulos, preferentemente) y tengamos la seguridad de la existencia de una inversión que quede por debajo de las cimas. Islas de poco relieve que queden por debajo de la inversión daría otro tipo de estructura turbulenta sotavento.

Los lugares más comunes donde se observan dichas calles de vórtices suelen ser las Islas Canarias Madeira, Cabo Verde, Guadalupe y Socorro (al oeste de la Baja California en el oceano Pacifico) , entre otros lugares. En el Atlántico norte, la isla de Jan Mayen (con alturas de 2.277 m) es otra candidata a generar calles de remolinos, como vimos antes y las Aleutianas en Alaska.

Los remolinos no suelen romper la capa de inversión donde se generan, tan solo modifican el campo nuboso, el campo de viento no perturbado donde se generó. Por todo ello, y desde el punto de vista atmosférico, constituyen una singularidad muy llamativa al observarlos desde satélites

Vórtices de von Karman en el flujo marítimo

De nuevo, las islas constituyen un obstáculo para el flujo de agua que se genera por las corrientes marinas y corrientes de marea. En determinadas condiciones se pueden ver perturbaciones en el flujo marino que recuerdan a los vórtices atmosféricos de nubes. Las condiciones de formación son similares pero su visualización y estudio es más difícil: se requieren satélites de alta resolución espacial, sensibles a la superficie marina o que el mismo flujo acuoso lleve partículas o materia en suspensión.

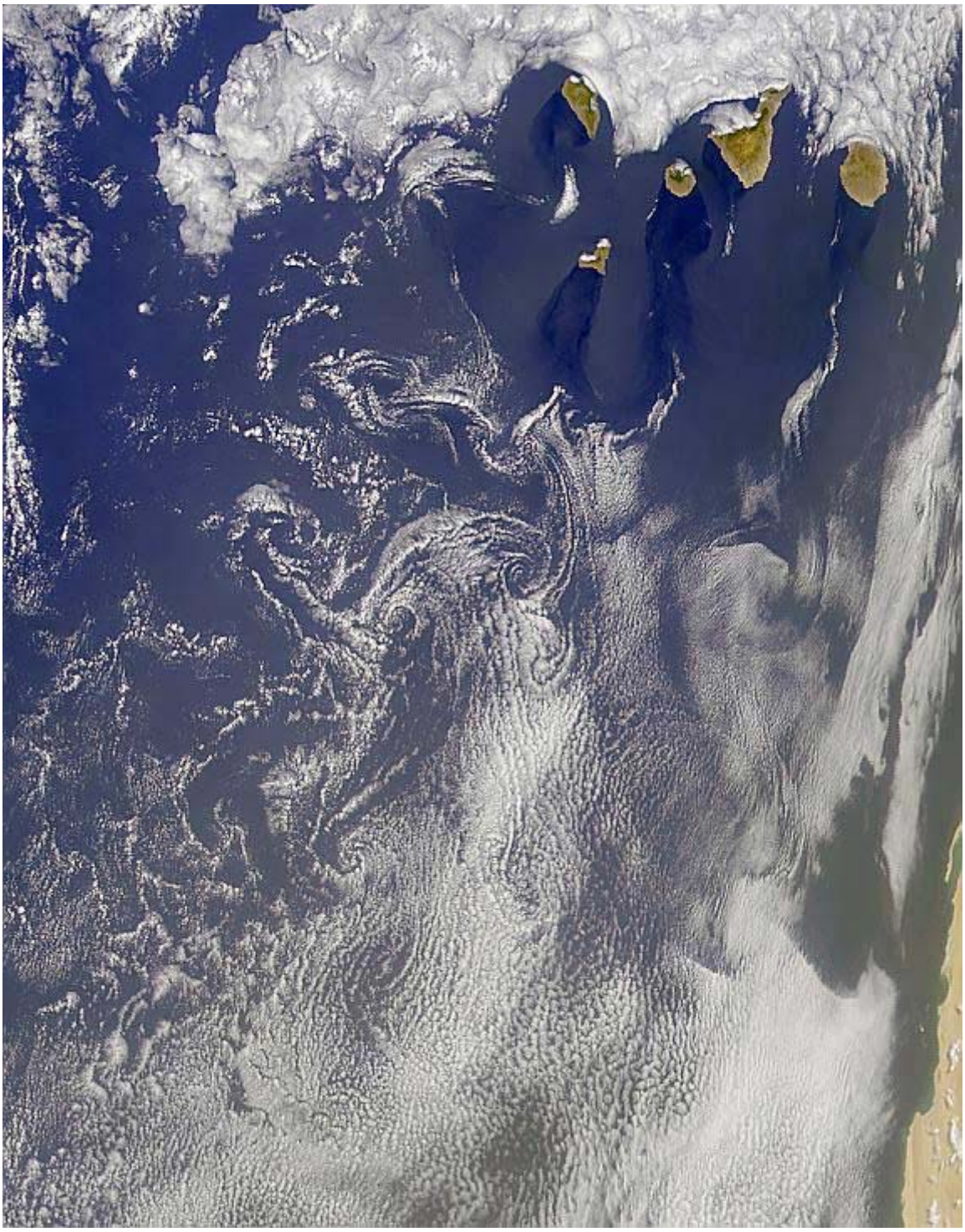


Imagen del SeaWiFS sobrevolando las islas Canarias en situación de remolinos de von Karman

En la imagen superior podemos ver las perturbaciones nubosas que estamos comentando, más las singularidades equivalentes que producen las islas en el flujo marino superficial. Las zonas marítimas a sotavento de las islas muestran trazas de ondulaciones.

Fotos aéreas de pequeñas islas también nos revelan los mismos hechos, como en el siguiente ejemplo.

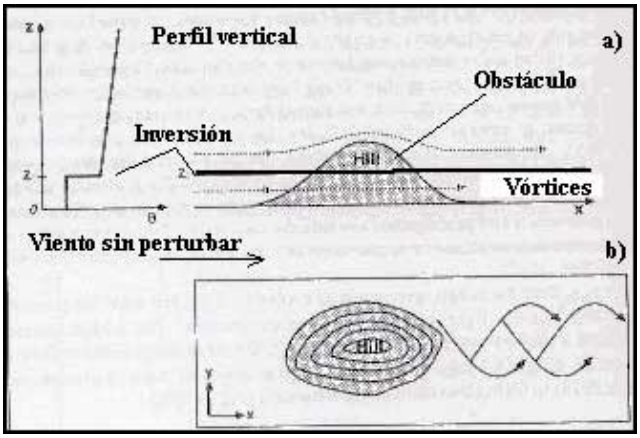
Remolinos de von Karman generados en el lago Eyre de Australia a sotavento de pequeñas islas. Vista aérea

Estos hechos son fundamentales a la hora de realizar ciertas actividades marinas. En algunos lugares, los peces se concentran allí donde existen afloramientos de material orgánico alimenticio generados por los remolinos acuosos. Otras veces los vertidos marítimos deben tener en cuenta la existencia de obstáculos cercanos para no generar concentraciones indeseadas de materia en suspensión.

Debemos hacer notar que estos remolinos deben generarse en islas separadas de la costa y donde la profundidad sea significativa con objeto de evitar la presencia de otras perturbaciones ondulatorias de distinto origen.

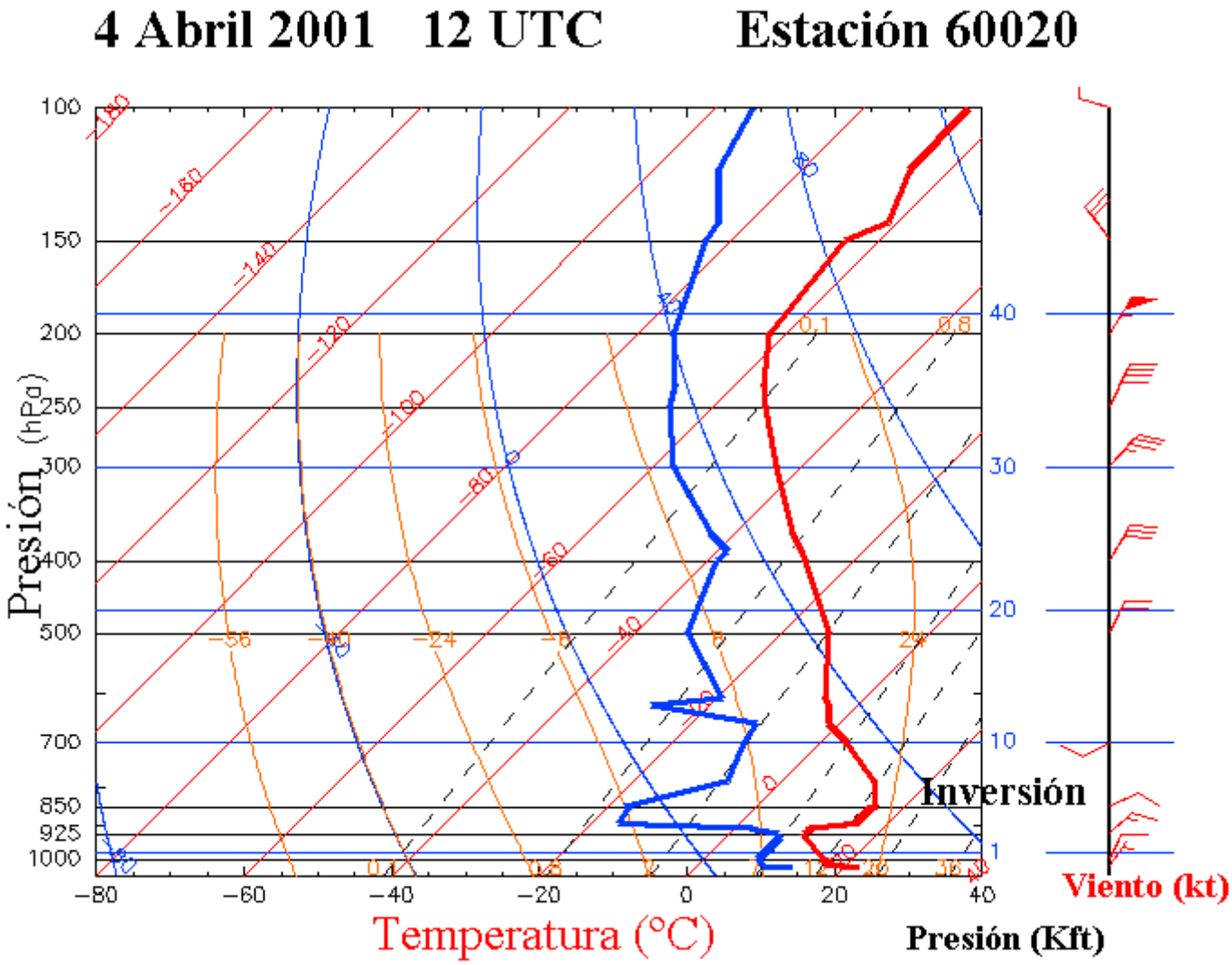
Algunas otras consideraciones

Tomaremos las siguientes figuras como referencia.



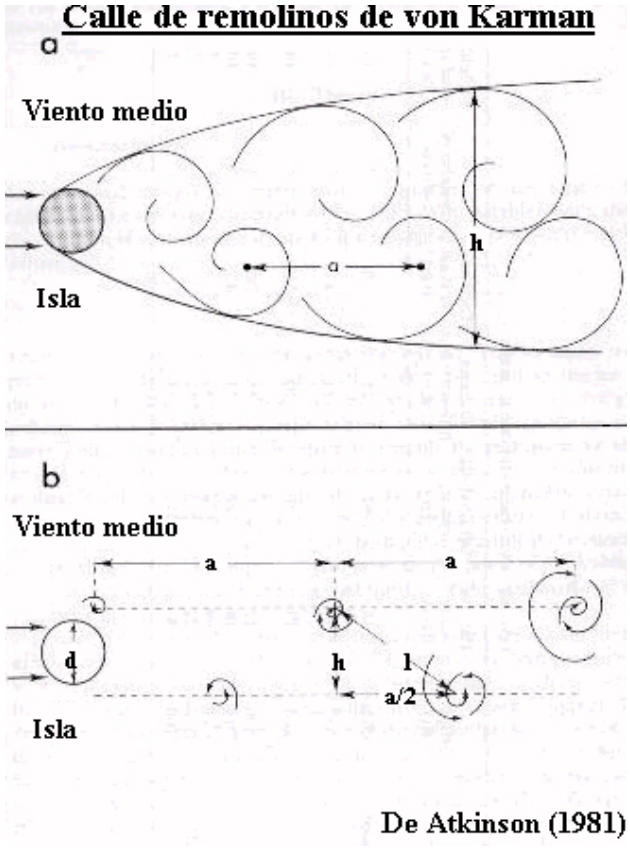
Corte vertical y vista horizontal de un obstáculo frente a un flujo del oeste. Ver texto para explicación

La imagen superior presentamos las condiciones básicas para la formación de remolinos de von Karman. La estabilidad se observa por la presencia de una inversión a una altura "z" (parte superior izquierda) donde la temperatura potencial no crece con la altura. Este perfil se podría sustituir por el perfil de temperatura y humedad dados por un sondeo convencional. Como siempre la altura de la inversión debe quedar por debajo del obstáculo, en este caso una colina. Obsérvese que el flujo por encima de la inversión no se mezcla con el inferior. Se puede demostrar que la capa inferior pegada al suelo o superficie marina se comporta como "un buen conductor o poco disipador" de las perturbaciones que quedan a sotavento del obstáculo (de ahí que el ciclo de vida sea tan significativo en estas estructuras).



Sondeo de S. C. de Tenerife del día 4 de Abril del 2001 de las 12 UTC, asociado a la imagen VIS del Meteosat, mostrada anteriormente, con calles de vórtices de von Karman y etiquetada como (*).

En la imagen superior podemos ver la inversión del aliseo en las Islas Canarias señalada en el sondeo. La fuerte inversión delimita una zona en capas bajas donde es posible la formación de calles de remolinos. El viento medio es de 10 kt del NE y en la capa por debajo de la inversión se pueden desarrollar débiles movimientos verticales que no romperán la inversión. Esta queda por debajo de la altura de la isla tinerfeña, elemento importante para que se desarrollen los vórtices.



Esquemas de la geometría de vórtices, generados por un obstáculo de diámetro "d". Figura tomada de Atkinson (1981)

Las pruebas de laboratorio demostraron que el cociente entre h/a era constante y del orden de 0.2805, para obstáculo cilíndrico. Cuando se realizan medidas reales la razón suele estar comprendida entre:

$0.28 < h/a < 0.52$

En las pruebas de laboratorio, la velocidad de propagación de los remolinos, Ve, corriente a bajo, es 0.85 del valor de la velocidad del fluido no perturbado, o sea, los vórtices se separan del obstáculo que lo generó a una velocidad inferior al la del flujo. El periodo de formación de vórtices, T, es a/Ve, y , por tanto la razón de desprendimiento de vórtices es 1/T.

En la realidad, los parámetros anteriores son del mismo orden pero dependen de la forma del obstáculo. Así se han determinado valores de velocidad de propagación del orden de 0.75 respecto al flujo no perturbado. Ver tablas adjuntas donde se muestran valores de casos de estudio particulares realizados en la Islas Canarias y Madeira:

Lugar	Altura (m)	Anchura efectiva (km)	Longitud de espaciamiento (km)	Distancia entre las calles(km)	Longitud de las calles (km)	Números de vórtices	Velocidad del flujo no perturbado m./s.
Tenerife	3720	40	122	48			7
Gran Canaria	1950	20	132	51			7
Madeira	1860	40	217	85			7

Lugar	h/a	Ve(m./s.)	Periodo de formación de vórtice(h)
Tenerife	0.39	5	6.8
Gran Canaria	0.39	5	7.3
Madeira	0.39	5	12.0

Tablas tomadas de Atkinson (1981)

Quién fue Von Karman.

No queremos terminar sin antes dar unas pinceladas de la persona a la que nos estamos refiriendo constantemente.

Todor (Theodore) von Kármán nació el 11 de mayo de 1881 en Budapest, Hungría. Fue ingeniero aeronáutico y profesor en diferentes escuelas y universidades. Fue en 1911 cuando él hizo un análisis detallado de la alternancia de vórtices alineados en dos fila o calles detrás de un cuerpo inmerso en un fluido.

Fotografía de T. Von Karman

En 1912 llegó a ser profesor y director del **Aeronautical Institute** de Aachen en Alemania a la edad de 31 años. Posteriormente, llegó a ser Director del Caltech's Guggenheim Aeronautical Laboratory en el periodo de 1930-1949. En EEUU, fue uno de los fundadores del prestigioso Jet Propulsion Laboratory. La formulación de los vórtices que hemos descrito aquí llevo a que fueran bautizados con su nombre. Muchos lo consideran un genio en el mundo de la Aeronáutica moderna.

Más información:

http://www.eumetsat.de/en/area5/special/vonkarman_04042001.html

Bibliografía de von Karman (en inglés).

http://www.aceflyer.com/karman/

Simulaciones de estructuras generadas por obstáculos en fluidos:

http://www2.icfd.co.jp/

Algunas figuras, tablas y referencias bibliográficas tomadas de:
- **Meso-scale atmospheric circulation**, 1981. Atkinson, B.A. Academic Press, 495 pp.

ram@meteored.com

© Meteored.com