

Formación del Viento y Tipos de Vientos.

El viento como muchos fenómenos terrestres está relacionado a sus movimientos planetarios: rotación y traslación. Por tanto, puede considerarse a la energía eólica como otra energía derivada de la interacción de la Tierra con el Sol.

El viento debe entenderse como ocasionado por fenómenos a nivel de gran escala y de pequeña escala. O sea, el viento en un determinado punto geográfico tiene origen tanto en los efectos planetarios como en las particularidades del sitio: características climáticas, orografía, influencia humana. Al analizar la bondad de un sitio eólico para su explotación se realiza un estudio de microescala, factor inherente al tamaño de la aplicación. Esto no impide, sin embargo, que los efectos de macroescala sean tomados en cuenta. De hecho, muchos softwares de cálculo eólico utilizan aproximaciones y traslaciones de efectos de gran escala para intentar predecir el viento en cierto lugar.

Primeros exploraremos la producción de viento a gran escala.

Como podemos fácilmente intuir, el movimiento de rotación de la Tierra también produce un movimiento sobre los elementos que se encuentran en ella: hidrósfera, atmósfera y litósfera. Aunque éste no es un movimiento totalmente uniforme, y depende de muchos factores, su periodo a escala humana puede considerarse constante. En el ecuador la velocidad de giro es aprox. 1.670 km/h. Esta velocidad disminuye según el coseno de la latitud. Así por ejemplo, en Nueva York, a una latitud de 40° Norte, es $1.670 \times \cos(40^\circ) = 1.279$ km/h.

Como curiosidad se puede mencionar que el terremoto producido en Chile en 2010 de 8,8 grados Richter, según estimaciones científicas de la NASA (Jet Propulsion Laboratory), habría causado que el día se redujera en 1,26 microsegundos y el eje se halla desplazado aprox. 8 cm. En el caso del terremoto de Japón de 2011, de magnitud 9,0 habría provocado una reducción de 1,8 microsegundos y un cambio en el eje de 17 cm. El caso de Sumatra de 9,1 grados en el año 2004, el efecto habría sido 6,8 microsegundos y un cambio de eje de 8 cm. Asimismo, cálculos científicos indican que con el embalse de la central hidroeléctrica china 'Tres Gargantas' (22.500 MW, 40 km³ de agua) lleno por completo, el día se ralentizará en 0,06 microsegundos, haciendo de la Tierra más redonda en el centro y más achatada en los polos. Todo esto finalmente debido al cambio en la distribución de masas, y consecuentemente en el momento de inercia. Cuanto más larga sea la distancia de una masa a su eje de rotación, más lento girará.

Derivación de la rotación de la Tierra son los movimientos de masas oceánicas y masas atmosféricas, como los resultados más perceptibles.

El efecto Coriolis [Gustave Coriolis, Francia (1792-1843)], es la descripción de la fuerza inercial que se produce sobre objetos en movimiento cuando se observan en un marco de referencia giratorio. Coriolis demostró que, si las leyes de movimiento de los cuerpos de Newton se aplican en un marco de referencia giratorio, una fuerza inercial - actuando a la derecha de la dirección del cuerpo en movimiento para una rotación en sentido antihorario al marco de referencia o a la izquierda para una rotación de las agujas del reloj - debe incluirse en las ecuaciones de movimiento.

El efecto de la fuerza de Coriolis es una desviación aparente de la trayectoria de un objeto que se mueve dentro de un sistema de coordenadas giratorio. El objeto en realidad no se desvía de su trayectoria, pero parece hacerlo a causa del movimiento del sistema de coordenadas.

Cuando un objeto se mueve en Tierra hacia el Hemisferio Norte, la trayectoria resulta curvada hacia la derecha respecto de la trayectoria inicial. Cuando se mueve en el Hemisferio Sur, la trayectoria se curva hacia la izquierda. Esto se debe a que la rotación terrestre es en sentido oeste a este.

Debido al efecto Coriolis (figura siguiente), los aviones pueden hacer correcciones de su curso, así como los patrones que siguen misiles o cohetes.

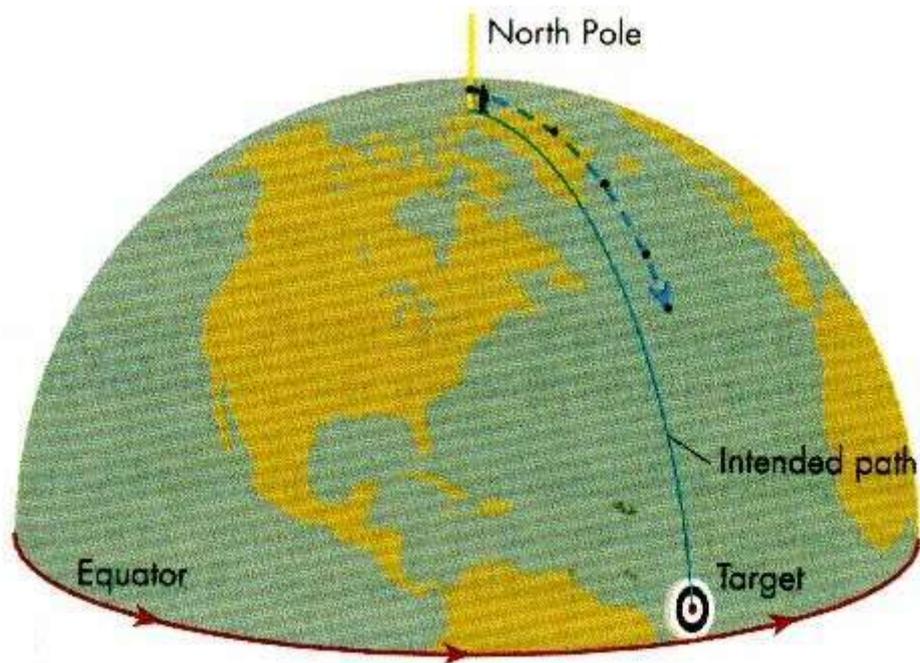
Hay que tener en cuenta que en el desplazamiento del objeto en movimiento no hay que considerar solamente la velocidad de giro del sistema de referencia, sino también, como en el caso de la Tierra, la latitud. La velocidad tangencial de un lugar sobre la superficie de la Tierra es función de la latitud. La velocidad es cero en los polos y de valor máximo en el ecuador. Por consiguiente, la desviación de Coriolis está relacionada con el movimiento del objeto, el movimiento de la Tierra y la latitud. Por esta razón, la magnitud del efecto viene dado por $\phi \cdot \text{seno}(2v\omega)$, en el que v es la velocidad del objeto, ω es la velocidad angular de la Tierra y ϕ es la latitud. Matemáticamente la fuerza de Coriolis se expresa:

$$F_c = -2m\vec{\omega} \times \vec{v}$$

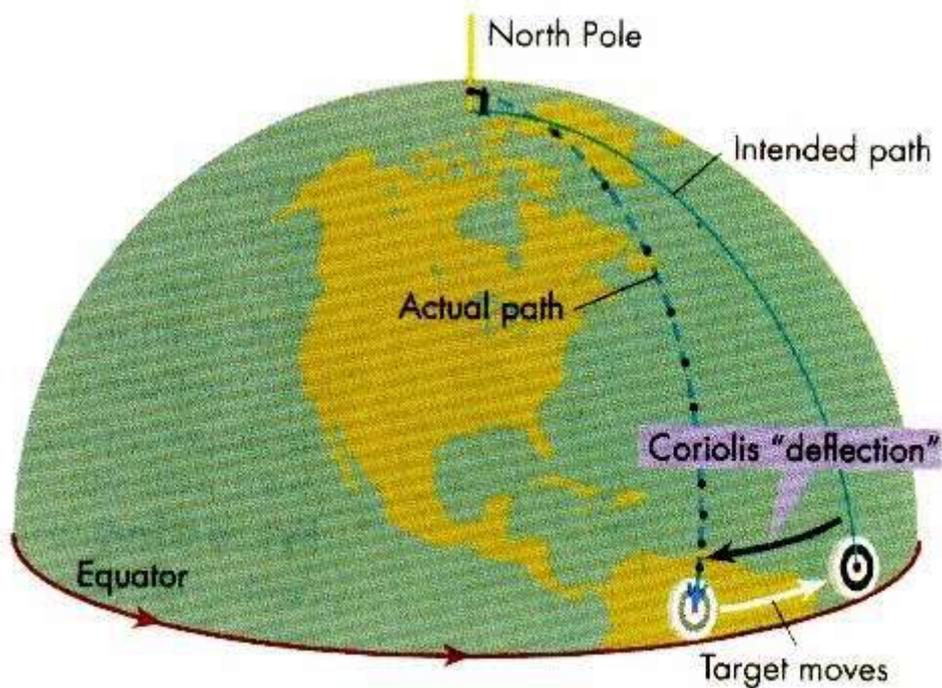
Donde

m es la masa del cuerpo, ω es el vector de velocidad angular del sistema de referencia, v es el vector de velocidad del cuerpo en el sistema rotatorio.

Téngase en cuenta que la fuerza de Coriolis se la llama a veces 'ficticia'. Esto se usa para explicar las aceleraciones observadas en un marco inercial, es decir en el sentido del cambio del sistema de coordenadas que se utiliza para la interpretación del fenómeno.



Tierra sin rotación



Tierra en rotación

Desviación por efecto Coriolis.

Como se ha visto, la rotación del planeta produce el movimiento de las masas de aire según el principio de Coriolis. Estos vientos a escala global o vientos planetarios sin embargo no son los únicos. Si no se consideraran otras fuerzas o fenómenos, y un objeto se moviera **con sujeción únicamente a la fuerza de Coriolis**, se podría formar lo que se llaman círculos inerciales. Véase la figura a continuación:

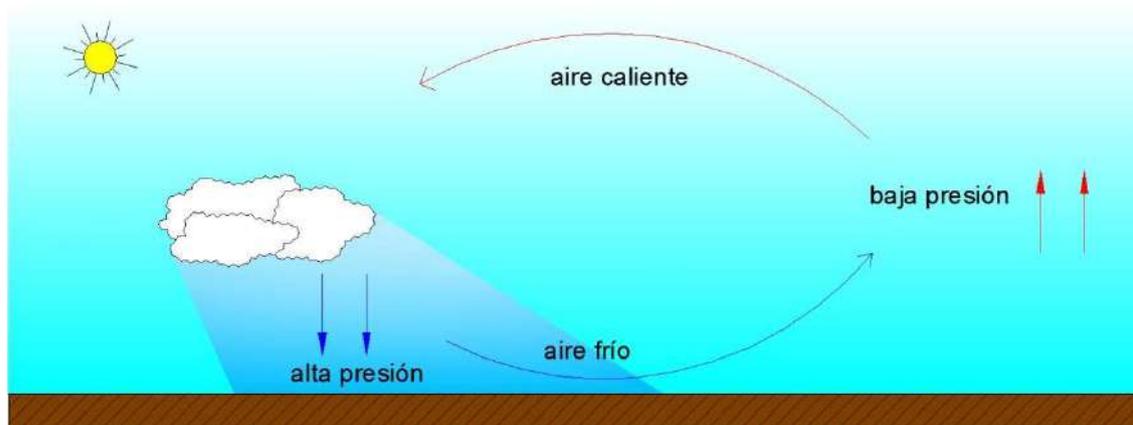


Círculos inerciales debidos al efecto Coriolis

La mayoría de los sistemas físicos son complejos, y son el resultado de la interacción de múltiples fuerzas. Por tanto, la generación de viento también se explica en otro fenómeno asociado al movimiento planetario: la traslación y la radiación solar. Las diferentes temperaturas que se alcanzan en la Tierra debido al movimiento de rotación (secuencia día/noche o variación diurna), también son influidas por la cercanía al Sol (variación estacional). La radiación solar puede producir variaciones típicas de 10 a 12 °C en el transcurso de un día y de hasta 40 °C entre estaciones, dependiendo de la latitud y factores como el tipo de superficie terrestre, pues los grados de albedo pueden ser muy distintos.

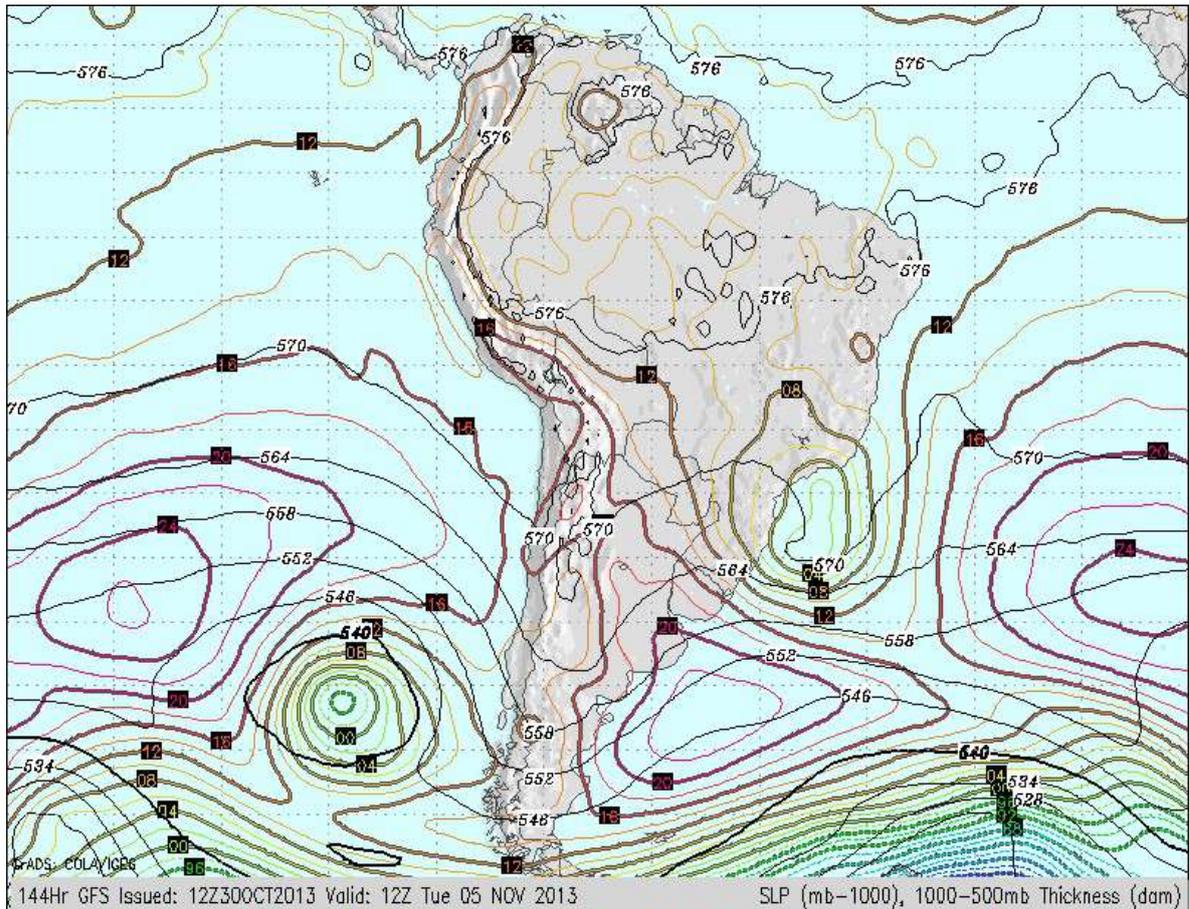
El calentamiento de la superficie del suelo, los cuerpos sobre su superficie, de las masas de aire, la diversa reflexividad, la variación diurna y estacional, la orografía, el rozamiento o fricción entre masas oceánicas y el aire, la gravedad que afecta al aire, la altitud, inducen la creación de presiones atmosféricas heterogéneas. Por tanto, habrá zonas con mayor presión atmosférica que otras, o un gradiente de presión. Asimismo, habrá zonas con mayor temperatura que otras, al igual que densidades de aire por la interdependencia antes formulada.

La influencia de la temperatura es especialmente apreciable a bajas alturas, en las cercanías con el suelo y los accidentes geográficos. El aire caliente, por su menor densidad, tenderá a moverse hacia arriba y el aire en una zona de alta presión atmosférica se inclinará a moverse hacia una zona de menor presión.



Flujo de aire de zona de alta presión a zona de menor presión.

En meteorología se suele utilizar mapas con isobaras, o sea líneas que unen puntos con iguales valores de densidad. (Ver figura siguiente). Alrededor de una zona de baja presión, las líneas se vuelven de forma circular aproximadamente. Si sólo existiera la fuerza de presión el aire se movería perpendicularmente a las zonas de isobaras, pasando de alta a baja presión. Cuando las distancias entre isobaras son pequeñas, el gradiente de presión es fuerte, y por tanto, las velocidades del viento son más altas.



Mapa isobárico de Sudamérica. Fuente: NCEP

Pero tanto la fuerza de Coriolis como la fuerza de la presión atmosférica existen simultáneamente. Cuando se produce un viento resultante del equilibrio entre la fuerza de Coriolis y del gradiente horizontal de la presión atmosférica, a éste se lo llama viento geostrófico. Cuando el equilibrio se produce entre fuerza de Coriolis, el gradiente de la presión y la fuerza centrípeta, se llama viento del gradiente.

Los **sistemas ciclónicos o depresiones** son zonas donde hay presiones bajas. Los ciclones, en su acepción como tormenta, son justamente puntos donde hay una muy baja presión atmosférica en la parte inferior, y una muy alta presión en la parte superior. Por el contrario, un **sistema anticiclónico** es una zona donde existen altas presiones atmosféricas. El hecho de que la fuerza de Coriolis es cero en el ecuador y muy débil cerca, explica por qué los ciclones tropicales, como los huracanes y tifones no se forman en el ecuador, aunque hay otros factores, como el agua caliente del océano, que podría provocarlos.

Los **vientos alisios** se denominan a los vientos que soplan con dirección y velocidad constante relativamente. Circulan desde zonas subtropicales (alrededor de los 30° de latitud sur o norte) hacia el ecuador. El efecto Coriolis hace que se desvíen en dirección noreste en el hemisferio norte y en dirección sureste en el hemisferio sur. Tienen su origen en el movimiento por cambio de presión.

Los **vientos contralisios** son aquellos que hacen el proceso inverso, es decir, se dirigen del ecuador hacia las zonas tórridas, afectados igualmente por el efecto Coriolis. Tienen su origen en el movimiento por cambio de temperatura.

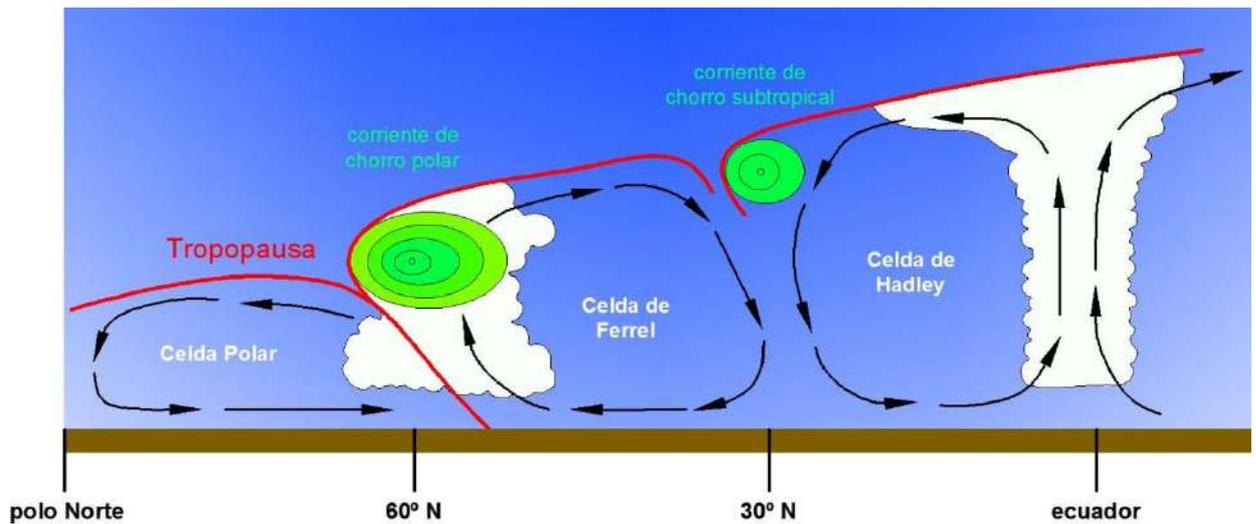
Los **vientos del oeste** o céfiros occidentales son aquellos que se forman en las regiones subtropicales y se dirigen hacia el norte hasta aproximadamente los 50 o 60 grados de latitud. Son producidos por el contraste de temperatura entre el ecuador y los polos. El aire caliente que está a una presión más alta tiende a moverse hacia los polos. Sin embargo, la fuerza de Coriolis cambia la dirección del flujo. Cuando se alcanza el equilibrio entre ambas fuerzas, se produce el viento con una importante componente hacia el oeste.

Los vientos de levante polar, **vientos del este polar** o vientos del frente polar son aquellos que se forman entre los 60 y 90 grados de latitud, o sea hasta llegar a los polos terrestres. Éstos se originan en las regiones más frías de los polos a una alta presión, dirigiéndose hacia las zonas donde terminan los vientos del oeste, a menor presión. Una vez más el efecto Coriolis provoca que los aires polares con rumbo a latitudes más bajas giren. Ya que se originan en la dirección este se conocen como vientos del este.

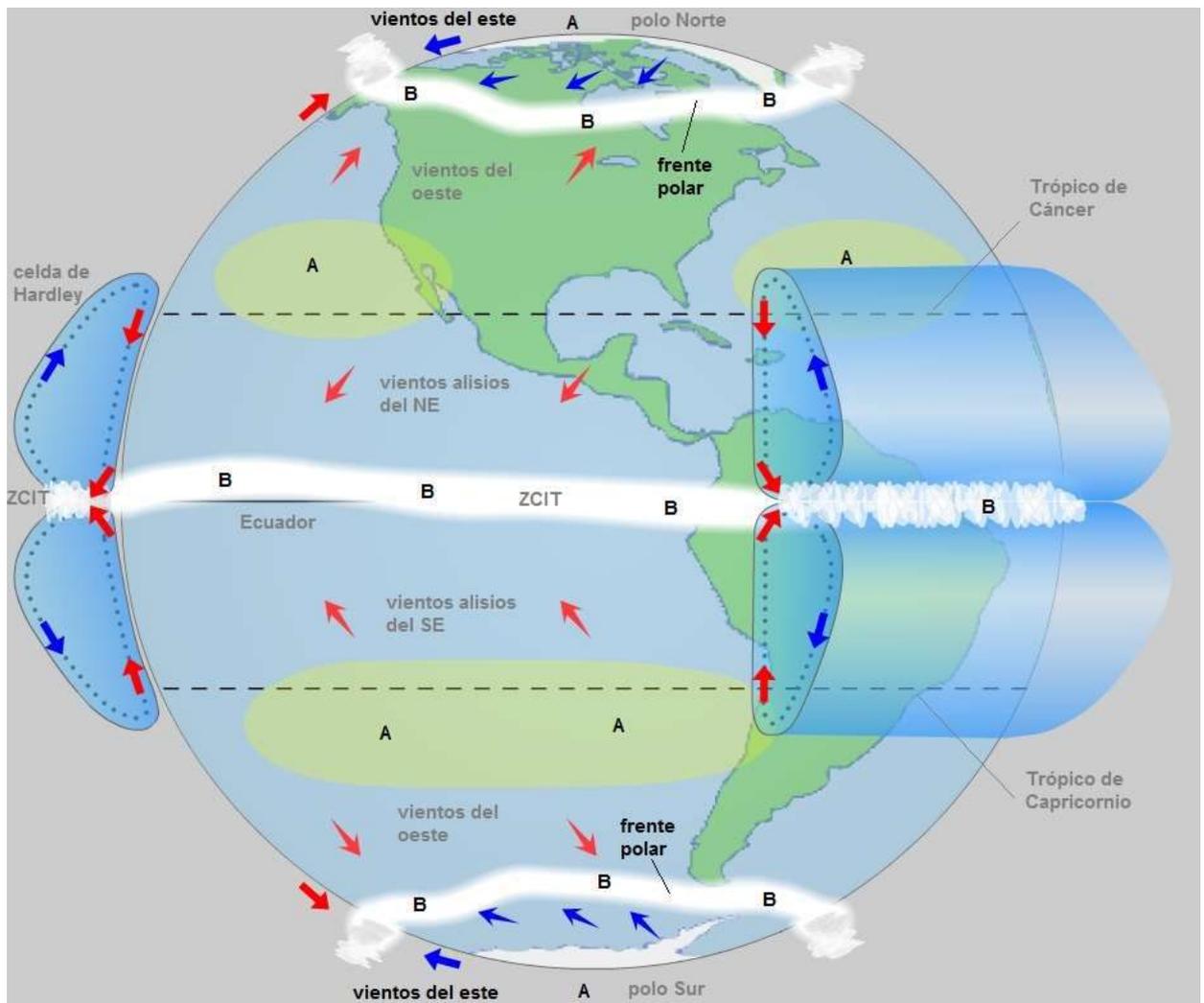
Finalmente se deben explicar las **corrientes en chorro** o jet stream. Éstas consisten en una fuerte y estrecha corriente de aire concentrada a lo largo de un eje casi horizontal en la alta troposfera o en la estratosfera, caracterizada por una fuerte cizalladura vertical y horizontal del viento. Se producen principalmente en la tropopausa. Se localizan en la región polar y subtropical. Como dato curioso, algunas aeronaves aprovechan estas corrientes (con velocidades de aprox. 120 km/h) para volar más rápido.

El flujo atmosférico terrestre en zonas cerradas descrito recientemente se resume definiendo tres celdas o regiones:

- La celda de Hadley.- la zona de circulación entre la zona ecuatorial y tropical
- La celda de Ferrel.- la zona de circulación entre la zona tropical y subtropical
- La celda Polar.- la zona de circulación entre la zona subtropical y la polar



Celdas atmosféricas. Fuente: National Weather Service (EE.UU.)



Vientos globales y celdas atmosféricas. ZCIT = zona de convergencia intertropical. A = zona de alta presión. B = zona de baja presión. Fuente: Prentice Hall Inc.

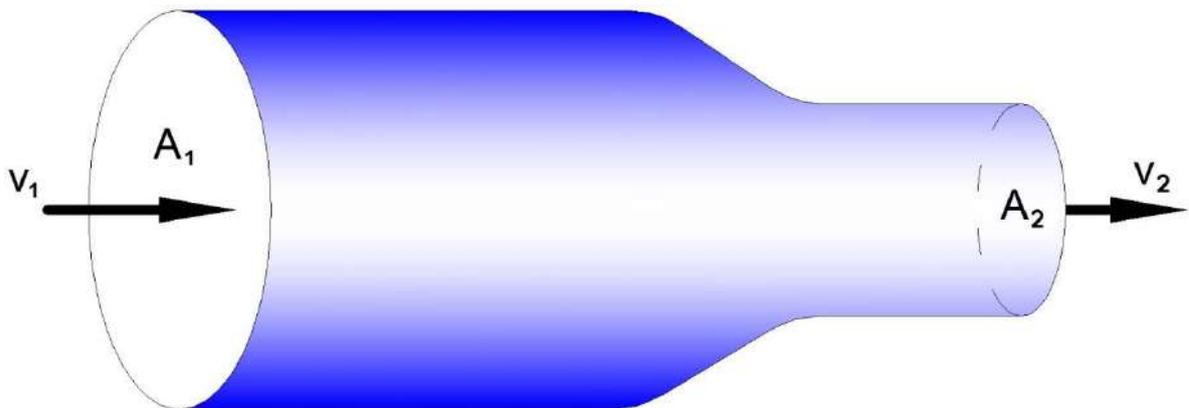
A escala más pequeña, son notorias por ejemplo en las zonas costeras, las brisas marinas, que se forman cuando durante el día el aire se calienta sobre el mar y asciende sobre la tierra que está más fría. A la inversa, durante la noche se produce un enfriamiento más rápido de la tierra, y una brisa terrestre desciende sobre el mar, es decir el aire frío recorre la pendiente descendente hacia el mar.

En las zonas de valles y montañas también se producen efectos locales, produciéndose constantes transferencias térmicas del aire entre la zona de valle y la zona de cumbre según sea la noche o el día, y por ello flujos de masas de aire. Los vientos anabáticos son los vientos húmedos y cálidos que ascienden en las zonas montañosas por la ladera. Los vientos catabáticos, en sentido contrario, son los vientos frescos y secos que descienden de la montaña.

Dentro los fenómenos que se producen a macro-escala y micro-escala están los efectos colina y los efectos túnel. Ambos son consecuencia de aplicar el principio de conservación al flujo de aire. Recordando la ecuación de continuidad:

$$A_1 v_1 = A_2 v_2$$

Vemos que la relación entre la velocidad y el área de la sección de un tubo de flujo imaginario (figura a continuación) por la que circula un fluido ideal (uniforme, incomprensible, flujo no viscoso, irrotacional) produce una constante. En otras palabras, si reducimos la sección por donde pasa el fluido la velocidad de éste aumentará.



Tubo imaginario de flujo para un fluido. Fuente: Elaboración propia.

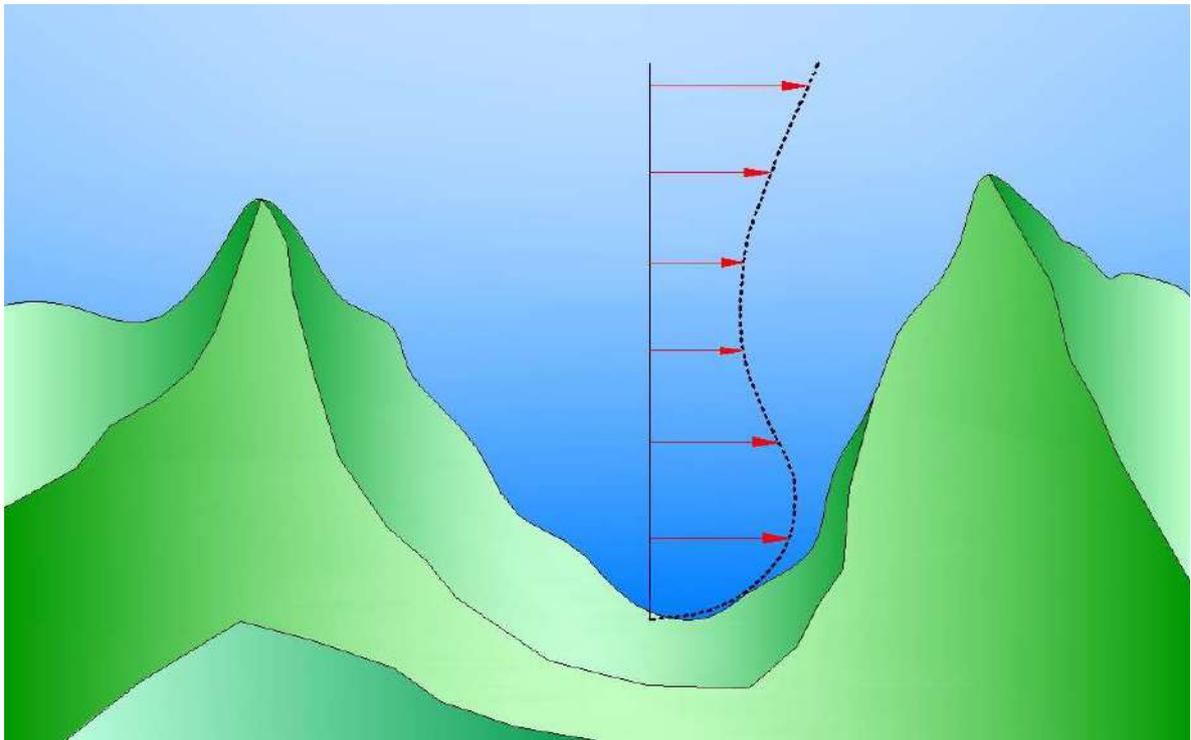
La ecuación de Bernoulli [Daniel Bernoulli, Holanda (1700-1782)], que no es otra cosa que aplicar el principio de conservación de la energía mecánica a fluidos, nos dice que si la velocidad de un fluido aumenta a medida que avanza a lo largo de una línea de flujo horizontal, la presión del fluido disminuirá:

$$p + \frac{1}{2} \rho v^2 + \rho gh = \text{una constante}$$

Donde p es la presión del fluido, ρ su densidad, v su velocidad y h su elevación.

El efecto túnel del viento se produce cuando el flujo de aire debe pasar de circular por un espacio abierto a uno más cerrado, usualmente este encajonamiento se produce en barrancos,

quebradas, cañones, pasos estrechos o gargantas profundas entre dos montañas. Al reducirse la sección por donde pasa el viento, éste incrementa su velocidad.

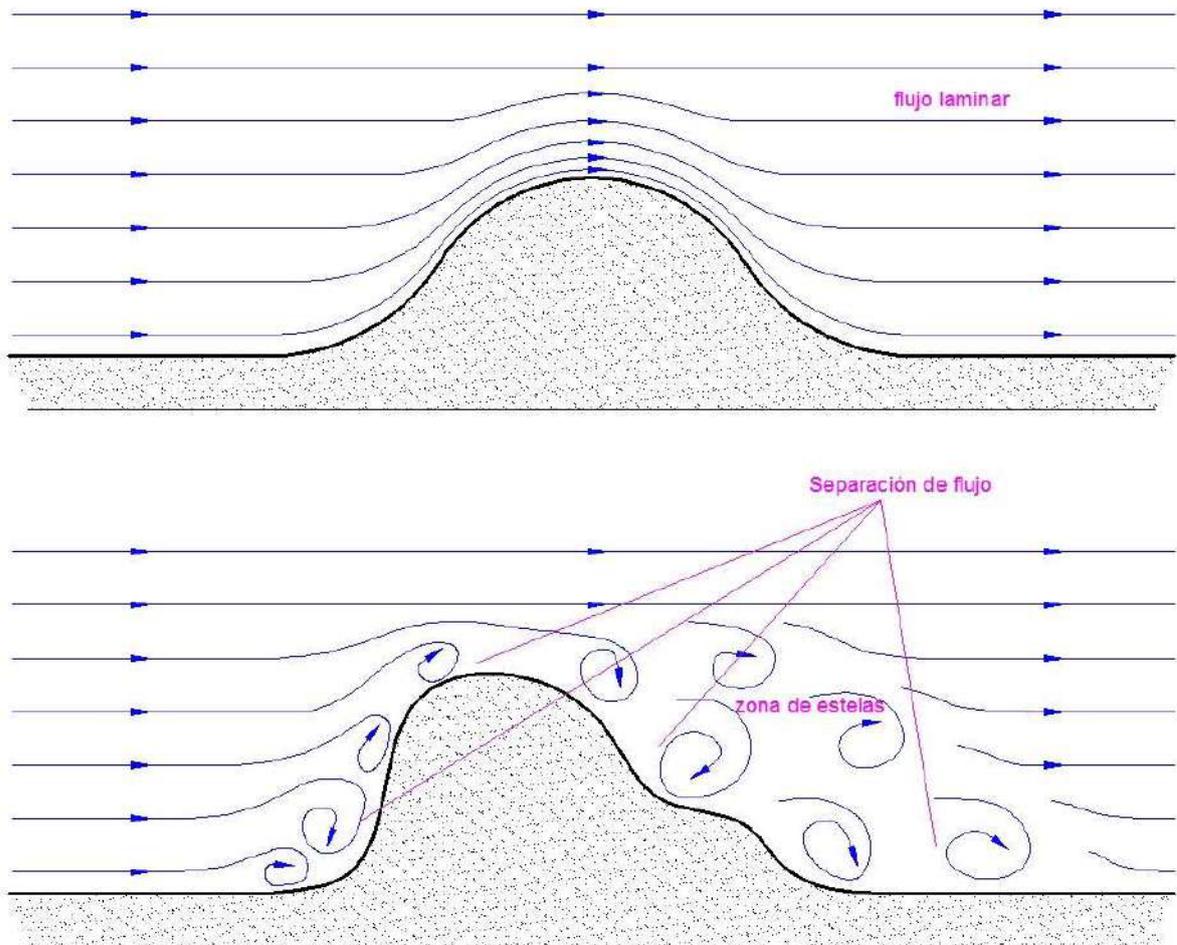


Efecto túnel entre montañas. Fuente: Elaboración propia.

Aunque el efecto túnel es muy común en zonas montañosas, la ubicación de máquinas aerogeneradoras sólo suele hacerse cuando las pendientes que forman el valle son suaves y no escarpadas, lo cual no es muy frecuente. Una pendiente irregular, escabrosa producirá altas turbulencias que pueden significar un bajo rendimiento de la máquina o inclusive su daño mecánico.

Cuando el flujo de aire se acelera al pasar sobre un montículo o colina se le conoce como efecto colina. Las líneas de flujo se comprimen al transitar por encima de la cumbre produciéndose una mayor velocidad del viento. Es muy habitual que las máquinas aerogeneradoras se ubiquen en las colinas. Nuevamente la situación de las pendientes y la regularidad de ellas alrededor del punto de cumbre influirán en la calidad de ese viento acelerado. Riscos y peñascos escarpados, pendientes muy pronunciadas, terrenos con múltiples obstáculos como edificaciones, arboledas, sembríos, etcétera, pueden producir turbulencias indeseadas.

Obsérvese en las siguientes imágenes la diferencia entre las líneas de flujo que pasan sobre una colina suave y una colina con pendientes pronunciadas. De la mecánica de fluidos sabemos que existe el efecto Coandă [Henry M. Coandă, Rumanía (1886-1972)], el cual consiste en que un flujo laminar tiende a seguir el contorno de la superficie sobre la que incide, dependiendo esencialmente de la viscosidad del fluido. La capa límite es una capa de cortadura con flujo no uniforme retardado producida por el contacto del fluido con un cuerpo sólido; o sea, es el cambio de velocidad y dirección del fluido al chocar con la superficie de un cuerpo. La rugosidad de la superficie es fundamental en el comportamiento de la capa límite, pudiendo continuar la forma laminar o producirse un flujo turbulento. Un cuerpo romo o de geometría obtusa, por ejemplo, producirá flujos turbulentos.



Flujo laminar (arriba) y flujo turbulento (abajo) en una colina de diferentes pendientes.

La zona turbulenta donde se producen vórtices o torbellinos se llama estela. Las estelas producen pérdida de presión en el fluido entre otros efectos. En ocasiones turbulentas el fluido puede perder su capacidad de reincorporarse a la velocidad y dirección del flujo que tenía antes del obstáculo. En estos casos se dice que hay una separación de flujo o de la capa límite. La separación se debe a una pérdida excesiva de cantidad de movimiento del fluido de la capa límite cerca de la pared del cuerpo, cuando el fluido debe moverse aguas abajo con un gradiente adverso de presión, o sea, $dp/dx > 0$ ¹. “Si la presión decrece, $dp/dx < 0$, y se dice que hay un gradiente favorable, en el cual no se produce nunca la separación de flujo. Este comportamiento fue descubierto por el investigador alemán Ludwig Prandtl (1875-1953) a principios del siglo veinte. Prandtl hizo su presentación con tan sólo 29 años de su teoría en un congreso de matemáticos en agosto de 1904, en Heidelberg, cuna de la universidad más antigua de Alemania (1386). Gracias a su aporte las mejoras tecnológicas que han hecho posible el mundo de hoy en aeronáutica, turbinas hidráulicas, automovilismo y fluidodinámica en general no serían posibles.

Matemáticamente la cantidad de movimiento sobre la pared del cuerpo puede escribirse como:

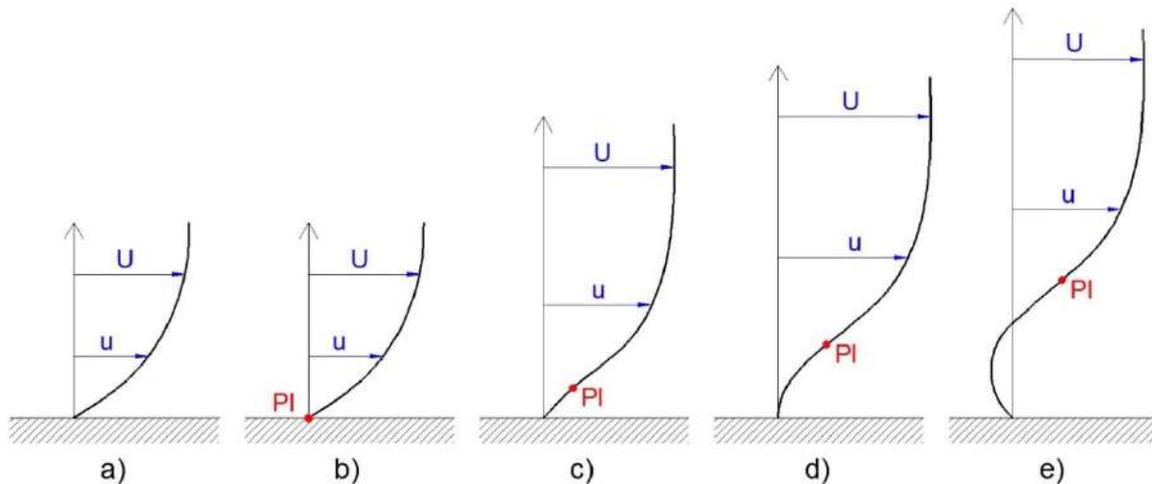
¹ La siguiente explicación es un extracto tomado del capítulo ‘Capa límite con gradiente de presión’, del texto ‘Mecánica de Fluidos’, Frank M. White, McGraw Hill, 2003

$$\mu \frac{\partial^2 u}{\partial y^2} \Big|_{\text{pared}} = -pU \frac{dU}{dx} = \frac{dp}{dx}$$

$$\frac{\partial^2 u}{\partial y^2} \Big|_{\text{pared}} = \frac{1}{\mu} \frac{dp}{dx}$$

Donde u es la velocidad, magnitud vectorial en función de (x,y) , variables de posición, $U(x)$ es la corriente exterior, p es la presión y μ es el coeficiente de viscosidad; expresión bidimensional obtenida de las ecuaciones diferenciales de la cantidad de movimiento particularizada en la pared del cuerpo.

Cuando el gradiente de presión es adverso, la segunda derivada de la velocidad exactamente sobre la pared es positiva, mientras en la parte exterior de la capa debe ser negativa para empalmar suavemente con la corriente exterior. Así, la segunda derivada debe anularse en algún punto intermedio, un punto de inflexión matemáticamente hablando, y el perfil de velocidades en la capa límite con gradiente adverso de presión tendrá una forma típica en S. En las siguientes gráficas puede verse la modificación del punto de inflexión (PI) según varía el gradiente de presión.

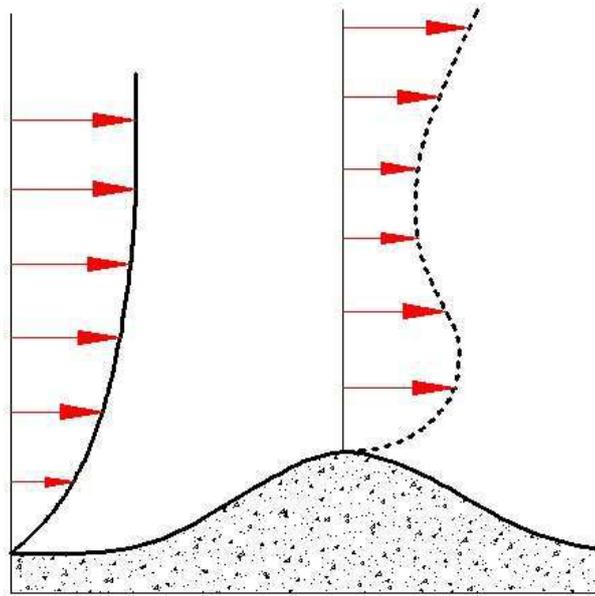


Efecto del gradiente de presión en el perfil de velocidades de una capa límite.

En el caso a) el gradiente es favorable y el perfil es convexo, sin punto de inflexión y por ello sin separación. Es decir, $dU/dx > 0$ y $dp/dx < 0$. En el caso b) el gradiente de presión es nulo, y el punto de inflexión está en la propia pared del cuerpo. No hay separación de flujo. Es decir, $dU/dx = 0$ y $dp/dx = 0$. En los casos c), d) y e) el gradiente es adverso, el punto de inflexión se ubica en la capa límite a una distancia de la pared que aumenta con la intensidad del gradiente adverso. Para c) el gradiente es débil, $dU/dx < 0$, $dp/dx > 0$, y todavía no existe separación, pero el flujo es susceptible de pasar a turbulento con bajos números de Reynolds. En el caso d) el gradiente adverso es crítico, $dp/dx > 0$, la pendiente en la pared es nula es decir el esfuerzo es nulo, y ya se produce una separación. En el caso e) el gradiente de presión es fuerte, es decir $dp/dx \gg 0$. Se produce un flujo inverso en la pared, y la corriente principal se desprende o separa de la pared, es decir hay una región desprendida.”

Una característica del efecto colina consecuentemente serán las variaciones en el perfil de velocidad. En una colina con pendientes suaves el perfil vertical de velocidad se verá relativamente ‘mejorado’ desde el interés del aprovechamiento eólico, puesto que a menores alturas se podrá conseguir más altas velocidades. Sin embargo, esta aparente mejoría a cierta altura de crecimiento

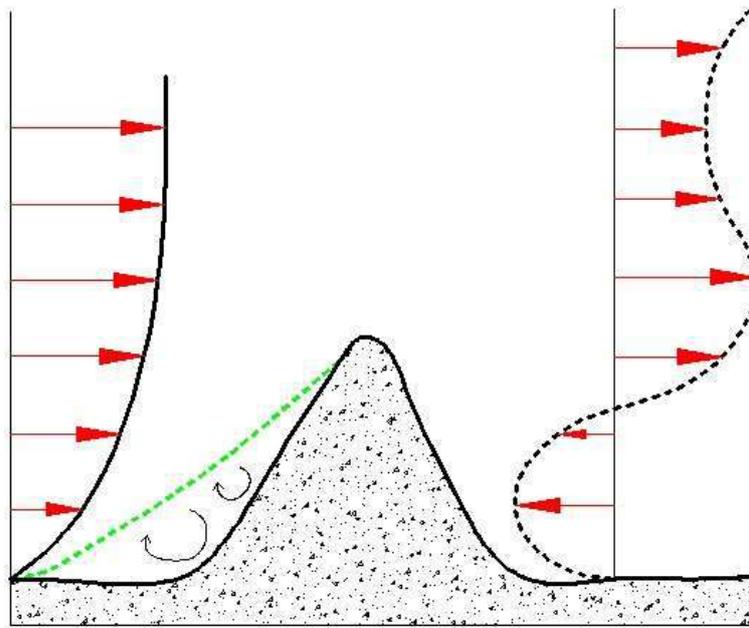
se verá anulada pues el flujo se vería de nuevo inmerso en la corriente previa no afectada por la colina. En breves palabras se tendría una reducción de la velocidad. Si siguiéramos creciendo en altitud, nuevamente volveríamos a ver un incremento en la velocidad esta vez debido a un gradiente favorable por la menor incidencia de los obstáculos terrestres y la influencia de las capas atmosféricas superiores. Ahora veamos algunos ejemplos gráficos. Obsérvese el ejemplo a), cuya gráfica se muestra a continuación:



a)

Perfil de velocidad y efecto colina en pendientes suaves.

La figura anterior representa claramente a una colina con pendientes suaves. El efecto colina o de aceleración en las cercanías a la superficie es visible sobre la cumbre. Nótese que el perfil de velocidades tiene una forma S, es decir se presenta una inversión en la velocidad -una deceleración- a cierta altura, una vez que ha pasado el efecto colina. Luego se vuelve al perfil esperado en el que la velocidad aumenta según se incrementa la altitud.

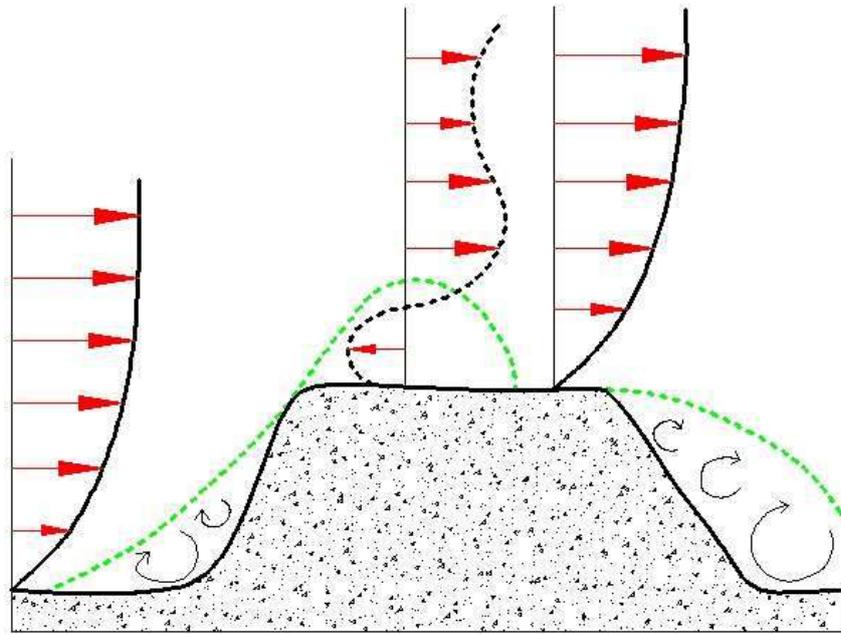


b)

Perfil de velocidad y efecto colina en pendientes escarpadas.

La figura previa, caso b) representa un cerro de forma puntiaguda o puntosa, típica de zonas montañosas con aristas, es decir crestas finas, escarpadas, también conocidas como cuchillas. En color verde y línea entrecortada se muestra la zona donde se producen vórtices. Las pendientes de entrada y salida son bastante inclinadas. En el área aguas abajo en relación a la dirección predominante, se puede observar que ya existe una región desprendida ya que el flujo es inverso. Esta zona contendrá torbellinos independientes del flujo previo a la interacción de la arista con el viento.

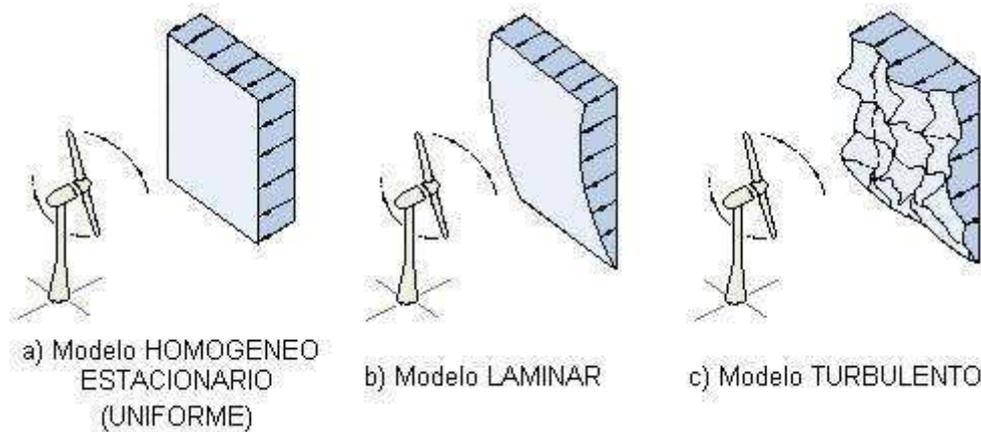
La figura siguiente, caso c) muestra una cumbre montañosa en forma de meseta angosta. Las pendientes de entrada y salida son igualmente elevadas. Como es de esperar, tanto en la parte inicial, en sentido de la dirección predominante del viento, como en la parte posterior se producen torbellinos y desprendimiento de flujo. Asimismo, en la parte inicial de la meseta también se presenta flujo inverso y separación de flujo; sin embargo, a cierta distancia el flujo tiene opción de recuperarse ya que se pierde el efecto turbulento. Esta circunstancia es importante en el análisis de emplazamientos eólicos, ya que, si las condiciones orográficas lo permiten, es posible evitar o reducir el efecto de la turbulencia. Nótese que la altura de la máquina también será factor fundamental en la incidencia de los flujos turbulentos.



c)

Perfil de velocidad y efecto colina en pendientes escarpadas y mesetas anchas.

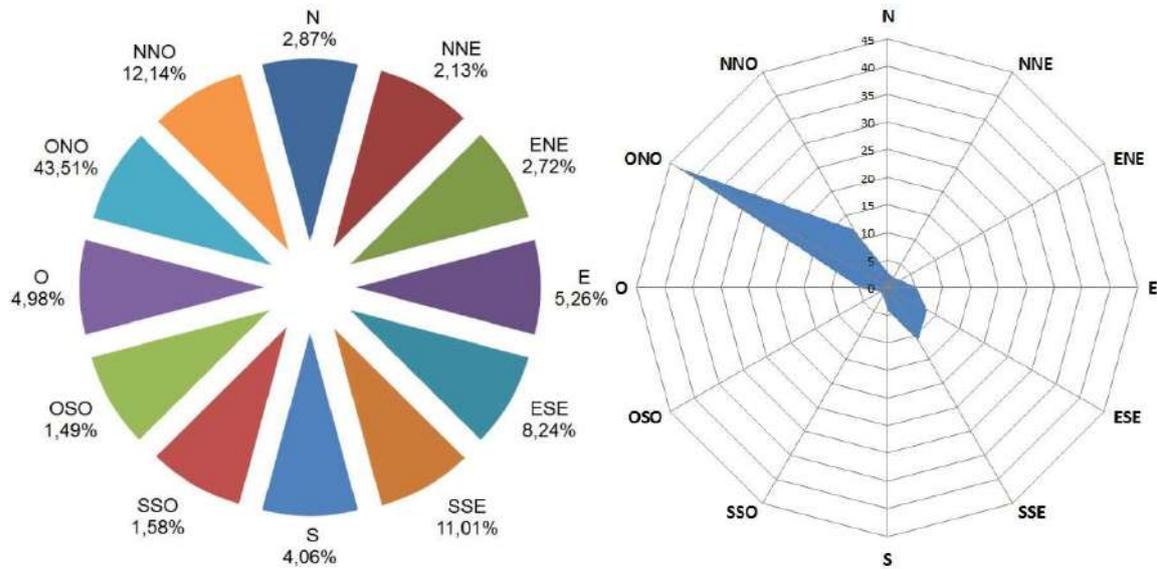
La siguiente figura resume las diferentes maneras (la primera idealizada) en que el flujo de aire podría llegar a una turbina:



Efecto estela de un aerogenerador. Parte C.

Fuente: Dpto. Física. Universidad de Córdoba. España.

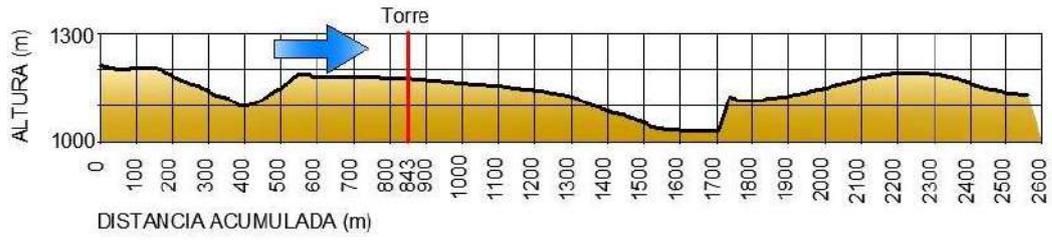
Por todo lo explicado, en análisis eólicos es conveniente realizar una inspección de la rugosidad del terreno en varias direcciones alrededor de un punto de interés específico, para determinar los posibles comportamientos del viento a través de la rosa de rugosidad y del perfil vertical de velocidad de viento, tal como se ha enseñado. Enseguida se muestra un ejemplo de un sitio eólico en donde se ha realizado perfiles longitudinales del terreno dividiendo la rosa de vientos en 12 rumbos. La rosa de dirección correspondiente con valores de frecuencia es la siguiente:



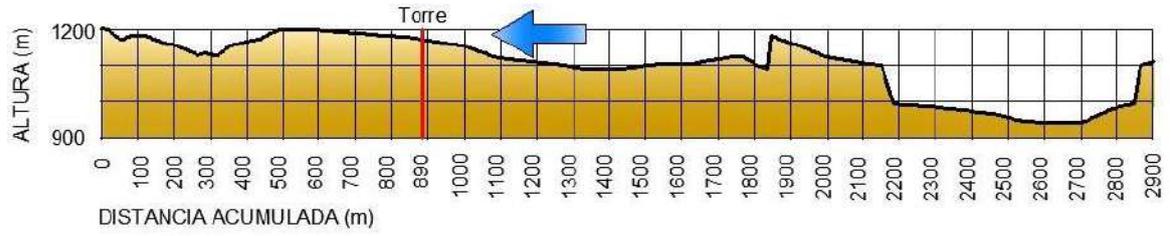
Ejemplo de predominancia de dirección en un sitio eólico.

La dirección predominante en el ejemplo es la oeste-noroeste, seguida por la dirección sursureste. En un análisis eólico del tipo de terreno circundante se escoge la distancia al punto de referencia según criterios de topografía, intensidad de viento, frecuencia o recurrencia. El examen es conveniente realizarlo por pares de dirección, siendo por supuesto entre dos direcciones opuestas, y señalándose la dirección de prevalencia entre las dos. Finalmente, luego se comparará entre pares agrupados en función de la recurrencia, velocidad y aporte energético, a fin de encontrar métodos para ubicar mejor las torres meteorológicas o torres de aerogeneradores, para reducir o evitar la turbulencia.

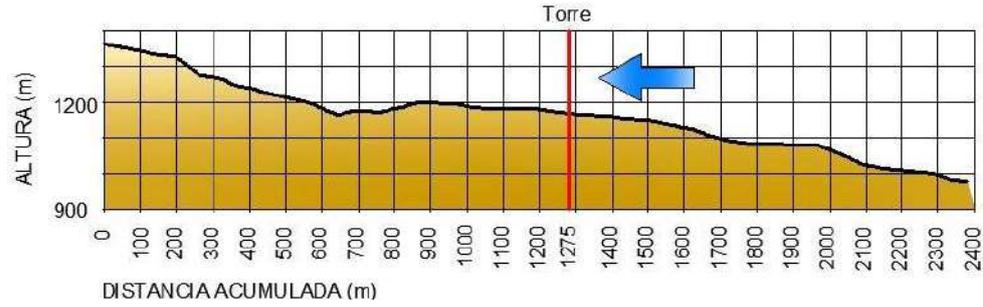
PERFIL SUR-NORTE

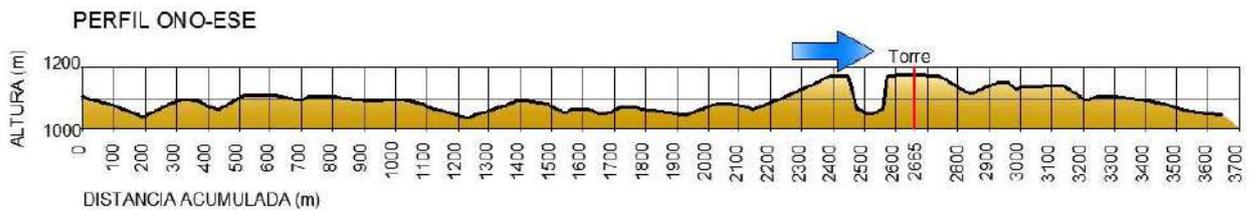
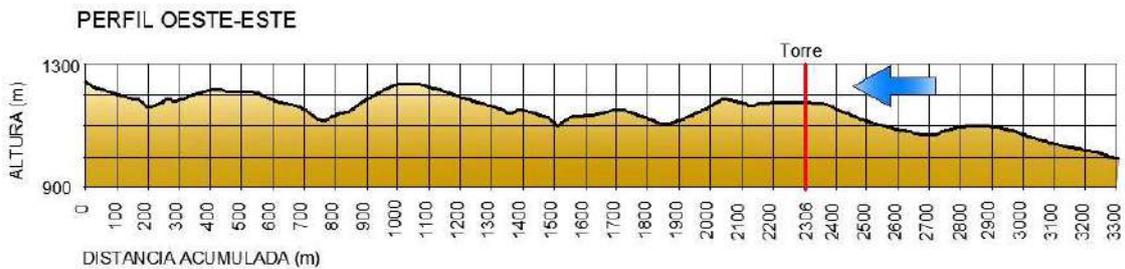


PERFIL SSO-NNE



PERFIL OSO-ENE





Perfiles longitudinales de terreno por pares de rumbo.

Un vistazo rápido a los distintos perfiles nos dejará como primera impresión que es posible encontrar problemas de turbulencia en la dirección Oeste-noroeste ya que hay un acantilado a aprox. unos 80 m previos al sitio de interés. Asimismo, en apariencia la dirección ENE debería producir un bajo valor de cizallamiento al avizorarse que hay una pendiente suave y regular de unos 400 m aprox. antes del sitio. Los cizallamientos calculados para estas direcciones son:

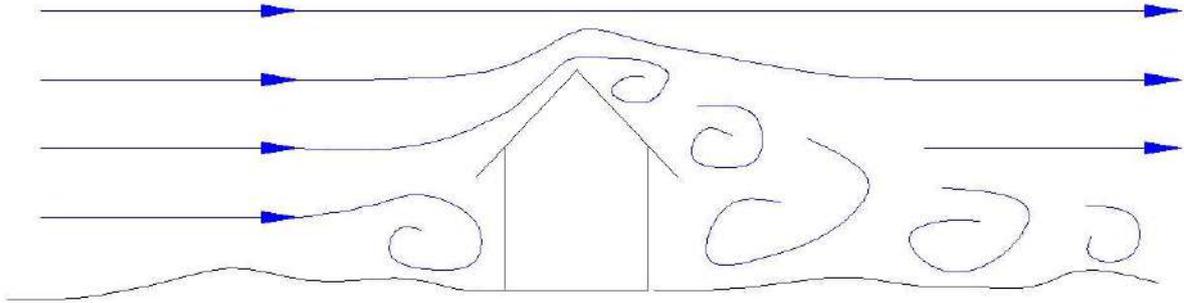
Cizallamientos calculados para las direcciones de la figura anterior

N	NNE	ENE	E	ESE	SSE	S	SSO	OSO	O	ONO	NNO
0,121	0,044	0,068	0,153	0,064	0,122	0,092	---	---	0,019	0,033	0,127

Las direcciones SSO y OSO carecen de cifras por insuficiencia de recurrencia de datos para llegar a valores confiables. A pesar de la estimación subjetiva inicial, los cálculos (basados en valores reales de mediciones) indican que el rumbo con mayor rugosidad, respecto al sitio de estudio, es el Este, seguido por el Nornoroeste (NNO), Sursureste (SSE) y Norte. La dirección Oeste por otro lado, seguida por la Oeste-Noroeste (ONO) y Estesudeste (ESE), son las direcciones con menor cizallamiento, en otras palabras, con menor efecto de turbulencia. Contrario a lo que se podía pensar en inicio, la dirección ONO resultó estar entre las de mejor resultado. Esto destaca la necesidad de efectuar mediciones en los sitios de interés y no sólo confiar en apreciaciones de carácter subjetivo, las cuales pueden ser aceptables si se desea una primera aproximación previa a una campaña de medición. La interacción entre suelo y viento puede ser muy compleja, sujeta a cambios por

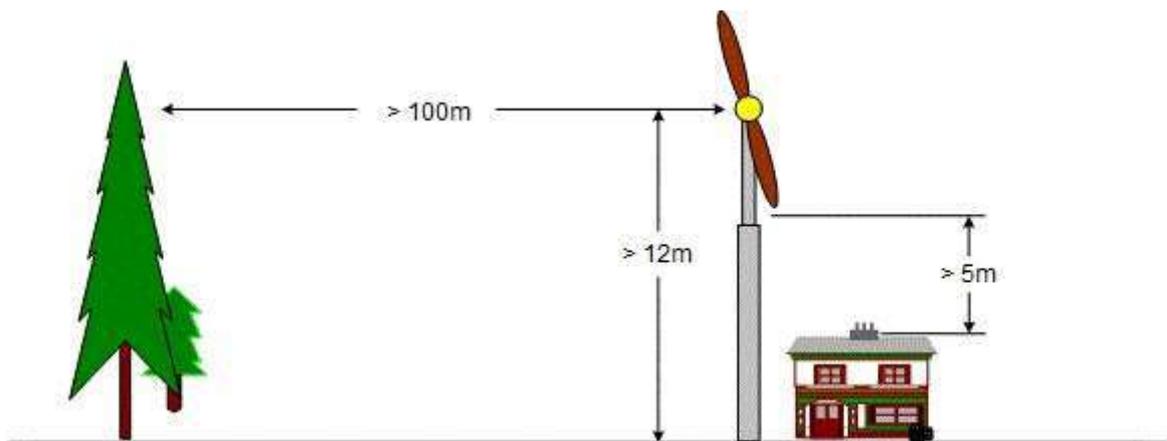
pequeños detalles orográficos, y dependiente de la fuerza del viento. Así, por ejemplo, el hecho de que el cizallamiento no sea tan alto en la dirección ONO puede deberse a una alta velocidad de viento en esa dirección en conjunto con una distancia relativa a la quebrada, permiten que se soslaye el accidente geográfico en esa dirección.

Para pequeñas aplicaciones eólicas, como electrificación rural, la visualización de probables problemas de turbulencia es crucial ya que las máquinas suelen ubicarse usualmente muy cercanas a la aplicación. Fíjese el lector las turbulencias que podría provocar una pequeña vivienda frente al viento en la siguiente ilustración.



Turbulencia producida por una pequeña vivienda.

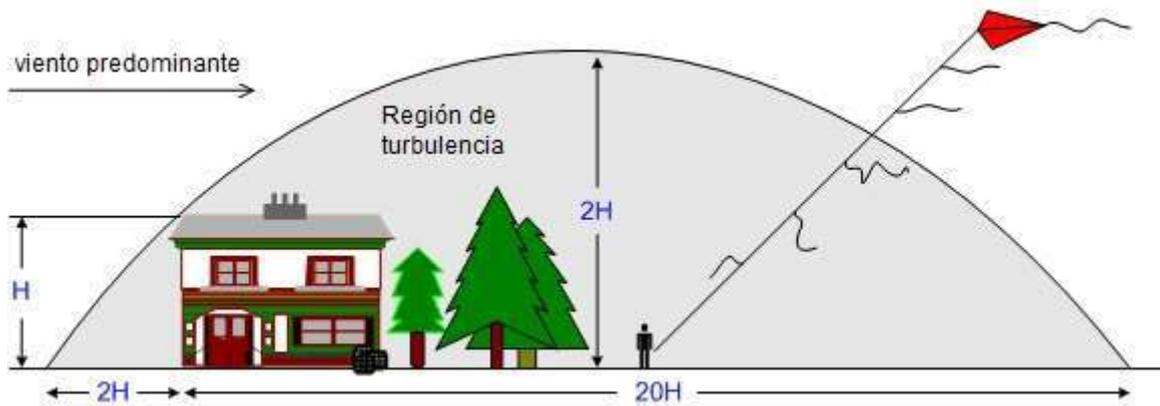
Una regla general de aplicación sencilla indica ciertas distancias horizontales y verticales mínimas a cumplir respecto de los obstáculos principales en relación a la dirección predominante del flujo de viento para evitar los efectos negativos de la turbulencia sobre aerogeneradores. Establece que para máquinas pequeñas (diámetro entre 5 y 6 m) es recomendable colocar el aerogenerador en torres de al menos 12 m de altura. También se aconseja que la pala en su parte inferior esté al menos 5 m por encima del obstáculo cuando éste está a pequeña altura y se halle cercano a la turbina. Si la altura del obstáculo es comparable o ligeramente mayor a la de la turbina, pero la turbina se puede colocar distante, se recomienda al menos 100 m de distancia.



Guía para ubicación de pequeños aerogeneradores en relación a obstáculos. Parte A. Fuente: Small Scale Wind Systems (Khennas, Dunnett, Piggott, 2003)

Otra pauta -de mejor concepción- puede observarse en la figura siguiente. Si no se dispusiesen de métodos más técnicos, una forma sencilla de ver la altura de la influencia de la turbulencia es volar una cometa a la cual se aten varios listones a intervalos regulares, a fin de

verificar visualmente la zona de disturbio y la zona de flujo suave. Estas recomendaciones son válidas para aplicaciones de pequeña escala donde usualmente se coloca una sola máquina de pequeña potencia y diámetro de rotor. En arreglos de dos o más máquinas, con grandes potencias, alturas y diámetros de máquina, es obligatorio realizar un estudio de turbulencia, el cual es un proceso físico y matemático complejo; usualmente apoyado en poderosos programas informáticos de cálculo.



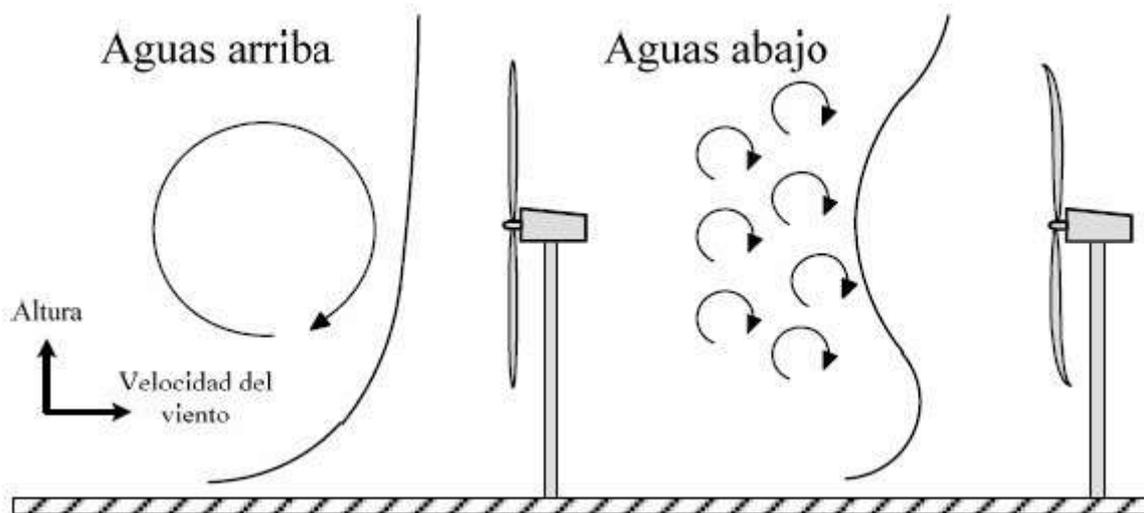
*Guía para ubicación de pequeños aerogeneradores en relación a obstáculos.
Parte B. Fuente: Wind Power, Paul Gipe, 2004.*

La turbulencia no es producida únicamente por los obstáculos que produce el viento. Es lógico suponer que una turbina eólica se convierte en sí misma en un elemento perturbador del flujo del aire, ya que el aire debe interactuar con ella. Se conoce como **efecto estela** al flujo de viento turbulento producido por un aerogenerador. La figura que sigue ilustra este fenómeno:



*Efecto estela de un aerogenerador. Parte A.
Fuente: Danish Wind Industry Association, 2003.*

Esta estela puede llegar a afectar a otro aerogenerador ubicado aguas abajo del primer aerogenerador en la dirección predominante del viento. Dependiendo de la magnitud de esta turbulencia el efecto puede producir pérdidas de energía, además de originar perjuicios mecánicos que reducen la vida útil de la máquina aguas abajo. La figura siguiente ejemplifica este concepto.



Efecto estela de un aerogenerador. Parte B.
Fuente: C. Méndez, F. González, E. Gavorskis, O. Ravelo.

En resumen, podemos concluir que el viento tiene su origen tanto en fenómenos a escala astronómica como a escala local. Existen vientos globales de macro escala y vientos superficiales de meso y microescala. El estudio de ambos casos es de interés en los proyectos eólicos, aunque lógicamente los de efecto localizado son los predominantes. La escala del proyecto también influirá mucho en el nivel de entendimiento que cada uno amerite.

El presente texto es un extracto del Capítulo VI, del libro:

Vaca Cordero, S., Jara Alvear J., 2015.

Energía Eólica en Ecuador. En: "Energías renovables en el Ecuador. Situación actual, tendencias y perspectivas", Editores: Peláez Samaniego, M.R. y Espinoza Abad, J.L. Universidad de Cuenca. Gráficas Hernández, Cuenca, Ecuador.

Stalin Vaca Cordero es actualmente Representante Legal y Técnico de la compañía SISENER INGENIEROS S.L. en Ecuador.