

# I. Efecto topográfico en el comportamiento de flujos de viento y sus implicaciones en el diseño de estructuras flexibles

Raúl González Herrera

## Resumen

**E**n este capítulo, se describe cómo se modifica la estructura del flujo de fuertes vientos cercanos a la superficie de la Tierra, con efectos tales como la generación de vórtices alternantes y contraflujos. Lo anterior como producto de la presencia de obstáculos topográficos de distintas características que se oponen a los flujos de viento y generan efectos estudiados por la dinámica de fluidos. Para una mejor comprensión se analiza cómo se considera este fenómeno en distintos códigos y reglamentos de diseño eólico en el mundo, a través de un ejemplo práctico de diseño de una estructura flexible.

## Modificación del flujo de viento por la topografía

La velocidad del viento puede incrementarse considerablemente por factores de la morfología topográfica de la corteza terrestre, con elementos naturales tales como montañas, montes, valles, colinas, depresiones topográficas, entre otras, o los obstáculos producidos por las construcciones del hombre. Cabe mencionar que también ejerce un efecto importante en el diseño eólico el fenómeno de la rugosidad, el cual se debe a la fricción que surge entre el viento y la cobertura vegetal

del terreno. Para los reglamentos internacionales el efecto topográfico y el de rugosidad se analizan independientemente, no así para el del Distrito Federal como se mostrará en la parte final de este documento. Conviene aclarar que el estudio de la rugosidad queda fuera del alcance de este capítulo.

Los efectos topográficos en el flujo de vientos fueron objeto de importantes investigaciones entre las décadas de 1970 y 1980. Estos estudios buscaban explicar el efecto de viento para optimizar los diseños de turbinas. Los resultados obtenidos permitieron, adicionalmente, entender las características de la velocidad media, su relación con distintas formas topográficas y el grado de cambio de esta velocidad al pasar de una a otra forma topográfica distinta.

## Efectos generales de la topografía

Los efectos generales que se ocasionan al flujo de viento laminar por las condiciones topográficas se observan en los cuatro esquemas que se presentan en la figura 1 <sup>[1]</sup>; considerando los incisos desde a y hasta d, se puede observar la trayectoria del flujo de viento en colinas y pendientes ascendentes. El viento al acercarse a una pendiente, reduce su velocidad considerablemente al encuentro con ésta, sin embargo, conforme asciende por el obstáculo el viento incrementa gradualmente su velocidad, hasta que, después de un trayecto donde se normalice la pendiente, la velocidad regresa a las condiciones originales.



a) Escarpado de poca pendiente sin separación de flujo. <sup>[1]</sup>

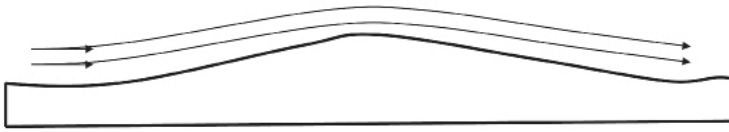


Figura 1b. Escarpado con pendiente importante y separación de flujo. [1]

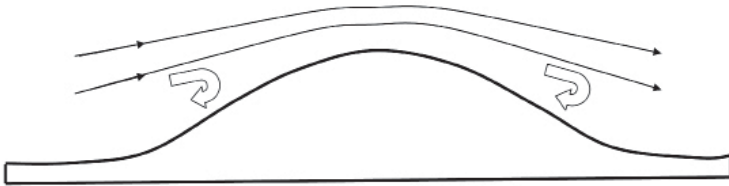


Figura 1c. Colina de poca pendiente sin separación de flujo. [1]

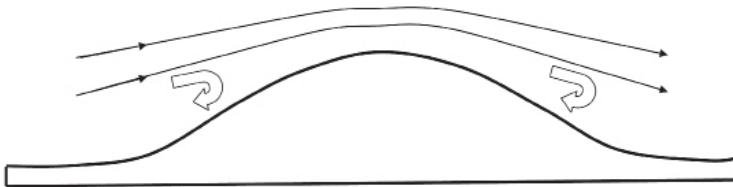


Figura 1d. Colina con pendiente importante y separación de flujo. [1]

Figuras 1. Flujo considerando las características topográficas en pendientes bajas y pronunciadas, desarrolladas a partir de diversas investigaciones. [1]

Más allá de la cresta, la velocidad del flujo se reduce a niveles cercanos a los que tenía antes de enfrentar el accidente topográfico. El ajuste será más rápido entre menor sea la pendiente del escarpado o la colina que el flujo de viento tenga que cruzar.

Otro fenómeno que se observa, en el impacto de flujos de viento con colinas escarpadas o de pendientes topográficas importantes (mayores al 30%), es la separación de corrientes pertenecientes al flujo. Esto ocurre cuando el flujo no puede superar el incremento del gradiente de presiones en la dirección de la corriente de viento dominante. La separación (en vórtices) ocurre durante el ascenso de la corriente de viento

por la pendiente escarpada de la colina, una vez que la corriente llega a la cresta se presenta el descenso del flujo. Esto da lugar nuevamente al fenómeno de desprendimiento de la corriente. Para apreciar lo anterior pueden verse las figuras 1b y 1d <sup>[1]</sup> que ejemplifican, mediante espiras, el fenómeno de la separación y formación de vórtices.

Los valores de estas separaciones de flujo se muestran en los códigos, normas o reglamentos de diseño por viento, mediante factores constantes ubicados en tablas que relacionan ciertos parámetros, e indican el límite superior donde se alcanzan las velocidades dominantes en el ascenso y descenso de la corriente del flujo en la colina o pendiente escarpada.

Los efectos del incremento de la velocidad de los flujos de viento son mayores cerca de la superficie del obstáculo, posteriormente se reducen y vuelven a incrementarse con la altura cercanos al nivel de la cresta o base. Este comportamiento puede afectar los perfiles de las velocidades medias y dominantes, cercanas a la cresta del perfil topográfico, donde se presentan los máximos o picos de la frecuencia de la señal en el tiempo. <sup>[1]</sup>

Los efectos que ejercen los accidentes topográficos sobre la velocidad de viento y las condiciones del flujo, se han analizado y citado en la literatura considerando modelos en dos direcciones, suponiendo una distancia longitudinal normal e infinita, así como una pendiente no tan pronunciada (menor al 30%). También se han utilizado modelos que consideran el efecto topográfico tridimensional, el cual ocurre cuando hay pendientes importantes, con incrementos y decrementos de la velocidad tal como se explicó en párrafos anteriores.

Para el diseño de las estructuras sometidas a flujos importantes de viento, los modelos en tres dimensiones son conservadores. Se ha observado en modelos ensayados en túneles de viento que generalmente el efecto de la tercera dimensión no es tan importante. Esto se debe a que, cuando el objeto topográfico no es muy ancho en su tercera dimensión (o espesor), el viento se desvía lateralmente y no se produce un incremento de velocidad en la cresta del objeto u obstáculo topográfico. Esto se muestra en la figura 2 <sup>[2]</sup>, la cual reproduce un ensayo en túnel de viento. En caso de que el objeto sea muy ancho, el efecto de la tercera dimensión no influye en su comportamiento de forma significativa, ya que el ancho reduce bastante la velocidad del viento. Las variables  $U_1$  y

$U_2$  corresponden a las velocidades de entrada y salida de la señal en el túnel de viento y  $H$  es la altura en donde se manifiestan estos efectos.

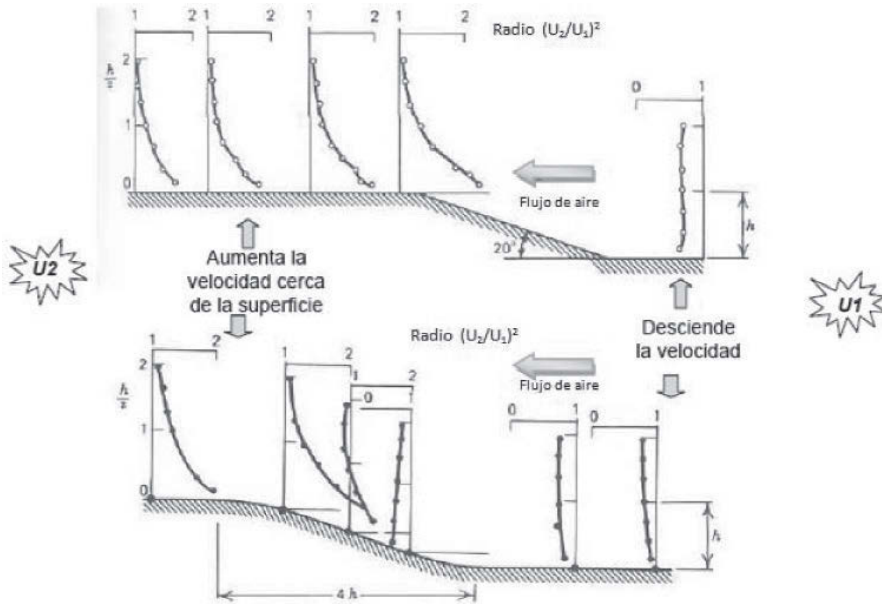


Figura 2. Comportamiento del flujo con respecto al cambio topográfico, este efecto es esquematizado considerando datos encontrados en túneles de viento. [2]

## Multiplicadores topográficos

La definición de *multiplicador topográfico* que se usa en este artículo es la siguiente: la razón de la velocidad del viento amplificada por el obstáculo topográfico entre la velocidad del viento anterior a la presencia del elemento u obstáculo. Esta definición aplica para los valores de la media, la máxima ráfaga y la desviación estándar de la velocidad del viento. Estos parámetros se denotan como  $\bar{M}_t$ ,  $\hat{M}_t$  y  $M'_t$ , respectivamente.

Los multiplicadores topográficos, ya sean medidos instrumentalmente en estructuras a escala natural, en estructuras construidas a escala en túneles de viento, o con estructuras modeladas a partir de algoritmos computacionales, pueden ser mayores o menores que la unidad. De cualquier manera, los casos de más interés para el diseño

estructural son los que corresponden a los efectos del incremento de la velocidad, para el cual los multiplicadores topográficos (media o ráfaga máxima) son superiores a la unidad.

## Colinas de poca pendiente

El análisis que se hace del comportamiento de la capa límite a partir del valor medio del flujo de viento sobre las colinas de poca pendiente, da lugar a la siguiente expresión para calcular la media del multiplicador topográfico, ecuación 1 [3]:

$$\overline{M}_t = 1 + ks\phi \quad (1)$$

donde  $\Phi$  es el ángulo de la pendiente topográfica,  $k$  es una constante dada por los distintos reglamentos a la forma topográfica y  $s$  es un factor de posición del flujo de viento analizado. La ecuación 1, ha sido empleada para distintas condiciones topográficas modificando su estructura en varios códigos y reglamentos. Esto indica que la fracción del incremento de velocidad, es igual a  $(\overline{M}_t - 1)$  y es directamente proporcional a la pendiente del flujo en la zona de incremento de velocidad,  $\Phi$ . Este último ángulo se define como  $(H/2L_u)$ , donde  $H$  es la altura de la cresta al nivel de la superficie antes del incremento del flujo, y  $L_u$  es la distancia horizontal desde la cresta hasta donde alcanza la elevación del terreno  $H/2$ . Otros estudios [3] propusieron, tras realizar el análisis de varios modelos, los siguientes valores para la constante  $k$ , para diversas formas topográficas:

- 4.0 para elevaciones en dos dimensiones.
- 1.6 para escarpados en dos dimensiones.
- 3.2 para colinas asimétricas en tres dimensiones.

El factor de posición  $s$  es de 1.0 cercano a la cresta de la elevación, y disminuye su valor para ambos lados de la colina hasta la altura de la superficie (base de la colina),  $z$ . La reducción de  $s$  con la altura, es más rápida cerca de la superficie, siendo más gradual conforme crece la altura,  $z$ .

Para una primera aproximación de análisis, la longitud de la componente de la turbulencia,  $\sigma_u$ , no cambia sobre la colina o el escarpado.

Lo anterior resulta en la ecuación 2, que se aplica para determinar el multiplicador topográfico de ráfaga,  $\hat{M}_t$ :

$$\hat{M}_t = 1 + k' s \phi \quad (2)$$

donde  $k'$ , es una constante para el multiplicador topográfico de ráfaga, cuyo valor se puede obtener mediante la ecuación (3):

$$k' = \frac{k}{1 + g \left( \frac{\sigma_w}{U} \right)} \quad (3)$$

donde  $\left( \frac{\sigma_w}{U} \right)$  es la intensidad de la turbulencia longitudinal sobre el nivel plano de la superficie y  $g$  es el factor pico de la turbulencia.

Las ecuaciones desde 1 hasta la 3 muestran que el multiplicador topográfico ( $\hat{M}_t$ ) de ráfaga es menor que el factor multiplicador ( $k'$ ) debido al valor medio, para el mismo tipo de accidente topográfico y altura sobre el nivel del terreno. Existe una pequeña dependencia de los multiplicadores topográficos basados en el número de Jensen considerando como la altura de la colina  $\left( \frac{H}{z_0} \right)$ , lo cual se observa mejor con el ejemplo que se colocó en la parte final del capítulo.

## Colinas, acantilados y escarpados

Cuando la pendiente ascendente de la colina o del escarpado se acerca a valores cercanos a 0.30 (alrededor de los  $17^\circ$ ), ocurre la separación del flujo de viento en la cara de la pendiente ascendente, las fórmulas simplificadas mostradas en las ecuaciones 1 a la 3 no se pueden aplicar directamente.

Para pendientes con valores cercanos a 0.30 y hasta 1.0 ( $17^\circ$  hasta  $45^\circ$ ), la espira de separación (vórtice) en la cara de viento ascendente presenta una pendiente efectiva relativamente constante. Los multiplicadores topográficos cercanos a la cresta, son constantes con la pendiente ascendente en este rango. Las ecuaciones 1 y 2 pueden ser aplicadas con  $\Phi$  remplazada por una pendiente efectiva  $\Phi'$ , igual a 0.30, como puede observarse en la figura 3a.

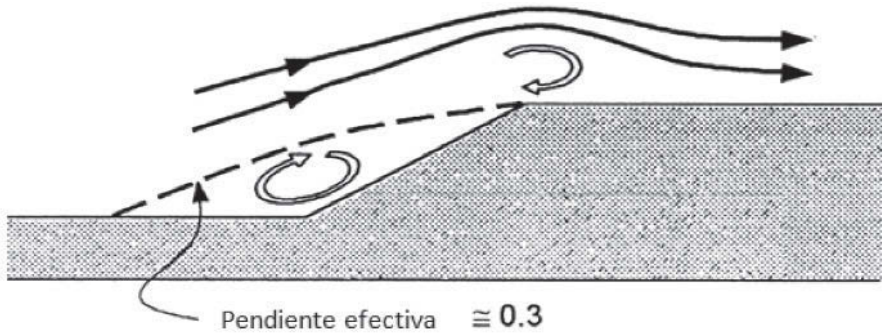


Figura 3a. Pendiente escarpada entre  $17^\circ$  y  $45^\circ$  con viento ascendente y formación de espiras de separación de flujo. <sup>[1]</sup>

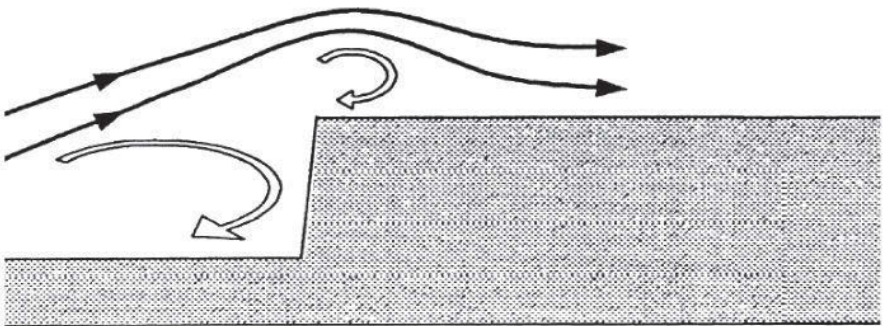


Figura 3b. Pendiente con inclinación mayor a  $45^\circ$  con viento ascendente y formación de espiras de separación de flujo. <sup>[1]</sup>

Para pendientes mayores o cercanas a 1, por ejemplo en colinas escarpadas, las líneas del flujo cercanas a la superficie de la cresta, originadas por el flujo en la cara ascendente cerca de la punta, se separan formando flujos más elevados y vórtices alternantes que generalmente colisionan con las líneas de flujo principal (véase figura 3b). El concepto de multiplicador topográfico definido en este capítulo es poco aplicado para ciertos casos. Algunos de los aparentes incrementos de velocidad son causados más por el cambio del perfil de la capa límite que por la perturbación producida por la pendiente de ascenso de la colina o escarpado (efecto de rugosidad, que es un efecto que no se analiza en este capítulo).



Una complicación adicional de los modelos a escala de colinas, para ser estudiadas en túneles de viento o mediante métodos analíticos, es que la separación del flujo del viento puede ocurrir arriba de o bajo la cresta de la colina (véase este efecto en la figura 3b). En un estudio realizado [4] se encontró que la separación del flujo es cercana a los primeros 50 m de una cresta de 480 m, con una pendiente de tan sólo 0.48, con ángulo promedio de  $26^\circ$ , en la escala natural y escala de modelo 1/1,000. El hecho de escalar una pendiente tan grande tiene el efecto de disminuir la velocidad media e incrementar la intensidad de la turbulencia, como se muestra en la figura 4. [4]

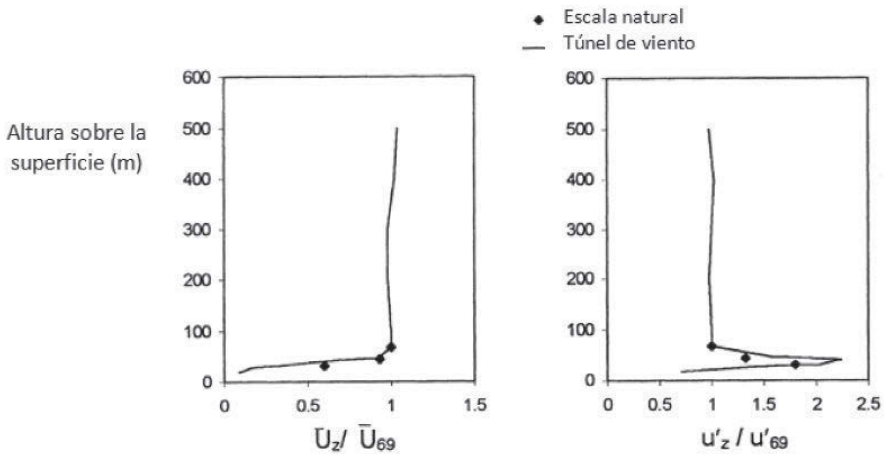


Figura 4. Perfil de la velocidad media de la turbulencia longitudinal cercana a la cresta de una colina escarpada con altura de 480 m, pendiente ascendente de 0.48. [4]

## Efecto de la topografía en los ciclones tropicales, huracanes y tormentas eléctricas

El efecto de elementos topográficos sobre el viento cercano a la superficie durante el paso de ciclones tropicales, huracanes y/o tormentas eléctricas ha sido menos estudiado que en otros fenómenos donde se

manifiestan capas límite<sup>1</sup> en larga escala longitudinal sin modificaciones considerables y de muy baja altura.

Los ciclones tropicales son grandes tormentas con capas límite similares a una tormenta o depresión extra tropical en sus límites exteriores. Cercano a la región de fuertes vientos, su capa límite parece tener menor altura, del orden de 100 m. Los elementos topográficos mayores que esta altura, se espera que interactúen con la estructura de la tormenta, generando una colisión que genera daños importantes al huracán y al obstáculo topográfico.

Las tormentas tropicales también muestran capas límite con picos en los perfiles de velocidad entre 50 y 100 m. Este fenómeno no desarrolla perfiles de velocidad parecidos en la capa límite. Se han desarrollado algunos estudios básicos empleando túneles de viento para considerar los factores multiplicadores topográficos bajos comparados con flujos con capa límite desarrollado por otras condiciones más estándares de flujo de viento. Por esta razón, las ecuaciones desarrolladas para los otros casos no son aplicables para estos fenómenos extremos y quedan fuera del alcance de la mayoría de los reglamentos del mundo, salvo algunos que han desarrollado investigación importante en la materia.

Las ecuaciones propuestas corresponden a las más empleadas en la literatura, sin embargo, los fuertes vientos en zonas tropicales o semi-tropicales, producidos por tormentas eléctricas y ciclones tropicales, no son del alcance de este trabajo, por lo cual se debe ser cauteloso en caso de decidirse a emplearlas en estas regiones.

## Cambios de rugosidad del terreno

Cuando vientos fuertes fluyen sobre una región que tiene una misma rugosidad, alcanzan una longitud parabólica con una altura a la que se

---

<sup>1</sup> Se entiende por capa límite, a la altura donde el flujo de viento se mantiene constante, lo cual depende de la rugosidad (fricción del viento sobre la superficie del suelo, esta rugosidad está determinada por el tipo de vegetación, densidad de construcciones o elementos topográficos que atraviesa el flujo). Los huracanes remueven con sus primeros vientos la vegetación, con lo cual se reduce la rugosidad, se extiende el área de rugosidad uniforme y baja la capa límite, ya que entre menos rugosidad la altura de la capa límite se mantiene más baja y viceversa.

denomina capa límite, por ejemplo vientos a campo abierto fluyendo sobre los exteriores o suburbios de la ciudad o pueblo analizado, tendrán una misma capa límite, sin embargo, cuando atraviesen la ciudad los vientos elevarán su capa límite, ya que se presenta mayor rugosidad. El ajuste de la capa límite comienza al nivel del terreno natural y gradualmente se desplaza hacia arriba hasta equilibrarse, pero al cruzar una nueva rugosidad se desarrollará una capa límite interna sobre el nuevo terreno como se muestra en la figura 5.

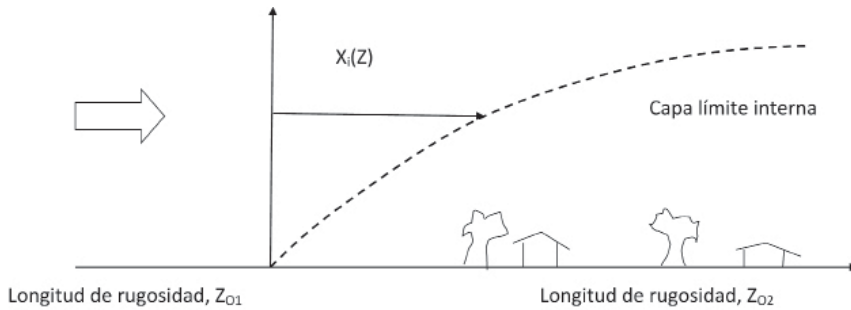


Figura 5. Capa límite interna desarrollada por el cambio de rugosidad del terreno. [1]

Mediante estudios analíticos [5], se desarrollaron las siguientes relaciones (ecuaciones 4 y 5) para la posición horizontal del cambio de la rugosidad del suelo como función de su altura,  $z$ .

Para el flujo de un terreno suave (longitud de rugosidad  $z_{01}$ ) a un terreno rugoso ( $z_{02}$ ) con  $z_{02} > z_{01}$ :

$$x_i(z) = z_{02} \left( \frac{z}{0.36 z_{02}} \right)^{\frac{4}{3}} \quad (4)$$

Para el flujo de un terreno rugoso (longitud de rugosidad  $z_{01}$ ) a un terreno suave ( $z_{02}$ ) con  $z_{01} > z_{02}$ :

$$x_i(z) = 14z \left( \frac{z_{01}}{z_{02}} \right)^{\frac{1}{2}} \quad (5)$$

Ajustando  $z_{02}$  a un valor 0.20 m, aproximadamente el valor del terreno de las afueras de un área urbana (suburbios) con edificios bajos de no más de 5.0 m de altura (correspondientes a uno o dos niveles), y  $z$  igual a 10 m, la ecuación 4 da un valor para  $x_i(10\text{ m})$  igual a 144 m. Más allá de esta distancia, la forma del perfil de la velocidad media por debajo de 10 m tiene las características de la nueva rugosidad. De cualquier manera la magnitud de la velocidad media para la ciudad continúa reduciéndose durante los siguientes kilómetros, hasta que se ajuste la capa atmosférica a la nueva rugosidad del terreno.

Se encontró <sup>[6]</sup> que la ráfaga de la velocidad de viento a la altura de 10 m, se ajusta a la aproximación del nuevo terreno (cambio de rugosidad) de manera exponencial con una distancia constante de cerca de 2,000 m. En consecuencia el pico de la ráfaga a una distancia  $x$  en metros dentro del terreno con cambio de rugosidad se puede obtener con la ecuación 6.

$$\hat{U}_{2,x} = \hat{U}_1 + (\hat{U}_2 - \hat{U}_1) \left[ 1 - \exp\left(\frac{-x}{2,000}\right) \right] \quad (6)$$

donde  $\hat{U}_1$  y  $\hat{U}_2$ , son asíntotas a la ráfaga de velocidades desarrolladas en distintos terrenos. En esta expresión el subíndice 1, es la velocidad anterior al cambio topográfico, y el subíndice 2, representa la velocidad posterior al cambio topográfico.

La ecuación 6 resultó del ajuste de los datos de un estudio experimental empleando un túnel de viento para flujo que pasa sobre una superficie rugosa, pero que pasa a ser suave y viceversa, considerando cambios importantes de rugosidad.

## Otras fuentes para obtener datos del fenómeno

Una buena alternativa para obtener descripciones de fenómenos atmosféricos como el viento, la temperatura, la humedad y la presión, es dada por las publicaciones: Engineering Sciences Data Unit (ESDU) las cuales se editaron ininterrumpidamente desde 1974 y hasta 1999. En sus publicaciones se abordó, entre otros temas, el efecto de la topografía en los flujos de viento y modelos matemáticos de la turbulencia.

Para nuestro país son dos las instituciones que cubren los datos para el territorio nacional: el Servicio Meteorológico Nacional (SMN), el Instituto Estatal de Protección Civil (IEPC) y la Comisión Federal de Electricidad (CFE), las anteriores instituciones tienen oficinas en Chiapas y ofrecen información en línea en sus respectivas páginas de internet.

La Universidad de Ciencias y Artes de Chiapas (UNICACH) a través de la página de internet de la escuela de Ingeniería Ambiental, presenta mediciones de parámetros ambientales, entre ellos, la velocidad de los vientos registrados en un punto de sus instalaciones en Ciudad Universitaria desde el año 2009 por parte de alumnos y el docente de la asignatura de climatología y meteorología, correspondiente al mismo programa educativo.

## Normas de diseño por viento en Chiapas

*El Reglamento de Construcción de Tuxtla Gutiérrez (RCTGZ-2004)* <sup>[7]</sup> señala, en su artículo 370, que el H. Ayuntamiento expedirá normas técnicas para diseño por sismo o viento, las cuales a la fecha no existen. El análisis por viento de las construcciones en Chiapas se realiza principalmente de acuerdo con alguna propuesta normativa nacional, ya que en el estado se carece de una normativa técnica propia en materia de diseño estructural por viento. Aunque como se mencionó existe un reglamento de construcción (RCTGZ-2004) <sup>[7]</sup> que, en su artículo 377, señala que en casos especiales y por las dimensiones y geometría de las estructuras, se solicite una memoria de cálculo estructural avalada por un director responsable de obra que pertenezca a un colegio o sociedad técnica local.

Por otra parte, se encuentra que las dos opciones de Normas técnicas más empleadas para el diseño por viento en el estado de Chiapas son:

- *Normas técnicas complementarias de diseño por viento del reglamento de construcciones del Distrito Federal*, cuya última versión corresponde a la del año 2004 (NTCV-RCDF-2004) <sup>[8]</sup> y,
- *Manual de obras civiles de Comisión Federal de Electricidad, diseño por viento de 1993 (MOC-CFE-DV-1993)* <sup>[9]</sup>. Este manual está en ac-

tualización y tendrá una nueva filosofía de diseño; su impresión se realizará a finales del año 2009.

De estas dos alternativas, la primera normatividad técnica es la más empleada, a pesar de que está condicionada a una ciudad con características físicas muy distintas de las ciudades del estado de Chiapas, pero tiene la ventaja de que su empleo es más sencillo; a diferencia de la segunda norma, la cual es una propuesta nacional con procedimientos más complejos y detallados y muy similar a las norteamericanas.

### Ejemplo de diseño comparativo de distintas normas

A continuación se presenta un ejemplo comparativo donde se observan los efectos topográficos de acuerdo con cuatro reglamentos, códigos o normas de diseño por viento. La construcción corresponde a un edificio de 100 m de altura, el cual se encuentra sobre la cima de un terreno con  $z_0=0.20$  m cuyas características se ilustran en la figura 6. Se busca calcular el factor de topografía a 20 m de altura de la base del edificio, se normalizan los resultados con el factor calculado considerando el mismo edificio sobre terreno plano. Para el análisis comparativo se observan los reglamentos más empleados en el mundo y el más empleado en Chiapas.

- Australian and New Zealand Standard Structural Design Actions, part 2: Wind Actions, 4 June 2002 (AS/NZS-1170.2/2002) <sup>[10]</sup>-(Estándares estructurales, acciones de diseño, parte 2: acciones por viento, 4 de junio de 2002).
- Minimum Design Loads for Buildings and Other Structures, Section 7 Wind Design, United States, 2005 (ASCE/SEI 7/05) <sup>[11]</sup>-(Cargas mínimas de diseño para edificios y otras estructuras, sección 7, diseño por viento, Estados Unidos de América, 2005).
- Eurocódigo 1 <sup>[12]</sup> (Eurocódigos normas europeas experimentales, UNE-ENV 1991-parte 2-4, acciones por viento, mayo 1998).
- NTC-DV-RCDF-2004 <sup>[8]</sup> (Normas técnicas complementarias de diseño por viento del Reglamento de construcciones del Distrito Federal, México, 2004)

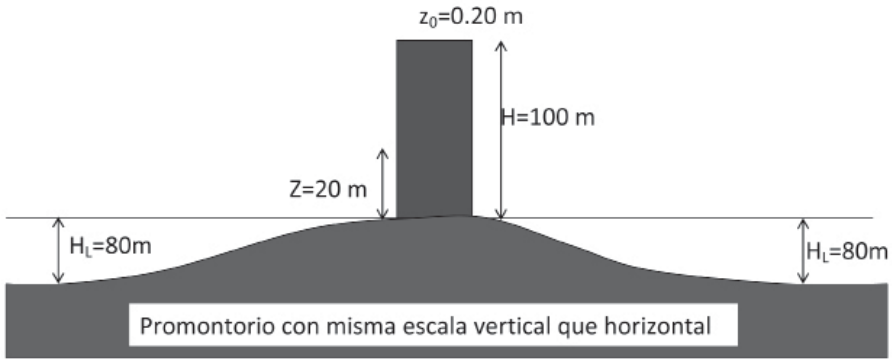


Figura 6. Esquema del ejemplo de aplicación con datos de diseño. [2]

Considerando las normas australianas y neozelandesas 2002 [10], se tiene el siguiente procedimiento:

La determinación del factor de topografía con las normas AS/NZS1170.2/2002 [10] se basa en relacionar las ecuaciones de la sección 4.4.2 del cuerpo de su norma con las variables mostradas en la figura 7, misma que representa la figura 4.2 del documento normativo citado.

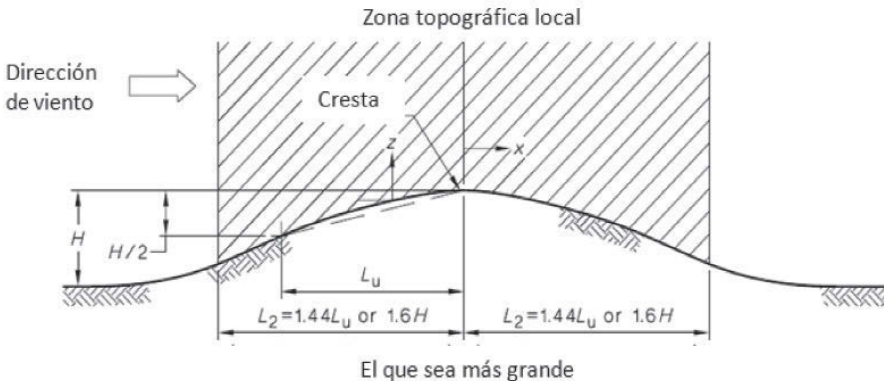


Figura 7. Esquema de colinas y promontorios, extraído del reglamento AS/NZS1170.2/2002, que corresponde a la figura 4.2. [10]

Las ecuaciones de la sección 4.4.2 de la norma australiana y neozelandesa se basan en las siguientes consideraciones: el factor de forma topográfica  $M_h$  se toma igual a 1.0, cuando no se tengan irregularidades como la que se muestra en la figura 7 (basada en la figura 4.2 del cuerpo normativo estudiado<sup>[10]</sup>) y que se ajusta a la presentada en el dibujo de la figura 6 del problema estudiado, en el caso contrario, el valor de  $M_h$  será igual a cualquiera de los reportados en los siguientes tres casos posibles:

Para  $H/(2L_u) < 0.05$ ,  $M_h = 1.0$

$$M_h = 1 + \left[ \frac{H}{3.5(z + L_1)} \right] \left( 1 - \frac{|x|}{L_2} \right)$$

Para  $0.05 < H/(2L_u) < 0.45$ ,

Para  $H/(2L_u) > 0.45$

Con base en lo anterior se tomaron las siguientes consideraciones:

- La zona de separación se obtendrá con la ecuación:

$$M_h = 1 + 0.71 * \left( 1 - \frac{|x|}{L_2} \right)$$

donde,  $H$  es la altura de la colina,  $L_u$  es la distancia horizontal viento arriba de la cresta de la montaña hasta la mitad de la altura bajo la cresta,  $x$  es la distancia horizontal viento arriba o viento debajo de la estructura a la cresta de la montaña,  $L_1$  es la escala de longitud en metros, para determinar la variación vertical de  $M_h$ , la cual se toma de  $0.36 L_u$  o  $0.40 H$  y  $L_2$  es la escala de longitud en metros, para determinar la variación horizontal de  $M_h$ , la cual es tomada de  $4 L_1$  viento arriba para todos los tipos, y viento abajo para colinas y acantilados, o  $10 L_1$  viento abajo para montañas y  $z$  es la altura de referencia sobre la estructura bajo el promedio del nivel local del suelo.

Considerando las variables de la figura 6 que contiene los planteamientos del enunciado del ejercicio, se puede observar que la región topográfica local se puede determinar a partir de las dimensiones propuestas en el ejercicio. En la figura 8 se muestran los valores de las distintas variables que se emplean en el análisis que se desarrolla a continuación.



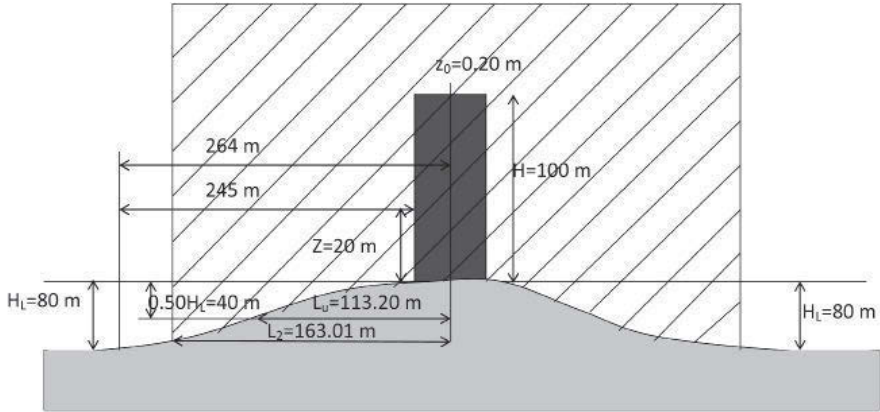


Figura 8. Datos para el diseño del edificio retomados a partir de la figura 6.

Para el presente ejemplo se consideran los siguientes datos:

$HL=80.00$  m, correspondiendo la mitad de la altura a  $0.5HL=80*0.50=40.00$  m, con la altura de análisis  $z=20.00$  m y la coordenada de inicio  $x=0.00$  m. Continuando con los cálculos  $L_u$  se obtiene por mediciones a escala de la figura del enunciado y es el punto más alto de la cresta al punto donde se alcanza  $H/2$  de la topografía, el cual corresponde a  $113.20$  m. A continuación se presentan los cálculos de  $L_1$  y  $L_2$ .

$L_2=1.44L_u=1.44*113.20=163.01$  m, de otra manera  $L_2=1.60H=1.60*80=128.00$  m.  
 $L_1=0.36L_u=0.36*113.20=40.75$  m, de otra manera  $L_1=0.40H=0.40*80=32.00$  m.

De acuerdo con las ecuaciones, los valores de la longitud son:  $L_u=113.20$  m,  $L_2=163.01$  m y  $L_1=40.75$  m. De acuerdo con lo anterior:

$\frac{H}{2L_u} = 0.353 > 0.05$ , por lo cual para calcular  $M_h$ , se puede emplear la ecuación:

$$M_k = 1 + \left[ \frac{H}{3.5(z + L_1)} \right] \left( 1 - \frac{|x|}{L_2} \right) = 1 + \left[ \frac{80}{3.5(20 + 40.75)} \right] \left( 1 - \frac{0}{163.01} \right) = 1.376.$$

Para normalizar el valor obtenido para una zona con un  $Z_o=0.20$  m, con respecto a una zona plana con un  $Z_o=0.02$  m, se obtienen los valores de exposición del terreno por medio de la tabla de la sección 4.2.2, del reglamento estudiado (AS/NZS1170.2/2002) <sup>[10]</sup>, la cual se denomina tabla 1.

Tabla 1. Multiplicadores de la altura del terreno para las velocidades de viento en todo tipo de terrenos para diseño por estado límite para las regiones A1 hasta A7, W y B. Denominada 4.1(A) por el reglamento AS/NZS1170.2/2002, del cual se transcribe. <sup>[10]</sup>

Altura (z), m	Terreno/Multiplicador de la altura ( $M_x$ , categoría)			
	Terreno categoría 1	Terreno categoría 2	Terreno categoría 3	Terreno categoría 4
≤3	0.99	0.91	0.83	0.75
5	1.05	0.91	0.83	0.75
10	1.12	1.00	0.83	0.75
15	1.16	1.05	0.89	0.75
20	1.19	1.08	0.94	0.75
30	1.22	1.12	1.00	0.80
40	1.24	1.16	1.04	0.85
50	1.25	1.18	1.07	0.90
75	1.27	1.22	1.12	0.98
100	1.29	1.24	1.16	1.03
150	1.31	1.27	1.21	1.11
200	1.32	1.29	1.24	1.16
250	1.34	1.31	1.27	1.20
300	1.35	1.32	1.29	1.23
400	1.37	1.35	1.32	1.28
500	1.38	1.37	1.35	1.31

Nota: Para valores intermedios de la altura  $z$  y la categoría del terreno, usar interpolación lineal.

De la tabla 1, se obtienen los datos para un  $Z_0=0.20\text{m}$ ,  $Ma_z=0.94$ , mientras que para un terreno con rugosidad  $Z_0=0.02\text{m}$ ,  $M_z=1.08$ . Aplicando los datos encontrados resulta:

$$F_{M_z M_z (Z_0=0.20)} = 1.376 * 0.94 = 1.293, \text{ al normalizarlo se tiene:}$$

$$F_{M_z M_z (Z_0=0.20)} / M_z (Z_0=0.02) = \frac{1.293}{1.08} = 1.198, \text{ el cual se coloca en la tabla 5}$$

para su comparación con los otros métodos.

Considerando las normas estadounidenses <sup>[1]</sup> del año 2005, se tiene el siguiente procedimiento de revisión:

La determinación del factor de topografía con las normas ASCE/SEI7/05, <sup>[1]</sup> se basa en utilizar las figuras de la página 45 de la norma citada y sus respectivas ecuaciones. Para el caso presente se emplea la figura que corresponde a promontorios asimétricos o rígidos de esa norma. Las variables involucradas en la determinación del factor que toma en cuenta la topografía y demás datos se muestran en la figura 9.

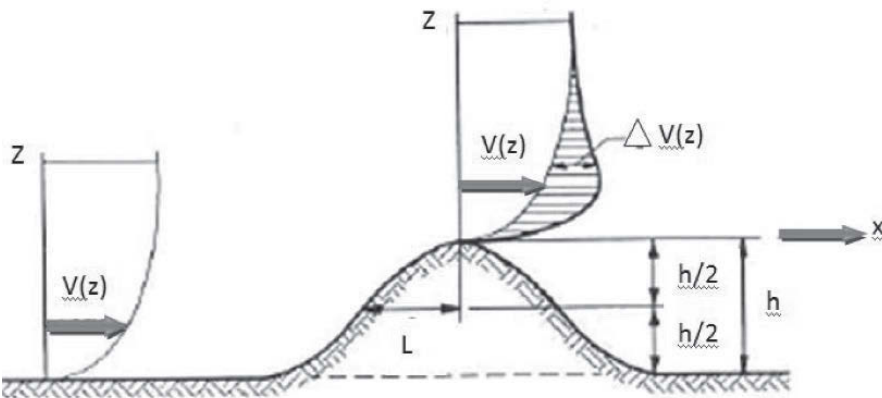


Figura 9. Colina o promontorio de dos dimensiones o de tres dimensiones asimétrica. Reglamento ASCE-SEI7-2005 <sup>[1]</sup> y retomado por MOC-CFE-1993. <sup>[9]</sup>

Las normas del MOC-DV-CFE-1993, <sup>[9]</sup> empleaban el mismo procedimiento que esta norma norteamericana, por lo cual no se realizó la revisión con esta norma y sólo se hizo con la original. Para la actualización reciente del manual de CFE se modificó el procedimiento a uno más congruente con la filosofía de diseño de la República Mexicana, aunque ha de señalarse que su empleo es sugerido pero no normativo en ninguna región del país.

En este caso se utilizan los valores calculados que corresponden a las variables identificadas en la figura 8. Recordar que esta figura contiene los datos que se emplearon para la revisión que se realizó con la norma AS/NZS1170.2-2002. <sup>[10]</sup> Estos se sustituyen por aquellos obtenidos en cada uno de los reglamentos que se analizan en este capítulo y además se consideran los factores propios del reglamento ASCE-SEI7-2005, <sup>[11]</sup> los cuales se encuentran agrupados en la tabla 2.

Tabla 2. Factores de Multiplicadores topográficos por exposición C retomado del reglamento ASCE-SEI7-2005, del cual se transcribe. <sup>[11]</sup>

H/L <sub>n</sub>	K <sub>1</sub> Multiplicador			x/L <sub>n</sub>	K <sub>2</sub> Multiplicador		z/L <sub>n</sub>	K <sub>3</sub> Multiplicador		
	2-D Ridge	2-D Escarp.	3-D Axisym. Hill		2-D Ridge	Todos los demás casos		2-D Ridge	2-D Escarp.	3-D Axisym. Hill
0.20	0.29	0.17	0.21	0.00	1.00	1.00	0.00	1.00	1.00	1.00
0.25	0.36	0.21	0.26	0.50	0.88	0.67	0.10	0.74	0.78	0.67
0.30	0.43	0.26	0.32	1.00	0.75	0.33	0.20	0.55	0.61	0.45
0.35	0.51	0.30	0.37	1.50	0.63	0.00	0.30	0.41	0.47	0.30
0.40	0.58	0.34	0.42	2.00	0.50	0.00	0.40	0.30	0.37	0.20
0.45	0.65	0.38	0.47	2.50	0.38	0.00	0.50	0.22	0.29	0.14
0.50	0.72	0.43	0.53	3.00	0.25	0.00	0.60	0.17	0.22	0.09
				3.50	0.13	0.00	0.70	0.12	0.17	0.06
				4.00	0.00	0.00	0.80	0.09	0.14	0.04
							0.90	0.07	0.11	0.03
							1.00	0.05	0.08	0.02
							1.50	0.01	0.02	0.00
							2.00	0.00	0.00	0.00

Notas para la tabla 2.

1. Para valores de  $H/L_h$ ,  $x/L_h$  y  $z/L_h$  se permite la interpolación lineal.
2. Para  $H/L_h > 0.5$ , se acepta que  $H/L_h = 0.50$  para evaluar  $K_1$  y se substituye  $2H$  por  $L_h$  para evaluar  $K_2$  y  $K_3$ .
3. Los multiplicadores están basados en la suposición que el viento se acerca a la colina o promontorio a lo largo de la dirección con la máxima pendiente.
4. Notación:
  - $H$ : altura del monte o promontorio relativo al terreno viento arriba, en pies o metros.
  - $L_h$ : distancia viento arriba de la cresta, donde la diferencia en la elevación del terreno es la mitad de la altura del monte o promontorio, metros.
  - $K_1$ : factor que considera la forma de la topografía y el efecto de la máxima velocidad creciente.
  - $K_2$ : factor que considera la reducción de la velocidad creciente con la distancia viento arriba o viento abajo en la cresta.
  - $K_3$ : factor que considera la reducción de la velocidad creciente con la altura cerca del terreno local.
  - $x$ : distancia (viento arriba y abajo) desde la cresta al lugar del edificio, en metros.
  - $z$ : altura bajo el nivel del terreno local, en metros.
  - $\mu$ : factor de atenuación horizontal.
  - $\gamma$ : factor de atenuación en la altura.

Considerando los elementos hasta ahora obtenidos para la norma estudiada y del esquema mostrado en la figura 8, se recuperan los siguientes datos:  $x=0.00$  m,  $z=20.00$  m,  $H=80.00$  m,  $L_h=113.20$  m y  $2H=160$  m. A partir de lo cual se puede calcular:

$$H / L_h = \frac{80.00}{113.20} = 0.707.$$

Dado que  $H/L_h > 0.5$ , se toma el valor de  $H/L_h = 0.50$  para evaluar  $K_1$  y se substituye  $2H$  por  $L_h$  para evaluar  $K_2$  y  $K_3$  tal como se menciona en

el punto dos de las notas de la norma ASCE/SEI7-2005, con lo que se tienen los siguientes valores de la tabla 2, a partir de esta información se obtiene  $K_1=0.53$  en la columna denominada 3-D Axisymmetric Hill. <sup>[11]</sup>

$x/2H = \frac{0.00}{2*80} = 0.00$ , en la tabla se tiene  $K_2=1.00$  (Para todos los demás casos). <sup>[11]</sup>

$z/2H = \frac{20.00}{2*80} = 0.125$ , en la tabla se tiene  $K_3=0.62$  (3-D Axisymmetric Hill). <sup>[11]</sup> Este valor se obtuvo mediante interpolación entre 0.10 y 0.20. <sup>[11]</sup> Donde:

$$K_{xy} = (1 + K_1 K_2 K_3)^2 = (1 + 0.53 * 1.00 * 0.62)^2 = 1.758$$

Para un  $z_0=0.20\text{m}$ ,  $K_z=0.834$ ; mientras que para un terreno con rugosidad  $z_0=0.02$ ,  $K_z=1.157$ . Con estos datos se puede normalizar el factor topográfico y el valor es:

$$K_{top(z_0=0.20)} / K_z(z_0=0.02) = \frac{1.758 * 0.834}{1.157} = 1.267$$

Considerando las normas europeas 1998, <sup>[12]</sup> se tiene el siguiente procedimiento de obtención del factor topográfico.

La determinación del factor de topografía del Eurocódigo 1-1998, se basa en utilizar las figuras 8.1 y 8.2 de las páginas 28 y 29 del cuerpo de la norma, para el caso presente se emplea la figura 10 correspondiente a la 8.2 <sup>[12]</sup>, la cual se muestra a continuación:

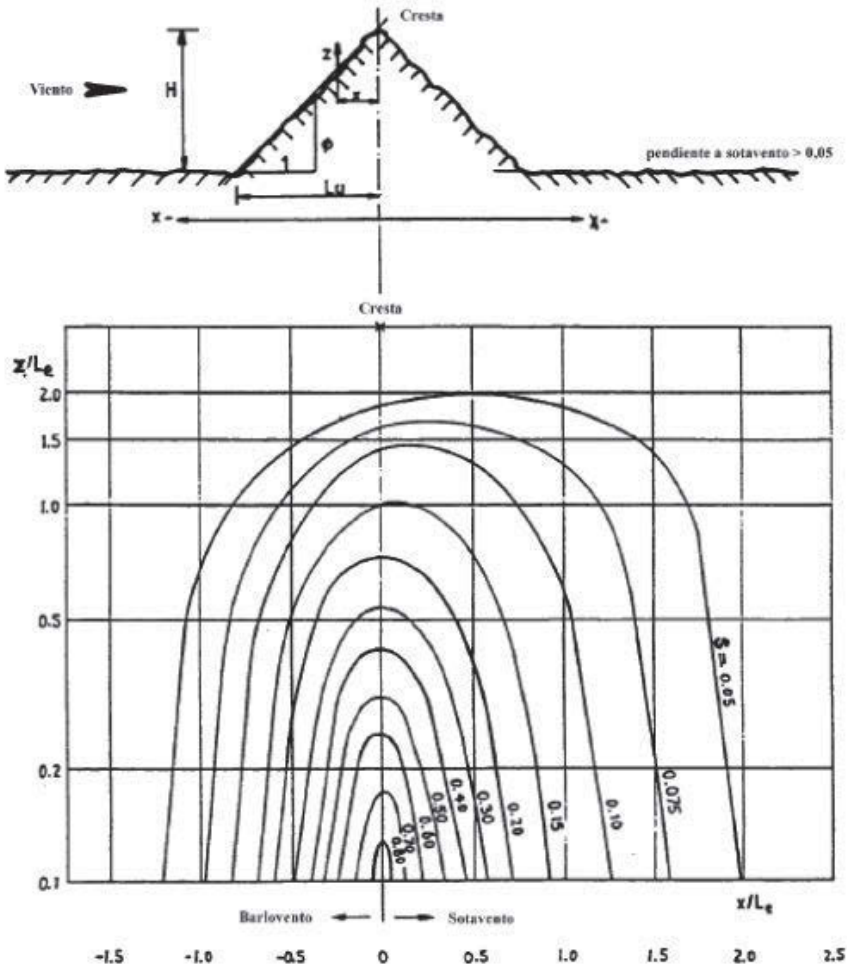


Figura 10. Factor  $s$  para colinas y sierras, figura 8.2 del Eurocódigo 1 - 1998. [12]

Considerando los elementos hasta ahora obtenidos de la norma estudiada y del esquema mostrado en la figura 8, se recuperan los siguientes datos:  $H=80.00$  m,  $L=163.01$  m y  $z=20.00$  m. A partir de los datos anteriores se calculan los siguientes parámetros:

$$\Phi=H/L=80.00/163.01=0.49 > 0.30 \text{ y } L_e=H/\Phi=80.00/0.30=266.67 \text{ m}$$

$$z/L_e=20.00/266.67=0.075, \text{ dado que } z/L_e, \text{ considerando la figura 10 de}$$

la norma europea [12], se observa que es un valor muy pequeño, por lo cual se considera que el valor de  $s=1.00$ , tras analizar lo anterior resulta:

$$C_t = 1 + 0.60s = 1 + 0.60 * 1.0 = 1.60$$

El factor de exposición del terreno es  $C_r=1.209$  para  $z_0=0.02$  m y  $C_r=0.806$  para  $z_0=0.20$ m, considerando lo anterior al normalizar se obtiene:

$$C_r(z_0=0.20) / C_r(z_0=0.02) = \frac{0.806 * 1.60}{1.209} = 1.067$$

Finalmente considerando las [Normas técnicas complementarias del reglamento de construcciones del Distrito Federal], México [8], resulta el siguiente procedimiento:

La determinación del factor de topografía de las NTC-DV-RCDF de 2004, se basa en utilizar las figuras 3.1 y 3.2 del cuerpo de la misma norma técnica mexicana [8]. A continuación se muestra el esquema en la figura 11:

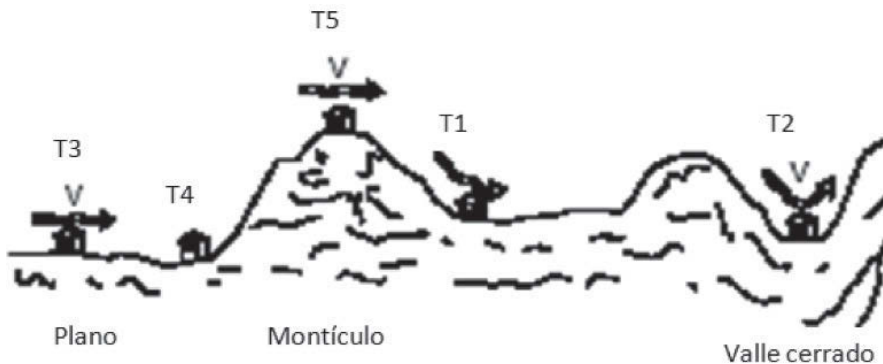


Figura 11. Formas topográficas locales que se ubican desde un terreno plano, montículo y valle cerrado, la cual se ubica en la figura 3.2 de las NTC-DV-RCDF-2004. [8]

Para el caso del factor de topografía, se observa que el reglamento lo coloca en función de la rugosidad del terreno, dicho factor se determina a partir de la tabla 3.



Tabla 3. Factor  $F_{TR}$  (factor de topografía y rugosidad del terreno), la cual se ubica en la tabla 3.3 de las NTC-DV-RCDF-2004, del cual se transcribe. [8]

Tipos de topografía	Rugosidad de terrenos en alrededor		
	Terreno tipo $R_2$	Terreno tipo $R_3$	Terreno tipo $R_4$
$T_1$ Base protegida de promontorios y faldas de serranías del lado de sotavento	0.80	0.70	0.66
$T_2$ Valles cerrados	0.90	0.79	0.74
$T_3$ Terreno prácticamente plano, campo abierto, ausencia de cambios topográficos, con pendientes menores de 5% (normal)	1.00	0.88	0.82
$T_4$ Terrenos inclinados con pendientes entre 5 y 10%	1.10	0.97	0.90
$T_5$ Cimas promontorios, colinas o montañas, terrenos con pendientes mayores de 10% cañadas o valles cerrados	1.20	1.06	0.98

El factor de topografía seleccionado en la tabla 4 de las NTC-DV-RCDF-2004, [8] corresponde a un terreno tipo  $R_3$  normalizado respecto al valor de  $R_2$ , como se puede observar en la figura 12.

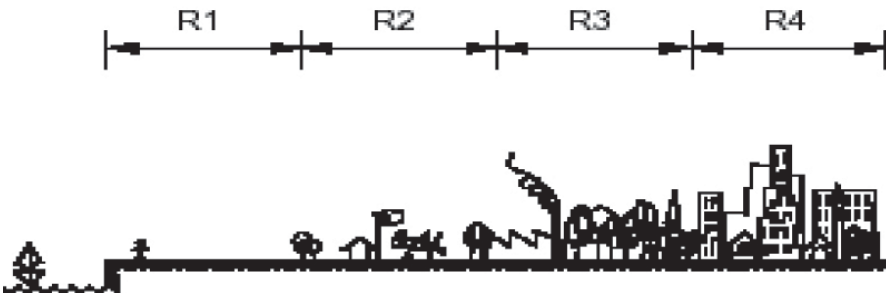


Figura 12. Rugosidad del terreno correspondiente a la figura 3.1 de las NTC-DV-RCDF-2004. [8]

Tabla 4. Rugosidad del terreno,  $\delta$  y  $\alpha$ , correspondiente a la tabla 3.2 de las NTC-DV-RCDF-2004, del cual se transcribe. [8]

Tipos de terreno	$\alpha$	$\delta$ , m
R <sub>1</sub> Escasas o nulas obstrucciones al flujo de viento, como en campo abierto	0.099	245
R <sub>2</sub> Terreno plano u ondulado con pocas obstrucciones	0.128	315
R <sub>3</sub> Zona típica urbana y suburbana. El sitio está rodeado predominantemente por construcciones de mediana y baja altura o por áreas arboladas y no se cumplen las condiciones del Tipo R <sub>4</sub>	0.156	390
R <sub>4</sub> Zona de gran densidad de edificios altos. Por lo menos la mitad de las edificaciones que se encuentran en un radio de 500 m alrededor de la estructura en estudio tiene altura superior a 20 m	0.170	455

Considerando los elementos hasta ahora obtenidos de la norma estudiada y del esquema mostrado en la figura 8, se recuperan los siguientes cálculos con los datos señalados anteriormente:

De la siguiente ecuación se tiene:

$$F_{\alpha} = \left( \frac{z}{10} \right)^{\alpha} \quad ; \quad \text{si } 10\text{m} < z < \delta$$

$$F_{\alpha} = \left( \frac{20}{10} \right)^{0.128} = 1.093 \quad \text{para la región } R_2 \text{ y} \quad F_{\alpha} = \left( \frac{20}{10} \right)^{0.156} = 1.114 \quad \text{, para la región } R_3$$

La normalización resulta:

$$F_{\alpha(z_0=0.20)} / F_{\alpha(z_0=0.02)} = \frac{1.06 * 1.114}{1.093} = 1.080$$

A continuación se presenta un resumen de los valores normalizados de acuerdo con los cuatro reglamentos estudiados:

Tabla 5. Comparación de resultados de los distintos reglamentos usados

<b>Norma estudiada</b>	<b>Factor de exposición normalizado con respecto al correspondiente a una longitud de rugosidad <math>z_0=0.02</math> m</b>
AS/NZS1170.2/2002	1.198
ASCE/SEI 7/2005	1.267
Eurocódigo 1-1998	1.067
NTC-DV-RCDF-2004	1.080

De acuerdo con lo mostrado en la tabla 5 se observa que el Reglamento norteamericano (ASCE/SEI 7/2005) <sup>[11]</sup> es el más conservador, mientras que las Normas técnicas complementarias del Distrito Federal (NTC-DV-RCDF-2004) <sup>[8]</sup> y el Eurocódigo 1-1998 <sup>[12]</sup> son los menos conservadores, por lo cual se explica que en todo México se recurra a la Norma Técnica de la capital del país para diseño por viento. Otro elemento a considerar es la sencillez de cálculo de los dos códigos menos conservadores, lo cual motiva su uso masivo.

## Comentarios finales

Los reglamentos estudiados son más complejos que los que se utilizan en México para el diseño por viento. Estas normativas estudian con más detalle el efecto de la topografía en la velocidad del viento y se basan en datos experimentales. Entre ellas destacan los reglamentos: AS/NZS1170.2/2002 (australiano y neozelandés) ASCE/SEI7/05 (norteamericano, principalmente para la costa este de los Estados Unidos de América).

Los países en que se han desarrollado estos reglamentos cuentan con historial en investigación e instrumentación en la materia. Por esta razón, la normativa mexicana, tradicionalmente, los ha tomado como base (aunque mayormente el MOC-CFE-1993, no así las NTC-DV-RCDF-2004). Cabe mencionar que en México el *Manual de obras civiles* (MOC-CFE-1993) tradicionalmente ha desempeñado el papel de norma nacional, sin embargo no es de cumplimiento obligatorio.

Existe una diferencia muy amplia entre lo que señala el reglamento norteamericano y lo que presentan las normas mexicanas. Pero más allá de la diferencia numérica y sus implicaciones, se debe estar consciente de las diferencias existentes en las investigaciones que los generaron. Las NTC-DV-RCDF-2004 son un reglamento desarrollado para una ciudad con las características del Distrito Federal. Por lo tanto es muy sencillo de emplear y por lo mismo conservador para algunos casos, pero no para todos como se mostró en el ejemplo. Sin embargo, hace falta trabajar en reglamentos locales para aquellas localidades que tienen una mayor presencia de estos fenómenos, tal como ocurre con algunas de las ciudades chiapanecas.

## Agradecimientos

Agradezco al doctor Emilio Zordo Sabay por las enseñanzas durante la materia ingeniería eólica en la Universidad Autónoma Metropolitana unidad Azcapotzalco, este trabajo se basa en ellas e incluso retoma un ejemplo de la materia para fortalecerlo.

Quiero manifestar un agradecimiento especial al doctor Alejandro Ruiz Sibaja, ya que desarrolló una revisión técnica pormenorizada y profesional, lo que permitió la mejora técnica del documento, pero sobre todo la claridad en el proceso de divulgación.

## Bibliografía

- [1] Holmes, J., 2001, *Wind Loading of Structures*. Spon Press by Taylor & Francis Group, London, England.
- [2] Sordo, E., 2006, *Apuntes de la materia de Ingeniería eólica*. Posgrado en Ingeniería Estructural, Universidad Autónoma Metropolitana Azcapotzalco, México, D.F.
- [3] Jackson, P. y J. Hunt, 1975, "Turbulent flow over a low hill" en *Quarterly Journal of the Royal Meteorological Society* 101: 929-55.
- [4] Glanville, M. y K. Kwok, 1997, "Measurements of topographic multipliers and flow separation from a steep escarpment. Part II" en *Model-scale measurements*, *Journal of Wind Engineering and Industrial Aerodynamics* 69-71: 893-902.
- [5] Deaves, D., 1981, "Computations of wind flow over changes in surface roughness" en *Journal of Wind Engineering and Industrial Aerodynamics* 7: 65-94.
- [6] Taylor, P. y R. Lee, 1984, "Simple guidelines for estimating wind speed variation due to small scale topographic features", en *Climatological Bulletin* 18: 3-32, Canada.
- [7] RCTGZ, 2004, *Reglamento de construcción de Tuxtla Gutiérrez, Chiapas*, México.

- [8] NTC-DV-RCDF, 2004, "Normas técnicas complementarias de diseño por viento" en Reglamento de construcciones del Distrito Federal, México.
- [9] MOC-DV-CFE, 1993, Manual de Obras Civiles de Comisión Federal de Electricidad, Instituto de Investigaciones Eléctricas, Cuernavaca Morelos.
- [10] AS/NZS-1170.2, 2002, Australian and New Zealand Standard Structural design actions, part 2: wind actions, 4 June.
- [11] ASCE/SEI 7, 2005, Minimum design loads for buildings and other structures, section 7 Wind design, United States.
- [12] Eurocódigo 1, 1998, Eurocódigos Normas europeas experimentales, UNE-ENV 1991-parte 2-4, acciones por viento.