

CONSIDERACIONES SOBRE LA ESTRUCTURA VERTICAL DE LA
VELOCIDAD DEL VIENTO EN ZONAS CON COBERTURAS VEGETALES

Alicia B. de Garín y Nicolás A. Mazzeo (*)
Departamento de Meteorología
Facultad de Ciencias Exactas y Naturales
Universidad de Buenos Aires
Argentina

RESUMEN

El desarrollo de expresiones representativas del intercambio turbulento de diferentes propiedades entre la vegetación y la atmósfera es importante para posteriores investigaciones relacionadas con el medio ambiente y la agricultura. Un parámetro incluido en estos intercambios es la velocidad del viento. En este trabajo, se amplía un modelo de perfil vertical de la velocidad del viento, desarrollado inicialmente para una capa de transición atmosférica neutral sobre coberturas vegetales, para ser aplicado en condiciones de estratificación inestable. Los resultados obtenidos en la posterior verificación, con datos observacionales, muestran un buen ajuste del modelo a diferentes condiciones atmosféricas reales.

ABSTRACT

The development of representative expressions about the turbulent exchange of different properties between vegetation and atmosphere is important for new investigations related to the environment and the agriculture. The wind speed is included among these exchanges. In this paper, a model of the vertical profile of the wind speed, first developed for a neutral atmospheric transition layer over vegetal canopy, is extended to unstable atmospheric conditions. The verification with observational data, show a good agreement for different conditions.

(*) Miembro de la Carrera del Investigador Científico del CONICET.

INTRODUCCION

El conocimiento del intercambio turbulento de la cantidad de movimiento, del calor sensible, del vapor de agua y de otras propiedades entre la vegetación y la atmósfera es de singular importancia práctica. Esto se debe a que una gran parte de la superficie terrestre está constituida por áreas "verdes".

El transporte turbulento desde y hacia superficies con distintas rugosidades ha sido estudiado teórica y experimentalmente (Denmead, 1964; Brown, 1964; Owen y Thompson, 1963; Cowan, 1968; Thom, 1972; Thompson, 1979). Sin embargo, excepto en coberturas vegetales con árboles y plantas de hojas que tienen un tamaño similar al de la planta y que no pueden ser fácilmente movidas por el viento, la mayoría de las plantas no son obstáculos frondosos típicos. Por otra parte, las superficies cultivadas constituyen elementos de rugosidad que no son de una naturaleza porosa y fibrosa. Esto significa que los argumentos de la semejanza euleriana utilizados para describir el flujo del aire que se desplaza sobre superficies con rugosidad homogénea, incluido coberturas vegetales frondosas, no son totalmente aplicables a áreas con plantas menos densas o distribuidas espacialmente.

En los últimos años, se originó un avance considerable en el estudio de los flujos turbulentos que se generan en la capa de aire dentro de la vegetación. Sin embargo, no se avanzó en el desarrollo de una formulación de los coeficientes de transporte turbulento inmediatamente por encima de la vegetación, (Chamberlain, 1966; Thom, 1972; Garrat y Hicks, 1973). La importancia del conocimiento de estos coeficientes es su vinculación con la hipótesis del flujo-gradiente, (Mazzeo, 1982) que es utilizada frecuentemente en modelos teóricos destinados a describir la estructura de la capa límite planetaria. Sin embargo, para su evaluación es necesario conocer la variación con la altura del valor medio de la propiedad considerada. De esta forma, el perfil del viento es necesario para la determinación de la componente vertical del flujo turbulento de la cantidad de movimiento. Las diferentes formas funcionales de la variación vertical de la velocidad del viento son distintas según se considere la capa atmosférica dentro de la zona cultivada, en la capa de transición o en la de flujos constantes (de Garín y Mazzeo, 1983).

En este trabajo se obtienen formas funcionales de la variación con la altura de la velocidad del viento en una capa de transición de una atmósfera estratificada inestablemente. Para ello, se utiliza una modificación de la hipótesis de la semejanza euleriana de Monin-Obukhov (Mazzeo, 1982).

EL MODELO

En un trabajo anterior (de Garín y Mazzeo, 1983) se presentó el desarrollo de un procedimiento destinado a conocer la estructura de la variación vertical de la velocidad del viento en la capa de transición, que está comprendida entre la altura (h) de la cobertura vegetal y el nivel (z_*) inferior de la capa de flujos constantes. En esta última, en condiciones de neutralidad atmosférica es válido el perfil logarítmico del viento.

En ese trabajo, se obtuvieron formas funcionales para describir la variación de la velocidad (\bar{u}) del viento con la altura (z) en condiciones neutrales, aplicando una alternativa de la hipótesis de la semejanza euleriana de Monin-Obukhov (Mazzeo, 1982). Una de las condiciones de aplicabilidad de esta hipótesis es que las superficies sobre las que fluye el aire sean aerodinámicamente suaves y homogéneas, no siendo este el caso de superficies con coberturas vegetales. Mediante ese procedimiento (de Garín y Mazzeo, 1983), se obtuvieron las siguientes expresiones:

$$\bar{u}(z) = \bar{u}(h) \frac{u_{*0}}{k} \frac{\phi'(1)}{2.41} \left[\left(\frac{z}{h} \right)^{-2.41} - 1 \right] \quad \text{si } 1 \leq \frac{z}{h} \leq 1.5 \quad (1)$$

$$\bar{u}(z) = \bar{u}(1.5h) + \frac{u_{*0}}{k} \phi'(1) (0.376 \ln \frac{z}{h} + 0.153) \quad \text{si } \frac{z}{h} \geq 1.5 \quad (2)$$

donde k es la constante de von Karmán,

u_{*0} es la velocidad de fricción en la capa de flujos constantes,

$$\phi'(1) = 1.11 + 0.496 (\bar{u}(h)/u_{*0}).$$

Asimismo, en ese trabajo (de Garín y Mazzeo, 1983 se efectuó una evaluación preliminar de las ecuaciones (1) y (2) con resultados satisfactorios. Sin embargo, la cantidad de los datos experimentales utilizados fue considerada insuficiente para dar una conclusión definitiva. En este trabajo, complementario del anterior, se utilizan los datos observacionales provenientes de la Expedición Koorin (Clarke y Brook, 1979) llevada a cabo en una zona forestal compuesta principalmente por acacias, ($h=10\text{m}$) en Australia.

En esta experiencia se efectuaron mediciones de la velocidad del viento a 9.96, 12.31, 15.76, 20.84 y 28.43m de altura y de las correlaciones entre velocidades turbulentas ($\overline{u'w'}$) y entre velocidad vertical y temperatura ($\overline{T'w'}$) obtenidas a 17.35m.

LA VELOCIDAD DE FRICCIÓN

La vegetación actúa como una importante superficie de arrastre, originando tensiones ($\tau = \rho u_{*0}^2$) producidas por cortante cuyo valor será máximo en $z=h$ y disminuirán gradualmente con la altura hasta adaptarse a las nuevas condiciones de la atmósfera y permanecerán constantes en la capa de superficie. En la capa de transición, se puede suponer que la velocidad de fricción es función de $\bar{u}(h)$, u_{*0} , z , h y L (La longitud de Monin-Obukhov) y se expresa, aplicando análisis dimensional clásico (Bridgman, 1937), como:

$$u_{*0} = u_{*0}(z) \cdot P(z/h, z/L, \bar{u}(h)/u_{*0}(z)) \quad (3)$$

donde P es una función adimensional, $L = -u_{*0}^3(z)/6(g/T_0)\overline{T'w'}$ (z),

(g/T_0) es el parámetro de empuje térmico.

En los datos provenientes de la Expedición Koorin, $z=17.35\text{m}$ y $h=10\text{m}$.

En la expresión (3) están incluidos los efectos de la variación con la altura y con la estabilidad atmosférica sobre la velo-

cidad de fricción en la capa de transición, como así también del coeficiente de arrastre,

$$C_D^{-1/2} = \bar{u}(h) / u_*(z)$$

La relación (3) es hallada, teniendo en cuenta la necesidad de obtener una fórmula que vincule la velocidad de fricción en la capa de transición con la correspondiente a la capa de flujos constantes, ya que los datos observacionales ofrecían u_* en un nivel dentro de la capa de transición (Clarke y Brook, 1979).

Cabe mencionar que, el argumento de semejanza (z/h) no es considerado en el presente trabajo, por ser el mismo único en la experiencia utilizada, $z/h=1.735$.

La forma funcional de P fue encontrada efectuando la reconstrucción de los perfiles del viento de una serie de 20 experiencias observacionales, haciendo variar u_{*0} en las expresiones (1) y (2) de acuerdo con diferentes porcentajes de $u_*(z)$ medido. Se seleccionó, para cada experiencia el porcentaje de $u_*(z)$ que correspondía a la reconstrucción de menor error medio en \bar{u} . Los porcentajes así seleccionados se encuentran graficados en la Figura 1, en función de la estabilidad atmosférica, para diferentes rangos de $\bar{u}(h)/u_*(z)$. En esta Figura se comprueba que la variación de P puede ser expresada para cada rango, como:

$$P = A \frac{z}{L} + B \quad \text{si } \left| \frac{z}{L} \right| \leq 0.325 \quad (4)$$

$$P = P(0.325) \quad \text{si } \left| \frac{z}{L} \right| \geq 0.325$$

donde $A = f(\bar{u}(h)/u_*(z))$ y $B = f(\bar{u}(h)/u_*(z))$.

En las Figuras 2 y 3, se muestra la relación de A y B con $(\bar{u}(h)/u_*(z))$ respectivamente, las que se pueden escribir de la siguiente forma:

$$A = -0.11 \frac{\bar{u}(h)}{u_*(z)} + 0.954 \quad (5)$$

$$B = 0.33 + 0.059 \frac{\bar{u}(h)}{u_*(z)} \quad (6)$$

Por lo tanto se puede expresar la relación (3) de acuerdo con:

$$u_{*0} = u_*(z) \cdot \left[\frac{z}{L} (-0.11 \frac{\bar{u}(h)}{u_*(z)} + 0.954) + 0.33 + 0.059 \frac{\bar{u}(h)}{u_*(z)} \right] \quad \text{si } \left| \frac{z}{L} \right| \leq 0.325 \quad (7)$$

$$u_{*0} = u_*(z) \cdot \left(0.020 + 0.095 \frac{\bar{u}(h)}{u_*(z)} \right) \quad \text{si } \left| \frac{z}{L} \right| \geq 0.325$$

COMPARACION CON DATOS OBSERVACIONALES

Para efectuar la comparación de las expresiones halladas con

datos experimentales, se reconstruyen 56 perfiles de viento diferentes a los utilizados en la determinación de las relaciones (7). Los valores observados y los calculados mediante las expresiones (1) y (2) con la (7) se encuentran graficados en la Figura 4. En ella se observa un buen ajuste que permite inferir la bondad del modelo desarrollado. En la Figura 4 se encuentra que en los niveles más alto y más bajo, el método sobreestima levemente, mientras que en los intermedios los valores medidos son subestimados ligeramente. El error relativo medio es de 2.5%.

En la Tabla 1 se observa la distribución de frecuencia de errores, donde se nota que las frecuencias disminuyen con el aumento del error, habiendo sólo un 6% de los errores mayores del 6%. En la Tabla 2 se encuentra la distribución de errores para distintos rangos de $(\bar{u}(h)/u_*(z))$, y es posible observar un ligero aumento del error con el aumento del parámetro. Por su parte la Tabla 3 incluye la distribución de errores correspondientes a diferentes rangos de estabilidad atmosférica, observándose que los mayores errores ocurren para las mayores inestabilidades y presentándose un mínimo para $-0.4 \leq \frac{z}{L} \leq -0.2$.

CONCLUSIONES

- De lo desarrollado en este trabajo se desprende que:
- el procedimiento expuesto permite obtener expresiones para la estimación cuantitativa de la velocidad del viento a diferentes alturas dentro de la capa de transición comprendida entre la copa de los árboles y el límite inferior de la capa de flujos constantes, en condiciones de inestabilidad atmosférica,
 - el procedimiento desarrollado permite estimar la velocidad de fricción en función de la altura, conociendo la altura de la vegetación, la estabilidad de la atmósfera y la velocidad de fricción en la capa de flujos constantes,
 - los resultados de las expresiones semiempíricas se ajustan satisfactoriamente a los datos experimentales,
 - el método produce algunas pequeñas sobreestimaciones y subestimaciones en los niveles superior e inferior, y medios respectivamente,
 - es necesario, para una generalización del método, ampliar el estudio a otros datos experimentales.

REFERENCIAS

- Bridgman, P.W.; 1937: "Dimensional Analysis", Univ. Yale.
- Brown, K.W.; 1964: "Vertical fluxes within the vegetative canopy of a corn field", Interin Report 64-1-Meteorology Dept. Arizona.
- Chamberlain, A.C.; 1966: "Transport of gases to from grass and grass-like surface", Proc. Roy. Soc. A 290, 236-260.
- Clarke, R. y Brook, R.; 1979: "The Koorin expedition, atmospheric boundary layer data over tropical savannah", Dept. of Science and Environment Bureau of Meteorology, Australian Government Publishing Service.

- Cowan, I; 1968; "Mass, heat and momentum exchange between stands of plant and their atmospheric environment", Quart. J. Roy. Met. Soc. Vol. 94, 523-544.
- de Garín, A. y Mazzeo, N.; 1983; "Estudio preliminar del perfil del viento sobre coberturas vegetales", a publicar en los Anales de la Sociedad Científica Argentina.
- Denmead, O.T.; 1964; "Evaporation sources and apparent diffusivities in a forest canopy", J. App. Met. Vol. 3, 383-389.
- Garrat, J.R. y Hicks, B.B.; 1973; "Momentum, heat and water vapour transfer to and from natural and artificial surface", Quart. J. Roy. Met. Soc. Vol. 99, 680-687.
- Mazzeo, N.A.; 1982; "Características de la turbulencia en la capa de superficie de la atmósfera", Publicación N°2 del Dept. de Meteorología, F.C.E. y N., UBA.
- Owen, P.R., Thompson, N.R.; 1963; "Heat transfer across rough surface" J. Fluid Mech. Vol. 15, 312-334.
- Thom, A.S.; 1972; "Momentum, mass and heat exchange of vegetation", Quart. J. Roy. Met. Soc. Vol. 98, 124-134.
- Thompson, N.R.; 1979; "Turbulence measurements above a pine forest" Bound. Layer Met. Vol. 16, 293-310.

TABLA 1

Distribución de Frecuencia de errores relativos ($\epsilon = (\bar{u}_{obs} - \bar{u}_{calc}) / \bar{u}_{obs}$)

Rango de $ \epsilon \cdot 100$	Frecuencia
0.00-1.00	65
1.01-2.00	40
2.01-3.00	40
3.01-4.00	33
4.01-5.00	22
5.01-6.00	10
> 6.00	14
Total	224

TABLA 2

Distribución de errores relativos por rangos de $\bar{u}_{(h)}/u_{*(z)}$.

Rango de $\bar{u}_{(h)}/u_{*(z)}$	3.00-4.00	4.01-5.00	5.01-6.00	> 6.00
Rango de $ \epsilon .100$				
0.00-1.00	16	33	12	5
1.01-2.00	7	22	4	6
2.01-3.00	5	23	9	3
3.01-4.00	5	19	6	3
4.01-5.00	5	12	2	3
5.01-6.00	1	8	-	1
> 6.00	1	3	7	3
Total	40	120	40	24
$ \bar{\epsilon} .100$	2.1	2.4	2.8	2.9

TABLA 3

Distribución de errores por rangos de estabilidad atmosférica. ($\frac{z}{L}$)

Intervalo de estabilidad	(0.0-0.2)	(0.2-0.4)	(0.4-0.6)	(0.6-0.8)	(0.8-1.0)	>1.0
Intervalos de error						
0.00-1.00	21	17	10	2	7	8
1.01-2.00	7	11	7	5	2	8
2.01-3.00	11	8	4	5	3	9
3.01-4.00	13	6	3	2	5	6
4.01-5.00	8	5	3	1	1	4
5.01-6.00	4	1	3	1	-	1
> 6.00	2	-	2	-	2	8
Total	66	48	32	16	20	44
$ \bar{\epsilon} .100$	2.7	2.0	2.5	2.4	2.5	3.2

FIGURA 1

Valores del porcentaje, de mejor ajuste de las expresiones (1) y (2), de $u_*(z)$ en función de la estabilidad atmosférica, para diferentes rangos de $\bar{u}(h)/u_*(z)$.

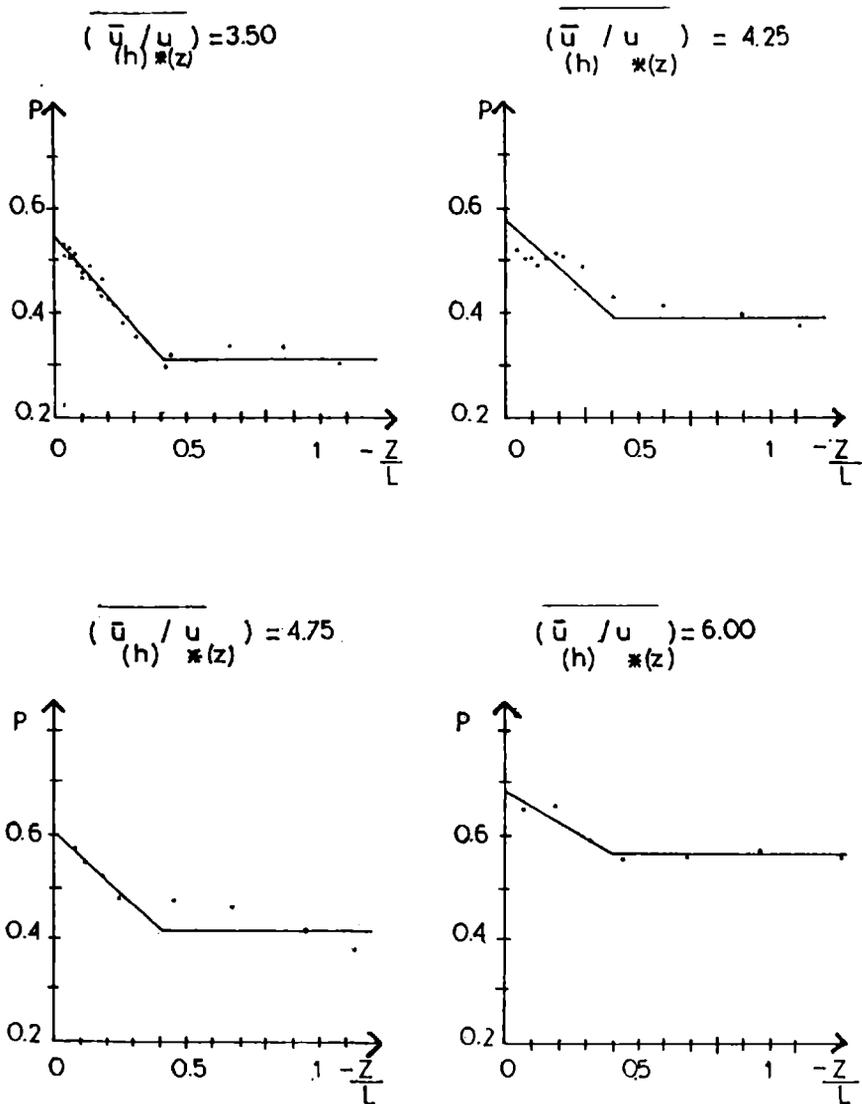


FIGURA 2

Valores del parámetro A en función de $\bar{u}_{(h)}/u_{*(z)}$.

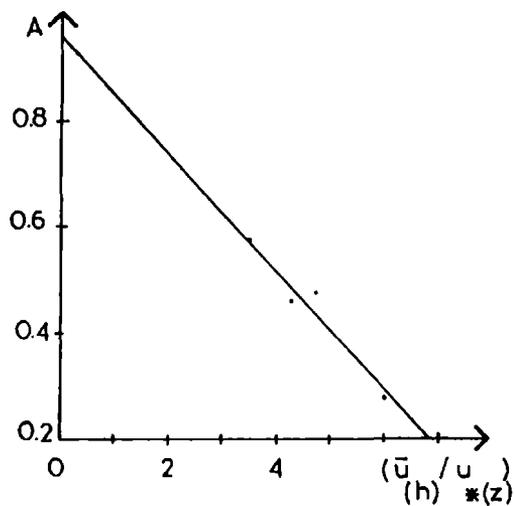


FIGURA 3

Valores del parámetro B en función de $\bar{u}_{(h)}/u_{*(z)}$.

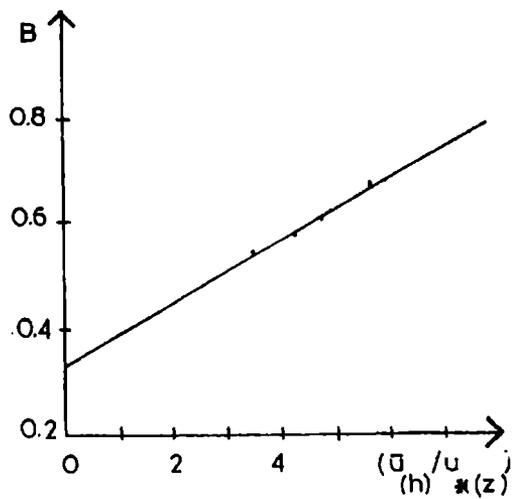


FIGURA 4

Comparación entre los valores de velocidad observados (\bar{u}_m) y los calculados por el modelo (\bar{u}_c). Los puntos representan las ^m velocidades de los niveles de 28.34 y 12.31 m, y las cruces las de 15.67 y 20.84 m.

