



EVALUACIÓN DE ESQUEMAS NUMÉRICOS DE CAPA LÍMITE ATMOSFÉRICA EN EL MODELO DE MESOESCALA WRF

Claudio Porrini

Alejandro Gutiérrez

IMFIA-FING-UdelaR
cporrini@fing.edu.uy

IMFIA-FING-UdelaR
aguti@fing.edu.uy

Resumen. En el presente trabajo se evalúa el desempeño de ocho diferentes esquemas numéricos de la capa límite atmosférica para alturas sobre el nivel de superficie, asociadas a la explotación del recurso eólico en parques eólicos. Se comparan simulaciones del modelo de mesoescala WRF para una grilla de 4 km de resolución horizontal con medidas de velocidad de viento a 100 metros de altura. Se discriminan los ciclos diarios, en casos de baja, media y alta velocidad de viento, por medio de un análisis de racimos (cluster). La mayoría de los esquemas muestran una sobrestimación para velocidades bajas durante la noche, un buen desempeño durante el día, y una subestimación para altas velocidades medias en las primeras horas del día.

Keywords: capa límite atmosférica, esquemas numéricos

1. INTRODUCCIÓN

La producción de energía eólica esta asociada al flujo de energía cinética en la capa límite atmosférica (CLA). A los efectos de la descripción del flujo de aire en la CLA, son relevantes tanto en valores medios como a las fluctuaciones entorno a los valores medios (turbulencia). Los procesos asociados a la transferencia de energía proveniente de la radiación solar, interactúan provocando mezclas turbulentas dado el intercambio de calor con la superficie terrestre. La radiación solar es determinante del ciclo diario en la CLA (Stull, 1988). En (de Almeida, 2015) se analiza desde el punto de vista de una descripción estadística el ciclo diario del perfil de velocidades y la intensidad de turbulencia en los primeros 100 metros de la CLA.

En los modelos de mesoescala se tienen diferentes esquemas numéricos para la simulación de los procesos físicos que se desarrollan en la atmósfera, de modo de generar información de la evolución futura de las variables que determinan el estado de la atmósfera (Pielke, 2013). Dentro de los modelos de mesoescala se tienen dos estrategias en lo que se refiere a los esquemas numéricos de la CLA, local y no-local y (Stensrud, 2007), así como diferentes órdenes de cierre de los esquemas numéricos en función de las ecuaciones utilizadas.

En este trabajo se evalúan ocho esquemas numéricos de la CLA implementados en el modelo numérico WRF (Skamarock, 2008). Se discriminan ciclos diarios por medio de un análisis de racimos de casos (clusters) (David, 2007), de modo de caracterizar eventos de velocidades de vientos bajas, medias y altas. En dichas condiciones se evalúa el BIAS para las diferentes condiciones de estabilidad en la CLA presentes en el ciclo diario.

2. ESQUEMAS NUMÉRICOS DE LA CAPA LÍMITE ATMOSFÉRICA EN LOS MODELOS DE MESOESCALA

Los modelos numéricos de mesoescala contienen formulaciones (esquemas), para los procesos físicos que se desarrollan en la atmósfera. A continuación, se describe en términos generales las diferentes estrategias de los esquemas numéricos de la CLA. En la CLA, se consideran despreciables las variaciones de la velocidad media en la vertical \bar{w} (ya que las mismas varían entre 0 y 0.1 m/s, mientras que las fluctuaciones w' pueden variar entre 0 y 5 m/s), asumiendo además que el flujo es homogéneo en el plano horizontal (\bar{u} , y \bar{v} componentes horizontales de la velocidad del viento tales que $\frac{\partial \bar{u}}{\partial x} = 0$ y $\frac{\partial \bar{v}}{\partial y} = 0$). A partir de las ecuaciones de balance de cantidad de movimiento, en base a las hipótesis anteriores se obtiene (1) y (2), presentando el gradiente de presiones en función del viento geostrofico $U_g = -\frac{1}{f_c \rho} \frac{\partial \bar{P}}{\partial y}$;

$$V_g = \frac{1}{f_c \bar{\rho}} \frac{\partial \bar{P}}{\partial x};$$

$$\frac{\partial \bar{u}}{\partial t} = f_c (\bar{v} - V_g) - \frac{\partial(\overline{u'w'})}{\partial z} \quad (1)$$

$$\frac{\partial \bar{v}}{\partial t} = -f_c (\bar{u} - U_g) - \frac{\partial(\overline{v'w'})}{\partial z} \quad (2)$$

En los esquemas numéricos de la CLA dentro de los modelos de mesoescala como el WRF se desarrollan diferentes estrategias para la descripción de los procesos de difusión turbulenta de calor, cantidad movimiento y masa (agua y otras especies como ser contaminantes). En lo que se refiere a la cantidad de movimiento la turbulencia dentro de la CLA se representa a través del coeficiente de difusión turbulenta K_m ($\overline{u'w'} = -K_m \frac{\partial \bar{u}}{\partial z}$; $\overline{v'w'} = -K_m \frac{\partial \bar{v}}{\partial z}$).

En términos de la formulación de los esquemas se tienen estrategias de cómputo del tipo no-local en la que K_m es dado como una función en altura (por ejemplo $K_m = kz w_s (1 - \frac{z}{h})^2$ (Hong et al, 2006) con la escala de velocidad w_s , siendo $k = 0,4$, z la altura y h la altura de la capa límite), el término no-local se refiere a que la difusión turbulenta se representa por una función, que no depende en esta formulación de los gradientes de velocidad media horizontal “locales” en altura.

En los esquemas locales, se plantea que K_m depende del gradiente de velocidad media local y de la longitud de mezcla turbulenta local (Mellor and Yamada, 1974; Mellor and Yamada, 1982), ($K_m = l^2 |\frac{\partial \bar{u}}{\partial z}|$, siendo l la longitud de mezcla y $|\frac{\partial \bar{u}}{\partial z}|$ el valor absoluto del gradiente local de la velocidad media horizontal). En los esquemas de mayor orden (de orden 1.5 y mayores), se agregan en el sistema de ecuaciones del modelo numérico de mesoescala el balance de energía turbulenta ($e = (u'^2 + v'^2 + w'^2)/2$) (Stull, 1988). También la ecuación del balance de calor considerando las fluctuaciones de temperatura θ' . En los modelos de orden 1.5, se tienen distintas formulaciones, las cuales en términos conceptuales, se expresa K_m como función de una escala de longitud de la turbulencia L , (que resulta de expresiones empíricas) por la raíz cuadrada del valor medio de la energía cinética turbulenta (Mellor and Yamada, 1974; Mellor and Yamada, 1982) ($K_m = L(\bar{e})^{1/2}$). Los esquemas numéricos de la CLA no-locales, son necesariamente de primer orden por la naturaleza de su definición de independencia a las condiciones locales, es decir no dependientes del gradiente de velocidad local (cortante) y de la energía cinética turbulenta local (e).

Una escala implícita en los esquemas numéricos que debe ser resuelta por las distintas formulaciones, es la altura de la capa límite ($PBLH$ planetary boundary layer height), la cual es una escala representativa de los vórtices más energéticos que producen la turbulencia (Stull, 1988). Las principales estrategias de cómputo de la altura de la capa límite, es el cálculo del valor crítico del número de Richardson (Ri), un valor umbral de energía cinética turbulenta (turbulent kinetic energy TKE). La altura de la CLA puede valer menos de 10 metros de noche hasta 2000 metros y más durante el día.

Las simulaciones en el modelo WRF se realizaron en base a condiciones iniciales del modelo GFS de 0.5 grado de resolución, con 41 niveles verticales, con dos grillas anidadas de 12 km y 4 km con esquemas de radiación RRTM de onda larga (Mlawer et al, 1997) y onda corta (Lacis and Hansen, 1974; Stephens, 1978), microfísica (Lin et al, 1983), el modelo de superficie Noah (Chen and Dudhia, 2001). El esquema de cumulus para 12 km fue el de Kain-Fritsch (Kain, 2004; Kain and Fritsch, 1990) con resolución explícita de cumulus para 4 km. Los esquemas numéricos de CLA analizados fueron YSU (Hong et al, 2006), MYJ (Mellor and Yamada, 1974; Mellor and Yamada, 1982), ACM2-Pleim (Pleim, 2007a; Pleim, 2007b), BouLac (Bougeault and Lacarrere, 1989), Bretherton-Park (Bretherton and Park, 2009), GBM-TKE (Grenier and Bretherton, 2001), Shin-Hong (Shin and Hong, 2015), and MYNN 2.5 (Nakanishi, 2001). En la figura 1 se presentan los dominios utilizados en la simulación numérica con el modelo WRF para los diferentes esquemas del CLA.

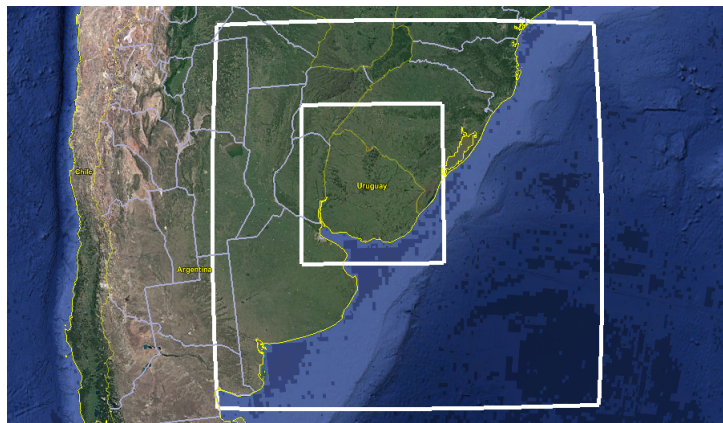


Figura 1. Dominios del modelo WRF anidados de 12 km y 4 km

Esquema – CLA	Tipo	Orden de cierre	Altura de la CLA
YSU	No-local	1	Ri
MYJ	local	1.5	TKE
ACM2-Pleim	No-local inestabilidad; local estabilidad	1	Ri
Boulac	local	1.5	TKE
Bretherton-Park	local	1.5	Ri
GBM-TKE	local	1.5	Salto de la inversión térmica
Shin-Hong	No-local función de la resolución de la grilla	1	Ri
MYNN	local	1.5	TKE

Cuadro 1. Esquemas numéricos de la CLA simulados en el WRF.

En cuadro 1 se presentan las estrategias de computo de los diferentes esquemas numéricos de la CLA evaluados en las simulaciones.

3. ANÁLISIS DE DESEMPEÑO DE LOS ESQUEMAS NUMÉRICOS

Se analizará el desempeño de los diferentes esquemas de simulación comparando las salidas del modelo con medidas de velocidad media de viento a 100 metros de altura realizadas en la torre Colonia Eulacio del sistema de medición de UTE (de coordenadas, Latitud 33,28° y Longitud 57,522°)

En la torre se tienen montados anemómetros de cazoletas (NRG Systems 40), la frecuencia de adquisición de datos es de 0.5 Hz, se registran valores cada diez minutos, en este trabajo se toman como referencia valores medios horarios, se compara el período 08/08/2014 – 07/08/2015.

3.1 Clasificación del ciclo diario.

Se realiza una clasificación de ciclos diarios, se consideran los vectores de velocidad media horaria a 100 metros de altura medidos de 00:00 a 23:00, se clasifican en condiciones de días con velocidad de viento baja ($V < 6m/s$), media ($6m/s \leq V < 8m/s$) y alta ($8m/s \leq V$).

Para las tres condiciones de velocidad media de viento, se hace una clasificación de días, a partir de los vectores del ciclo diario (vector de 24 componentes de velocidad media horaria) en dos racimos (clusters) para cada condición de velocidad, por medio de la metodología de k-means [kmean]. En la figura 2 se muestra el resultado de la clasificación de los ciclos diarios, se tuvieron para el año de datos analizado, 28.6 % días de baja velocidad, 41.2 % media y 30.2 % alta. El porcentaje de casos de ciclos de baja velocidad de viento C11 19.8 % C12 8.8 %, de media velocidad C21 11.0 % C22 30.2 %, y de alta velocidad C31 21.1 % C32 9.1 %.

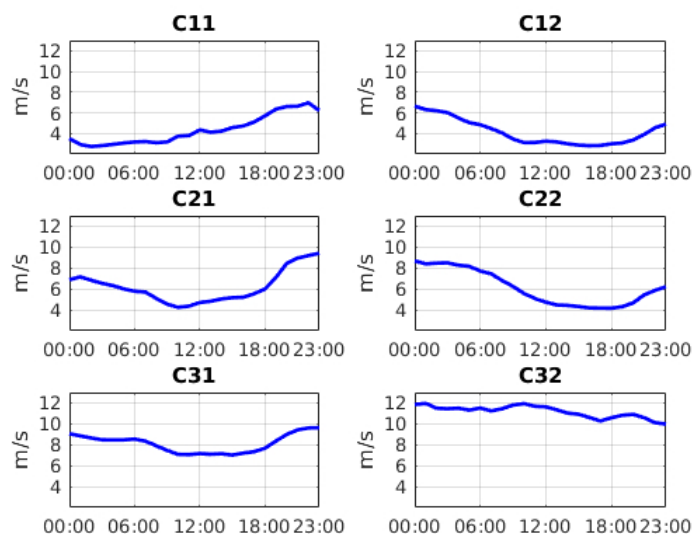


Figura 2. Ciclos diarios de la velocidad media (m/s) a 100 metros de altura medida en Colonia Eulacio.

Del análisis de los componentes del racimo (culster), se puede ver que los ciclos diarios de baja velocidad de viento C11 y C12, están caracterizados por muy bajas velocidades en la madrugada (C11 00:00 a 06:00) ó en las primeras horas

de la noche (C12 20:00 a 23:00). En el caso de las velocidades medias, tanto C21 y como C22 tienen marcados ciclos diarios, con bajas velocidades en las horas del día asociado a la mezcla por vórtices térmicos en la CLA. Para velocidades altas, en C31 se tiene todavía un marcado ciclo diario (altas velocidades durante la noche y bajas velocidades durante el día), en el caso de C32 correspondiente a mayores velocidades de viento, no se tiene un ciclo diario tan marcado.

3.2 Análisis de Esquemas Numéricos

En el análisis de racimos (cluster) para el año de datos, cada día se clasifica en función de las observaciones en días de velocidad baja, media o alta, y se le asigna a ese día como correspondiente a uno de los miembros del racimo (C11, C12, C21, C22, C31, C32). Luego se comparan las simulaciones del modelo de mesoescala WRF para los ocho esquemas numéricos (MYJ, YSU, ACM2-Pleim, BouLac, Bretherton-Park, GBM-TKE, Shin-Hong, and MYNN 2.5). Se calcula para cada hora y miembros del racimo el error, como valor pronosticado de la velocidad menos valor medido observado. Luego se calcula el *BIAS* como la media del error, ($BIAS = \overline{(\hat{V} - \bar{V})}$) siendo \hat{V} la velocidad pronosticada por el modelo de mesoescala, y velocidad medida en la torre de medición Colonia Eulacio \bar{V}). En la figura 3 se grafica el *BIAS* en los ciclos diarios para los ocho esquemas numéricos simulados para cada ciclo diario clasificado (C11, C12, C21, C22, C31, C32).

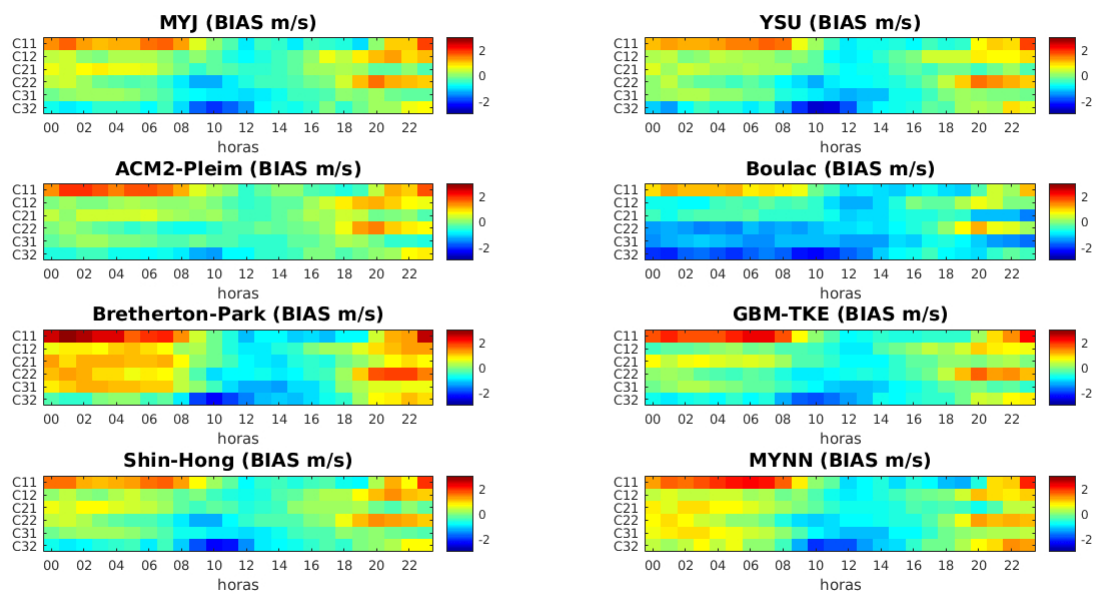


Figura 3. BIAS para los ciclos diarios los esquemas de CLA: MYJ, YSU, ACM2-Pleim, BouLac, Bretherton-Park, GBM-TKE, Shin-Hong, y MYNN 2.5.

Boulac es el esquema que muestra peor desempeño. Luego los restantes esquemas muestran una sobrestimación para velocidades bajas durante la noche, un buen desempeño durante el día, y una subestimación para altas velocidades medias en las primeras horas del día. MYJ es el esquema que muestra mejor desempeño en general. ACM2-Pleim es el esquema que muestra mejor desempeño para velocidades de viento altas.

4. CONCLUSIONES

Luego del análisis del desempeño en la simulación de la velocidad a 100 metros sobre el nivel de superficie de ocho esquemas de simulación de la CLA del modelo WRF (MYJ, YSU, ACM2-Pleim, BouLac, Bretherton-Park, GBM-TKE, Shin-Hong, y MYNN 2.5). Se observa que Boulac es el esquema que muestra peor desempeño. Los restantes esquemas muestran una sobrestimación para velocidades bajas durante la noche, un buen desempeño durante el día, y una subestimación para altas velocidades medias en las primeras horas del día. MYJ es el esquema que muestra mejor desempeño en general. ACM2-Pleim es el esquema que muestra mejor desempeño para velocidades de viento altas.

5. REFERENCIAS

- Bougeault, P., Lacarrere. P, 1989. Parameterization of orography induced turbulence in a mesobeta-scale model. *Mon. Wea. Rev.* 117, 1872-1890.
- Bretherton, C. S., Park, S., 2009. A new moist turbulence parameterization in the Community Atmosphere Model. *J. Climate.* 22, 3422-3448.
- Chen, F., and Dudhia, J., 2001. Coupling an advanced land-surface/ hydrology model with the Penn State/ NCAR MM5 modeling system. Part I: Model description and implementation. *Mon. Wea. Rev.*, 129, 569-585.
- Bretherton, C. S., Park, S., 2009. A new moist turbulence parameterization in the Community Atmosphere Model. *J. Climate.* 22, 3422-3448.
- Chen, F., and Dudhia, J., 2001. Coupling an advanced land-surface/ hydrology model with the Penn State/ NCAR MM5 modeling system. Part I: Model description and implementation. *Mon. Wea. Rev.*, 129, 569-585.
- David A., Vassilvitskii S., 2007. "K-means++: The Advantages of Careful Seeding." *SODA '07: Proceedings of the Eighteenth Annual ACM-SIAM Symposium on Discrete Algorithms*, pp. 1027–1035.
- de Almeida E. L., Gutierrez A., Romero M., Cazes G., Cataldo J., 2016. Descrição estatística do ciclo diário do vento nos primeiros 100 metros de altura da C.L.P na localidade de Colonia Eulacio, Uruguai, *Ciência e Natura v.38 Ed. Especial- IX Workshop Brasileiro de Micrometeorologia*, p. 426– 434.
- Grenier, H., Bretherton, C. S., 2001. A moist PBL parameterization for large-scale models and its application to subtropical cloud-topped marine boundary layers. *Mon. Wea. Rev.* 129, 357-377.
- Hong, S., Noh Y., Dudhia J., 2006. A new vertical diffusion package with an explicit treatment of entrainment processes. *Mon. Wea. Rev.* 134, 2318-2341.
- Kain, J. S., Fritsch, J. M., 1990. A one-dimensional entraining/detraining plume model and its application in convective parameterization, *J. Atmos. Sci.* 47, 2784-2802.
- Kain, J.S., 2004. The Kain-Fritsch convective parameterization: an update. *J. Appl. Meteor. Climatol.* 43, 170–181.
- Lacis, A. A., Hansen, J. E., 1974. A parameterization for the absorption of solar radiation in the earth's atmosphere. *J. Atmos. Sci.* 31, 118-133.
- Lin, Y. L., Farley, R. D., Orville, H. D., 1983. Bulk parameterization of the snow field in a cloud model. *J. Climate Appl. Meteor.* 22, 1065-1092.
- Mellor, G. L., Yamada, T., 1974. A hierarchy of turbulence closure models for planetary boundary layers. *J. Atmos. Sci.* 31, 1791-1806.
- Mellor, G. L., Yamada, T., 1982. Development of a turbulence closure model for geophysical fluid problems. *Rev. Geophys. Space Phys.* 20, 851-875.
- Mlawer, E. J., Taubman, S. J., Brown, P. D., Iacono, M. J., Clough, S. A., 1997. Radiative transfer for inhomogeneous atmosphere: RRTM, a validated correlated-k mod.
- Nakanishi, M., 2001. Improvement of the Mellor-Yamada turbulence closure model based on large-eddy simulation data. *Bound. Layer. Meteor.* 99, 349-378.
- Pielke, R. A., 2013. *Mesoscale Meteorological Modeling Academic Press eBook ISBN: 9780123852380.*
- Pleim, J. E., 2007a. A combined local and nonlocal closure model for the atmospheric boundary layer. Part I: Model description and testing. *J. Appl. Meteor. Climatol.* 46, 1383-1395.
- Pleim, J. E., 2007b. A combined local and nonlocal closure model for the atmospheric boundary layer. Part II: Application and evaluation in a mesoscale meteorological model. *J. Appl. Meteor. Climatol.* 46, 1396-1409.
- Shin, H., Hong, S., 2015. Representation of the Subgrid-Scale Turbulent Transport in Convective Boundary Layers at Gray-Zone Resolutions. *J. Atmos. Sci.* 143, 250-271
- Skamarock, W. C., and co-authors, 2008. *A Description of the Advanced Research WRF Version 3. NCAR/TN 475+STRNCAR Tech. Note.*
- Stensurd, D. J., 2007. *Parameterization Schemes: Keys to Understanding Numerical Weather Prediction Models Cambridge University Press.*
- Stephens, G. L., 1978. Radiation profiles in extended water clouds. Part II: Parameterization schemes, *J. Atmos. Sci.* 35, 2123-2132.
- Stull R.B., 1988. *An Introduction to Boundary Layer Meteorology (Atmospheric Sciences Library). Kluwer Academic Publishers, Dordrecht. ISBN 90-277-2768-6.*

6. RESPONSIBILITY NOTICE

Los autores son los unicos responsables por el material impreso en este trabajo.