

**ESTUDIO DEL FENOMENO DE MEZCLA EN NUBES  
CON UN SIMPLE MODELO NUMERICO 3D**

GIORGIO M. CARANTI y CARLOS M. SCAVUZZO  
*Facultad de Matemática, Astronomía y Física,  
Universidad Nacional de Córdoba.  
Laprida 854, 5000 Córdoba, Argentina.*

**RESUMEN**

En este trabajo se presenta un estudio del mecanismo de mezcla de aire que sufren las nubes convectivas con el aire del entorno, utilizando los campos de viento, temperatura, presión y contenido de agua líquida obtenidos con un modelo de simulación numérico 3D. Este estudio se realizó a través del análisis de dos variables que se conservan ante movimientos adiabáticos de la parcela estudiada; y que se mezclan en forma casi lineal; ellas son la temperatura potencial equivalente húmeda y la cantidad total de sustancia agua (vapor + agua líquida).

Los resultados obtenidos en este trabajo muestran que las conclusiones obtenidas a través de mediciones "in situ" son en parte recuperadas. Además puede concluirse que la mezcla de aire desde los sectores superiores de la nube debería ser de tipo turbulento y no producida por corrientes descendentes organizadas. Los resultados confirman además la buena performance del modelo en la descripción de la circulación del aire en la nube. Este trabajo muestra por otra parte las ventajas que ofrece el estudio de propiedades de las nubes convectivas realizado a través de modelos numéricos adecuados.

**ABSTRACT**

In this paper the study of the entrainment in cloud is presented using the wind, temperature, pressure, and water contents fields of a 3D numerical cloud model.

This study is done using two parameters that conserved with adiabatic altitude changes and that mix in a nearly manner. they are the total water contents and the equivalent potential temperature.

The results show that the conclusions obtain with "in situ" measurement are recuperated. Also can be concluded that the entrainment with upper sector will be turbulent and not organized. For other hand this results confirm the good performance of the numerical cloud model. The advantage of numerical estudy of cloud physics are showed.

**Introducción**

El fenómeno de mezcla de aire o "Entrainment" que se produce en una nube desde el exterior a ésta, ha sido analizado en forma sistemática por su importancia en la determinación en forma simplificada de los contenidos de agua líquida, cristallitos de hielo, alturas del tope de la nube, etc. a través de modelos numéricos uni-dimensionales super-simplificados.

El fenómeno de mezcla en nubes tipo cumulus ha sido muchas veces comparado con la

mezcla en "Plumes" (Norton 1957) [1] o "burbujas" (Scorer and Ludlan 1953) [2], modelados en tanques en laboratorio. Las nubes sufren mezcla de aire del exterior a través de los lados y este es llevado hacia arriba por la corriente ascendente. Así a una dada altitud, el aire de la nube en la corriente ascendente, debería tener mezcla del aire del exterior proveniente desde abajo.

Un diferente mecanismo de mezcla fue propuesto por Squires (1958) quien mostró que aire de la nube mezclado con aire del entorno, en el tope de la nube, bajaba por enfriamiento evaporativo, el cual podía causar que esta mezcla de aire penetrara hacia abajo diluyendo el aire de la nube de más abajo. El notó que en pequeños cumulos no presipitantes, esta mezcla con aire del tope de la nube producía una mejor explicación a los contenidos de agua líquida observados, y variaciones de la temperatura con la altura que aquellos basados en la teoría de mezcla horizontal que toman los modelos de burbuja.

Más recientemente, Telford (1975) [3] postuló un mecanismo de mezcla con el entorno, en el cual el aire de afuera entra también a través del tope de la nube. El mostró que la dilución del aire de la nube con la altura, respecto a los valores predichos por la aproximación adiabática, y la mayoría de los hechos dinámicos observados durante la vida de pequeños cumulos pueden explicarse postulando que existe una mezcla de aire desde el tope de la nube que desciende rápidamente hasta que este llega a una equilibrio de fuerzas de empuje con el entorno.

Paluch (1979) [4] investigó las propiedades del aire de nube y del aire del entorno para determinar la altura desde la cual la mezcla se producía. Este estudio se realizó a través de la utilización de dos variables que se concierban ante movimientos adiabáticos de la parcela estudiada; y que se mezclan en forma casi lineal; ellas son la temperatura potencial equivalente húmeda y la cantidad total de sustancia agua (vapor + agua líquida). El método por ella empleado es aplicable a regiones de la nube que no posean gran cantidad de presipitación, ni de hielo. Sus estudios fueron basados en mediciones "in situ" [5] dentro cumulos continentales y de sus resultados se concluye que la mayoría del aire mezclado proviene de niveles varios kilómetros por arriba del nivel de observación. Además este autor postula que la dilución del aire de la corriente ascendente, es a través de la mezcla con el aire de la corriente descendente que proviene de arriba.

Con el presente trabajo se pretende estudiar la hipótesis de que el aire de la nube a una dada altura esta compuesto de una mezcla del aire claro proveniente de la zona de abajo de este lugar con los sectores superiores al sitio de observación y cual es el mecanismo por el cual esta mezcla se produce. Aprovechando la mayor información que nos provee el modelo de nube desarrollado por los autores [6], comparado con las mediciones "in situ" mostradas por Paluch (79), es posible estudiar tal fenómeno con mayor detalle. Además comparando los resultados obtenidos con el modelo numérico de nube, con la mediciones reales es posible testear la circulación de aire producida por el modelo. Como ejemplo de esto se estudiara a una parcela en su evolución dentro de la nube.

Además en este trabajo se pretende mostrar las ventajas que ofrece el estudio, de propiedades de las nubes convectivas, realizado a través de modelos numéricos adecuados.

#### Parámetros utilizados para el análisis

En ausencia de hielo y de gotas de presipitación es posible reducir la temperatura, presión y contenido de agua líquida a solo dos variables que sean invariantes ante ascensos

adiabáticos y que se mezclen en forma casi lineal.

Uno de estos parámetros es la razón de mezcla total de sustancia agua  $Q$  (masa de sustancia agua dividido masa de aire), la cual es la suma de la razón de mezcla de vapor más la razón de mezcla de agua líquida. Si dos parcelas de aire son mezcladas en proporciones  $x$  e  $y$  de manera tal que  $x + y = 1$  (masa unitaria), entonces la razón de mezcla total de la parcela final  $Q$  será el promedio lineal de las razones de mezcla de las parcelas originales  $Q_f = xQ_1 + yQ_2$ , donde los subíndices 1 y 2 denotan las parcelas originales y la "f" denota la parcela final.

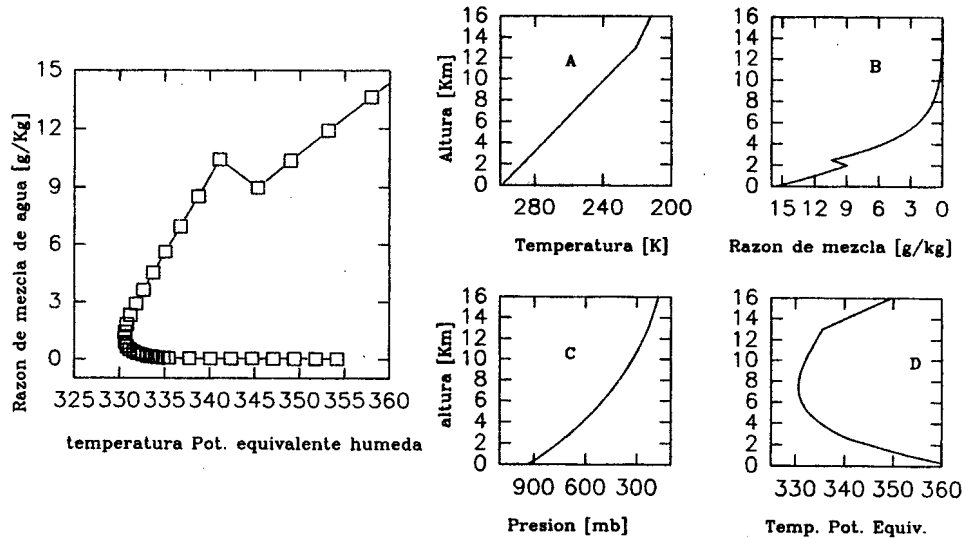


Figura 1:: valores iniciales de razon de mezcla total vs temp. potencial equivalente.

Figuras 2 A,B,C y D: valores iniciales de las variables Atmosfericas

Otro parámetro que es conservado ante cambios de altitud adiabáticos, pero que no se mezcla en forma estrictamente lineal, es la entropía específica. La variable utilizada en este estudio, como en Paluch (79) [4], es un parámetro de temperatura que contiene la entropía específica en el exponente. Esta variable de temperatura es llamada "temperatura potencial equivalente húmeda  $\theta_q$ , y esta está definida por:

$$\theta_q = T \left( \frac{1000}{P_d} \right)^{(R_d/C_{pd})/(1+C_w Q/C_{pd})} \text{EXP} \left[ \frac{qL/C_{pd}T}{(1+C_w Q/C_{pd})} \right]$$

donde  $T$  es la temperatura [K],  $L(T)$  es el calor latente de vaporización,  $C_{pd}$  y  $C_w$  son los calores específicos del aire seco a presión constante y del agua respectivamente,  $R_d$  es la constante de los gases para el aire seco,  $P_d$  es la presión parcial del aire seco y  $q$  la razón

de mezcla del vapor de agua.

Es mostrado por Paluch (79) [4] que su no linealidad en la mezcla, dentro de los valores de interés, no produce un error mayor de los  $0.3K$ . La temperatura potencial equivalente húmeda puede interpretarse como la temperatura que tendría una parcela al nivel del mar (1000 mb) si hubiera ascendido en forma adiabática, condensando agua de tal forma de estar siempre a nivel de saturación, en forma reversible.

En un gráfico de  $Qvs\theta_q$  el aire del zondeo antes de que la nube se formara se ve como lo muestra la figura 1. Ahora si aire de un nivel del entorno se mezcla con aire de otro nivel en diversas proporciones entonces los puntos  $Q, \theta_q$  del aire mezclado deberían estar muy próximos a la línea que une los puntos  $Q, \theta_q$  de los dos niveles originales. Si se mezcla aire de varios niveles diferentes del entorno los puntos  $Q, \theta_q$  del aire mezclado deberían estar en la zona entre los valores extremos del aire original.

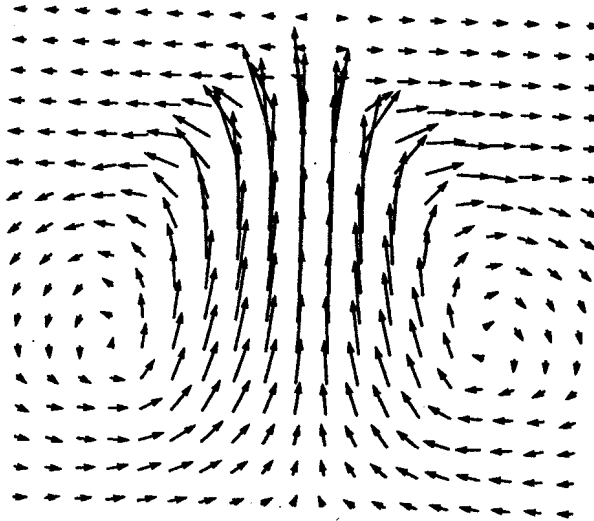


Figura 3: Campos de viento de la nube simulada 15 min después de iniciada la convección. Plano Z-X. Máxima velocidad vertical 30m/s

### El modelo de nube

Como se dijo con anterioridad los datos de nube sobre los cuales se realizó el estudio fueron extraídos de los resultados arrojados por un modelo numérico 3D de convección Atmosférica profunda no presipitante (Scavuzzo et al 1992) [6]. Este modelo es capaz de simular la etapa de desarrollo de una nube convectiva, sin ninguna simetría predeterminada en 2 hs corriendo sobre una pequeña "workstation". El modelo resuelve sus ecuaciones pronósticas en diferencias finitas sobre una grilla tipo "stagger" de 500m de parámetro de

red, en un dominio cúbico de 16km de lado.

La ecuación diagnóstica resultante para la perturbación de la presión es resuelta por un método pseudo-espectral, Consistente de utilizar transformada rápida discreta de Fourier en las coordenadas "x" e "y" y así resolver problemas más pequeños uno para cada par de números de onda.

Las suposiciones básicas sobre las cuales se basa dicho modelo son las siguientes:

- Se asume la aproximación anelástica, o sea que se desprecia la derivada temporal de la densidad en la ecuación de continuidad del aire.

- La precipitación y la fase hielo no se incluyen en esta primera etapa del trabajo.

- Ya que la escala temporal es de alrededor de una hora, es razonable despreciar la fuerza de Coriolis.

- El agua líquida se mueve con la velocidad del aire. (agua de nube)

- En aire saturado, la parcela cambia su temperatura según el ritmo adiabático húmedo. Si la parcela está sobresaturada se lleva a la saturación instantáneamente y si hay agua líquida en un lugar no saturado, se evapora hasta alcanzar la saturación también instantáneamente.

### Resultados obtenidos

Los datos analizados fueron obtenidos de una nube simulada cuyas características se muestran en la figura 2 a), b), c) y d). En ellas se presentan respectivamente los zondeos de temperatura, razón de mezcla total y presión y temperatura potencial equivalente antes de que se iniciara la convección. En la figura 3 se presentan los campos de viento, en un plano Z-X 15 minutos después de iniciada la convección. Las flechas verticales más grandes representan velocidades de 30m/s.

En las figuras 4 a) y b) se muestran los valores  $Q, \theta_q$  obtenidos para 3 parcelas contiguas de  $500m^3$  cada una, partiendo desde el centro de la corriente ascendente para dos instantes de tiempo. En a) los puntos elegidos están a los 5km de altura y en b) a los 7 km. Cabe destacar que no seguimos a la parcela sino que se analizan las características del aire en cada lugar fijo para diferentes tiempos. Junto a estos valores se superpone la curva del zondeo inicial de la nube. Puede verse, que en ambas, existe una mezcla desde el nivel de observación con aire de abajo y que la cantidad de aire de sectores inferiores al de observación crece cuando el tiempo va transcurriendo ya que puede notarse como los puntos se van aproximando a los valores de sectores inferiores del zondeo inicial.

En la figura 5 se muestran, en un gráfico similar al de la fig. 4. Los valores  $Q, \theta_q$  obtenidos para 3 parcelas juntas a un tiempo fijo para dos niveles diferentes 4km y 7km pero en otra nube simulada de características un tanto diferentes. En esta se puede observar como el hecho de la alineación de los valores se sigue cumpliendo, verificando la generalidad de los resultados encontrados para el caso estudiado con mayor detalle.

Aprovechando las ventajas que provee el análisis de los datos provenientes de un modelo numérico de nube, se analizaron los datos de parcelas siguiéndolas en el tiempo (esto sería imposible con mediciones "in situ", ya que un avión no podría nunca seguir el ascenso de una parcela). O sea que ya no analizamos las características del aire para un lugar fijo sino que se sigue a la parcela en su ascenso. En teoría, si no hubiera mezcla, la parcela debería tener el mismo valor  $Q, \theta_q$  para todo tiempo, ya que, como se dijo antes, estas variables se conservan ante ascensos adiabáticos. En las figuras 6 a) y b) se muestran estos valores siguiendo dos parcelas en a) una 1500 m a un lado de la corriente ascendente y en b) una sobre esta corriente ascendente. La segunda, parte inicialmente de los 2.2km y la primera

de aproximadamente los 3km de altitud. En ambos casos se ve una variación temporal de las variables  $Q, \theta_q$  que demuestran que existe algún tipo de mezcla que produce una pérdida de la cantidad total de agua, hecho que es reportado por todas la mediciones realizadas "in situ" dentro de nubes convectivas y que es representado, en alguna medida, por los resultados de nuestro modelo numérico de nube.

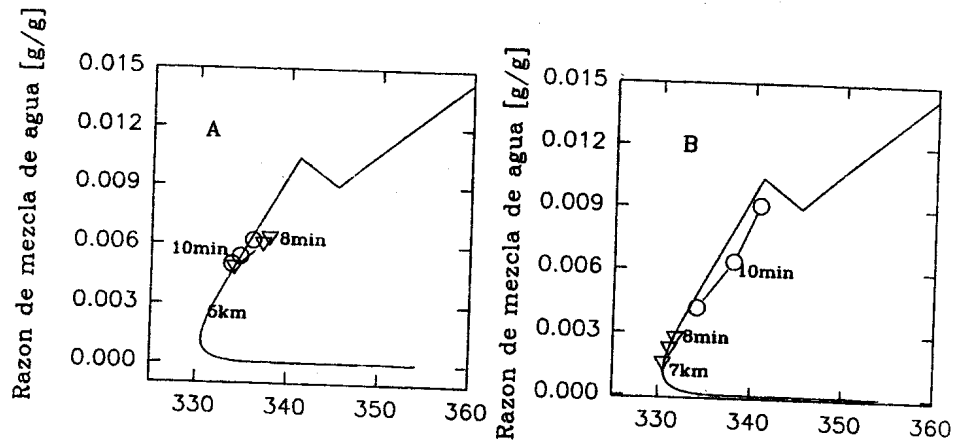


Figura 4 a) y b) : Valores obtenidos para 3 parcelas fijas a los 8 y 10 min. En a) las parcelas fueron elegidas a los 5Km y en b) a los 7Km de altura.

#### Discusión de resultados conclusiones

Los resultados mostrados en las figuras 4 y 5, muestran que los valores de  $Q, \theta_q$  de parcelas contiguas caen sobre una recta y que luego de un tiempo evolucionan, pero siguen estando alineados. Esto nos induce a corroborar la hipótesis de que la mezcla debería ser producida por solo dos niveles y no por muchos, como lo enuncia Paluch (79). La evolución temporal de éstos puntos Fig 4 demuestra, de una manera indirecta, como el modelo va trasladando el aire, con sus propiedades, desde niveles inferiores a la parte superior de la nube. Todos estos resultados serían encontrados aún si ningún proceso de mezcla estuviera presente. O sea que estas curvas podrían interpretarse simplemente como la mezcla debida al ascenso del aire a causa de la convección. O sea que no se observa ningún fenómeno que nos haga pensar en la presencia de mezcla de los niveles superiores de la nube.

A este resultado encontrado puede interpretarselo de la forma siguiente: Si el proceso de mezcla desde niveles superiores existe, este solo puede deberse a transporte turbulento,

que no está representado debidamente en el modelo de nube por nosotros desarrollado, pero no al transporte organizado por corrientes descendentes, ya que si este fuera el factor que da origen a la mezcla el modelo sí lo mostraría.

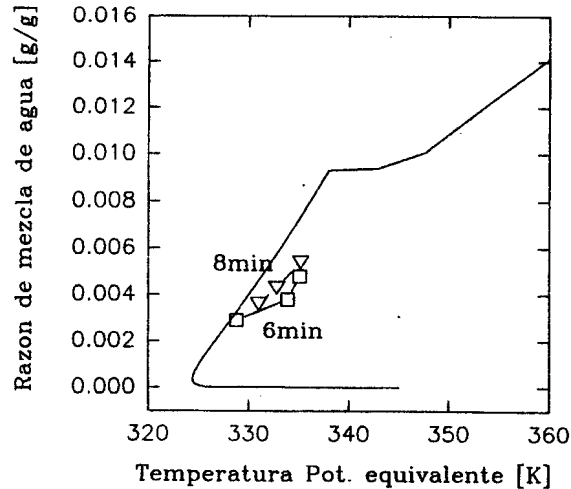


Figura 5: Valores obtenidos en otra nube para observaciones a los 5km. se ve como se mantienen alineados los puntos de las parcela contiguas.

Para corroborar que, apesar de lo dicho, el modelo incluye mezcla de algún tipo; se estudiaron las características del aire de una parcela siguiendo su ascenso. Si no hubiera mezcla de ningún tipo los valores de  $Q, \theta_q$  para esta parcela deberían mantenerse inalterados. En la figura 6 b) (parcela central) se ve como claramente la parcela posee menos  $Q$  a medida que el tiempo transcurre, hasta los 8min, mostrando que existe alguna mezcla lateral con los costados, más secos, de la nube. En la Fig. 6a) (parcela fuera de la corriente ascendente principal) se ve claramente que este proceso de pérdida de agua total de la parcela es monótono y que esta parcela siempre tiene las características del aire del entorno pero de un poco más abajo de donde ella está. O sea que cuando ella se encuentra a los 6 km de altura posee las cualidades del aire de los 4.5km del entorno, apesar de ella ser originada con aire de los 3km (su altura inicial).

De lo expuesto puede concluirse que de existir una mezcla con aire de niveles altos de la nube ella debe ser a través de procesos turbulentos. Por otro lado el modelo en 3D produce mezcla con niveles horizontales sin incluir ningún parámetro de "entrainment" artificial. Además la coherencia de los resultados obtenidos nos da una idea de la autoconsistencia de todos los parámetros arrojados por el modelo de nube en su evolución en el tiempo. Por último hacemos notar la importancia, para la investigación de procesos como estos que involucran interacciones de diversas escalas, el contar con una herramienta tan poderosa como lo es la modelación numérica.

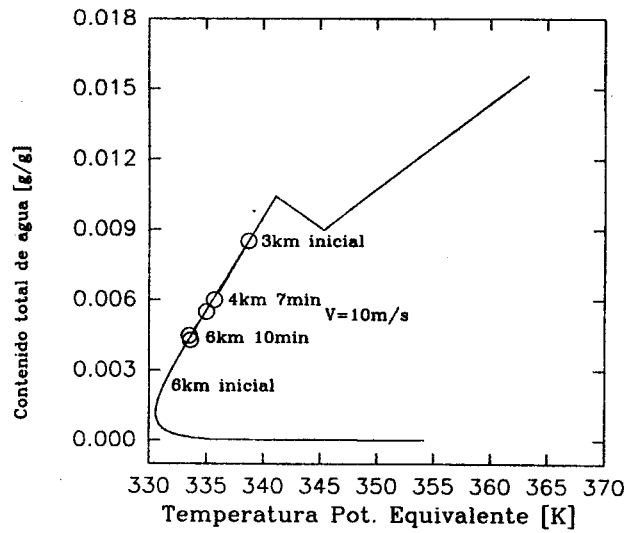


Fig 6 a) : Valores siguiendo a una parcela 1500m fuera del centro de la nube.

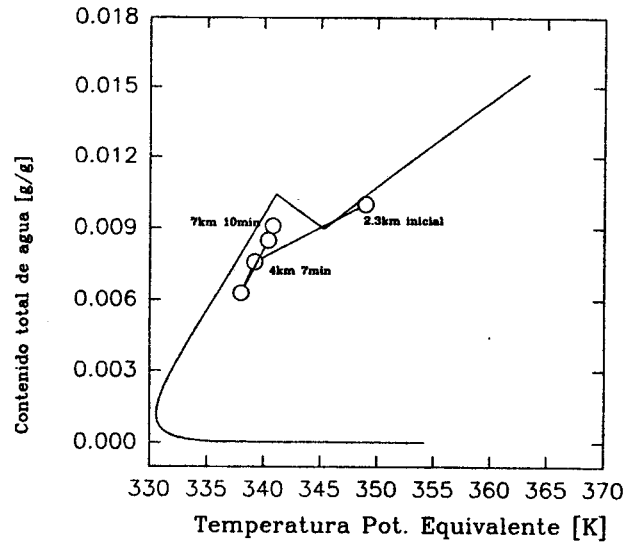


Fig 6 b: Valores obtenidos siguiendo a una parcela en la region central de la nube.



### Referencias

- [1]- Morton, B.R. (1957) Bouyant plumes in a moist atmosphere. *J. Fluid. Mech.*, **2**, 127-144.
- [2]- Scorer, R.S. and F.H. Ludlan, (1953) The bubble theory of penetrative convection. *Quart. J. Roy. Meteor. Soc.*, **79**, 94-103.
- [3]-Telford, J. W. (1975) Turbulence, Entrainment and mixing in cloud dynamics. *Pure Appl. Geophys.*, **113**, 1067-1084.
- [4]-Paluch H.R. (1979) the Entrainment Mechanism in Colorado Cumuli. *J. Atmos. Sci.*, **36**, 2467-2478.
- [5]-Heymsfield, A. j., P. N. Johnson and J.E. Dye, (1978) Observations of moist adiabatic ascent in northeast Colorado cumulus congestus cluds. *J. Atmos. Sci.*, **35**, 1689-1703.
- [6]-Scavuzzo C.M., Comes R. , Caranti G.M. , (1992) , A simple 3-D numerical cloud model. *in press, J. Comp. Phy.*

Este trabajo ha sido financiado por el Consejo Nacional de Investigaciones Cientificas y Tecnicas, Argentina y el CONICOR.

