

## ESTUDIO DE MEZCLA DE AIRE EN NUBES CON UN MODELO NUMÉRICO 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 la sustancia agua (vapor + agua líquida). Los resultados obtenidos en este trabajo muestran que los comportamientos generales provenientes de mediciones "in situ" son encontrados también aquí. 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 del modelo confirman además la buena performance del mismo en la descripción de la circulación del aire en la nube. En el trabajo se discuten las ventajas que ofrece el estudio de propiedades de las nubes convectivas realizado a través de modelos numéricos adecuados.

### SUMMARY

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 wet 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 study on cloud physics are discussed.

† Este trabajo ha sido financiado por el Consejo Nacional de Investigaciones Científicas y Técnicas, Argentina y el CONICOR

Recibido: Julio 1993

## INTRODUCCIÓN

El fenómeno de mezcla o "entrainment" que se produce en una nube con aire del exterior a ésta, ha sido analizado en forma sistemática por su importancia en la determinación de los contenidos de agua líquida, cristalitas de hielo, alturas del tope de la nube, etc. a través de modelos numéricos uni-dimensionales simples. También se ha utilizado para explicar el relativo ensanchamiento del espectro de tamaños de gotas de nube.

El fenómeno de mezcla en nubes tipo cumulus ha sido muchas veces comparado con la mezcla en "plumes" (Norton 1957)<sup>1</sup> o "burbujas" (Scorer and Ludlan 1953)<sup>2</sup>, modelados en tanques en laboratorio. En estos casos las nubes sufrirían mezcla de aire del exterior a través de los lados, que luego, 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 de niveles inferiores.

Un mecanismo diferente 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 su temperatura, por enfriamiento evaporativo, lo 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 cúmulos no precipitantes, 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.

Telford (1975)<sup>3</sup> 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 cúmulos pueden explicarse postulando que existe una mezcla de aire desde el tope de la nube que desciende rápidamente hasta llegar a un equilibrio de fuerzas de empuje con el entorno.

Paluch (1979)<sup>4</sup> 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 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 la sustancia agua (vapor + agua líquida). El método por ella empleado es aplicable a regiones de la nube que no posean cantidades apreciables de precipitación ni de hielo. Sus estudios fueron basados en mediciones "in situ"<sup>5</sup> dentro cúmulos 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 estudiará 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 cuál es el mecanismo por el cual esta mezcla se produce. Aprovechando la mayor información que nos provee

el modelo de nube desarrollado<sup>6</sup>, 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 probar la circulación de aire producida por el modelo. Como ejemplo de esto se estudiará 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 precipitación es posible reducir la temperatura, presión y contenido de agua líquida a solo dos variables que sean invariantes ante ascensos adiabáticos y que se combinen en forma casi lineal al mezclar dos masas de aire. 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 parcela originales  $Q_f = xQ_1 + yQ_2$ , donde los subíndices 1 y 2 denotan las parcelas originales y la "f" denota la parcela final.

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

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

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)<sup>4</sup> 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 de una parcela a una dada altitud puede interpretarse como la temperatura que tendría esa parcela al nivel del mar (1000 mb) previo a un ascenso en forma adiabática, condensando agua de tal forma de estar siempre a nivel de saturación, en forma reversible. En un gráfico de  $Q(vs)\theta_q$  el aire muestreado en un a sondeo antes de que la nube se formara se ve como lo muestra la Figura 1. En esta figura la base de la nube está indicada por el punto ubicado en el ángulo superior derecho de la figura; a medida que se asciende la curva se recorre hacia el ángulo inferior izquierdo, primero y luego hacia el inferior derecho. 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, ubicados según la ley de la palanca. Si se mezcla aire de varios niveles diferentes del entorno los puntos  $Q, \theta_q$  del aire mezclado deberían estar en la zona comprendida entre los valores extremos del aire original.

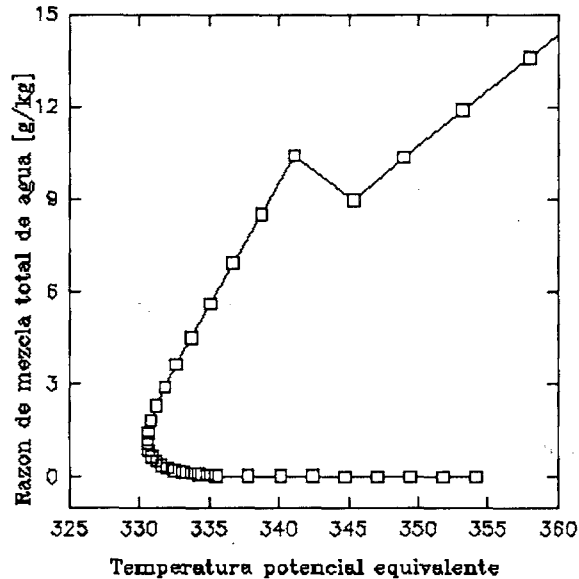


Figura 1. Condiciones iniciales de la razón de mezcla total de agua y temperatura potencial equivalente húmeda. Para su interpretación remitirse al texto.

## EL MODELO DE NUBE

Como se dijo con anterioridad los datos de nube necesarios para este estudio fueron extraídos de los resultados arrojados por un modelo numérico 3D de convección atmosférica profunda no precipitante (Scavuzzo et al. 1992).<sup>6</sup> Este modelo es capaz de simular la etapa de desarrollo de una nube convectiva, sin ninguna simetría predeterminada en aproximadamente 2 h corriendo sobre una pequeña "workstation". En este modelo se resuelven las ecuaciones pronósticas en diferencias finitas sobre una grilla tipo "stagger" de 500 m de parámetro de red, en un dominio cúbico de 16 km 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 reducir a 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 toma 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 el aire (agua de nube).
- En aire saturado, la parcela cambia su temperatura según el ritmo adiabático húmedo. Si la parcela esta sobresaturada se lleva a la saturación en el mismo paso de tiempo y si hay agua líquida en un lugar no saturado, se evapora hasta alcanzar la saturación de la misma manera.

## RESULTADOS OBTENIDOS

Los datos analizados fueron obtenidos de una nube simulada a partir de las condiciones iniciales que se muestran en la Figura 2 a), b), c) y d). En ellas se presentan respectivamente los sondeos verticales de temperatura, razón de mezcla total y presión y temperatura potencial equivalente antes de que se iniciara la convección (de hecho todos los datos no representan una situación determinada sinó un caso idealizado). En la Figura 3 se presentan los campos de viento, en un plano Z-X 15 minutos despues de iniciada la convección. Las flechas verticales más grandes representan velocidades de hasta 30 m/s. Notese que a pesar de no poner viento de corte, la nube no es exactamente simétrica, ventaja de usar un modelo 3D.

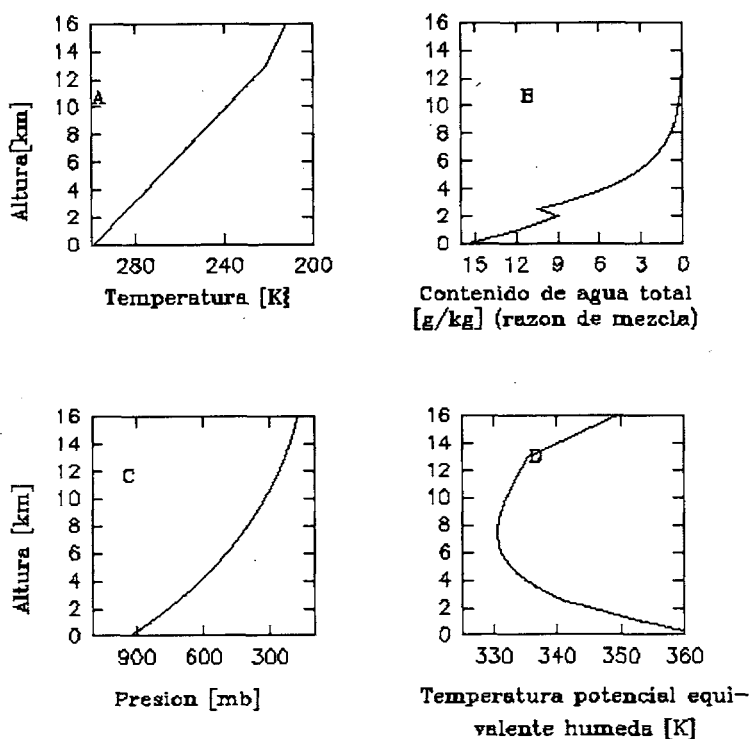


Figura 2. Condiciones iniciales sobre las cuales se formó la nube estudiada en este capítulo. Además de estas, se incluyó una perturbación inicial en temperatura potencial, para iniciar la convección.

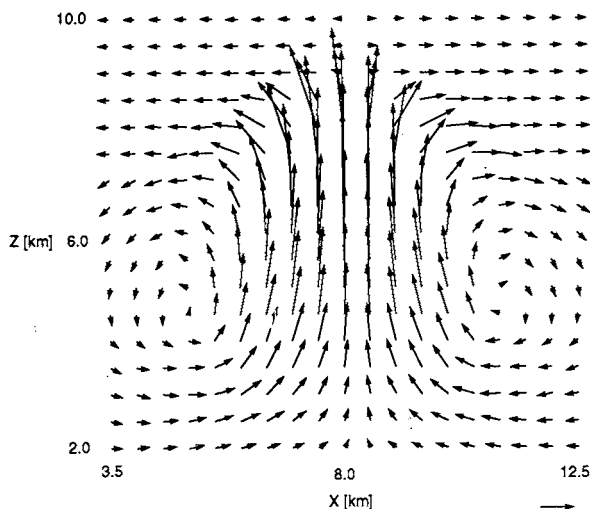


Figura 3. Campos de viento, en un corte vertical (plano Z-X), 15 minutos luego de iniciada la convección. La flecha de abajo representa una velocidad de 10 m/s.

En las Figuras 4 a) y b) se muestran los valores  $Q, \theta_q$  obtenidos para 3 parcelas contiguas de  $(500 \text{ m})^3$  cada una, a igual altura, partiendo desde el centro de la corriente ascendente para tiempos diferentes. En a) los puntos elegidos están a los 5 km de altura y en b) a los 7 km. Cabe destacar que no se sigue 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 sondeo inicial de la nube. Puede verse, que en ambas, los puntos están corridos hacia el ángulo superior derecho indicando que existe una mezcla de aire del nivel de observación con aire de más abajo y que la proporción de aire de sectores inferiores al de observación crece a medida que transcurre el tiempo ya que puede notarse como los puntos se van aproximando a los valores de sectores inferiores del sondeo inicial.

El análisis de los datos provenientes de un modelo numérico de nube, permite simultáneamente para una misma nube, el estudiar las características de parcelas diferentes a igual altura o a una parcela a medida que se mueve y realizar comparaciones. Así se analizaron los datos de parcelas siguiéndolas en el tiempo (esto sería difícil con mediciones "in situ", ya que un avión no podría seguir el ascenso de una parcela). 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 5 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 2.2 km y la primera de aproximadamente los 3 km 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 las mediciones realizadas "in situ" dentro de nubes convectivas y que es representado, también, por los resultados de nuestro modelo numérico de nube. En el caso a) se observa que existe un

retraso del aire respecto del sondeo inicial que sugiere mezcla. Este retraso es monótono en el caso a) pero no lo es en b). En este caso b) el retraso aumenta con el tiempo. Esto puede explicarse ya que a los 4 km entra aire de los lados y a 7 km entra solo desde abajo ya que ésta es la región de divergencia.

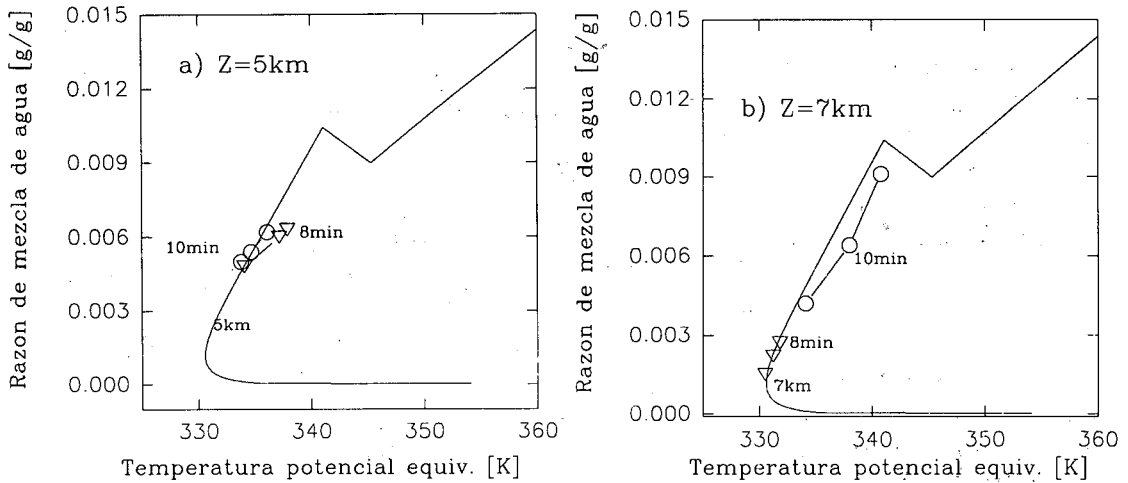


Figura 4. Valores obtenidos para parcelas de aire fijas a 5 y 7 km de altura respectivamente a dos instantes de tiempo.

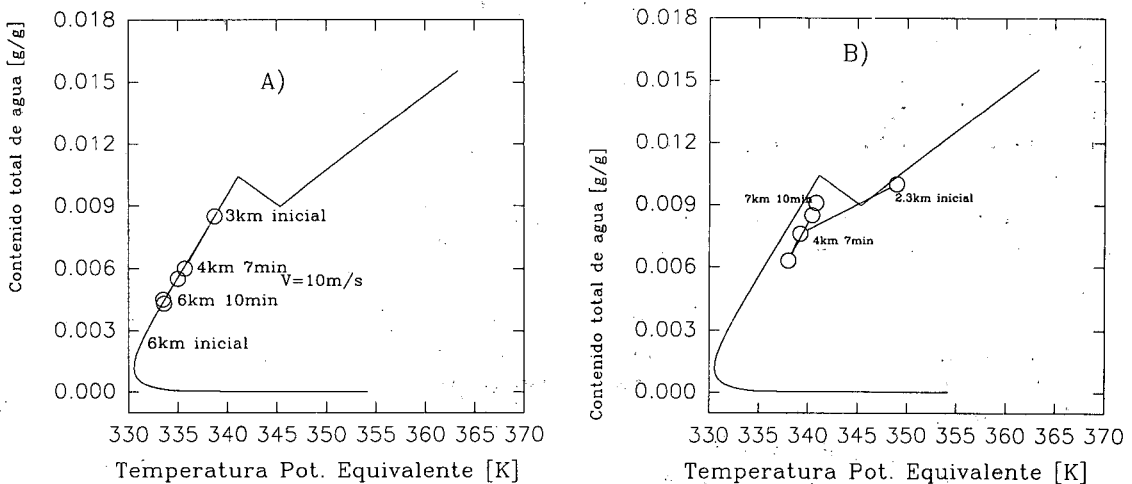


Figura 5. Valores obtenidos siguiendo a las parcelas en su ascenso. (a) 1500 m fuera de la corriente central, (b) justo en el centro de esta. Ellas parten de 3 y 2 km de altura respectivamente.

## DISCUSIÓN DE RESULTADOS CONCLUSIONES

Los resultados mostrados en las Figuras 4, muestran que los valores de  $Q, \theta_q$  de parcelas contiguas caen sobre una recta y que a pesar de evolucionar en el tiempo, 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, tal como lo enuncia Paluch (79). La evolución temporal de éstos puntos Figura 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. No se observa ningún fenómeno que sugiera la presencia de mezcla de los niveles superiores de la nube. Este resultado se puede interpretar de la siguiente forma: Si en una nube natural el proceso de mezcla con aire proveniente de niveles superiores existe, este solo puede deberse a transporte turbulento, el que no está representado debidamente en el presente modelo de nube. De haber transporte organizado por corrientes descendentes, como origen del aire de mezcla, el modelo así lo mostraría.

A pesar de lo dicho, el modelo incluye algún tipo de mezcla; y por ello 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 5 b) (parcela central) se ve como claramente la parcela posee menos  $Q$  (cantidad total de agua) a medida que el tiempo transcurre, hasta los 8 min, mostrando que existe alguna mezcla lateral con los costados, más secos, de la nube. En la Figura 5 a) (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 4.5 km del entorno, apesar de ella ser originada con aire de los 3 km (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.

## REFERENCIAS

1. Morton, B.R. (1957) "Bouyant plumes in a moist atmosphere", *J. Fluid. Mech.*, Vol. 2, pp.127-144.
2. Scorer, R.S. and F.H. Ludlan, "The bubble theory of penetrative convection", *Quart. J. Roy. Meteor. Soc.*, Vol.79, pp. 94-103, (1953).



3. Telford, J. W. Turbulence, "Entrainment and mixing in cloud dynamics", *Pure Appl. Geophys*, Vol. **113**, pp. 1067-1084, (1975).
4. Paluch H.R. "The Entrainment Mechanism in Colorado Cumuli", *J. Atmos. Sci.*, Vol. **36**, pp. 2467-2478, (1979).
5. Heymsfield, A. j., P. N. Johnson and J.E. Dye, "Observations of moist adiabatic ascent in northeast Colorado cumulus congestus cluds", *J. Atmos. Sci.*, Vol. **35**, pp. 1689-1703, (1978).
6. C.M. Scavuzzo N.E. Castellano, "Simulación numérica de procesos atmosféricos: Parte 1 Modelo de nube", *Revista internacional de metodos numéricos*, Vol.8 N° 4, pp. 417-426, (1992).