

# EL USO DE LOS MODELOS NUMÉRICOS DE MESOESCALA EN MÉXICO: UN EJEMPLO DE APLICACIÓN

*René Lobato Sánchez,  
rlobato@tlaloc.imta.mx  
Olivia Rodríguez López  
spankyrm@mexico.com  
Indalecio Mendoza Uribe  
inmeu17@yahoo.com*

## EL USO DE LOS MODELOS NUMÉRICOS DE MESOESCALA EN MÉXICO: UN EJEMPLO DE APLICACIÓN

### RESUMEN

Durante la década de los 90's se inició en México la implementación de modelos numéricos de la atmósfera a nivel de mesoescala. La colaboración interinstitucional del Instituto Mexicano de Tecnología del Agua (IMTA), el Centro de Ciencias de la Atmósfera de la UNAM (CCA/UNAM) y el Servicio Meteorológico Nacional (SMN) trajo consigo que en la actualidad se tengan este tipo de modelos trabajando en forma operativa para el SMN y continuando con experimentos y análisis en el campo de la investigación científica en los otros dos centros de investigación y desarrollo tecnológico. Por otra parte, el manejo y dominio de los modelos numéricos de la atmósfera, y en particular del modelo MM5 se ha manifestado en los trabajos de acoplamiento con sistemas que se relacionan directamente con este tipo de patrones de circulación, por ejemplo procesos de capa límite planetaria, suelo y cobertura vegetal y calidad del aire entre otros. Una de las utilidades adicionales se refiere al uso de este tipo de modelos en aplicaciones de estudios climáticos, consiguiendo una mejor definición regional de los procesos que ocurren a estas escalas en las que las redes de observación tradicionales no alcanzan a definir. En el presente trabajo, se muestra un caso de estudio utilizando el modelo numérico MM5 (detalles del modelo se describen en el cuerpo del trabajo) para determinar y cuantificar un proceso que tiene particular importancia por la interacción de la atmósfera con los procesos de superficie (suelo y cobertura vegetal). El proceso de reciclamiento de la precipitación se emplea para cuantificar del total de la lluvia precipitada en una determinada región, cuanta se origina en el mismo dominio y cuanta es de origen externo. La relación entre los dos orígenes se denomina como coeficiente de reciclamiento. Entre más cerca este el coeficiente de reciclamiento de uno, esto implica que toda la humedad tiene como origen el mismo dominio, en caso de que el coeficiente tenga un valor de cero, entonces toda la humedad viene del exterior al dominio. El valor del coeficiente dependerá fundamentalmente de las condiciones climáticas de cada región, por ejemplo en la selva amazónica la lluvia ocurrida en esta región tiene una tasa de reciclamiento de 34%, sin embargo en la región NW de México, tiene un coeficiente de reciclamiento del orden de 9% como valor máximo que se obtiene durante la temporada de lluvias que ocurren durante el período de julio a septiembre.

**Palabras clave:** Modelos numéricos, Reciclamiento de lluvia, Pronóstico meteorológico, Modelo MM5, Flujos de humedad en atmósfera

## THE USE OF MESOSCALE NUMERICAL WEATHER PREDICTION MODELS IN MÉXICO: A CASE STUDY

### ABSTRACT

During the 90's started a scientific collaboration between the Mexican Institute of Water Technology (IMTA), Atmospheric Science Center from UNAM (CCA/UNAM) and the Mexican Weather Service (SMN), for the implementation of mesoscale numerical weather prediction models for both operational use and applied and basic research. In the field of operational research, through the implementation of the MM5 mesoscale numerical weather prediction model, a well known and documented model used in many centers throughout the world; and for research with the use of the same model coupled with other dynamic models with the idea of bringing more detail to the atmospheric circulations and hence rainfall. Those dynamical models are related with boundary layer meteorology, land-surface, air quality; particularly for regional climatology this kind of models bring more detail to the atmospheric fields than those of provided by climatic observations. In this document, it is shown a case study where the MM5 model is used to quantify recycled rainfall. This concept considers and tries to trace back rainfall for determining how much of this rainfall comes from the external boundaries, and how much originates from the lower boundary such as evaporation and evapotranspiration. Recycling of precipitation is strongly linked to land-surface and vegetation cover processes, so that a ratio between external rainfall and local forcing is obtained. As the recycling ratio approaches to zero implies that total rainfall comes from the outside boundaries, on the other hand if the ratio is one implies that total rainfall comes from inside. This kind of study is relevant to determine the amount of moisture available in the atmosphere and how much of that become part of the hydrologic cycle. It is expected that the value of the ratio may depend on the region, for example in the Amazon region the recycling ratio goes as high as 34%; on the other hand, for the NW Mexico the ratio is about 9%, understandable since in NW Mexico is considered as an arid and semi-desertic zone and the only period in which land-surface becomes interactive with vegetation is during the rainy season (early July-early September).

**Keywords:** Numerical models, Recycling of precipitation, Weather prediction, MM5 model, Moisture fluxes in the atmosphere.

## INTRODUCCIÓN

El desarrollo de la modelación numérica de la atmósfera en México es el resultado de la colaboración entre el Instituto Mexicano de Tecnología del Agua (IMTA), el Centro de Ciencias de la Atmósfera de la UNAM (CCA/UNAM) y la Comisión Nacional del Agua a través del Servicio Meteorológico Nacional (SMN). Este trabajo en conjunto se inició en el año de 1995 y desde entonces cambios significativos en el ámbito de la modelación numérica han surgido para consolidar estos grupos de investigación y sobre todo en el entorno de la implementación de modelos numéricos tanto meteorológicos como climáticos. El inicio de esta área de trabajo fue la consecuencia de dos acciones a desarrollar: la primera que consistió en una mejoría en el entendimiento de los procesos físicos de la atmósfera acompañada por la formulación de la solución numérica de éstos; y la segunda, debido al rápido desarrollo tecnológico computacional, trayendo así equipos de cómputo cada vez más veloces con costos muy reducidos tanto de adquisición como de mantenimiento. En un principio fue necesario contar con equipo de supercómputo, la UNAM era uno de los pocos centros de investigación que contaban con el equipo de cómputo suficiente como para implementar un modelo numérico de pronóstico meteorológico, aunque en la actualidad es posible realizar el mismo tipo de simulaciones en una PC.

## ANTECEDENTES

A la par, se desarrolló el modelo numérico de mesoescala MM5 en los Estados Unidos, con el que se trabaja desde entonces, habiendo pasado por varias etapas de la asimilación del modelo. Si bien el trabajo inicial en México se concentró por un par de años en entender el concepto del diseño del modelo y explorar sus capacidades, en la actualidad es posible incluso modificar módulos completos del modelo de tal forma que ahora es posible realizar estudios específicos sobre la física de la atmósfera y sus interacciones con el ambiente que lo rodea, esto es, que es posible acoplar módulos sobre procesos de escurrimiento de superficie, procesos dinámicos de suelo y cobertura vegetal, calidad del aire y transferencia radiactiva, entre otros. En este documento se presenta cómo la integración de un modelo dinámico de suelo y cobertura vegetal puede hacer que el modelo mejore en sus simulaciones. Por lo tanto, el esfuerzo también se ha concentrado en verificar los resultados del modelo utilizando datos o registros de precipitación fundamentalmente, y por lo tanto, definiendo qué esquemas de escala a nivel de submalla son los que numéricamente mejor representan a los procesos físicos de los diferentes entornos o regiones que existen dentro de nuestro país.

Los centros de previsión meteorológica utilizan en gran medida los resultados de este tipo de modelos numéricos, sobre todo en la meteorología operativa; esto es, que la confiabilidad de los modelos numéricos de mesoescala tienen un rango alto de certidumbre de las primeras 72 horas, posteriormente ésta baja debido a que en un sistema no lineal como es la atmósfera y sus interacciones, sus resultados se vuelven caóticos Lorenz (1963). Por otra parte, desde junio de 2000 se tiene funcionando operativamente y en forma automática en el SMN el modelo de mesoescala MM5 (Lobato; 2000), modelo que proporciona más de cuatrocientos productos meteorológicos (Comunicación personal con el Mat. Carlos Cario del SMN) al grupo de previsión de dicho Servicio. Adicionalmente, se ha visto la utilidad del modelo para realizar estudios de análisis y diagnóstico en fenómenos de escala regional tanto en la escala meteorológica como en la climática, esta utilidad abre las necesidades de mejorar la resolución espacial de fenómenos de son necesarios para la planeación y manejo sustentable de los recursos naturales.

Este trabajo tiene como objetivo mostrar los avances referentes al manejo de uno de los modelos de física de la atmósfera más utilizados en el mundo científico y operativo. Asimismo, la confiabilidad de un modelo de este tipo se debe basar en entender sus alcances y sus limitaciones. Estas últimas dos acciones están en función de la experiencia que se tenga en el manejo del modelo y las técnicas objetivas de verificación o validación.

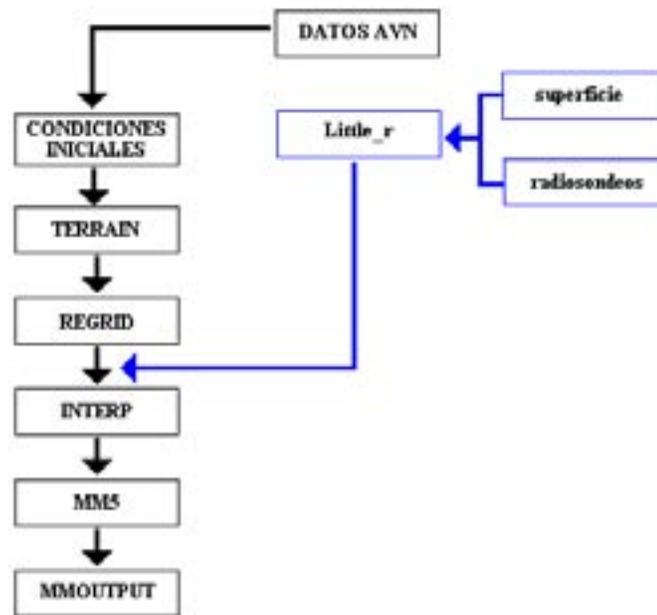
El modelo numérico de mesoescala MM5 se puede resumir en el siguiente párrafo; si el lector precisa de detalles tanto de la física como de la implementación del modelo se recomienda acudir a las referencias, las cuales se citan en las secciones respectivas.

El modelo de mesoescala MM5 fue desarrollado en conjunto entre la Univ. Estatal de Pensilvania y el Centro Nacional de Investigaciones Atmosféricas (PSU y NCAR por sus siglas en inglés) con el objetivo de predecir las circulaciones atmosféricas de escala regional y de mesoescala, creando así un modelo de área limitada y no-hidroestático; esto es, con un sistema coordinado que sigue los contornos topográficos en su frontera cercana a la superficie terrestre. Las condiciones de uso y manejo del modelo permiten que sea continuamente actualizado, no sólo por los desarrolladores del modelo sino por la comunidad científica internacional que labora en diversos centros de investigación y universidades en todo el mundo.

El modelo MM5 se define como la quinta generación del desarrollo entre PSU/NCAR y es la última versión de que en un principio fue desarrollado con la base teórica de Anthes y Warner (1978); y desde entonces ha tenido cambios substanciales que permiten que el modelo se aplique para otros propósitos, por ejemplo: en meteorología, climatología, medio ambiente: manejo y control de bosques, y calidad del aire. Las características principales que posee el modelo MM5 se refieren a la dinámica no hidrostática y que permite que el modelo se escale hasta resoluciones espaciales de unos cuantos kilómetros; por otra parte, el modelo MM5 tiene la capacidad de realizar multi tareas en máquinas de memoria compartida y distribuida; y también la capacidad de contar con un esquema de asimilación de datos en tres y cuatro dimensiones: Four Dimensional Data Analysis y Three Dimensional Data Assimilation (FDDA y 3DVAR por sus siglas en inglés) y un número variado de opciones de física tanto de nubes como de otros fenómenos de escala mayor.

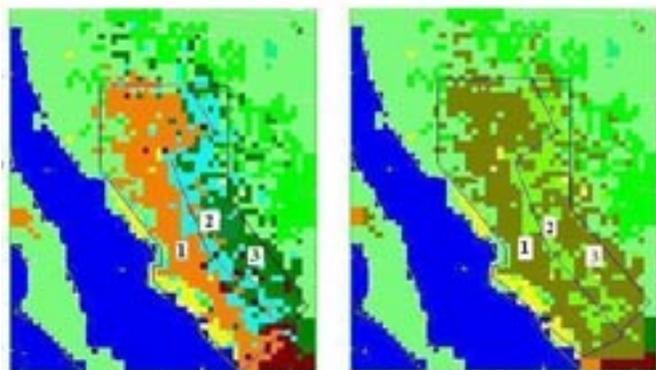
En general, el sistema del modelo MM5 se conforma de programas o módulos auxiliares que preprocesan y posprocesan la información de entrada (condiciones iniciales y de frontera) así como las de salida (despliegue gráfico de las variables meteorológicas). Los datos meteorológicos tanto en superficie como en altura (coordenadas de presión) se interpolan horizontalmente (programas TERRAIN y REGRID) de una malla regular y "plana" a una con resolución vertical variable, posteriormente se interpola verticalmente a un sistema de coordenadas tipo sigma (i.e. que siguen el contorno del terreno en sus niveles cercanos a éste, pero en niveles mayores tiende a uniformizarse). Para propósitos de eficiencia de código, el programa emplea dimensiones parametrizadas necesarias para ajustar las necesidades de memoria de cómputo.

La forma ordinaria de correr el modelo MM5 es mediante el uso de datos iniciales y de frontera de modelos de escala global. En la actualidad existe un número considerable de modelos de circulación global que funcionan en forma operativa, uno de ellos; el modelo AVN (Modelo Global de la Aviación) es donde se toman las condiciones iniciales y de frontera para que corra el modelo MM5 en el SMN. Los datos del modelo global de aviación (AVN) han mostrado ser muy consistentes y confiables de tal forma que es de ahí donde se extraen las condiciones iniciales y de frontera. La segunda opción, aunque más compleja en su implementación operativa, es a través de un esquema de asimilación que considera a los mismos datos de la AVN, pero corregidos con información meteorológica obtenida de la red nacional tanto de observatorios meteorológicos como de radiosondeo. El mismo esquema de asimilación, conocido como el sistema 3DVAR (Barker et al, 2003) considera la posibilidad de integrar información satelital, así como de radar meteorológico, entre otras fuentes de datos meteorológicos; sin embargo, para integrar esta información adicional en forma operativa se requiere desarrollar la automatización de la integración de éstos módulos al esquema de asimilación, ésta es una de las tareas que se implementarán próximamente. **La Figura 1** muestra el esquema de funcionamiento operativo, las líneas negras indican los procesos que ya están implementados, mientras que las de color azul indican las etapas por implementar. Los resultados gráficos del modelo MM5 se pueden consultar diariamente en las siguientes direcciones: <http://galileo.imta.mx> modelo que corre diariamente en el IMTA y <http://smn.cna.gob.mx/SMN.html> que corre diariamente en el SMN.

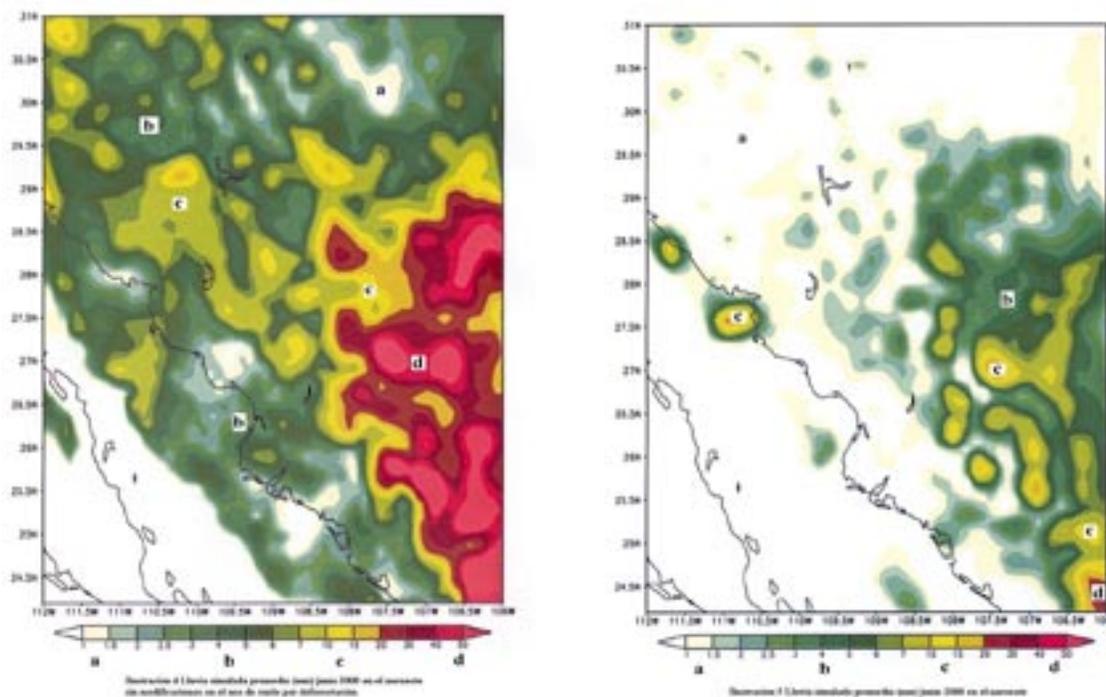


**Figura 1.** Esquema del sistema de automatización del modelo MM5, este sistema funciona diariamente partiendo en su estado actual con las conexiones vía ftp a un servidor que concentra la mayoría de los resultados de los modelos numéricos tanto de área limitada como de escala global, en una etapa próxima (color azul) se implementará la asimilación de datos obtenidos por la red nacional de observatorios meteorológicos y de radiosondeos.

La utilidad del modelo MM5 se manifiesta no sólo para trabajo operativo, sino también para estudios de análisis y diagnósticos de investigación. A continuación se muestra cómo el modelo MM5 sirve para determinar la importancia de la interacción de procesos que ocurren en el suelo y la cobertura vegetal en los patrones de circulación atmosférica, y sobre todo en la generación o supresión de lluvia. En un trabajo previo realizado por Salinas et al. (2001), se describe la influencia de la cobertura vegetal en el cambio de los patrones de circulación regional y local. En este trabajo se realizaron simulaciones con el modelo MM5 alterando las condiciones de suelo y vegetación; Para el noroeste de México se realizaron cambios en cuatro subregiones: La primera fue cambiar la clasificación de "árboles caduceos de hoja ancha" por cultivos y praderas, la clase de "bosques mixtos" fue cambiada por "cultivos y bosques", la clase de "árbol perenne con hoja de aguja" y de "árboles de hoja ancha" fueron substituidas por "cultivos y praderas". Aunque sólo fue un mes de simulaciones (junio de 2000), los resultados fueron contrastantes como se puede apreciar en la **Figura 2** que muestra cómo los patrones de lluvia cambian dependiendo de las condiciones dinámicas en la superficie terrestre. Sin lugar a dudas que los procesos de flujos de energía a la atmósfera están determinados en gran medida por la radiación solar y la respuesta dinámica en la superficie.

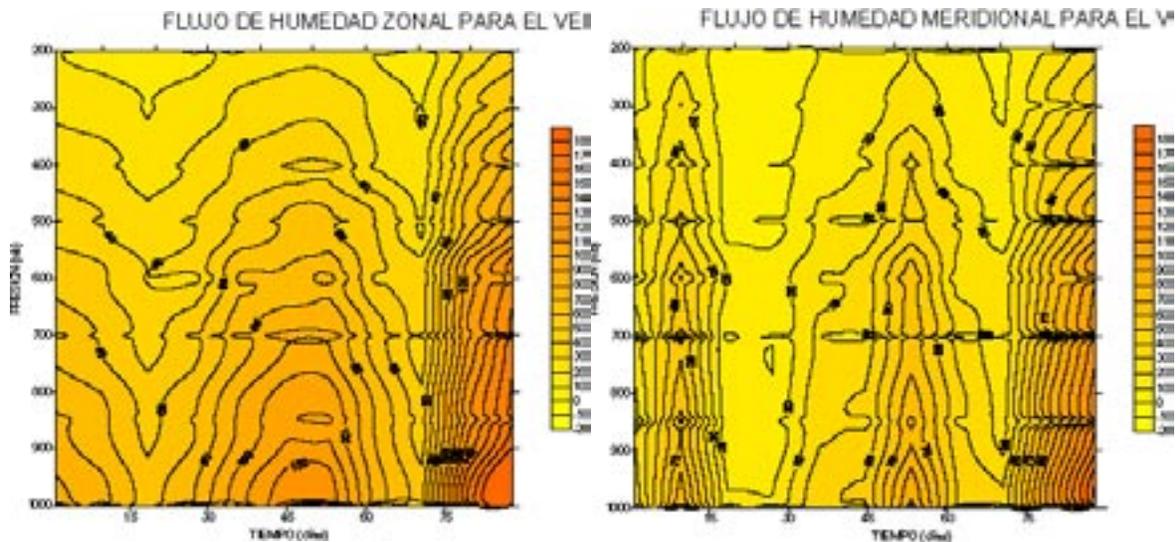


**Figura 2.** El primer recuadro muestra las condiciones normales de suelo y cobertura vegetal; en el segundo se muestra el dominio con las modificaciones respectivas; el tercer recuadro muestra los patrones de lluvia simulados por el modelo en condiciones normales de cobertura vegetal; en el cuarto recuadro se aprecia el cambio en la lluvia simulada cuando se alteran o modifican estas características. [Salinas et al, 2001].



## EL RECICLAMIENTO DE LLUVIA: UN EJEMPLO DE APLICACIÓN

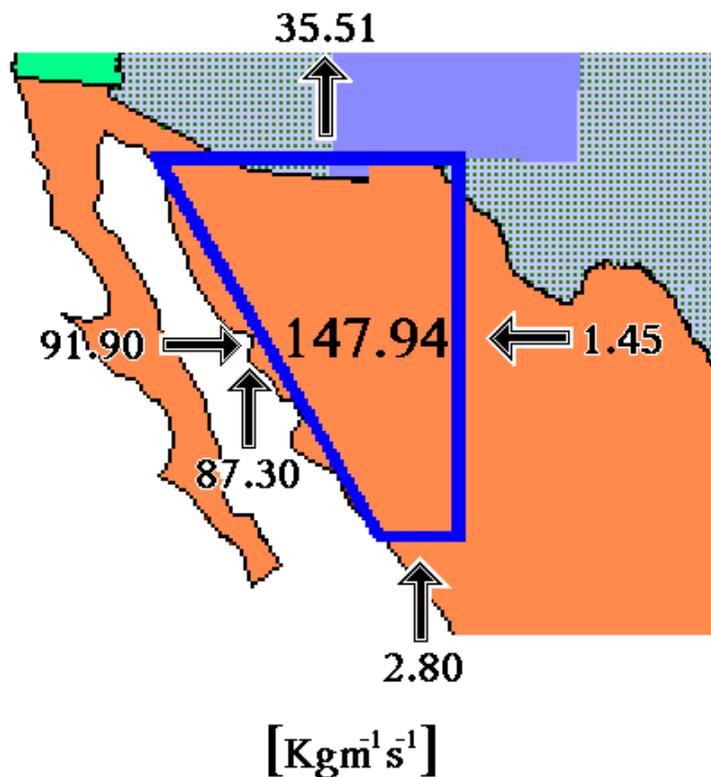
Los resultados previos en los patrones de precipitación muestran entonces que la superficie terrestre tiene un papel muy importante en el entorno climático. El cambio en los ecosistemas y fundamentalmente en los de tipo vegetal induce cambios en el clima regional. Por otra parte, si bien se ha mostrado la importancia de la cobertura vegetal y el cambio de uso de suelo, es necesario medir la cantidad de humedad que proviene de la superficie y se convierte en precipitación; esto es, "lluvia reciclada", es agua que dentro del dominio o región considerada pasa por la fase de vapor-líquido en más de una ocasión. El proceso físico que retorna la humedad a la atmósfera es a través de la evaporación del suelo y cuerpos de agua, así como de la evapotranspiración que es la humedad despedida por la cobertura vegetal y que depende directamente de la temperatura ambiente en el sitio y del ciclo de vida de la planta. Por lo tanto, la cantidad de agua reciclada dependerá del tipo de vegetación y uso de suelo, la cantidad de evapotranspiración depende de la especie de que se trate. Por ejemplo, en la selva amazónica la lluvia reciclada alcanza valores de hasta un 34% del total disponible en la atmósfera (Elthair y Bras, 1994). Para el noroeste de México y para el verano del 2000, con la ayuda del modelo MM5 se realizó una estimación de los flujos de humedad que ocurren en esta región, para posteriormente determinar la cantidad de lluvia reciclada (Rodríguez y Lobato; 2002). En la **Figura 3** se muestra la cantidad de flujos de humedad integrados en toda



**Figura 3** Los flujos de humedad zonal son mayores que los meridionales, la fecha de ambos coincide en que el en pico del verano es cuando mayores flujos de humedad se presentan.

la vertical de la atmósfera, obteniéndose éste a partir de la multiplicación de los vectores zonal (dirección este-oeste) y meridional (dirección norte-sur) del viento por la humedad específica.

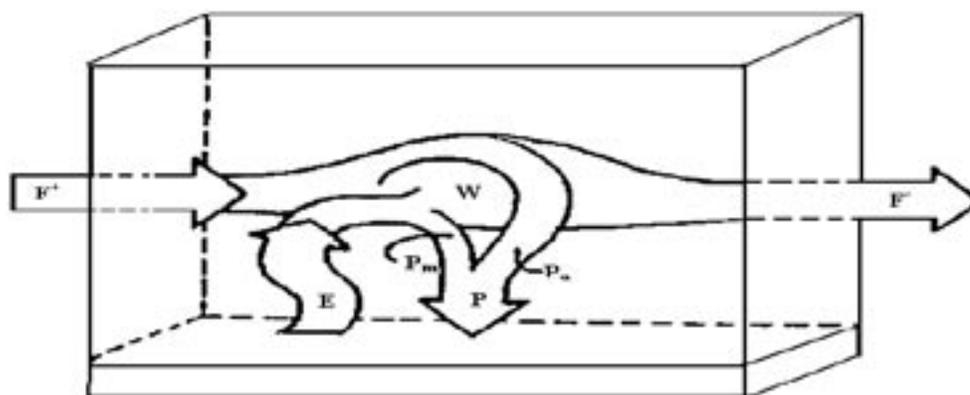
En el inciso a) de esta figura se aprecia cómo la humedad fluye en los meses pico de la estación de verano y la mayor parte se concentra en los niveles inferiores hasta los 850 mb, estos valores máximos coinciden con las tormentas convectivas que se desarrollan a lo largo de la Sierra Madre Occidental (SMO), incrementándose en magnitud por el tremendo forzamiento orográfico producido por la dirección del flujo que es mayormente perpendicular al eje de la SMO. El flujo de humedad es información básica para calcular el balance completo de la humedad existente en la atmósfera, como datos adicionales para realizar el balance completo se requiere de la precipitación y la evaporación total superficial, la **Figura 4** muestra un esquema del mecanismo para estimar el balance total para el verano de 2000, el valor estimado que entra al dominio de interés es de  $147.94 \text{ kg m}^{-1}\text{s}^{-1}$ , en dicha figura se puede observar la contribución de los flujos de humedad en cada una



**Figura 4** Dominio de interés con valores calculados de balance de humedad en la atmósfera. En la figura se aprecia que los flujos más importantes son los del Golfo de California y del Pacífico Ecuatorial. La figura anterior muestra que estos flujos se concentran fundamentalmente en niveles inferiores a los 700 mb.

de sus componentes, mostrando claramente que el mayor aporte proviene del Golfo de California y del Océano Pacífico Ecuatorial. La interpretación práctica a este ejercicio indica que el flujo de humedad estimado se queda y forma parte de la precipitación y la evaporación, valores antecedentes necesarios para calcular la tasa de agua de lluvia reciclada.

El esquema que se muestra en la **Figura 5** muestra al lector los parámetros básicos para estimar la lluvia reciclada. El balance se realiza a partir de la ley de continuidad en un volumen de control. La entrada y salida de los flujos de humedad del dominio de interés se complementan con el equilibrio entre la precipitación pluvial o la lluvia y la evaporación tanto del suelo como de la cobertura vegetal. Los procesos físicos a nivel de submalla son altamente no lineales, sin embargo al parametrizar se utilizan artificios que permiten "cerrar" a los sistemas de ecuaciones; de los más interesantes y controvertidos es el de la lluvia producida por sistemas convectivos, al respecto el modelo MM5 considera 8 opciones de diferentes parametrizaciones (Grell, Arakawa, Arakawa-Schubert, Bets-Miller, Kain-Fritsch, Kuo), los resultados que se muestran en el presente trabajo corresponden a los de Grell (1993).



**Figura 5.** Esquema considerado para la estimación de los flujos de humedad. Dentro del dominio se considera que la evaporación contribuye a la humedad existente en la atmósfera en la cual, una parte de ésta se convierte en lluvia. Los flujos de humedad que entran y salen del dominio cierran la ecuación de continuidad, estos se integran desde la superficie del terreno hasta una altura donde se considera que no existe la humedad, el nivel de 400 mb se consideró como la frontera superior.

Para calcular el reciclamiento se modificó la ecuación propuesta por Brubaker et al. (1993), la modificación a estas ecuaciones consistió en integrar los valores de los flujos con respecto a la longitud dentro del dominio de interés, haciendo esta estimación más precisa, puesto que la formulación original consideraba un valor medio para todo el dominio. La tasa de reciclamiento queda de la siguiente manera:

$$\rho = \frac{E}{P + \frac{2F}{L}} \quad (1)$$

Una forma alterna de calcular el reciclamiento es:

$$\rho = \frac{E}{E + \frac{2F_{in}}{L}} \quad (2)$$

Para el dominio de interés se definen:

L = Longitud en dirección este-oeste

E = Evaporación

F<sub>in</sub> = Flujo de humedad que entra

F = Balance de humedad

P = Precipitación

P(kg/m <sup>2</sup> s <sup>-1</sup> )	E (kgm <sup>-2</sup> s <sup>-1</sup> )		L (m)	F <sub>in</sub> (kgm <sup>-1</sup> s <sup>-1</sup> )	F <sub>out</sub> (kgm <sup>-1</sup> s <sup>-1</sup> )
1.48 x 10 <sup>-4</sup>	1.42 x 10 <sup>-5</sup>	v	915000	90.10	35.51
		u	457500	93.35	

Al realizar el cálculo se encontró que la contribución de la evaporación a la precipitación fue:

$$\rho = \frac{E}{E + \frac{2F_{in}}{L}} = 9.31\%$$

$$\rho = \frac{E}{P + \frac{2F}{L}} = 9.0\%$$

Estos valores indican que durante el año 2000, del total de la precipitación ocurrida en el noroeste de México hay un valor que oscila entre el 9 y 9.31% de ésta cuyo origen proviene del mismo dominio (e.g. agua reciclada de lluvia).

## CONCLUSIONES Y RECOMENDACIONES

El uso de los modelos numéricos de la atmósfera permite hacer estudios de diagnóstico en diferentes escalas tanto espaciales como temporales, por lo tanto es factible analizar eventos meteorológicos ocurridos en el pasado. Por otra parte, esta herramienta también es de utilidad para generar escenarios tanto meteorológicos como climáticos que pueden ser de utilidad para planeación integral del uso y manejo de los recursos naturales, la disponibilidad natural de éstos está en función directa de la variabilidad climática tanto a mediano plazo (estacional) como a largo plazo (anual, decadal y mayores).

Los resultados que se muestran indican que si a todo el proceso anterior se agregara un modelo dinámico de cobertura vegetal los resultados probablemente mejorarían, sin embargo; los resultados nos indican que la complejidad de las escalas debe estar acompañada con información inicial del mismo tamaño, a escalas puntuales es la micrometeorología quien define en la implementación de las parametrizaciones qué elementos son fundamentales para describir estadísticamente a la turbulencia. Desafortunadamente en México muy poco se ha hecho al respecto, para validar los resultados de estos modelos acoplados es necesaria la experimentación y trabajo de campo, es cierto también que para medir los fenómenos a esta escala se requiere de equipo muy sofisticado y caro y que se debiera instrumentar y muestrear cada

zona o micro región diferente dentro del dominio del que se trate. Por otra parte, los modelos acoplados hasta fechas muy recientes se están implementando y la mayoría se encuentra en etapa de pruebas y verificación.

Los campos meteorológicos de escalas mayores son importantes pues éstos transportan la humedad desde los océanos, de la misma manera son importantes los procesos locales y regionales debido al transporte vertical con la ayuda del forzamiento orográfico, incrementando así el proceso convectivo. Por lo tanto, el problema radica en si los modelos dinámicos de suelo-cobertura vegetal acoplados a modelos atmosféricos contribuyen a una mejor representación de los patrones de lluvia. Para este fin, es necesario contar con información de superficie (humedad y tipo de suelo, cobertura vegetal) actualizados, puesto que año con año se aprecia a través de los inventarios forestales, el decremento de densidad de biomasa no sólo en el NW de México sino en toda la república.

Los modelos numéricos atmosféricos de mesoescala tienen diversas utilidades, desde el análisis objetivo y diagnóstico, hasta el del pronóstico operativo. Sin embargo, es recomendable considerar los alcances y las limitaciones de un modelo discreto de área limitada, sobre todo en procesos que ocurren a nivel de submalla y cuya solución es a través de esquemas de parametrización, es necesario hacer un trabajo extenso en la verificación del esquema y sus resultados. Particularmente para lluvia, llega a ocurrir que no es el esquema de parametrización cuyo algoritmo matemático complejo represente mejor al proceso físico.

Está probada la utilidad de este tipo de modelos como herramienta auxiliar en sistemas de previsión meteorológica. Sin embargo se recomienda evaluar los resultados mediante una evaluación objetiva y que estos deberían de compararse con otros producidos por modelos similares. Al final de cuentas, en el ambiente operativo el pronóstico lo hacen los previsores y son ellos a los que se confiere tal responsabilidad.

### **Agradecimientos**

Se agradece la colaboración del grupo de modelación numérica de la Subcoordinación de Hidrometeorología del IMTA. Compañeros con los que ha sido un privilegio compartir esta aventura desde sus inicios.

## BIBLIOGRAFÍA

- Anthes, R. A., y T. T. Warner, 1978: Development of hydrodynamical models suitable for air pollution and other mesometeorological studies, *Mon. Wea. Rev.*, 106, 1045-1078.
- Barker, D.M., W. Huang, Y.-R. Guo, A.J. Burgeois y Q.N. Xiao, 2003; A three-dimensional variational data assimilation system for MM5: Implementation and initial results, submitted to *Monthly Weather Review*, February.
- Brubaker, K.L., D. Entekhabi y P.S. Eagleson, 1993: Estimation of continental precipitation recycling. *J. of Climate*, V6, pp.1077-1089.
- Dudhia, J., 1993: A nonhydrostatic version of Penn State. NCAR Mesoscale Model: validation test and simulation of an Atlantic cyclone and cold front. *Monthly Weather Review*.121, pp. 1449-1513.
- Elthair, H. y R.L. Bras, 1994: Precipitation recycling in the Amazon Basin. *Q.J.R. Meteorol. Soc.*, 120, pp.861-880.
- Grell, G.A., 1993: Prognostic evaluation of assumptions used by cumulus parameterizations, *Monthly Weather Review*, 121, 764-787.
- Lobato, R., 2001; Implementación del modelo de mesoescala MM5 en el servidor SGI-CRAY del SMN, IMTA informe final.
- Lorenz, Edward, 1963; Deterministic Nonperiodic Flow, *Journal of the Atmospheric Sciences*, 20, 130-141.
- Miranda, S., J.A. Salinas y R. Lobato, 1998; El pronóstico meteorológico numérico en México. Anuario IMTA.
- Rodríguez, O., y R. Lobato; 2001: Balance de Humedad y Reciclamiento de Lluvia para el Monzón Mexicano, memorias del XXX congreso Nacional de Meteorología.
- Salinas, J.A., R. Lobato, F. Oropeza y J.L. Pérez, 2001; Estudio de efectos climáticos por uso de suelo y cobertura vegetal en el noroeste y sureste del país. Anuario IMTA.