

El pronóstico numérico del tiempo atmosférico como apoyo a la ingeniería hidráulica¹

Enrique Buendía Carrera, Francisco Villicaña Cruz,
Orlando Delgado Delgado, Eugenio del Valle Sánchez²

Centro de Ciencias de la Atmósfera, UNAM

En este artículo se reporta un modelo barotrópico equivalente, integrado en un área cíclica dentro del hemisferio norte de América (cuarta región meteorológica mundial). El modelo se desarrolló con objeto de efectuar el pronóstico del tiempo atmosférico en la República Mexicana, para lo cual se recurrió a la ecuación de vorticidad casigeostrófica a 500 mb y se tomó en cuenta la orografía correspondiente a cada punto de la malla considerada. La integración de la ecuación elíptica resultante se realizó mediante diferencias finitas y se resolvió con el método de relajación secuencial. El pronóstico del estado del tiempo atmosférico basado en este modelo es satisfactorio y puede servir de apoyo en la planificación hidráulica, agrícola y ganadera, entre otras.

El ser humano vive con la necesidad constante de conocer el tiempo atmosférico a un futuro inmediato o mediato con objeto de planificar sus actividades, su alimentación y su economía. Esta necesidad surgió principalmente en los países de latitudes medias, donde es preciso aprovechar al máximo la estación agrícola para obtener cosechas óptimas y almacenar alimentos para sobrevivir la etapa invernal.

A fin de prever el estado del tiempo que genera la circulación atmosférica, los investigadores meteorológicos han desarrollado varios modelos físico-matemáticos con los cuales se consigue una buena aproximación del comportamiento de la atmósfera. Dichos modelos pueden ser integrados en todo el planeta, para lo cual es necesario contar con información meteorológica sobre todo el mundo. Sin embargo, dado el alto costo de este planteamiento, varios países de latitudes medias del hemisferio norte han resuelto la integración de los modelos exclusivamente sobre este hemisferio. No obstante que la computación ha coadyuvado a disminuir los costos para obtener resultados hemisféricos y globales, se ha comprobado que aún son muy elevados, por lo que en los paí-

ses en vías de desarrollo conviene circunscribir más el área, como se plantea con el modelo de este trabajo.

Las aplicaciones de los modelos barotrópico y barotrópico equivalente empezaron a aparecer en la literatura meteorológica desde 1950. En ese año, Charney filtró por primera ocasión las ondas de alta frecuencia que perturbaron el modelo de ecuaciones primitivas de Richardson (1922).

Con el nacimiento del pronóstico numérico mediante computadoras, una gran cantidad de autores ha elaborado diversas técnicas y aplicaciones de estos modelos simples en latitudes medias; entre ellos se mencionan a Gate (1953), que propuso la solución de la ecuación de vorticidad utilizando funciones de Green; Eliassen y Machenhauer (1978), quienes emplearon la técnica de integración espectral en forma similar a Cullen (1974); Bedi (1979) que efectuó la integración hemisférica de las ecuaciones hidrodinámicas; Shuman y Vanderman (1976), quienes las integraron a lo largo de un cinturón global entre 45°S y 45°N; Krishamurti (1962) que experimentó en regiones tropicales; Sanders y Burpee (1968), que utilizaron áreas de integración más pequeñas a la

sinóptica, y Ramanathan y Bansal (1978) que realizaron estudios de pronóstico de la trayectoria de huracanes en el Océano Indico.

En los diferentes métodos para solucionar la ecuación de vorticidad que proporcionan los modelos barotrópicos filtrados no se ha empleado la técnica que se trata en este artículo, la cual ha brindado resultados satisfactorios en el pronóstico de la altura geopotencial a 500 mb. Para resolver la ecuación de vorticidad casigeostrófica equivalente se emplea una proyección mercator con 19×22 puntos reticulares y se extiende el área de interés para crear una ciclicidad entre el oriente y occidente de la región cuarta, lo cual equivale a transformar imaginariamente la tierra en forma de un cilindro. De esta manera, el flujo de los vientos del oeste en latitudes medias y el del este en latitudes bajas quedan conectados por medio de las altas semipermanentes de los océanos Atlántico y Pacífico, unidas en un sistema anticiclónico común.

En este trabajo se incluyen también las condiciones a la frontera, denominadas de escalón (Buendía, 1984), que consisten en interrumpir el flujo zonal en los renglones anteriores a la frontera y el flujo meridional a lo largo de los límites, con lo cual, también se tiene un geopotencial constante, condición matemática necesaria para resolver la ecuación elíptica de la vorticidad equivalente.

El pronóstico de la posición de los sistemas atmosféricos obtenido con este modelo permite detectar las zonas que serán afectadas o beneficiadas por la precipitación pluvial en el territorio nacional. La finalidad de los estudios sobre modelos numéricos de pronóstico del tiempo que se realizan en la actualidad en el Centro de Ciencias de la Atmósfera de la UNAM, con apoyo del Instituto Mexicano de Tecnología del Agua de la SARH, es calcular con la máxima exactitud posible dónde, cuándo y cuánta precipitación habrá en las diferentes áreas de la República Mexicana.

El modelo

Entre los estudiosos de la meteorología los modelos simples se denominan también filtrados, porque en ellos se filtran las ondas de gravedad y de sonido al considerar el equilibrio geostrófico e hidrostático de la atmósfera, respectivamente.

La primera de estas condiciones de equilibrio no es una aproximación del todo adecuada en bajas latitudes; no obstante, su postulación ha proporcionado resultados adecuados al resolver

la ecuación de vorticidad. Esta incluye los efectos orográficos (Thompson, 1961):

$$\nabla^2 \frac{\partial Z}{\partial t} - A^2 \frac{\partial Z}{\partial t} = -\frac{1}{4} J(Z, \xi + f) - \frac{A^2 M^2 g}{4d^2 f} J(Z, Z_g) \quad (1)$$

donde Z representa la altura geopotencial de la superficie de 500 mb, ξ , la vorticidad relativa, f , la vorticidad de la tierra, g , la aceleración de la gravedad, M , el factor de mapa para una proyección mercator en el ecuador (Saucier, 1955), Z_g , la altura orográfica del continente promediada en la vecindad de cada punto de la malla, d , la distancia entre los puntos reticulares de la malla, t , el tiempo, ∇^2 , el operador laplaciano, $\frac{\partial}{\partial t}$ la derivada local y A está dada por

$$A^2 = \frac{d^2 A_0 f}{m^2 R T_0} (\xi + f) \quad (2)$$

donde R es la constante universal de los gases, T_0 , la temperatura de una parcela de aire a la presión P_0 , y A_0 es la constante dada por Charney (1949). El miembro izquierdo de la ecuación (1) representa el cambio local de la vorticidad relativa debido a la advección de vorticidad por el viento geostrófico y a la presencia de las montañas en los continentes. Esta ecuación se integra en una malla de 19×22 puntos, de los cuales los primeros cuatro renglones y las últimas cinco columnas no pertenecen a la región cuarta, sino que son una extensión que se emplea, en el primer caso para que las condiciones de frontera del norte no contaminen seriamente a la solución en el interior de la cuarta región; las columnas se usan para hacer cíclico el campo de la altura geopotencial de 500 mb.

Las condiciones de frontera de escalón utilizadas en la integración consisten en mantener constante la altura geopotencial en las fronteras norte y sur para que no haya flujo de momento a través de ellas; además, los renglones penúltimo y antepenúltimo (segundo y tercero) se consideran con el mismo valor de la altura geopotencial punto a punto, con objeto de impedir el flujo zonal cerca de las fronteras. Estas condiciones han permitido realizar con buenos resultados el pronóstico numérico a 500 mb de los sistemas atmosféricos más frecuentes en la cuarta región.

Experimentos

Una vez resuelta la expresión (1) correspondiente a la ecuación de conservación de vorticidad equi-

valente en el nivel de 500 mb, con el método de relajación, para obtener la tendencia de la altura geopotencial el pronóstico se realiza mediante

$$Z_{t+1} = Z_t + \frac{\partial Z}{\partial t} \Delta t \quad (3)$$

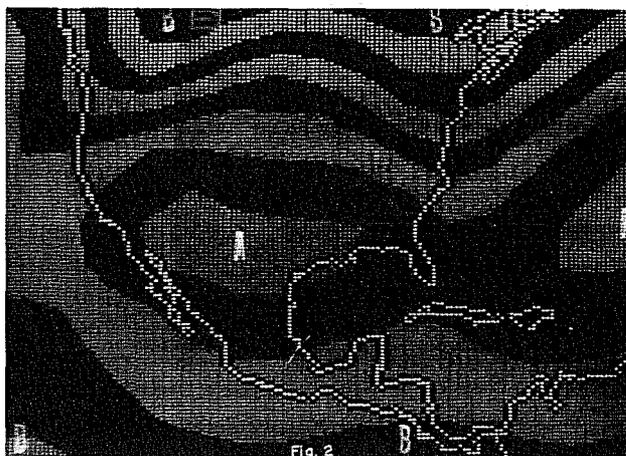
en el primer paso de tiempo, donde $\Delta t = 1$ hora y

$$Z_{t+1} = Z_{t-1} + 2 \left(\frac{\partial Z}{\partial t} \right) \Delta t \quad (4)$$

en los pasos de tiempo siguientes.

Los datos de las 12 00 TMG se aplican para realizar el pronóstico y se obtienen del análisis isohíptico de 500 mb, elaborado en el Departamento de Meteorología Sinóptica del Centro de Ciencias de la Atmósfera. La ilustración 1 muestra el campo de altura geopotencial del 21 de agosto de 1985; es fácil apreciar la circulación de los vientos del oeste al norte de la región y de los del este al sur. Estas dos circulaciones están conectadas por un canal de alto valor geopotencial que se extiende en la mayor parte del área de estudio (en las ilustraciones se identifican estos sistemas con la letra A). El jueves 22 de agosto de 1985 (véase ilustración 2), los sistemas de bajo valor geopotencial (en las ilustraciones se identifican con la letra B) se desplazaron hacia el este; el eje de esta vaguada más oriental llegó a estar sobre la costa atlántica de Canadá y Estados Unidos de Norteamérica. Es evidente que persistió un canal de alto valor geopotencial en la parte central de la región cuarta, así como vientos del este en el sur. Conviene tener en cuenta que el viento sopla en

Observado jueves 22/VIII/85 500 mb

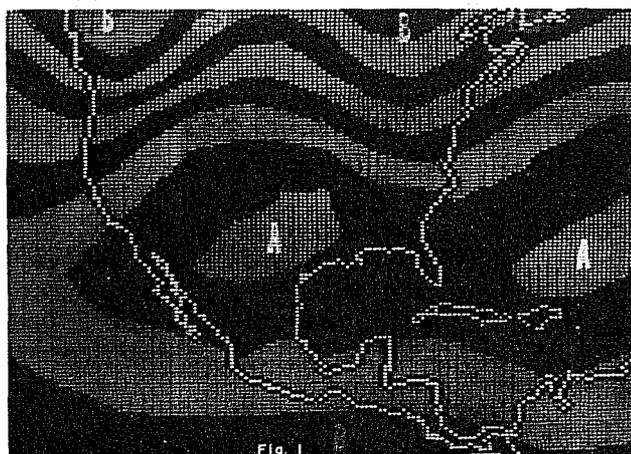


2. Campo de la altura geopotencial

sentido contrario a las manecillas del reloj en los sistemas de bajo valor geopotencial y en las altas sopla a la inversa.

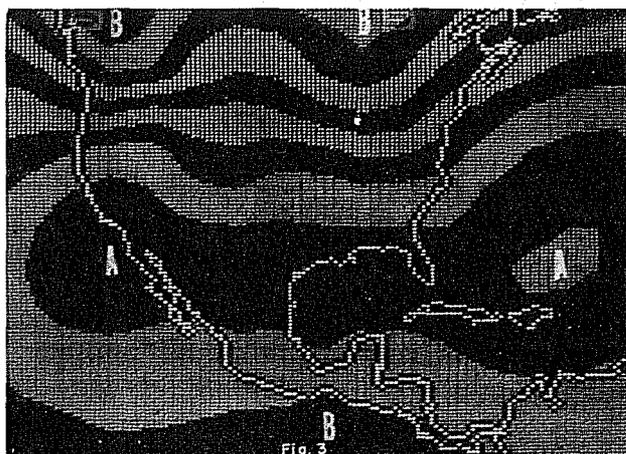
La persistencia de los sistemas de alto valor geopotencial pronosticada para el jueves 22 (véase ilustración 3), muestra la utilidad del modelo para prever las intensas precipitaciones registradas en la parte oriental, central y sur de la República Mexicana, donde el continuo transporte de humedad desde el Océano Atlántico es provocado por esta persistencia. Así mismo, la circulación anticiclónica de este canal permitió prever la presencia de aire seco en el norte de México. La vaguada oriental que se muestra en el pronóstico (véase ilustración 3) está retrasada respecto a la observada (véase ilustración 2), sin modificar el tiempo que se había pronosticado en el país.

Observado miércoles 21/VIII/85 500 mb



1. Campo de la altura geopotencial

Pronosticado jueves 22/VIII/85 500 mb



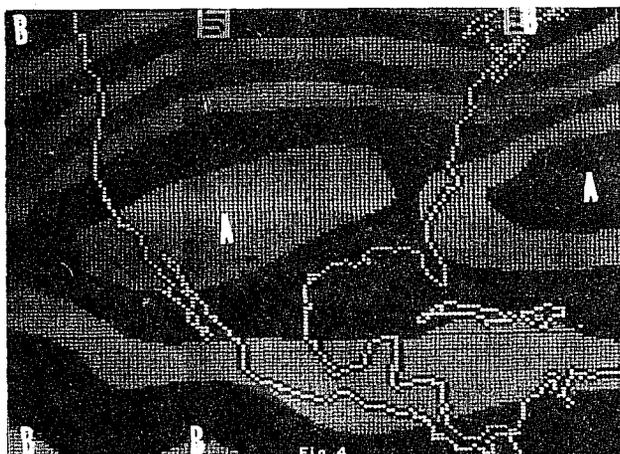
3. Campo de la altura geopotencial

En las ilustraciones 4 y 5, se presenta el campo isohéptico a 500 mb de los días 28 y 29 de agosto de 1985. Es evidente la intensa persistencia que tuvo el canal de alto valor geopotencial en esos días; en el norte de la región cuarta se identifican también sistemas de bajo valor geopotencial muy debilitados y una circulación del este muy amplia que abarca desde el norte de la Península de Yucatán, hasta el límite sur de la región cuarta. Estos vientos transportan humedad que se precipitará sobre todo el sur de México. Al norte de la región cuarta, se observa con claridad la circulación de los vientos oestes, que se perturban por ligeras cuñas asociadas a los centros de alto valor geopotencial. (Las cuñas se identifican como la cresta correspondiente a una onda y se caracterizan

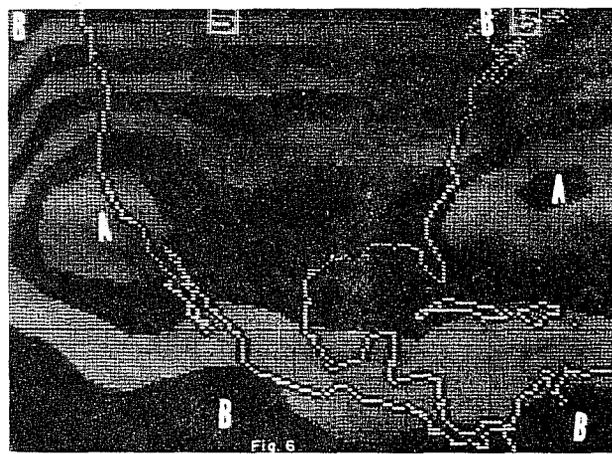
por tener movimientos descendentes de aire y cielos despejados). En la ilustración 6, se muestra el campo isohéptico pronosticado para el día 29. En general, se aprecia un pronóstico adecuado, ya que se detectaron los sistemas al norte de la región cuarta con el desplazamiento franco de los vientos del oeste, perturbados ligeramente por los centros de alto valor geopotencial presentes en los Estados Unidos de Norteamérica y el norte de la República Mexicana. Para el sur de ésta se pronostica flujo de humedad debido a los vientos del este, lo que también concuerda con lo observado. La ilustración 7 señala la altura geopotencial de 500 mb observada el jueves 28 de noviembre de 1985; es notoria la presencia de la vaguada de gran amplitud que separa los sistemas anticiclónicos

Observado miércoles 28/VIII/85 500 mb

Pronosticado jueves 29/VIII/85 500 mb



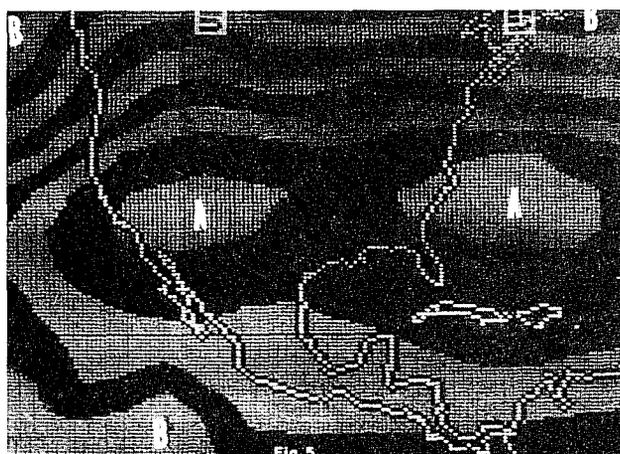
4. Campo isohéptico



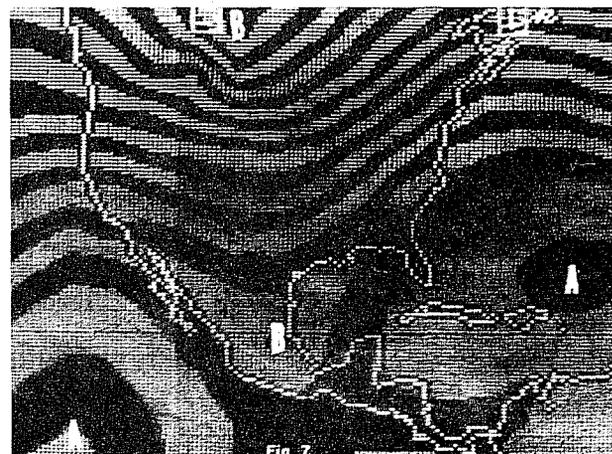
6. Campo isohéptico

Observado jueves 29/VIII/85 500 mb

Observado jueves 28/XI/85 500 mb



5. Campo isohéptico

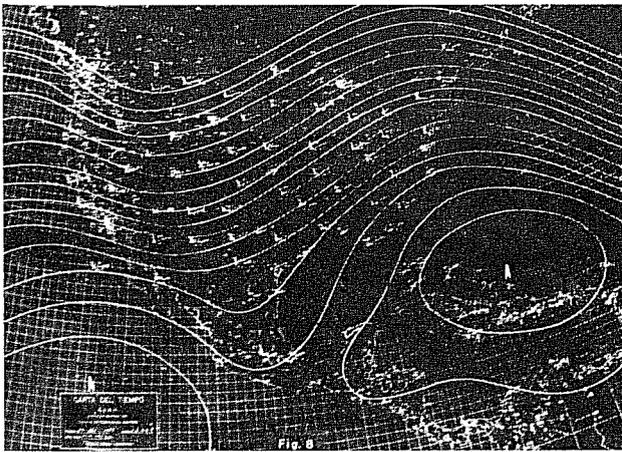


7. Altura geopotencial

nicos de los océanos Atlántico y Pacífico. Para el viernes 29 de noviembre (véase ilustración 8), la vaguada incrementó su amplitud hasta el sur de la región cuarta y se unió a un desprendimiento de humedad de la zona intertropical de convergencia que provocó nevadas en las zonas altas del Valle de México. El pronóstico para este día se muestra en la ilustración 9 y se nota una gran concordancia con el campo observado.

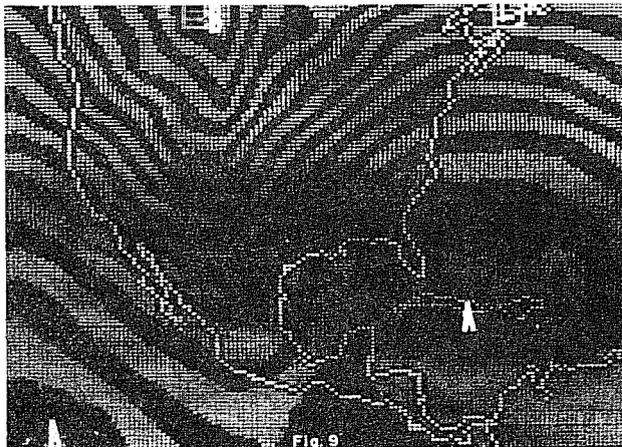
A partir de lo anterior, se puede afirmar que los pronósticos realizados son adecuados porque superan la persistencia —en caso contrario se consideran malos pronósticos.

Observado viernes 29/XI/85 500 mb



8. Altura geopotencial

Pronosticado viernes 29/XI/85 500 mb



9. Altura geopotencial

Referencias

- Bedi, H.S., "Spectral integration of an hemispheric barotropic model" *Mausam* 30, 1, pp. 31-38, 1979.
- Buendía, *et al.* "El modelo baroclínico simple y su resolución en la cuarta región". *Revista Geofísica IPGH*, núm. 21, 1984.
- Cullen, J. R. "Integration of the primitive equations on a sphere using the finite element method". *Quarterly Journal Research, Meteorological Society*, 100 pp. 555-562, 1974.
- Charney, J. G., "On a physical basis for numerical prediction of large-scale motions in the atmospheric", *Journal Meteorological*, 6, pp. 371-185, 1979.
- Charney, J. G., Fjortoft, R., Von Newman, J. "Numerical integration of the barotropic vorticity equations". *Tellus*, 2, 4, pp. 237-254, 1950.
- Eliassen, E., Machenhauer, B. "A study of the Fluctuations of the atmospheric planetary flow patterns represented by spherical harmonics". *Tellus*, 17, pp. 222-238, 1965.
- Gates, W. L. "A method of numerical forecasting by juxtaposition of one-dimensional solutions and its application of the equivalent barotropic model". *Journal Meteorological*, 10, 4, pp. 149-159, 1953.
- Krishnamurti, T. N. "Numerical integration of primitive equations by quasi-lagrangian advective scheme". *Journal of Applied Meteorology*, pp. 508-521, 1962.
- Ramanathan, Y., Bansal, R. R., K. "On application of a primitive equation barotropic model for the prediction of storm track in Indian region". *Indian Journal Meteorological Hydrology and Geophysics*, 28, 2, pp. 169-176, 1977.
- Richardson, L. *Weather prediction by numerical process*, Cambridge Univ. Press, Londres y Nueva York, 1922.
- Sanders, F., Burpee, R. W. "Experiments in barotropic hurricane track forecasting". *Journal of Applied Meteorology*, pp. 313-323, 1968.
- Shuman, F. G., Vanderman, L. W. "Difference system and Boundary conditions for the primitive equation barotropic forecast", *NER*, 94, pp. 329-335, 1968.
- Saucier, W. J. *Principles of Meteorological Analisis*, The University of Chicago Press. 438 pp., EUA, 1955.
- Thompson, P. D. "Numerical weather analisis and prediction", Nueva York, Mac Millian Company, N.Y., 170 pp., 1961.

¹ Artículo realizado en colaboración con el IMTA, SARH.

² Los autores agradecen la colaboración de R. Meza y R. Patiño para la obtención de los campos iniciales y sus puntos de vista en la discusión de los resultados; así como las facilidades proporcionadas por el Programa Universitario de Cómputo.