

La lluvia invernal en Tacubaya, México y su relación con los *nortes*.

Norma Sánchez-Santillán* y René Garduño López**

**Depto. El Hombre y su Ambiente, UAM-Xochimilco

*Depto. Climatología. Centro de Ciencias de la Atmósfera, UNAM

e-mail: santilla@correo.xoc.uam.mx

Recibido: 13 de enero de 2006.

Aceptado: 27 de abril de 2006.

Resumen

En el presente trabajo se hace un análisis del comportamiento de la lluvia invernal registrada en la estación meteorológica de Tacubaya en función del tipo de *norte* que la produce. Destaca la alta variabilidad observada durante los 127 años analizados (1878-2004), dentro de los cuales el 21.3% estuvo fuera de los límites establecidos por el Sistema Modificado de clasificación climática; la década con mayor ocurrencia de frentes fríos fue la de 1971-80 y la de menor 1931-40. Se analiza a través de una regresión, tanto el comportamiento de la precipitación como de ocurrencia de *nortes*; en el primer caso la pendiente es negativa y en el segundo positiva, lo que se explica por un incremento de *nortes* tipo profundo-seco (54.2%).

Abstract

This paper presents a behavior analysis of the winter rainfall registered on the Tacubaya weather station, as a function of the norther type that produces it. An outstanding facts is the high variability observed during the 127 year analyzed (1878-2004), 21.3% of which was outside of the limits set up by the Modified System of climate classification; the decade with greatest cold front occurrence was 1971-80 and the least one was 1931-40. By means of a regression, the precipitation behavior and the norther occurrence are analyzed; in the first case the slope is negative and in the second is positive, which is explained by the increase of deep-dry type northers.

Palabras clave: variabilidad climática, *nortes*, lluvia invernal.

Key words: climatic variability, norther, winter rainfall

Introducción

Cuando se analiza el comportamiento de la precipitación, no sólo es importante considerar la cantidad de lluvia que cae en el año, sino también su distribución a lo largo del mismo, para planear de manera óptima las actividades humanas. La Cd. de México, donde se localiza la estación meteorológica de Tacubaya, posee un régimen de lluvias de verano, determinado por los vientos alisios que se caracterizan por ser cálidos y húmedos, así como por la incidencia de ciclones tropicales en septiembre y octubre, predominantemente. Durante la porción invernal del año (noviembre, diciembre, enero y febrero), cuando la intensidad de los frentes fríos es máxima, el volumen precipitado es considerablemente menor y es consecuencia de los *nortes*, es decir, masas de aire polar, que en forma de cuñas de aire frío y denso penetran al Golfo de México por el norte, detrás de un frente frío difuso, que se denomina borde de ataque, separando el aire marítimo tropical cálido del aire polar modificado y constituyen una verdadera invasión de aire húmedo de las latitudes templadas o frías hacia las regiones intertropicales, su duración promedio es de uno a cinco días y su extensión supera los tres millones de km² (Mosiño, 1988; García, 1964; Schultz, *et al.*, 1998; Steenburg, *et al.*, 1998; Castillo & Castellvi, 2001; Tamayo, 2004).

Un frente frío se genera cuando una masa de aire frío avanza y desplaza a una masa de aire cálido, lo que resulta en una frontera entre una atmósfera baroclínica y una barotrópica (DiMego, *et al.*, 1976); con una rápida transición del campo térmico, acompañado por un cambio en la dirección del viento (Blumen, 2003). La interacción entre las dos masas de aire, genera vientos en los niveles bajos de la troposfera, desde la superficie hasta el nivel de los 700 milibarios, propiciando la formación de una línea frontal cuya longitud varía de cientos a miles de kilómetros y con una anchura en superficie

de unas cuantas decenas de kilómetros. A lo largo de ésta, se desarrollan abundantes nubes tipo *cumulus* y *cumulo-nimbus* con un desarrollo vertical superior a 1.5 km, que en ocasiones provocan precipitaciones a su paso (Carrasco, 1945; Magaña, 1999). De acuerdo a la intensidad del norte, se pueden alcanzar vientos desde 10-15 m/seg hasta 25 m/seg; de forma eventual, los más intensos han alcanzado los 40 m/seg, generando oleajes en los puertos del Golfo de México de 1.8 a 2.4 m, 5.5 m y 9 m respectivamente (Schultz, *et al.*, 1998).

La distribución estacional de la lluvia constituye una de las variables para tipificar los climas, en los diversos sistemas de clasificación climática existentes hoy en día. La clasificación de Köppen (1948) es la más usada en escalas globales, para caracterizar amplias zonas geográficas cuyos climas se extienden esencialmente en latitud, mas no en altitud; este sistema no se puede aplicar de manera óptima en México porque no es lo suficientemente detallado para poder caracterizar la enorme variedad de microclimas existentes, derivados de la accidentada orografía; razón por la cual, García (1964), adaptó y modificó dicho sistema para la República Mexicana, al que se denomina Sistema Modificado.

En el Sistema Modificado y para aquéllas localidades con régimen de lluvias de verano —como la Cd. de México— la cantidad de lluvia invernal (enero, febrero y marzo) se calcula como la fracción porcentual del volumen precipitado durante todo el año. Para esta fracción existen tres intervalos que caracterizan los microclimas: menor de 5%, entre 5 y 10.2% y mayor de 10.2%. En el caso de Tacubaya el promedio para los últimos 30 años es de 2.9%. Sin embargo, se reporta una importante variabilidad interanual de este valor durante el período 1878-2004, que podría ser consecuencia del comportamiento del vórtice circumpolar, este último, constituye un enorme río de viento que gira alrededor del globo a gran altura sobre las latitudes templadas que corresponden a Norteamérica, Europa y norte de Asia. La velocidad de esta corriente es variable a lo largo del año y se evalúa a través del índice zonal; cuando éste es bajo, la corriente es lenta y desarrolla ondulaciones llamadas vaguadas, que provocan el desplazamiento del vórtice hacia el sur, mientras que cuando es alto, la circulación es rápida y conforma corrientes de chorro que se mantienen alrededor de las latitudes altas, sin presentar deformaciones. Este fenómeno incide, de manera importante, en la inestabilidad del clima que se experimen-

ta en la Tierra (Rossby, 1954; Lamb, 1972).

Cuando el planeta tiende a calentarse y la circulación circumpolar se intensifica, es decir, aumenta su velocidad, las corrientes de chorro asociadas a éste, también la incrementan, registrándose un mínimo de meandros, con lo que las zonas climáticas del sur pueden extenderse hacia latitudes templadas, esto propicia condiciones climáticas más moderadas y las regiones de latitudes medias no presentan situaciones meteorológicas extremas, por lo que la temperatura y las lluvias son más previsibles, con el consecuente beneficio para las actividades humanas.

De acuerdo a Gribbin (1982) los tiempos climáticos fluctuantes registrados en las últimas décadas guardan una estrecha relación con la dilatación y el debilitamiento que se observa en dicho vórtice, al empujar los sistemas de alta presión tropicales, como la celda Bermuda-Azores, hacia el sur y permitir que los anticiclones de bloqueo retornen con mayor frecuencia. Ello hace que los sistemas de baja presión cargados de humedad se desplacen a lo largo de los extremos norte o sur de las trayectorias principales de los meandros o vaguadas, originando fenómenos de teleconexión, es decir, de enlaces a grandes distancias de anomalías climáticas aparentemente desconectadas, como sucede por ejemplo, entre la Oscilación del Atlántico Norte y los eventos El Niño-Oscilación del Sur que contribuyen a la variabilidad climática (Díaz & Markgraf, 1992; Sánchez-Santillán, *et al.*, 2006).

En este sentido, Lamb (1972) aporta pruebas de la existencia de una circulación global atmosférica debilitada entre el período 1950-70, incluso afirma que si el vórtice circumpolar se debilita, la Tierra se enfría y se establecen los anticiclones de bloqueo. No se sabe exactamente cada cuantos años se producirán sistemas de bloqueo, pero coinciden con una mayor frecuencia de sequías, incidencia de *nortes* y otros eventos meteorológicos extremos observados en la actualidad, y pudieran señalar que se está retornando a las condiciones que dominaron el globo hace varios milenios, donde hubo una circulación zonal debilitada.

La problemática antes planteada dio origen a la presente contribución, en la que se hace un análisis de largo período de la variabilidad de la lluvia invernal que se registra en la Cd. de México durante el período 1878-2004 por la incidencia de *nortes*.

Materiales y Métodos

Se emplearon los registros mensuales de precipitación de la estación meteorológica de Tacubaya, D. F., localizada en las coordenadas 19°24' de latitud N y 99°12' de longitud W, durante el período de 1878-2004. Por ser la serie superior a 120 años (1,524 meses invernales), fue necesario determinar la homogeneidad de los mismos a través de una visualización gráfica para observar su comportamiento según el criterio de García (1984) y, posteriormente, se determinó la confiabilidad de los mismos a través de una prueba de homogeneidad de datos con el método de Sved-Eisen-Hart (Klein, 1982; Wilkis, 1995), dando por resultado un intervalo de confianza calculado para registros homogéneos del 95%.

A partir del promedio de los registros de lluvia total mensual y temperatura media mensual se determinó el tipo de clima de acuerdo con García (1964); y dentro de éste se estimó el porcentaje de lluvia invernal con respecto a la precipitación total anual a partir de la ecuación propuesta en el Sistema Modificado:

$$\text{Porcentaje de lluvia invernal} = \frac{\text{Lluvia de enero} + \text{febrero} + \text{marzo}}{\text{Lluvia total anual}} \times 100\%$$

A continuación, se determinó la tendencia del comportamiento de la lluvia invernal y de los *nortes* a lo largo del período (1878-2004) mediante una regresión lineal (Daniel, 1996).

Por último, se recopilaron los registros de la incidencia de *nortes* en el Distrito Federal del Servicio Meteorológico Nacional durante el período 1879-1999 (no están disponibles los de 2000-2004); y junto con el volumen de lluvia invernal se aplicó un análisis de correlación simple (Daniel, 1996).

Resultados y Discusión

El clima de Tacubaya corresponde al tipo Cb(w₁)(w)(i')g, es decir, templado con un verano fresco y largo, subhúmedo, con régimen de lluvias en verano, su temperatura promedio anual es de 15.2 °C; el mes más frío es febrero con 5.9 °C y el más cálido es mayo con 17.7 °C; registra poca oscilación térmica y tiene una marcha de la temperatura tipo ganges. La precipitación total anual es de 766 mm, el mes más lluvioso es julio con 166.2 mm y el más seco es febrero con 5.9 mm; su porcentaje de lluvia in-

vernal es de 2.9 (Sánchez-Santillán & Garduño, 2005).

A lo largo de los 127 años analizados se observa una amplia variabilidad en el porcentaje de lluvia invernal respecto al valor promedio, los años extremos fueron 1919 con 12.7%, lo que significa que hubo un incremento de más de cuatro veces lo normal (2.9%); mientras que 1986 el porcentaje fue 0.0% lo que denota que no hubo precipitación durante los meses invernales (Tabla 1).

Como se dijo inicialmente, la precipitación invernal registrada en Tacubaya debe su origen a la ocurrencia de *nortes*, sin embargo, no todos los *nortes* que se registran en la Cd. de México aportan lluvias, debido a que existen diversos tipos. Uno de los aspectos más importantes al analizar los frentes fríos, consiste en determinar las modificaciones termodinámicas y dinámicas a las que se someten las masas de aire a través de su desplazamiento hacia latitudes bajas; lo que hace que vayan perdiendo progresivamente su identidad original; sus características se entremezclan con el aire y la superficie que las rodea, debilitándose paulatinamente el intercambio energético entre ellas, hasta verse sometidas a la afinidad de la nueva región (Castillo & Castellví, 2001). Así entonces, cuando la masa de aire permanece por un tiempo prolongado —varias horas o hasta días— sobre una cuenca oceánica o continental, tenderá a desarrollar un equilibrio termodinámico con el medio que lo rodea, de tal manera que las características del aire, serán modificadas por la superficie en la que se desplaza, mientras que, a su vez las características del terreno se verán afectadas por el aire en contacto (Reyes-Coca, 2001). Las masas de aire que se desplazan hacia otras regiones distintas en las que se originaron, modifican el estado del tiempo; en algunas ocasiones, el desplazamiento de los frentes fríos puede ocasionar condiciones de tiempo severo (Weisberg, 1976). Tal es el caso de las masas de aire polar o *nortes* que llegan a México en invierno.

Lo anterior explica la gama de características que pueden tener los *nortes* y ha dado origen a una diversidad de clasificaciones; entre las más conocidas se encuentran la de López (1926), Domínguez (1941), Jáuregui (1971), Klaus (1973), Mosiño (1988), y Mckalsy & Tilley (1992). Todas ellas señalan diversas cualidades particulares; ya sean barotrópicas, por su grado de penetración meridional, por su modificación al pasar por una región continental u oceáni-

Tabla 1. Porcentaje de lluvia invernal en Tacubaya, D. F. durante el período 1878-2004.

Años	Lluvia invernal (%)						
1878	0.9	1910	0.1	1942	6.4	1974	2.6
1879	3.5	1911	3.0	1943	4.1	1975	3.9
1880	2.7	1912	1.5	1944	1.3	1976	0.6
1881	4.5	1913	0.5	1945	2.8	1977	2.5
1882	10.7	1914	7.8	1946	4.1	1978	7.4
1883	10.8	1915	7.5	1947	1.5	1979	2.5
1884	2.2	1916	4.8	1948	0.9	1980	3.5
1885	3.4	1917	2.1	1949	6.5	1981	4.7
1886	4.0	1918	5.7	1950	0.5	1982	11.3
1887	0.5	1919	12.7	1951	2.8	1983	2.8
1888	4.8	1920	1.4	1952	2.7	1984	1.7
1889	4.7	1921	3.9	1953	1.3	1985	0.3
1890	0.6	1922	6.5	1954	2.2	1986	0.0
1891	4.7	1923	7.7	1955	1.2	1987	1.5
1892	10.4	1924	0.5	1956	1.0	1988	6.3
1893	4.3	1925	4.6	1957	1.1	1989	0.4
1894	1.8	1926	1.6	1958	2.1	1990	1.9
1895	11.3	1927	3.7	1959	1.7	1991	2.2
1896	0.5	1928	6.4	1960	1.0	1992	4.9
1897	0.6	1929	0.5	1961	2.1	1993	4.5
1898	2.3	1930	0.1	1962	0.5	1994	1.6
1899	1.0	1931	0.5	1963	1.7	1995	6.0
1900	5.6	1932	1.7	1964	2.7	1996	0.3
1901	4.3	1933	1.6	1965	3.7	1997	4.2
1902	3.2	1934	3.5	1966	8.3	1998	0.8
1903	0.8	1935	2.4	1967	5.4	1999	1.3
1904	5.9	1936	2.0	1968	5.0	2000	0.5
1905	4.5	1937	5.6	1969	2.6	2001	1.1
1906	7.2	1938	3.3	1970	0.8	2002	1.7
1907	8.1	1939	0.7	1971	4.5	2003	1.6
1908	3.1	1940	10.8	1972	1.6	2004	6.4
1909	1.8	1941	2.5	1973	1.5		

ca, o por su velocidad de desplazamiento. Recientemente en México, Vázquez (2002) se dio a la tarea de generar a partir de las clasificaciones anteriores y de un conjunto de elementos sinópticos, una sistematización que podría utilizarse para caracterizar los *nortes* al reunir las siguientes cinco propiedades: 1) ser un sistema de alta presión que se desplace sobre Estados Unidos de NE a SE, esto es, desde las montañas Rocallosas hasta la Península de Florida; 2) presentar vientos intensos que soplen de norte a sur en el Golfo de México y que se canalizan por el Istmo de Tehuantepec para finalmente afectar el Pacífico sur de México, donde producen un mezclado superficial del océano; 3) ocasionar descensos de la temperatura superficial, por el desplazamiento de la masa de aire polar continental hacia latitudes bajas; 4) provocar precipitaciones variables sobre el sureste de México y 5) registrar la presencia de una onda de latitudes medias desplazándose hacia los trópicos que pueda observarse en el nivel de 500 milibarios.

Esta última clasificación, aunque bastante actual, no explica satisfactoriamente los dos tipos de *nortes* que inciden en la Cd. de México: los que aportan lluvia invernal y los que no. De ahí que, para este caso, resulta más adecuada la clasificación propuesta por Mosiño (1988). En ella se tipifican cuatro tipos fundamentales: los someros y los profundos; los primeros, son las invasiones de aire polar modificado que chocan a lo largo de la llanura costera del Golfo de México y cuya profundidad no supera la altitud del Altiplano Mexicano; mientras que, en los segundos, la altura de la masa de aire sobrepasa la Sierra Madre Oriental, lo que le permite invadir el Altiplano Mexicano. Su característica de humedad se debe a la trayectoria por la que se desplazó, ya sea por una región oceánica o por una continental. En el primer caso, tiende a cargarse de humedad, mientras que en el segundo a desecarse (Castillo & Castellví, 2001). De ahí que pueden existir entonces, las siguientes combinaciones de *nortes*: a) someros húmedos, b) someros secos, c) profundos húmedos y d) profundos secos. En el caso de la Cd. de México los años que registran precipitaciones invernales son causadas por los *nortes* profundos-húmedos; es decir, masas de aire polar que al posarse sobre el Océano Atlántico adquirieron humedad, traspasaron la Sierra Madre Oriental y descargaron ésta a lo largo de su trayectoria, para finalmente depositar su remanente en la Cd. de México, antes de la *frentelisis* o disolución del frente; mientras que,

en los años sin precipitación invernal, son responsables las masas de tipo profundo y seco cuya trayectoria proviene de Canadá y Estados Unidos.

Al agrupar los porcentajes de precipitación invernal en los tres intervalos que marca el Sistema Modificado para los climas con régimen de verano, la mayor frecuencia se observa en el intervalo menor a 5 (78.7% de los inviernos); en el intervalo entre 5 y 10.2 (15.7%) y en el intervalo mayor de 10.2 (5.5%) (Tabla 2). La distribución de la frecuencia de la lluvia invernal corrobora el tipo climático de la zona de estudio y es indicativo de una mayor proporción de *nortes* profundos-secos que arriban a la Cd. de México; los 27 casos que exceden el límite para este tipo climático representan el 21.3% y no constituyen argumento suficiente para cambiar el intervalo dentro del cual se ubica el área de estudio; pero señalan, por un lado una variabilidad altamente significativa; y por otro, que durante esos años los *nortes* fueron del tipo profundo-húmedo.

Tabla 2. Intensidad de la precipitación invernal en Tacubaya, D. F., durante el período 1878-2004.

Intervalo de lluvia Invernal (%)	Número de inviernos	Porcentaje
Menor de 5	100	78.7
Entre 5 y 10.2	20	15.7
Mayor de 10.2	7	5.5

De acuerdo al porcentaje de lluvia invernal estimado en la Cd. de México se puede afirmar que hay un ligero predominio de *nortes* profundos-secos equivalente al 54.2% (valores negativos), mientras que al tipo profundo-húmedo corresponden el 45.8% (positivos); como se observa en los coeficientes de correlación calculados entre el número de *nortes* y la cantidad de lluvia invernal registrada (Tabla 3). Dentro de los del tipo profundo-húmedo, el 56.3% de los casos generó precipitaciones en la localidad de estudio debido a que la masa de aire adquiere calor en su trayectoria hacia el sur sobre el Océano Atlántico, la intensa evaporación generada al pasar por el Golfo de México enriquece de vapor dicha masa, originalmente seca, lo que propicia una inestabilidad importante y favorece una condensación brusca y violenta, la lluvia adquiere un carácter borrascoso con nubes tipo *cumulo-nimbus*, al que se denomina línea de borrasca y con frecuencia genera tormentas en la capital del país; cabe destacar que este tipo de frentes avanzan con mayor rapidez (Ca-

rrasco, 1945); a diferencia de los profundos-secos, cuya velocidad de desplazamiento es proporcionalmente más lenta en su recorrido (Castillo & Castellvi, 2001).

La tendencia de la lluvia invernal mostró una ligera pendiente negativa ($b = -0.0155$), esto explica el descenso de la lluvia invernal que pasó de 4.4 a 2.4% en 127 años e implica que, a lo largo del período estudiado, han ido en aumento los *nortes* del tipo profundos-secos que alcanzan la Cd. de México (Fig. 1).

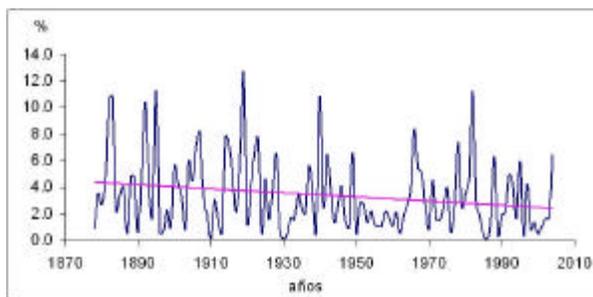


Figura 1. Tendencia del porcentaje de lluvia invernal en Tacubaya, D. F., durante el período 1878-2004.

Respecto a la incidencia de *nortes* en la Cd. de México, la tendencia refleja una pendiente positiva $b = 0.065$, que pasó de 18 eventos en 1923 a 23 en 1996, la tasa de cambio de incremento es de cinco *nortes* en 74 años (Fig. 2).

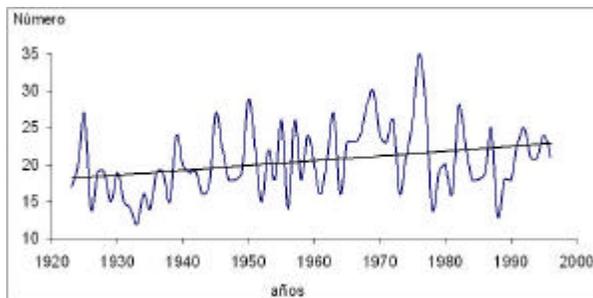


Figura 2. Tendencia de los *nortes* durante el período 1923-96, en Tacubaya, México.

Lo anterior permite observar un incremento de los *nortes* profundos-secos, que explica el descenso de la lluvia invernal a lo largo del período analizado. Es importante destacar que la correlación y la tendencia tanto del porcentaje de lluvia invernal como de la ocurrencia de *nortes* reflejan que el 54.2% de los casos, tiene coeficientes de correlación tanto ne-

gativos como positivos con valores absolutos mayores que 0.66, resultante de un índice zonal bajo, es decir, la circulación del vórtice circumpolar es lenta; mientras que, el 45.8% de los casos, con un coeficiente de valor absoluto menor que 0.66 denota un índice zonal alto o circulación rápida.

Al analizar la ocurrencia del número de *nortes*, sin importar su tipo, registrados en la Cd. de México en las diferentes décadas, se observa una variabilidad significativa (Tabla 4), ya que el promedio anual es de 20.5 y su desviación estándar es de 2.2; en las primeras tres décadas, la ocurrencia fue menor a la media; mientras que, en las siguientes tres, fue mayor. Es importante destacar que el comportamiento a lo largo del tiempo parece ser de carácter periódico e implica armónicos de distinta amplitud. Los resultados coinciden con lo señalado por Hernández (2002), quien reporta el invierno de 1926-27 como anómalo, ya que hubo un solo *norte*; asimismo, el período 1965-73 en donde el promedio de *nortes* fue de 25 por año. Jáuregui (1971) afirma que al iniciar la década de los 60 del siglo XX hubo un incremento tanto del número de *nortes* como del volumen de lluvia invernal. Por otro lado, Hurrell (1995) analiza el comportamiento de la Oscilación del Atlántico Norte, evento meteorológico asociado con el comportamiento del vórtice circumpolar, y determina que durante el período 1970-2000 ha predominado una circulación zonal rápida de éste, cuyo efecto es la disminución de frentes fríos hacia latitudes más bajas.

Tabla 4. Número de *nortes* registrados en la Cd. de México por décadas.

Década	Número de <i>nortes</i>	Diferencia con respecto al valor promedio
1924-1930	18.7	1.8
1931-1940	16.7	3.8
1941-1950	19.5	1.0
1951-1960	21.4	0.9
1961-1970	22.8	2.3
1971-1980	23.2	2.7
1981-1990	19.7	0.8
1991-1997	21.8	1.3

La variabilidad climática de regiones intertropicales como la Cd. de México obedece, en parte, a la diferencia que se forma con el gradiente de temperatura y presión de las regiones extratropicales; sobre todo en invierno, cuando la República Mexicana

Tabla 3. Coeficiente de correlación entre el número de *nortes* y la lluvia invernal

Años	r	Años	r	Años	r	Años	r
1925	-0.21	1943	0.10	1961	-0.34	1979	-0.77
1926	0.75	1944	0.61	1962	-0.99	1980	-0.94
1927	0.94	1945	-0.07	1963	-0.18	1981	-0.75
1928	0.83	1946	0.52	1964	-0.40	1982	0.89
1929	0.89	1947	0.42	1965	-0.36	1983	0.67
1930	0.45	1948	0.98	1966	0.63	1984	0.91
1931	-0.99	1949	1.00	1967	-0.14	1985	0.83
1932	-0.83	1950	-0.48	1968	-0.73	1986	-0.64
1933	-0.68	1951	-0.93	1969	-0.83	1987	0.94
1934	0.90	1952	-0.84	1970	0.58	1988	-0.74
1935	0.99	1953	-0.44	1971	-0.15	1989	-0.70
1936	-0.34	1954	-1.00	1972	-0.61	1990	-0.97
1937	0.42	1955	-0.92	1973	0.25	1991	0.63
1938	0.15	1956	-0.07	1974	0.06	1992	0.78
1939	-0.59	1957	0.75	1975	1.00	1993	0.16
1940	-0.19	1958	-0.15	1976	-0.73	1994	0.61
1941	-0.48	1959	-0.92	1977	-0.98	1995	0.77
1942	0.88	1960	-0.17	1978	-1.00	1996	0.97

na queda fuera de la influencia de los vientos alisios, hasta una latitud aproximada de 20° , en esta época, el comportamiento del vórtice circumpolar, determina las características meteorológicas dominantes. Dicho vórtice presenta dos tipos de circulación, caracterizados de acuerdo a la velocidad con que giran sus vientos y siguiendo siempre una dirección de oeste a este; uno es el de circulación zonal lenta y, su contraparte, rápida. En la primera, se forman grandes meandros, denominados vaguadas, que facilitan el desplazamiento de los vientos polares hacia latitudes más bajas; este corrimiento hacia el este, ocasiona que dichas masas atraviesen, alternadamente, las porciones continentales de Canadá y Estados Unidos y, posteriormente, las áreas marinas del Atlántico Norte, para luego continuar sobre el continente Euroasiático hasta conformar una vuelta circumpolar. En la segunda, la velocidad de la circulación de los vientos alrededor del polo es tal, que no permite el retraso de las masas de aire frío, por lo que no invaden latitudes tan bajas como en otro caso, sino que más bien, se mantienen alrededor del polo (Rossby, 1954, Lamb, 1972).

En el primer tipo de circulación zonal, los inviernos para la porción norte y centro de México son severos y abundan los *nortes*, ya sean del tipo húmedo, cuando se desplazaron por encima del océano Atlántico o del Golfo de México, donde elevan lige-

ramente su temperatura y se cargan de humedad, para posteriormente descargarla sobre las planicies costeras de Tamaulipas y Veracruz y, en muchos casos, traspasan la Sierra Madre Oriental y acarrear consigo la humedad restante en el centro del país ocasionando la lluvia invernal; mientras que los de tipo seco, caracterizados por ser fríos y secos, generan descensos térmicos abruptos e intensos, donde se registran temperaturas de entre 1 y 2°C , durante dos o tres días (Mosiño, 1974).

Las modificaciones en el gradiente de presión entre una fase y otra, es decir, entre una vaguada y otra, producen grandes cambios en la velocidad y dirección de los vientos del Atlántico. El calor y el transporte de humedad entre este océano y los alrededores de los continentes americano y europeo varían marcadamente de acuerdo a la intensidad y número de tormentas invernales, sus trayectorias y el estado del tiempo meteorológico asociado a ellas. Asimismo, estos cambios en las presiones barométricas, acompañados de modificaciones en las temperaturas del Atlántico alteran el nivel del mar debido a que las masas de agua reaccionan a las variaciones en el régimen de los vientos, los cuales influyen sobre las corrientes, la altura y amplitud de las olas y la temperatura superficial oceánica (Villanueva, 1991).

Identificar la velocidad del vórtice circumpolar, el número y profundidad de las vaguadas que se desarrollan, el patrón que siguen durante el período invernal y la periodicidad de los *nortes*, constituyen una herramienta fundamental para comprender y en su caso, predecir la cantidad e intensidad frentes de fríos que ocurrirán año con año para determinar la severidad invernal y prevenir, en la medida de lo posible, las pérdidas económicas que se registran en los diversos sectores económicos no sólo de la Cd. de México sino de todo el país.

Conclusiones

- El 78.7% de los años registró un porcentaje de lluvia invernal de acuerdo con su tipo climático, mientras que el 21.3% lo estuvo fuera de los límites.
- El año de 1919 fue el año con mayor porcentaje de lluvia invernal (12.7), equivalente a más de cuatro veces la cantidad promedio; mientras que en 1986 el volumen fue de 0.0
- En el 54.2% de los inviernos los *nortes* fueron del tipo profundo-seco y el 45.8% del tipo profundo-húmedo.
- Sólo el 56.3% de los *nortes* del tipo profundo-húmedo aportaron precipitación en la Cd. de México.
- La tendencia de la precipitación invernal mostró una pendiente negativa ($b = -0.155$) a lo largo de 127 años (1878-2004); cuyo volumen porcentual pasó de 4.4 a 2.4
- La tendencia de los *nortes* refleja una pendiente positiva ($b = 0.065$) en los 127 años (1878-2004); que pasó de 18 a 23 eventos por invierno.
- La década con mayor número de *nortes* fue de 1971-80 y la menor de 1931-40.

Bibliografía

1. Blumen, W. 2003. *Fronts*. Encyclopedia of Atmospheric Sciences. Vol. 2. Academic Press. London. 805 pp.
2. Carrasco, P. 1945. *Meteorología*. Fondo de Cultura Económica. México. 278 pp.
3. Castillo, F. y F. Castellví. 2001. *Agrometeorología*. Ed. Mundi-Prensa. Barcelona. 2ª ed. 517 pp.
4. Daniel, W. 1996. *Bioestadística. Base para el análisis de las ciencias de la salud*. UTHEA. México. 878 pp.
5. Díaz, H. y V. Markgraf. 1992. *El Niño. Historical and paleoclimatic aspects of the Southern Oscillation*. University Press. Cambridge. 477 pp.
6. DiMego, G., L. Bosart y G. Enderson. 1976. An examination of the frequency and mean conditions surrounding frontal incursions into the Gulf of Mexico and Caribbean Sea. *Monthly Weather Review*. 104: 709-719.
7. Domínguez, D. 1941. Clasificación de los nortes del Golfo de México. *Revista de Meteorología y Aerología*. 1(4):14-22.
8. García, E. 1964. *Modificaciones al sistema de Clasificación Climática de Köppen, para adaptarlo a las condiciones de la República Mexicana*. Serie Libros. Instituto de Geografía. UNAM. México. 90 pp.
9. García, E. 1984. *Apuntes de Climatología de Posgrado*. Instituto de Geografía, UNAM. s/p
10. Gribbin, J. 1982. *El clima futuro*. Ed. Biblioteca Científica Salvat. Barcelona. 241 pp.
11. Hernández, B. 2002. El Niño-Oscilación del Sur (ENOS) y los frentes fríos que arriban a la región occidental cubana. *Investigaciones Marinas*. Valparaíso. 30(2): 3-19.
12. Hurrell, J. 1995. Decadal trends in the North Atlantic Oscillation regional temperatures and precipitation. *Science*. 269: 676-679.
13. Jauregui, E. 1971. Los sistemas de tiempo en el Golfo de México y su vecindad. *Boletín del Instituto de Geografía*. Vol. VI.
14. Klaus, D. 1973. Las invasiones de aire frío en los trópicos a sotavento de las Montañas Rocallosas. *Geofísica Internacional*. 13(2):99-143.
15. Klein, W. 1982. Statistical weather forecasting on different time scales. *Bulletin of the American Meteorological Society*. 63: 170-177.
16. Köppen, W. 1948. *Climatología. Con un estudio de los climas de la tierra*. Ed. Fondo de Cultura Económica. México. 478 pp.

17. Lamb, H. 1972. *Climate: Present, past and future*. Volume I. Fundamentals and climate now. Ed. Methuen. Londres. 613 pp.
18. López, E. 1926. Estudio sobre los *nortes*. *Boletín del Servicio Meteorológico y Sismológico Central*. México. No. 6: 1-23.
19. Magaña, V. (Ed.). 1999. *Los impactos de El Niño en México*. UNAM. 229 pp.
20. Mecikalsi, J. y J. Tilley. 1992. Cold surges along the front range of the Rocky Mountains: Development of a Classification Scheme. *Meteorology and Atmospheric Physics*. 48: 249-271.
21. Mosiño, P. 1974. *El escenario geográfico. Introducción ecológica*. INAH y SEP. México. 306 pp.
22. Mosiño, P. 1988. Dos tipos de norte en el Golfo de México. *Memoria del III Congreso Interamericano de Meteorología*. Del 14 al 18 de octubre de 1988. pp. 119-123.
23. Reyes-Coca, S. 2001. *Introducción a la Meteorología*. Ed. Universidad Autónoma de Baja California. 466 pp.
24. Rossby, C. 1954. *Las bases científicas de la moderna meteorología*. Sociedad Mexicana de Geografía y Estadística. México. Tomo LXXVIII (2): 107-187.
25. Sánchez-Santillán, N. y R. Garduño. 2005. Tendencia de la sequía intraestival en Tacubaya. *Contactos. Revista de Educación en Ciencias e Ingeniería*. 3ª Época. No. 56: 62-69.
26. Sánchez-Santillán, N., R. Garduño, I. Méndez, A. Esquivel y R. Sánchez-Trejo. 2006. Simultaneous occurrence between the North Atlantic Seesaw and El Niño. Enviado para su publicación en *Atmósfera*.
27. Schultz, D., W. Bracken y L. Bosart. 1998. Planetary and synoptic scale signatures associated with Central American cold surges. *Monthly Weather Review*. 126: 5-27.
28. Servicio Meteorológico Nacional. Registros de *nortes* en el D. F. durante el período 1879-1999.
29. Steenburg, W., D. Schultz y B. Colle. 1998. The structure and evolution of gap outflow over the Gulf of Tehuantepec, Mexico. *Monthly Weather Review*. 126: 2673-2691.
30. Tamayo, J. 2004. *Geografía Moderna de México*. Ed. Trillas. México. 512 pp.
31. Vázquez, J. 2002. Caracterización objetiva de los *nortes* del Golfo de México y su variabilidad interanual. Tesis de Licenciatura en Ciencias Atmosféricas. Universidad Veracruzana. México. 62 pp.
32. Villanueva, E. 1991. Predicción de anomalías de temperatura superficial en el Golfo de México. Tesis Doctoral. Instituto de Ciencias del Mar y Limnología, UNAM. 97 pp.
33. Wilkis, D. 1995. *Statistical Methods in the Atmospheric Science*. Academic Press. Nueva York. 375 pp.