

VARIACIONES TEMPORALES DE LA HUMEDAD ATMOSFÉRICA EN ALTURA SOBRE MÉXICO

J. Omar CASTRO-DÍAZ, Aranza BARUCH-VERA y Adalberto TEJEDA-
MARTÍNEZ

Universidad Veracruzana, Xalapa, Veracruz, México.

omcastro293@gmail.com, vera.aranza@gmail.com, atejeda@uv.mx

RESUMEN

Se comparan las tendencias de la humedad atmosférica en altura en México en tres estaciones de radiosondeo (costa, continente en altura y desierto), con el fin de detectar cambios en el contenido de vapor de agua en la atmósfera entre 1981 y 2016. Se analizaron datos diarios de razón de mezcla, temperatura del aire y agua precipitable de radiosondeos a las 12Z. La razón de mezcla y la temperatura mostraron tendencias positivas en tres niveles (500, 300 y 200 hPa) en el sitio continental y en el de costa; para la zona desértica en la tropósfera media la tendencia de temperatura se encontró positiva y en la razón de mezcla no se presentaron tendencias; en la tropósfera alta la tendencia de razón de mezcla es negativa, pero la de temperatura fue positiva. Para el agua precipitable las tendencias observadas en el desierto son mayormente negativas, a excepción del verano; las tendencias de menor magnitud se presentaron en la zona continental, y las positivas con valores más altos en la costa. La influencia del ENSO en el comportamiento del vapor de agua no fue determinante; no obstante se observó que en el sitio continental y el desierto se registraron valores más altos durante El Niño, mientras que en el sitio de costa fueron mayores durante La Niña.

Palabras clave: Tendencias de humedad, radiosondeos, México, ENOS.

ABSTRACT

Trends and variations of the atmospheric humidity in height in Mexico at three radiosonde stations (coast, continental and desert) are compared, in order to detect changes in the water vapor content in the atmosphere between 1981-2016. Mixing ratio, air temperature and precipitable water 12Z daily radiosonde data were analyzed. Mixing ratio and temperature show positive trends at 500, 300 y 200 hPa in the continental site and the coastal; for desert zone in the middle troposphere temperature trend was positive and null for mixing ratio; in high troposphere mixing ratio trend was negative but temperature trend was positive. For precipitable water, trends observed in the desert are mostly negative, with the exception of summer; lower trends was present in continental zone; and positive highs in the coast. ENSO influence was not determinant; nevertheless greater values during El Niño in continental and desert zones were observed, otherwise, during La Niña phase greater values were found in the coast.

Key words: atmospheric humidity trends, radiosonde, Mexico, ENSO.

1. INTRODUCCIÓN

La humedad atmosférica representa una proporción mínima del agua planetaria, pero afecta el balance de energía entre la atmósfera y la superficie del planeta y es el gas de mayor contribución al efecto invernadero. Aquí se pretende identificar sus tendencias sobre México a través de la razón de mezcla (r) y del agua precipitable (W) a 500, 300 y 200 hPa. La r (gramos de vapor/kilogramo de aire seco) se suele calcular con la Ec. 1, con e la presión de vapor y P la presión atmosférica en hPa:

$$r = 622 \frac{e}{P-e} \quad \text{Ec. 1,}$$

W , en mm, se obtiene mediante la Ec. 2:

$$W = \frac{1}{\rho g} \int_{P_1}^{P_2} r dp \quad \text{Ec. 2,}$$

con ρ la densidad del agua (10^3 kg m^{-3}) y g la aceleración gravitacional ($9,81 \text{ ms}^{-2}$). Más detalles de ambas ecuaciones se pueden ver en Tejeda et al. (2018). Sin embargo, para este trabajo los datos de r y W se obtuvieron de los archivos de radiosondeos de la Universidad de Wyoming (<https://weather.uwyo.edu/upperair/sounding.html>).

El Sexto Reporte de Evaluación del Grupo 1 del Panel Intergubernamental de Cambio Climático (IPCC, 2021) indica que el calentamiento global intensifica y continuará intensificando el ciclo del agua, incluyendo su variabilidad, las lluvias monzónicas y la severidad de eventos húmedos o secos. De ahí la importancia de evaluar las tendencias de la humedad atmosférica, dado que el contenido de vapor de agua en la atmósfera se incrementa con el calentamiento planetario en alrededor de $7\% \text{ }^\circ\text{C}^{-1}$ (Hartmann, 2016).

La distribución mundial del vapor de agua muestra una configuración latitudinal. Tuller (1968) evaluó 182 estaciones a lo largo del planeta y encontró los valores más bajos sobre los polos, que aumentan hasta las regiones ecuatoriales donde alcanzan hasta 44,5 mm de agua precipitable; un factor que disrumpe el patrón latitudinal es la advección de vapor de agua por las corrientes oceánicas.

Para México Jáuregui (1986) y Belitzkaya y Skiba (1999) analizaron la distribución de W para los periodos 1965-1974 y 1990-1996, respectivamente. Como era de esperarse los valores más bajos se presentan al interior del país, sobre la altiplanicie, mientras que los más altos cerca de las costas, excepto en la region desértica del noroeste.

Gutzler (1992) analizó la atmósfera sobre el océano Pacífico oeste en 16 niveles verticales, hasta aproximadamente los 300 hPa y observó tendencias positivas en la temperatura y humedad específica en los años setenta del siglo pasado. Wang y colaboradores (2017) encontraron tendencias negativas de W sobre China Continental para el periodo 1995-2012, además de una correlación positiva de W con sistemas como el ENSO y el monzón asiático. Mencionan que dicha tendencia en la mayoría de las estaciones fue consistente con la tendencia negativa de temperatura en la columna de 1000 a 300 hPa. Por su parte, Kassomenos y McGregor (2006) encontraron variaciones considerables a escalas mensual e interanual sobre el sur de Grecia, así mismo observaron tendencias positivas estadísticamente significativas a escala anual y para el verano (junio a agosto) y otoño (septiembre a noviembre).

2. DATOS Y MÉTODOS

Se analizaron datos diarios de radiosondeos a las 12 Z. El análisis de r en los niveles de 500, 300 y 200 hPa, corresponde al periodo 1977-2016; mientras que el de W al periodo 1981-2016; ambos para las estaciones indicadas en la Tabla 1. Como ya se mencionó, estos datos se obtuvieron de la Universidad de Wyoming (<https://weather.uwyo.edu/upperair/sounding.html>).

Estación	Característica Geográfica	Altitud msnm	Latitud °N	Longitud °W
CDMX*	Continental	2231	19,40°N	-99,20°W
Tucson	Desierto	751	32,23°N	-110,96°W
Veracruz	Costa	10	19,15°N	-96,12°W

*Tabla 1: Ubicación de las estaciones de radiosondeo utilizadas. *Ciudad de México.*

Se eligieron tres sitios de características geográficas distintas (Fig. 1): Veracruz, en una zona costera; la Ciudad de México, al interior del continente a 2250 msnm, y Tucson, Arizona, que es un sitio árido en los Estados Unidos a 20 km de la frontera con México. En cuanto al control de calidad de los datos, las series de tiempo de r y la temperatura (T en °C) fueron verificadas bajo la técnica de Box-Jenkins (Box, 2016), la cual permite identificar, estimar y validar datos faltantes, así como detectar valores atípicos, pero principalmente genera modelos ARMA (autorregresivos de medias móviles) y ARIMA (autorregresivos integrados de media móvil), los cuales permitieron encontrar patrones en las series de tiempo. Se analizaron los datos a 500, 300 y 200 hPa; se imputaron, por interpolación, del 15 al 20% de los datos mediante el promedio del dato anterior y posterior al faltante, y se descartaron los datos atípicos que estuvieran fuera de la media más/menos dos desviaciones estándar. Para la r , en cada sitio y para cada nivel, se obtuvieron las estadísticas descriptivas, el modelo ARIMA (que en todos los casos fue completamente autorregresivo) y las gráficas de series de tiempo, en las cuales se evaluó su tendencia y su significancia estadística bajo la prueba de Mann-Kendall (Hamed y Rao, 1998).

A las series de datos diarios de W se les aplicó un análisis exploratorio para detectar datos que sobresalían del rango ($0 < W < 100$ mm), dado que físicamente no es posible encontrar valores negativos de W y los máximos absolutos globales no rebasan los 100 mm (Tuller, 1968). Debido a la naturaleza de los datos, para eliminar atípicos se aplicó el siguiente procedimiento. De los datos ordenados de menor a mayor, se tomaron muestras aleatorias de posibles atípicos y se detectó que las inconsistencias se presentaban principalmente en los extremos inferior y superior de la serie debido a errores en los registros de T y/o r a lo largo del sondeo; del histograma de frecuencias se observó que dentro del 5% de los límites inferior y superior de las series se encontraban los datos sospechosos; se examinaron los radiosondeos de estos casos para comprobar que contaran con registros por lo menos en los niveles obligatorios de medición y que alcanzaran los 250 hPa en altura, eliminando los datos que no cumplieran con estos criterios. En todos los casos se alcanzó más del 70% de los datos de las series, mínimo para considerar que una serie es útil, según el criterio de Guo y Ding (2009). Ya con series sin datos atípicos se calcularon los promedios mensuales,

anuales y estacionales para cada sitio. Finalmente, se evaluaron las tendencias y su significancia estadística bajo la prueba de Mann-Kendall (Hamed y Rao, 1998); así mismo, se calcularon las tendencias relativas, es decir, el porcentaje que representa la tendencia de Mann-Kendall respecto de la media de W .

Para detectar numéricamente la relación entre la humedad atmosférica con el ENSO, se realizaron regresiones lineales y tablas de contingencias con datos de anomalías de la temperatura de la superficie del mar (SST) en la región de El Niño 3.4 (5°N-5°S, 120°-170°W), obtenidos de la página del Climate Prediction Center (https://origin.cpc.ncep.noaa.gov/products/analysis_monitoring/ensostuff/ONI_v5.php), el cual usa el índice Oceanic Niño Index (ONI). Se calcularon los datos de W equivalentes a los de anomalías de SST, calculando las medias móviles trimestrales para el mismo periodo.

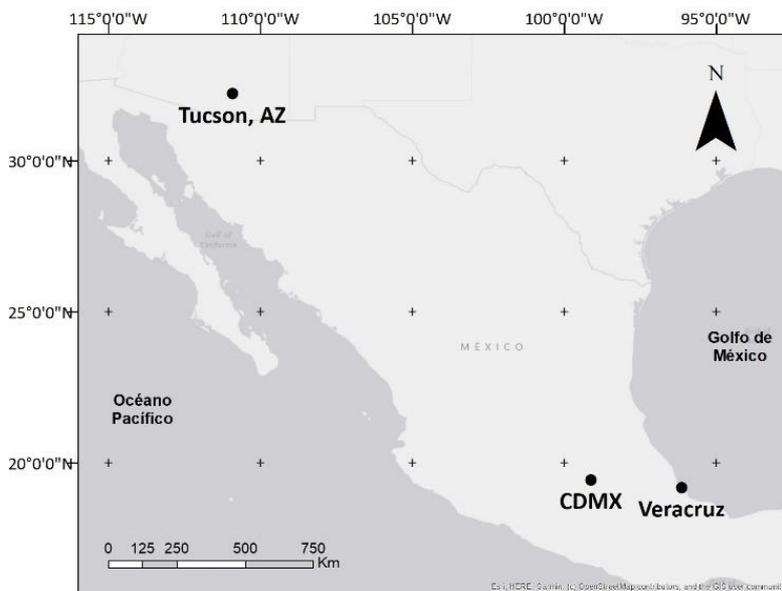


Fig. 1: Distribución espacial de las estaciones de radiosondeo estudiadas.
Fuente: Google Earth. CDMX: Ciudad de México.

3. RESULTADOS

3.1 Razón de mezcla (r)

Los modelos que cumplieron los criterios de Box-Jenkins con los menores valores del error cuadrático medio, presentaron el proceso autorregresivo AR de orden uno, ARIMA (1,0,0) o AR (1), sin la transformación logarítmica, por lo que las series originales no tuvieron que *estacionarizarse* ni en media (tendencia) ni en varianza (periodicidad); esto es, que no hubo necesidad de aplicar el proceso de medias móviles.

En la Figura 2a se presentan las tendencias de r para la Ciudad de México. En los tres casos se observan tendencias positivas, de 0,03 g/kg/década a 200 y 500 hPa, y a 300 hPa de 0,01 g/kg/decada. Para el Puerto de Veracruz (Fig. 2b) las tendencias son de mayor magnitud, en 500 hPa (0,11 g/kg/década), mientras que en la troposfera alta (300 y 200 hPa) son de 0,03 g/kg/década. Por otro lado, para el desierto (Fig. 2c) las

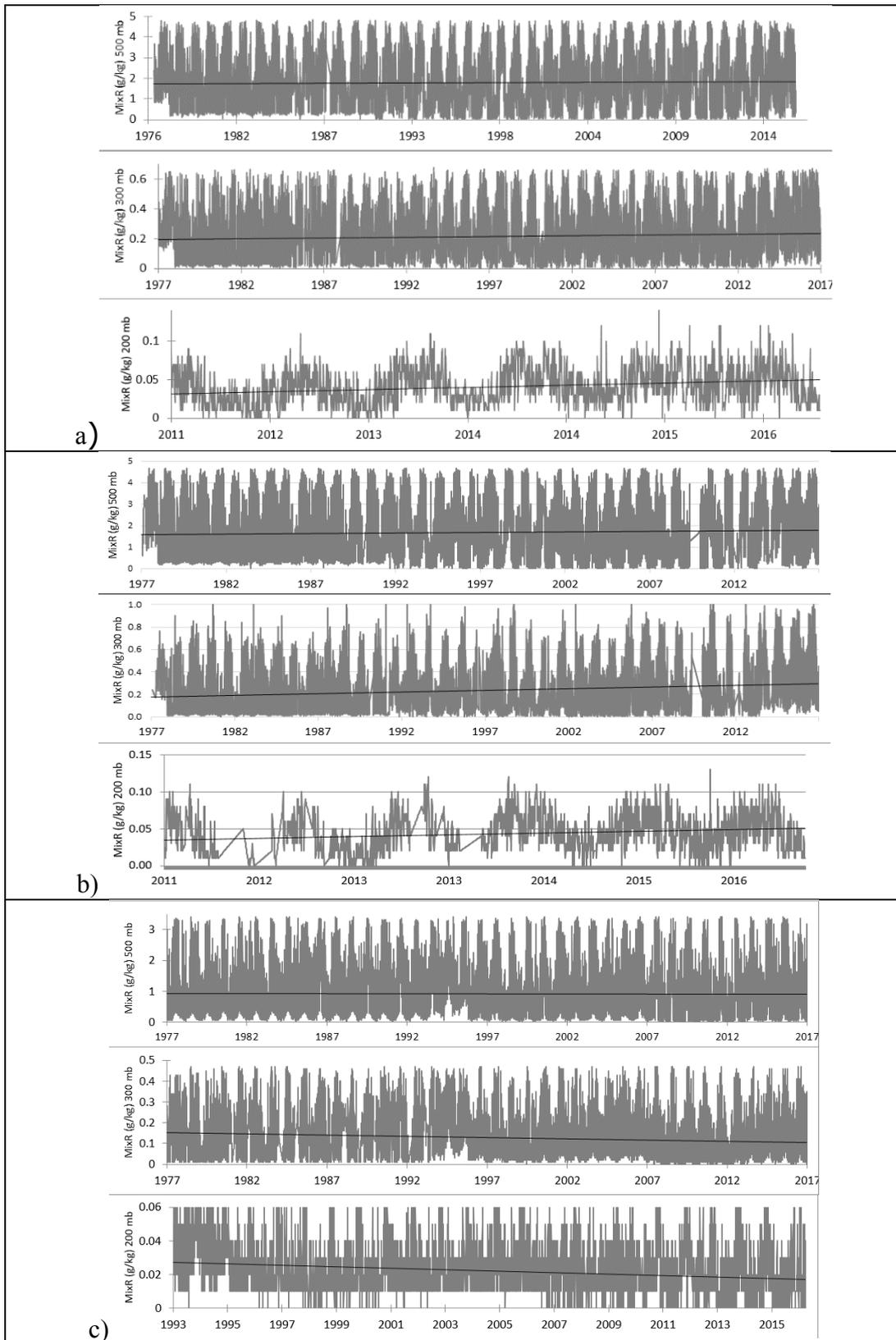


Fig. 2: Tendencias de razón de mezcla en a) Ciudad de México, b) Veracruz y c) Tucson.

tendencias resultaron negativas a los 300 y 200 hPa (-0,01 g/kg/década y -0,005 g/kg/década), mientras que a los 500 hPa no se presentó tendencia.

3.2 Agua precipitable (W)

Las series de tiempo de W resultaron ser un reflejo de las condiciones geográficas de cada uno de los tres puntos analizados. Los mayores valores se encontraron en el sitio costero. Aunque Tucson es más seco que la Ciudad de México, debido a su altura la segunda tiene un valor medio de W inferior (Fig. 3).

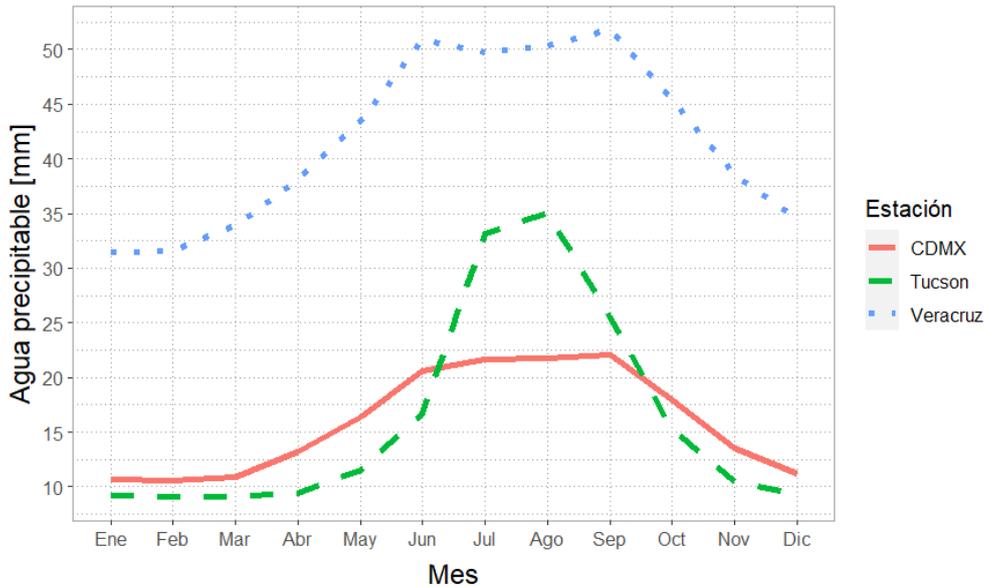


Fig. 3: Comparación de la variación interanual del agua precipitable en los tres sitios de estudio.

Las tendencias con valores más altos se detectaron en el Puerto de Veracruz en todas las escalas temporales (Tabla 2), seguido por Tucson, mientras que las de menor magnitud en la Ciudad de México. Esto sugiere que cuanto mayor sea el contenido de vapor en la columna atmosférica, las tendencias son más intensas; no obstante, también es claro que el contenido de vapor depende fuertemente de la profundidad de la capa de medición del sondeo.

La Tabla 3 contiene las tendencias relativas, expresadas como el porcentaje del cambio de W respecto de la media del sitio. Se observa que las variaciones más intensas se han presentado en Tucson, donde ha disminuido el 0,7% por década del valor de la media climatológica; en Veracruz y Ciudad de México se observa un aumento del 0,6% y 0,5% por década, respectivamente. Se detectaron tendencias estadísticamente significativas únicamente en dos casos, para Veracruz a partir de datos diarios (Tabla 2), y para el verano en Tucson (Tabla 4), lo cual podría sugerir una intensificación en el monzón que afecta la región durante esta temporada.

Estación	Diaria	Anual	Mensual
CDMX	0,08	-0,01	0,003
Tucson	-0,11	-0,05	-0,018
Veracruz	0,24	0,15	-0,112

Tabla 2: Tendencias absolutas [mm/década]. Nota: En negritas se resaltan las tendencias estadísticamente significativas.

A pesar de que la tendencia absoluta en Tucson es negativa, en julio (verano) se presentó un aumento significativo del vapor de agua que, como ya se mencionó, podría estar vinculado al aporte de humedad del monzón en esta región. En Veracruz sucede lo opuesto, pues la tendencia absoluta fue positiva en todas las escalas, pero se observa que durante los veranos W ha disminuido a una tasa de 0,25 mm por década. Finalmente, en la Ciudad de México las tendencias resultaron positivas, a excepción de enero (invierno) con una disminución de 0,13 mm por década para los últimos 36 años.

Estación	Total	Anual	Mensual
CDMX	0,5	-0,06	0,02
Tucson	-0,7	-0,31	-0,11
Veracruz	0,6	0,36	-0,27

Tabla 4: Tendencias relativas [% de la media/década]

Estación	Enero	Abril	Julio	Octubre
CDMX	-0,13	0,06	0,12	0,06
Tucson	-0,06	-0,37	1,61	-0,54
Veracruz	0,36	0,57	-0,25	0,61

Tabla 3: Tendencias estacionales [mm/década]. En negritas se resaltan las tendencias estadísticamente significativas.

3.3 Relación con el ENSO

A partir de datos anuales de W se identificaron gráficamente los periodos con más variación respecto de la media, los cuales resultaron correspondientes a fases activas positiva/negativa del ENSO. Se eligieron los periodos 2015-2016 y 1999-2000 representativos de El Niño y La Niña, respectivamente; se graficaron en la Figura 4 los valores mensuales de W en las tres estaciones de radiosondeo y se observó una ligera pero clara diferencia en magnitud durante cada fase; para la Ciudad de México y Tucson, los valores de W fueron superiores durante El Niño, y en Veracruz fueron mayores en periodos de La Niña.

No se encontró una correlación importante entre W y las anomalías de la SST. El coeficiente de determinación más alto fue de 0.0044 en la Ciudad de México y el más bajo en Tucson (0.0018). Puesto que las regresiones lineales no fueron determinantes, se generaron tablas de contingencia; en la columna principal se categorizaron los

valores de las series de W , que se agruparon en seis clases de distinta amplitud para cada estación de radiosondeo; y en la fila principal las fases del ENSO a partir de valores de la SST: La Niña de $-1,8$ a $-0,5$ °C, neutro entre $-0,4$ a $0,4$, y El Niño de $0,5$ a $2,6$ °C. De estas tablas se observó que en Tucson independientemente de la fase en que se encontrara el ENSO dominaron valores bajos de W , especialmente durante La Niña, mientras que en periodos neutros ocurrieron alrededor del 15% de los valores superiores a los 21 mm. Para la Ciudad de México, los valores más bajos se presentaron con mayor frecuencia durante La Niña, especialmente valores entre 6 y 12 mm; en eventos de El Niño dominaron valores cercanos al promedio (18.85 mm); en los periodos neutros se observaron valores más altos en general, alrededor del 26% de los datos de W fueron por arriba del promedio durante estos periodos. En Veracruz, durante La Niña se presentaron valores más bajos de W , el 9 % del total de los datos ocurrió en el rango de los 31 a 36 mm (la segunda categoría en orden ascendente) durante esta fase; en los periodos de El Niño fueron ligeramente más frecuentes valores cercanos al promedio (41.7 mm); y en condiciones neutras se observó alrededor del 25 % de valores por arriba del promedio.

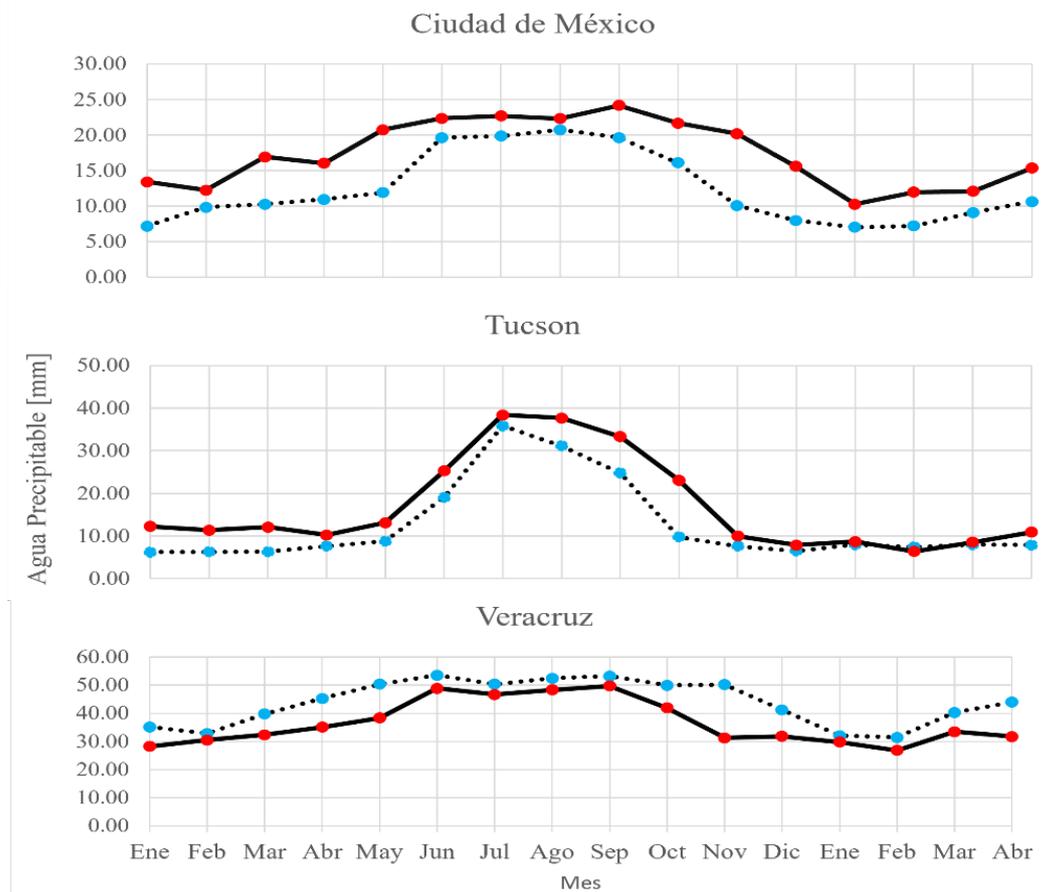


Fig. 4: Comportamiento del agua precipitable en el periodo 2015-2016 del ENSO positivo (continua) y 1999-2000 para su fase negativa (punteada).

4 .DISCUSIÓN

Se presentaron las tendencias de humedad atmosférica mediante la r a 500, 300 y 200 hPa de altura y de la columna completa mediante la W (Tabla 5), con datos de radiosondeo para un periodo de 40 años y 36 años, respectivamente. El análisis se realizó a través de series de tiempo que fueron sometidas a un control de calidad. La serie de r bajo la metodología de Box et al. (2016) se ajustó a un modelo ARIMA(1,0,0) o AR(1), esto es, que las series se adecuaron a partir de los valores observados, no necesitando los componentes aleatorias, es decir, no requirieron para su ajuste de las medias móviles. Por otra parte, para la serie de W se siguió un proceso para la homogeneización diseñada ex professo.

En la integración vertical de la columna de aire el sitio costero contiene mayor cantidad de vapor de agua, y el que menos es la Ciudad de México debido a su elevación (2.500 msnm), lo que es consistente con lo encontrado por Jauregui (1986). La Ciudad de México y Veracruz presentan tendencias positivas en W y r , mientras Tucson presenta tendencias negativas de r a 300 hPa y 200 hPa y en W . Aparentemente, cuanto mayor es el contenido de vapor de agua en la columna atmosférica, se manifiestan tendencias de mayor magnitud.

Un punto que queda pendiente, es la atribución de las tendencias encontradas a cuestiones locales o a cambios y variaciones climáticas de mayor escala.

Fueron calculadas regresiones lineales y tablas de contingencia del ENSO con W para cada sitio, sin embargo no fue posible demostrar una relación clara pues los coeficientes de determinación fueron sumamente bajos y las tablas de contingencia no fueron determinantes. En suma, se infiere que sí existe relación entre W y el ENSO, dado que en cada fase y en cada sitio fue diferente el comportamiento de la humedad atmosférica, pero se requieren estudios más profundos para precisar en qué medida ocurre esta relación.

Estación	Ciudad de México	Tucson	Veracruz
Tendencia absoluta [mm/década]			
Agua precipitable	0,08	-0,11	0,24
Razón de Mezcla [g/kg/década]			
500hPa	0,03	0,11	N/P
300hPa	0,01	0,03	-0,01
200hPa	0,03	0,03	-0,005

Tabla 5: Resumen de tendencias a partir de series diarias. Se resaltan en negritas las tendencias estadísticamente significativas.

REREFENCIAS

Belitskaya, V. D., & Skiba, Y. N. (1999). The distribution and transport of the water vapor over Mexico. *World Resource Review*, 11(4), 562-575.

- Box, G., Jenkins, G., Reinsel, G. and Ljung, G. (2016). *Time series analysis. Forecasting and Control*. Hoboken, New Jersey: John Wiley & Sons, Inc.
- Chung, E.-S., Soden, B., Sohn, B., & Shi, L. (2014). Upper-tropospheric moistening in response to anthropogenic warming. *Proceedings of the National Academy of Sciences of the United States of America*, 111, 11636-11641.
doi: <https://doi.org/10.1073/pnas.1409659111>
- Guo, Y., & Ding, Y. (2009). Long-term free-atmosphere temperature trends in China derived from homogenized in situ radiosonde temperature series. *Journal of Climate*, 22(4), 1037-1051. doi: <https://doi.org/10.1175/2008JCLI2480.1>
- Gutzler, D. S. (1992). Climatic variability of temperature and humidity over the tropical western Pacific. *Geophysical Research Letters*, 19(15), 1595-1598.
doi: <https://doi.org/10.1029/92GL01579>
- Hamed, K. H., & Rao, A. R. (1998). A modified Mann-Kendall trend test for autocorrelated data. *Journal of Hydrology*, 204(1-4), 182-196.
doi: [https://doi.org/10.1016/S0022-1694\(97\)00125-X](https://doi.org/10.1016/S0022-1694(97)00125-X)
- Hartmann, D. L. (2016). *Global Physical Climatology*, Chapter 1 - Introduction to the Climate System, Editor(s): Dennis L. Hartmann, (Second Edition), Elsevier, 1-23. ISBN 9780123285317. doi: <https://doi.org/10.1016/B978-0-12-328531-7.00001-3>.
- IPCC, 2021: *Climate Change 2021: The Physical Science Basis. Contribution of Working Group I to the Sixth Assessment Report of the Intergovernmental Panel on Climate Change* [Masson-Delmotte, V., P. Zhai, A. Pirani, S. L. Connors, C. Péan, S. Berger, N. Caud, Y. Chen, L. Goldfarb, M. I. Gomis, M. Huang, K. Leitzell, E. Lonnoy, J. B. R. Matthews, T. K. Maycock, T. Waterfield, O. Yelekçi, R. Yu and B. Zhou (eds.)]. Cambridge University Press. In Press.
- Jáuregui, E. (1986). Distribución del vapor de agua precipitable en México. *Geofísica Internacional*, 25(2), 353-359.
- Kassomenos, P. A., & McGregor, G. R. (2006). The interannual variability and trend of precipitable water over southern Greece. *Journal of Hydrometeorology*, 7(2), 271-284. doi: <https://doi.org/10.1175/JHM484.1>
- Tejeda-Martínez, A., I.R. Méndez-Pérez, N.C. Rodríguez y E. Tejeda-Zacarias (2018). *La humedad en la atmósfera: bases físicas, instrumentos y aplicaciones*. Universidad de Colima, Colección Enfoque Académico, 263 p.
http://ww.ucol.mx/content/publicacionesenlinea/adjuntos/La-humedad-en-la-atmosfera_466.pdf
- Tuller, S. E. (1968). World distribution of mean monthly and annual precipitable water, *Monthly Weather Review*, 96(11), 785-797. doi: [https://doi.org/10.1175/1520-0493\(1968\)096%3C0785:WDOMMA%E2.0.CO;2](https://doi.org/10.1175/1520-0493(1968)096%3C0785:WDOMMA%E2.0.CO;2)
- Wang, R., Fu, Y., Xian, T., Chen F., Yuan, R., Li, R., & Liu, G. (2017). Evaluation of Atmospheric Precipitable water characteristics and trends in Mainland China from 1995-2012. *Journal of Climate*, 30(21), 8673-8688.
doi: <https://doi.org/10.1175/JCLI-D-16-0433.1>