

# TENDENCIAS OBSERVADAS DE LA PRECIPITACIÓN EN LOCALIDADES CERCANAS AL VALLE DE MÉXICO Y UNA ESTIMACIÓN DE SU EVOLUCIÓN DURANTE EL SIGLO XXI

Benjamín MARTÍNEZ LÓPEZ<sup>1</sup>, Francisco ESTRADA PORRÚA<sup>1</sup>, Carlos GAY GARCÍA<sup>1</sup>  
<sup>1</sup> *Centro de Ciencias de la Atmósfera, Universidad Nacional Autónoma de México*  
benmar@atmosfera.unam.mx, feporrúa@atmosfera.unam.mx, cgay@servidor.unam.mx

## RESUMEN

En esta comunicación se estiman las tendencias observadas de precipitación en algunas localidades cercanas al Valle de México durante el siglo XX. En general, las series analizadas son lo suficientemente complejas como para eliminar la posibilidad del simple ajuste de una recta por mínimos cuadrados. Por esta razón, se usan modelos de regresión estadísticamente adecuados, enfatizando principalmente el análisis de la estabilidad de los parámetros e identificando posibles fechas de cambio estructural en la función de tendencia. Se estiman las tendencias de la precipitación simuladas durante el siglo XX por algunos modelos de circulación general utilizados en el Cuarto Reporte de Evaluación del IPCC y se discuten las proyecciones de los mismos bajo diversos escenarios de emisiones durante el siglo XXI.

**Palabras clave:** Ciudad de México, Precipitación, Tendencias de Precipitación, Modelos de Regresión.

## ABSTRACT

In this communication, available precipitation time series covering the XX century are analyzed in order to estimate the precipitation tendencies in some locations around Mexico City. In general, the precipitation series show a complex behaviour, which precludes the use of ordinary regression methods. Here we use appropriate statistical tools to estimate possible structural changes in the tendency function. We also estimate and discuss the precipitation tendencies from IPCC-AR4 models for both 20<sup>th</sup> century simulations and 21<sup>th</sup> century scenarios.

**Key words:** Mexico City, Precipitation, Precipitation Tendencies, Regression Models.

## 1. INTRODUCCIÓN

Durante los últimos años, los habitantes de las zonas menos favorecidas de la Ciudad de México se han tenido que acostumbrar a los cada vez más frecuentes cortes en el suministro de agua. Algunas ocasiones la razón argumentada ha sido el mantenimiento a la infraestructura que surte el líquido; en otras, se informa que la necesidad de hacerlo se debe a los niveles alarmantemente bajos de las presas del Sistema Cutzamala. Poco se dice, sin embargo, acerca del porcentaje que representa el volumen proveniente del Cutzamala en la cantidad de agua total que se usa en la Ciudad de México: alrededor del 27%, según el

Sistema de Aguas de la Ciudad de México (Soto y Herrera, 2009). Comparando este porcentaje con la cantidad de agua que se pierde en la red de distribución, aproximadamente el 37% del caudal que ingresa (Soto y Herrera, 2009), resulta evidente que con la inversión local necesaria para reparar las fugas se podría prescindir totalmente del aporte del Sistema Cutzamala (aunque esta solución quizás no es realista debido al acelerado hundimiento que presenta la ciudad).

En la actualidad, el mayor porcentaje de la demanda de agua de la Ciudad de México es cubierto por pozos administrados por la federación y por las autoridades locales. Un grave problema, asociado íntimamente con ellos, es el agresivo cambio de suelo que ha experimentado el Valle de México en las últimas décadas. La urbanización ha traído consigo una pérdida sostenida de la capacidad de infiltración del agua de lluvia al subsuelo en las zonas naturales de recarga. El resultado: grandes volúmenes que antes llegaban a los mantos acuíferos, hoy acaban yéndose al drenaje o a los ríos, mismos que por falta de la infraestructura necesaria han sido convertidos en cañerías en las cuales se mezclan tanto aguas pluviales como negras e industriales. Año con año se extiende la mancha urbana, y año con año se tiene un volumen mayor de aguas negras que se tiene que sacar del Valle de México, con el concomitante gasto energético para realizar tal tarea.

Lo peor y sin sentido, sin embargo, es el cada vez mayor volumen de agua pluvial que no recarga los acuíferos, de los cuales dependen los pozos que abastecen a la ciudad y cuya sobreexplotación es tal que año con año ocasiona un hundimiento mayor de la ciudad (Escolero et al., 2009), dificultando aún más las labores de desagüe. Considerando lo anterior, parecería que las autoridades responsables en todos los niveles de gobierno se han empeñado en crear un problema más que en solucionarlo. De mantenerse el sistema hidráulico actual, los costos económicos del bombeo de agua del Sistema Cutzamala y las obras de infraestructura para sacar las aguas negras del Valle de México, los cuales representan egresos extraordinarios, se incrementarán en un futuro. Por ejemplo, si se presentaran más frecuentemente periodos secos y cálidos se tendría una gran demanda de agua que no podría satisfacerse utilizando un volumen adicional proveniente del Sistema Cutzamala debido a las cuotas existentes y al acotamiento en la disponibilidad del recurso. Una manera de satisfacer esta hipotética demanda futura sería utilizar más agua de los pozos, con lo cual se agravaría su sobreexplotación, ya de por sí menguada por la poca o nula recarga asociada al crecimiento futuro de la mancha urbana y la poca precipitación supuesta. Por el contrario, en caso de que se observaran periodos más húmedos se tendría un volumen mayor de aguas negras que sacar del Valle de México, pero debido al crecimiento de la mancha urbana, no se tendría una recarga de los mantos acuíferos acorde a la mayor cantidad disponible de lluvia, situación absurda y paradójica.

El interés primario de esta investigación es responder una pregunta, en apariencia muy sencilla, pero que tiene implicaciones muy serias para el entorno urbano de la Ciudad de México: basándonos en las observaciones disponibles, ¿han cambiado las características de los patrones de precipitación en el Valle de México? Dependiendo de la respuesta a tal interrogante y contrastándola con las proyecciones futuras asociadas al cambio climático obtenidas a partir de modelos climáticos se puede construir el conocimiento base, que utilizado por expertos en hidrología, sustente la información necesaria sobre la cual se puedan desarrollar las políticas hídricas adecuadas tendientes a resolver, o al menos mitigar, el problema futuro de abasto de agua de la Ciudad de México.

## 2. METODOLOGÍA

### 2. 1. Datos

Para estimar la evolución de la precipitación en localidades cercanas al Valle de México se utilizaron ocho series de precipitación extraídas de dos mallas climáticas, cada una con una resolución espacial de medio grado tanto en longitud como latitud, disponibles en la página <http://climexp.knmi.nl>. Las cuatro primeras series fueron extraídas de la base denominada CRU TS3, producida por el “Climate Research Unit” de la Universidad de East Anglia, la cual cubre el periodo 1901-2006 (MITCHELL y JONES, 2005). Además, se extrajeron otras cuatro series (en las mismas localidades de las cuatro primeras) de la base del “Global Precipitation Climatology Centre” (denotada por GPCC), la cual cubre el periodo 1901-2007 (SCHNEIDER et al., 2008). Las localidades son mostradas en la Fig. 1. Se utilizó además el registro de precipitación del Observatorio de Tacubaya, el cual es la serie de tiempo más larga con que se cuenta en la Ciudad de México.

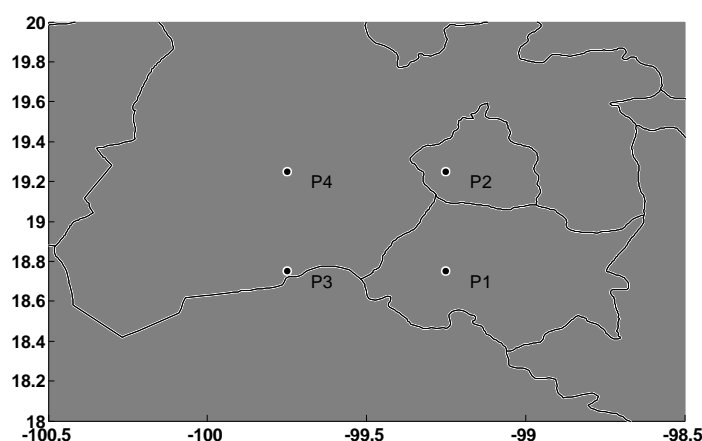


Fig. 1: Localidades de los puntos de las mallas climáticas utilizadas para analizar las series de tiempo de precipitación. La localidad P2 está muy próxima al observatorio de Tacubaya.

Las proyecciones futuras de la precipitación se obtuvieron a partir de las salidas disponibles de algunos modelos globales de circulación general usados en el Cuarto Reporte de Evaluación del IPCC (IPCC, 2007). CONDE (2009) seleccionó algunos modelos que representan el rango de incertidumbre, es decir incluyen el rango aproximado de los posibles aumentos de temperatura y, más importante, contienen tanto incrementos como reducciones en precipitación. De esta manera, y tomando en cuenta todos los criterios del IPCC-TGICA, seguimos la sugerencia de CONDE (2009), quien recomienda el uso de los modelos ECHAM5, HADGEM1, GFDL CM2.1 y MIROC32-HIRES para construir los escenarios de cambio climático en Centroamérica y las hacemos extensivas para la región del Valle de México (vea la página <http://www.ipcc-data.org/ar4/scenario-20C3M.html>). En esta página también se encuentra información acerca de los modelos utilizados y las variables disponibles. Las series se pueden extraer fácilmente de la base de datos disponible en la página <http://climexp.knmi.nl>).

### 2.2. Estimación de tendencias de las series de precipitación

La evolución temporal de las series de precipitación es, en general, lo suficientemente compleja que elimina la posibilidad de usar el simple ajuste de una recta por mínimos cuadrados para estimar las tendencias de las series. Por esta razón, se utilizaron modelos de regresión estadísticamente adecuados, enfatizando principalmente el análisis de la estabilidad de los parámetros e identificando posibles fechas de cambio estructural en la función de tendencia (ver por ejemplo, GAY et al., 2009; GAY et al., 2007; ANDREOU y SPANOS, 2003).

Para la estimación de tendencias se utilizó el método de regresión lineal por mínimos cuadrados ordinarios, máxima verosimilitud y mínimos cuadrados generalizados dependiendo de las características de los datos y modelos probabilísticos ajustados.

En todos los casos se verificaron los supuestos de regresión lineal pertinentes para este propósito, tales como: no auto-correlación, homoscedasticidad, normalidad, estabilidad en los parámetros y linealidad. Los tres primeros supuestos son necesarios para poder hacer pruebas de hipótesis sobre los coeficientes estimados (por ejemplo, evaluar si son estadísticamente significativos a un cierto nivel de confianza). El supuesto de no auto-correlación es de gran importancia para estimar correctamente los errores estándar de los coeficientes y por lo tanto su significancia. Adicionalmente, si bien en promedio las estimaciones siguen siendo insesgadas aún en la presencia de auto-correlación, cualquier estimación en particular puede ser sesgada. Para la estimación de tendencias, en el caso de que se presentara auto-correlación, se extendió el modelo a uno que incluyera componentes auto-regresivos y medias móviles (ARMA). Para estos modelos la estimación se realizó por el método de máxima verosimilitud.

El supuesto de homoscedasticidad, es decir que los errores de la regresión tengan una varianza constante, es necesario para que los estimadores de mínimos cuadrados ordinarios sean eficientes. Las consecuencias de la heteroscedasticidad son similares a las de la auto-correlación y dependiendo del tipo de heteroscedasticidad los errores estándar de los coeficientes pueden ser muy grandes o muy pequeños por lo que las inferencias que se realicen pudieran ser erróneas. En este trabajo cuando se presentaron problemas de heteroscedasticidad, se cambió el método de estimación a mínimos cuadrados generalizados o se utilizaron estimaciones de los errores estándar de White o de Newey-West.

El supuesto de normalidad permite realizar pruebas de hipótesis e inferencias. Para muestras grandes, las consecuencias de no cumplir este supuesto pueden ser pequeñas ya que debido al Teorema del Límite Central los estadísticos de prueba asintóticamente seguirán la distribución apropiada.

Asimismo, se verificó la estabilidad de los parámetros para evaluar si son válidos para toda la muestra. Esto resulta de gran interés para analizar cómo se ha presentado el cambio climático en los distintos puntos de la región en las variables analizadas. En los casos que se presentaron cambios estructurales, se estimó la fecha de ocurrencia y se introdujeron los cambios pertinentes en la función de tendencia.

Un supuesto adicional del modelo de regresión lineal es que es lineal en los parámetros. Si este supuesto no se cumple los estimadores pueden ser sesgados e inconsistentes, por lo que las estimaciones no deben ser usadas y el método de estimación y/o la forma funcional propuestos deben ser cambiados.

### **3. RESULTADOS**

#### **3.1. Análisis de las bases de datos disponibles**

En los paneles superiores de la Fig. 2 se muestran las series de precipitación anual acumulada (líneas delgadas) obtenidas de la base GPCC para las localidades mostradas en la Fig. 1. El

análisis de tendencias muestra que la precipitación se ha incrementado (con un nivel de significancia del 5%) durante el periodo 1901-2007 (líneas gruesas). La serie de precipitación correspondiente a la Ciudad de México (P2) tiene una tendencia positiva y no presenta ningún cambio estructural. Un comportamiento similar se observa en el estado de México (P4). En los puntos al sur, en la frontera entre el estado de México y el estado de Guerrero (P1) y en el estado de Morelos (P3), se observan, además de las tendencias positivas significativas, cambios estructurales significativos en 1927, consistentes en una disminución de la precipitación (aproximadamente 175 mm en las dos localidades). En las series de la base CRU TS3, no se observa este incremento en la precipitación (paneles inferiores). El análisis de tendencias revela únicamente un cambio estructural significativo en las cuatro localidades en 1922, con la precipitación disminuyendo entre 200 mm y 250 mm aproximadamente.

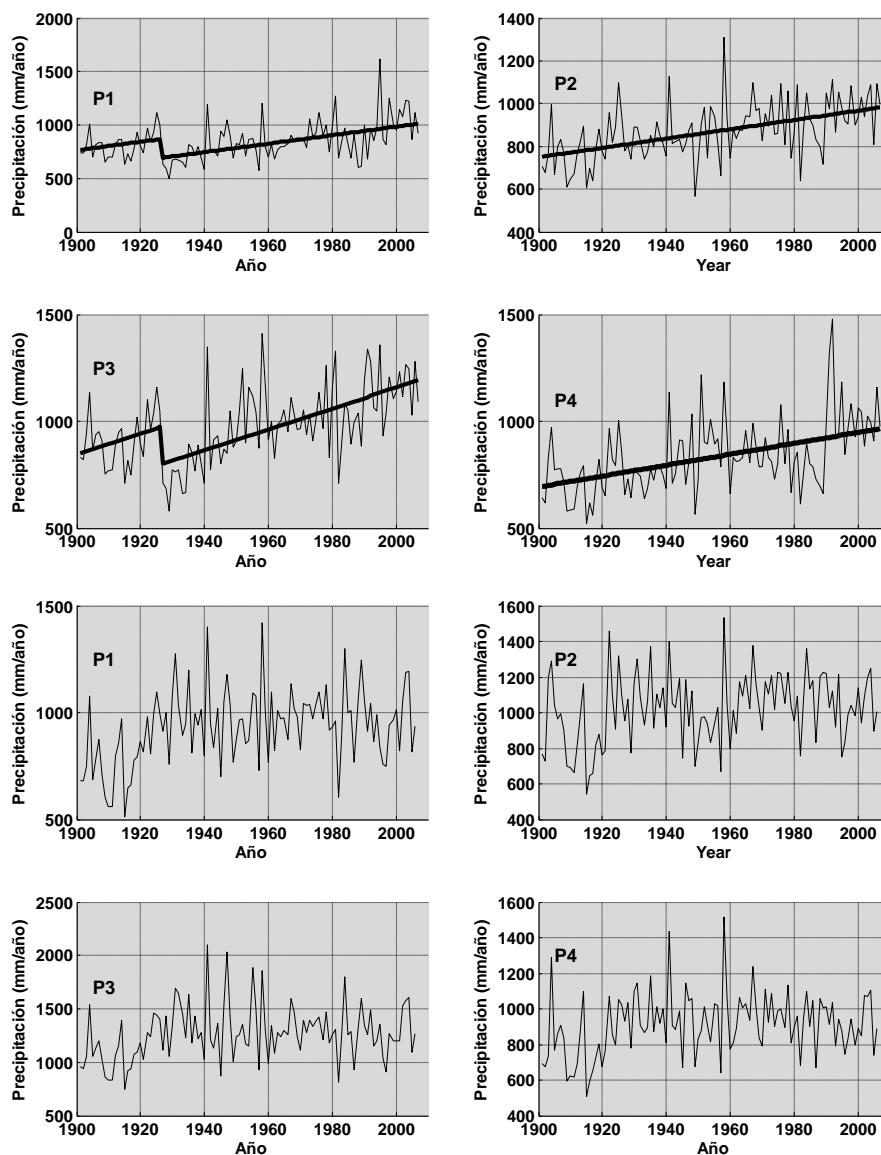


Fig. 2: Precipitación anual acumulada obtenida de la base GPCC (paneles superiores) y CRU TS3 (paneles inferiores) para los cuatro puntos mostrados en la Fig. 1. Note que en la base CRU TS3 no se detectaron tendencias significativas en la precipitación.

Los resultados de las bases CRU TS3 y GPCC nos dan información en cierta medida contradictoria, por lo que es necesario validar de alguna manera las series de precipitación de estas dos mallas climáticas. Con esta finalidad se usó la serie de precipitación del Observatorio de Tacubaya, la cual es la serie más larga y de mejor calidad disponible en la Ciudad de México. En la Fig. 3 se muestran las series de las mallas climáticas, correspondientes a los puntos cercanos al observatorio de Tacubaya, y la serie de precipitación anual observada en ese lugar (línea negra gruesa). Note que las series se han suavizado usando un filtro triangular de 5 puntos para resaltar la variabilidad en periodos mayores de un par de años. En la base CRU TS3 (línea negra delgada), claramente se sobrestima la media anual, mientras que en la base GPCC (línea blanca) la media está más cercana a la observada (panel superior). Las dos bases, sin embargo, reproducen aceptablemente la variabilidad inter-decadal (panel inferior). La variabilidad de la lluvia en escalas de tiempo largas parece estar relacionada con la Oscilación Decadal del Pacífico (PDO), siendo esto más evidente en la primera mitad del siglo XX (el índice de la PDO se indica con la línea blanca discontinua).

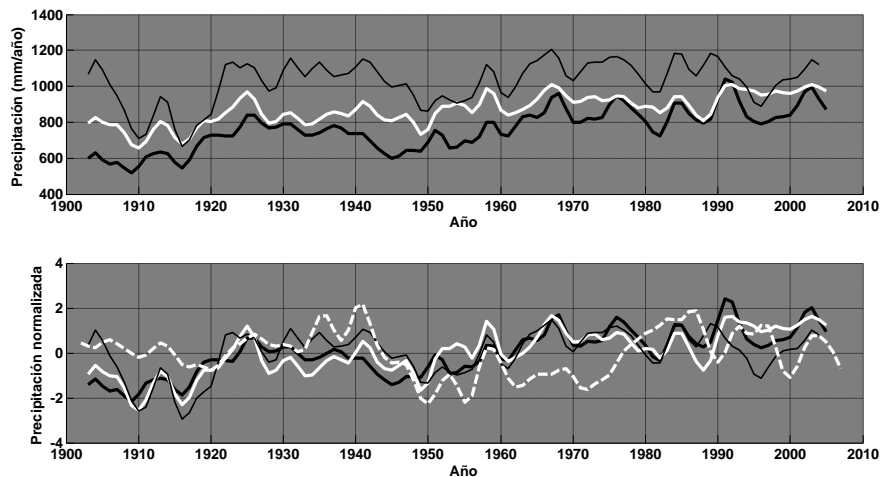


Fig. 3: En el panel superior se muestran los valores de precipitación anual acumulada suavizada utilizando un filtro triangular de 5 elementos, mientras que en el panel inferior se muestran las series suavizadas con su media substráida y normalizadas por su respectiva desviación estándar. Vea el texto para más detalles.

El análisis de tendencias de la serie de Tacubaya (Fig. 4) muestra que ocurrió un cambio estructural significativo en la precipitación en 1942. Además de este cambio, el análisis indica una tendencia positiva significativa, con una pendiente de aproximadamente el doble del valor estimado en el punto P2 para la base GPCC. Esta información es importante pues nos permitirá clasificar a los diferentes modelos utilizados por el IPCC de acuerdo a su capacidad de reproducir o no la tendencia observada de la precipitación en su celda correspondiente al observatorio de Tacubaya. Note que las otras tres series de la base GPCC, localizadas en los estados de México, Morelos y los límites de Guerrero, exhiben también tendencias positivas de la precipitación (Fig. 2). Lo anterior sugiere que el incremento observado en Tacubaya podría ser parte de un cambio regional, más que un cambio local asociado al efecto de la isla de calor. Por lo tanto, se esperaría que los modelos pudieran capturar al menos el signo de

esta variabilidad. Lo anterior, sin embargo, tiene que ser corroborado haciendo un análisis más exhaustivo de las series disponibles en la región central de México.

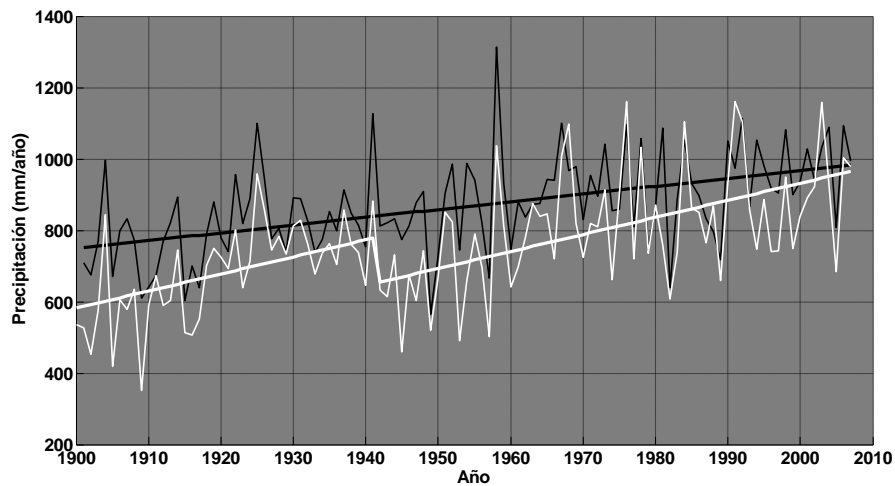


Fig. 4: Precipitación anual acumulada en Tacubaya (línea blanca) y el punto correspondiente de la base GPCC (P2, línea negra). Las tendencias son indicadas por las líneas gruesas. Las pendientes de las dos series y el cambio estructural ocurrido en 1942 son significativos.

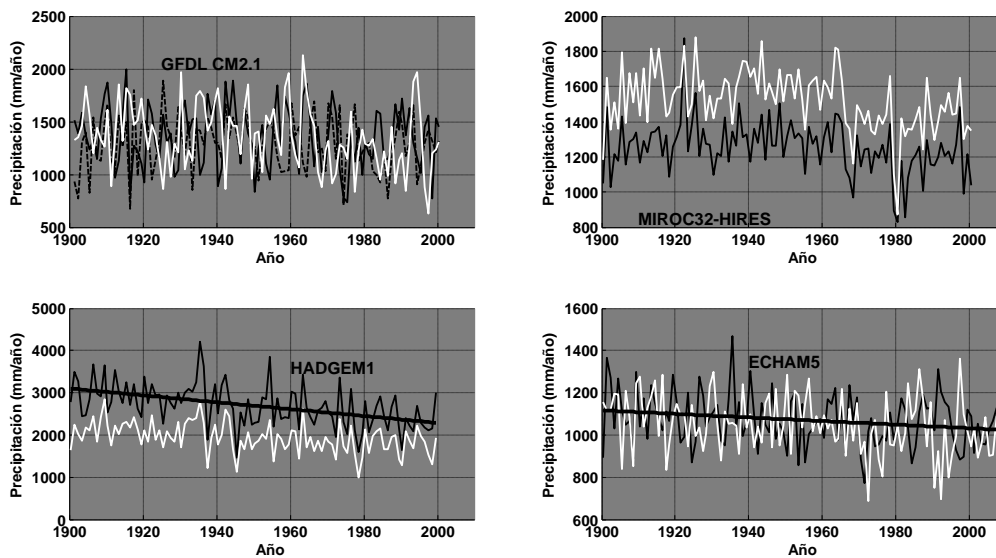


Fig. 5: Precipitación anual simulada en el siglo XX. Las series corresponden a la celda más cercana a la localidad de Tacubaya. En general, los modelos indican una disminución de la precipitación durante el siglo XX. Por claridad, se omiten algunas series analizadas y se muestran sólo algunas tendencias.

1.

### 3.2. Características de la precipitación simulada por los modelos durante el siglo XX

En la Fig. 5 se muestra la evolución de la precipitación proveniente de algunos resultados de los experimentos para simular el clima observado en el siglo XX, reportados en el AR4 del IPCC. De esta figura es evidente que ningún modelo, de los cuatro considerados, es capaz de capturar la tendencia observada de la precipitación en la localidad de Tacubaya. En las tres corridas disponibles del modelo GFDL 2.1 y en las dos localidades de la única corrida disponible del modelo MIROC32-HIRES no se detectan tendencias de ningún signo durante el siglo XX; pero sí se detecta un cambio estructural en los dos modelos en 1966. La magnitud del cambio simulado por el MIROC32-HIRES es comparable en magnitud y signo con el observado en Tacubaya, pero este último ocurre en 1966.

En las dos localidades de la simulación disponible del HADGEM1, se observan valores muy por encima de lo observado. Por ejemplo, en una localidad se obtienen valores arriba de los 3000 mm/año a inicios del siglo XX, mismos que decrecen significativamente a una tasa de aproximadamente 8.15 mm/año. En las tres corridas disponibles del modelo ECHAM5 (se muestran únicamente dos), los valores de precipitación están en un rango más acorde a la realidad, aunque en las tres corridas se observan una tendencia negativa significativa, misma que no es observada en la serie de Tacubaya.

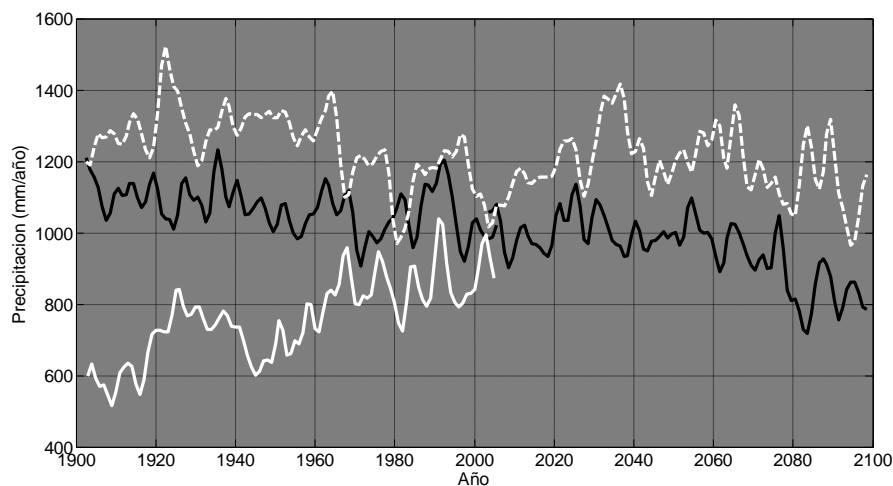


Fig. 6: Precipitación anual observada (línea blanca continua), simulada durante el siglo XX y proyectada al 2100. El modelo ECHAM5 (línea negra) usa el escenario de emisiones A2 y el MIROC32-HIRES (línea blanca discontinua) el escenario A1B.

### 3.3. Cambios en la precipitación ante diversos escenarios de emisiones

En base a los resultados mostrados en la sección anterior, podemos inferir que existe un sesgo en los modelos analizados a disminuir la cantidad de lluvia en la zona del Valle de México, lo cual es contrario a lo que indican las observaciones disponibles. Es claro que ningún modelo tendría que reproducir fehacientemente las características observadas de la precipitación, lo cual sería exigirles demasiado; pero sus resultados al menos tendrían que tener valores de precipitación anual cercanos a la media observada y, lo más importante, deberían de reproducir mínimamente el signo de las tendencias observadas. Nuestros resultados muestran que esto no es así, al menos para la localidad disponible, y plantean la interrogante de cuán capaces son los modelos empleados en el IPCC para simular la precipitación en nuestro país. Considerando lo anterior, no es raro que se obtengan resultados indicando que existiría una disminución de la lluvia en el mediano plazo (digamos al horizonte 2030); resultados que, en algunos casos, podrían no sustentarse debido a la inhabilidad de esos modelos para simular correctamente la tendencia de las series observadas de precipitación.



Lo anterior queda de manifiesto, a manera de ejemplo, en la Fig. 6, en la cual se muestran las series de precipitación simuladas en el experimento del siglo XX y las respectivas proyecciones de dos modelos usados por el IPCC. En los dos modelos (ECHAM5 y MIROC32-HIRES), la precipitación muestra una evolución en el siglo XX muy diferente a la que se registró en el Observatorio de Tacubaya. Lo preocupante: las tendencias simuladas son contrarias a la tendencia observada.

#### 4. CONCLUSIONES

Los cuatro modelos analizados son incapaces de simular la magnitud y la tendencia de la precipitación en la celda correspondiente al registro observado durante el siglo XX localizado en el Observatorio de Tacubaya.

Las tendencias simuladas son negativas, mientras que la observada es positiva. La incapacidad de los modelos a simular el signo de la tendencia se refleja en sus proyecciones hacia finales del siglo XXI.

Dada la gran importancia de la precipitación en estudios de impactos asociados al cambio climático, es muy deseable profundizar esta investigación para poder ponderar de una manera más cuantitativa a la amplia gama de modelos disponibles, mismos que al parecer están aún lejos de reproducir correctamente la precipitación, al menos en la zona del Valle de México.

#### 5. REFERENCIAS

ESCOLERO FUENTES, O. A.; MARTINEZ, S.E., KRALISCH, E. y PEREVOCHTCHIKOVA, M. (2009). Vulnerabilidad de las fuentes de abastecimiento de agua potable de la Ciudad de México en el contexto del cambio climático. Documento disponible en:

[http://www.cvcccm-atmosfera.unam.mx/cvcccm/proyectos/Agua\\_Escolero\\_%20InfFinal\\_org.pdf](http://www.cvcccm-atmosfera.unam.mx/cvcccm/proyectos/Agua_Escolero_%20InfFinal_org.pdf)

GAY, C.; ESTRADA, F. y CONDE, C. (2007): Some implications of time series analysis for describing climatologic conditions and for forecasting: An illustrative case: Veracruz, México. *Atmósfera* 20(2): 147-170.

GAY C.; ESTRADA, F. y SANCHEZ, A. (2009): Global and hemispheric temperature revisited. *Climatic Change* 94:333–349. doi:[10.1007/s10584-008-9524-8](https://doi.org/10.1007/s10584-008-9524-8)

MITCHELL, T.D. y Jones, P.D. (2005): [An improved method of constructing a database of monthly climate observations and associated high-resolution grids](#). *International Journal of Climatology* 25(6): 693-712.

SCHNEIDER, U.; FUCHS, A. MEYER-CHRISTOFFER, A. y RUDOLF, B. (2008): Global Precipitation Analysis Products of the GPCC. Global Precipitation Climatology Centre (GPCC), DWD, Internet Publication, 1-12.

SOTO MONTES DE OCA, G. y HERRERA PANTOJA, M. (2009). Estudio sobre el impacto del cambio climático en el servicio de abasto de agua en la Zona Metropolitana de la Ciudad de México. Documento disponible en:

[http://www.cvcccm-atmosfera.unam.mx/cvcccm/proyectos/Agua\\_Soto\\_abast\\_cc\\_RepFinal.pdf](http://www.cvcccm-atmosfera.unam.mx/cvcccm/proyectos/Agua_Soto_abast_cc_RepFinal.pdf)