

# CLIMA Y DISPONIBILIDAD DE AGUA: ANÁLISIS DEL PASADO PARA PREVER EL FUTURO

## CLIMATE AND WATER AVAILABILITY: ANALYSIS OF THE PAST FOR PREDICTING THE FUTURE

I. Sánchez Cohen<sup>1</sup>, W. Ojeda Bustamante<sup>2</sup>, J. Villanueva Díaz<sup>3</sup>, G. Díaz Padilla<sup>4</sup>,  
M. A. Velásquez Valle<sup>5</sup>, J. A. Muñoz Villalobos<sup>6</sup>

<sup>1</sup>Centro Nacional de Investigación Disciplinaria en Relaciones Agua Suelo Planta Atmósfera INIFAP [sanchez.ignacio@inifap.gob.mx](mailto:sanchez.ignacio@inifap.gob.mx)

<sup>2</sup>Instituto Mexicano de Tecnología del agua. Jiutepec, Morelos

<sup>3</sup>Centro Nacional de Investigación Disciplinaria en Relaciones Agua Suelo Planta Atmósfera INIFAP

<sup>4</sup>Centro de Investigación Regional Golfo Centro. INIFAP. Campo Experimental Cotaxtla, Veracruz, México.

<sup>5</sup>Centro Nacional de Investigación Disciplinaria en Relaciones Agua Suelo Planta Atmósfera INIFAP

<sup>6</sup>Centro Nacional de Investigación Disciplinaria en Relaciones Agua Suelo Planta Atmósfera INIFAP

**RESUMEN.** Las variables de entrada para el análisis del ciclo hidrológico son predominantemente climáticas (radiación, precipitación, temperaturas, etc); así, la alteración en patrones de precipitación traen como consecuencia las modificaciones al resto de las variables involucradas en este proceso (infiltración, escurrimiento, evaporación, etc). Es claro entonces que la disponibilidad de agua esta fuertemente ligada a las variaciones climáticas. En esta tesitura, el análisis histórico del clima es fundamental para conocer las leyes que rigen su variación y así poder predecir su comportamiento. En el presente trabajo se muestran algunos estudios de caso de variabilidad climática puntualizando algoritmos para su cuantificación.

**Palabras Clave:** Clima, variabilidad, disponibilidad, agua, series tiempo

**SUMMARY.** Variables involved in the water cycle are mainly climatic (radiation, precipitation, temperatures, etc.), thus, alterations to precipitation patterns impact the rest of the variables (infiltration, runoff, evaporation, etc). It is clear that water availability is strongly tied to climatic variations. In this way, historical analysis of climate it is of crucial importance for knowing the laws that controls its variation and to predict future behavior of climate patterns. This paper present some case studies regarding climatic variability focusing in the algorithms used for this purpose.

**Key Words:** Climate, variability, availability, water, time series.

### INTRODUCCIÓN

#### Variabilidad climática

La incertidumbre se asocia con la variabilidad del clima y esta es el primer impacto del cambio global climático. Sin embargo, las series de tiempo instrumentales (medidas) no son lo suficientemente largas para aseverar que la variabilidad climática que exhiben se deben en realidad a cambios en los patrones climáticos globales o a variabilidad natural (Villanueva, et al. 2005). Sin embargo, evidencia científica muestra que las

temperaturas globales han sufrido modificaciones mostrando incrementos importantes en su patrón (IPCC, 2007, 2001). El impacto de estas modificaciones en temperaturas tiene su causa en el incremento de gases a la atmósfera que ha ocurrido a tasas alarmantes en la era industrial. La ciencia moderna ha partido de esta premisa para la creación de escenarios de clima que permitan predecir el comportamiento de algunas variables de interés de gran impacto en el bienestar humano.

La base de dichos escenarios climáticos son las proyecciones a largo plazo de las emisiones IS92 (IPCC 1994) y SRES/IE-EE (IPCC 2002), estas estimaciones de las emisiones corresponden a los datos de entrada de los MCGAO-A (modelos de simulación del comportamiento de la atmósfera). Con estas emisiones se predicen los cambios climáticos que pudieran presentarse en el futuro. La figura 1 muestra los gráficos de las emisiones de CO<sub>2</sub> para la familia de escenarios SRES y para el escenario IS92a del IPCC, con estas emisiones de CO<sub>2</sub> los MCGAO-A proyectan los cambios de temperatura previstos para el periodo 2000-2100.

De las anteriores figuras se desprende que en cualquiera de los escenarios de estudio se predice un incremento sustancial de la temperatura producto de la concentración de gases en la atmósfera. De hecho, independientemente de las tasas de emisión de gases a la atmósfera en el futuro, el impacto de las concentraciones actuales de éstos en diversos procesos, está ya garantizado y con evidencia palpable.

**Análisis de series de tiempo**

El historial de las variables climáticas es la esencia para la predicción de su comportamiento futuro. Así para poder descifrar el futuro es necesario entender el pasado para lo cual existen diversos métodos de análisis. La mayoría de éstos métodos se fundamentan en el comportamiento estadístico que describen las series de tiempo.

Los “datos”, son el elemento primordial en la era digital. Estos, son representaciones formalizadas de elementos del mundo real: hechos, conceptos o instrucciones. Los datos, al ser calculados “correctamente”, en términos metodológicos, y si se conoce su significado en el análisis de una situación particular, se origina “la información” para finalmente llegar al “conocimiento”, el

cual es un conjunto de percepciones a cerca de los datos, activados por un evento Walsham (2001).

Disponer de grandes volúmenes de datos no significa tener información, es necesario analizarlos correctamente, derivar conocimiento y finalmente llegar a una propuesta de “modelo”, que permita estimar un valor futuro de un sistema y su probabilidad de ocurrencia (Figura 2).

Esta parte descriptiva provee de información base para la adecuada toma de decisiones. Por ejemplo, la Figura 3 muestra la variación de las temperaturas en el tiempo para la Comarca Lagunera en la que se aprecia un incremento en la temperatura máxima de 0.42°C y de 0.8°C en la mínima (rangos). Si bien esta fluctuación en términos absolutos pareciera insignificante, es de importancia en diversos procesos fisiológicos y bioquímicos de los seres vivos. Baste decir que en los últimos 150 años, a nivel global la temperatura se ha incrementado en 1.5°C con severos impactos en variables climáticas como se ha asentado anteriormente (Figura 4, como ejemplo de impacto en la Comarca Lagunera).

Para poder fundamentar el cambio climático como impacto no aleatorio, la ciencia moderna ha extendido las base de datos instrumental mediante “proxis” como la DENDROCRONOLOGIA que se fundamenta en la magnitud del crecimiento de los anillos de árboles como producto de variables climáticas (Villanueva, et al 2006) Así, la paleo climatología ha venido a reforzar diversas teorías del cambio climático. Como ejemplo las Figura 5 muestra la correlación existente entre el índice de anillo de árbol (IA) y la precipitación pluvial para Bacadehuchi, Sonora y la Figura 6 presenta la correlación entre el IA y el índice estandarizado de precipitación (SPI, por sus siglas en inglés) para Tepehuanes Durango.

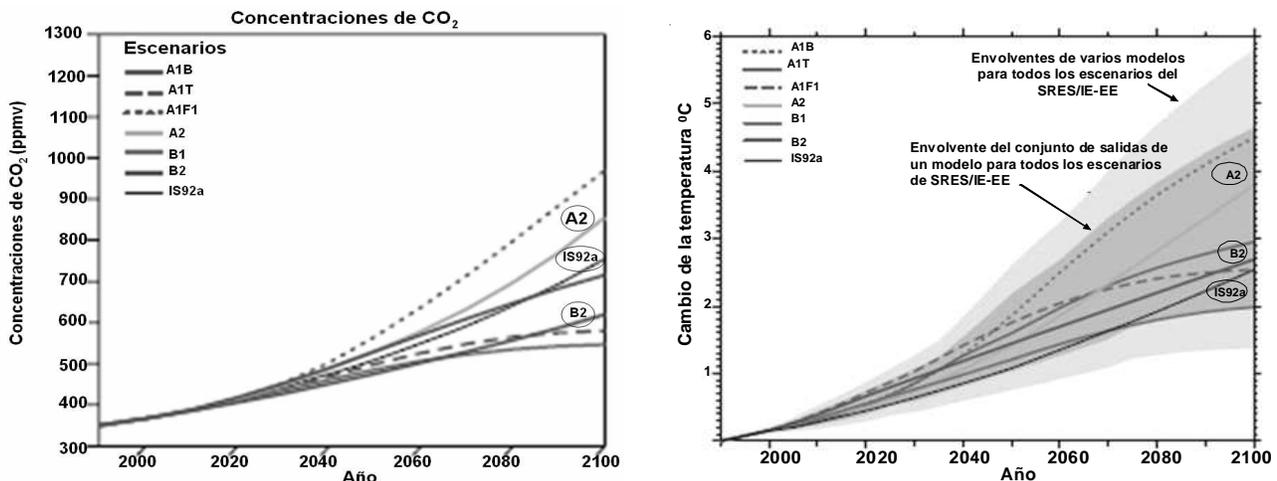


Figura 1. Emisiones de CO<sub>2</sub> previstas para el siglo XXI (izquierda) y los escenarios climáticos obtenidos por los MCGAO-A con base a las emisiones IS92 y SRES 2001 para los cambios de temperatura, (IPCC, 2001) (derecha).

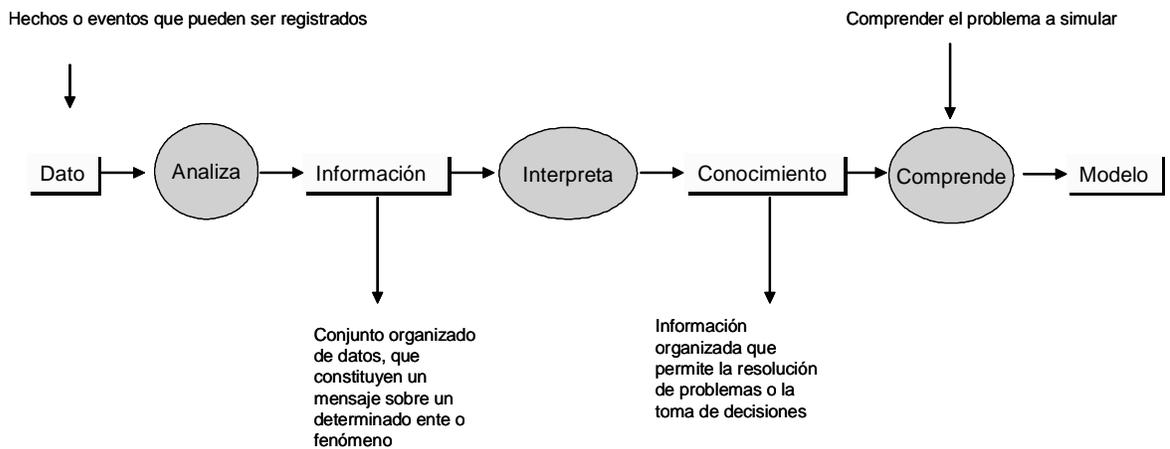


Figura 2. Seguimiento de análisis de información para la propuesta de modelos de predicción.

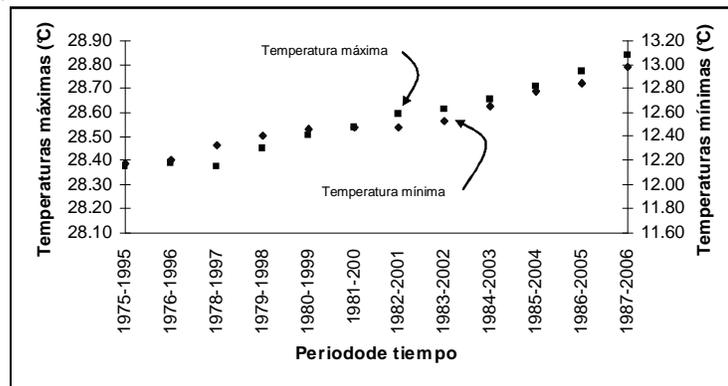


Figura 3. Variación de las temperaturas máximas y mínimas en la comarca lagunera

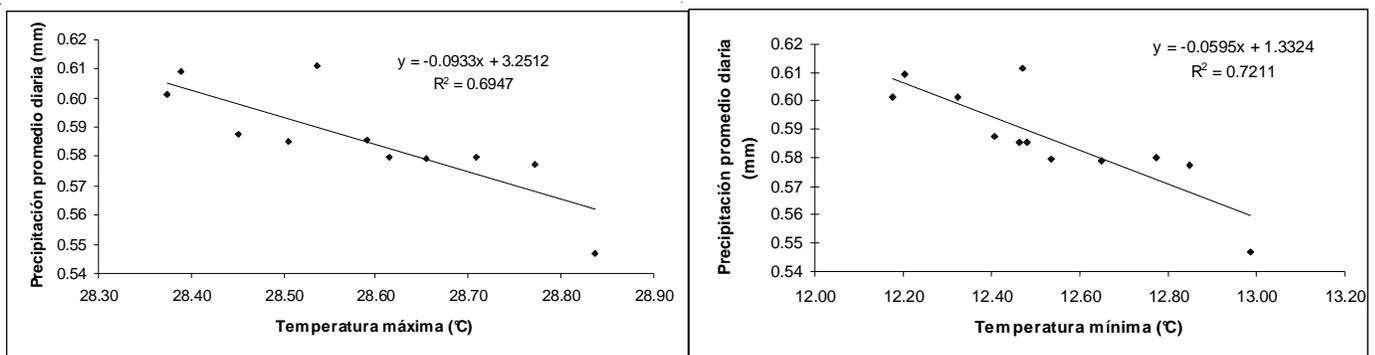


Figura 4. Variación de la precipitación pluvial media diaria con las temperaturas máximas (izquierda) y mínimas (derecha) para la Comarca Lagunera

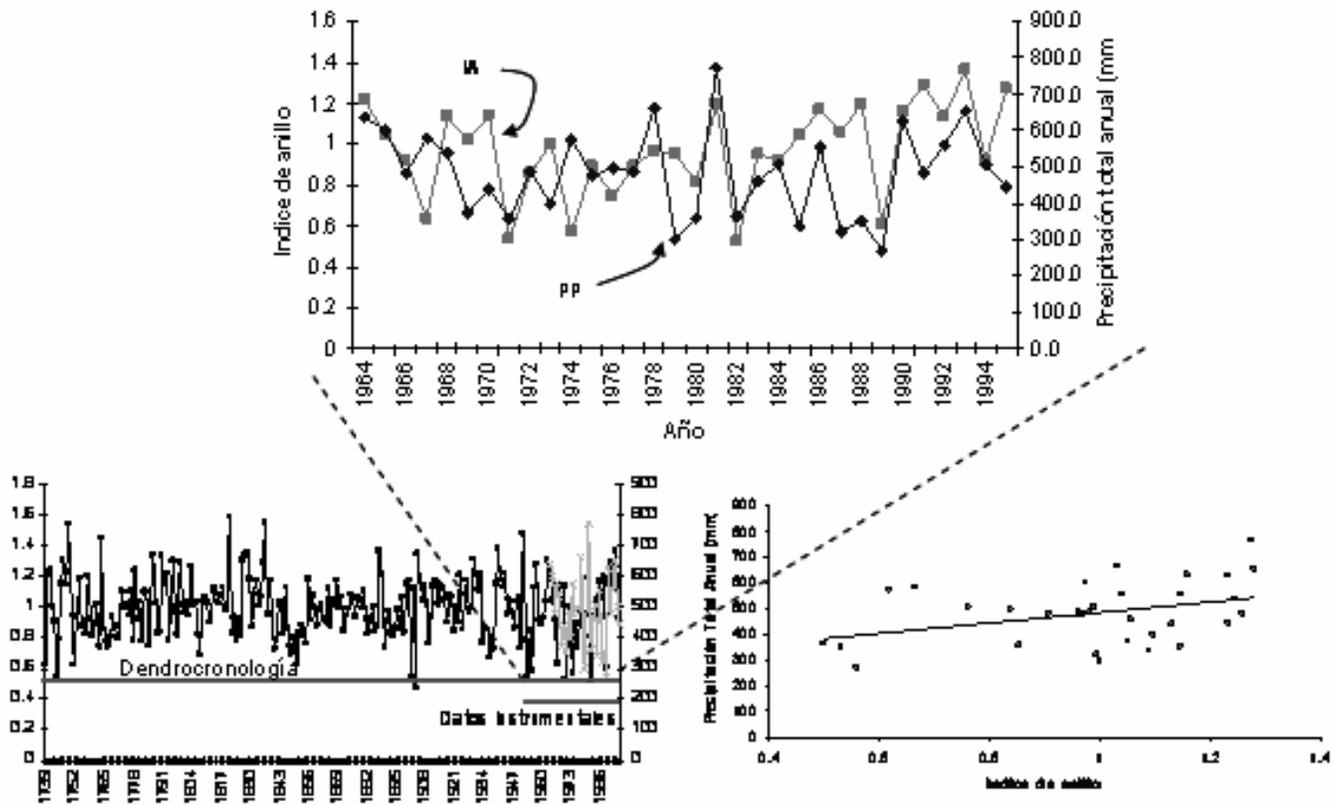


Figura 5. Relación entre el índice de anillo de árbol y la precipitación pluvial anual para Bacadehuachi Sonora. (Datos fuente de Villanueva, 2007; análisis de los autores)

Figura 6. Relación entre el índice de anillo de árbol y el índice estandarizado de precipitación para Tepehuanes, Dgo. (Datos fuente de Villanueva, 2007, análisis de los autores)

De la Figura 5 se puede deducir que el comportamiento de las series de tiempo instrumentales siguen la misma tendencia de las series obtenidas de IA y por lo tanto su correlación (mostrada en la parte inferior derecha de la figura) puede ser utilizada para generar series sintéticas de precipitación que permiten el estudio del clima pasado para predecir el futuro. También, la Figura 6 muestra la relación entre el SPI y el crecimiento de anillo de árboles. El SPI señala el número de desviaciones estándar que la precipitación se aleja por arriba (eventos húmedos) y debajo (eventos secos) del valor promedio histórico de la serie de tiempo de la precipitación (marcado con "0" en la escala derecha de la figura). Es de notarse la dependencia del crecimiento de anillo de los árboles como respuesta directa al SPI; así, mientras mayor precipitación en un año dado, mayor será el crecimiento de anillo de árbol en el tiempo de respuesta como función de la especie considerada.

Un método comúnmente usado para generar series sintéticas de datos climáticos se fundamenta en la teoría Bayesiana en la que se analizan probabilidades condicionales de eventos como punto de partida (Sánchez, 1994, 1997, 2005, Tiscareño, 2004). La Figura 7 muestra un ejemplo de generación de variables aleatorias para la Comarca Lagunera. Para su obtención

se utilizó un modelo Markoviano en el que se analizó la matriz de transición (esquina inferior izquierda de la Figura) de la precipitación de una serie de tiempo de 60 años. Para este caso para el año 2033 se prevé una reducción de precipitación promedio del 35% y una reducción en temperatura del 8%. Es pertinente recalcar que el uso de otros modelos pudiera predecir datos contrastantes especialmente si se considera el calentamiento del que esta siendo objeto la región acorde a la información presentada en la Figura 3. Por otro lado los resultados son exclusivamente para ese año mostrando la base de datos generada variaciones en temperatura y precipitación; es decir, se presentan años calientes y húmedos a la vez que años secos y fríos.

**La Geometría Fractal de Series de tiempo**

El comportamiento de las series de tiempo de variables climáticas como la precipitación pluvial, exhiben alta variabilidad en el tiempo por lo que la serie se puede analizar en función de su magnitud (valor específico de altura de agua) y su frecuencia de tal manera que la gráfica de estas series pueden presentar "rugosidad" (alta variación en periodos cortos de tiempo) lo que es una medida a considerar para poder cuantificar el valor esperado de esa variable en el futuro.

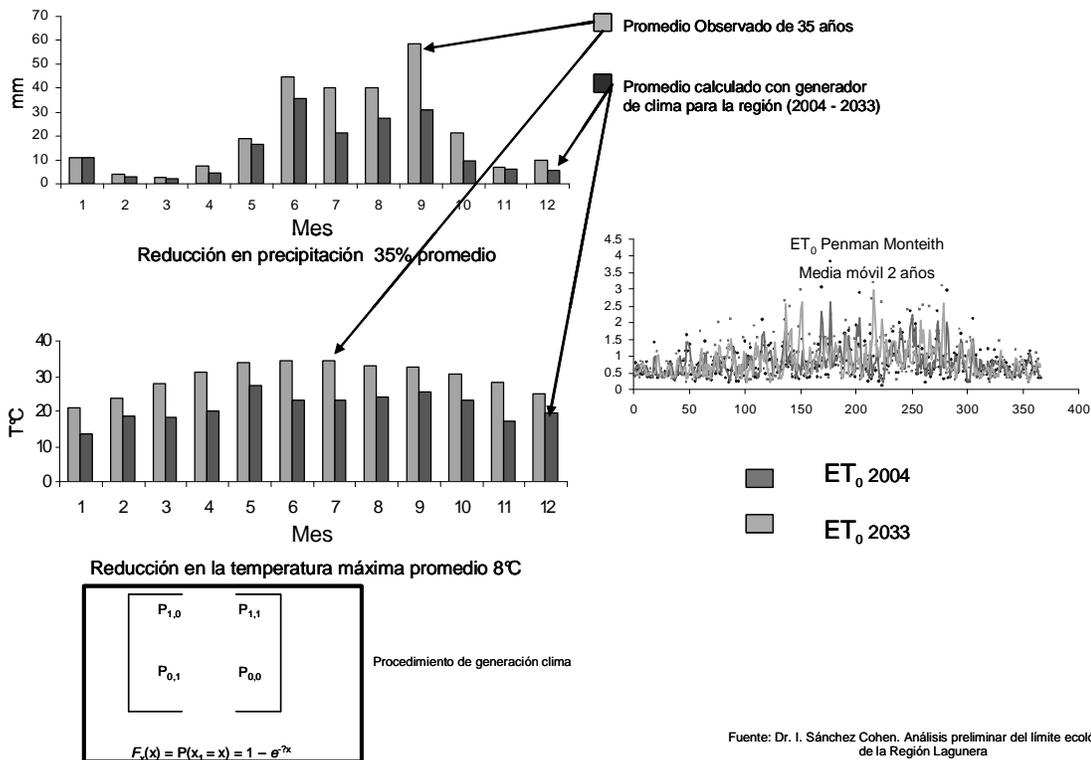


Figura 7. Probable escenario climático para la región Lagunera en los próximos 30 años estación climática Cd. Lerdo Dgo. 25°30' Latitud, 103°18' Longitud. ASNMM = 1140 m

La dimensión fractal ofrece una aproximación sistemática para la cuantificación de patrones irregulares que contienen una estructura interna que se repite en un rango de escalas (Meakin, 1991, Posadas et al, 2003, Zhou, et al. 2005). La geometría fractal de series de tiempo se fundamenta en el análisis de la rugosidad que exhibe la información, su magnitud y frecuencia. <sup>1</sup>Así, una serie puede subdividirse en fracciones ó ventanas de longitud “w” dentro de la cual se pueden definir dos valores:

- R(w) que es el rango que toman los valores de “y” en ese intervalo mismo que es medido respecto a la tendencia de la serie en esa ventana y la tendencia es simplemente la diferencia entre el valor mayor y menor.

- El otro valor es S(w) que es la desviación estándar de las primeras diferencias (dy) de los valores de “y” en la ventana. Estas diferencias se definen como las diferencias entre los valores de “y” en algún punto “x” y de “y” en un punto anterior en el eje de las “x”; así:

$$dy(x) = y(x) - y(x - dx) \tag{1}$$

donde “dx” es el intervalo de muestreo, es decir, el intervalo entre dos valores consecutivos de “x”.

La cuantificación de S(w) requiere de datos con un intervalo de muestreo constante “dx” porque la diferencia esperada entre valores sucesivos de “y” es función de la distancia que los separa. Así, S(w) en el método de rango reescalado se utiliza para estandarizar el rango R(w) para poder realizar comparaciones de diferentes bases de datos.

El rango reescalado se define como:

donde “w” es la longitud de la ventana y los corchetes indican el promedio de varios R(w). El método se fundamenta en que dada la afinidad de la serie se espera que el rango tomado por los valores de “y” en un a ventana de longitud “w” sea proporcional a la longitud de la ventana elevado a un exponente igual al exponente de Hurst (H), es decir:

$$\frac{R}{S} w = w^H \tag{3}$$

En la práctica para una longitud dada de ventana “w”, la serie de tiempo se subdivide en un número de intervalos de longitud “w”, se cuantifica R(w) y S(w) en cada intervalo y se calcula R/S(w) mediante la ecuación 2. Este proceso se repite para un determinado número de longitudes de ventana; así, los logaritmos de R/S(w) se grafican versus los logaritmos de “w”. Si la traza presenta afinidad (una traza es afín cuando el cociente entre el rango vertical y horizontal varía con la escala mientras que en trazas “similares” este cociente permanece constante), la gráfica seguirá una línea recta cuya pendiente es igual al coeficiente de Hurst (H). La dimensión fractal de la traza puede ser entonces calculada de la relación entre “H” y la dimensión fractal.

Donde Drs es la dimensión fractal estimada mediante el método de rango reescalado.

Acorde al método, cuando el valor de H es inferior a 0.5 se dice que la serie de tiempo no presenta persistencia, es decir, los datos no son dependientes o son aleatorios; cuando el valor es mayor, se dice que los datos presentan dependencia ó menor volatilidad por lo que las series de tiempo que se generen a partir de “H” serían mas “certeras” o precisas en su ocurrencia.

El método anteriormente descrito ha sido aplicado a una serie de tiempo de 32 años para la Comarca Lagunera y se ha generado una serie de tiempo de precipitación (10años) partiendo de “H = 0.34” mediante dos métodos de generación de datos sintéticos: Fourier y Ondoletas ó Wavelets. La serie generada considera un rango de variación de eventos de precipitación de 0.44 mm promedio diario; es decir, acorde a la serie de tiempo original se puede esperar que el valor promedio diario de precipitación oscile entre 0 y 0.44 mm . Para ubicar el rango se procedió como:

$$R(m) = \max_{1 \leq t \leq m} \{y(t,m)\} - \min_{1 \leq t \leq m} \{y(t,m)\} \tag{5}$$

Con :

$$y(t,m) = \sum_{u=1}^t [y(u) - \langle y \rangle_m] \tag{6}$$

Donde y(t,m) son los valores obtenidos en el rango d” 1 d” m ,  $\langle y \rangle_m$  el valor promedio del rango. La serie de tiempo original se dividió en periodos de 5 años (m), se calculó el valor del rango de cada periodo y posteriormente se obtuvo el rango promedio que resultó = 0.44 mm. Se utilizó el software Benoit 1.3 @ pera el análisis.

<sup>1</sup>La descripción del método ha sido traducido de la información contenida en el software Benoit 1.3 de Truesoft Internacional Inc. Mayor información en : <http://www.truesoft-international.com/about.html>

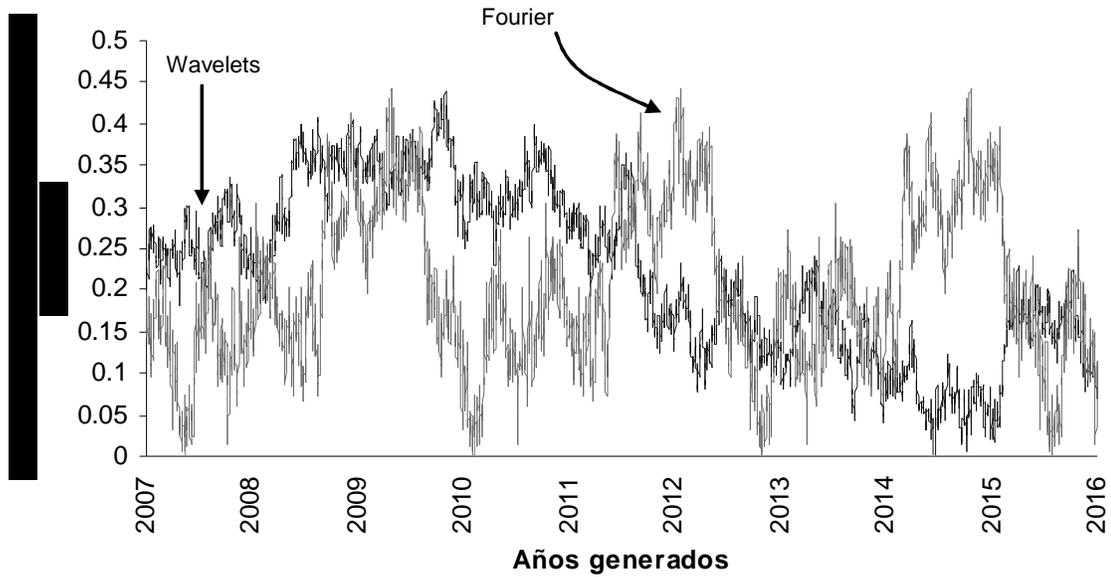


Figura 8. Oscilación del valor máximo probable de precipitación media en un determinado día en la Comarca Lagunera tomando como rango 0.44 mm mediante dos métodos de predicción.

Acorde al método de ondoletas (Figura 8) el valor promedio máximo de precipitación diaria pudiera presentarse para los años 2009 y 2010 mostrando una disminución gradual los años posteriores y hasta el 2015; por otro lado, las series de Fourier presentan una ciclicidad respecto a la ocurrencia de este valor repitiéndose en los años 2009, 2012 y 2014.

Para el presente caso, la geometría fractal que describe a la serie original tiene una tendencia a la no persistencia ( $H=0.34$ ,  $D = 1.66$ ) por lo que las series de tiempo generadas contienen esta aleatoriedad. Como se ha asentado, una serie de tiempo se considera totalmente aleatoria cuando  $H = 0.5$  y volátil cuando este valor se aproxima a 0.01; por otro lado, valores cercanos a la unidad indican persistencia, (Palomas, 2002).

### CONCLUSIONES

Las disponibilidades de agua para todos los usos están fuertemente ligadas a la ocurrencia de precipitación. La adecuada toma de decisiones respecto al uso y manejo de estas disponibilidades requiere del estudio de escenarios climáticos en aras de tener una apreciación objetiva del valor esperado de volúmenes de agua para planear diferentes estrategias o mecanismos de mitigación ante la presencia de eventos extremos.

Los diferentes métodos de predicción exhiben distintos resultados acorde a su estructura matemática; así, estas predicciones se deben tomar con reserva y

únicamente como indicadores de tendencias ya que la información resultante se fundamenta en las características estadísticas de las series de tiempo originales.

### LITERATURA CITADA

- IPCC. 1997.** Introducción a los modelos climáticos simples utilizados en el Segundo Informe de Evaluación del IPCC. Documento Técnico II del IPCC. Grupo
- Intergubernamental de Expertos sobre el Cambio Climático.** Cambridge University Press, Cambridge, Reino Unido.
- IPCC. 2001.** Tercer informe de evaluación. La base científica. Grupo I del Tercer Grupo Intergubernamental sobre el Cambio Climático. Cambridge University Press, Cambridge, Reino Unido.
- IPCC. 1994.** Forzamiento radiativo del cambio climático y evaluación de los escenarios de emisiones IS92 del IPCC. Cambridge University Press, Cambridge, Reino Unido
- IPCC. 2002.** Informe Especial de Escenarios de Emisiones del IPCC para Responsables de Políticas. Grupo Intergubernamental de Expertos sobre el Cambio Climático
- Meakin, P. 1991.** Fractal aggregates in geophysics. Rev. Geophys. 29:317–354.
- Palomas Molina, E. 2002.** Evidencia e implicaciones del fenómeno Hurst en el mercado de capitales. Gaceta Económica. Año 8 No. 15 . pp 117 – 153.

- Adolfo N. D., Daniel Giménez, Roberto Quiroz, and Richard Protz. 2003.** Multifractal Characterization of Soil Pore Systems. *Soil Sci. Soc. Am. J.* 67:1361–1369. USA
- Posadas Adolfo, N. D.; R. Quiroz, P. E.; Zorogastu and C. Leon Velarde. 2005.** Multifractal characterization of the spatial distribution of ulexite in a Bolivian salt flat. *International Journal of Remote Sensing*, Month 2005, 1–13
- Sánchez – Cohen, I. 2005.** Fundamentos para el manejo integral del agua. Una aproximación de simulación de procesos. Libro Científico No. 2. INIFAP CENID RASPA. 272 pp.
- Sánchez Cohen, I. 1994.** Evaluatin Strip Farming Systems. A Stochastic Approach. Ph. D. Dissertation. The University of Arizoa. E.U.A. 111 pp.
- Sánchez Cohen, I.; V.L. Lopes; D.C. Slack and M. M. Fogel. 1997.** Water Balance Model for Small Scale Water Harvesting Systems. *Journal of Irrigation and Drainage Engineering*. Vol. 123. No. 2. pp 123-128.
- Tiscareño López, M. 1994.** A Bayesin Monte Carlo Approach to Assess Uncertainties in Process Based Continuous Simulation Models. Ph. D. Dissertation. The University of Arizona. E.U.A. 196 pp.
- Villanueva Díaz, J.; J. Cerano Paredes; B. H. Luckman, J. E. Estrada Avalos; D. W. Stahle; I. Sanchez Cohen, M. D. Therrell y R. Moran Martínez. 2006.** Precipitación y flujo historico de la cuenca Nazas Aguanaval e impacto en la Agricultura. Folleto Científico No. 19. CENID RASPA INIFAP. 44 pp.
- Villanueva Díaz, J. 2007.** Laboratorio Nacional de Dendrocronología. Bases de Datos. INIFAP CENID RASPA. Gómez Palacio Dgo.
- Walsham, G. 2001.** Making a world of difference. IT in a global context. John Wiley & Sons. Ltd England. P-37
- Zhou, U.; N. Persaud and H. Wang.** Scale invariance of daily runoff time series in agricultural watersheds. *Hydrol. Earth Sys. Sci. Discuss.*, 2, 1757 -1786.