



Tecnología y Ciencias del Agua

ISSN: 0187-8336

revista.tyca@gmail.com

Instituto Mexicano de Tecnología del

Agua

México

Martínez Austria, Polioptro F.; Patiño Gómez, Carlos; Tamayo Escoba, José Enrique
Análisis de tendencias climáticas en la cuenca baja del río Yaqui, Sonora, México
Tecnología y Ciencias del Agua, vol. V, núm. 6, noviembre-diciembre, 2014, pp. 135-149
Instituto Mexicano de Tecnología del Agua
Morelos, México

Disponible en: <http://www.redalyc.org/articulo.oa?id=353539530009>

- ▶ Cómo citar el artículo
- ▶ Número completo
- ▶ Más información del artículo
- ▶ Página de la revista en redalyc.org

Análisis de tendencias climáticas en la cuenca baja del río Yaqui, Sonora, México

• Polioptro F. Martínez-Austria* • Carlos Patiño-Gómez •

• José Enrique Tamayo-Escobar •
Universidad de las Américas Puebla

*Autor de correspondencia

Resumen

Martínez-Austria, P. F., Patiño-Gómez, C., & Tamayo-Escobar, J. E. (noviembre-diciembre, 2014). Análisis de tendencias climáticas en la cuenca baja del río Yaqui, Sonora, México. *Tecnología y Ciencias del Agua*, 5(6), 135-149.

Diversos escenarios de cambio climático pronostican un incremento de la temperatura y una disminución de la precipitación en latitudes medias, zona en la que se encuentra el norte de México. Los estudios para la república mexicana, obtenidos por escalamiento a partir de los modelos de circulación globales, pronostican esta tendencia, en especial en la región noroeste de México. No obstante, dadas las dificultades de modelación a escala de regiones hidrológicas o cuencas, es necesario el análisis de tendencias observadas, para corroborar la existencia en los hechos de este comportamiento climático. Los métodos no paramétricos exhiben limitaciones de análisis, por lo que en este trabajo se propone el uso de diversos métodos que, combinados, permiten arribar con mayor certeza a la existencia, en su caso, de tendencias climáticas. En este trabajo se analizan los registros de estaciones en la cuenca baja del río Yaqui, habiéndose encontrado tendencias claras de incrementos de temperatura, no así en el caso de la precipitación, en la que no se observa aún una tendencia significativa.

Palabras clave: tendencias cambio climático, cuenca del río Yaqui, tendencias observadas cambio climático.

Abstract

Martínez-Austria, P. F., Patiño-Gómez, C., & Tamayo-Escobar, J. E. (November-December, 2014). *Climatic Trends in the Lower Yaqui Valley Watershed, Sonora, Mexico*. Water Technology and Sciences (in Spanish), 5(6), 135-149.

Different climate change scenarios predict an increase in temperature and decreased precipitation in middle latitudes, the area in which lies the north of Mexico. Studies for the Mexican Republic, obtained by downscaling from global circulation models, predict this trend especially in the Northwest region of Mexico. However, given the difficulties of modelling at hydrologic regions or basins scales, it is necessary the analysis of observed trends, in order to support on facts this climatic behavior. Nonparametric methods, usually used in this analysis, show limitations, so in this paper we propose the use of various methods that together allow arrive, with greater certainty, to the existence, if any, of climate trends. In this paper, climate records of the climatologic stations in the lower basin of the Yaqui River are analyzed. We found clear trends of increased temperature, but not in the case of precipitation, in which is not yet observed a significant trend.

Keywords: Climate change trends, Yaqui River Basin, observed climate change trends.

Publicado por invitación

Antecedentes

El cambio climático representa el mayor reto global para la humanidad en el siglo XXI. El calentamiento planetario que se producirá, y que de hecho ya ha iniciado, tendrá grandes efectos ambientales, económicos y sociales. Las sociedades modernas se esfuerzan, hasta ahora con poco éxito, por mitigar sus efectos mediante la disminución de las emisiones de gases de invernadero que produce la actual civilización, consumidora, al parecer insaciable, de petróleo,

gas y carbón. La concentración de gases de invernadero continúa incrementándose y de acuerdo con la NOAA (2014), en febrero de 2014 la concentración de gases de invernadero global alcanzó 397.6 ppm, mientras que la tasa de crecimiento de estas concentraciones no sólo no ha disminuido, sino que continúa aumentando, habiendo alcanzado en 2103 un valor de 2.62 ppm/año.

Hoy en día, prácticamente todos los investigadores involucrados en el tema coinciden en la realidad del cambio climático de origen antro-

pogénico. Como ha expresado con claridad el reporte de situación del Panel Intergubernamental de Cambio Climático (IPCC, por sus siglas en inglés): “el calentamiento del sistema climático es inequívoco, como evidencian ya los aumentos observados del promedio mundial de la temperatura del aire y del océano, el deshielo generalizado de nieves y hielos, y el aumento del promedio mundial del nivel del mar” (IPCC, 2007).

Una de las mayores preocupaciones de la sociedad en relación con el cambio climático se refiere a sus posibles efectos en los recursos hídricos. En efecto, el clima y el ciclo hidrológico están tan fuertemente relacionados, que es difícil definir las fronteras entre ellos; el clima depende de variables relevantes del ciclo hidrológico, como la humedad atmosférica, humedad de los suelos y precipitación.

De acuerdo con estudios del Panel Intergubernamental de Cambio Climático, las regiones ubicadas en latitudes medias del planeta experimentarán los mayores efectos negativos del cambio climático sobre sus recursos hídricos. En particular, se espera que en transcurso de este siglo se produzca un aumento de la temperatura y una disminución de entre el 10 y 30% en el escurrimiento y disponibilidad de agua en regiones en latitudes medias y en el trópico seco. Este decrecimiento en la oferta de agua coincidirá con una mayor demanda ocasionada, entre otras causas, por el crecimiento demográfico y procesos de urbanización, agravando la situación de estrés hídrico que muchas regiones ya registran (IPCC, 2008). La mayor parte del territorio mexicano, por tanto, experimentará estos efectos.

En México, en los años recientes se han desarrollado estudios que permiten pronosticar con mayor detalle los efectos en diversas regiones (Martínez-Austria & Patiño-Gómez, 2010; Martínez-Austria, 2007). Conforme a estos estudios, se estima que a finales de este siglo se reducirá la precipitación en su territorio en un 15%, como se muestra en el cuadro 1.

Los mayores efectos en la temperatura y precipitación, conforme a los resultados de estos modelos para el escenario A2, ocurrirán en la región norte de México, como se puede apreciar en las figuras 1 y 2.

Estas predicciones están basadas en los resultados de modelos de circulación general. El IPCC ha realizado una estimación del desempeño de estos modelos haciendo una comparación entre sus resultados y el clima observado durante el periodo 1980-1999. En cuanto a temperatura, cuando se analizan los resultados multimodelo (el promedio de 23 modelos de circulación general), el error de estimación (es decir, la diferencia entre lo observado y el modelo) es raramente mayor a 2 °C, si bien los modelos individuales pueden mostrar errores cercanos a 3 °C (Randall & Word 2007). No obstante, se hace notar que: “las características en escalas grandes son simuladas con mayor exactitud que las escalas regionales”. Por lo que respecta a la precipitación, la incertidumbre es aún mayor, dado que los modelos no pueden todavía tomar en cuenta con suficiente precisión los efectos del flujo vertical en la atmósfera y los de la orografía (Randall & Word, 2007) que, en el caso de México rodeado por dos cadenas montañosas, son de gran importancia en el ámbito local.

A las incertidumbres anteriores cabe añadir que los cálculos más detallados que se han hecho para la república mexicana, como los mostrados en las figuras 1 y 2, y en el cuadro 1, están basados en los modelos de circulación general y transferidos a una escala menor por medio de diversos sistemas de escalamiento, es decir, de interpolación. Por lo anterior, para propósitos de aplicación de medidas de adaptación, las estimaciones de cambios en las variables climáticas pueden ser consideradas como indicativas, pero aún se requiere de mejoras en los modelos en la escala regional en lo que se refiere a sus valores absolutos.

El análisis de impacto y vulnerabilidad a cambio climático, por lo tanto, deberá estar sólidamente fundamentado en evidencia

Cuadro 1. Disminución porcentual de precipitación por efecto del cambio climático (Montero-Martínez, Martínez-Jiménez, Castullo-Pérez, & Espinoza-Tamarindo, 2010).

Entidad de la república mexicana	Disminución proyectada en el periodo 2060-2090 en porcentaje		
	Invierno	Verano	Anual
Aguascalientes	22.20	6.53	13.00
Baja California	28.70	13.80	21.28
Baja California Sur	28.73	18.10	18.01
Campeche	13.83	28.09	17.61
Coahuila	12.64	19.90	12.92
Colima	24.68	7.07	14.43
Chiapas	16.40	7.91	12.45
Chihuahua	20.48	15.25	14.24
Distrito Federal	20.14	12.82	12.86
Durango	28.06	8.69	15.59
Guanajuato	21.12	7.04	12.30
Guerrero	18.54	12.65	11.86
Hidalgo	18.22	13.05	13.25
Jalisco	22.73	12.48	14.45
México	21.49	12.68	13.05
Michoacán	20.70	11.68	12.84
Morelos	20.69	13.76	12.84
Nayarit	28.37	10.82	16.28
Nuevo León	13.28	11.02	12.72
Oaxaca	17.57	19.01	13.67
Puebla	15.96	16.38	13.18
Querétaro	19.40	10.04	12.45
Quintana Roo	13.11	29.26	17.65
San Luis Potosí	16.81	6.80	11.30
Sinaloa	31.58	9.55	17.05
Sonora	28.47	20.15	21.26
Tabasco	10.95	27.04	16.18
Tamaulipas	14.06	18.05	14.88
Tlaxcala	16.78	15.62	12.37
Veracruz	12.82	19.96	13.93
Yucatán	16.65	26.81	18.87
Zacatecas	23.07	6.33	13.13
Nacional	20.00	15.76	15.15

observacional. Así, el cuarto reporte del IPCC sobre la situación del clima (IPCC, 2007a) está basado no solamente ni de manera preponderante en los resultados de los modelos de circulación general, sino en evidencia observacional. No obstante, el mismo reporte hace notar que: “existe una notable falta de

balance geográfico en datos y literatura sobre cambios observados, con una marcada escasez en países en desarrollo”.

Luego entonces, tanto por razones de falta de precisión en los modelos de circulación general y efectos de escalamiento en el ámbito regional como por la necesidad de evidencia

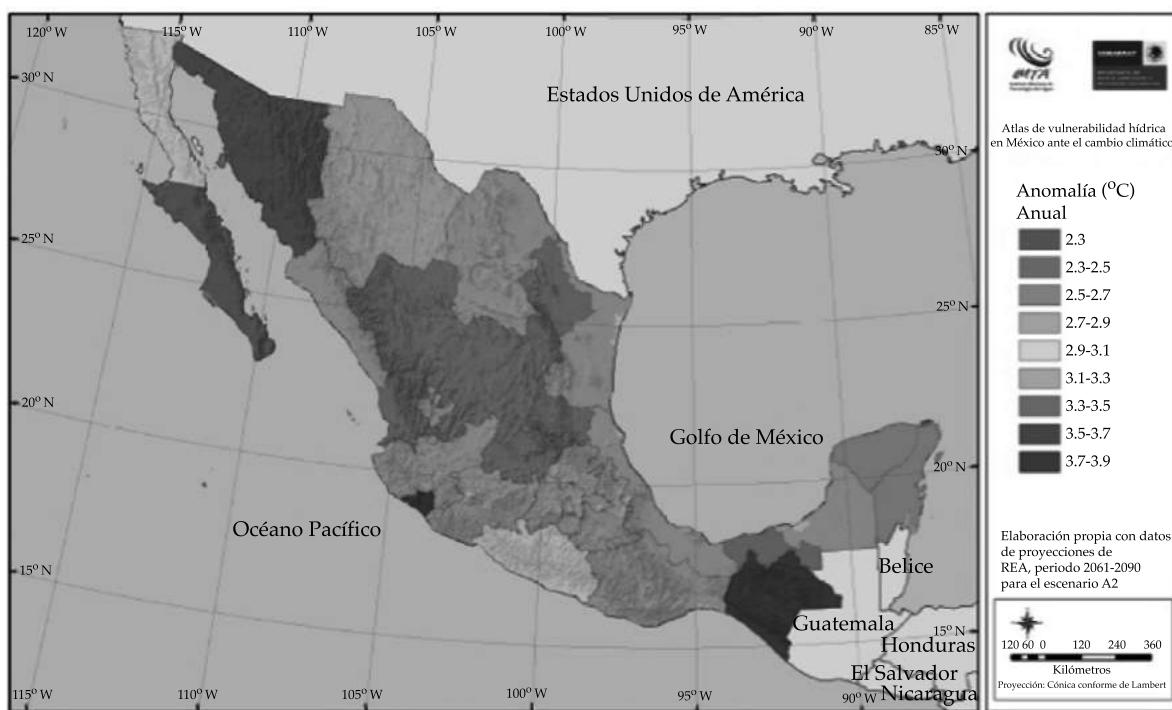
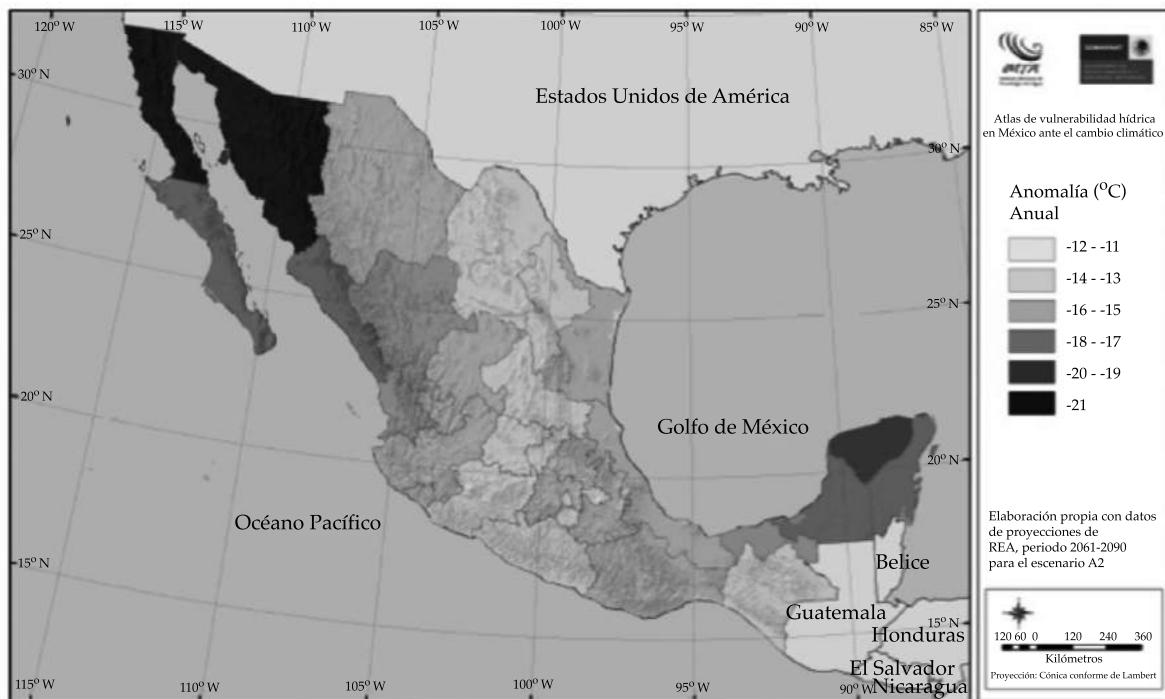


Figura 1. Anomalía promedio anual de temperatura para el periodo 2061-2090 respecto del promedio 1961-1990 (Montero-Martínez *et al.*, 2010).



Escenarios climáticos en México proyectados para el siglo XXI: precipitación y temperatura máxima y mínima

Figura 2. Anomalía promedio anual de precipitación para el periodo 2061-2090 respecto del promedio 1961-1990 (Montero-Martínez *et al.*, 2010).

observacional es indispensable avanzar en el análisis de series de tiempo climático en México, a lo cual espera contribuir el presente artículo.

Zona de estudio

Tanto los resultados de los modelos de circulación general como la evidencia observacional en el ámbito global indican que las regiones de latitudes medias se verán afectadas de manera especial por un incremento de la temperatura y reducciones en la precipitación. En el caso de México, se estima que se perturbarán la región norte en general y la noroeste en particular, por lo que es de esperar que en esas zonas se observen ya cambios estadísticamente significativos.

En específico, la región de la cuenca del Yaqui es climatológicamente vulnerable, sujeta a sequías frecuentes; las más severas con períodos recurrentes de alrededor de 50 y 100 años, que conforme a los escenarios de cambio climático habrían de incrementarse, afectando de manera seria las actividades agrícolas, base económica de la zona. Por estas razones, y por su importancia económica y agrícola en México, se eligió como zona de estudio la cuenca del río Yaqui, en el noroeste mexicano.

La cuenca del río Yaqui, con una extensión de 79 172 km², se ubica casi en su totalidad en el estado de Sonora, México; forma parte de Chihuahua en el este y en su parte superior culmina en la región suroeste de Arizona, Estados Unidos, como se muestra en la figura 3. El río Yaqui desemboca en las laderas de la Sierra Madre Occidental hacia el interior del Golfo de California, cerca de ciudad Obregón, y constituye uno de los mayores sistemas de ríos del noroeste de México. Aunque la cuenca del Yaqui se caracteriza por su clima semiárido (y al este, un terreno montañoso), es una región de gran importancia económica (Nicholas & Battisti, 2008), principalmente por su producción agrícola, sustentada en el Distrito de Riego 014, con una superficie cosechada que supera cada año las 210 000

ha y un valor de la producción de casi 6 000 millones de pesos. Recientemente, además, de la cuenca del río Yaqui depende en parte el abastecimiento de agua para uso municipal de la ciudad de Hermosillo, capital del estado de Sonora, a cuya cuenca se trasvasa agua desde la del Yaqui.

Por otra parte, como se aprecia en la citada figura 3, la cuenca del río Yaqui es muy extensa y con cambios importantes en elevación y orografía. Para realizar un análisis de tendencias es necesario considerar solamente aquellas estaciones localizadas en sitios con características fisiográficas e hidroclimatológicas semejantes. Evidentemente, los resultados serán válidos sólo para esa región.

En la cuenca baja del río Yaqui se cuenta con un grupo de estaciones con registros amplios y prácticamente completos, y las estaciones comparten condiciones hidroclimatológicas semejantes. Por tales razones se seleccionaron para este análisis las estaciones que se muestran en el cuadro 2.

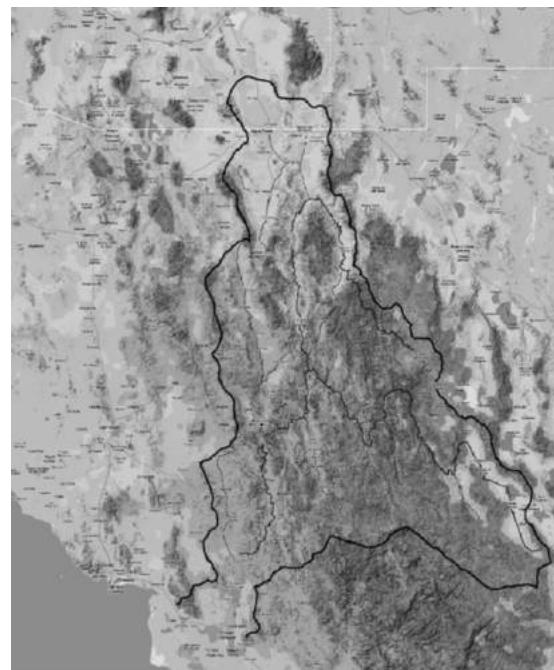


Figura 3. Localización geográfica de la cuenca del río Yaqui (Sortillon-Valenzuela, 2104).

Cuadro 2. Estaciones climatológicas consideradas en el análisis.

Clave	Nombre	Latitud	Longitud	Años con registros
00026123	Yecora (DGE)	28° 22' 17"	108° 55' 40"	39
00026043	Hornos	27° 42' 47"	109° 54' 15"	47
00026073	Punta de Agua I	28° 26' 39"	110° 22' 11"	55
00026068	Presa Álvaro Obregón	27° 49' 23"	109° 53' 9"	63

Metodología

Se han utilizado diversos métodos en el análisis de tendencias de series de datos climáticos. Así, se han empleado la correlación lineal (*v.g.* McCabe & Wolock, 1997) y las técnicas de correlación serial. En años recientes se usan métodos de estimación no paramétricos, tales como el Mann Kendall y la prueba Rho de Spearman. Esta última ha demostrado ser una prueba robusta, cuando se compara con otras semejantes, y brinda resultados consistentes con la de Mann-Kendall. Por ejemplo, Shadmani, Marofi y Majid (2012) utilizaron ambas pruebas para analizar tendencias en escurreimientos en Irán, encontrando resultados consistentes entre ellas. En este artículo se utiliza la prueba no paramétrica de Spearman.

Los métodos no-paramétricos exhiben el problema de que la probable existencia de correlación serial oscurezca los resultados. Sin embargo, si se aplican métodos de blanqueo, se corre el riesgo de eliminar o disminuir la tendencia, si ésta existe. En contraparte, si no se aplican métodos de blanqueo, se corre el riesgo de sobreestimar las tendencias. Todos los métodos no paramétricos comparten esta característica, por lo que el uso de más de uno de ellos de modo simultáneo no resuelve el problema.

Una aproximación metodológica adecuada es el uso simultáneo de diferentes métodos, como correlación lineal o el método de Sen, que se describe más adelante, para confirmar la existencia de tendencias, empleados al mismo tiempo que los métodos no paramétricos sin alteración de datos. Con este enfoque, si bien no se puede estimar de manera cuantitativa la magnitud de la tendencia, sí es posible

determinar con mayor certeza su existencia. Ese es el enfoque propuesto en este artículo.

Por otra parte, es importante considerar que el estudio de las señales del cambio climático se debe realizar mediante el análisis cuidadoso y detallado de las series de tiempo de las variables climáticas, en particular temperatura y precipitación, analizándolas en su totalidad en secciones suficientemente largas del registro, y en sus valores medios, máximos y mínimos, entre otras posibles combinaciones. Esto se debe a que se han encontrado evidencias de cambio climático más claras en el análisis de valores extremos que en el de valores medios (ver por ejemplo, Zhang, Xu, Zhang, & Chen, 2009, y Powell, 2011). Es posible que no se observen cambios significativos en los promedios de las variables, pero sí en los valores máximos o mínimos, o en sus diferencias.

Asimismo, las señales de tendencias climáticas pueden no detectarse en el registro completo, pero ser más obvias si se analizan secciones suficientemente largas (≥ 30 años, que es el periodo en el que se define un clima), debido a que las tendencias pueden ser mayores —y por tanto más evidentes— en las últimas décadas. Esto podría ser el resultado del crecimiento de las tasas globales de emisiones de gases de invernadero que se han incrementado las últimas décadas.

Por estas razones, en este texto se presenta un análisis sistemático de las series de tiempo de temperatura y precipitación en la zona en estudio tanto en sus valores medios como extremos, así como en diversos periodos de tiempo.

Para series de datos climáticos, el estadístico (D) de la prueba Rho de Spearman (SR) se reduce a la siguiente ecuación:

$$D = 1 - \frac{6 \sum_{i=1}^n (R_i - i)^2}{n(n^2 - 1)}$$

Donde R_i es el rango de la i -ésima observación y n es el número de datos en la muestra.

El estadístico estandarizado Z_{SR} está dado por la ecuación:

$$Z_{SR} = D \sqrt{\frac{n-2}{1-D^2}}$$

La hipótesis nula es que no existe una tendencia en la serie. Si $\text{abs}(Z_{SR}) > t_{(n-2, 1-\frac{\alpha}{2})}$ entonces se rechaza la hipótesis nula y existe una tendencia en la serie.

En esta ecuación, $t_{(n-2, 1-\frac{\alpha}{2})}$ es el valor del estadístico t en la tabla de la distribución t de student para un nivel α de significancia.

Recientemente, Sen (2012) propuso una metodología innovadora, que tiene la ventaja de no ser estadística y permite observar de forma gráfica la existencia de alguna tendencia en la serie. El método propuesto es singularmente simple y su fundamento reside en el hecho de

que si dos series de tiempo son idénticas, la gráfica de una con respecto a la otra mostrará una distribución específica de puntos sobre una línea de 45° en un plano de coordenadas cartesianas.

El procedimiento es sencillo: se toma la serie de datos original y se subdivide en dos porciones con respecto al tiempo, mismas que se ordenan en forma descendente. Se toma la primera parte como eje de las ordenadas y la segunda como eje de las abscisas y se traza un diagrama de dispersión.

Se inspecciona el resultado, como se muestra en la figura 4. Cuanto más se separan las parejas de datos de la línea de 45° se tendrá más claramente un tren ascendente si los puntos de la gráfica se ubican en el cuadrante superior de la recta, o descendente si los puntos de la gráfica se ubican en el cuadrante inferior. Desde luego, pueden existir casos más complicados, en los que se observe un cambio de tendencia, es decir, que los datos cambien claramente de cuadrante.

Por último, para observar las tendencias existentes en la cuenca, se presentan en este texto las gráficas de los datos analizados y la recta de ajuste que, como se verá, en algunos casos exhiben un claro sesgo.

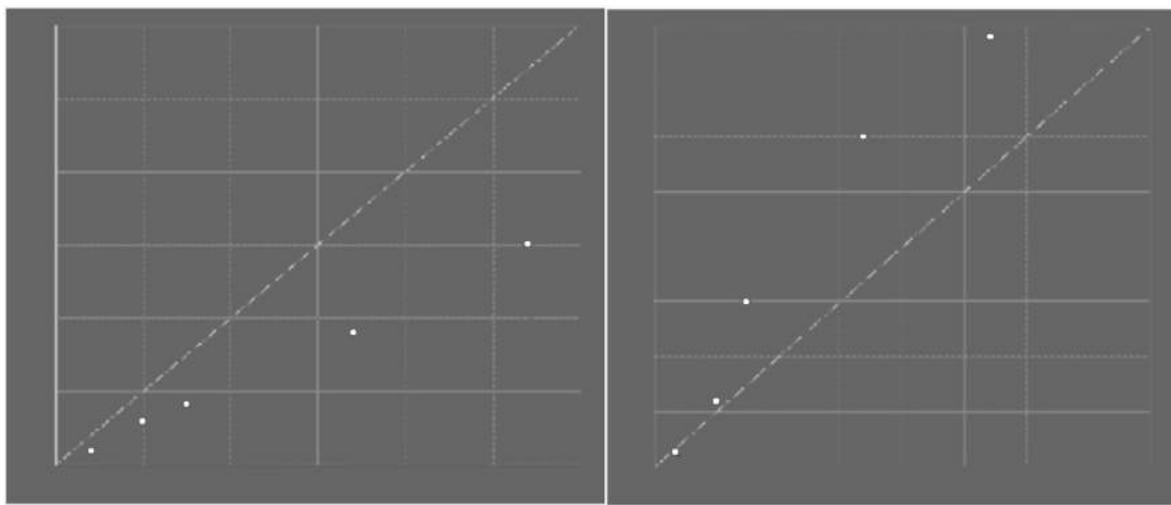


Figura 4. Tendencias ascendente y descendente, diagrama de dispersión con el método de Sekai Sen (Sen, 2012).

Resultados

Se presenta a continuación un análisis detallado de los datos de la estación con el registro más largo y, posteriormente, en forma resumida, los resultados de todas las estaciones analizadas.

Considerese en primer término la temperatura promedio de la estación con el registro más largo, la 26068 Presa Álvaro Obregón, como se muestra en la figura 5. Si se aplica el método Rho de Spearman, se obtienen los valores del cuadro 3, lo que indica la existencia de una tendencia en el registro, puesto que $|Z_{SR}| > t_{(n-2,1-(\alpha/2))}$.

En la figura 5 se muestra el registro con la línea de ajuste de mínimos cuadrados, en el que también se observa con claridad una pendiente negativa. Estos resultados se confirman cuando se aplica el método de Sen, con el que se obtiene el diagrama de dispersión de la figura 6.

El diagrama de dispersión de Sen, además, sugiere la existencia de un cambio de tendencia en la temperatura, lo que aconseja realizar un análisis más detallado.

El cambio de tendencia se observa con mayor claridad cuando se hace un análisis de temperaturas máximas. En efecto, si se grafican las temperaturas máximas en los meses de verano junio-julio-agosto, y de invierno diciembre-enero-febrero, se obtienen la gráficas de la figura 7, en las que se observa una tendencia al incremento de temperatura, en especial en las últimas cuatro décadas. Esta tendencia se observa con mayor claridad cuando se analizan las temperaturas máximas anuales, como se muestra en la figura 8.

Si se aplica la prueba Rho de Spearman a las temperaturas promedio anual y máximas registradas en los meses indicados, se obtienen los valores que se muestran en el cuadro 4.

Cuadro 3. Valores con el método Rho de Spearman.

Periodo	D	$ Z_{SR} $	$t_{(n-2,1-(\alpha/2))}$	Tendencia
1949-2011	0.487	4.354	1.99	Sí

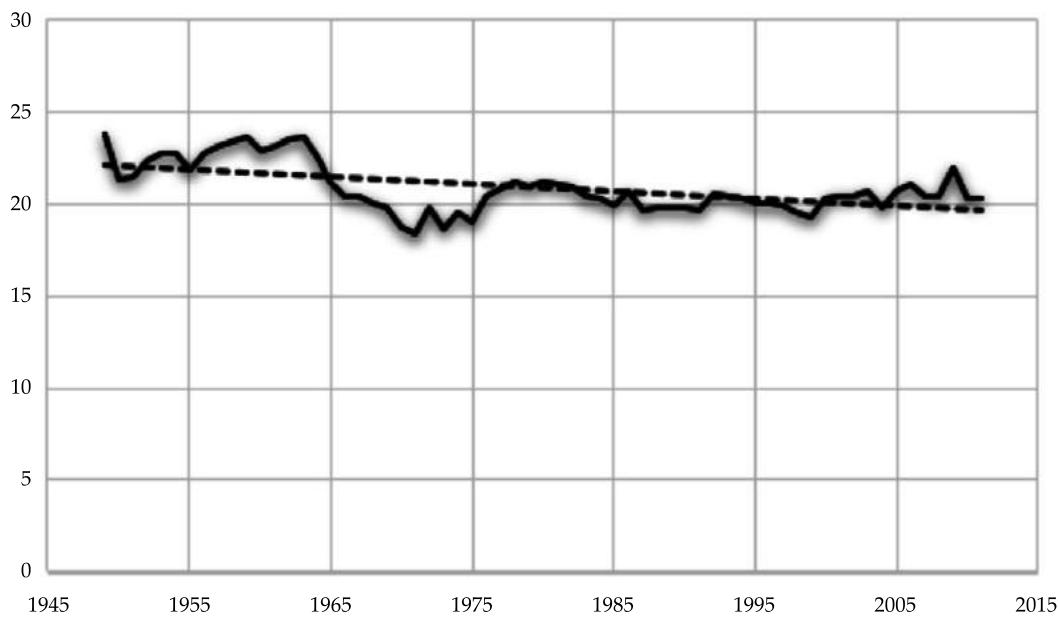


Figura 5. Temperatura promedio anual en la estación 26068 presa Álvaro Obregón.

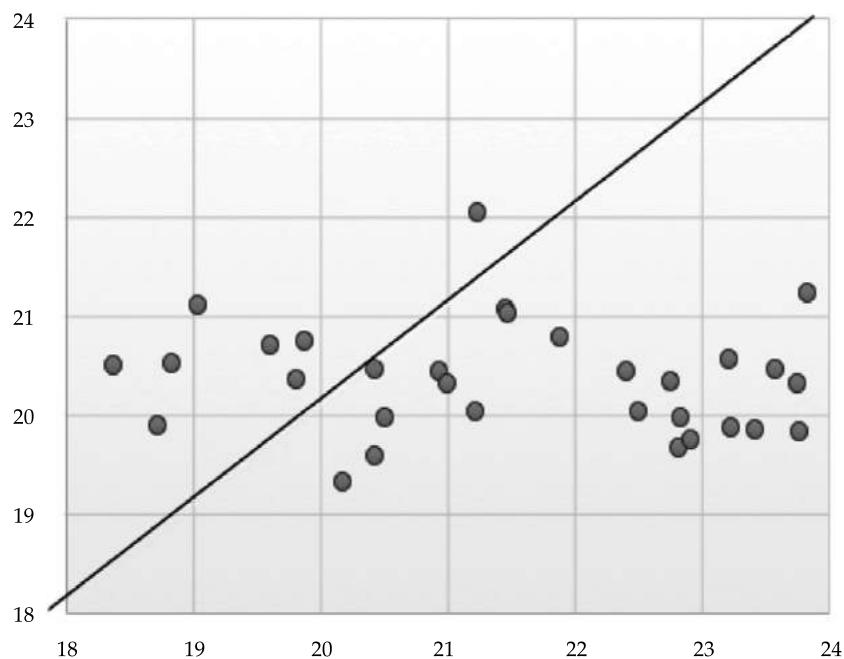


Figura 6. Diagrama de Sen de la temperatura promedio anual de la estación 26068.

Lo que indica la existencia de una tendencia estadísticamente significativa tanto en la temperatura promedio anual como en las temperaturas máximas de los meses seleccionados de invierno y de verano, pues en todos los casos $|Z_{SR}| > t_{((n-2,1)-\alpha/2)}$. Se observa claramente, en especial por las líneas de ajuste visibles en las figuras antes citadas, que las temperaturas máximas en invierno están descendiendo (el clima es menos frío en invierno), mientras que las de verano están aumentando, lo que evidencia un proceso de calentamiento.

Por otra parte, las tendencias climáticas pueden estar enmascaradas por la ocurrencia de algún fenómeno climático de menor duración. En la cuenca del Yaqui parece haberse registrado un periodo más frío durante los años 1967-1984, lo que puede apreciarse en la gráfica de las temperaturas máximas anuales registradas, que se muestra en la figura 8, en la que se observa una línea recta de ajuste prácticamente horizontal. Si se aplica la prueba no paramétrica Rho de Spearman al periodo

completo, el resultado es que no se detecta tendencia estadísticamente significativa. Sin embargo, si se aplica la misma prueba a los últimos 32 años del registro, es decir 1980-2011, se encontrará una clara tendencia creciente, como se muestra en los resultados del cuadro 5. Es importante anotar que un periodo de 32 años es mayor que el que se utiliza para definir el clima de una localidad, que es de 30 años.

Esta tendencia en valores extremos en las últimas décadas es consistente con los resultados obtenidos para los Estados Unidos por Gleason, Lawrimore, Levinson, Karl y Karoly (2008), quienes establecieron que: "las observaciones de la última década continúan apoyando el hallazgo de que el área que experimenta temperaturas máximas y mínimas muy arriba de lo normal está aumentando en años recientes, con una ocurrencia infrecuente de temperaturas máximas y mínimas muy debajo de lo normal".

Se ha reportado que las temperaturas mínimas, que usualmente ocurren durante la noche, han estado aumentando de tal modo que

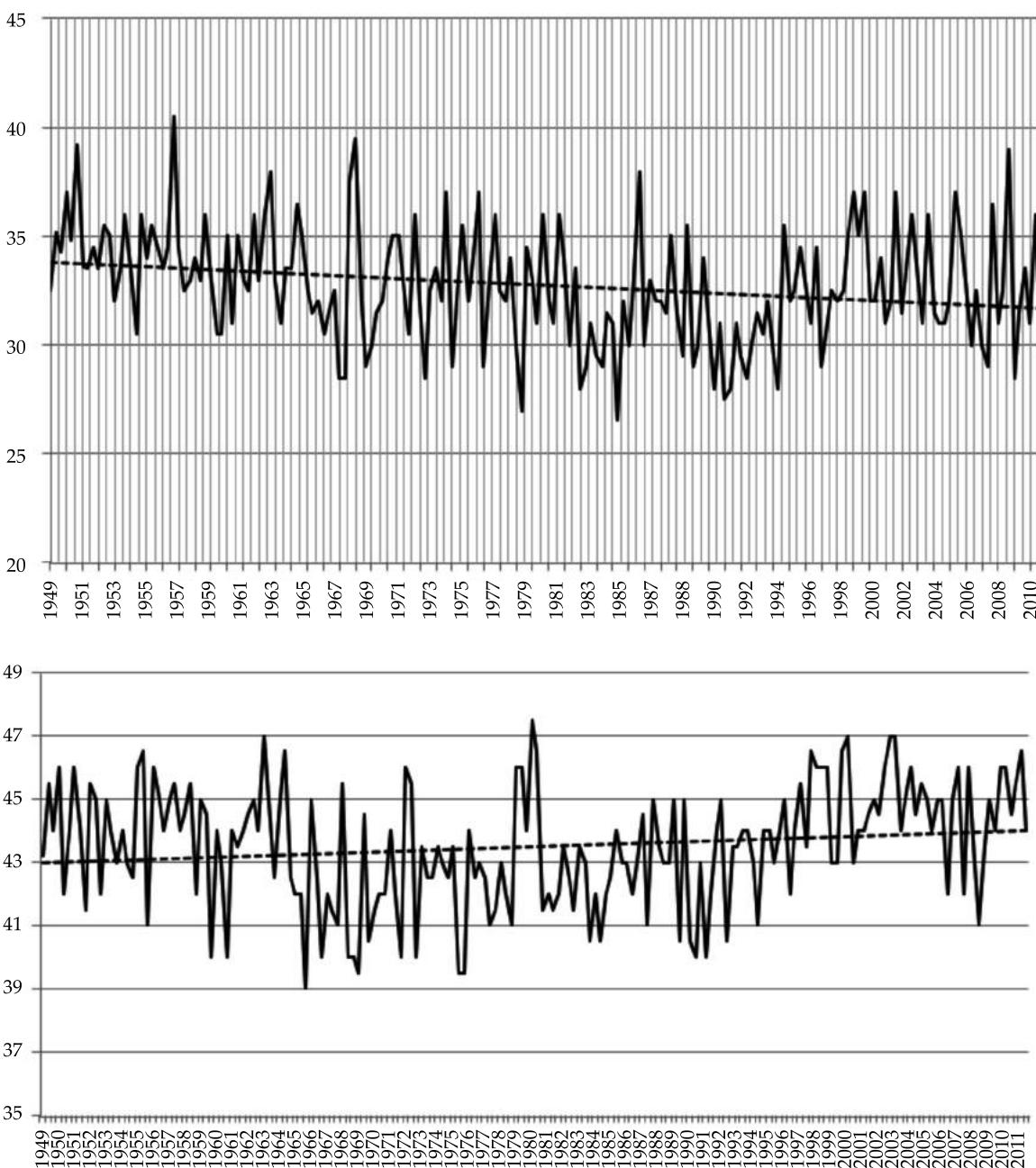


Figura 7. Temperaturas máximas invierno y verano. Estación 26068.

la diferencia entre temperaturas máximas y mínimas también puede mostrar una tendencia indicativa de cambio climático (ver por ejemplo Powell, 2011, o Easterling *et al.*, 2000). Con el propósito de estudiar esta posibilidad, y siguiendo con el análisis de la información de la estación de más largo registro de la zona

(26068), en la figura 9 se muestra la diferencia de temperaturas mínimas y máximas registradas mensuales, y en la figura 10, la diferencia del promedio mensual de temperaturas máximas y mínimas. Al realizar a estas series la prueba no paramétrica Rho de Spearman, se obtiene el resultado que se muestra en el cuadro 6.

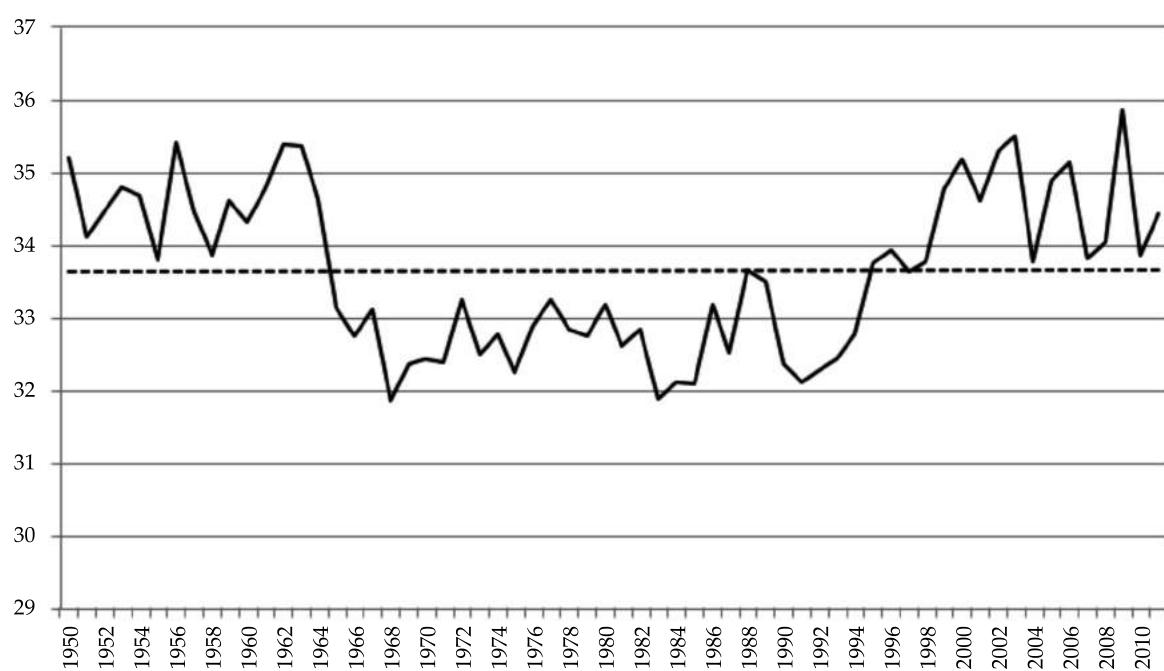


Figura 8. Temperatura máxima anual en la estación 26068.

Cuadro 4. Valores obtenidos con la prueba Rho de Spearman a las temperaturas promedio anual y máximas registradas en los meses de verano junio-julio-agosto, y de invierno diciembre-enero-febrero.

Temperatura/periodo	D	$ Z_{SR} $	$t_{(n-2,1-(\alpha/2))}$	Tendencia
Promedio anual 1949-2011	0.487	4.35	1.99	Sí
Máxima junio-agosto 1949-2011	-0.1715	2.37	1.96	Sí
Máxima diciembre- febrero 1949-2011	0.2513	3.552	1.96	Sí

Cuadro 5. Valores que arroja la prueba no paramétrica Rho de Spearman de los períodos 1949-2011 y 1980-2011.

Temperatura máxima anual/periodo	D	$ Z_{SR} $	$t_{(n-2,1-(\alpha/2))}$	Tendencia
1949-2011	0.050	0.397	1.996	No
1980-2011	0.786	6.97	2.0423	Sí

Con lo que de forma clara existe una señal de cambio climático; esto es, la diferencia de temperaturas extremas registra una tendencia estadísticamente significativa hacia una dismi-

nución en la diferencia entre temperaturas máxima y mínima.

La precipitación, como también ha sido encontrado por varios autores, no registra

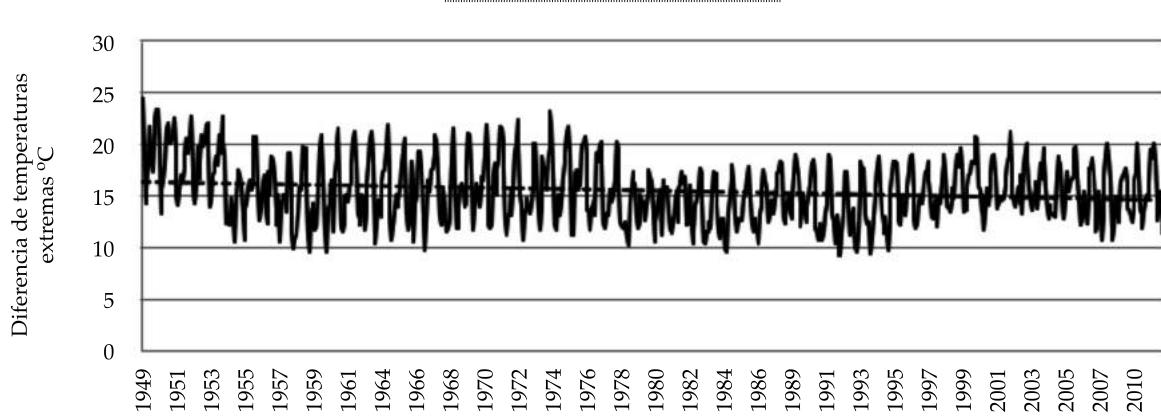


Figura 9. Diferencias de temperatura máxima y mínima registrada mensual en la estación 26068.

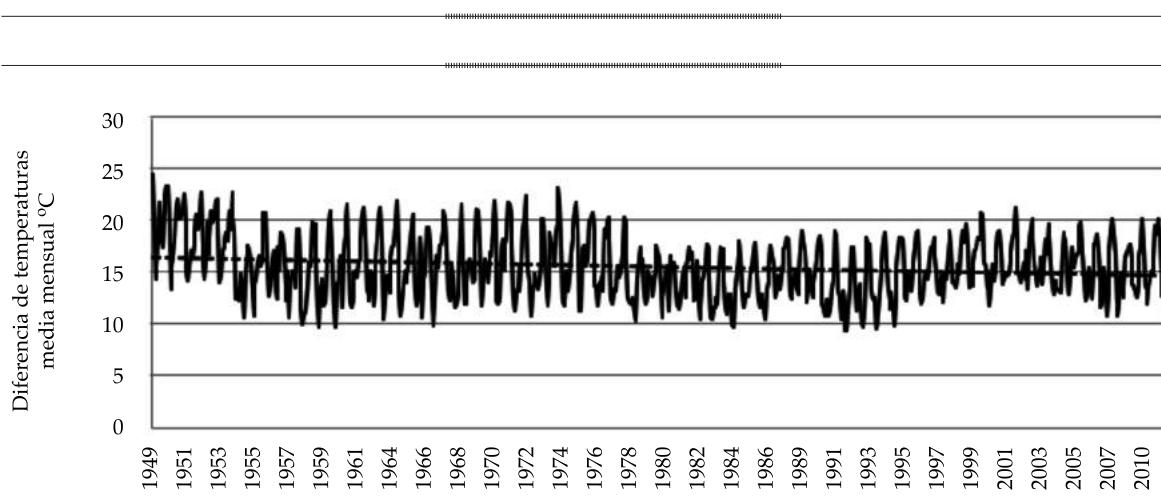


Figura 10. Diferencias de promedio de temperaturas máxima y mínima mensuales en la estación 26068.

Cuadro 6. Diferencia de temperaturas máxima y mínima. Periodo 1949-2011.

Diferencia de temperaturas máxima y mínima	D	$ Z_{SR} $	$t_{(n-2,1-(\alpha/2))}$	Tendencia
Extremas registradas 1949-2011	0.211	5.915	1.96	Sí
Promedio de máximas y mínimas 1949-2011	0.149	4.105	1.96	Sí

con la misma sensibilidad la presencia de alguna tendencia climática. En la figura 11 se presenta la precipitación anual registrada en la estación 26068. En esta figura, la línea delgada es el promedio móvil de cinco años y la recta

punteada es la línea de ajuste de los datos, que prácticamente coincide con la media de los datos, que es de 408.9 mm/año.

Como se ha mostrado anteriormente para el caso de la temperatura, la tendencia es más

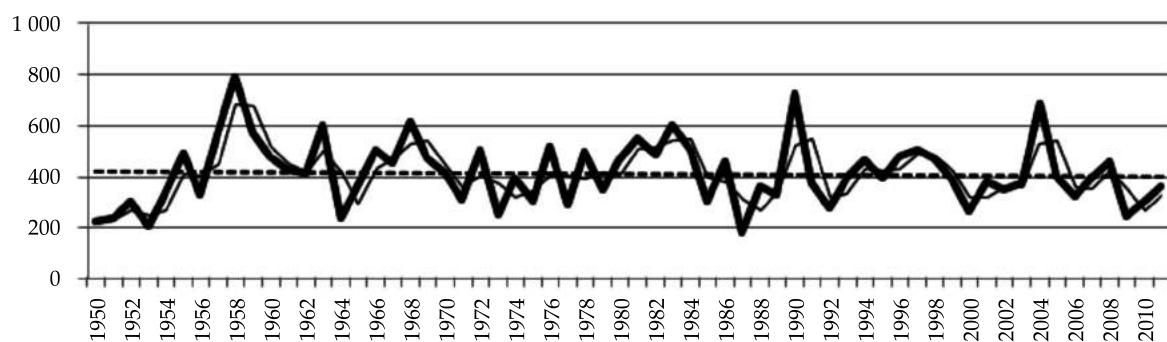


Figura 11. Precipitación anual (mm/año) en la estación 26068.

clara en las décadas recientes. Por esta razón, se aplicó la prueba no paramétrica también a la precipitación mensual registrada en la estación 26068, para diferentes períodos de tiempo, con los resultados que se observan en el cuadro 7.

Si bien en el periodo 1980-2011 se observa un valor más cercano al límite de significancia, se puede decir que por ahora no hay una tendencia estadísticamente significativa en la precipitación.

El análisis realizado en la estación 26068 se extendió a las otras seleccionadas. En el cuadro 8 se resumen los resultados de la

prueba de Spearman encontrados en cuanto a precipitación y temperaturas extremas.

No se observa tendencia consistente en la precipitación, lo cual sí ocurre cuando se analizan los datos de temperaturas extremas. En particular, en todas las estaciones menos una se observa una clara tendencia a la disminución de la diferencia entre las temperaturas máxima y mínima mensual, promedio y máxima registrada, lo que, como se ha dicho antes, es acorde con lo encontrado en estudios semejantes en los estados Unidos (Gleason *et al.*, 2008).

Cuadro 7. Resultados de la prueba no paramétrica a la precipitación mensual registrada en la estación 26068 para diferentes períodos de tiempo.

Precipitación anual Período	D	$ Z_{SR} $	$t_{(n-2,1-(\alpha/2))}$	Tendencia
1949-2011	0.049	0.377	2.003	No
1970-2011	0.141	0.900	2.0211	No
1980-2011	0.34	1.993	2.04	No

Cuadro 8. Resultados generales de la prueba de Spearman para las estaciones analizadas.

Estación	Período de registro o análisis	Precipitación media anual	Temperatura máxima anual	Temperatura mínima anual	Diferencia entre extremas mensuales	Diferencia entre promedio máximo y mínima mensual
00026123	1967-2010	No	Sí	No	Sí	Sí
00026043	1980-2011	No	No	No	Sí	Sí
00026073	1987-2011	No	Sí	Sí	No	No
00026068	1949-2011	No	No	Sí	Sí	Sí

Conclusiones

El análisis de tendencias climáticas en una región debe realizarse mediante la revisión de los valores medios y extremos de las variables climáticas principales, así como en diferentes secciones del registro. Esto último para registrar la probable existencia de tendencias en las últimas décadas, en las que la emisión de gases de invernadero y sus efectos parecen estarse incrementando y que al aplicar técnicas estadísticas en la serie completa pueden fácilmente enmascararse. Asimismo, como ha sido encontrado por otros autores, la presencia de cambio climático es más fácilmente detectable en el análisis de extremos, lo que es consistente con una atmósfera más caliente y, por tanto, con mayor energía.

Asimismo, dadas las limitaciones de los diversos métodos, en especial los estadísticos no paramétricos, es conveniente emplear simultáneamente diversos métodos. En este trabajo se ha usado el método de regresión lineal y del de Sen, con resultados consistentes con los obtenidos con el método de Spearman sin alteración de datos. No obstante, esta metodología sólo permite discernir con razonable certeza la existencia de alguna tendencia y su dirección (positiva o negativa), pero no su valor exacto.

En la cuenca baja del río Yaqui, región analizada en este estudio, se observa una tendencia clara de cambio climático en las temperaturas. Se detecta, en particular, una disminución de la diferencia entre temperaturas máximas y mínimas, lo que se observa con claridad en la estación 26068, que ha sido, por la longitud de su registro, estudiada con mayor detalle, en la cual además las temperaturas máximas en invierno disminuyen y las de verano aumentan, con valores estadísticamente significativos.

No se observa aún en la región una tendencia clara o estadísticamente significativa en la precipitación anual, lo que se verificó en todas las estaciones consideradas.

Referencias

- Easterling, P. A., Evans, J. L., Groisman, Y. P., Karl, T. R., Runkel, K. E., & Ambenje, P. (2000). Observed Variability and Trends in Extreme Climate Events: A Brief Review. *Bulletin of the American Meteorological Society*, 81(3), 417-425.
- Gleason, K. L., Lawrimore, J. H., Levinson, D. H., Karl, T. R., & Karoly, D. J. (2008). A Revised U. S. Climate Extremes Index. *Journal of Climate* (American Meteorological Society), 21, 2124-2137.
- IPCC (2007a). *Climate 2007: Impacts, Adaptation and Vulnerability*. M. L. Parry, O. Canziani, J. Palutikof, P. van Del Linden, & C. Hanson, C. (Eds). Cambridge: Cambridge University Press.
- IPCC (2007). *IPCC 2007: Summary for Policy Makers*. In *Climate Change 2007: Impacts, Adaptation and Vulnerability. Contribution of the Working Group II*. M. L. Parry, O. Canziani, J. P. Palutikof, P. J. Van der Linden, & C. E. Hasum (Eds.). Cambridge: Cambridge University Press.
- IPCC (2008). *Climate Change and Water. IPCC Technical Paper VI*. Geneva: Intergovernmental Panel for Climate Change.
- Martínez-Austria, P., & Patiño-Gómez, C. (2010). *Atlas de vulnerabilidad hídrica en México ante el cambio climático*. G. C. Patiño & P. F. Martínez-Austria (Eds.). Jiutepec, México: Instituto Mexicano de Tecnología del Agua.
- Martínez-Austria, P. (2007). *Efectos del cambio climático en los recursos hídricos de México*. Jiutepec, México: Instituto Mexicano de Tecnología del Agua.
- McCabe, G. J., & Wolock, D. M. (1997). Climate Change and the Detection of Trends in Annual Runoff. *Climate Research*, 8, 129-134.
- Montero-Martínez, M. J., Martínez-Jiménez, J., Castullo-Pérez, N. I., & Espinoza-Tamarindo, B. E. (2010). Escenarios climáticos en México proyectados para el siglo XXI. Precipitación y temperaturas máxima y mínima. En P. F. Martínez-Austria & G. C. Patiño-Gómez (Eds.). *Atlas de vulnerabilidad ante el cambio climático* (pp. 39-63). Jiutepec, México: Instituto Mexicano de Tecnología del Agua.
- Nicholas, R. E., & Battisti, D. S. (2008). *Drought Recurrence and Seasonal Rainfall Prediction in the Rio Yaqui Basin, Mexico*. Seattle: Department of Atmospheric Sciences, University of Washington.
- NOAA (2014). *Trends in Atmospheric Carbon Dioxide. Global Trends in Atmospheric Carbon Dioxide*. Recuperado de <http://www.esrl.noaa.gov/gmd/ccgg/trends/mlo.html>.
- Powell, J. L. (2011). *Rough Winds. Extreme Weather and Global Warming*. Kindle Singles. Recuperado de http://www.amazon.com/Rough-Winds-Extreme-Weather-Climate-ebook/dp/B005LYTHZO#reader_B005LYTHZO.

- Randall, D. A., & Word, R. A. (2007). Climate Models and their Evaluation (pp. 589-662). In *Climate 2007: Impacts, Adaptation and Vulnerability*. Cambridge: IPCC.
- Sen, S. (2012). Innovative Trend Analysis Methodology. *Journal of Hydrologic Engineering (ASCE)*, 17, 1042-1043.
- Shadmani, M., Marofi, S., & Majid, R. (2012). Trend Analysis in Reference Evapotranspiration Using Mann-Kendall And Spearman's Rho Test in Arid Regions of Iran. Edited by Springer. *Water Resources Management*, 26, 211-224.
- Sortillon-Valenzuela, M. J. (2004). *La cuenca del río Yaqui*. Accessed January 20, 2014. Recuperado de www.historiadehermosillo.com/htdocs/cuencas-sonora/rioyaqui/yaqui.htm.
- Zhang, Q., Xu, C.-Y., Zhang, Z., & Chen, Y. D. (2009). Changes of Temperature Extremes for 1960-2004 in Far-West China. *Stoch Environ Res Risk Assess* (Springer), 23, 721-735.

Dirección institucional de los autores:

Dr. Polioptró F. Martínez Austria

Director general de Investigación, Posgrado e
Internacionalización
Universidad de Las Américas Puebla
polioptró.martinez@udlap.mx

Dr. Carlos Patiño Gómez

Coordinador del Posgrado de Ingeniería
Universidad de Las Américas Puebla
carlos.patino@udlap.mx

Ing. José Enrique Tamayo Escobar

Estudiante
Escuela de Ingeniería
Universidad de Las Américas Puebla