

# TENDENCIAS EN LOS CAUDALES EN RÍOS DE MICHOACÁN, MÉXICO

• Humberto Hernández-Rodríguez •  
*Consultor forestal privado*

• José de Jesús Návar-Cháidez •  
*Centro Interdisciplinario de Investigación para el  
 Desarrollo Integral Regional-Instituto Politécnico Nacional, Unidad Durango, México*

## Resumen

En este trabajo se analizaron las tendencias y sus magnitudes de cambio en los caudales de 12 estaciones hidrométricas del estado de Michoacán, México. Se utilizaron registros diarios del caudal y se usó el programa RORA para la separación del flujo base y directo. Se utilizó la regresión lineal simple y la prueba de Mann-Kendall para evaluar tendencias, así como la prueba del Seno para evaluar magnitudes de cambio. Se encontró una disminución en los escurrimientos en el 40% y un aumento en el 16% de las estaciones hidrométricas analizadas. Los resultados proveen un indicador del impacto de los factores climáticos y antropogénicos que están afectando la producción de escurrimientos en el estado de Michoacán.

**Palabras clave:** cambios en caudales, presión antropogénica, degradación de cuencas.

## Introducción

Las aguas superficiales y subterráneas son una parte vital de nuestro sistema de agua dulce; sus usos principales son el público, agrícola, e industrial. Recientemente se ha reconocido también el uso ambiental de los ríos. Sin embargo, el recurso está amenazado por la presión que ejercen los diferentes usos, además de la contaminación. En muchos lugares se usa el agua de estos sistemas con mayor rapidez que con el que puede reemplazarla la naturaleza. Algunos factores incipientes, como la posibilidad del comercio internacional del agua, el rápido crecimiento de la población en zonas de alta demanda del líquido y el cambio climático, aumentarán las presiones de las aguas superficiales y subterráneas.

Muchos investigadores afirman que el acceso al agua limpia será el problema ambiental del siglo XXI (Postel, 2000; Schmandt *et al.*, 2000). Un estudio reciente prevé que si los patrones actuales de consumo continúan, al menos 3 500 millones

de personas o 48% de la población mundial vivirá en cuencas de agua presionadas por sobreuso y contaminación en el año 2025 (World Resources Institute, 2000).

Ahora bien, el estado de Michoacán se encuentra ubicado en una zona en donde existe 36% de grado de presión sobre los recursos hidrológicos, por su ubicación en dos cuencas señaladas con problemas futuros para abastecer el suministro de agua a todos los usuarios: el río Lerma-Santiago y el río Balsas. Todos los acuíferos de la zona norte, donde reside gran parte de la población, se encuentran sobreexplotados. La presión sobre las aguas superficiales y subterráneas continuará aumentando por el crecimiento demográfico y por causas del desarrollo, la constante deforestación, urbanización, y fragmentación de ríos y cuerpos de agua. Este trabajo de investigación se justifica por plantear como objetivos la separación de los gastos base y directo de los escurrimientos totales medidos diariamente y tratar de entender las tendencias temporales de estos componentes

del ciclo hidrológico, para contar con elementos en el manejo sustentable del agua en el estado.

## Materiales y métodos

### *El área de estudio*

El estado de Michoacán está situado en la región centro occidente de la república mexicana, entre las coordenadas geográficas extremas de 17° 55' y 20° 24' de latitud norte, y 100° 04' y 103° 44' de longitud oeste (figura 1). La extensión territorial que ocupa es de 58 837 km<sup>2</sup>, que corresponde aproximadamente al 3% de la superficie del país. Los climas predominantes son templado, cálido y de transición. Las temperaturas medias anuales fluctúan desde los 10 hasta los 14 °C en los climas semifríos, y de los 28 a 29.5 °C en los cálidos secos. La precipitación, por el contrario, oscila desde los 400 mm anuales en los climas cálidos secos, hasta los 1 700 mm en los climas templados húmedos. Dentro de los tipos de vegetación representativos se encuentran de selvas, sabanas, bosques templados, bosques

semisecos y pastizales. Destacan por su importancia los suelos vertisólicos, luvisólicos, litosólicos y regosólicos.

### *Análisis estacionales*

Se analizaron los datos de caudales diarios registrados en las estaciones hidrométricas establecidas en varios ríos del estado de Michoacán y publicados en el programa BANDAS. En total, doce estaciones cumplieron con las características para separar el flujo base y directo. Las estaciones de registro de caudales se encuentran ubicadas principalmente en la zona norte y centro del estado (cuadro 1). Los datos observados contaron con registros diarios entre 13 y 58 años. Se utilizó el programa RORA (Rutledge, 1998) para separar el flujo base y directo a escalas diaria, mensual y anual. Para detectar las tendencias en los caudales se empleó la prueba paramétrica de *F* y no paramétrica Mann-Kendall. La prueba no paramétrica del método del Seno y la paramétrica de la regresión lineal se usaron

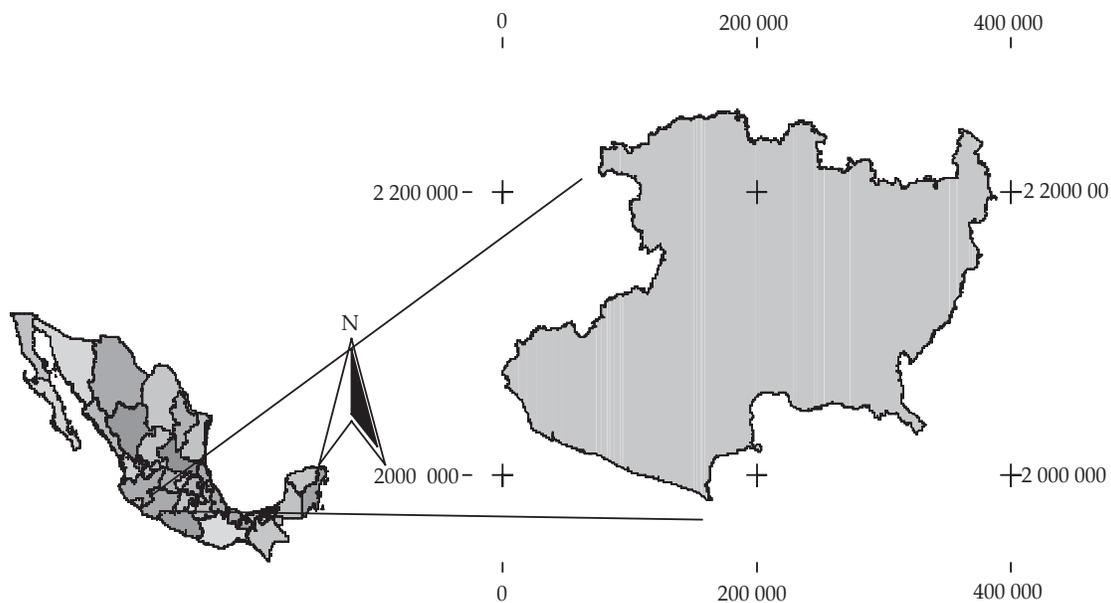


Figura 1. Ubicación del estado de Michoacán en la república mexicana.

Cuadro 1. Estaciones hidrométricas analizadas y las proporciones de caudales base y directo en el estado de Michoacán, México.

Núm.	Clave	Estación	Corriente	Qb (%)	Qd (%)	Qa (Mm <sup>3</sup> )
1	12224	Chiquito	Río Chiquito	0.51	0.49	226
2	12233	Corrales	Río Lerma	0.79	0.21	693
3	12310	La Estanzuela	Río Duero	0.87	0.13	588
4	12323	Salidad de Malpais	Río Querándaro	0.57	0.43	261
5	12338	San Antonio	Arroyo las Liebres	0.80	0.20	552
6	12415	Puente San Isidro	Río de la Patera	0.85	0.15	468
7	12588	El Plan	Río Grande de Morelia	0.64	0.36	327
8	18095	El Puerto	Río Cotija	0.61	0.39	468
9	18351	Piritícuaro	Arroyo Chihuero	0.65	0.35	139
10	18452	El Charco	Río Chila	0.79	0.21	180
11	18532	Chorros	Río Itzícuaro	0.89	0.11	168
12	18553	Obregón	Río Taixtan	0.66	0.34	176

Qb=caudal base; Qd=caudal directo; t=número de meses disponibles para correr los análisis; Qa=caudal anual.

para detectar la magnitud de cambio de las variables de la descarga en tiempo (Gilbert, 1987).

## Resultados

Los datos hidrométricos de las estaciones analizadas presentan una variación espacial muy amplia en los caudales anuales promedio desde 8.3 Mm<sup>3</sup> (Piritícuaro) hasta 1 163.3 Mm<sup>3</sup> en la estación Corrales (cuadro 1). Las estaciones presentan un caudal total promedio ( $\pm$  intervalo de confianza) de 312 Mm<sup>3</sup> ( $\pm$  213 Mm<sup>3</sup>) para todas las estaciones hidrométricas analizadas. Las variaciones tan amplias demuestran que existen factores, como el balance hidrológico y el tamaño de las cuencas, que están influyendo en la desviación espacial tan amplia en los escurrimientos anuales promedio.

En general, el flujo base domina los caudales totales. Del caudal promedio anual, el 72% ( $\pm$  7%) corresponde al flujo base. Esto equivale, en promedio, a 224 Mm<sup>3</sup> ( $\pm$  22 Mm<sup>3</sup>). El flujo directo contabiliza, en promedio, 28% ( $\pm$  7%) y equivale en promedio anual a 88 Mm<sup>3</sup>

( $\pm$  22 Mm<sup>3</sup>). Existen estaciones climáticas que tienen un mejor equilibrio entre el flujo base y directo, como lo es la estación Salida de Malpais, que genera un caudal anual promedio de sólo 52 Mm<sup>3</sup> y se localiza en la zona del altiplano mexicano. Návar (2008) encontró que los caudales base representan entre el 20 y el 30% del caudal total para las estaciones hidrométricas del estado de Durango. Las diferencias tan notorias se pueden explicar por los diferentes tipos de climas, los suelos y la geología presentes.

De acuerdo con los resultados de la prueba de *F* de la regresión lineal, de las 12 estaciones analizadas, siete muestran tendencias a aumentar en flujo base. De éstas, sólo tres (San Antonio, El Puerto y Chiquito) presentaron diferencias estadísticamente significativas. Las estaciones que mostraron una disminución estadísticamente significativa en el caudal fueron la estación Corrales, con una pendiente de  $-1.92$  para el flujo total,  $-2.03$  en flujo base y una pendiente positiva para el flujo directo, y la estación Salidas de Malpais, que muestra tendencias negativas

Cuadro 2. Los valores de  $F$  y  $Z$ , y su significancia estadística para los caudales total, base y directo para doce estaciones hidrométricas del estado de Michoacán, México.

Clave	Estación	Probabilidad de $F$			Valores de $Z$ de Mann-Kendall		
		$Qt$	$Qb$	$Qd$	$Qt$	$Qb$	$Qd$
12224	Chiquito	0.31	0.04	0.85	1.44	2.28*	-0.15
12233	Corrales	0.09	0.04	0.46	-2.44	-2.8*	-0.16
12310	La Estanzuela	0.94	0.02	0.001	0.49	-1.28	4.42***
12323	Salidas de Malpais	0.02	0.006	0.38	-2.17*	-2.92**	0.47
12338	San Antonio	0.03	0.04	0.024	2.11*	2.05*	2.49*
12415	Puente San Isidro	0.66	0.92	0.08	-0.56	-0.21	-1.78+
12588	El Plan	0.42	0.31	0.97	-0.89	-1.07	-0.45
18095	El Puerto	0.03	0.004	0.33	2.45*	2.63*	1.63*
18351	Piritícuaro	0.56	0.81	0.37	-1.02	-0.87	-0.79
18452	El Charco	0.78	0.28	0.39	-1.19	-1.68+	-0.4
18532	Chorros	0.14	0.36	0.09	1.53	0.66	1.42
18553	Obregón	0.56	0.72	0.56	-0.55	-0.92	-0.55

$Qt$  =caudal total;  $Qb$ =caudal base;  $Qd$ =caudal directo; + = ( $p=0.10$ ); \* = ( $p=0.05$ ); \*\* = ( $p=0.01$ ); \*\*\* = ( $p=0.005$ ).

Cuadro 3. Pendientes y sus significancia estadística de la regresión lineal y la prueba de Mann-Kendall entre los componentes del caudal y el tiempo para doce estaciones hidrométricas del estado de Michoacán, México.

Clave	Estación	Pendiente regresión			Pendiente Mann-Kendall		
		$Qt$	$Qb$	$Qd$	$Qt$	$Qb$	$Qd$
12224	Chiquito	0.009	0.0009	0.0008	-0.02	-0.01	-0.001*
12233	Corrales	-1.92	-2.03	0.115	-1.61	-1.56*	-0.01**
12310	La Estanzuela	-0.008	-0.2	0.19	0.04	0.12	0.19***
12323	Salidas de Malpais	-0.20	-0.23	0.02	-0.22*	-0.24	0.027
12338	San Antonio	0.08	0.06	0.02	0.081*	0.06*	0.023*
12415	Puente San Isidro	-0.005	-0.001	-0.004	-0.01	-0.001	-0.004+
12588	El Plan	-0.20	-0.20	-0.001	-0.19	-0.21	-0.017
18095	El Puerto	0.05	0.042	0.015	0.05	0.02	0.02
18351	Piritícuaro	-0.02	-0.005	-0.01	-0.04	-0.02	-0.019
18452	El Charco	-0.082	-0.19	0.10	-0.41	-0.40	-0.060+
18532	Chorros	1.20	0.54	0.65	1.48	0.55	0.52
Promedio		-0.100	-0.201	0.100	-0.079	-0.021	0.106
Desviación estándar		0.715	0.644	0.193	0.786	0.268	0.232
Intervalo de confianza ( $\alpha=0.05$ )		0.405	0.364	0.109	0.444	0.152	0.131

$Qt$ =caudal total;  $Qb$ =caudal base;  $Qd$ =caudal directo.

en el flujo base y total, pero un aumento en el flujo directo (cuadro 2).

Las tendencias de las pendientes del ajuste de la regresión son variables para los flujos en el estado de Michoacán (cuadro 3). El 67% de las estaciones hidrométricas presentan una tendencia negativa en el flujo total y sólo dos estaciones son estadísticamente diferentes ( $p < 0.05$ ). El flujo directo ha aumentado en dos estaciones (Corrales y Salidas de Malpais), posiblemente porque ha aumentado la extracción del agua de los acuíferos y disminuido la infiltración y recarga de acuíferos, o por una combinación de ambas, al observarse una disminución significativa en los caudales base.

De acuerdo con la prueba de Mann-Kendall, el 66% de las estaciones hidrométricas presenta tendencias negativas, pero sólo el 40% exhibe significancia estadística. La estación Corrales muestra una disminución importante en flujo base (-1.56) y flujo directo (-0.01), y por consiguiente se observa una disminución en el flujo total en tiempo. Nívar *et al.* (2006) observaron para las estaciones hidrométricas del norte de México, que el 40% presentaba tendencias estadísticamente significativas tanto a reducir (26%), como a aumentar (14%) los caudales base, directo y total.

Del total de estaciones analizadas, el 34% presenta aumentos en sus caudales totales, pero sólo la estación San Antonio muestra tendencias significativas en flujo total (0.081), flujo base (0.06) y flujo directo (0.023). La estación La Estanzuela parece aumentar sus flujos directos, pero no sus flujos base y total.

La consistencia estadística en el signo para todos los caudales base, directo y total, como en las estaciones hidrométricas Chiquito, San Antonio y El Puerto, indican cambios climáticos a escala espacio-temporal de la muestra de datos utilizados. Por el contrario, las estaciones hidrométricas que tuvieron inconsistencia en los signos, como Corrales, La Estanzuela y Salidas de Malpais, por lo general presentaron disminución en el caudal base y aumento en el caudal directo.

El análisis estadístico de las pendientes resultantes de las pruebas de Mann-Kendall y de la ecuación lineal muestran que, en general, los caudales totales están disminuyendo a una tasa de 0.08 a 0.10  $\text{Mm}^3 \text{año}^{-1}$  de acuerdo con la prueba no paramétrica o la ecuación de regresión lineal. De igual manera, los caudales base están disminuyendo a una tasa mayor de -0.20 o -0.02  $\text{Mm}^3 \text{año}^{-1}$ , según las pruebas realizadas. Al contrario, los caudales directos están aumentando consistentemente en ambas pruebas a una tasa de 0.10  $\text{Mm}^3 \text{año}^{-1}$ . Si se considera la prueba de Mann-Kendall, la disminución del flujo base no se compara con el aumento del caudal directo. Esto es un indicador preliminar de cambio climático a escala temporal de los datos utilizados en el análisis estadístico. La diferencia entre este equilibrio, que es de 0.10  $\text{Mm}^3 \text{año}^{-1}$ , se puede atribuir a las actividades antropogénicas que modifican con sus actividades la cobertura y el suelo, factores hidrológicos tendientes a perturbar la recarga de acuíferos a través de la infiltración y la escorrentía superficial.

En particular, los caudales base están disminuyendo drásticamente en la estación Corrales, a una tasa de 2.03  $\text{Mm}^3 \text{año}^{-1}$ . Actualmente esta estación está presentando un caudal base promedio de 919  $\text{Mm}^3 \text{año}^{-1}$  y la reducción del flujo base a esta tasa indica que de continuarse esta tendencia para el 2050 sólo habrá el 90% del caudal base que se produce actualmente (827  $\text{Mm}^3 \text{año}^{-1}$ ). La estación Salida de Malpais presenta, en términos relativos, una mayor disminución en el caudal base de un promedio actual de 29.5  $\text{Mm}^3 \text{año}^{-1}$ ; de continuarse esta tendencia, para finales del 2050 sólo habrá el 65% del caudal base actual a la tasa de cambio presente (19  $\text{Mm}^3 \text{año}^{-1}$ ).

El cambio climático podría eventualmente cambiar la frecuencia, duración y magnitud de las precipitaciones. Tendencias significativas hacia la reducción de la precipitación fueron encontradas para algunas regiones de Michoacán en algunas estaciones del periodo de 1920-2004 por Méndez *et al.* (2008). La deforestación continúa siendo un problema

ambiental severo en Michoacán y se registra a una tasa de entre 1.5 y 2.0%. Los desmontes para la agricultura ocasionan cambios importantes en los regímenes hidrológicos de los suelos, aumentando la escorrentía superficial en la etapa de las lluvias importantes y reduciendo la recarga de acuíferos, que alimentan los ríos en las épocas de estiaje (Návar y Synnott, 2000). Debido a la deforestación y al cambio climático, algunas regiones de la tierra están entrando en una etapa de escasez de agua (Postel, 2000). De ser ciertas las proyecciones con respecto a las precipitaciones en México por el cambio climático (Villers-Ruiz y Trejo-Vázquez, 1997; IPCC, 2001), es posible que las variaciones y tendencias hacia la baja en los caudales base no sólo se agudizarían por el crecimiento demográfico y los disturbios a los ecosistemas, sino que también el clima estaría contribuyendo a que estos fenómenos climáticos se magnifiquen eventualmente.

### Conclusiones

En los ríos analizados se encontró que el 66% de las estaciones tiene tendencias a disminuir sus caudales y el 40% presenta tendencias estadísticamente significativas. Para el 34% de las estaciones se encontraron aumentos notorios en los caudales, pero sólo para el 16% este incremento es estadísticamente significativo. Destacan las estaciones hidrométricas de Corrales y Salida de Malpais, cuyos caudales base están disminuyendo y los caudales directos, aumentando. Ante la creciente necesidad de un manejo sustentable de los recursos hidrológicos, es necesario impulsar políticas que apoyen el desarrollo de mecanismos para la protección y restauración de cuencas hidrológicas, y así poder asegurar la calidad de perenne en los caudales, para la satisfacción de los usos y usuarios del agua desde el municipio, la industria, la agricultura

y el medio ambiente, en pro del bienestar de la sociedad presente y futura.

Recibido: 02/04/2008  
Aprobado: 17/06/2009

### Referencias

- IPCC. Intergovernmental Panel on Climate Change. Impacts, adaptation, and vulnerability. *Summary for Policy Makers*. Cambridge, UK: Cambridge University Press, 2001, 17 pp.
- GILBERT, R.O. *Statistical Methods for Environmental Pollution Monitoring*. New York: Van Nostrand Rienhold Company, Inc., 1987.
- MÉNDEZ, G.J., NÁVAR, J. y GONZÁLEZ, V. Análisis de tendencias de la precipitación (1920-2004) en México. *Investigaciones Geográficas. Boletín del Instituto de Geografía de la UNAM*. Vol. 65, 2008, pp. 38-55.
- NAVAR, J. and SYNNOTT, J.T. Surface runoff, soil erosion and land-use in North-Eastern Mexico. *Terra*. Vol. 18, no. 3, 2000, pp. 247-253.
- NÁVAR, J., HERNÁNDEZ, H. and RÍOS, S.J.C. Temporal tendencies of river discharge of five watersheds of northern México. *Proceedings RMRS-P-42CD*. Forth Collins, USA: USDA Forest Service, 2006.
- NÁVAR, J. *Atlas hidrológico del estado de Durango*. Inédito, 2008.
- POSTEL, S.L. Entering an era of water scarcity: the challenges ahead. *Ecological Applications*. Vol. 10, no. 4, 2000, pp. 941-948.
- RUTLEDGE, A.T. *Computer programs for describing the recession of ground-water discharge and for estimating mean ground-water recharge and discharge from streamflow data – update*: U.S. Geological Survey Water-Resources Investigations Report 98-4148, 1998, 43 pp.
- SCHMANDT, J., AGUILAR, I., ARMSTRONG, N., CHAPA, L., CONTRERAS, S., EDWARDS, R., HAZELTON, J., MATHIS, M., NÁVAR, J., VOGEL, E. and WARD, G. *Water and sustainable development. Executive Summary*. Houston: EPA Research Agreement R 824799-01-0, March 31, 2000.
- VILLERS-RUIZ, L. and TREJO-VÁZQUEZ, I. Assessment of the vulnerability of forest ecosystems to climate change in Mexico. *Climate Research*. Vol. 9, 1997, pp. 87-93.
- WORLD RESOURCES INSTITUTE. *World Resources 2000. Freshwater systems: Executive summary*. New York: World Resources Institute, 2000.

## Abstract

HERNÁNDEZ-RODRÍGUEZ, H. & NÁVAR-CHÁIDEZ, J.J. *Discharge patterns of rivers in Michoacán, Mexico. Water Technology and Sciences, formerly Hydraulic Engineering in Mexico (in Spanish). Vol. I, no. 1, January-March, 2010, pp. 153-159.*

*This paper analyzes trends and magnitude changes in discharge of twelve gauging stations in the State of Michoacán, Mexico. Daily discharge data were fed to the RORA computer program for separating quick and base flow. Simple lineal regression and the Man-Kendall test evaluated discharge tendencies and the sine test computed the magnitude of change. From the gauging stations analyzed, 40% are having reduced flows and 16% are showing increased flows. The results provide an index of the climatic and anthropogenic factors that are controlling the production of discharge in rivers of the State of Michoacán.*

**Keywords:** *discharge changes, human pressure, watershed degradation.*

## Dirección institucional de los autores

*M.C. Humberto Hernández-Rodríguez*

Facultad de Ciencias Forestales  
Universidad Autónoma de Nuevo León  
Carretera Nacional, km 145  
67700 Linares, Nuevo León, México  
teléfono: + (52) (821) 2124 251

*Ph.D. José de Jesús Nívar-Cháidez*

Centro Interdisciplinario de Investigación para el  
Desarrollo Integral Regional (CIIDIR-IPN)  
Unidad Durango  
Calle Sigma sin número  
Fraccionamiento 20 de Noviembre II  
34220 Durango, Durango, México  
teléfono: + (52) (618) 8142 091  
jnavar@ipn.mx