

## **Reanálisis del índice de concentración de la precipitación diaria en la cuenca del Río Grande de Morelia**

### **Reanalysis of the daily precipitation concentration index in the Río Grande of Morelia basin**

Gerardo Núñez-González<sup>1</sup>, ORCID: <https://orcid.org/0000-0001-6274-5575>

<sup>1</sup>Universidad de Guadalajara, Centro Universitario de la Costa Sur, Departamento de Ingenierías, Jalisco, México, [gerardo.nunez@cucsur.udg.mx](mailto:gerardo.nunez@cucsur.udg.mx)

Autor para correspondencia: Gerardo Núñez-González, [gerardo.nunez@cucsur.udg.mx](mailto:gerardo.nunez@cucsur.udg.mx)

#### **Resumen**

El índice de concentración de la precipitación diaria es una herramienta útil para analizar la estructura estadística de la lluvia. Sin embargo, en su

empleo es necesario tener cuidado con los datos usados para su cálculo, ya que este índice puede ser sensible tanto a la ubicación temporal de los datos como a la longitud de los registros. Así, el objetivo consistió en un reanálisis del índice de concentración de la precipitación diaria (CI) en la cuenca del Río Grande de Morelia para determinar cómo afecta la ubicación temporal de los datos y la longitud de los registros a los valores del CI, además de analizar bajo tres condiciones diferentes el comportamiento del CI en dicha cuenca. Los resultados muestran que la ubicación temporal de los registros puede afectar el valor del CI aumentándolo si se analizan los últimos años disponibles o disminuyéndolo si se toman registros anteriores a 1980. En cuanto a la longitud de los registros, se encontró que el valor de este índice tiende a estabilizarse en la mayor parte de los casos estudiados para longitudes de registros mayores a 20 años. El comportamiento anual del CI está dentro de lo reportado en la literatura; por década y para el periodo de 30 años se observó una disminución en su variabilidad. Así, se recomienda que en estudios de este tipo se elija para los análisis un periodo de registros común y de longitud acorde con los objetivos perseguidos.

**Palabras clave:** concentración de la precipitación diaria, índice de concentración, CI, cuenca del Río Grande de Morelia.

## Abstract

The daily precipitation concentration index is a useful tool for the analysis of the statistical structure of rainfall. However, it is necessary to be careful

with the data used for its calculation since this index can be sensitive to both the temporal location of the data and the length of the records. Thus, the objective of this work consisted of a re-analysis of the daily precipitation concentration index (CI) in the Río Grande de Morelia basin to determine how the temporal location of the data and the length of the records affect the CI values. In addition to analyzing the behavior of the CI under three different conditions. The results show that the temporary location of the records can affect the value of the CI, increasing it if the last available years are analyzed or decreasing it if records before 1980 are taken. Regarding the length of the records, it was found that the value of this index tends to stabilize in most of the cases studied for record lengths greater than 20 years. The behavior of the CI at the annual level is within that reported in the literature, and at the decade level and for the 30-year, a decrease in its variability was observed. Therefore, it is recommended that in studies of this type, a common recording period be chosen for the analyzes and a length according to the objectives pursued.

**Keywords:** Daily precipitation concentration, concentration index, CI, Río Grande de Morelia basin.

Recibido: 08/09/2020

Aceptado: 28/11/2020

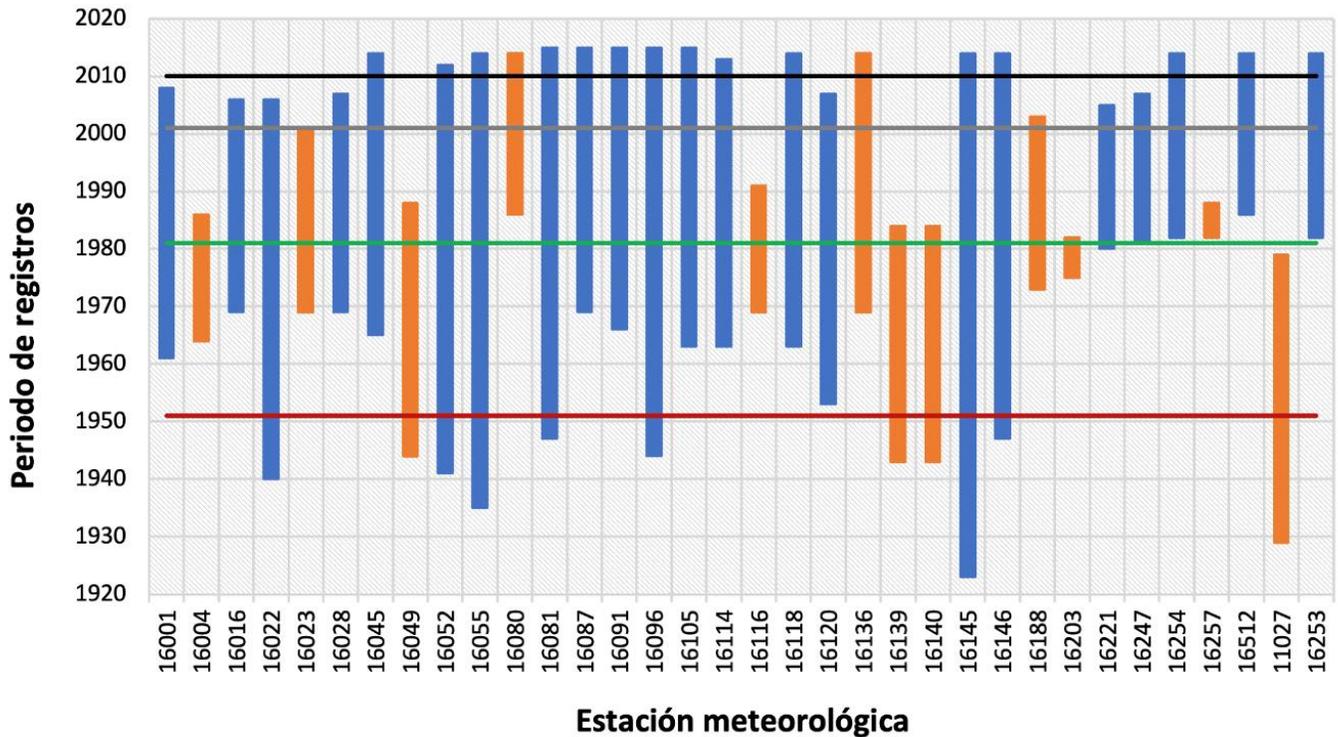
## Introducción

En los últimos años, el índice de concentración de la precipitación diaria (CI) propuesto por Martín-Vide (2004) se ha vuelto una herramienta popular para analizar la estructura estadística de las precipitaciones en diferentes partes del mundo, como puede constatarse en los trabajos de investigación de Benhamrouche *et al.* (2015); Patel y Shete (2015); Yeşilirmak y Atatanir (2016); Monjo y Martín-Vide (2016); Mayer, Marzol y Parreño (2017); Zubieta, Saavedra, Silva y Giraldez (2017); Llano (2018); Serrano-Notivoli *et al.* (2018); Vyshkvarkova, Voskresenskaya y Martín-Vide (2018); Zamani, Mirabbasi, Nazeri, Meshram y Ahmadi (2018); Lu *et al.* (2019); Meseguer-Ruiz, Ponce-Philimon, Guijarro y Sarricolea (2019); Sarricolea, Meseguer-Ruiz, Serrano-Notivoli, Soto y Martín-Vide (2019); Velez, Martín-Vide, Roye y Santaella (2019), y Núñez-González (2020), entre otros. La popularidad de este índice se debe, por un lado, a que es un índice fácil de calcular y, por el otro lado, a que puede ser interpretado de una manera sencilla con base en el comportamiento de la curva de Lorenz, la cual relaciona al porcentaje de días lluviosos con el porcentaje de precipitación observado en un sitio.

El interés por el estudio de la concentración de la precipitación se debe a la utilidad que este índice tiene para explorar riesgos asociados con eventos de precipitación extrema (Serrano-Notivoli *et al.*, 2018), pues

cuando la precipitación se concentra en unos pocos días, el riesgo para que ocurran fenómenos como inundaciones, sequías, erosión del suelo, etcétera, aumenta (Coscarelli & Caloiero, 2012; Zubieta *et al.*, 2017). En este sentido, Roblero-Hidalgo *et al.* (2018) propusieron el análisis del CI como una medida para evaluar la torrencialidad de las precipitaciones en la cuenca del Río Grande de Morelia, Michoacán, México, debido a que dicha cuenca se ha visto afectada en el pasado por caudales extraordinarios en sus afluentes (Roblero-Hidalgo *et al.*, 2018).

En su estudio, Roblero-Hidalgo *et al.* (2018) utilizaron los datos diarios de precipitación de 34 estaciones meteorológicas convencionales de las cuales algunas cuentan con registros entre 1923 y 2015. Sin embargo, no todas las estaciones tienen un periodo de registros común. Así, se tienen dos estaciones con un periodo de registro menor a 10 años entre las décadas de 1970 y 1980; siete estaciones que cubren un periodo de registro entre 20 y 30 años situado entre los decenios de 1960 a 1990, del 70 al 2000, y del 80 al 2010 principalmente. Se tienen cinco estaciones con registros entre 30 y 40 años con inicio en las décadas de 1970 y 1980; 10 estaciones con registros entre 40 y 50 años con inicio de los registros en 1929, 1943 y después de 1960; por último, 10 estaciones con registros mayores a 50 años (Figura 1).



**Figura 1.** Periodo de registro de las estaciones meteorológicas utilizadas en el trabajo de Roblero-Hidalgo *et al.* (2018). Nota: las estaciones que se presentan en color naranja son las estaciones descartadas en el presente estudio.

La diferencia observada en el tamaño de los registros y en su ubicación temporal puede afectar la comparación de los valores del índice de concentración entre las distintas estaciones. En particular, en lo referente a la ubicación de los registros, Benhamrouche y Martín-Vide (2012), en su trabajo titulado "Avances metodológicos en el análisis de la concentración diaria de la precipitación en la España peninsular", al

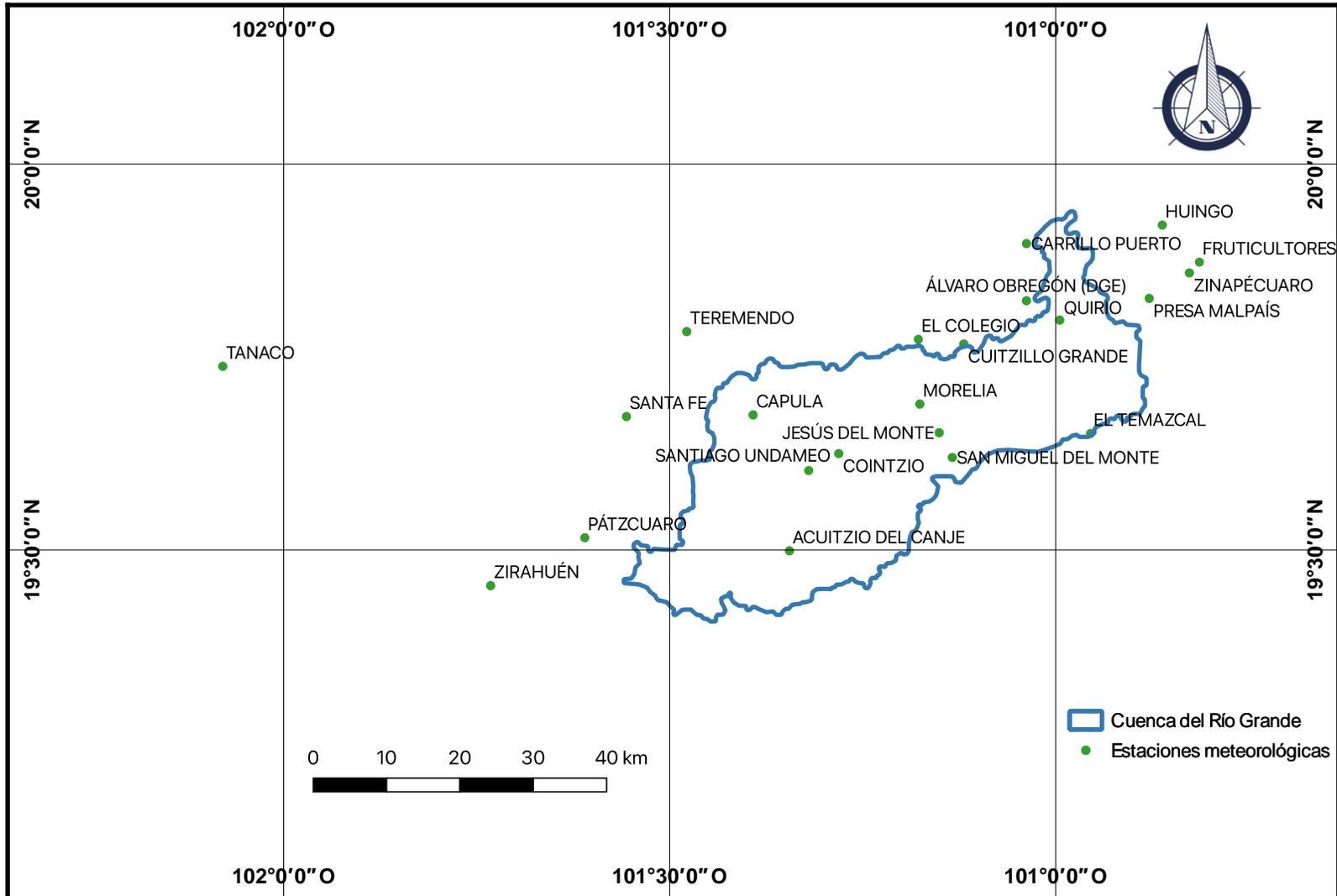
comparar los valores del CI obtenidos como resultado para los periodos 1951-1980 y 1981-2010 observaron un incremento en el valor del CI en más del 80 % de las estaciones, lo que sugiere la importancia de trabajar con periodos de registro común.

Sin embargo, en cuanto al efecto que tiene el tamaño de los registros en los valores del CI no se ha encontrado información en la literatura consultada. De esta manera, el objetivo del presente trabajo consiste en hacer un reanálisis del índice de concentración de la precipitación diaria en la cuenca del Río Grande de Morelia, con el propósito de profundizar en el comportamiento de la concentración de la precipitación, así como de averiguar de qué manera afecta la ubicación temporal de los datos y la longitud de los registros a los valores del CI, además de analizar para la mayor parte de las estaciones el comportamiento del índice de concentración de la precipitación diaria en la cuenca del Río Grande cuando éste se calcula año por año, para un periodo común de 10 años y para un periodo común de 30 años. Lo anterior con el objetivo de analizar el grado de variabilidad interanual del CI, además de comparar para periodos comunes de registros el comportamiento del índice de concentración diaria dentro de la cuenca del Río Grande de Morelia, la cual se caracteriza por presentar una variedad de climas que van desde los semifrío subhúmedo  $C(E)(w_2)(w)$  y templado subhúmedo  $C(w_2)(w)$  en la parte alta; templado subhúmedo  $C(w_1)(w)$  en la parte media, y templado  $C(w_0)(w)$  en la parte baja, lo que pudiera tener un efecto en el comportamiento del índice de concentración.

## Materiales y métodos

### Datos

Para el desarrollo del trabajo se decidió utilizar como base los datos diarios de precipitación de las 34 estaciones meteorológicas convencionales utilizadas por Roblero-Hidalgo *et al.* (2018). Sin embargo, debido a los objetivos del presente trabajo se decidió dejar fuera del estudio a las estaciones que contaban con un periodo de registro menor a 10 años, así como las estaciones cuyos registros finalizaban antes del año de 1990. En la Figura 1 se presentan los periodos de registro de las estaciones utilizadas por Roblero-Hidalgo *et al.* (2018). En dicha figura, las estaciones que están en color naranja son las que se descartaron para el desarrollo del presente trabajo; asimismo, en la Figura 2 se presenta el mapa de ubicación de las estaciones seleccionadas.



**Figura 2.** Ubicación de las estaciones meteorológicas utilizadas para el cálculo del índice de concentración de la precipitación.

Con el objetivo de verificar si en la zona de estudio el índice de concentración es sensible a la ubicación de los registros se decidió utilizar los datos de las estaciones 16052, 16055, 16081, 16096, 16145 y 16146,

las cuales cuentan con un periodo de registro común entre los años de 1950 y 2010 (Figura 1). Para calcular el CI, las series de datos de dichas estaciones se dividieron en dos subperiodos: 1951-1980 y 1981-2010. En el mismo sentido, para verificar la sensibilidad del índice de concentración a la longitud de los registros, a partir de las series de datos de las estaciones anteriormente mencionadas se construyeron series de diferente longitud para cada una de las estaciones. La primera serie se construyó con los datos del año 1951; la segunda serie con los datos de los años 1951 y 1952, y así, sucesivamente, se fue agregando un año a la nueva serie hasta llegar a la que contiene todos los datos para el periodo 1951-2010; posteriormente se repitió el proceso de construcción de las series, pero ahora comenzando a partir del último año de registros. Por tanto, la serie 61 se construyó con los registros del año 2010; la serie 62, con los datos de los años 2009 y 2010, y así, sucesivamente, se fue agregando un año a la nueva serie, como en el caso mencionado.

Por otro lado, con el propósito de conocer el comportamiento del índice de concentración en la cuenca del Río Grande de Morelia se decidió calcular el CI bajo tres condiciones diferentes. La primera consiste en calcular el CI año por año para el periodo de registros disponible usando los años con registros completos; la segunda, tomando en cuenta para el cálculo del CI el periodo de registro de 1981-2010; y la tercera, utilizando los datos de la década de 2001-2010. En la Figura 1 se pueden observar las estaciones que se emplearon en cada uno de los análisis mencionados. El cálculo del CI para diferentes periodos se realizó con el propósito de conocer cómo ha sido su comportamiento de manera histórica, al igual

que para tener una visión más certera de lo que se ha venido observando en la cuenca en los últimos años.

## Métodos

El cálculo del índice de concentración se realizó de acuerdo con la metodología propuesta por Martín-Vide (2004), en la cual se ajusta una función de la forma presentada en la Ecuación (1) entre la frecuencia acumulada de los días con lluvia y las cantidades de precipitación asociadas a dichas frecuencias:

$$y = axe^{bx} \quad (1)$$

donde  $a$  y  $b$  son constantes de regresión calculadas por el método de mínimos cuadrados.

De manera resumida, el procedimiento para llevar a cabo el ajuste de la curva consiste en eliminar de los registros de precipitación todos los valores iguales a cero; después los datos de precipitación se agrupan en clases de un milímetro, comenzando con los valores menores a un milímetro hasta el valor máximo registrado; una vez clasificados los

datos, se calculan las frecuencias absolutas de los días con lluvia y las cantidades de precipitación para cada clase; posteriormente se determinan las frecuencias acumuladas porcentuales para los días con lluvia y la cantidad de precipitación, las cuales, una vez graficadas, generan una curva de tipo exponencial, como la curva de Lorenz. Con las frecuencias acumuladas porcentuales se determina el valor de las constantes  $a$  y  $b$  de la Ecuación (1) con el método de los mínimos cuadrados, para lo cual Martín-Vide (2004) propone las siguientes ecuaciones:

$$\ln(a) = \frac{\sum X_i^2 \sum \ln Y_i + \sum X_i \sum X_i \ln X_i - \sum X_i^2 \sum \ln X_i - \sum X_i \sum X_i \ln Y_i}{N \sum X_i^2 - (\sum X_i)^2} \quad (2)$$

$$b = \frac{N \sum X_i \ln Y_i + \sum X_i \sum \ln X_i - N \sum X_i \ln X_i - \sum X_i \sum \ln Y_i}{N \sum X_i^2 - (\sum X_i)^2} \quad (3)$$

donde  $X_i$  es el porcentaje acumulado de días de lluvia;  $Y_i$ , el porcentaje acumulado de la cantidad de precipitación, y  $N$  es el número de eventos de precipitación. Una explicación paso a paso y ejemplos del proceso de cálculo se puede consultar en los trabajos de Martín-Vide (2004) y Roblero-Hidalgo *et al.* (2018), entre otros.

Una vez ajustada la ecuación mencionada anteriormente, se procede a calcular el área entre la curva de Lorenz y la línea de equidistribución utilizando la siguiente expresión:

$$A = 5000 - \int_0^{100} axe^{bx} dx \quad (4)$$

Por último, el índice de concentración de la precipitación se calcula como el cociente del área obtenida con la Ecuación (4), y el área del triángulo delimitado en el plano por la línea de equidistribución, a saber:

$$CI = \frac{A}{5\,000} \quad (5)$$

donde  $CI$  es el índice de concentración;  $A$ , el área comprendida entre la curva de Lorenz y la línea de equidistribución; y 5 000 es el área del triángulo delimitado en el plano por la línea de equidistribución.

Los resultados del índice de concentración se sometieron a un análisis estadístico descriptivo para conocer la tendencia y dispersión de los datos. Adicionalmente se analizó la normalidad de los resultados obtenidos para el CI en el periodo 1981-2010 de acuerdo con las pruebas de Shapiro-Wilk, Crammer-von Mises, Lilliefors (Kolmogorov-Smirnov) y Anderson-Darling (Thode, 2002). El uso de varias pruebas se debió al hecho de que la muestra de datos utilizada es pequeña. Los cálculos estadísticos y gráficos se realizaron a través de la plataforma estadística de código abierto R (R Core Team, 2013).

Finalmente, con el propósito de conocer la distribución espacial del índice de concentración dentro de la zona de estudio, se realizó una interpolación espacial con base en los resultados y haciendo uso del método de *splines* mediante el sistema de información geográfica de código abierto QGIS (QGIS Development Team, 2020).

## Resultados y discusión

En la Tabla 1 se presentan los resultados del índice de concentración para los periodos 1981-2010 y 2001-2010. Los resultados del CI para el periodo 1981-2010 variaron de 0.427 a 0.577, rango ligeramente menor al encontrado por Roblero-Hidalgo *et al.* (2018). La diferencia en el rango de valores puede atribuirse a la longitud de los registros utilizados para el cálculo del CI en ambos trabajos. A pesar de que el rango observado de valores en el índice de concentración para el periodo de 30 años es menor al reportado por Roblero-Hidalgo *et al.* (2018), en este trabajo se encontró que en siete de las estaciones analizadas el valor del CI para el periodo de 30 años fue ligeramente superior a lo señalado en el trabajo de investigación anteriormente mencionado, lo cual es atribuible a la naturaleza aleatoria de las precipitaciones.

**Tabla 1.** Índice de concentración para los periodos 1981-2010 y 2001-2010.

Clave	Nombre	CI 1981 - 2010			CI 2001 - 2010		
		<i>a</i>	<i>b</i>	CI	<i>a</i>	<i>b</i>	CI
<b>16001</b>	Acuitzio del Canje	0.0534	0.0291	0.545			
<b>16016</b>	Carrillo Puerto	0.0565	0.0284	0.545			
<b>16022</b>	Cointzio	0.0475	0.0303	0.555			
<b>16028</b>	Cuitzillo Grande	0.0638	0.0272	0.532			
<b>16045</b>	El Temazcal	0.0677	0.0269	0.515	0.0480	0.0301	0.557
<b>16052</b>	Huingo	0.0553	0.0287	0.544	0.0482	0.0300	0.559
<b>16055</b>	Jesús del Monte	0.1081	0.0223	0.459	0.0729	0.0260	0.514
<b>16081</b>	Morelia	0.0388	0.0322	0.577	0.0345	0.0333	0.589
<b>16087</b>	Pátzcuaro	0.0528	0.0292	0.547	0.0495	0.0299	0.551
<b>16091</b>	Álvaro Obregón (DGE)	0.0647	0.0271	0.530	0.0627	0.0274	0.533*
<b>16096</b>	Presa Malpaís	0.0489	0.0300	0.553	0.0493	0.0299	0.553*
<b>16105</b>	Quirio	0.0403	0.0319	0.571	0.0281	0.0354	0.603
<b>16114</b>	San Miguel del Monte	0.0676	0.0267	0.524	0.0712	0.0262	0.518+
<b>16118</b>	Santa Fe	0.1316	0.0205	0.427	0.1547	0.0195	0.375+
<b>16120</b>	Santiago Undameo	0.0637	0.0273	0.529			
<b>16145</b>	Zinapécuaro	0.0810	0.0250	0.500	0.0576	0.0283	0.540*
<b>16146</b>	Zirahuén	0.1016	0.0229	0.468	0.0799	0.0252	0.499+

<b>16221</b>	Fruticultores	0.0547	0.0291	0.534			
<b>16247</b>	Capula	0.0618	0.0277	0.529			
<b>16254</b>	Teremendo	0.0746	0.0259	0.506	0.0794	0.0251	0.506
<b>16512</b>	El Colegio	0.0417	0.0315	0.570	0.0403	0.0318	0.574*
<b>16253</b>	Tanaco	0.0952	0.0235	0.477			

Nota: debido a la disponibilidad de datos, los valores con (+) se calcularon con un periodo de ocho años y los valores con (\*) se calcularon con un periodo de nueve años.

Los valores del índice de concentración considerados por Roblero-Hidalgo *et al.* (2018) como torrenciales y altamente torrenciales ( $CI > 0.54$ ) durante el periodo 1981-2010 se observaron principalmente en las regiones norte y noroeste (estaciones 16016, 16052, 16096 y 16105), así como en el centro de la cuenca en las estaciones 16022, 16081 y 16254, y en menor medida en la zona sur y suroeste de la cuenca en las estaciones 16001 y 16087, respectivamente. La distribución de las concentraciones más altas pudiera resultar importante en lo referente a la prevención de riesgos, ya que una fuerte concentración en la zona norte pudiera generar problemas en las partes media (zona donde se encuentra la ciudad de Morelia) y baja de la cuenca.

El cálculo del índice de concentración para el periodo 2001-2010 sólo fue posible en 14 de las 22 estaciones utilizadas en este trabajo debido a que en el resto no se tenían registros para ese periodo; incluso entre las 14 estaciones utilizadas hay cuatro estaciones que sólo tuvieron

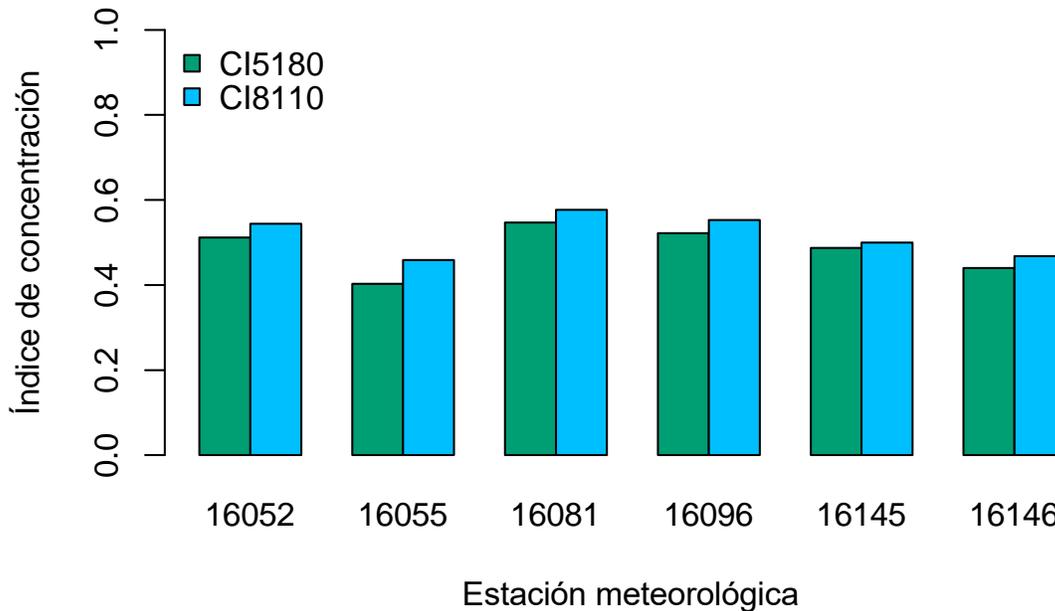
registros para nueve años y otras dos estaciones con registros sólo para ocho años. La falta de registros no es un problema nuevo. En el caso de México, ya ha sido señalado por Gay-García, Estrada-Porrua y Martínez (2010), y en el ámbito internacional ha sido mencionado por Cortesi, Gonzalez-Hidalgo, Brunetti y Martín-Vide (2012), Llano (2018), y Serrano-Notivoli *et al.* (2018).

El rango de valores observados para el periodo 2001-2010 estuvo entre 0.375 y 0.603, rango mayor al encontrado en este trabajo para el periodo 1981-2010 y también un poco mayor al rango observado por Roblero-Hidalgo *et al.* (2018) en la misma zona de estudio. Cabe resaltar que el aumento en el rango dentro del cual oscilan los valores del índice de concentración se dio hacia el límite inferior del mismo, aunque esto se debió a un solo valor por debajo de 0.499, que se presentó en la estación meteorológica 16118. Descartando dicho valor, el rango de valores para el CI estaría muy apegado al encontrado por Roblero-Hidalgo *et al.* (2018).

Por otro lado, en 11 de las 14 estaciones analizadas para el periodo 2001-2010 se encontraron valores del índice de concentración mayores a los observados para el periodo 1981-2010; en el mismo sentido, 10 de las 14 estaciones mostraron valores mayores a los encontrados por Roblero-Hidalgo *et al.* (2018), lo que sugiere que en los últimos años la concentración de la precipitación en algunas partes de la cuenca se ha incrementado, aunque dicha concentración todavía se encuentra por debajo de lo reportado para el estado de Jalisco por Núñez-González (2020).

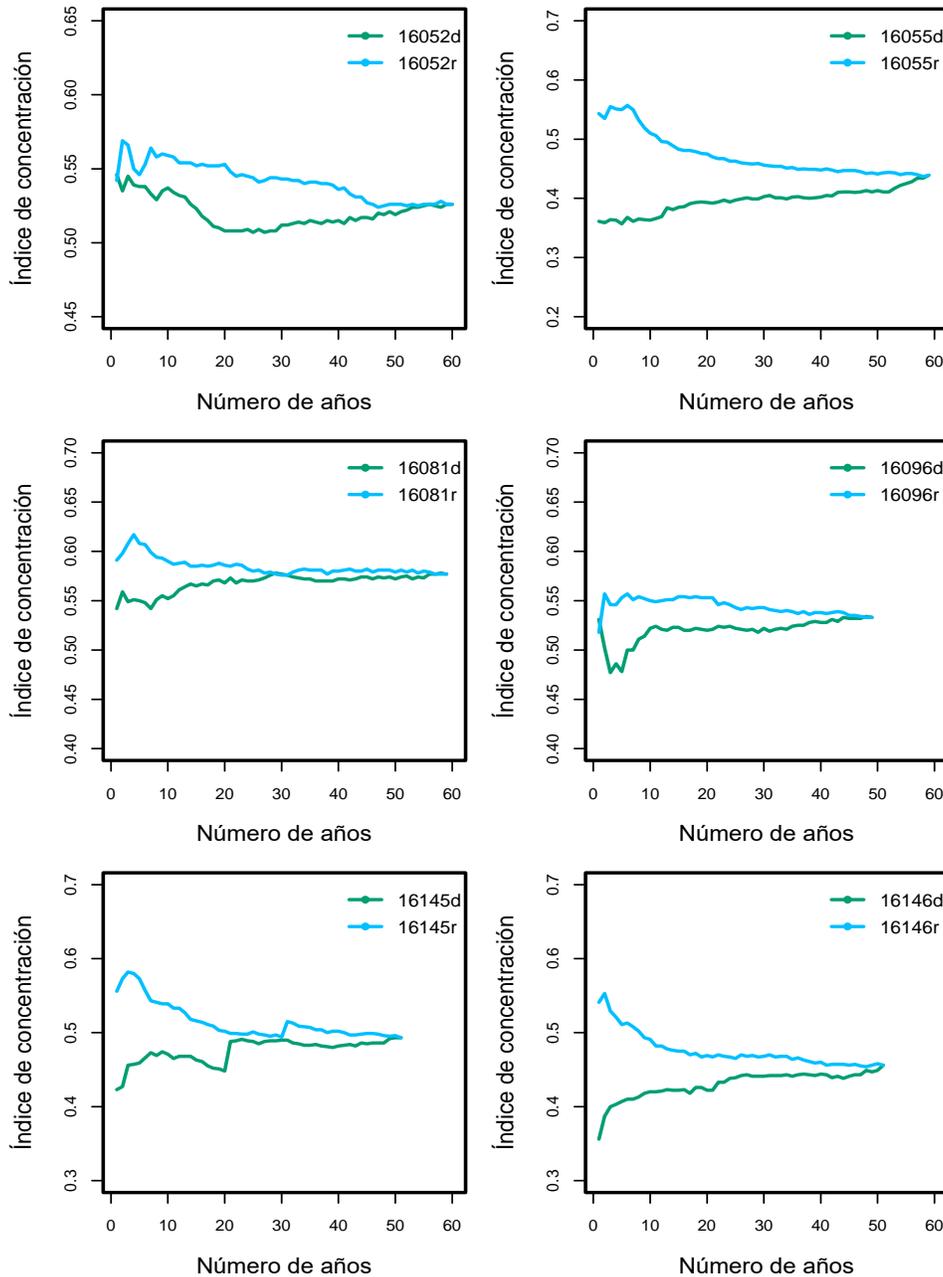
## **Sensibilidad del CI a la ubicación de los datos y a la longitud de los registros**

La comparación de la concentración de la precipitación puede verse afectada si no se toma en cuenta un periodo de registros común en las estaciones con las que se está trabajando. En la Figura 3 se presentan los resultados del índice de concentración calculado para los subperiodos 1951-1980 y 1981-2010 de las seis estaciones con los registros comunes más largos en la zona de estudio. En esta figura se puede apreciar que en dichas estaciones el valor del CI fue más alto para el segundo periodo de registros (1981-2010), coincidiendo con los resultados de Benhamrouche y Martín-Vide (2012). Las diferencias encontradas entre los dos subperiodos van desde el 3 % en el caso de la estación meteorológica 16145 hasta el 14 % en el caso de la estación 16055. Si bien las diferencias pueden parecer pequeñas, no deben ser descartadas, ya que pueden llegar a ser una señal de que en los últimos años la concentración de la precipitación en la cuenca del Río Grande de Morelia ha aumentado.



**Figura 3.** Sensibilidad del índice de concentración a la ubicación de los registros.

Por otro lado, las diferencias observadas en el CI entre los dos subperiodos analizados refuerzan la hipótesis de que la ubicación de los registros puede llegar a ser un factor importante al momento de calcular el índice de concentración de la precipitación diaria, sobre todo si el objetivo es comparar los resultados entre estaciones. En ese sentido, en la Figura 4 se puede observar el efecto que produce la longitud de los registros en los valores calculados del CI a partir de los datos de las seis estaciones con los periodos de registro mayores.



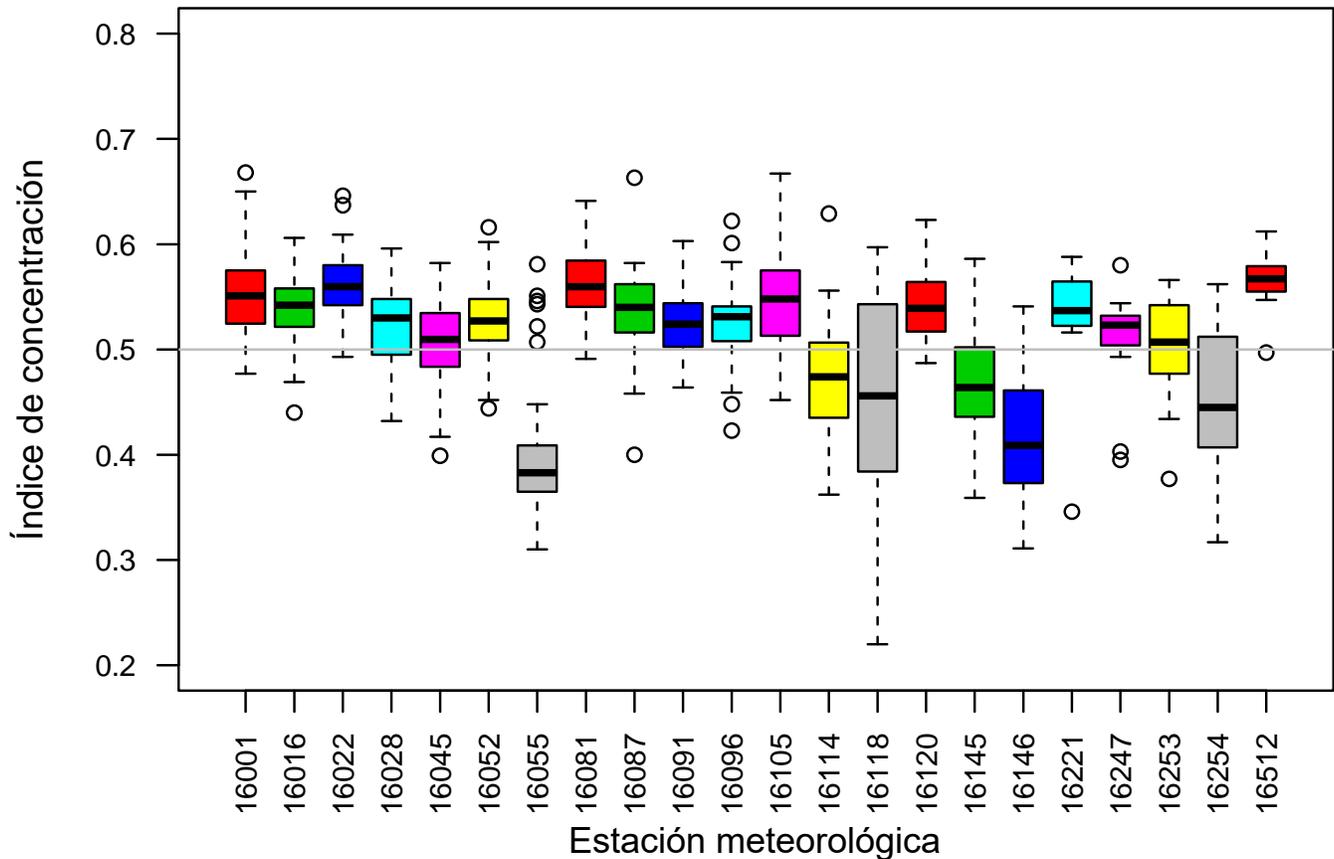
**Figura 4.** Sensibilidad del índice de concentración en función de la longitud de los registros. Nota: la letra d después del nombre de la

estación indica que las series se construyeron de inicio a fin y la letra r del fin al inicio.

En cinco de las seis estaciones presentadas en la Figura 4 se puede observar que el nivel de variabilidad en el índice de concentración es mayor cuando la longitud de los registros es menor a 20 años; para longitudes de registros mayores a 20 años, el valor del CI tiende a estabilizarse. La excepción a este comportamiento se da en la estación 16052, donde incluso para registros con longitudes mayores a 20 años se siguen presentando cambios importantes en los valores del CI, es decir, no se observa una rápida estabilización de sus valores. Lo anterior puede ser importante cuando se quieren comparar los valores del CI entre estaciones con más y menos de 20 años de registros. Aunque los resultados señalados corresponden a un bajo número de estaciones, están en concordancia con las recomendaciones de la Organización Meteorológica Mundial en cuanto a la longitud de los registros utilizados en los análisis con datos climáticos (OMM, 2007), la cual es deseable que no sea inferior a 30 años de registros.

## **Comportamiento del índice de concentración anual, y para los periodos 1981-2010 y 2001-2010**

Con los datos de los años completos de registros se calculó el índice de concentración anual para cada estación, con el propósito de conocer la variabilidad temporal de dicho índice. Los resultados obtenidos se presentan en la Figura 5. En esta figura se observa que casi tres cuartas partes de las estaciones (72.7 %) presentan en su mayoría valores del CI superiores a 0.5, lo que de acuerdo con los trabajos de Martín-Vide (2004), Zubieta *et al.* (2017), y Núñez-Gonzalez (2020), entre otros, indicaría que alrededor del 60 % de la lluvia se concentra en el 25 % de los días más lluviosos. Por el contrario, las estaciones 16055, 16114, 16118, 16145, 16146 y 16254 presentan en su mayoría valores del índice de concentración menores a 0.5, lo que sería producto de una distribución más uniforme de la lluvia a lo largo del año en los sitios donde se encuentran ubicadas dichas estaciones meteorológicas.

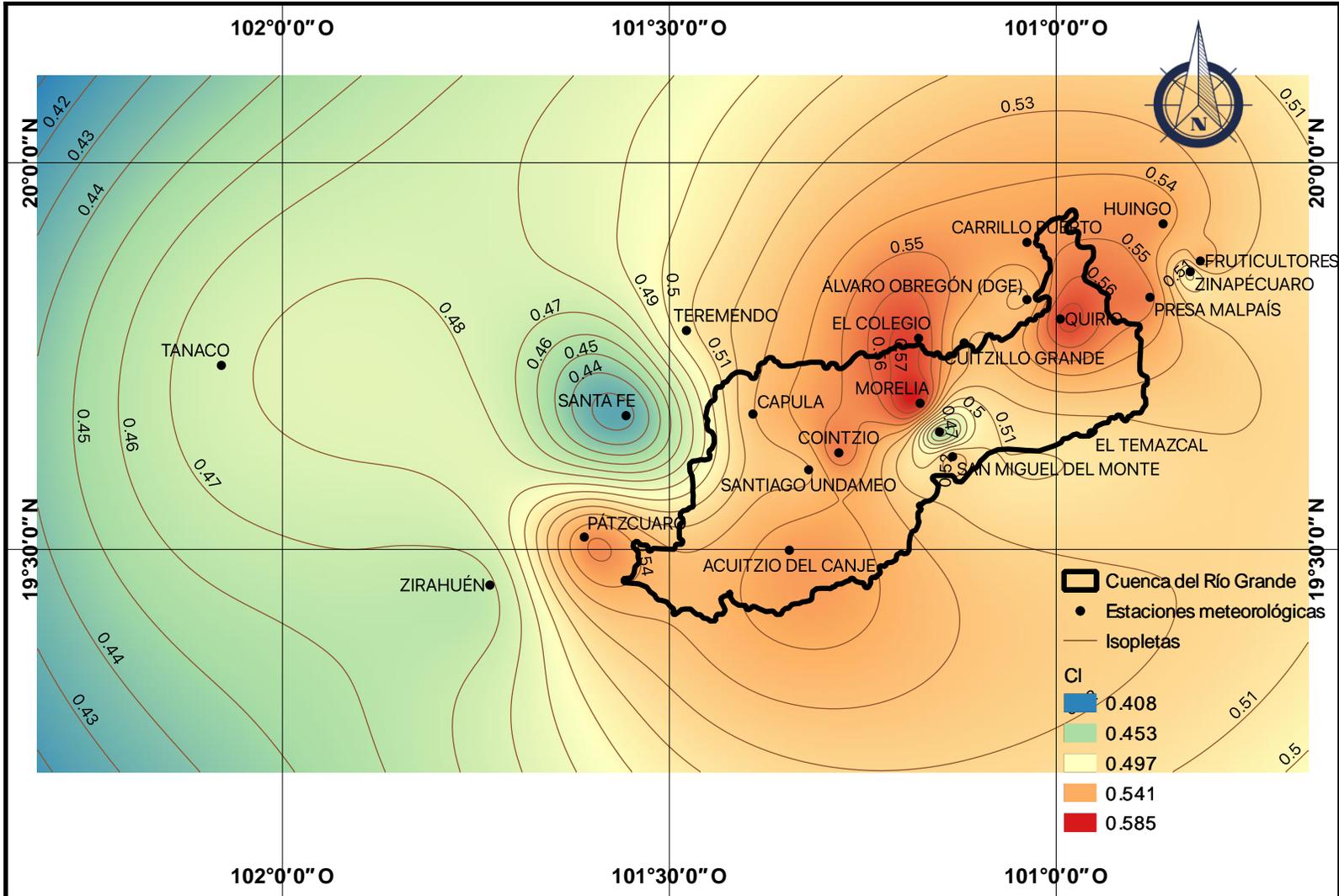


**Figura 5.** Distribución del índice de concentración anual.

El promedio de los valores anuales del índice de concentración osciló entre 0.395 y 0.567, lo que sitúa a la concentración de la precipitación en la zona de estudio entre moderada y moderada-alta (Núñez-González, 2020). De hecho, en la mitad de las estaciones se observaron valores del CI superiores a 0.6, aunque los valores de este tipo se observaron sólo de forma esporádica. En cuanto a la dispersión de los valores del CI de acuerdo con el rango intercuartílico, se observa una alta concentración de

valores alrededor de la mediana, con excepción de las estaciones 16118, 16145, 16146 y 16254.

Por otro lado, en la Figura 6 se presenta la distribución espacial del índice de concentración en la zona de estudio, la cual fue obtenida a través de la interpolación de los valores del índice de concentración de las 22 estaciones. Para una lectura más clara de la distribución del CI se generaron las isopletas con una separación de 0.01. En la distribución presentada en esta figura se puede notar un comportamiento muy similar al encontrado por Roblero-Hidalgo *et al.* (2018), en el sentido de que las zonas con los valores más altos del índice de concentración se presentan en la parte media y alta de la cuenca, y los valores de concentración más bajos se dan en la parte baja de la misma.



**Figura 6.** Distribución espacial del índice de concentración.

La distribución del CI mencionada anteriormente puede estar relacionada con los tipos de clima presentes en la zona de estudio, ya que hacia la parte alta de la cuenca se tiene la presencia de climas tipo

semifrío subhúmedo  $C(E)(w_2)(w)$  y templado subhúmedo  $C(w_2)(w)$ ; mientras que en la parte media se tiene la presencia de clima templado subhúmedo  $C(w_1)(w)$ , y en la parte baja de la cuenca es común el clima templado  $C(w_0)(w)$ .

La coincidencia en la distribución espacial del índice de concentración observado en los dos trabajos sugiere una marcada distribución geográfica de la precipitación en la zona de estudio. Además, la distribución de los valores más altos del CI podría ser parte de las causas que en el pasado reciente han ocasionado inundaciones en la ciudad de Morelia, la cual se encuentra ubicada en la parte media de la cuenca y por ella atraviesa el Río Grande, cauce principal de la cuenca.

Tomando en cuenta que el rango de valores observados para el CI del periodo 1981-2010 fue más bajo al encontrado por Roblero-Hidalgo *et al.* (2018), se decidió verificar si aún con las 22 estaciones utilizadas en este trabajo se podría considerar que los valores siguen una distribución aproximadamente normal; esto, con el propósito de redefinir la clasificación de la torrencialidad en la zona de estudio. Para ello se aplicaron las pruebas de normalidad descritas en la metodología de este trabajo y se encontró en todas ellas que no existe evidencia suficiente para rechazar la hipótesis nula a un nivel de significancia del 5 %, la cual establece que los datos siguen una distribución normal.

Una vez verificado que se puede considerar que los datos de las 22 estaciones siguen una distribución aproximadamente normal, se procedió a definir los cuatro niveles de torrencialidad siguiendo la metodología

utilizada por Roblero-Hidalgo *et al.* (2018), la cual se basa en los cuantiles 0, 25, 50, 75 y 100 % para definir los límites de las clases. Los resultados obtenidos se presentan en la Tabla 2, donde se hace una comparativa con los resultados de los investigadores anteriormente mencionados. Las diferencias observadas, aunque parecen pequeñas, de 1 a 5 centésimas del valor del CI, pudieran llegar a ser importantes debido a que el rango de variación general de dicho índice es pequeño: de 0.427 a 0.577.

**Tabla 2.** Clasificación del grado de torrencialidad de la cuenca.

<b>Índice de concentración de Roblero-Hidalgo <i>et al.</i> (2018)</b>	<b>Grado de torrencialidad</b>	<b>Índice de concentración, periodo 1981-2010</b>
<b>0.476-0.515</b>	Bajo torrencial	0.427-0.508
<b>0.515-0.538</b>	Medio torrencial	0.508-0.531
<b>0.538-0.560</b>	Torrencial	0.531-0.547
<b>0.560-0.607</b>	Altamente torrencial	0.547-0.577

## Conclusiones

El índice de concentración de la precipitación diaria es una herramienta útil para analizar la estructura estadística de la lluvia en diferentes sitios, así como para explorar la posibilidad de riesgos asociados con eventos extremos de precipitación. Sin embargo, en su utilización es necesario tener cuidado con los datos empleados para su cálculo, ya que este índice puede ser sensible tanto a la ubicación temporal de los datos como a la longitud de los registros. Los resultados obtenidos con base en datos con periodos de registro diferentes pueden complicar las comparaciones, ya que en muchos casos los resultados están influenciados por condiciones climáticas particulares; por ejemplo, en los últimos años pudieran incidir los efectos del cambio climático.

Por otro lado, la longitud de los registros también puede afectar a los valores del índice de concentración, ya que este índice tiende a estabilizarse en periodos mayores a 20 o 30 años. En ese sentido, los resultados presentados muestran que cuando se calcula el índice de concentración anual, el grado de variabilidad es mayor que cuando se calcula para periodos de 10 y 30 años, respectivamente.

Los valores obtenidos para el índice de concentración están dentro de los rangos reportados en la literatura tanto a nivel nacional como a nivel internacional. Además, estos valores pueden clasificarse para definir el grado de torrencialidad que puede llegar a tener la precipitación dentro de la cuenca.

Por otro lado, la distribución espacial de la concentración de la precipitación puede ayudar a explicar parte de las causas que han generado los problemas de inundaciones que se han venido registrando en los últimos años en la ciudad de Morelia, Michoacán, México.

## Referencias

- Benhamrouche, A., & Martín-Vide, J. (2012). Avances metodológicos en el análisis de la concentración diaria de la precipitación en la España peninsular. *Anales de Geografía*, 11-27. Recuperado de [http://dx.doi.org/10.5209/rev\\_AGUC.2012.v32.n1.39306](http://dx.doi.org/10.5209/rev_AGUC.2012.v32.n1.39306)
- Benhamrouche, A., Boucherf, D., Hamadache, R., Bendahmane, L., Martín-Vide, J., & Teixeira, N. J. (2015). Spatial distribution of the daily precipitation concentration index in Algeria. *Natural Hazards and Earth System Sciences*. DOI: 10.5194/nhess-15-617-2015
- Cortesi, N., Gonzalez-Hidalgo, J., Brunetti, M., & Martín-Vide, J. (2012). Daily precipitation concentration across Europe 1971-2010. *Natural Hazards and Earth System Science*. DOI: 10.5194/nhess-12-2799-2012
- Coscarelli, R., & Caloiero, T. (2012). Analysis of daily and monthly rainfall concentration in Southern Italy (Calabria region). *Journal of Hydrology*. DOI: 10.1016/j.jhydrol.2011.11.047
- Gay-García, C., Estrada-Porrua, F., & Martínez, B. (2010). Cambio climático y estadística oficial. *Realidad, Datos y Espacio: Revista*

*Internacional de Estadística y Geografía*. Recuperado de <https://rde.inegi.org.mx/index.php/2010/11/10/cambio-climatico-y-estadistica-oficial/>

Llano, M. P. (2018). Spatial distribution of the daily rainfall concentration index in Argentina: Comparison with other countries. *Theoretical and Applied Climatology*. DOI 10.1007/s00704-017-2236-0

Lu, Y., Jiang, S., Ren, L., Zhang, L., Wang, M., Liu, R., & Wei, L. (2019). Spatial and temporal variability in precipitation concentration over mainland China. *Water*. DOI: 10.3390/w11050881

Martín-Vide, J. (2004). Spatial distribution of a daily precipitation concentration index in peninsular Spain. *International Journal of Climatology*. DOI: 10.1002/joc.1030

Mayer, P., Marzol, M. V., & Parreño, J. M. (2017). Precipitation trends and a daily precipitation concentration index for the Mid-Eastern Atlantic (Canary Islands, Spain). *Cuadernos de Investigación Geográfica*. DOI: <http://doi.org/10.18172/cig.3095>

Meseguer-Ruiz, O., Ponce-Philimon, P., Guijarro, J., & Sarricolea, P. (2019). Spatial distribution and trends of different precipitation variability indices based on daily data in Northern Chile between 1966 and 2015. *International Journal of Climatology*. Recuperado de <https://doi.org/10.1002/joc.6089>

Monjo, R., & Martín-Vide, J. (2016). Daily precipitation concentration around the world according to several indices. *International Journal of Climatology*. DOI: 10.1002/joc.4596

- Núñez-Gonzalez, G. (2020). Comparison of the behavior of the precipitation concentration index on global and local scale. *Theoretical and Applied Climatology*. Recuperado de <https://doi.org/10.1007/s00704-019-02996-5>
- OMM, Organización Meteorológica Mundial. (2007). *The role of climatological normals in a changing climate*. Ginebra, Suiza: Organización Meteorológica Mundial. Recuperado de [https://library.wmo.int/doc\\_num.php?explnum\\_id=4546](https://library.wmo.int/doc_num.php?explnum_id=4546)
- Patel, N. R., & Shete, D. T. (2015). Analyzing precipitation using concentration indices for North Gujarat Agro Climatic Zone, India. *Aquatic Procedia*. DOI:10.1016/j.aqpro.2015.02.115
- QGIS Development Team. (2020). *QGIS Geographic Information System*. Open Source Geospatial Foundation. Recuperado de <https://www.qgis.org/>
- R Core Team. (2013). *R: A language and environment for statistical computing*. Viena, Austria: R Foundation for Statistical Computing.
- Roblero-Hidalgo, R., Chavez-Morales, J., Ibañez-Castillo, L. A., Palacios-Velez, O. L., Quevedo-Nolasco, A., & Gonzalez-Camacho, J. M. (2018). Índice de concentración de la precipitación diaria en la cuenca del Río Grande de Morelia. *Tecnología y ciencias del agua*. DOI: 10.24850/j-tyca-2018-05-07
- Sarricolea, P., Meseguer-Ruiz, O., Serrano-Notivoli, R., Soto, M., & Martín-Vide, J. (2019). Trends of daily precipitation concentration

- in Central-Southern Chile. *Atmospheric Research*. Recuperado de <https://doi.org/10.1016/j.atmosres.2018.09.005>
- Serrano-Notivoli, R., Martín-Vide, J., Saz, M. A., Longares, L. A., Begueria, S., Sarricolea, P.,..., & De-Luis, M. (2018). Spatio-temporal variability of daily precipitation concentration in Spain based on a high-resolution gridded data set. *International Journal of Climatology*. Recuperado de <https://doi.org/10.1002/joc.5387>
- Thode, H. C. (2002). *Testing for normality*. New York: CRC Press.
- Velez, A., Martín-Vide, J., Roye, D., & Santaella, O. (2019). Spatial analysis of daily precipitation concentration in Puerto Rico. *Theoretical and Applied Climatology*. Recuperado de <https://doi.org/10.1007/s00704-018-2550-1>
- Vyshkvarkova, E., Voskresenskaya, E., & Martín-Vide, J. (2018). Spatial distribution of the daily precipitation concentration index in Southern Russia. *Atmospheric Research*. Recuperado de <https://doi.org/10.1016/j.atmosres.2017.12.003>
- Yeşilirmak, E., & Atatanir, L. (2016). Spatiotemporal variability of precipitation concentration in western Turkey. *Natural Hazards*. DOI: 101007/s11069-015-2102-2
- Zamani, R., Mirabbasi, R., Nazeri, M., Meshram, S. G., & Ahmadi, F. (2018). Spatio-temporal analysis of daily, seasonal and annual precipitation concentration in Jharkhand state, India. *Stochastic Environmental Research and Risk Assessment*. Recuperado de <https://doi.org/10.1007/s00477-017-1447-3>

Zubieta, R., Saavedra, M., Silva, Y., & Giraldez, L. (2017). Spatial analysis and temporal trends of daily precipitation concentration in the Mantaro River basin: Central Andes Peru. *Stochastic Environmental Research and Risk Assessment*. DOI: 10.1007/s00477-016-1235-5