

## Comparación entre siete capas climáticas digitales para identificar áreas con alta precipitación anual en México (al menos 1 500 mm en promedio)

### *Comparison between seven digital climate layers to identify areas with high annual precipitation in Mexico (at least 1 500 mm on average)*

Armando Rincón-Gutiérrez,\* Martin Ricker\*\* y Jean-François Mas\*\*\*

Recibido: 24/08/2024. Aceptado: 22/11/2023. Publicado: 01/04/2024.

**Resumen.** El modelaje espacial de la precipitación es fundamental para entender la distribución de la vegetación silvestre, el crecimiento de las plantas y las consecuencias del cambio climático. Aquí comparamos, para el territorio continental de México, la estimación de alta precipitación anual ( $\geq 1\ 500$  mm en promedio) de siete capas climáticas digitales disponibles en internet. ¿Es relevante con qué capa se identifican las áreas con alta precipitación? ¿Es recomendable usar una capa de precipitación elaborada con datos satelitales, en lugar de pluviómetros terrestres? Resultó que hay enormes diferencias entre las estimaciones de las siete capas digitales: la superficie con promedios de precipitación anual  $\geq 1\ 500$  mm varía, según la capa seleccionada, entre  $143\ 964\ \text{km}^2$  (“Cuervo”) y  $232\ 439\ \text{km}^2$  (“Satelital”), o de 7.4% a 11.9% de la superficie terrestre de México. La segunda superficie es 1.6 veces la primera. La superficie total, donde al menos una de las siete capas estima un promedio de precipitación anual  $\geq 1\ 500$  mm, es de  $287\ 042\ \text{km}^2$  (14.7% de la superficie de México). El coeficiente de variación para la precipitación anual estimada entre las siete capas varía de 1.8 a 60.9%. La categoría con un coeficiente de variación relativamente bajo abarca 74.7% de los  $287\ 042\ \text{km}^2$ , la categoría intermedia 24.1%, y la

que tiene mayor variación 1.2%. Todas las capas, excepto la “Satelital”, se basan en los datos de la Comisión Nacional del Agua (CONAGUA). Para ninguna capa es posible rastrear cuáles estaciones climatológicas se usaron para su elaboración, y solo para algunas capas se indica el número de estaciones utilizadas. Otras limitaciones para el análisis de las capas fueron la imposibilidad de encontrar la siguiente información: ¿cuáles correcciones estadísticas se efectuaron a los datos crudos? ¿Cómo se manejaron los datos faltantes sobre precipitación (que son comunes en los datos de la CONAGUA)? ¿Cuáles son las especificaciones precisas para la metodología que se empleó para la interpolación espacial? ¿Cuáles factores ambientales se tomaron en cuenta? ¿Cuáles parámetros de exactitud estadística se pueden reportar? Por otra parte, utilizamos 504 estaciones climatológicas de la CONAGUA donde, para los años de 1951 a 2010 (o dos periodos de “normales climatológicas” de 30 años), se habían medido en promedio  $\geq 1\ 500$  mm. Tomando en cuenta los datos faltantes, las 504 estaciones climatológicas cubrieron, en promedio, solo 32.7 años para el intervalo de 60 años. Para los datos de las estaciones climatológicas tampoco encontramos información metodológica adecuada: ¿cuáles instrumentos de medición se emplearon y qué

\* Posgrado en Ciencias Biológicas, Instituto de Biología, Universidad Nacional Autónoma de México. Ciudad Universitaria, Coyoacán, Ciudad de México, 04510, México. ORCID: <https://orcid.org/0009-0009-7981-0316>. Email: [arg07@yahoo.com](mailto:arg07@yahoo.com)

\*\* Departamento de Botánica, Instituto de Biología, Universidad Nacional Autónoma de México. Ciudad Universitaria, Coyoacán, Ciudad de México, 04510, México. ORCID: <https://orcid.org/0000-0002-9814-113X>. Email: [mricker@ib.unam.mx](mailto:mricker@ib.unam.mx). Autor de correspondencia.

\*\*\* Laboratorio de Análisis Espacial, Centro de Investigaciones en Geografía Ambiental, Universidad Nacional Autónoma de México. Antigua Carretera a Pátzcuaro 8701, colonia Ex-Hacienda de San José de La Huerta, Morelia, 58190, Michoacán, México. ORCID: [orcid.org/0000-0002-6138-9879](https://orcid.org/0000-0002-6138-9879). Email: [jfmas@ciga.unam.mx](mailto:jfmas@ciga.unam.mx)

exactitud tenían? ¿A qué se debe el gran número de datos faltantes? ¿Hubo algún proceso de corrección y mejora de los datos? Analizamos las diferencias entre la precipitación medida en las 504 estaciones climatológicas y la estimada por la capa, determinando el promedio (“sesgo relativo”) y el intervalo entre los cuantiles de 10% y 90% de las diferencias (“dispersión 1”). La capa “Satelital” presentó el mayor sesgo relativo (-481 mm) y la mayor dispersión (1707 mm), mientras que “García” tenía el menor sesgo relativo (-23 mm) y “UNIATMOS” la menor dispersión (781 mm). Los promedios de las diferencias absolutas (“dispersión 2”), según la capa de 226 a 630 mm, también fueron altos. La situación de grandes inconsistencias entre las capas resultó similar en 110 525 sitios ubicados equidistantes entre pares de las estaciones. En estos sitios, las estimaciones de precipitación por las capas resultaron de interpolar datos entre estaciones climatológicas. El extremo fue en un sitio, donde una capa estimó una precipitación de 886 mm y la otra de 4929 mm, 5.6 veces el primer valor. La gran variación en la precipitación estimada por las capas se explicó de manera considerable por la heterogeneidad topográfica en un círculo de 1 km diámetro alrededor de las 504 estaciones. Como información suplementaria, proporcionamos los vínculos a dos archivos en Excel con los datos de precipitación anual de la CONAGUA, y las estimaciones de las capas en los sitios de las estaciones. En conclusión, sí es relevante con cuál de las siete capas se identifican áreas con alta precipitación, y una capa basada exclusivamente en datos satelitales (todavía) no es recomendable. La capa “UNIATMOS” destacó aquí con los mejores parámetros en comparación. De cualquier forma, la estimación espacial de precipitación anual alta en México presenta todavía grandes problemas de exactitud, lo que da como resultado tres recomendaciones. Primero, sería importante mejorar la base científica de datos empíricos de precipitación y otras variables climáticas para México, con menos datos faltantes en el futuro, con la descripción de los métodos e indicadores de calidad, y en lo posible con un mayor número de estaciones climáticas en regiones con alta precipitación; segundo, se deberían incluir métodos reproducibles en la descripción de las capas climáticas, y tercero, sería recomendable modelar una capa específica para precipitación alta en la superficie correspondiente, estimada aquí en 14.7% de la superficie de México, donde se tome en cuenta a detalle la topografía.

**Palabras claves:** datos faltantes, estaciones climatológicas, inconsistencia, satélite climatológico, Sistema de Información Geográfica.

**Abstract.** Spatial modeling of precipitation is fundamental to understand the distribution of natural vegetation, plant growth, and the consequences of climate change. Here we compare for mainland Mexico the estimates of high annual precipitation ( $\geq 1\,500$  mm on average) from seven digital climate layers, which are available from the Internet. Is it relevant with which layer the areas with high precipitation are identified? Is it advisable to use a precipitation layer elaborated with satellite data, instead of ground-based rain

gauges? It turned out that there are huge differences among the estimates of the seven digital layers: The area with average annual precipitation  $\geq 1\,500$  mm varies according to the selected layer between 143 964 km<sup>2</sup> (“Cuervo”) and 232 439 km<sup>2</sup> (“Satelital”), or 7.4% to 11.9% of Mexico’s land area. The latter area is 1.6 times the former. The total area, where at least one of the seven layers estimates an average annual precipitation  $\geq 1\,500$  mm, is 287 042 km<sup>2</sup> (14.7% of Mexico’s land area). The coefficient of variation for the estimated annual precipitation among the seven layers varies from 1.8 to 60.9%. The category with a relatively low coefficient of variation covers 74.7% of the 287 042 km<sup>2</sup>, the intermediate category 24.1%, and the one with the highest variation 1.2%. All layers, except “Satellite”, are based on data from Mexico’s National Water Commission (CONAGUA). For no layer is it possible to trace which climatological stations were used for its elaboration, and only for some layers the number of used stations is indicated. Other limitations for the analysis of the layers were that we could not find the following information: What statistical corrections were made to the raw data? How were missing precipitation data (which are common in the data from the CONAGUA) handled? What are the precise specifications for the methodology used for spatial interpolation? What environmental factors were taken into account? What parameters of statistical accuracy can be reported? On the other hand, we used 504 climatological stations from CONAGUA, where for the years 1951 to 2010 (or two 30-year periods of climatological normals) an average of  $\geq 1\,500$  mm had been measured. Taking into account the missing data, the 504 climatological stations covered on average only 32.7 years of this 60-year interval. For the data from the climatological stations, we also did not find adequate methodological information: Which measuring instruments were used, and how accurate were they? What is the reason for the large number of missing data? Was there any process of correction and improvement of the data? We analyzed the differences between the precipitation measured at the 504 climatological stations and that estimated by the layer, determining the average (“relative bias”) and the interval between the 10% and 90% quantiles of the differences (“dispersion 1”). The “Satellite” layer had the largest bias (-481 mm) and the largest dispersion (1 707 mm), while “García” had the smallest relative bias (-23 mm) and “UNIATMOS” had the smallest dispersion (781 mm). The averages of the absolute differences (“dispersion 2”), according to the layer from 226 to 630 mm, were also high. The situation of large inconsistencies among layers was similar at 110 525 sites located equidistant between pairs of stations. At these sites, the precipitation estimates of the layers resulted from interpolating data between climatological stations. The extreme was at a site, where one layer estimated 886 mm and the other 4 929 mm of precipitation, 5.6 times the first value. The large variation in precipitation estimated by the layers was considerably explained by the topographic heterogeneity in a circle of 1 km diameter around the 504 stations. As supplementary information, we provide two Excel files with the annual precipitation data from the CONAGUA, and the layer estimates at the station

sites. In conclusion, it is relevant which of the seven layers are used to identify areas with high precipitation, and a layer based exclusively on satellite data is not (yet) recommended. The “UNIATMOS” layer stood out here with the comparatively best parameters. In any case, the spatial estimation of high annual precipitation in Mexico still presents major accuracy problems, which results in three recommendations: First, it would be important to improve the scientific basis of empirical data of precipitation and other climate variables for Mexico, with less missing data in the future, with description of methods and quality indicators, and if

possible with a larger number of climate stations in regions with high precipitation; second, reproducible methods should be included in the description of climate layers; and third, it would be advisable to model a specific layer for high precipitation for the corresponding surface, estimated here at 14.7% of the Mexico’s surface, where topography is taken into account in detail.

**Keywords:** Geographic Information System, inconsistency, missing data, weather satellite, weather stations.

## INTRODUCCIÓN

Las primeras mediciones de precipitación se reportan en la India en el siglo IV A.C., pero su registro con enfoque científico empezó en Europa en el siglo XVII (Strangeways, 2010). Durante los más de 300 años posteriores se han empleado mapas para representar la distribución espacial de las variables climáticas. A partir de finales del siglo XX surgieron los sistemas computacionales de información geográfica para representar la distribución espacial y su análisis en capas digitales. Actualmente, las superficies climáticas de alta resolución espacial (con píxeles que representan 1 km<sup>2</sup>) se basan en registros puntuales de estaciones climatológicas (Lawrimore *et al.*, 2011) y procesos de interpolación, con programas como ANUSPLIN (Xu y Hutchinson, 2013) o ANUCLIM (Booth, 2018). Es posible tomar en cuenta variables como elevación, pendiente y orientación de ladera. Algunas de las primeras contribuciones para generar capas climáticas digitales se elaboraron con el objetivo de analizar la distribución de especies biológicas en función del clima, como, por ejemplo, BIOCLIM para especies de plagas agrícolas en Australia (Busby, 1991).

La motivación para el análisis en el presente artículo fue delimitar la superficie de alta precipitación en México para estudiar las formaciones forestales correspondientes. Para este propósito comparamos siete capas de precipitación para seleccionar una: ¿es relevante con qué capa se identifican las áreas con alta precipitación? ¿es recomendable usar una capa de precipitación elaborada con datos satelitales en lugar de pluviómetros terrestres?

## METODOLOGÍA

### Capas climáticas digitales analizadas

En la Tabla 1 presentamos un resumen con información básica de las siete capas analizadas, incluyendo sus fuentes y características. El nombre de la primera capa (“CHELSA”) es la abreviatura de “Climatologies at High resolution for the Earth’s Land Surface Areas”. En su elaboración se contemplan predictores orográficos, como exposición a vientos, relieve y variación altitudinal. “Cuervo” (Cuervo-Robayo *et al.*, 2020) representa el seguimiento de una versión anterior (Cuervo-Robayo *et al.*, 2014). “García” se basa en el trabajo clásico de Enriqueta García (1965) para México, cuyo mapa fue digitalizado y ajustado por la Comisión Nacional para el Conocimiento y Uso de la Biodiversidad (CONABIO). Utiliza isoyetas que delimitan rangos de precipitación, en lugar de valores específicos por píxel. “Sáenz” es un desarrollo de Sáenz-Romero *et al.* (2010) para modelar cambios de vegetación en diferentes escenarios de cambio climático en México. “WorldClim” es una capa de amplio uso a nivel mundial, cuya primera versión fue presentada por Hijmans *et al.* (2005). La abreviatura “UNIATMOS” se refiere a la Unidad de Informática para las Ciencias Atmosféricas y Ambientales del Centro de Ciencias de la Atmósfera de la Universidad Nacional Autónoma de México (UNAM), donde se elaboró esta capa. Finalmente, “Satelital” (GPM-IMERG) es la única capa analizada aquí que mide precipitación mediante sensores de microondas y radares satelitales. “GPM-IMERG” abrevia “Global Precipitation Measurement (GPM) - Integrated Multi-satellitE Retrievals for GPM”, un proyecto de la National Aeronautics and Space

Administration o NASA (Portier *et al.*, 2023). Sin embargo, su resolución espacial es menor a la de las capas anteriores, cuyos datos en todos los casos se basan principalmente en mediciones con pluviómetros terrestres.

Todas las capas climáticas, excepto la de origen satelital, se basan en datos de la Comisión Nacional del Agua (CONAGUA). Sin embargo, para ninguna capa es posible rastrear cuáles fueron las estaciones climatológicas usadas para su elaboración. Solo para algunas capas se indica el número de estaciones utilizadas (Tabla 1). Otras limitaciones para el análisis de las capas fueron que no encontramos información precisa sobre correcciones estadísticas efectuadas a los datos crudos, manejo de datos faltantes en las series de tiempo (que son comunes en los datos de la CONAGUA), detalles de la interpolación empleada, los posibles factores ambientales tomados en cuenta, y parámetros de exactitud estadística.

#### **Datos pluviométricos de la Comisión Nacional del Agua (CONAGUA) para México**

Las estimaciones de precipitación de cada capa las comparamos con los datos medidos y reportados por la Comisión Nacional del Agua (CONAGUA) para 504 estaciones climatológicas con un promedio de precipitación (total) anual  $\geq 1500$  mm entre 1951 y 2010. Los 60 años representan dos normales climatológicas de 30 años, aunque para muchas estaciones sus datos están incompletos. El intervalo de 1951 a 2010 se traslapa, pero no coincide, con los diferentes períodos de precipitación usado (penúltima columna en la Tabla 1) para elaborar las siete capas. Es razonable suponer que tanto el efecto sobre los promedios de precipitación como algún posible efecto del cambio climático no son relevantes en comparación con las otras fuentes de error de medición y estimación.

Los datos climatológicos de la CONAGUA los obtuvimos del portal <https://smn.conagua.gob.mx/es/climatologia/informacion-climatologica/informacion-estadistica-climatologica>, el cual despliega un mapa en formato KMZ con todas las estaciones climatológicas de la CONAGUA en México (5466). Para extraer la información

asociada a cada estación, empleamos el programa *GPS Visualizer* (<https://www.gpsvisualizer.com>). El resultado fue un archivo de texto (CSV o Comma-Separated Values), con los enlaces para la información de cada estación. Posteriormente, escribimos un código en *Mathematica* 13.2.0 (<https://www.wolfram.com/mathematica/>), para conectarse con cada enlace de la CONAGUA y descargar los datos de precipitación para el periodo 1951 a 2010 de 3820 estaciones, para las cuales el acceso vía internet funcionó. En el portal de la CONAGUA también está disponible un “Manual de usuario” (versión del 2010); sin embargo, carece de información metodológica: ¿cuáles instrumentos de medición se emplearon y qué exactitud tenían? ¿A qué se debe el gran número de datos faltantes? ¿Hubo algún proceso de corrección y mejora de los datos? A pesar de estas limitaciones, son los únicos datos de origen empírico que están disponibles para un intervalo de décadas y con distribución en todo México.

Del total de 3820 estaciones climatológicas con precipitación anual para 1951 a 2010, solo 510 tuvieron un promedio de precipitación anual  $\geq 1500$  mm. De estas, seis no contaron con valores de estimación en todas las capas, ya sea porque el pixel no contaba con un valor (al coincidir con un cuerpo de agua) o quedaba fuera del margen de la capa. Las 504 estaciones representan 13% de las 3820 estaciones para las que obtuvimos datos. El archivo de Excel “Annual precipitation means 1951-2010 from Mexico’s CONAGUA.xlsx”, con la información suplementaria detallada, está disponible en <https://doi.org/10.17632/v2wvfgzm53.1>.

La incertidumbre (varianza estadística) sobre el promedio de precipitación reportada para 1951 a 2010 varía entre las estaciones climatológicas, porque varía el número de datos en los que se basan. La CONAGUA calculó el promedio de la precipitación para cada uno de los 12 meses del año con aquellos datos disponibles entre 1951 y 2010 para cada mes. Posteriormente sumaron los 12 promedios mensuales de precipitación. Con los datos faltantes (su número cambia entre las 504 estaciones), la media de años disponibles por estación varía de 10 a 60, con un promedio para todas las 504 estaciones de 32.7 años.

Tabla 1. Datos básicos sobre las siete capas estudiadas.<sup>1</sup>

Nombre usado para la capa	Referencias	Versión	Formato y resolución	Observaciones sobre métodos	Número de estaciones climatológicas	Período de precipitación usado	Precipitación anual mínima a máxima (mm/año)
"CHELSA"	Karger <i>et al.</i> (2017)	1	Raster, 30" [arcosegundos] (0.92 km x 0.92 km)	Procesos de reanálisis e interpolación con 'B-splines' multinivel.	Número no especificado	1979 –2013	44 a 4 543
"Cuervo"	Cuervo-Robayo <i>et al.</i> (2020)	t <sub>3</sub>	Raster, 30"	Algoritmo de interpolación de 'thin-plate smoothing spline'.	circa 5 000	1980 –2009	45 a 3 917
"García"	García (1965)	-	Shapefile, 1: 1 000 000	Emplea isoyetas que llevan a áreas con una sola estimación de precipitación.	1 900	1921 –1960	25 a 4 750
"Sáenz"	Sáenz-Romero <i>et al.</i> (2010)	-	Raster, 30"	Algoritmo de interpolación de 'thin-plate smoothing spline'.	circa 3 100	1961–1990	61 a 4 585
"Satelital" (GPM-IMERG)	Hou <i>et al.</i> (2014), Huffman <i>et al.</i> (2020)	6-B	Raster, 0.1° x 0.1° (11.1 km x 11.1 km)	Datos de satélites climáticos, sin basarse en datos de pluviómetros terrestres.	No aplica	2000 –2021	73 a 2 816
"UNIATMOS"	Fernández-Eguiarre <i>et al.</i> (2014)	-	Raster, 30"	Interpolación de 'inverse distance weighting'.	5 320	1902 –2011	31 a 5 072
WorldClim	Fick y Hijmans (2017)	2	Raster, 30"	Algoritmo de interpolación de 'thin-plate smoothing spline'.	Número no especificado	1970 –2000	45 a 4 866

<sup>1</sup> "CHELSA" se puede descargar en <https://chelsa-climate.org/downloads/>, "Cuervo" desde <http://www.conabio.gob.mx/informacion/gis/>, "García" de <http://www.conabio.gob.mx/informacion/gis/>, "Sáenz" de <http://forest.moscowfs.wsu.edu/climate/>, "Satelital" de <https://giovanni.gsfc.nasa.gov/giovanni/>, "WorldClim" de [https://www.worldclim.org.](https://www.worldclim.org/) y "UNIATMOS" de <https://atlasclimatico.unam.mx/ACM/#192>.

### Mapeo y análisis de datos

Para analizar las capas y crear los mapas utilizamos ArcMap 10.4.1. A través del menú de herramientas de análisis espacial (“Extract Values to Points”) asociamos cada punto de una estación climatológica a los respectivos valores asignados al pixel de la capa correspondiente. Este mismo proceso lo realizamos en 110 525 sitios equidistantes en línea recta entre pares de estaciones climatológicas. El número total de sitios equidistantes entre cada par de las 504 estaciones teóricamente correspondería a  $(504^2 - 504) / 2 = 126\ 756$  sitios (coordenadas geográficas). Sin embargo, 25 sitios se repetían, y 16 006 se encontraron fuera del límite del país. Las coordenadas de los sitios equidistantes las calculamos con el promedio de las latitudes y de las longitudes entre las respectivas estaciones. En las capas con resolución de 30 arcosegundos, cada pixel representa 0.846 km<sup>2</sup> (0.92 km por lado), mientras que en la capa satelital con resolución de 0.1° cada pixel representa 123.2 km<sup>2</sup> (11.1 km por lado). Solo la capa “García” maneja áreas de tamaño variable, que corresponden a diferentes intervalos de precipitación anual, para los cuales usamos el valor intermedio equidistante a los extremos de cada intervalo.

Los análisis de los datos y la elaboración de las gráficas (excepto los mapas) se programaron en *Mathematica*. El archivo con los datos de entrada en Excel “Input for comparing the prediction of high precipitation among 7 layers in Mexico. xlsx” está disponible en <https://doi.org/10.17632/v2wvfgzm53.1>, como información suplementaria.

Analizamos las diferencias de precipitación entre cada capa y las estaciones climatológicas, así como entre los pares de capas. El promedio de los datos de diferencias positivas y negativas representa un indicador del sesgo relativo. Como parámetro de dispersión calculamos la diferencia entre el cuantil de 90% y el cuantil de 10%, es decir, el intervalo de 80% de los datos, sin tomar en cuenta 20% de los datos más extremos que podrían ser estadísticamente atípicos. Como parámetro alternativo de dispersión calculamos el promedio de las diferencias absolutas, siendo el promedio del valor absoluto (positivo) de todas las diferencias en cuestión.

Para mapear el coeficiente de variación de la precipitación anual estimada entre las siete capas, convertimos la resolución de las capas “García” y “Satelital” a pixeles de 30 arcosegundos, para obtener siempre siete valores de precipitación por pixel de 30 arcosegundos. Para este análisis delimitamos aquella superficie, donde por lo menos una de las siete capas estimó un promedio de precipitación de  $\geq 1500$  mm. La fórmula para el coeficiente de variación (*CV*), corregido para quitar un sesgo (Sokal y Rohlf, 2012, p. 56), es

$$CV = \frac{s \cdot 100\%}{\bar{Y}} \cdot \left( 1 + \frac{1}{4 \cdot n} \right),$$

donde *s* es la desviación estándar de los siete valores de precipitación anual,  $\bar{Y}$  el promedio, y *n* = 7 capas.

### ÍNDICE DE HETEROGENEIDAD TOPOGRÁFICA ALREDEDOR DE LAS ESTACIONES CLIMATOLÓGICAS

Descargamos el modelo digital de elevación con cobertura nacional y resolución espacial de 15 m, llamado “Continuo de Elevaciones Mexicano” (CEM 3.0), del Instituto Nacional de Estadística y Geografía (INEGI) en formato TIF de <https://www.inegi.org.mx/app/geo2/elevacionesmex/>. Con dicho modelo analizamos la variación altitudinal en un área circular con diámetro de 1 km, cuyo centro corresponde a las coordenadas de cada una de las 504 estaciones climatológicas. Dado que el modelo de elevación usa pixeles de 15 m x 15 m, cada círculo abarca en promedio 3490.7 pixeles ( $500^2 \cdot \pi / 15^2$ ).

En ArcGis establecimos el radio de 500 m mediante la herramienta de “Análisis de proximidad”. Posteriormente extrajimos en cada círculo de 1 km de diámetro el valor de altitud asociado a cada pixel, mediante la herramienta ‘Intersect’. Se exportaron un total de 1 769 785 de valores de altitud para los 504 círculos en un archivo de texto. Este archivo se importó en *Mathematica*, para calcular 504 desviaciones estándares con la fórmula usual

$$s = \sqrt{\frac{1}{n-1} \cdot \sum_{i=1}^n (A_i - \bar{A})^2},$$

donde  $A_i$  se refiere a la altitud número  $i$  de  $n$  altitudes en el círculo, y  $\bar{A}$  al promedio de todas las altitudes del círculo. Con la desviación estándar tomamos en cuenta solamente la variación altitudinal en el círculo, y no la altitud en la cual se encuentra la estación.

Posteriormente aplicamos el modelo de regresión  $y = b_0 + b_1 \cdot x + b_2 \cdot x^2 + \varepsilon$ , con restricción  $b_1 = -2 \cdot b_2 \cdot x_{máx}$  donde la variable independiente ( $x$ ) se refiere a la desviación estándar ( $s$ ) de las altitudes. La variable dependiente ( $y$ ) es la diferencia correspondiente entre el promedio de la precipitación anual medido (1951-2010) y la precipitación estimada por una de las siete capas. La restricción asegura que el mínimo de la línea de regresión se alcanza en  $x_{máx}$  evitando un modelo polinómico de segundo grado que primero baja y luego arbitrariamente sube otra vez. Se deriva al despejar  $dy/dx = b_1 + 2 \cdot b_2 \cdot x = 0$  para  $b_1$ , y sustituir  $x$  con  $x_{máx}$ . Calculamos la regresión con la función “NonlinearModelFit” en *Mathematica*.

## RESULTADOS

### Distribución geográfica de las áreas con alta precipitación anual en las capas

Como primer diagnóstico para detectar diferencias entre las capas, mapeamos la superficie con alta precipitación anual ( $\geq 1\,500$  mm en promedio, Figuras 1 y 2). Para afinar este análisis, distinguimos tres subcategorías: de  $1\,500$  a  $< 2\,500$  mm, de  $2\,500$  a  $< 3\,500$  mm, y  $\geq 3\,500$  mm. De las siete capas que analizamos, “Satelital” y “García” son las que presentan la mayor superficie con alta precipitación ( $232\,439$  y  $212\,948$  km<sup>2</sup>, respectivamente), mientras que la menor es la de “Cuervo” ( $143\,964$  km<sup>2</sup>). Esta última capa abarca solo 62% y 68%, respectivamente, del área de las dos primeras (Figura 1). Las otras cuatro capas tienen áreas intermedias (Figura 2). También la precipitación máxima en cada capa varía considerablemente. La más alta está en “UNIATMOS” con  $5072$  mm

(Figura 2), y la más baja en “Satelital” con  $2816$  mm, lo que representa 56% de la más alta (Figura 1). La segunda-más baja es “Cuervo” con  $3917$  mm (77%). Las diferencias en superficie con promedio de precipitación anual  $\geq 1500$  mm se reflejan también en la distribución de las superficies correspondientes. En particular la capa “Satelital” difiere de las demás capas en su distribución.

### Estimación de la precipitación anual en los sitios de las 504 estaciones climatológicas

Al comparar el promedio de los datos medidos de precipitación anual de 1951 a 2010 en las 504 estaciones climatológicas con la precipitación que estima cada capa en el mismo sitio, destacan grandes intervalos de diferencia (Tabla 2). La mayor disparidad se presenta en un sitio de montaña del municipio de San Juan Comaltepec en Oaxaca, donde la capa “Cuervo” estimó  $4765$  mm de precipitación menor a la reportada por la respectiva estación climatológica. El caso opuesto lo observamos en un sitio con pastizales en el municipio de Las Margaritas en Chiapas, donde la capa “García” estimó  $1667$  mm de precipitación mayor a la reportada por la respectiva estación. Todas las capas subestiman en promedio la precipitación anual en las estaciones, ya que los promedios por capa de las 504 sustracciones entre la precipitación estimada por capa y la precipitación reportada por la estación son negativos (de  $-23$  mm a  $-481$  mm en la Tabla 2). En la capa “Satelital”, el sesgo relativo es especialmente notoria (Figura 3). También su intervalo entre los cuantiles de 10% a 90% de los datos en la penúltima columna de la Tabla 2 (“dispersión 1”) es 2.2 veces mayor ( $1707$  mm) que el intervalo de la capa “UNIATMOS” ( $781$  mm). De forma similar, los promedios de las diferencias absolutas en la última columna (“dispersión 1”) son considerables, desde un mínimo de  $226$  mm en la capa “UNIATMOS” hasta un máximo de  $630$  mm en la capa “Satelital”.

### Comparación entre capas

Para analizar inconsistencias entre pares de capas, comparamos en la Tabla 3 sus precipitaciones anuales estimadas en los  $110\,525$  sitios entre estaciones. La Tabla 3 tiene las mismas columnas que la

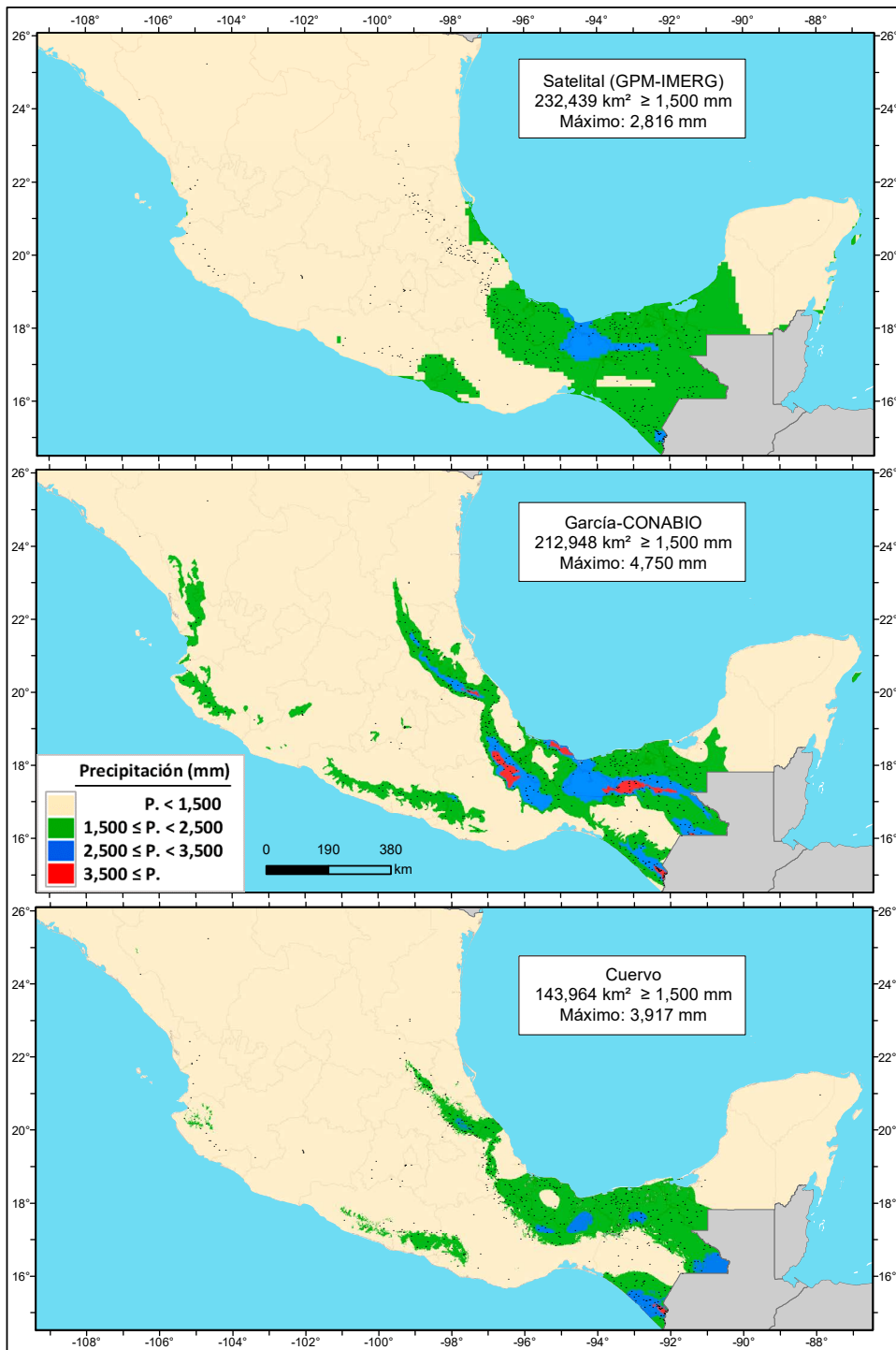


Figura 1. Identificación de alta precipitación anual ( $\geq 1500$  mm en promedio) en México por tres de siete capas digitales. La capa “Satelital” estima la mayor superficie, “García” la segunda-mayor, y “Cuervo” la menor. Los puntos negros indican los sitios de las 504 estaciones de la CONAGUA que reportan valores de dos normales climatológicas (1951-2010) con alta precipitación anual.



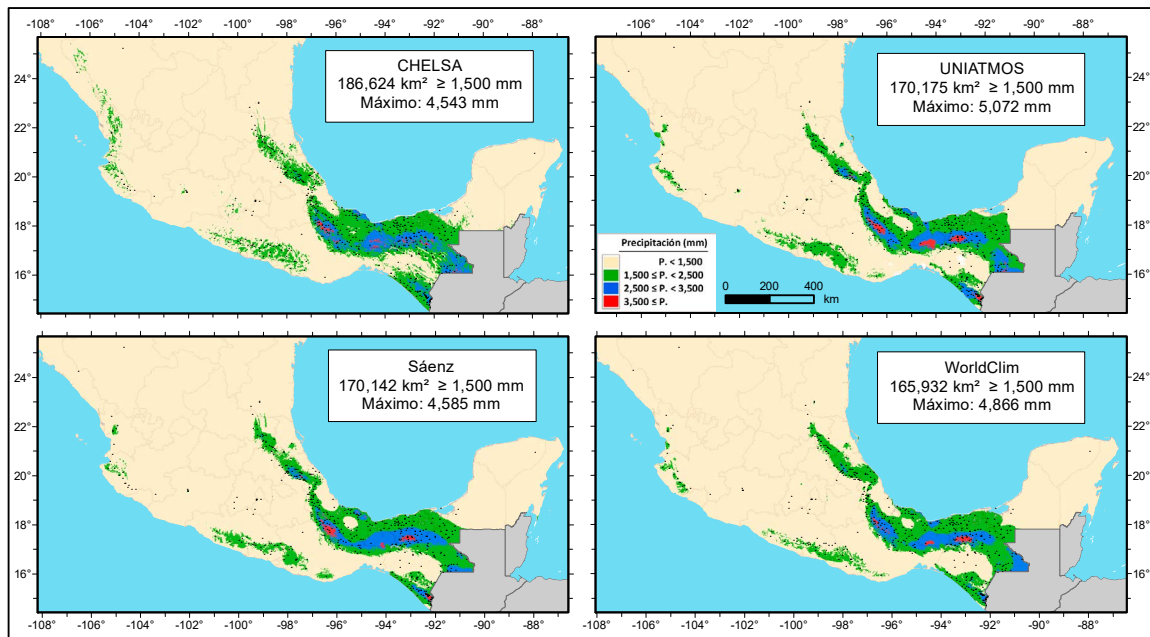


Figura 2. La misma información de la Figura 1 para las otras cuatro capas, con tamaño de superficies intermedias.

Tabla 2. Estadísticas para las diferencias de precipitación anual de cada capa y la precipitación medida en el mismo sitio para las 504 estaciones climatológicas, ordenadas según el intervalo entre cuantiles en la penúltima columna; todos los datos están en milímetros (mm).

Nombre de la capa	Diferencias mínima y máxima	Promedio de diferencias (“sesgo relativo”)	Cuantiles de 10% y 90%	Intervalo entre los cuantiles (“dispersión 1”)	Promedio de diferencias absolutas (“dispersión 2”)
“UNIATMOS”	-3134 a 1361	-110	-673 a 108	781	226
“García”	-3235 a 1667	-23	-424 a 381	805	276
“Sáenz”	-4100 a 1094	-222	-754 a 294	1048	375
“WorldClim”	-2829 a 1428	-284	-1000 a 201	1201	404
“CHELSA”	-2546 a 1328	-379	-1134 a 215	1349	491
“Cuervo”	-4765 a 1468	-447	-1327 a 148	1475	543
“Satelital”	-3941 a 766	-481	-1406 a 301	1707	630

Tabla 3. Estadísticas para las diferencias de precipitación anual en 110 525 sitios, equidistantes entre pares de las 504 estaciones, ordenadas según el intervalo entre cuantiles en la penúltima columna; todos los datos están en milímetros.

Nombre de la capa	Diferencias mínima y máxima	Promedio de diferencias (“sesgo relativo”)	Cuantiles de 10% y 90%	Intervalo entre los cuantiles (“dispersión 1”)	Promedio de diferencias absolutas (“dispersión 2”)
“Sáenz” y “UNIATMOS”	-1297 a 1 830	2	-264 a 289	553	176

Tabla 3. Continúa.

Nombre de la capa	Diferencias mínima y máxima	Promedio de diferencias ("sesgo relativo")	Cuantiles de 10% y 90%	Intervalo entre los cuantiles ("dispersión 1")	Promedio de diferencias absolutas ("dispersión 2")
"UNIATMOS" y "WorldClim"	-1831 a 1822	-39	-371 a 218	589	185
"Sáenz" y "WorldClim"	-1886 a 1872	-37	-398 a 288	686	210
"García" y "UNIATMOS"	-2951 a 1977	-115	-508 a 235	743	256
"CHELSA" y "WorldClim"	-2143 a 2082	-61	-476 a 332	808	263
"Cuervo" y "Satelital"	-1506 a 1263	257	-164 a 651	815	371
"CHELSA" y "Sáenz"	-2185 a 1972	-25	-432 a 387	819	267
"Cuervo" y "WorldClim"	-1380 a 3852	182	-144 a 695	839	267
"García" y "Sáenz"	-2836 a 2139	-117	-576 a 268	844	272
"CHELSA" y "UNIATMOS"	-2112 a 2331	-22	-427 a 432	859	283
"Cuervo" y "Sáenz"	-1441 a 3430	219	-124 a 773	897	288
"CHELSA" y "García"	-1639 a 2702	92	-361 a 613	974	307
"García" y "WorldClim"	-2953 a 1705	-153	-718 a 261	979	305
"Cuervo" y "UNIATMOS"	-1445 a 4043	221	-141 a 847	988	301
"CHELSA" y "Cuervo"	-3497 a 1403	-243	-852 a 160	1012	339
"CHELSA" y "Satelital"	-2342 a 966	14	-592 a 460	1052	332
"Satelital" y "WorldClim"	-1110 a 2895	-75	-554 a 583	1137	368
"Sáenz" y "Satelital"	-2623 a 1091	38	-628 a 532	1160	394
"Cuervo" y "García"	-2182 a 3994	335	-152 a 1086	1238	412
"Satelital" y "UNIATMOS"	-1195 a 2987	-36	-614 a 745	1359	424
"García" y "Satelital"	-3105 a 1356	-78	-891 a 575	1466	444

Tabla 2. A pesar de que la Figura 4 solo muestra tres de las  $(7^2 - 7) / 2 = 21$  comparaciones entre pares de capas, en general se observan grandes inconsistencias en las estimaciones de la precipitación en los 110 525 sitios. El menor intervalo entre los cuantiles de 10% y 90% se da con 553 mm entre

"Sáenz" y "UNIATMOS", y el mayor intervalo con 1466 mm entre "García" y "Satelital" (2.7 veces el primero).

La Figura 5 muestra un panorama geográfico de la variación de la precipitación anual estimada entre las siete capas. Ambos mapas presentan el

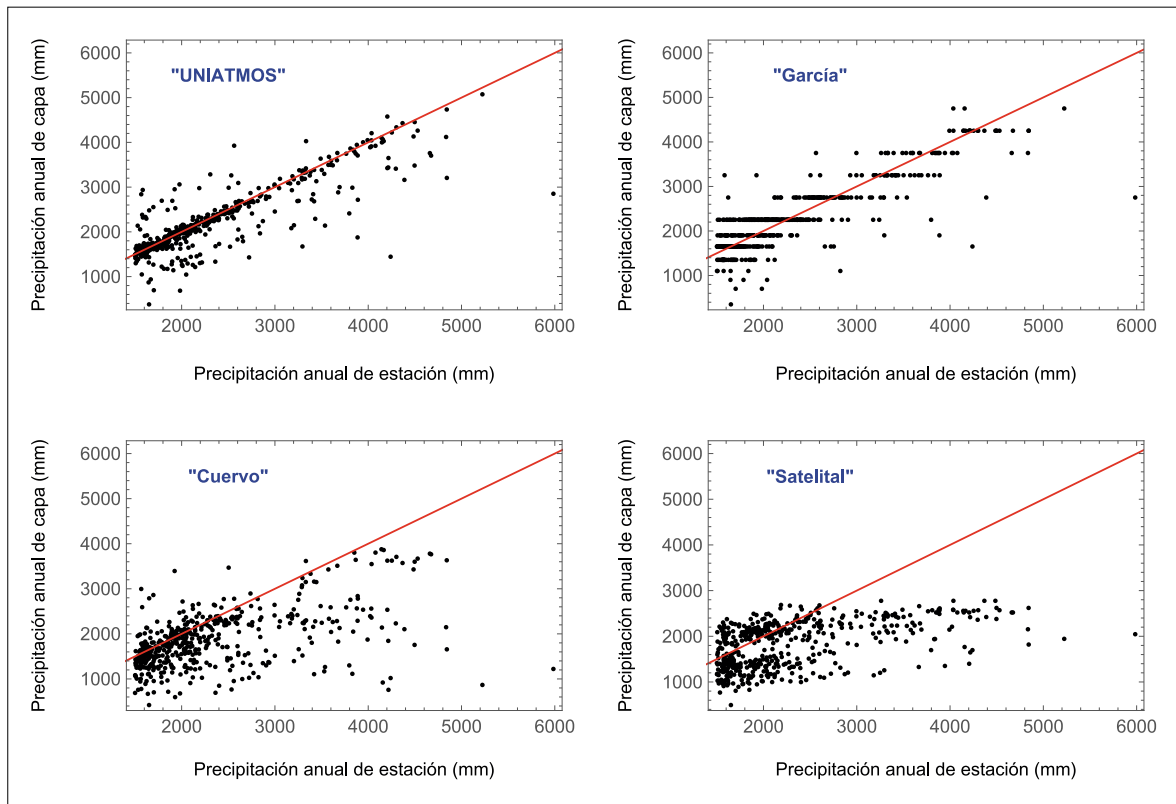


Figura 3. Comparación entre la precipitación anual de las estaciones climatológicas y la precipitación estimada en cuatro de las siete capas. La línea roja representa la diagonal, donde tendrían que estar los puntos si hubiera total coincidencia. Arriba: las dos estaciones con menor diferencia de los datos y también menor sesgo relativo. En el caso de "García", la estimación no es puntual sino para áreas con un solo valor. Abajo: las dos estaciones con la mayor diferencia de los datos y también el mayor sesgo relativo.

coeficiente de variación, uno en escala continua de 1.8 a 60.9% (arriba), y otro en tres categorías con curvas de nivel (abajo). La superficie donde al menos una de las siete capas estima un promedio de precipitación anual  $\geq 1500$  mm es de 287 042 km<sup>2</sup>, o 14.7% de la superficie de México. La categoría con un coeficiente de variación relativamente bajo abarca 74.7% (214 403 km<sup>2</sup>) de los 287 042 km<sup>2</sup>. La categoría intermedia es de 24.1% (69 318 km<sup>2</sup>), y la que tiene mayor variación de 1.2% (3320 km<sup>2</sup>). En el mapa inferior de la Figura 5 se puede observar que las superficies con coeficiente de variación alto y medio siempre se encuentran en regiones montañosas, aunque algunas de estas regiones también tienen un coeficiente de variación bajo.

### Heterogeneidad topográfica como factor que explica incertidumbre en las estimaciones de precipitación

Con el índice de heterogeneidad topográfica exploramos si en la vecindad de las 504 estaciones climatológicas hay mayor diferencia entre precipitación anual medida y estimada con mayor heterogeneidad topográfica (desviación estándar de altitudes). La Tabla 4 presenta los resultados de la regresión estadística. En la Figura 6 se puede observar que, con una desviación estándar cerca de cero, los valores positivos y negativos son similares en magnitud. Con mayor desviación estándar dominan cada vez más las diferencias negativas, es decir, la precipitación estimada por la capa subestima la precipitación medida en la estación. Finalmente,

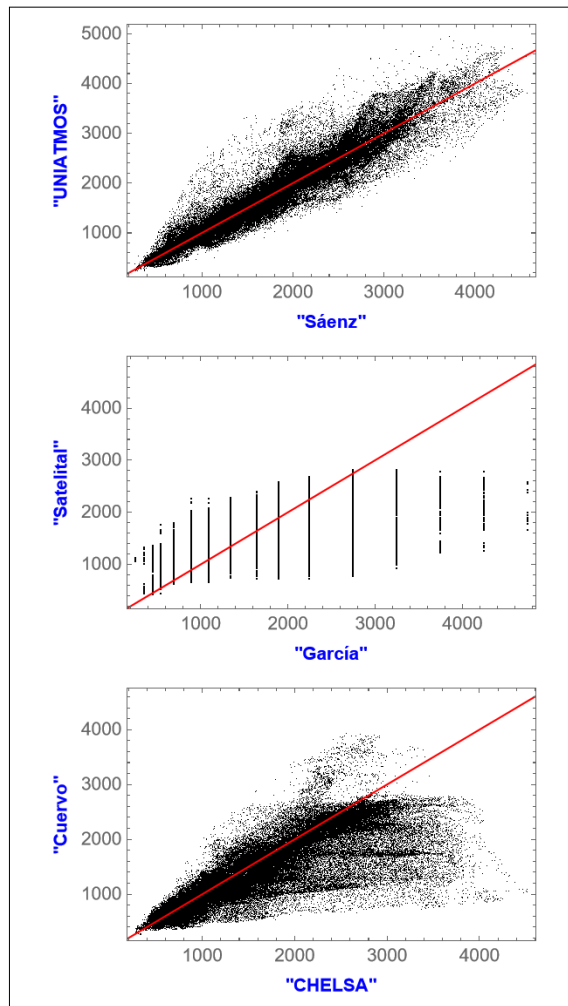


Figura 4. Comparación entre promedios de precipitación anual estimada (en mm) de tres pares de capas climáticas en 110 525 sitios equidistantes entre estaciones climáticas. La primera comparación (arriba) presenta el menor intervalo entre los cuantiles de 10 y 90% de las diferencias entre ambas capas (Tabla 3). La segunda comparación (en medio) tuvo el mayor intervalo, y la tercera (abajo) el mayor intervalo cuando se excluyen “García” y “Satelital” (capas de menor resolución).

la diferencia proyectada por la regresión se nivela con mayor desviación estándar.

“García” es la única capa donde ambos coeficientes  $b_1$  (representando la inclinación) y  $b_2$  (representando la curvatura) resultan no ser significativamente diferentes a cero con  $\alpha = 0.05$ . En segundo lugar queda “UNIATMOS”, donde

solamente  $b_1$  es ligeramente significativo, mientras que para la capa “Satelital” en el último lugar ambos coeficientes son altamente significativos. A pesar de que  $b_2$  no es significativo en los primeros tres casos, la distribución de los residuos con su inclusión es mejor que en un modelo lineal (con solo  $b_1$ ).

La desviación estándar de las altitudes para las 504 estaciones climatológicas varía en un rango de 0 a 149.52 m. Al insertar estos valores en cada ecuación de la regresión en la segunda columna de la Tabla 4 y tomar la diferencia  $f(0) - f(149.52)$  resulta un intervalo de precipitación anual (última columna) que la desviación estándar de altitudes puede explicar. Destaca la capa “García” en el primer lugar, ya que parece tomar en cuenta de mejor manera la heterogeneidad topográfica, y en último lugar la capa “Satelital”. La Figura 6 presenta las dos primeras y las dos últimas capas en la secuencia de la Tabla 4. Las otras tres capas tienen patrones intermedios. Con mayor variación altitudinal existe mayor diferencia entre precipitación anual medida y estimada. Además, las capas difieren en su habilidad de modelar el efecto de esta variación sobre la precipitación.

## DISCUSIÓN

Analizamos en siete capas climáticas digitales sus estimaciones de alta precipitación anual ( $\geq 1\,500$  mm en promedio) en México. Este nivel de precipitación implica generalmente una vegetación natural forestal en una elevación de 0 a aproximadamente 4 000 m sobre nivel del mar (INEGI, 2017, p. 44). Hay enormes diferencias entre las estimaciones de las siete capas digitales: La superficie con promedios de precipitación anual  $\geq 1\,500$  mm varía según la capa seleccionada entre 143 964 km<sup>2</sup> (“Cuervo”) y 232 439 km<sup>2</sup> (“Satelital”), donde la segunda superficie es 1.6 veces la primera. Si tomamos como superficie terrestre de México 1 954 658 km<sup>2</sup>, según la CONABIO (Comisión Nacional para el Conocimiento y Uso de la Biodiversidad), el intervalo del posible porcentaje de la superficie con este nivel de precipitación en México es de 7.4% a 11.9%. Puede haber varias razones para estas discrepancias:

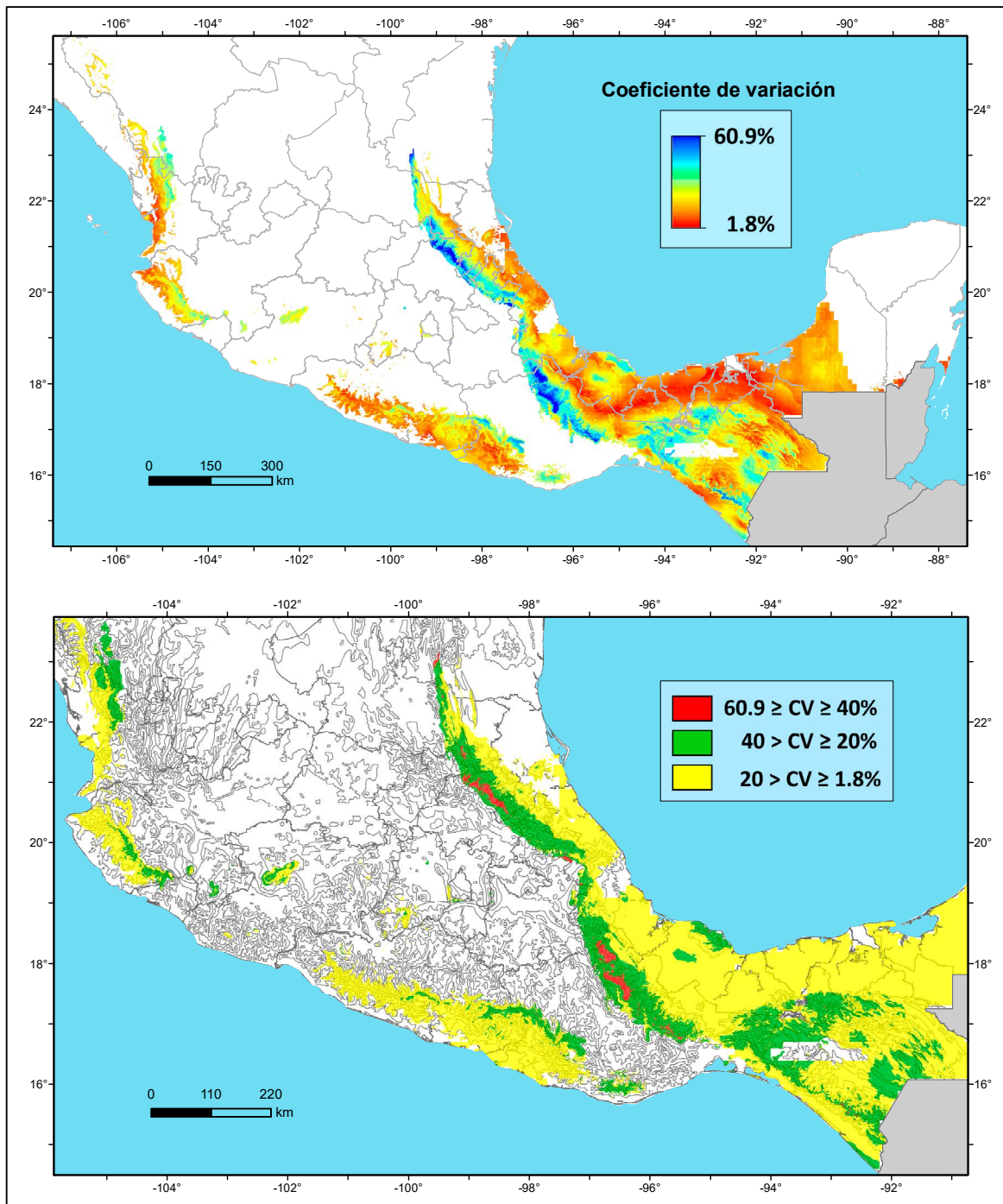


Figura 5. Mapas del coeficiente de variación (CV) de la precipitación anual estimada entre las siete capas, por pixel de 30 arcosegundos. Se muestra la superficie, donde al menos una de las siete capas estima un promedio de precipitación anual  $\geq 1500$  mm. Arriba: El coeficiente de variación en escala continua de 1.8% a 60.9%. Abajo: El coeficiente de variación por categoría, y con curvas de nivel en el mapa que tienen 500 m de diferencia en elevación entre sí. Aquí hicimos un acercamiento para presentar toda la superficie verde y roja ( $CV \geq 20\%$ ).

Tabla 4. Resultados de la regresión estadística de las diferencias entre la precipitación anual medida (promedio de 1951 a 2010) y la estimada por cada capa, en función de la desviación estándar de las altitudes en círculos con radio de 500 m alrededor de cada una de las 504 estaciones.

Nombre de la capa	Ecuación de regresión $f(x) = b_0 + b_1 \cdot x + b_2 \cdot x^2$	Probabilidad que $b_1 = 0$	Probabilidad que $b_2 = 0$	$f(0) - f(149.52)$ en m
"García"	$45.3 - 3.04 \cdot x + 0.00980 \cdot x^2$	0.090	0.57	236
"UNIATMOS"	$-17.0 - 4.32 \cdot x + 0.0149 \cdot x^2$	0.014	0.38	312
"Sáenz"	$-55.3 - 8.48 \cdot x + 0.0324 \cdot x^2$	$3.9 \cdot 10^{-5}$	0.10	544
"CHELSA"	$-172 - 11.0 \cdot x + 0.0439 \cdot x^2$	$1.1 \cdot 10^{-6}$	0.044	661
"WorldClim"	$-63.2 - 11.0 \cdot x + 0.0408 \cdot x^2$	$7.6 \cdot 10^{-7}$	0.056	726
"Cuervo"	$-115 - 16.3 \cdot x + 0.0599 \cdot x^2$	$7.4 \cdot 10^{-9}$	0.027	1097
"Satelital"	$-105 - 19.6 \cdot x + 0.0769 \cdot x^2$	$2.6 \cdot 10^{-12}$	0.0041	1212

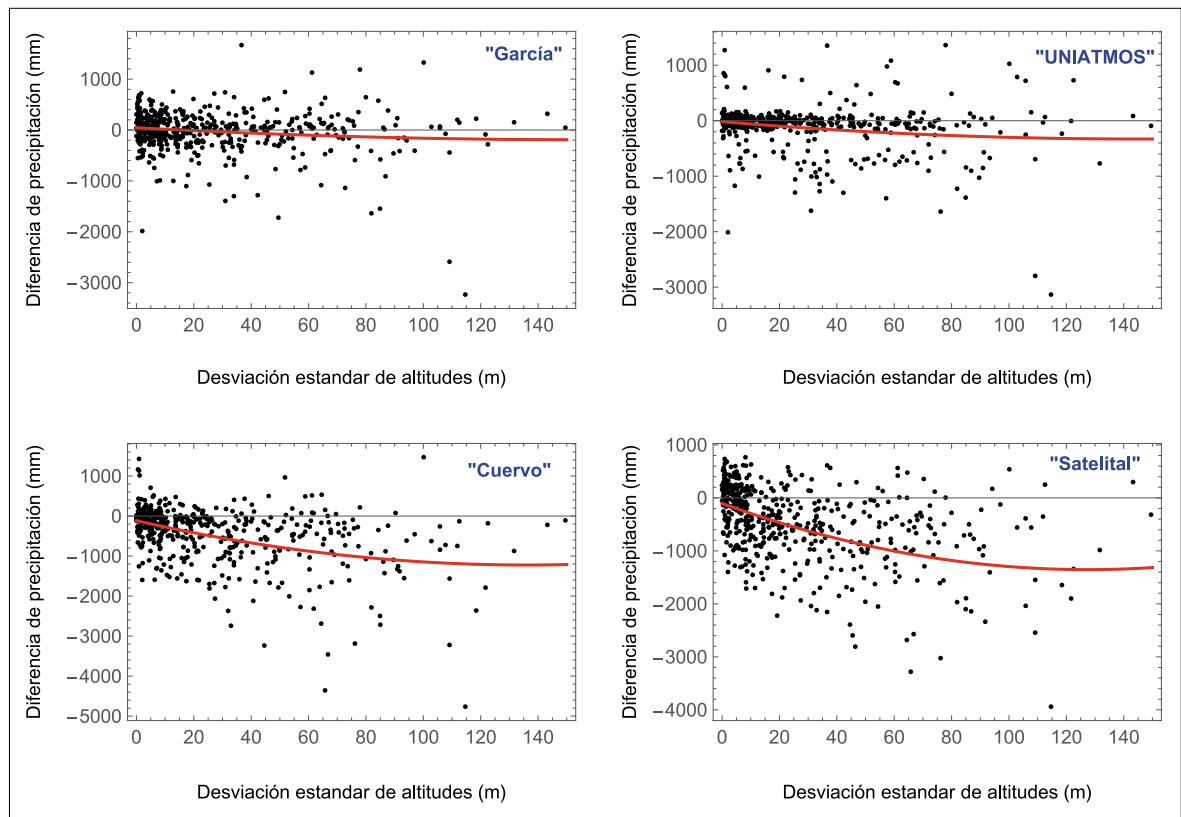


Figura 6. Arriba: gráficas de regresión para las dos primeras capas de la Tabla 4, donde la variación topográfica (desviación estándar de las altitudes) explica poco las diferencias entre la precipitación medida y la estimada. Abajo: gráficas para las dos últimas capas de la Tabla 4, donde la variación topográfica explica mucha más las diferencias.

- Modelar la distribución geográfica de alta precipitación parece implicar mayor incertidumbre. En el 14.7% del área continental de México (287 042 /1 954 658), al menos una de las siete capas analizadas estima un promedio de precipitación anual  $\geq 1\ 500$  mm. La superficie restante, con una precipitación menor a 1 500 mm, tiene 1 667 616 km<sup>2</sup>. En 87% de esta última superficie, las siete capas tienden a ser más consistentes entre sí, con un coeficiente de variación de la precipitación anual estimada más bajo ( $< 20\%$ ). Esto contrasta con un 75% de la superficie en el área con alta precipitación anual con coeficiente de variación bajo. Las dos superficies difieren 12% (87–75%).
- Las capas no se ajustan a las condiciones particulares de cada sitio. Más bien representan modelos que no toman en cuenta todos los factores que determinan la precipitación en cada lugar. El modelo de una capa puede ser menos adecuado que el modelo de otra. No pudimos profundizar en este aspecto, debido a la carencia de la información detallada sobre la metodología empleada para su modelaje.
- Los datos de origen empírico disponibles de las estaciones climatológicas también tienen limitaciones, dado que pueden tener errores (instrumentales, de lectura, transcripción, etc.). Los datos faltantes pueden sesgar el promedio de la precipitación anual de 1951 a 2010. La CONAGUA proporciona para cada estación las coordenadas geográficas y la altitud. Al determinar las altitudes de las estaciones según las coordenadas geográficas proporcionadas por la CONAGUA con el modelo de elevaciones del INEGI, hay 80 (16%) de las 504 estaciones con una diferencia absoluta mayor a 100 m entre el modelo de elevaciones y la altitud proporcionada por la CONAGUA, y 21 estaciones (4%) con una diferencia absoluta mayor a 500 m (marcadas en rojo en “Input for comparing the prediction of high precipitation among 7 layers in Mexico.xlsx” en <https://doi.org/10.17632/v2wvfgzm53.1>). Hay dos posibilidades: o están incorrectas las altitudes o están incorrectas las coordenadas geográficas,

cas, como ya lo observaron Cuervo-Robayo *et al.* (2014, p. 2429) para algunos sitios.

La idea de obtener datos de precipitación por medio de satélites en forma independiente a la de los pluviómetros terrestres es atractiva (Masunaga, 2022). Sin embargo, ya es conocido que esta tecnología todavía no funciona bien para altos niveles de precipitación en México (Mayor *et al.*, 2017), lo que se confirmó aquí plenamente.

Regresando a las preguntas de la introducción, sí es relevante con cuál capa se identifican las áreas con alta precipitación. La capa de mediciones satelitales tenía especialmente altos valores de incertidumbre y sesgo relativo. En contraste, la capa “UNIATMOS” pareció aquí con los mejores parámetros. De cualquier forma, la estimación de altos niveles de precipitación anual en México presenta todavía grandes problemas de incertidumbre.

## RECOMENDACIONES

- Sería importante mejorar la base científica de datos empíricos de precipitación y otras variables climáticas para México, con menos datos faltantes en el futuro, con la descripción de los métodos e indicadores de calidad, y en lo posible con un mayor número de estaciones climáticas en regiones con alta precipitación.
- Se deberían incluir métodos reproducibles en la descripción de las capas: especificaciones de las estaciones climatológicas, datos faltantes y correcciones estadísticas realizadas, descripción de la interpolación con factores ambientales incluidos, indicadores de exactitud, etc.
- Sería recomendable modelar una capa específica para altos niveles de precipitación en la superficie correspondiente (estimada aquí en 14.7% de la superficie de México), donde se tome en cuenta a detalle la topografía.

## AGRADECIMIENTOS

Agradecemos al Posgrado de Ciencias Biológicas de la UNAM su apoyo al primer autor (Armando

Rincón-Gutiérrez) como tesista de doctorado, y al Consejo Nacional de Humanidades, Ciencias y Tecnologías (CONAHCYT) por haberle otorgado una beca para tesis.

## REFERENCIAS

- Booth, T. H. (2018). Why understanding the pioneering and continuing contributions of BIOCLIM to species distribution modelling is important. *Austral Ecology*, 43(8), 852-860. <https://doi.org/10.1111/aec.12628>
- Busby, J. R. (1991). BIOCLIM - a bioclimate analysis and prediction system. *Plant Protection Quarterly*, 6(1), 8-9. <https://caws.org.nz/PPQ567/PPQ%2006-1%20pp008-9%20Busby.pdf>
- Cuervo-Robayo, A. P., Téllez-Valdés, O., Gómez-Albores, M. A., Venegas-Barrera, C. S., Manjarrez, J., y Martínez-Meyer, E. (2014). An update of high-resolution monthly climate surfaces for Mexico. *International Journal of Climatology*, 34(7), 2427-2437. <https://doi.org/10.1002/joc.3848>
- Cuervo-Robayo, A. P., Ureta, C., Gómez-Albores, M. A., Meneses-Mosquera, A. K., Téllez-Valdés, O., y Martínez-Meyer, E. (2020). One hundred years of climate change in Mexico. *PLOS ONE*, 15(7), e0209808. <https://doi.org/10.1371/journal.pone.0209808>
- Fernández-Eguiarte, A., Romero Centeno, R., y Zavala Hidalgo, J. (2014). Metodologías empleadas en el atlas climático digital de México para la generación de mapas de alta resolución. *Geoacta*, 39(1), 165-173. [http://www.scielo.org.ar/scielo.php?script=sci\\_arttext&pid=S1852-77442014000100013](http://www.scielo.org.ar/scielo.php?script=sci_arttext&pid=S1852-77442014000100013)
- Fick, S. E., y Hijmans, R. J. (2017). WorldClim 2: New 1-km spatial resolution climate surfaces for global land areas. *International Journal of Climatology*, 37(12), 4302-4315. <https://doi.org/10.1002/joc.5086>
- García, E. (1965). Distribución de la precipitación en la República Mexicana. *Investigaciones Geográficas*, 1, 2-30. <https://doi.org/10.14350/ig.59179>
- Hijmans, R. J., Cameron, S. E., Parra, J. L., Jones, P. G., y Jarvis, A. (2005). Very high resolution interpolated climate surfaces for global land areas. *International Journal of Climatology*, 25(15), 1965-1978. <https://doi.org/10.1002/joc.1276>
- Hou, A. Y., Kakar, R. K., Neeck, S., Azarbarzin, A. A., Kummerow, C. D., Kojima, M., Oki, R., Nakamura, K., y Iguchi, T. (2014). The global precipitation measurement mission. *Bulletin of the American Meteorological Society*, 95(5), 701-722. <https://doi.org/10.1175/BAMS-D-13-00164.1>
- Huffman, G. J., Bovin, D. T., Braithwaite, D., Hsu, K., Joyce, R., Kidd, C., Nelkin, E. J., Sorooshian, S., Tan, J., y Xie, P. (2020). *NASA Global Precipitation Measurement (GPM) Integrated Multi-satellite Retrievals for GPM (IMERG)*. Greenbelt, Maryland, EUA: National Aeronautics and Space Administration (NASA). [https://gpm.nasa.gov/sites/default/files/2020-05/IMERG\\_ATBD\\_V06.3.pdf](https://gpm.nasa.gov/sites/default/files/2020-05/IMERG_ATBD_V06.3.pdf)
- INEGI. (2017) *Guía para la interpretación de cartografía: uso del suelo y vegetación, escala 1:250, 000, serie VI*. Ciudad de Aguascalientes, México: Instituto Nacional de Estadística y Geografía (INEGI). [https://www.inegi.org.mx/contenidos/productos/prod\\_serv/contenidos/espanol/bvinegi/productos/nueva\\_es-truc/702825092030.pdf](https://www.inegi.org.mx/contenidos/productos/prod_serv/contenidos/espanol/bvinegi/productos/nueva_es-truc/702825092030.pdf)
- Karger, D. N., Conrad, O., Böhrner, J., Kawohl, T., Kreft, H., Soria-Auza, R. W., Zimmermann, N. E., Linder, H. P., y Kessler, M. (2017). Climatologies at high resolution for the earth's land surface areas. *Scientific Data*, 4(1), 170122. <https://doi.org/10.1038/sdata.2017.122>
- Lawrimore, J. H., Menne, M. J., Gleason, B. E., Williams, C. N., Wuertz, D. B., Vose, R. S., y Rennie, J. (2011). An overview of the Global Historical Climatology Network monthly mean temperature data set, version 3. *Journal of Geophysical Research*, 116(D19), D19121. <https://doi.org/10.1029/2011JD016187>
- Masunaga, H. (2022). *Satellite Measurements of Clouds and Precipitation: Theoretical Basis*. Singapore: Springer Nature. <https://doi.org/10.1007/978-981-19-2243-5>
- Mayor, Y. G., Tereshchenko, I., Fonseca-Hernández, M., Pantoja, D. A., y Montes, J. M. (2017). Evaluation of error in IMERG precipitation estimates under different topographic conditions and temporal scales over Mexico. *Remote Sensing*, 9, 503. <https://doi.org/10.3390/rs9050503>
- Portier, A., Kirschbaum, D., Gebremichael, M., Kemp, E., Kumar, S., Llabres, I., Snodgrass, E., y Wegiel, J. (2023). NASA's global precipitation measurement mission: Leveraging stakeholder engagement & applications activities to inform decision-making. *Remote Sensing Applications: Society and Environment*, 29, 100853. <https://doi.org/10.1016/j.rsase.2022.100853>
- Sáenz-Romero, C., Rehfeldt, G. E., Crookston, N. L., Duval, P., St-Amant, R., Beaulieu, J., y Richardson, B. A. (2010). Spline models of contemporary, 2030, 2060 and 2090 climates for Mexico and their use in understanding climate-change impacts on the vegetation. *Climatic Change*, 102(3-4), 595-623. <https://doi.org/10.1007/s10584-009-9753-5>
- Sokal, R. R., y Rohlf, F. J. (2012). *Biometry*. New York: W.H. Freeman and Company.



Strangeways, I. (2010). A history of rain gauges. *Weather*, 65(5), 133-138. <https://doi.org/10.1002/wea.548>  
Xu, T., y Hutchinson, M. F. (2013). New developments and applications in the ANUCLIM spatial climatic

and bioclimatic modelling package. *Environmental Modelling & Software*, 40, 267-279. <https://doi.org/10.1016/j.envsoft.2012.10.003>