

**LA VARIABILIDAD ESPACIAL DE LA PRECIPITACIÓN EN MÉXICO.
GRADIENTES ALTITUDINALES BASADOS EN LA RED DE ESTACIONES
METEOROLÓGICAS**

*The spatial variability of precipitation in Mexico. Altitudinal
gradients based on the network of meteorological stations*

RODRIGO TOVAR CABAÑAS¹, HIPÓLITO VILLANUEVA HERNÁNDEZ²
Y JOSÉ VICENTE JARAMILLO ESCOBEDO³

Recibido: 16 de mayo 2024 • Aceptado: 24 de mayo 2024

Cómo citar: Tovar Cabañas, R., Villanueva Hernández, H. y Jaramillo Escobedo, J. V. (2024). La variabilidad de la precipitación en México. Gradientes altitudinales basados en la red de estaciones meteorológicas. *Ciencia, Ambiente y Clima*, 7(1), 9-29. <https://doi.org/10.22206/cac.2024.v7i1.3125>

Resumen

La exploración de la variabilidad espacial de los gradientes de precipitación es importante para comprender las diferencias regionales presentes en los patrones de isoyetas y así optimizar las modelaciones de las dinámicas hidrometeorológicas, agrícolas y forestales. El objetivo de este artículo fue, analizar geostatísticamente la distribución espacial de los distintos gradientes pluviométricos que existen en México, conforme con los datos de las estaciones meteorológicas nacionales de 1921 a 2004. Se determinaron cuatro gradientes latitudinales de precipitación. Los resultados muestran que las precipitaciones anuales en las montañas situadas por arriba de los 1 800 msnm e inmersas en el gradiente intratropical de la vertiente del Golfo de México, en promedio, son 200 mm mayores en comparación con la vertiente del Pacífico, en tanto que las precipitaciones en las montañas situadas por arriba de los 1 800 msnm e inmersas en el gradiente extratropical de la vertiente del Golfo de México, en promedio, son solo 50 mm mayores en comparación con la vertiente del Pacífico.

¹ El Colegio de Veracruz. ORCID: 0000-0003-4873-2502. Correo-e: rod_geo77@hotmail.com

² Universidad Autónoma de Nuevo León, Instituto de Investigaciones Sociales. ORCID: 0000-0003-0319-6777

³ Universidad Autónoma de Tamaulipas: Tampico, Tamaulipas, Mexico. ORCID: 0000-0002-2447-5356



Palabras clave: gradiente altitudinal, precipitación, isoyetas, topografía, México.

Abstract

The exploration of the spatial variability of precipitation gradients is important to understand the regional differences present in isohyet patterns and thus optimize modeling of hydrometeorological, agricultural and forestry dynamics. The objective of this article was to geostatistically analyze the spatial distribution of the different rainfall gradients that exist in Mexico, in accordance with data from the national meteorological stations from 1921 to 2004. Four latitudinal precipitation gradients were determined. The results show that annual precipitation in the mountains located above 1,800 meters above sea level and immersed in the intratropical gradient of the Gulf of Mexico slope, on average, is 200 mm greater compared to the Pacific slope, while Precipitation in the mountains located above 1,800 meters above sea level and immersed in the extratropical gradient of the Gulf of Mexico slope, on average, is only 50 mm greater compared to the Pacific slope.

Keywords: altitudinal gradient; precipitation; isohyets; topography; Mexico.

1. Introducción

En medio del cambio global, la altura máxima de precipitación se está redefiniendo, de modo que los pisos bioclimáticos también se están reajustando a la dinámica acelerada de este ciclo hidrológico, lo que lleva a cambios significativos en las actividades hidrológicas, agrícolas y forestales, entre otras. Por ejemplo, desde la década de 1990, conforme con (Tovar, *et al.* 2022) las variaciones climáticas que ha sufrido el norte de México ocupan 7.7% del territorio constituido por Tamaulipas, Nuevo León, Coahuila, Chihuahua y Sonora, puesto que de los 717 mil km² que cubren, al menos 55 mil km² experimentaron un cambio en el régimen pluviométrico medio anual. Las áreas que experimentaron una reducción en su extensión pertenecen a las isoyetas de 450 y 300 mm, puesto que éstas se redujeron en 50 mil y 5 mil km², respectivamente. En tanto, las áreas que experimentaron un incremento en su extensión pertenecen a las isoyetas de 900, 600 y 150 mm, ya que éstas ampliaron su cobertura en 24 094, 14 095 y 2 000

km², respectivamente. Estos datos sugieren que los núcleos de las zonas climáticas se están consolidando, mientras que sus bordes limítrofes se están dinamizando de manera estocástica.

La precipitación, como elemento determinante de los recursos hídricos y fuente importante para el reabastecimiento en zonas montañosas, está influenciada por factores como la continentalidad, la latitud, la topografía y el cambio climático. Su variabilidad espacial y temporal, en términos climáticos conduce a tasas de cambios hidrológicos regionales. Las precipitaciones de montaña tanto en el norte como en el sur de México tienen características no tan obvias de distribución vertical, puesto que la vertiente (pacífica o atlántica, esta última proponemos denominar como gólfica), así como la altitud y la topografía juegan un papel decisivo en su distribución. Por lo que, la relación propia entre precipitación y altitud es de gran importancia para conocer la razón de la distribución espacial de las isoyetas. Es útil señalar que tal distribución espaciotemporal de la precipitación montañosa varía significativamente de una vertiente a otra, y los cambios en las precipitaciones conforme a la altitud no son uniformes.

Las observaciones de las cantidades de precipitación y el análisis de los gradientes de precipitación juegan un papel importante en la comprensión hidrológica de estos procesos y son importantes para estudiar la hidrología y los recursos hídricos en zonas montañosas. Por lo tanto, los gradientes de precipitación en zonas montañosas se han convertido en un importante tema de investigación. La distribución espacio natural del agua de lluvia en el norte y sur de México es significativamente desigual, con un patrón de precipitación creciente en las regiones altas, tanto del área central y suroriental como noroccidental. En general, las precipitaciones, al sur de México, muestran una tendencia creciente del 0.9%, de igual modo, las precipitaciones en el norte de México presentan una tendencia creciente del 1.8% (Méndez, *et al.*, 2008; Nazarian, *et al.*, 2024; Andrade y Medrano, 2021).

Debido a los cambios en la altura potencial de los pisos climáticos, se espera que las precipitaciones en las montañas de la región sureste continúen aumentando en el futuro, con un mayor aumento en la estación fría

que en la cálida y una tendencia significativa a la humificación. En tanto, dado que la geomorfología en la región noroeste es compleja y variable, al parecer, el contenido de agua atmosférica en esta zona montañosa, estadísticamente, se está enrareciendo y las precipitaciones solo se concentran principalmente en el verano. A describir tales gradientes de precipitación y pisos climáticos de México está encaminada la presente Investigación, para ello se brinda un breve estado del arte de los gradientes pluviométrico altitudinales de diferentes regiones del mundo, para luego presentar, materiales métodos e interpretación de resultados.

2. Gradientes de Precipitación. Estado del Arte

Douguédroit y Saintignon (1984), definen el gradiente pluviométrico como una medida de la distribución del agua precipitada en una región en función de la altura sobre el nivel del mar, en donde generalmente, a medida que se asciende en altitud, la cantidad de precipitación tiende a aumentar hasta un óptimo, a partir del cual tiende a disminuir gradualmente. Las características altitudinales de dicho gradiente pluviométrico son influenciadas por factores como la topografía, la distancia al mar y la rugosidad del terreno. En las regiones montañosas de clima templado, la variabilidad espacial del gradiente pluviométrico se ve afectada por el efecto de abrigo, por ejemplo, la precipitación es mayor en las vertientes a barlovento que en las vertientes a sotavento. Sin embargo, otros factores biogeográficos hacen difícil la determinación del gradiente pluviométrico altitudinal para determinados lugares.

Por ejemplo, en climas mediterráneos, conforme con Del Valle y San Roman (1994), el gradiente pluviométrico en la vertiente norte del Macizo del Moncayo, entre Zaragoza y Soria, España, oscila alrededor de los 43 mm por cada 100 m de ascenso, mientras que en la zona sur es de 37 mm /100 m. Además, en la vertiente norte se suelen encontrar altitudes superiores a 1900 metros sobre el nivel del mar (msnm), donde se alcanza el óptimo pluviométrico⁴, mientras que en la vertiente sur la

⁴ Las precipitaciones aumentan con la altitud hasta llegar a la cota óptima pluvial u óptimo pluviométrico, a partir del cual se registran precipitaciones menores, esto se aprecia claramente en regiones con alturas superiores a los 2000 msnm.

precipitación disminuye antes de llegar a tal altitud debido a la pérdida de humedad relativa de las masas de aire.

Por su parte, en climas tropicales, Condit *et al.*, (2004) observaron que la precipitación media anual en el Fuerte Sherman (costa atlántica de Panamá) es de 2892 mm a los 25 msnm; en la Isla Barro Colorado (centro del istmo panameño) es de 2616 a los 25 msnm; mientras que en la Ciudad de Panamá (costa pacífica) es de 2030 mm a los 20 msnm, de donde se puede inferir que la latitud, el relieve y la circulación general de la atmosfera tienen un mayor efecto sobre el gradiente pluviométrico que la continentalidad en regiones ístmicas próximas al Ecuador.

Este hecho se vio reforzado con el estudio del gradiente pluviométrico que Ceballos *et al.* (2004), realizó a lo largo de un transecto de 130 km en la cuenca del Duero, España, pues reveló la marcada diferencia altitudinal entre la zona más seca, situada en el extremo noroccidental, la cual presenta una precipitación media anual inferior a 400 mm, mientras que la zona más húmeda, ubicada en el suroeste, supera los 1000 mm, donde la drástica variación en la precipitación está relacionada con la presencia de la Cordillera Central, que actúa como barrera orográfica para los sistemas frontales procedentes del oeste.

Lo mismo ocurre en climas áridos, como lo atestigua el análisis exhaustivo del gradiente pluviométrico que realizó en Túnez, Slimani *et al.*, (2007), quien revela que las marcadas diferencias altitudinales (entre el norte y el sur), son el resultado de factores locales (o subgradientes altitudinales, como él los nombra), que alteran al gradiente medio continental de 7 mm por km de continentalidad.

De acuerdo con Ruiz-Sinoga *et al.*, (2010), en el sur de España, entre la porción alta de Gérgal a 900 msnm y la porción baja de Gaucín a 500 msnm, existe una diferencia de 860 mm en tan solo 400 metros de altitud, lo que evidencia la marcada influencia de la topografía sobre el régimen de lluvias. Es útil señalar que, este gradiente pluviométrico se ve reflejado en las características de la cubierta vegetal, donde la cobertura pasa de ser superior al 80% en condiciones húmedas a apenas un 35% en condiciones semiáridas, lo mismo puede decirse de las propiedades físico-químicas del suelo, como del contenido de materia orgánica

y la estabilidad de agregados, puesto que también se ven afectados por las diferencias pluviométrico altitudinales.

Mandujano y Naranjo (2010), por su parte, evidencian que la biomasa animal aumenta con la precipitación, alcanzando un máximo entre los 1,000 y 1,500 mm anuales, para luego disminuir a partir de los 1,500 mm. Por ejemplo, en los bosques secos tropicales con precipitaciones entre 750 y 1,000 mm, la biomasa de ungulados varía considerablemente, desde 618 kg/km² en México hasta 11,595 kg/km² en Tanzania, mientras que, en los bosques húmedos tropicales con precipitaciones superiores a los 2200 mm, la biomasa oscila entre 222 kg/km² en México y 765 kg/km² en Gabón.

Sin embargo, es en la Meseta Tibetana, donde se aprecia cómo la topografía juega un papel importante en la formación del monzón asiático, donde el óptimo pluviométrico, o altura máxima de precipitación anual, del lado de barlovento de la Meseta Tibetana (al oeste de las montañas Tianshan, al sur del Himalaya y al suroeste de las montañas Hengduan) se alcanza a los 2000 msnm, mientras que en las zonas norte e interior de la Meseta Tibetana se alcanza a los 4000 msnm (Li *et al.*, 2021). Al respecto, esta variación se atribuye a diferencias en la riqueza de especies, la textura del suelo y el contenido de carbono, que limitan el crecimiento de la vegetación de manera distinta a lo largo del gradiente de precipitación (Yang *et al.*, 2010).

Mientras que, en el páramo ecuatoriano, la precipitación muestra una notable variabilidad a lo largo del gradiente altitudinal. Según un estudio de Muñoz, Céleri y Feyen (2016), en el observatorio de Chirimachay a 3298 msnm, se registra un promedio anual de 2540 mm, o bien, en Toreadora a 3955 msnm, la precipitación total es de 2407 mm. Sin embargo, en la zona oriental de la Cordillera de los Andes, entre los 400 y 800 msnm se da un óptimo pluviométrico de 2000 mm de lluvia anual (Niessner, *et al.*, 2019), entre tanto, la zona andina del sur del Ecuador muestra notables diferencias altitudinales en la precipitación, con variaciones desde 700 mm hasta 3000 mm anuales (Urdiales y Céleri, 2018). Esto evidencia que la cantidad de precipitación no disminuye uniformemente con la altitud, sino que está dominada por los efectos orográficos locales propios de la Cordillera de los Andes.

Como se puede apreciar, y de acuerdo con Anders y Nesbitt (2015), el gradiente pluviométrico en los trópicos muestra una marcada variabilidad en comparación con las regiones de latitudes medias, puesto que, si en las latitudes medias la precipitación tiende a aumentar gradualmente con la elevación, en los trópicos, los máximos de precipitación se pueden encontrar desde elevaciones relativamente bajas (como en los casos de Panamá o Hawái), pero también en zonas altas, por ejemplo, en Nueva Guinea, el máximo de precipitación, en función de cada región local, se puede ubicar entre los 1000 y 2000 msnm, mientras que en los Andes peruanos el máximo de precipitación ronda los 1000 msnm, en los Himalaya, éste se ubica aproximadamente a partir de los 2000 msnm.

Este comportamiento se asocia a diferencias en los mecanismos de precipitación, como la convección disparada por la orografía, el ascenso forzado por los vientos alisios o los monzones. Al respecto, es importante señalar que tanto en Etiopía como en México el máximo de precipitación tiene unos márgenes altimétricos muy amplios que van de los 0 a los 2000 msnm (Anders, y Nesbitt, 2015; Tovar, *et al.* 2022). Por lo que es necesario desagregar las características de tales gradientes pluviométricos para tener una tipificación más precisa de sus complejos regímenes pluviométricos.

3. Área de Estudio

El análisis contempla toda la superficie continental de la República Mexicana, conforme al Instituto Nacional de Estadística y Geografía (INEGI, 2017), que representan 1,960,189 km², la cual para fines climatológicos podría subdividirse, estudiarse y representarse mediante dos grandes zonas, delimitadas a partir de criterios geográficos: 1) la zona intertropical, correspondiente a todas las tierras situadas al sur del trópico de cáncer y 2) la zona extratropical, conveniente para referirse a todas las tierras situadas al norte de dicho trópico.

A su vez, las tierras ubicadas dentro de la zona intertropical, pueden subdividirse en función del parte aguas, de ese modo se tiene 1) la zona intertropical de la vertiente del Golfo de México y 2) la zona intertropical de la vertiente del Océano Pacífico. De igual modo, las tierras ubicadas en la zona extratropical, también, pueden subdividirse en función del

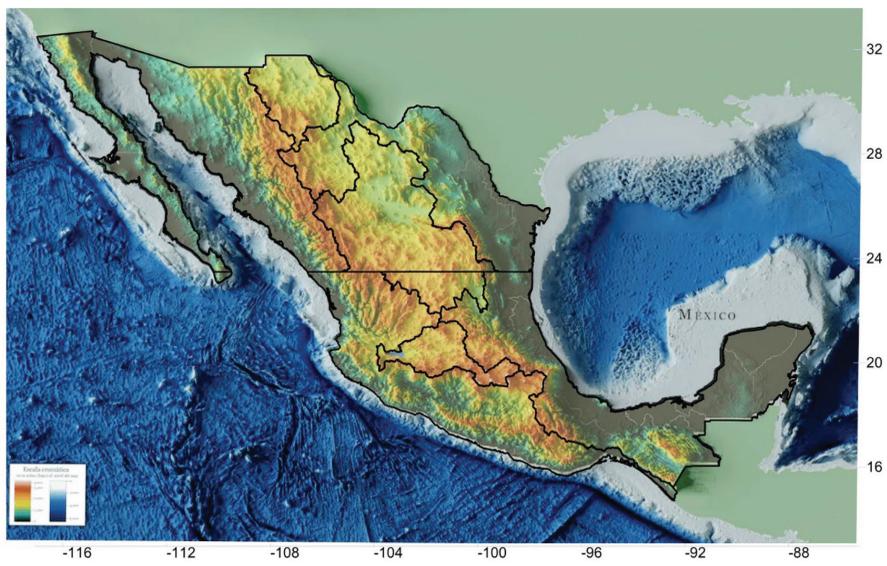
parte aguas, quedando 1) la zona extratropical de la vertiente del Golfo de México y 2) la zona extratropical de la vertiente del Océano Pacífico. El altiplano mexicano sería la última gran zona climática ubicada siempre a sotavento. En síntesis, tenemos cinco grandes zonas climáticas (figura 1), a saber:

1. Zona Intertropical de la vertiente del Golfo de México.
2. Zona Intertropical de la vertiente del Océano Pacífico.
3. Zona Extratropical de la vertiente del Golfo de México.
4. Zona Extratropical de la vertiente del Océano Pacífico.
5. Altiplano Mexicano.

La Zona Intertropical de la vertiente del Golfo de México tiene 435,553.0 km², abarca toda la península de Yucatán, luego se extiende prácticamente por todo el centro norte de Chiapas, norte de Oaxaca y todo Veracruz; la Zona Intertropical de la vertiente del Océano Pacífico cuenta con 370,598.3 km², abarca desde la Sierra del Soconusco,

Figura 1

Zonas climáticas en función del gradiente de precipitación



Fuente: Elaboración propia con base en CONABIO, 2007.

Chiapas, sur de Oaxaca, Guerrero, Colima, oeste de Jalisco, suroeste de Michoacán, Nayarit y la punta sur de la península de Baja California; la Zona Extratropical de la vertiente del Golfo de México cubre 279,069.4 km², abarca el estado de Tamaulipas, Nuevo León, norte de Coahuila y centro sur de Chihuahua; la Zona Extratropical de la vertiente del Océano Pacífico es de 432,195.5 km², corre desde la península de Baja California, además de Sonora y Sinaloa; en tanto el Altiplano Mexicano se compone de 442,772.8 km², y se encuentra fragmentado en tres porciones, la norte en el estado de Chihuahua, la mesa central abarca Durango, suroeste de Coahuila, noreste de Zacatecas, norte de San Luis Potosí, mientras que su porción sur abarca Guanajuato, oeste de Jalisco y norte de Michoacán. De tales regiones se intenta definir las especificidades gradiente pluviométricas, cuya metodología se explica en el siguiente apartado.

4. Datos y Metodología

La delimitación regional de estaciones meteorológicas ayudó a caracterizar los regímenes de precipitación de los gradientes pluviométricos de la República Mexicana, dicha delimitación fue discutida y justificada tanto desde el punto de vista socio-espacial propuesto por Kandziora *et al.* (2024) para conocer la distribución de los ecosistemas alpino tropicales en función de promedios climáticos del trimestre más frío y más cálido, como del de Mahe *et al.* (2001) para lograr una delimitación morfoclimática de unidades territoriales homogéneas con la intención de poder mapear y cartografiar los gradientes pluviométricos a escala nacional. En ese sentido, la propuesta analizó 3036 estaciones meteorológicas, agrupadas en cuatro zonas climáticas, a saber: Zona Intertropical de la vertiente del Golfo de México, Zona Intertropical de la vertiente del Océano Pacífico, Zona Extratropical de la vertiente del Golfo de México y Zona Extratropical de la vertiente del Océano Pacífico. (Figura 2).

Los datos concernientes a la precipitación su obtuvieron de García (2004), cuya base de datos contiene información de tres mil estaciones meteorológicas con los atributos siguientes: número de estación meteorológica, nombre de estación, Estado de la estación, altitud de la estación, longitud en grados minutos segundos, latitud en grados minutos segundos, temperatura promedio por mes, temperatura promedio anual, milímetros (mm) de precipitación por mes, milímetros (mm) de

precipitación total anual, porcentaje de precipitación invernal, límites en las condiciones de temperatura o cociente (p/t)⁵, oscilación térmica y nomenclatura de tipo de clima.

Comúnmente las anomalías de precipitación suelen elaborarse tomando en cuenta un enfoque temporal, ya que en la mayoría de los estudios casi siempre se busca conocer la escasez o el superávit de la precipitación para un año determinado, sin embargo, las anomalías de precipitación de carácter espacial sirven para comprender, de un conjunto de lugares, la influencia local, tanto de los elementos geográficos (altitud) como de los factores externos del clima (circulación general de la atmósfera).

Uno de los métodos más empleados para agrupar las estaciones meteorológicas en función de su altitud, son las medidas de tendencia central, las cuales se refieren a una técnica estadística empleada para resumir en un solo valor a un conjunto de valores; los resultados pretenden evaluar en qué medida los datos del conjunto analizado son semejantes entre sí, por ejemplo, el valor medio de la muestra empleada en este trabajo (3 mil estaciones meteorológicas) se asume como numéricamente muy cercano a la realidad topográfica de la variable medida. Su expresión matemática es:

$$\bar{x} = \frac{1}{n} \sum_{i=1}^n xi = \frac{x1 + x2 + \dots + xn}{n}$$

donde:

\bar{x} = media o promedio.

n = suma de todos los datos recolectados (cantidad de estaciones meteorológicas).

$\sum_{i=1}^n$ = sumatoria de las frecuencias (altitudes de todos los casos recolectados).

X^1 = cualquiera de los valores de n .

⁵ El P/T, también conocido como índice de Lang es un estimador de eficiencia de la precipitación en relación con la temperatura. Éste se calcula como el cociente entre la precipitación total anual y la temperatura media anual de un lugar.

Ahora bien, recordemos que la moda de un conjunto de números es el valor que ocurre con mayor frecuencia, el cual se puede expresar estadísticamente de la siguiente forma:

$$M = L1 + \left(\frac{D1}{D1 + D2} \right) C$$

donde:

M = moda.

$L1$ = frontera inferior de la clase modal (clase que contiene a la moda).

$D1$ = exceso de la frecuencia modal sobre la de la clase inferior inmediata.

$D2$ = exceso de la frecuencia modal sobre la clase superior inmediata.

c = anchura del intervalo de clase modal.

En cuanto a la moda, se tuvieron que trazar intervalos modales para ponderar la altura para cada una de las cuatro zonas analizadas, un ejemplo se expone en el cuadro 1. De forma concomitante, los volúmenes de precipitación se interpolaron a los rangos altitudinales resultantes.

La red de estaciones meteorológicas de la zona intertropical de la vertiente del Golfo de México es de 1136, de las cuales, el 24.8% de ellas se distribuyen a lo largo del piso altitudinal de los 0 msnm; luego el 12.2% de las estaciones se corresponden con el piso de los 100 msnm; le sigue 5.6% dispuesto para el piso de los 2300 msnm; mientras que los pisos 200 y 2200 msnm cuentan cada uno con un 5.5% de estaciones meteorológicas; el resto de los 28 pisos analizados tienen una representación inferior al 4%.

La red de estaciones meteorológicas de la zona intertropical de la vertiente del Océano Pacífico es de 1096, de las cuales, el 6.8% de ellas se distribuyen a lo largo del piso altitudinal de los 0 msnm; luego el 3.9% de las estaciones se corresponden con el piso de los 100 msnm; le sigue 3.2% dispuesto para el piso de los 200 msnm; mientras que los pisos 300 y 400 msnm cuentan cada uno con un 3.0% de estaciones meteorológicas; el resto de los 29 pisos analizados tienen una representación inferior al 2.5%.

Cuadro 1*Intervalos modales de la zona intertropical de la vertiente del Golfo de México*

Altitud msnm	Núm. de estaciones	Altitud msnm	Núm. de estaciones	Altitud msnm	Núm. de estaciones
0	282	1100	21	2200	62
100	139	1200	15	2300	64
200	62	1300	20	2400	20
300	44	1400	10	2500	17
400	24	1500	20	2600	10
500	24	1600	18	2700	12
600	36	1700	14	2800	12
700	28	1800	17	2900	4
800	21	1900	25	3000	1
900	16	2000	38	3100	4
1000	29	2100	25	3200	2

Fuente: elaboración propia con base en García (2004).

La red de estaciones meteorológicas de la zona extratropical de la vertiente del Golfo de México es de 233, de las cuales, el 15.9% de ellas se distribuyen a lo largo del piso altitudinal de los 0 msnm; luego el 9.9% de las estaciones se corresponden con el piso de los 200 msnm; le sigue 9.4% dispuesto para el piso de los 100 msnm; le sigue 9.0% dispuesto para el piso de los 300 msnm; mientras que los pisos 400 y 1200 msnm cuentan cada uno con un 7.5% de estaciones meteorológicas; el resto de los 18 pisos analizados tienen una representación inferior al 4%.

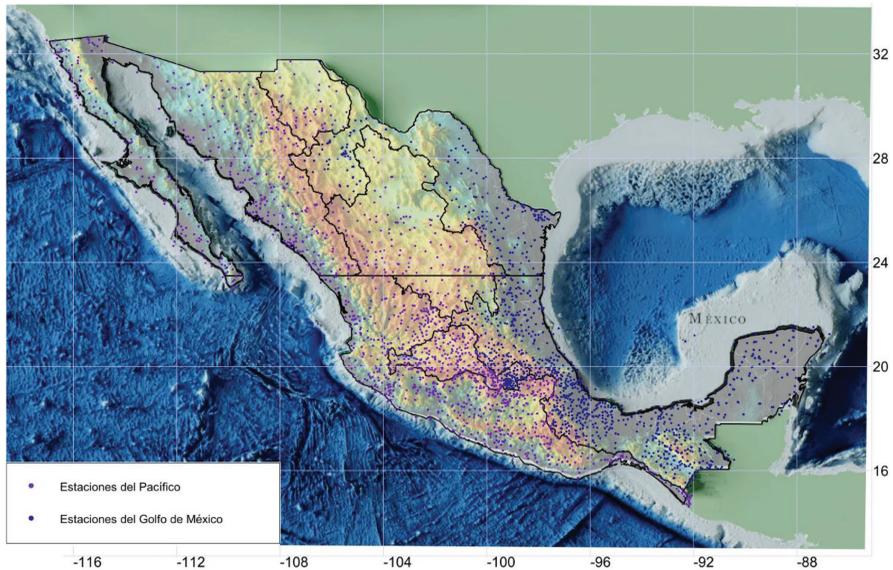
La red de estaciones meteorológicas de la zona extratropical de la vertiente del Océano Pacífico es de 574, de las cuales, el 19.1% de ellas se distribuyen a lo largo del piso altitudinal de los 0 msnm; luego el 10.3% de las estaciones se corresponden con el piso de los 100 msnm; le sigue 6.8% dispuesto para el piso de los 200 msnm; luego el piso 300 msnm cuentan con un 5.6%; entre tanto, los pisos 1900, 400, 1300, 1500 y 2000 msnm cuentan con 4.7%, 4.4%, 4.4%, 4.0% y 4.0%

respectivamente, el resto de los 20 pisos analizados tienen una representación inferior al 3.5%.

Como es de apreciarse, la gran mayoría de las estaciones meteorológicas están distribuidas sobre el piso 0 y 100 del territorio, atendiendo a la lógica de un país costero tropical oceánico, cuando en realidad, hace falta que más estaciones meteorológicas se distribuyan sobre la realidad árido alpina del relieve mexicano, pues de ese modo se abonará en la comprensión del papel que juegan los elementos del clima (altitud, longitud, latitud, influencia marítima y continentalidad) en el condicionamiento local, sustancial, espacio temporal, de los regímenes altitudinales de precipitación de las distintas vertientes del territorio mexicano, tanto de las zonas intertropicales como extratropicales de las vertientes del Golfo y del Océano Pacífico, mismas que se discuten a continuación.

Figura 2

Distribución geográfica de la red nacional de estaciones meteorológicas de México



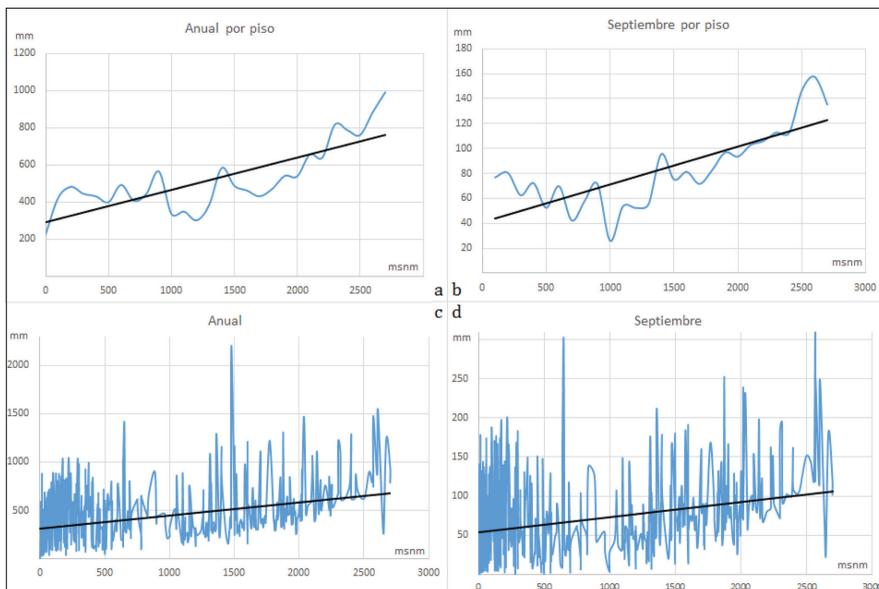
Fuente: Elaboración propia con base en García, 2004.

5. Discusión y resultados

De las cuatro regiones analizadas, solo en la zona extratropical de la vertiente del Océano Pacífico, se cumple, relativamente, la definición estándar del gradiente pluviométrico, puesto que: a medida que se asciende en altitud, estadísticamente, la cantidad de precipitación, conforme a la línea de tendencia, tiende a aumentar pasando por cuatro óptimos ubicados: a los 650, 1500⁶, 2000 y 2600 msnm con 1400, 2200, 1470 y 1550 mm respectivamente (Gráfica 1a y 1c). Las características altitudinales de dicho gradiente pluviométrico son influenciadas por factores como la elevación de las montañas, la relativa proximidad al mar y la evotranspiración de los parches boscosos de coníferas.

Gráfica 1

Gradiente pluviométrico la zona extratropical de la vertiente del Océano Pacífico



Fuente: elaboración propia con base en García (2004).

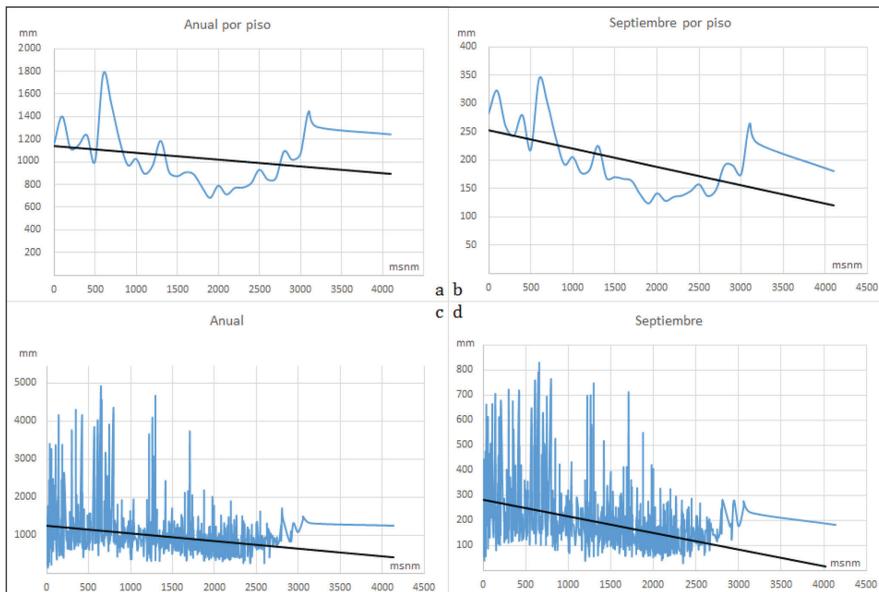
⁶ Altitud sobre la que se encuentra aproximadamente la presa Las Lajas (1540 msnm) en el municipio de Buenaventura Chihuahua.

Esa progresión o aumento de la precipitación con la altura, que experimenta la zona extratropical de la vertiente del Océano Pacífico, también se aprecia en el mes más lluvioso del año, septiembre (Gráfica 1b y 1d), el cual presenta cinco picos óptimos, tres de los cuales superan los 250 mm, como en el caso de: los 650, 1875 y 2570 msnm, con 301, 252 y 312 mm respectivamente. Donde, geoestadísticamente, su línea de tendencia sugiere que, por cada 100 m de ascenso, en septiembre, el gradiente pluviométrico gana 11.5 mm de lluvia, en tanto que anualmente la ganancia es de 81.7 mm por 100 de altitud.

Ahora bien, en la zona intertropical de la vertiente del Océano Pacífico, no se cumple con un gradiente pluviométrico ascendente, puesto que: a medida que se asciende en altitud, estadísticamente, la cantidad de precipitación, conforme a la línea de tendencia, tiende a disminuir (Gráfica 2b), de hecho, el análisis modal arroja solo dos óptimos pluviométrico ubicados: a los 600 y 3100 msnm con 1780 y 1450 mm de lluvia anual respectivamente (Gráfica 2a).

Gráfica 2

Gradiente pluviométrico la zona intertropical de la vertiente del Océano Pacífico



Fuente: elaboración propia con base en García (2004).

Ese decremento o cuña descendente de la precipitación conforme a su altitud, que experimenta la zona intertropical de la vertiente del Océano Pacífico, también se aprecia en el mes de septiembre, ya que, conforme a su análisis modal (Gráfica 2b), éste, presenta los mismos dos óptimos pluviométrico, a los 600 y 3100 msnm con 344 y 264 mm de lluvia mensual respectivamente. Donde, geoestadísticamente, de sus 600 a sus 2000 msnm, su gradiente pluviométrico anual por cada 100 m de ascenso pierde 127 mm, luego de allí, de los 2000 a sus 3100 msnm tal gradiente por cada 100 m de ascenso gana 130 mm. En efecto, la forma geométrica de dicho gradiente se asemeja a una parábola cuyo vértice se ubica a los 1900 msnm (Gráfica 2a y 2b).

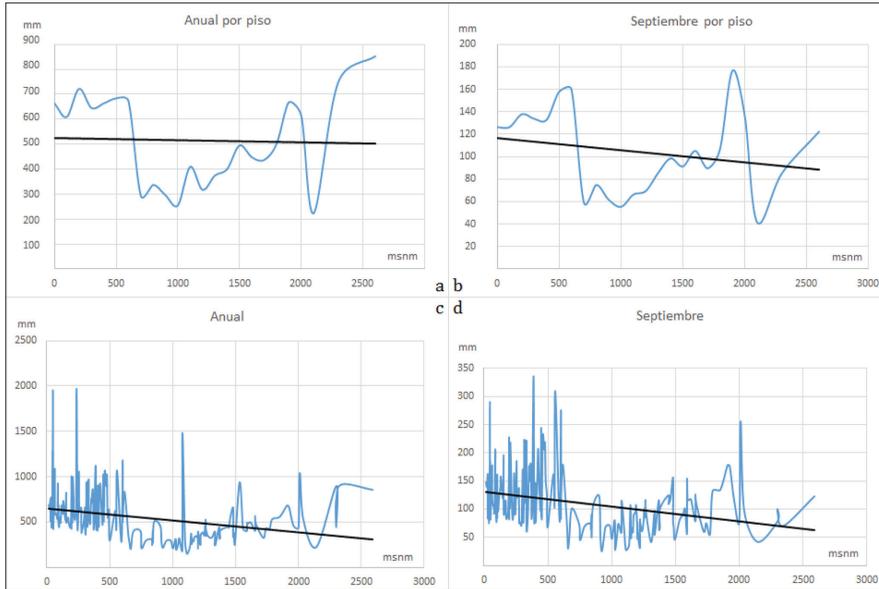
Para el caso del Atlántico, en la zona extratropical de la vertiente del Golfo de México, conforme a la línea de tendencia, se presenta un ligerísimo gradiente pluviométrico (Gráfica 3a), que va de sus 700 a sus 1900 msnm, donde por cada 100 m de ascenso solo gana 31 mm. Más bien esta zona presenta dos pisos pluviométricos: el primero de ellos presenta una media de precipitación de 650 mm para las altitudes de 0 a 600 msnm; el segundo piso tiene una precipitación de 300 mm para las altitudes de 650 a 1500 msnm; imbricado en ello están tres óptimos pluviométricos: a los 45, 200 y 1100 msnm con 1950, 1970 y 1480 mm respectivamente (Gráfica 3c).

Tal configuración pluviométrica es más marcada en el gráfico de septiembre, donde se distinguen claramente los dos pisos (Gráfica 3b), el ligero gradiente y cuatro picos óptimos. El primer piso tiene una precipitación media de 140 mm para las altitudes de 0 a 600 msnm, el siguiente piso es de 66 mm de los 650 a los 1100 msnm, de allí inicia el ligero gradiente pluviométrico y culmina hasta los 1800 msnm, donde por cada 100 m de ascenso gana 23 mm. Siendo los óptimos pluviométricos para septiembre: a los 45, 385, 600 y 2100 msnm con 290, 335, 290 y 255 mm respectivamente (Gráfica 3d).

Ahora bien, en la zona intertropical de la vertiente del Golfo de México, no se cumple con un gradiente pluviométrico ascendente, ya que: a medida que se asciende en altitud, estadísticamente, la cantidad de precipitación, conforme a la línea de tendencia, tiende a disminuir, de hecho, el análisis modal (Gráfica 4a) presenta un solo óptimo pluviométrico bien definido a los 1000 msnm con 5876 mm de precipitación anual.

Gráfica 3

Gradiente pluviométrico la zona extratropical de la vertiente del Golfo de México



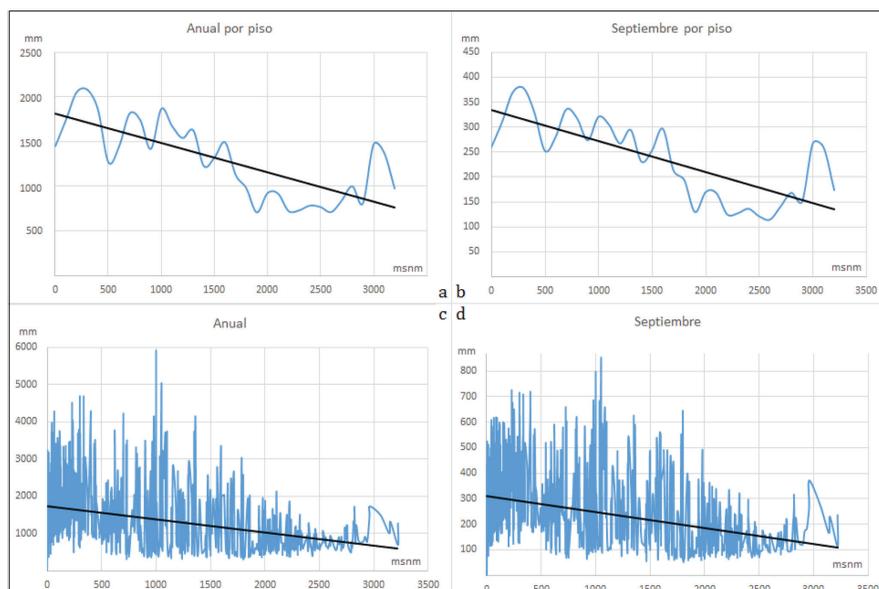
Fuente: elaboración propia con base en García (2004).

Geoestadísticamente, su gradiente pluviométrico anual por cada 100 m de ascenso pierde 182 mm (Gráfica 4c). Las características somero altitudinales tanto de la península de Yucatán, como de la amplia llanura costera del golfo, más la proximidad al mar y la evotranspiración de la selva alta perennifolia, hacen que este gradiente pluviométrico se comporte como el de una región costera tropical oceánica, semejante al de Hawái o Panamá (Anders y Nesbitt, 2015; Condit *et al.*, 2004).

La cuña descendente descrita, que experimenta la zona intertropical de la vertiente del Golfo de México, se aprecia con mayor claridad en el mes de septiembre (Gráfica 4b), ya que presenta un único óptimo pluviométrico, distinguible a los 1050 msnm con 844 mm de lluvia mensual. Es útil señalar que su gradiente pluviométrico mensual por cada 100 m de ascenso pierde 26.2 mm.

Gráfica 4

Gradiente pluviométrico la zona intertropical de la vertiente del Golfo de México



Fuente: elaboración propia con base en García (2004).

6. Conclusiones

En México, el comportamiento de las lluvias tiene múltiples características, sin embargo, a escala macro regional, se pueden diferenciar cuatro gradientes pluviométricos, con especificidades claramente diferenciables, por ejemplo: en la zona extratropical de la vertiente del Océano Pacífico se experimenta una progresión o aumento de la precipitación con la altura a razón de 80 mm por 100 de altitud aproximadamente. Es útil señalar que esta región es la única cuyo gradiente se parece al de las zonas templadas del mundo.

Las otras tres regiones tienen puntualizaciones *siu generis*, como en el caso de la zona intertropical de la vertiente del Océano Pacífico y la zona intertropical de la vertiente del Golfo de México, donde a medida que se asciende en altitud, la cantidad de precipitación tiende a disminuir, siendo muchísimo más pronunciado y marcado el fenómeno en ésta última.

Es decir, en la vertiente intertropical de la vertiente del Océano Pacífico por cada 100 m de ascenso se pierden 127 mm, mientras que en la vertiente del Golfo de México por cada 100 m de ascenso se pierden 182 mm. Bajo lo expuesto, se sabe que las precipitaciones anuales en las montañas de la vertiente del Golfo de México, situadas por arriba de los 1 800 msnm, en promedio, son ligeramente 50 mm mayores en comparación con la vertiente del Pacífico.

Finalmente, en la vertiente extratropical del Golfo de México se presentan dos pisos pluviométricos: el primero de ellos presenta una media de precipitación de 650 mm para las altitudes de 0 a 600 msnm; el segundo piso tiene una precipitación de 300 mm para las altitudes de 650 a 1500 msnm. En contexto, se infiere que las precipitaciones anuales en las montañas situadas por arriba de los 1 800 msnm e inmersas en el gradiente intratropical de la vertiente del Golfo de México, en promedio, son 200 mm mayores en comparación con las de la vertiente del Pacífico.

Al respecto, si bien es cierto que los patrones de precipitación son complejos y a veces hasta impredecibles, la tipificación expuesta abona a la comprensión regional de la dinámica pluviométrica y climatológica de un país trópico intermontano, con fuertes efectos de continentalidad al norte y marcados efectos de maritimidad al sur, de gran utilidad para simulaciones o escenarios futuros bajo condiciones de cambio climático acelerado.

Referencias

- Anders, A. M., y Nesbitt, S. W. (2015). Altitudinal precipitation gradients in the tropics from Tropical Rainfall Measuring Mission (TRMM) precipitation radar. *Journal of Hydrometeorology*, 16(1), 441-448.
- Andrade, M., y Medrano, O. R. (2021). Historical precipitation patterns in the South-Southeast region of Mexico and future projections. *Earth Sciences Research Journal*, 25(1), 69-84.
- Ceballos, A., Martínez-Fernández, J., y Luengo-Ugidos, M. Á. (2004). Analysis of rainfall trends and dry periods on a pluviometric gradient representative of Mediterranean climate in the Duero Basin, Spain. *Journal of Arid Environments*, 58(2), 215-233.

- CONABIO. (2007). *Cuencas Hidrográficas de México. México: Comisión Nacional para el Conocimiento y Uso de la Biodiversidad*. http://geoportal.conabio.gob.mx/metadatos/doc/html/cue250k_07gw.html
- Condit, R., Aguilar, S., Hernandez, A., Perez, R., Lao, S., Angehr, G.,... y Foster, R. B. (2004). Tropical forest dynamics across a rain-fall gradient and the impact of an El Nino dry season. *Journal of Tropical Ecology*, 20(1), 51-72.
- Del Valle, J. y San Roman, J. (1994). Gradiente pluviométrico en el macizo del Moncayo (Zaragoza y Soria). *Geographica*, 31, 71-82.
- Douguédroit, A., y De Saintignon, M. F. (1984). Les gradients de températures et de précipitations en montagne. *Revue de géographie alpine*, 72(2), 225-240.
- García, Enriqueta (2004). *Modificaciones al sistema de clasificación climática de Köppen (para adaptarlo a las condiciones de la República Mexicana)*. México: Instituto de Geografía, Universidad Nacional Autónoma de México.
- INEGI. (2017). *Anuario estadístico y geográfico de los Estados Unidos Mexicanos*. Aguascalientes, México: Instituto Nacional de Estadística y Geografía.
- Kandziora, M., Gorospe, J. M., Salomon, L., Vásquez, D. L., Vargas, M. P., Kolář, F., ... y Schmickl, R. (2024). The ghost of past climate acting on present day plant diversity: Lessons from a climate based delimitation of the tropical alpine ecosystem. *Journal of Systematics and Evolution*, 62(2), 275-290.
- Li, G., Yu, Z., Wang, W., Ju, Q., & Chen, X. (2021). Analysis of the spatial Distribution of precipitation and topography with GPM data in the Tibetan Plateau. *Atmospheric Research*, 247, 105259.
- Mahe, G. I. L., L'hote, Y., Olivry, J. C., y Wotling, G. (2001). Trends and discontinuities in regional rainfall of West and Central Africa: 1951–1989. *Hydrological sciences journal*, 46(2), 211-226.
- Mandujano, S., y Naranjo, E. J. (2010). Ungulate biomass across a rain-fall gradient: a comparison of data from Neotropical and Palaeo-tropical forests and local analyses in Mexico. *Journal of Tropical Ecology*, 26(1), 13-23.

- Méndez, J., Návar, J. D. J., y González, V. (2008). Análisis de tendencias de precipitación (1920-2004) en México. *Investigaciones geográficas*, 65, 38-55.
- Muñoz, P., Célleri, R., y Feyen, J. (2016). Effect of the resolution of tipping-bucket rain gauge and calculation method on rainfall intensities in an Andean mountain gradient. *Water*, 8(11), 534.
- Nazarian, R. H., Brizuela, N. G., Matijevic, B. J., Vizzard, J. V., Agostino, C. P., y Lutsko, N. J. (2024). Projected Changes in Mean and Extreme Precipitation Over Northern Mexico. *Journal of Climate*, 37, 2405 – 2422.
- Niessner, A., Küppers, M., Graham, J., Valenzuela, L., Güney, A., Remmele, S., y Zimmermann, R. (2020). Climate and seasonal rainfall anomalies along an elevational gradient in the El Sira Mountains, Peru, and their impacts on tree radial growth. *Journal of forestry research*, 31, 1521-1538.
- Ruiz Sinoga, J. D., Garcia Marín, R., Martínez-Murillo, J. F., y Gabarrón Galeote, M. A. (2010). Pluviometric gradient incidence and the hydrological behaviour of soil surface components (southern Spain). *Land degradation & development*, 21(5), 484-495.
- Slimani, M., Cudennec, C., y Feki, H. (2007). Structure du gradient pluviométrique de la transition Méditerranée–Sahara en Tunisie: déterminants géographiques et saisonnalité. *Journal des Sciences Hydrologiques*, 52(6), 1088-1102.
- Tovar, R., Vargas, R., y Rueda, J. (2022). “Cambio climático y perspectivas agroalimentarias en el noroeste de México” en: Olivera, M. y Gustavo Sosa (Coords). *Impactos del cambio climático: una visión desde México*. México: Universidad Autónoma Metropolitana–Unidad Cuajimalpa, Instituto de Investigaciones Dr. José María Luis Mora. (pp 95-116).
- Urdiales, D., y Célleri, R. (2018). Pronóstico de la ocurrencia de precipitación diaria en un gradiente altitudinal en el Sur del Ecuador mediante un generador climático. *Enfoque UTE*, 9(3), 29-41.
- Yang, Y., Fang, J., Fay, P. A., Bell, J. E., y Ji, C. (2010). Rain use efficiency across a precipitation gradient on the Tibetan Plateau. *Geophysical Research Letters*, 37(15).

