

Análisis de la distribución espacial de la precipitación anual (1979-2014) aplicando métodos de interpolación en la Región Occidental del Paraguay

Analysis of the spatial distribution of annual precipitation (1979-2014) applying interpolation methods in the Western Region of Paraguay

Monserrat Victoria García-Calabrese¹ María Teresa Paniagua² Elena Chicaiza³

Fecha de recibido: 8 de junio de 2021 Fecha de aceptado: 15 de noviembre de 2021

Resumen

Los eventos de lluvia menos frecuente o con alta intensidad, seguidos de periodos largos de sequía, someten a excesivo estrés a un ecosistema

- Facultad de Ingeniería, Universidad Nacional de Asunción (UNA), Paraguay. XLVII Curso Internacional de Geografía Aplicada 2020, Centro Panamericano de Estudios e Investigaciones Geográficas (CEPEIGE), Ecuador, correo electrónico: mgarcia@ing.una.py. ORCID: https://orcid.org/0000-0003-4706-2914
- Investigación para el Desarrollo, Paraguay.; XLVII Curso Internacional de Geografía Aplicada 2020, Centro Panamericano de Estudios e Investigaciones Geográficas (CEPEIGE), Ecuador, correo electrónico: tpaniagua@desarrollo.org.py
- Universidad Politécnica de Madrid, España. XLVII Curso Internacional de Geografía Aplicada 2020, Centro Panamericano de Estudios e Investigaciones Geográficas (CEPEIGE), Ecuador, correo electrónico: elenag.chicaiza@gmail.com. ORCID: https://orcid.org/0000-0003-4975-9344

y pueden aumentar la posibilidad de pérdida de suelo por erosión o aumentar la vulnerabilidad de las comunidades. El Chaco paraguayo es una región dominada por el uso pecuario y vegetación sumamente vulnerable, con escasas lluvias a lo largo del año. Además, posee pocas estaciones meteorológicas para su monitoreo a lo largo del territorio. Por tanto, el uso de métodos geoestadísticos adecuados, presentan una oportunidad para predecir la distribución espacial de la precipitación. En este estudio se obtuvieron datos de precipitación diaria desde 1979-2014 de siete estaciones meteorológicas in situ y se las combinó con datos de reanálisis del Sistema de Pronóstico del Clima (CFSR). Se seleccionaron 400 puntos de los cuales se escogieron al azar 78, contando con un total de 84 puntos de muestreo para interpolar. Se optó por la interpolación de Kriging ordinario y se compararon los variogramas teóricos exponencial, matern, esférico, lineal y gaussiano para la caracterización de la precipitación. De la comparación de los valores obtenidos en el presente estudio, el modelo con ajuste automático, exponencial, matern, lineal y esférico son los que presentaron un menor error, por lo que se los considera adecuados para la estimación de precipitación en el Chaco paraguayo.

Palabras clave: Chaco paraguayo, precipitación, Kriging, interpolación.

Abstract

Less frequent or high intensity rain events followed by long periods of drought put pressure on an ecosystem and can increase the possibility of soil loss due to erosion or increase the vulnerability of communities. The Paraguayan Chaco is a region dominated by livestock use and with extremely vulnerable vegetation that receives little rainfall throughout the year. However, it has very few meteorological stations for monitoring throughout the territory. Thus, geostatistical methods present an opportunity to predict the spatial distribution of precipitation. In this study, daily precipitation data from 1979-2014 were obtained from seven in-situ meteorological stations and combined with reanalysis data from the Climate Forecast System (CFSR). 400 points were selected of which 78 were randomly chosen, with a total of 84 sampling points to interpolate. The ordinary Kriging interpolation was chosen and the theoretical exponential, matern, spherical, linear and Gaussian variograms were compared for the characterization of precipitation. From the comparison of the values obtained in the present study, the model with automatic, exponential, matern, linear and spherical adjustment are those that present a lower error, for which they are considered adequate for estimating precipitation in the Paraguayan Chaco.

Key words: paraguayan Chaco, precipitation, Kriging, interpolation.

1. Introducción

En las últimas décadas el planeta Tierra se encuentra sufriendo un acelerado cambio climático. Este proceso es un fenómeno cíclico natural que tarda millones de años en ocurrir, pero la actividad humana ha ocasionado su aceleración. Según el Grupo de Expertos Intergubernamentales sobre el Cambio Climático (IPCC, 2014) es prácticamente seguro que la energía de la Tierra haya aumentado considerablemente entre 1971 y 2010 indicando un calentamiento.

Debido a estos cambios constantes en la atmósfera es de suma importancia comprender el comportamiento de las variables climáticas, dicha información nos permite entender y predecir los efectos del cambio climático, que representa en la actualidad un tema obligado en las preocupaciones de toda sociedad y debe ser incluida en la agenda de cualquier gobierno (Díaz Cordero, 2012).

Una de las variables importantes para el control de cambios que se producen en un entorno que afectan a comunidades, tanto social como económicamente, es la precipitación. Las precipitaciones tienen un impacto importante en las actividades humanas. Por ejemplo, la producción agrícola y el suministro de agua urbana, dependen no solo de la cantidad total de lluvia anual recolectada en las presas, sino también de la distribución temporal y espacial de la lluvia. Los eventos frecuentes de lluvia con baja intensidad son beneficiosos para las capas del acuífero y los cultivos. En contraste, los eventos de lluvia menos frecuentes con tasas de alta intensidad seguidas de períodos prolongados de sequía pueden ser devastadores para la producción agrícola, tanto a corto como largo plazo, al degradar la calidad del suelo a través de la erosión y la humificación mecánica (Michaelides, 2009).

En contraste a esta situación, el país cuenta con pocas estaciones meteorológicas cuya distribución no es homogénea entre regiones. El Paraguay es un país que se encuentra en el continente americano, específicamente en el sur, y se divide en dos regiones con características distintas, la Región Oriental y la Región Occidental o Chaco como comúnmente se le conoce.

El área de estudio se ubica en la Región Occidental, que cuenta con mayor superficie y estaciones meteorológicas distribuidas deficientemente. En la mayoría de los casos existen, por las actividades que allí se realizan, estaciones de monitoreo agrícola que muchas veces no poseen datos continuos o completos. Debido a la falta de estos datos meteorológicos in situ, muchas veces se recurre a las funciones disponibles en los sistemas de información geográfica para caracterizar el área con el objeto de describir su comportamiento climático.

En cuanto a la precipitación, se puede destacar el estudio de Weiberlen y Báez (2018), quienes mencionan que en la zona estudiada han utilizado imágenes de dos satélites para describir la precipitación en todo el país y han concluido que ambos productos son buenos para estimar la ocurrencia de eventos de precipitación de baja intensidad de dos a cinco milímetros al día y tienden a sobreestimar eventos de alta precipitación de 40 milímetros al día.

Por otra parte, la región del Chaco está dominada por el uso pecuario v con una vegetación sumamente vulnerable. Entre las regiones referidas existe una marcada diferencia en la cantidad de precipitación que se registra. Mientras en la Región Occidental predomina la seguía, en la Región Oriental la precipitación es mayor. Otra diferencia muy particular es la distribución de la población en el país, en donde hay menor densidad poblacional en la región chaqueña, por lo que gran parte del espacio es aprovechado en rubros dedicados exclusivamente a la producción agropecuaria.

Es así que Mereles et al. (2019) mencionan que existen empresas que prosperan al norte del territorio, dedicadas mayormente a la producción de carne de alta calidad y genética, lo que hace que el país se vea privilegiado con exportación de alta gama, pero a expensas de la modificación de los sistemas naturales. Esto se constata en otro estudio realizado por Prayogi et al. (2020) donde se habla de la exportación de carbón a Europa fruto de la producción a expensas de la vegetación natural del Chaco paraguayo, situación que ha causado un ritmo acelerado de deforestación en el área.

Complementariamente, Kruck (1998) menciona que los datos de precipitación anual del Chaco presentan variabilidades. Él mismo refiere que existe un aumento en la precipitación a lo largo del tiempo posiblemente ocasionado por el cambio climático cuyos efectos quizás se hayan empezado a visualizar desde esa época. Por otro lado, argumenta que este fenómeno se encuentra influenciado por un patrón de aumento cada 20 años con cambios entre períodos húmedos y secos. Asimismo, no se puede descartar las características propias del ecosistema que se ven influenciadas por fenómenos como El Niño o La Niña que son anomalías de circulación general de la atmósfera. Según el modelado de cambio climático de Bidegain et al. (2011), para el Paraguay el patrón de variación de la precipitación se mantuvo constante para la década del 2020, por lo que se registraron mayores precipitaciones al sur de la región oriental y una reducción al norte de la Región Occidental (Chaco Paraguayo).

En cuanto a las técnicas para el análisis y predicción de la distribución espacial de variables climáticas, la interpolación espacial representa una oportunidad de descripción de cualquier variable en el espacio como la precipitación y constituye una herramienta valiosa para predecir su distribución, que puede ser modelada con datos obtenidos in situ o productos del monitoreo satelital. Mckinley et al. (2020) han hecho una revisión de la

geoestadística en donde recalcan que las propiedades de la superficie y el subsuelo de la Tierra son especiales porque están estructuradas en el espacio y el tiempo. La geoestadística se ha desarrollado continuamente para crear modelos estocásticos que representan explícitamente y, por lo tanto, sean apropiados para modelar las propiedades espacio-temporales de una variable regionalizada. Ahí radica su importancia, ya que ayudan a describir datos faltantes en áreas de gran extensión que se desea caracterizar.

La fragilidad de los ecosistemas y la importancia económica en cuanto a la producción en la zona de estudio hacen que la descripción climática, en particular la precipitación, sea de interés. Es así que este estudio tiene como objetivo aplicar métodos de interpolación para describir la precipitación espacial del Chaco paraguayo.

2. Materiales y métodos

El Paraguay cuenta con dos regiones distintivas, la región occidental y la región oriental comúnmente conocida como Chaco, el cual forma parte del Gran Chaco Americano. El Chaco Paraguayo se compone por tres departamentos: Presidente Hayes, Boquerón y Alto Paraguay. La región es conocida por tener una mayor extensión territorial en comparación con la oriental, en cambio, posee una menor densidad poblacional. Según la Dirección General de Estadísticas, Encuestas y Censos (DGEEC, 2018), el territorio chaqueño ocupa una superficie de 246 925 km².

El Chaco paraguayo se encuentra al norte del país (Figura 1), presenta una transición entre clima semiárido y húmedo, caracterizado por largos periodos, con déficit de humedad, ya que la precipitación es menor que la evaporación potencial. En promedio según Kruck (1998) en el Bajo Chaco cercano al río Paraguay se registra la mayor cantidad de precipitación anual con un valor de 1 400 milímetros, que disminuye progresivamente al norte hacía los límites fronterizos con Bolivia, alcanzando una precipitación anual de 500 milímetros aproximadamente. Esto denota una enorme diferencia en una zona de altitud, prácticamente homogénea.

La mayor cantidad de precipitación, durante el año, se registra en el verano (diciembre a marzo), considerándose como la época húmeda. La estación invernal (julio a septiembre), se caracteriza por la condición predominante de sequía. Según Yurrita (2005), la población que habita en el territorio conoce dichas variaciones, sin embargo, las condiciones han ido cambiado a lo largo de los años con épocas húmedas más cortas y sequías más prolongadas lo que hace más difícil llevar a cabo las actividades agrícolas y ganaderas además de disminuir la seguridad hídrica de sus habitantes.

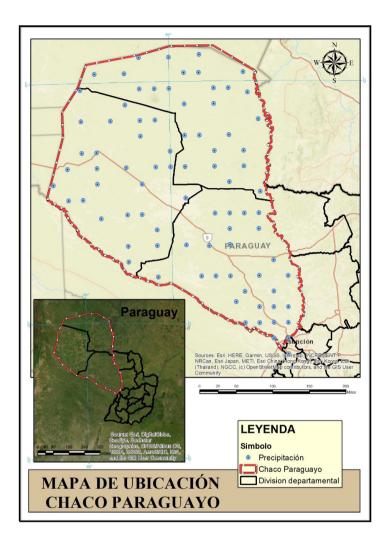


Figura 1. Ubicación área de estudio puntos У muestreo. Fuente: elaboración propia con datos de Global Weather for Swat y Dirección Nacional de Aeronáutica Civil (DINAC).

La metodología contempla tres grandes aspectos:

- 1. la obtención y análisis exploratorio de los datos;
- 2. análisis estructural de los datos; y
- 3. el ajuste y selección del mejor modelo.

Para el análisis de datos se utilizó el software RStudio (Equipo RStudio, 2020), los paquetes utilizados para realizar el kriging fueron automap (Hiemstra y Hiemstra, 2013) y gstat (Pebesma, 2004).

En la primera etapa se obtuvieron los datos de precipitación diaria desde 1979 hasta 2014, de las estaciones meteorológicas de la región obtenida de la Dirección Nacional de Aeronáutica Civil [DINAC], solo siete estaciones contaban con los datos completos del área de estudio, de la página de Global Weather for SWAT (datos CFSR).

El reanálisis del Sistema de Pronóstico del Clima (CFSR) de los Centros Nacionales de Predicción Ambiental (NCEP) se completó durante el período de 36 años, de 1979 a 2014, se diseñó y ejecutó como un sistema global, de alta resolución, acoplando atmósfera-océano-superficie terrestre-sistema de hielo marino, para proporcionar la mejor estimación del estado de estos dominios acoplados durante este período (Dile y Srinivasan, 2014).

Es así que fue descargada una grilla de 400 puntos con datos de precipitación de la Global Weather for SWAT. De los cuales se seleccionaron 78 puntos al azar y en total fueron utilizados 84 puntos de muestreo. Para el análisis exploratorio de los datos se realizaron cálculos estadísticos, histogramas, identificación de valores atípicos y normalización de datos con el objetivo de describirlos.

En la segunda etapa se propuso realizar la interpolación mediante un Kriging ordinario para la caracterización de la precipitación en el Chaco paraguayo. El método Kriging proporciona una solución al problema de la estimación basada en un modelo de variación espacial estocástica. En su formulación original, una estimación, como tal, en un lugar era simplemente una suma lineal o promedio ponderado de los datos en su vecindario, aunque según Haining et al. (2010), el Kriging es una denominación general, ya que existen distintos tipos de modelos para describir el comportamiento de variables espaciales que se desee predecir. Kriging lineal es el método más robusto y conocido, aunque este puede tener funciones lineales y no lineales dependiendo de las variables en estudio.

En el kriging lineal la estimación en cualquier zona es una ponderación lineal de los datos que se tengan y se expresa en la Ecuación 1.

$$Z(S_0) = \sum_{i=1}^{n} \lambda_i Z(S_i) \tag{1}$$

En donde

 S_0 = la ubicación de un punto

 $Z(S_o)$ = la combinación de la ponderación de los datos

 λ i= la ponderación o peso de datos escogidos, las ponderaciones están obligadas a sumar 1 (Haining et al., 2010).

La interpolación Kriging se basa en la definición de, primeramente, variogramas experimentales, los cuales permiten definir el patrón de la variación espacial del fenómeno en estudio. Este patrón se modela tratando de ajustar dicha tendencia a un variograma teórico (Reyes-Cardenas et al., 2019). Esto puede realizarse, usando como base los modelos gaussiano, esférico, exponencial, etcétera.

Se construyó un variograma empírico o experimental y además la nube variográfica. Se construyeron variogramas para cada modelo teórico (exponencial, esférico, matern, gaussiano y lineal), con el objeto de identificar el modelo que mejor se ajusta a los datos. Además se utilizó la función de ajuste automático de variograma teórico del paquete automap, en donde selecciona el modelo que tiene la suma de cuadrados residual más pequeña en comparación al variograma de muestra (Hiemstra y Hiemstra, 2013).

En la tercera etapa se calculó la suma cuadrática ponderada del ajuste de cada variograma y también el error cuadrático medio (RMSE). Según lo mencionado por Gundogdu y Guney (2007), el RMSE se puede utilizar para comparar el rendimiento de varios métodos de interpolación. RMSE es un tipo de desviación estándar generalizada. Aparece cada vez que busca diferencias entre subgrupos u otros efectos o relaciones entre variables. Es el margen que queda cuando ha tenido en cuenta dichas relaciones en sus datos, o cuando ha ajustado un modelo estadístico a los datos. De ahí su otro nombre, variación residual. RMSE se define como la raíz cuadrada de una diferencia cuadrática promedio entre los valores observados y predichos (Ecuación 2).

$$RMSE = \sqrt{\frac{SSE_i}{n}}$$
 (2)

Donde SSE es la suma de errores (valores observados-estimados) n es el número de pares (errores). RMSE se utiliza con frecuencia para evaluar errores en SIG y cartografía. Se probó si las diferencias entre el valor RMSE más bajo y los demás son importantes. El método que produce el valor más pequeño de RMSE se considera el mejor ajuste. Por lo tanto, como último paso, se seleccionó el modelo con menor error, se ajustaron los variogramas y finalmente se realizó la interpolación de la variable estudiada. Además, se calculó el RMSE para interpolaciones con polígonos de Thiessen e Inverso Ponderado a la Distancia (IDW, *Inverse Distance Weight*, por sus siglas en inglés) que son interpoladores más simples y constituyen métodos deterministas.

3. Resultados y discusión

3.1. Precipitación anual 1979-2014

El Chaco Paraguayo presenta una distribución espacial de la precipitación bastante homogénea en casi toda su superficie, pero con variaciones en ciertas zonas. Los datos no presentan una distribución normal (asimetría positiva), la mayor parte de las observaciones están a la izquierda de la media, el coeficiente de sesgo o asimetría es de 1,48 y la curtosis 1,79 que se encuentran alejados de los valores centrales. La precipitación al centro y norte, desciende llegando a 500 milímetros al año, mientras que al sur aumenta hasta 1.300 milímetros al año, constituye una región bastante seca con una precipitación predominante de 600 a 700 milímetros (Figura 2). Los meses de mayor precipitación van de diciembre a mayo, y los meses de mayor seguía se extienden desde septiembre a julio (Figura 3).

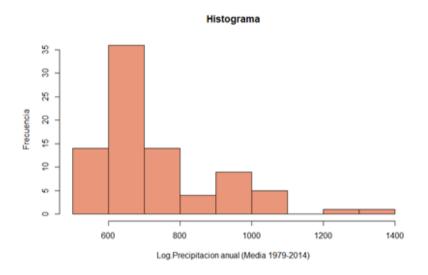
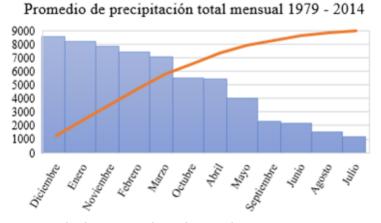


Figura 2. Histograma de precipitación anual (1979-2014). Fuente: Elaboración propia.



Promedio de precipitación total mensual 1979-2014. Fuente: adaptado de la Dirección Nacional de Aeronáutica Civil (DINAC).

Los datos fueron normalizados para obtener una distribución normal que facilita la construcción de los variogramas, la curtosis de los datos normalizados fue 0,34 y el coeficiente de sesgo o asimetría fue 1,09, que se acercan más a valores ideales.

El promedio de la mínima precipitación anual registrada en el periodo de estudio fue de 562.4 milímetros y el promedio de la máxima anual registrada fue de 1342,4 milímetros para el periodo de estudio analizado que abarca el año 1979 al 2014 (Tabla 1).

Tabla 1. Estadística de datos (mínima, media, cuartiles y máxima)

Min.	1st Qu.	Median	Mean	3rd Qu.	Мах.
562.4	616.7	675.5	729.1	772.2	1342.4

Fuente: adaptado de Dirección Nacional de Aeronáutica Civil (DINAC).

En el gráfico de caja y bigotes (Figura 4) se constata la existencia de valores atípicos en la muestra, mientras que las nubes direccionales de la Figura 5 nos permiten precisar la distribución espacial de los mismos. Los valores atípicos observados no pueden ser excluidos del estudio porque representan las condiciones típicas de una zona del área de estudio, en general no existe mucha variabilidad en gran parte de los datos.

Diagrama caja y bigote Precipitacion anual (Media 1979-2014)

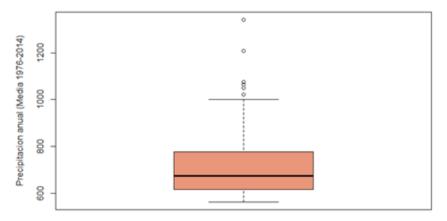
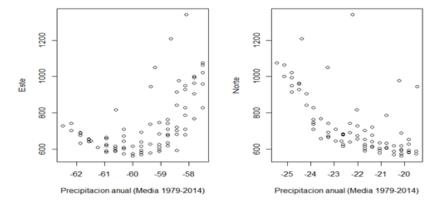


Figura 4. Diagrama de caja y bigote de la precipitación anual media (1979-2014). Fuente: elaboración propia.



Nube direccional norte y este de los datos de precipitación. Fuente: elaboración propia.

3.2. Análisis estructural y ajuste de variogramas

Suponiendo que la precipitación es una variable regionalizada y cuyos datos no son independientes entre sí, es decir, lo observado en un sitio provee información de los sitios vecinos.

El semivariograma juega un papel central en el método Kriging, ya que el más válido debe ser seleccionado para que los parámetros puedan ser estimados. Los variogramas proveen información acerca del parámetro en estudio, pero son herramientas para continuar con los cálculos geoestadísticos. Una de sus funciones principales es la estimación de valores de puntos que no han sido muestreados o sus promedios.

El variograma experimental indica que las variables presentan dependencia espacial, ya que la semivarianza es constante en función a la distancia. La anisotropía está marcada a los 45 grados que representan las direcciones con mayor continuidad espacial (Figura 6 y Figura 7). El variograma experimental omnidireccional con cutoff= 700 se observa en la Figura 7.

Los modelos teóricos analizados, como se mencionó previamente, fueron el exponencial, esférico, lineal, matern y gaussiano. En la Figura 8, se puede apreciar el análisis de envolventes de cada modelo teórico. Los datos no son productos del azar, el único modelo fuera de rango es el modelo lineal.

En la Figura 9 se pueden observar el variograma de cada modelo, el modelo gaussiano es el que no se ajusta a los datos y en la Figura 10 se observa un variograma con ajuste automático. Mukhopadhaya (2015), aplicó un Kriging ordinario para analizar precipitación de la ciudad de Túnez teniendo como base 75 observaciones, el modelo que mejor se ajustó a su estudio fue el exponencial, la diferencia radica en que la superficie de análisis es menor a la del Chaco Paraguayo y la cantidad de observaciones es mayor.

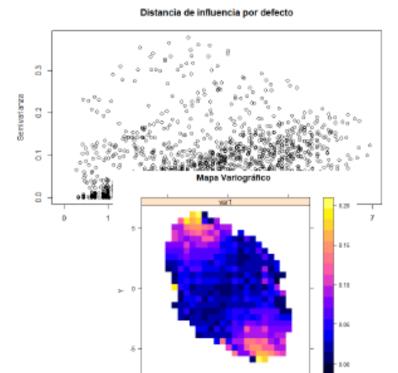


Figura 6. Nube y mapa variográfico de los datos de precipitación normalizados. Fuente: elaboración propia.

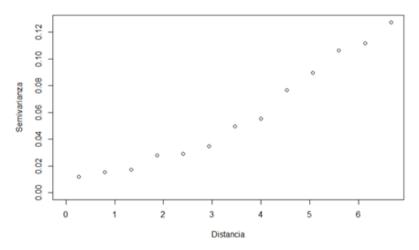


Figura 7. Variograma experimental omnidireccional.

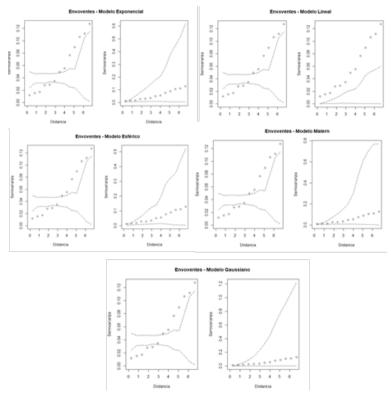


Figura 8. Análisis de envolventes de los modelos de variogramas teóricos. Fuente: elaboración propia.

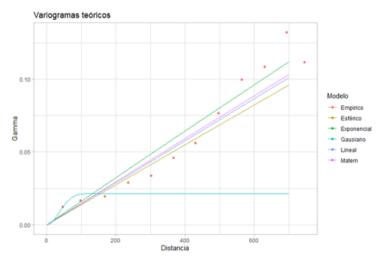


Figura 9. Variogramas con modelo empírico, esférico, exponencial, gaussiano, lineal y matern. Fuente: elaboración propia.

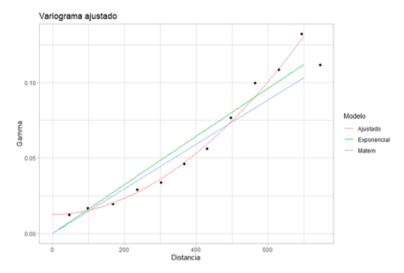


Figura 10. Variograma con ajuste automático (paquete automap Rstudio) con base en los mejores modelos.

Fuente: elaboración propia.

Los modelos que presentan una menor suma cuadrática ponderada con un menor error (RMSE) son el exponencial, esférico, matern y el lineal. Mientras que el modelo con ajuste automático presenta un valor levemente menor que las anteriores (Tabla 2).

Tabla 2. Suma cuadrática ponderada de modelos teóricos

Modelo	Suma cuadrática ponderada	RMSE
Exponencial	212.56	200.91
Esférico	200.54	200.91
Gaussiano	7036.60	208.31
Matern	212.56	200.91
Lineal	186.63	200.91
Ajuste automático	14.02	195.41

elaboración propia. Fuente:

3.3. Interpolaciones de precipitación

Los modelos teóricos con mejor desempeño, se citaron anteriormente; para el modelado de la precipitación se utilizó el modelo con ajuste automático. También se comparó el error cuadrático medio obtenido con las interpolaciones utilizando polígonos de Thiessen y Distancia inversa

ponderada. El modelo con menor error, es el modelo con ajuste automático (Tabla 3), sin embargo, no existe mucha diferencia con el error obtenido con el modelo exponencial, esférico, matern y lineal.

Aragón-Hernandez et al. (2019) evaluaron los métodos de interpolación Kriging, Thiessen e IDW para estimar la distribución espacial de variables meteorológicas y concluyeron que el Kriging ordinario es un buen estimador.

Modelo **RMSE** Ajuste automático 195.41 Thiessen 218.30 IDW 218.30

Tabla 3. Error cuadrático medio

Fuente: elaboración propia.

Se ha visto que los mejores modelos para explicar el comportamiento de la variable de precipitación en la región del Chaco paraguayo son el modelo exponencial, modelo matern, esférico y el lineal sopesando el error cuadrático medio, sin embargo, el error es bastante grande en comparación con otros estudios por la carencia de datos y la gran superficie del área de estudio. Yan-Bing (2002), al realizar un estudio con precipitación en una región de China, bajo un periodo de 37 años con 61 estaciones meteorológicas, concluyó que los cinco modelos estudiados, entre éstos el exponencial, eran buenos para describir la precipitación, pero bajo diferentes circunstancias referentes a los meses de estudio. Entre éstos, el modelo exponencial tendía a subestimar los valores. Sin embargo, no descarta ninguno, ya que todos eran válidos para describir la precipitación del área. Por otra parte, Gundogdu y Guney (2007), probaron distintos modelos de interpolación Kriging para describir el comportamiento de agua subterránea y concluyeron que Kriging fue un método robusto en general para la descripción de las variables en estudio. Es así que a pesar que el método exponencial tiende a sobreestimar los datos de precipitación, Kriging continúa siendo un método viable para la estimación de datos espaciales faltantes. El mapa generado se observa en la Figura 11.

Otra tendencia en el tipo de estudio realizado es la utilización de datos auxiliares como modelos digitales de elevación para describir cómo la precipitación varía con la altitud. Esto lo han hecho autores como Goovaerts (2000), Marquinez et al. (2003) y Vargas et al. (2009).

Goovaerts (2000) afirmó que los modelos de elevación digital son buenos complementos para la interpolación de precipitación en zonas montañosas, trabajó con 36 estaciones climáticas en la región de Portugal probando tres métodos estadísticos entre ellos Kriging, en donde concluyó que es un mejor

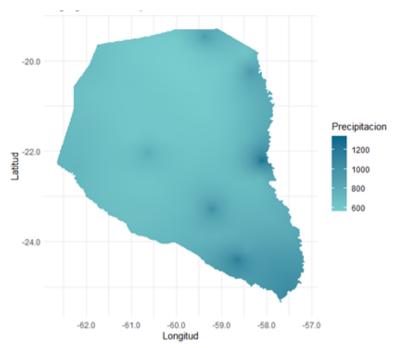


Figura 11. Kriging de la precipitación anual (1979-2014). Fuente: elaboración propia.

método cuando la correlación entre precipitación y elevación es moderada, es decir cuando no se tiene en cuenta tanto la elevación. En cambio, Vargas et al. (2009), estudiaron para un área en Chile, con solo 11 estaciones, la interpolación de precipitación complementada con modelos de elevación en un área de los Andes. Concluyendo que el co-kriging es un mejor modelo de estimación ya que, se puede utilizar información complementaria; igualmente resalta la robustez del método Kriging. Por último, Marquinez et al. (2003) al realizar un análisis en España con 117 estaciones tomando como referencia un periodo de 24 años de precipitación en una zona montañosa, concluye que existe una ventaja en los métodos de interpolación en donde los datos estimados no dependen precisamente de la densidad de las estaciones meteorológicas, sino que es suficiente con tener estaciones en áreas de topografía similar, aunque se encuentren relativamente separadas por una gran distancia. Con todo esto en el área de estudio, existe la ventaja de que la topografía es prácticamente uniforme, la región del Chaco paraguayo no posee grandes elevaciones y se caracteriza justamente por ser un territorio prácticamente plano sin mesetas o cerros en la mayoría de su territorio, por lo que esto representa una ventaja a la hora de realizar una interpolación sin asistencia de un modelo digital de elevación. Con lo que se cree se ha obtenido un modelo fiable.

4. Conclusiones

La geoestadística es una herramienta útil para predecir valores de datos espaciales en zonas carentes de información. La inexistencia de los datos climáticos por ausencia de estaciones meteorológicas es un problema muy común en muchos países, y la aplicación de los análisis geoestadísticos subsana este tipo de limitaciones de infraestructura de monitoreo.

El Chaco es una zona bastante seca y actualmente sufre una gran explotación agropecuaria que implica una fuerte presión en un ecosistema naturalmente frágil, debido a la carencia e inexistencia de datos, el análisis del clima en la zona se vuelve difícil, es por ello que no se puede caracterizar correctamente su situación pasada, actual y futura.

Es de suma importancia la instalación de estaciones meteorológicas en la zona que nos permitan obtener información actualizada y precisa de las condiciones del lugar, con el objeto de predecir eventos futuros, ya que el cambio climático afecta a ecosistemas frágiles como éste.

A través del ajuste con modelos de variogramas teóricos como el exponencial, matern, esférico, lineal, gaussiano y además interpolaciones deterministas como polígonos de thiessen y distancia inversa ponderada, se puede concluir que Kriging es un método válido para la caracterización de la precipitación con métodos estocásticos.

De la comparación de los valores obtenidos en el presente estudio, el modelo con ajuste automático, exponencial, matern, lineal y esférico, son los que presentaron un menor RMSE, en ese orden, por lo que se los considera adecuados para la estimación de precipitación en el Chaco paraguayo, a partir del muestreo realizado.

Finalmente, por los resultados expuestos, la presente metodología puede ser aplicada para variables regionalizadas en el ámbito de las ciencias de la Tierra, como son las variables climáticas.

Bibliografía

Aragón-Hernández, J. L.; Aguilar-Martínez, G. A.; Velázquez-Ríos, U.; Jiménez-Magaña, M. R. y Maya-Franco, A. (2019). Distribución espacial de variables hidrológicas. Implementación y evaluación de métodos de interpolación. Ingeniería, investigación y tecnología, 20 (2), 1-15.

Dirección General de Estadísticas, Encuestas y Censos (2018). Anuario Estadístico 2018,

Díaz Cordero, G. (2012). El Cambio Climático. Ciencia y Sociedad, XXXVII (2), 227-240.

Dile, Y. and Srinivasan, R. (2014). Evaluation of CFSR Climate Data for Hydrologic Prediction in Data-Scarce Watersheds: An Application in the Blue Nile River Basin. Journal of the American Water Resources Association, 50 (5), 1226-1241.

- Equipo RStudio (2020). RStudio: Desarrollo integrado para R. RStudio, PBC, Boston, MA. http://www.rstudio.com/.
- Goovaerts, P. (2000) Geostatistical approaches for incorporating elevation into the spatial interpolation of rainfall. Journal of Hydrology, 228 (1-2), 113-129.
- Gundogdu, K. S. and Guney, I. (2007). Spatial analyses of groundwater levels using universal Kriging. Journal of Earth System Science, 116 (1), 49-55.
- Hiemstra, P. and Hiemstra M.P. (2013). Package automap. Compare, 105 (10).
- Haining, R.; Kerry, R. and Oliver, M. (2010) Geography, Spatial Data Analysis, and Geostatistics: An Overview. Geographical Analysis, 42, 7-31.
- Grupo Intergubernamental de Expertos sobre el Cambio Climático (2014). Climate Change 2014: Mitigation of Climate Change. Contribution of Working Group III to the Fifth Assessment Report of the Intergovernmental Panel on Climate Change, Cambridge University Press, Cambridge, United Kingdom and New York.
- Kruck, W. (1998). Proyecto Sistema Ambiental del Chaco: inventario, evaluación y recomendaciones para la protección de los espacios naturales en la Región Occidental del Paraguay, Cooperación Técnica Paraguayo Alemana, Tomo I, Paraguay, 142.
- Marquínez, J.; Lastra, J. and García, P. (2003). Estimation models for precipitation in mountainous regions: the use of GIS and multivariate analysis. Journal of *Hydrology*, 270 (1-2), 1-11.
- McKinley, J. M.; Atkinson, P. M. (2020). A Special Issue on the Importance of Geostatistics in the Era of Data Science. Mathematical Geoscience, 52, 311–315.
- Mereles, M.; Céspedes, G.; Cartes, J.; Goerzen, R.; De Egea, J.; Rodríguez, L.; Yanosky, A.; Villalba, L.; Gustafson, A. and Cacciali, P. (2019). Biological Corridors as a Connectivity Tool in the Region of the Great American Chaco: Identification of Biodiversity Hotspots in the Ecoregions of the Paraguayan Chaco. Research in Ecology. https://www.doi.org/10.30564/re.v2i1.1324.
- Michaelides, S. C.; Tymvios, F. S. and Michaelidou, T. (2009). Spatial and temporal characteristics of the annual rainfall frequency distribution in Cyprus. Atmospheric Research, 94 (4), 606-615.
- Mukhopadhaya, S. (2004). Rainfall Mapping using ordinary Kriging technique: case study: Tunisia. Journal of Basic and Applied Engineering Resolutions, 3 (1), 1-5.
- Pebesma, E. J. (2004). Multivariable geostatistics in S: the gstat package. Computers & Geosciences, 30, 683-691.
- Prayogi, A.; Cangara, A.; Muhammad, B. and Baharuddin, A. (2020). The impacts of Paraguayan charcoal export to European markets upon deforestation of Paraguay's Chaco forest. IOP Conference Series Earth and Environmental Science, 575 (1).
- Reyes-Cárdenas, O.; Treviño-Garza, E. J.; Jiménez-Pérez, J.; Aguirre-Calderón, O. A.; Cuéllar-Rodríguez, L. G.; Flores-Garnica, J. G. and Cárdenas-Tristán, A. (2019). Modelización de biomasa forestal aérea mediante técnicas deterministas y estocásticas. *Madera y bosques*, 25(1).

- Vargas, J.; De la Fuente, L. y López, A. (2009). Análisis geoestadístico para describir la distribución espacial de la precipitación de una Cuenca Patagónica. Aqua-LAC, 1 (1), 29-41.
- Weiberlen, F. y Báez, J. (2018). Assessment of satellite-based precipitation estimates over Paraguay. Acta Geophysica, 66 (3), 369-379.
- Yan-Bing, T. (2002). Comparison of semivariogram models for Kriging monthly rainfall in eastern China. Journal of Zhejiang University-SCIENCE A, 3 (5), 584-590.
- Yurrita, E. (2005). Atlas climático del Chaco paraguayo. Fundación para el Desarrollo Sustentable del Chaco, Paraguay, 92 pp.