

Mapas de curvas isoyetas para la provincia de Mayabeque

Laritza de la Torre MendozaE-MAIL: laritzadelatorremendoza@gmail.com

Centro de Investigaciones Hidráulicas (CIH), Universidad Tecnológica de La Habana José Antonio Echeverría (CUJAE).

Yakelin Rodríguez LópezE-MAIL: yakelin780603@gmail.com

Centro de Investigaciones Hidráulicas (CIH), Universidad Tecnológica de La Habana José Antonio Echeverría (CUJAE).

RESUMEN

Se presenta un estudio de las precipitaciones máximas diarias en la provincia Mayabeque. Se realizó el análisis regional de estas series de lluvias con el empleo de herramientas actuales como el R y su interfaz RStudio. Se obtienen los cuantiles de lluvias para las cuatro regiones definidas para diferentes periodos de retorno, se obtuvieron las curvas de precipitación – duración – periodo de retorno (PDF) para cada región. Se presentan los mapas de curvas isoyetas en la provincia de Mayabeque para los periodos de retorno 2, 5, 10, 20, 50 y 100 años.

PALABRAS CLAVE: *mapas, isoyetas, RStudio*

Isohyets contour maps for the province of Mayabeque

ABSTRACT

This study presents the maximum daily rainfall in Mayabeque province. A regional analysis of these rainfall series was performed using modern tools such as R and its RStudio interface. Rainfall quantiles are obtained for the four regions defined for different return periods, and precipitation-duration-return period curves (PDF) are presented for each region. Isohyet curve maps for Mayabeque province are presented for return periods of 2, 5, 10, 20, 50, and 100 years.

KEYWORDS: *maps, isohyetal, RStudio*

01 INTRODUCCIÓN

Las curvas isoyetas son utilizadas en el análisis climático, permiten comprender patrones de precipitación en diferentes regiones y la identificación de zonas húmedas y secas. Facilitan la planificación y gestión de recursos hídricos al mostrar la distribución de la precipitación. Contribuyen a la evaluación de las inundaciones al identificar áreas propensas a recibir grandes cantidades de lluvia. Se requiere una metodología que facilite a los ingenieros la obtención de estas curvas, contribuyendo así a un desarrollo más eficiente y sostenible de los recursos hídricos.

El objetivo de este trabajo es proponer una metodología para la obtención de mapas de curvas isoyetas, empleando como caso de estudio la provincia Mayabeque, haciendo uso del software R y su interfaz RStudio.

1.1. Formación de series estadísticas

En el procesamiento estadístico de la información de los eventos extremos no se utilizan todos los datos registrados sino los eventos de magnitudes más grandes o críticas, los cuales formarán una serie estadística con una secuencia conveniente de datos (González Spíndola et al., 2008).

Se pueden formar diferentes tipos de series estadísticas (Campos Aranda, 1992):

- Serie anual de máximos: La desventaja principal de la serie anual radica en que cada año queda representado por un solo evento y el máximo de un año puede ser menor que el segundo o tercero en magnitud de otro año y sin embargo no fueron considerados.
- En la serie de duración parcial se toman en cuenta los eventos secundarios en magnitud de todos los años y por ello un evento de cierta magnitud tendrá un periodo de retorno diferente en cada una de las dos series.
- Serie de excedentes anuales: Se encuentra dentro de la serie de duración parcial, está formada por datos cuya magnitud es mayor que un cierto valor base, el cual es determinado de manera que el número de eventos de la serie integrada sea igual al número de años de registro.

Se debe tener en cuenta la condición de independencia; las condiciones meteorológicas que generan una lluvia importante son independientes de otras después de un tiempo de 15 días.

La serie de excedentes anuales sí toma en cuenta los eventos secundarios de un año y para periodos de retorno menores de 10 años siempre conduce a valores más grandes al ser procesada estadísticamente y para periodos de retorno mayores a 10 años, carece de importancia.

La otra serie de duración parcial que puede ser formada, está integrada por todos los eventos mayores que el menor de la serie anual de máximos. Debido a lo anterior, contendrá casi siempre un número de eventos diferentes al número de años de registro, por tanto, no puede ser procesada como las otras series.

1.2. Análisis de Frecuencia Regional por el Método de L-momentos (ARF-LM)

El análisis de frecuencia es un método estadístico fundamental que se emplea para estimar la probabilidad de ocurrencia de eventos hidrológicos extremos y determinar sus magnitudes correspondientes para periodos de retorno específicos (Sunghun et al., 2025).

Los modelos de distribución utilizados por el ARF-LM no son los modelos convencionales utilizados en la hidrología probabilística, sino que son modelos de distribución mucho más generales y flexibles, basados en 3 o más parámetros. Se debe recordar que, a mayor cantidad de parámetros, aumenta la flexibilidad de la distribución, pero se requiere un mayor número de ecuaciones para su resolución (Nuñez Cobo & Verbist, 2010). El análisis regional de frecuencias es un procedimiento consistente en agregar la información proveniente de varias muestras, en una sola gran muestra, asumiendo previamente que todas éstas provienen de un mismo modelo de probabilidad, excepto por una diferencia entre ellas debida a un factor de escala. En comparación con el procedimiento convencional:

- Permite aumentar significativamente el tamaño total de la muestra.
- Permite tener en cuenta la variabilidad de los L-momentos de cada estación debido al tamaño muestral.
- Permite, por tanto, mejorar significativamente el ajuste a la distribución “parental”, de donde provienen estas muestras (registros de cada estación).
- Permite compensar la carencia de información en el tiempo, por su abundancia en el espacio.

1.3. Etapas del análisis Regional

La metodología del ARF-LM, originalmente propuesta por Hosking y Wallis (1997), consideraba la realización de 4 etapas, las cuales consisten en:

- Análisis y filtrado de los datos primarios de observaciones.
- Identificación de regiones homogéneas.
- Selección de la distribución regional de frecuencia.
- Estimación de los cuantiles regionales de frecuencia.

Hosking y Wallis (1997) proponen tres pruebas estadísticas útiles en el análisis regional de frecuencia: una prueba de discordancia **Di** para la identificación de estaciones inusuales en comparación con el resto de las estaciones de la región; una prueba de heterogeneidad **H**, para evaluar cuando la región propuesta puede ser considerada homogénea; y, por último, una prueba de bondad de ajuste **Z**, para evaluar cuando la distribución candidata a ser utilizada se ajusta adecuadamente a los datos.

La prueba de discordancia **Di**, sirve para identificar estaciones cuyos valores muestrales de los L-momentos difieren significativamente de las otras estaciones de la supuesta región. Esta medida de discordancia es una

herramienta útil en el filtrado inicial de los datos e indica los puntos dentro de la región donde los datos deben ser sometidos a un análisis de calidad más profundo. Se considera que el vector de L-momentos (LCv, LCs, LCK) de una estación determinada constituye un punto en un espacio tridimensional, por lo que un grupo de estaciones, producirá una nube de puntos en este espacio. Cualquier punto que se ubique lejos del centro de gravedad del conjunto de éstos deberá ser considerado como discordante (Álvarez et al., 1999).

Numéricamente la medida de discordancia **Di** se define a partir de un estadístico que se aparta del comportamiento general del resto de estaciones. De acuerdo con Hosking y Wallis (1997), el valor crítico para **Di** en regiones con 15 o más estaciones es igual 3; las estaciones individuales que superen este umbral deben ser sometidas a un minucioso análisis de calidad en busca de las posibles causas que diferencien a éstas del resto del grupo.

La medida de heterogeneidad se utiliza para estimar el grado de coherencia en un grupo de estaciones y evaluar cuando éstas pueden ser tratadas en su conjunto como una región homogénea. En particular, la medida de heterogeneidad **H**, compara la variabilidad de los L-momentos muestrales del grupo de estaciones que conforman la región con la esperada, obtenida a partir del empleo de técnicas de simulación (Álvarez et al., 1999).

El cálculo de **H** implica la estimación de la media y la desviación estándar de (μ_V y σ_V), lo que se logra mediante los experimentos de simulación en los que V_i se determina para cada simulación realizada. El número de simulaciones N_{sim} debe ser seleccionado de forma tal que las estimaciones de μ_V y σ_V resulten fiables. Hosking y Wallis, consideran que un valor de $N_{sim} = 500$ es adecuado para obtener tales resultados. Los citados autores han propuesto que una región compuesta por n estaciones puede ser considerada como “aceptablemente homogénea” si $H < 1$, “posiblemente heterogénea” si, $1 \leq H < 2$, y “definitivamente heterogénea” si $H \geq 2$ (Álvarez et al., 1999).

La prueba de bondad de ajuste, una vez comprobado que la región resulta homogénea, tiene por objetivo constatar objetivamente cuando una distribución determinada se ajusta a los datos aceptablemente; si se dispone de un conjunto de distribuciones candidatas, el objeto es seleccionar aquella que mejor se ajusta. La bondad de ajuste juzgará en qué medida los momentos LCs y LCK de la distribución seleccionada se ajustan bien al promedio regional de LCs y LCK de los datos observados (Álvarez et al., 1999).

Se considera que el ajuste de una determinada distribución es adecuado si el estadístico Z_{DIST} es suficientemente cercano a cero, siendo un valor razonable para este criterio el grado de significación del 90 %, que corresponde a $|Z_{DIST}| \leq 1.64$ (Álvarez et al., 1999).

Escogida la función de distribución adecuada para la región, se estiman los cuantiles asociados a un cierto periodo de retorno. El objetivo de esta etapa es determinar los cuantiles, es decir, los valores de la precipitación anual asociados con un determinado valor de probabilidad de ocurrencia.

02 METODOLOGÍA A EMPLEAR PARA LA OBTENCIÓN DE LOS MAPAS DE CURVAS ISOYETAS

Ante la inexistente metodología para la obtención de mapas de curvas isoyetas en Cuba, las autoras proponen la metodología que se ilustra en la figura 2.1.

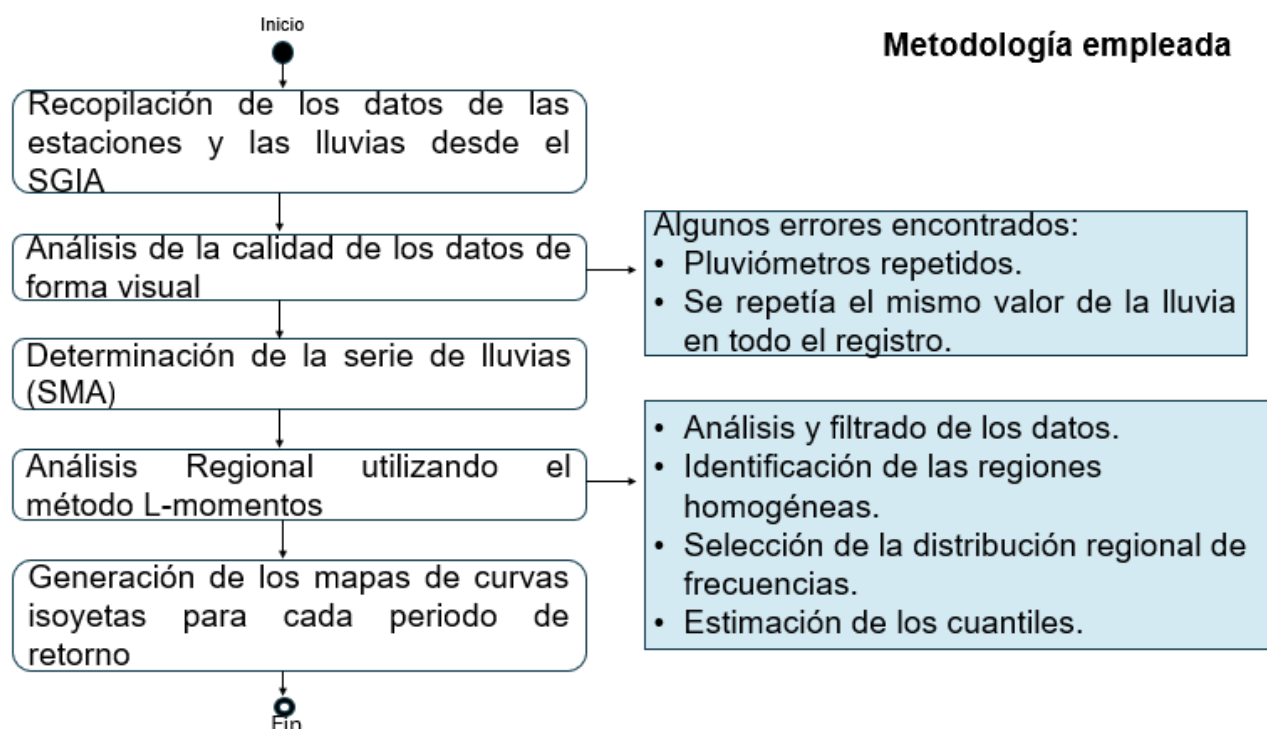


Figura 2.1. Metodología para la obtención de mapas de curvas isoyetas.

2.1. Obtención y preparación de los datos

- Se seleccionó la provincia de Mayabeque como área de estudio, utilizando el Sistema de Gestión Integral del Agua (SGIA), se descargaron los datos de las lluvias en cada pluviómetro y la información de las estaciones.

2.2. Análisis de Frecuencia Regional usando el RStudio y el método de L-momentos

Veranes Casero (2023) en su tesis de diploma implementó una aplicación web, utilizando los paquetes shiny y shinydashboard, que permite realizar las etapas propuestas en la metodología del análisis regional. En su primera versión, la aplicación permite la carga de los datos y su procesamiento.

La aplicación se implementó en un único Script, que contiene tanto la programación de los elementos de interfaz de usuario, como las funciones matemáticas que permiten llevar a cabo el análisis regional. Por tanto, además de shiny, se empleó un conjunto de paquetes.

Una vez cargados los datos en RStudio, aparece una ventana donde se observan los datos de las lluvias y las estaciones, al procesar los datos se obtienen los resultados de los valores de L-momentos.

- n : Longitud muestral que corresponde a la cantidad de años analizados.
- l_1 : Media de cada estación.
- t : L-CV (Coeficiente de variación).
- t_3 : L-asimetría (Coeficiente de asimetría).
- t_4 : L-Kurtosis (Coeficiente de Kurtosis).

Después del análisis anterior se comprueba el cumplimiento de los requisitos para tener en cuenta la medida de discordancia (Di), donde se muestra los rangos máximos del umbral crítico, hay que tener presente que los equipos que excedan el rango máximo del umbral crítico se descartarán (Tabla 2.1).

Con los resultados obtenidos se analizaron los equipos que se encuentran lejanos del centro de gravedad o sitio genérico y por tanto que no cumplen con los requisitos de la medida de discordancia (Di).

Como se trabaja con 42 estaciones, se debe tener en cuenta que el umbral crítico de la medida de discordancia para un grupo de 15 o más estaciones es 3. Por lo tanto, analizando la Tabla 2.1 los equipos que se comportaron como discordantes fueron: **Plu2400272** y **Plu2400416**.

Tabla 2.1. Valores de Di de cada pluviómetro

Pluviómetros	Di	Pluviómetros	Di
Plu2400009	0,08	Plu2400219	0,26
Plu2400016	1,67	Plu2400260	0,09
Plu2400021	0,29	Plu2400266	1,56
Plu2400022	0,85	Plu2400272	3,72
Plu2400034	0,56	Plu2400289	0,18
Plu2400035	0,46	Plu2400291	2,64
Plu2400045	1,95	Plu2400294	0,78
Plu2400055	0,70	Plu2400296	0,68
Plu2400057	0,29	Plu2400297	0,55
Plu2400063	0,47	Plu2400299	1,11
Plu2400089	1,01	Plu2400302	0,45
Plu2400096	0,18	Plu2400303	0,97
Plu2400101	0,41	Plu2400317	1,24
Plu2400104	2,44	Plu2400326	1,34
Plu2400106	1,22	Plu2400347	0,74
Plu2400123	0,60	Plu2400354	1,54
Plu2400126	0,07	Plu2400361	0,37
Plu2400145	1,32	Plu2400412	1,14
Plu2400159	2,31	Plu2400416	3,63
Plu2400177	0,02	Plu2400419	0,41
Plu2400209	1,40	Plu2400420	0,32

2.3. Identificación de las regiones homogéneas

Para la identificación de las regiones homogéneas se trabajará con 2 estaciones menos como se explicó anteriormente: **Plu2400272** y **Plu2400416**, por lo tanto, se hará el análisis de esta etapa con 40 equipos.

Como se descartaron 2 equipos se crea una nueva hoja de Excel que contiene todos los equipos menos los eliminados y se vuelven a cargar en el programa.

Para llevar a cabo la división de los equipos en regiones homogéneas se hace un análisis clúster de las estaciones, definiéndose mediante cuatro variables físicas que se consideran relacionadas con las precipitaciones máximas anuales: precipitación media anual, altitud, latitud y temperatura media anual, este análisis crea regiones atendiendo a la similitud que tenga dichas características físicas (Veranes Casero, 2023).

Para delimitar las regiones homogéneas, la aplicación tiene una sección para crear las regiones que contiene una caja de texto donde se inserta el número de regiones que se desean crear y luego debe accionarse sobre el botón **Crear regiones**. En este caso se decidió que fueran 4 regiones.

Después de formada las regiones se pasa a comprobar para cada una si cumple con la medida de heterogeneidad H. Si tiene un valor menor que 1, la región se considera homogénea, es necesario realizar un estudio del fenómeno, por ejemplo, la influencia de la orografía, puede ser causa de heterogeneidad dentro de una región y es necesario separar las estaciones ubicadas en la zona de sotavento y las de barlovento como dos regiones diferentes (Rodríguez López, 2011).

En caso que alguna región no cumpla los criterios antes mencionados, se pasa a conformar nuevas regiones que cumplan con el criterio de homogeneidad.

En el programa se muestran los resultados de la medida de heterogeneidad para cada región, escogiéndose el valor más pequeño modularmente.

Los valores de la medida de discordancia también se muestran calculados para cada región permitiendo completar el análisis realizado, mostrando qué equipos se pueden descartar de las regiones conformadas, siempre cumpliendo

con que su valor no exceda el umbral crítico de la medida de discordancia, se debe tener en cuenta que para cada región cambia el umbral crítico siempre y cuando varíe el número de equipos en ella.

Al analizar los datos arrojados por el RStudio, se concluye que la selección de las 4 regiones es correcta, pues cumple con los criterios de homogeneidad planteados y las medidas de discordancia. A continuación, se muestra la distribución de los equipos por regiones (Tabla 2.2).

Tabla 2.2. Distribución de los equipos por región

No	Región 1	Región 2	Región 3	Región 4
1	Plu2400009	Plu2400016	Plu2400063	Plu2400123
2	Plu2400021	Plu2400035	Plu2400089	Plu2400126
3	Plu2400022	Plu2400057	Plu2400145	Plu2400159
4	Plu2400034	Plu2400096	Plu2400177	Plu2400209
5	Plu2400045	Plu2400101	Plu2400297	Plu2400303
6	Plu2400055	Plu2400296	Plu2400361	Plu2400317
7	Plu2400104	Plu2400299	Plu2400419	Plu2400354
8	Plu2400106	Plu2400302		
9	Plu2400219	Plu2400326		
10	Plu2400260			
11	Plu2400266			
12	Plu2400289			
13	Plu2400291			
14	Plu2400294			
15	Plu2400347			
16	Plu2400412			
17	Plu2400420			

2.4. Selección de la distribución de mejor ajuste

Definidas las regiones, se procede a determinar la función de distribución de mejor ajuste para cada una de ellas.

Se pasa a valorar, para cada región, el ajuste de las siguientes funciones tripamétricas recomendadas por Hosking y Wallis (1997) por incluir entre sus casos particulares las distribuciones más empleadas en el estudio de variables ambientales:

- Logística Generalizada (GLO).
- General de Valores Extremos (GEV).
- General de Pareto (GPA).
- LogNormal (LN3).
- Pearson tipo III (PE3).

En esta etapa para saber a qué distribución se ajusta cada región se calcula la medida de bondad de ajuste Z_{DIST} , la distribución que tenga el mínimo valor de Z_{DIST} es la de mejor ajuste para cada región (Tabla 2.3).

Tabla 2.3. Distribución de mejor ajuste por región

Región	Distribución de mejor ajuste
1	Pearson tipo III (PE3)
2	Pearson tipo III (PE3)
3	General de Valores Extremos (GEV)
4	Pearson tipo III (PE3)

2.5. Estimación de los cuantiles para cada región y obtención de curvas PDF

Seleccionada la distribución de frecuencia más apropiada para cada región, se procede a definir sus parámetros de estimación de los cuantiles (Tabla 2.4) para los diferentes periodos de retorno y las curvas Precipitación-Duración-Frecuencia PDF para las cuatro regiones, que se presentan en la figura 2.2.

Tabla 2.4. Cuantiles por región

T (años)	Cuantil (Región 1)	Cuantil (Región 2)	Cuantil (Región 3)	Cuantil (Región 4)
2	0,91	0,86	0,85	0,87
5	1,22	1,23	1,27	1,26
10	1,47	1,54	1,61	1,57
20	1,76	1,91	2,03	1,92
50	2,21	2,55	2,74	2,45
100	2,64	3,19	3,43	2,92

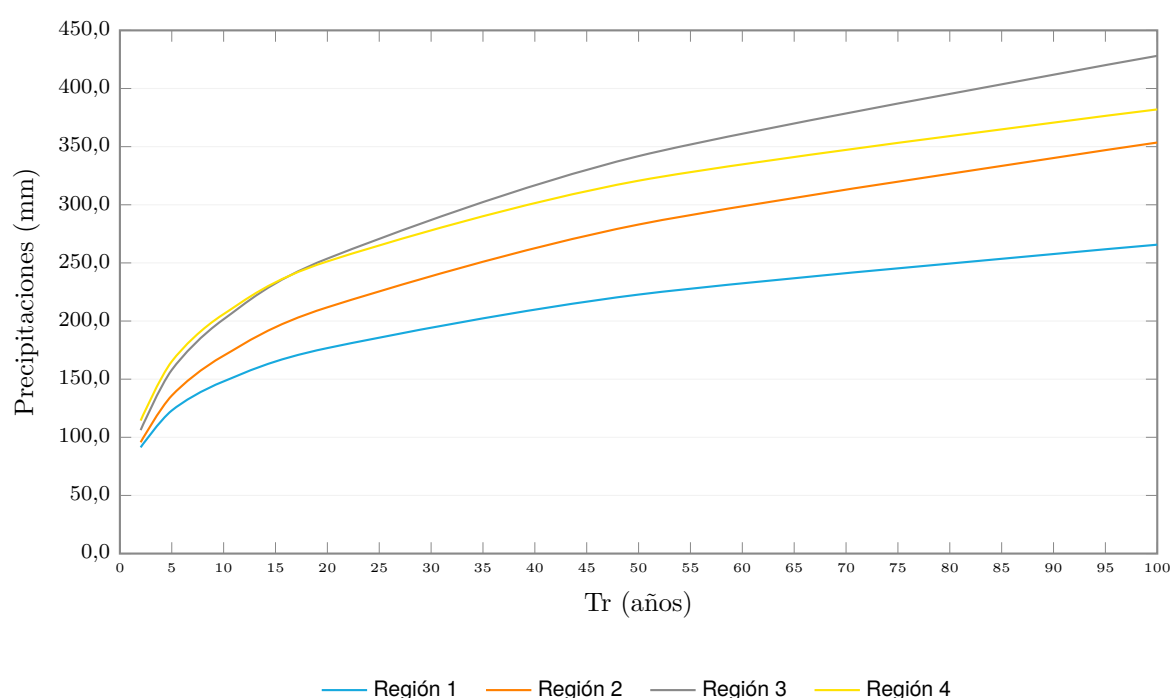


Figura 2.2. Curvas PDF por cada región.

2.6. Obtención de las curvas isoyetas para la provincia Mayabeque

En la actualidad no se justifica la modelación hidrológica sin la utilización de los SIG (sistemas de información geográfica), por las posibilidades que brindan, entre las que se pueden mencionar: la visualización, el análisis y el procesamiento de la información (Rodríguez López, 2011). Para la obtención de las curvas isoyetas, se utilizó el QGIS, software libre para plataformas GNU/LINUX, Mac OS, Microsoft Windows y Android.

Como resultado se obtienen los mapas de curvas isoyetas para periodos de retorno de 2, 5, 10, 20, 50 y 100 años (figuras 2.3, 2.4, 2.5, 2.6, 2.7 y 2.8).

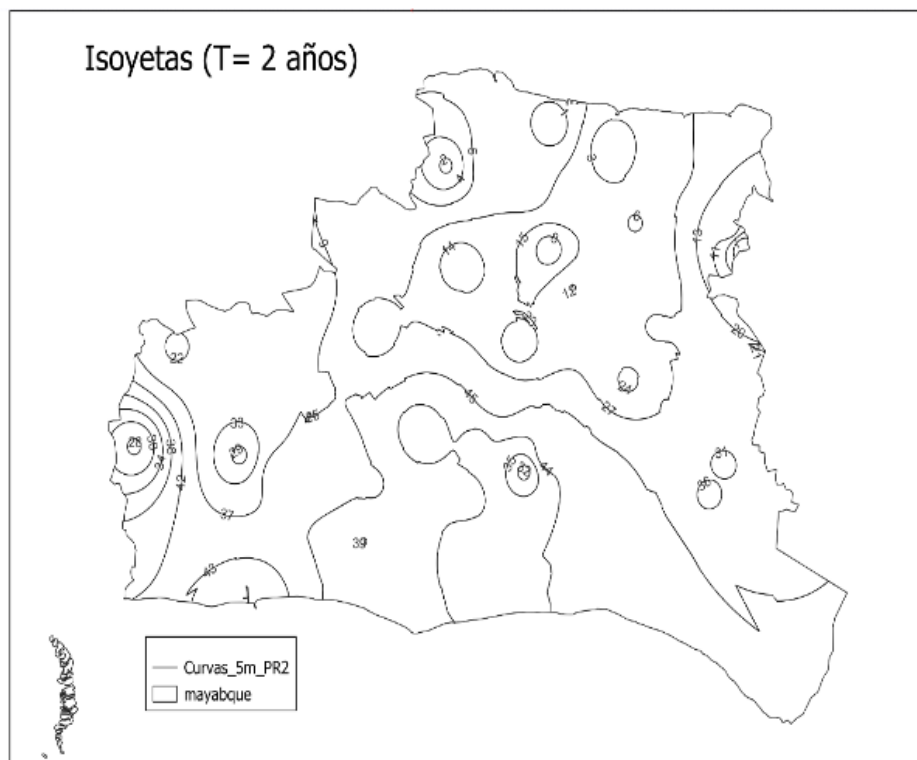


Figura 2.3. Mapa de curvas isoyetas T=2 años para la provincia Mayabeque.

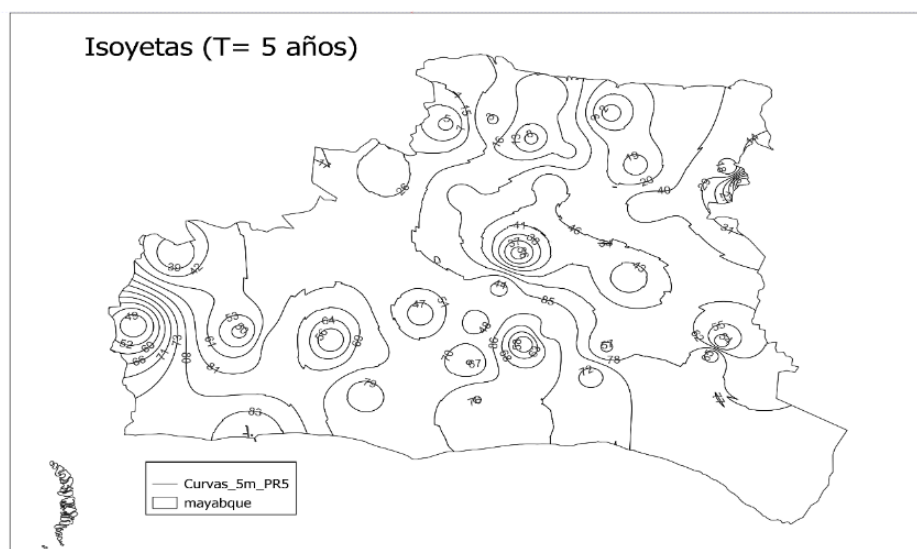


Figura 2.4. Mapa de curvas isoyetas T=5 años para la provincia Mayabeque.

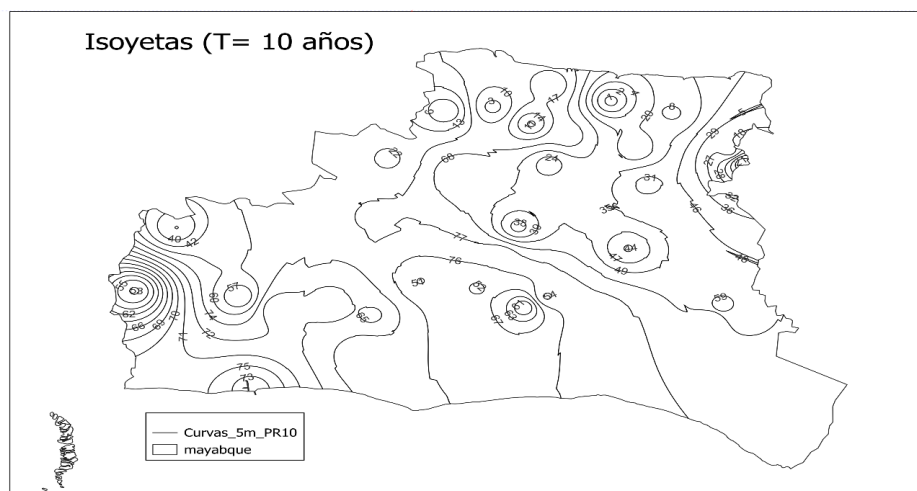


Figura 2.5. Mapa de curvas isoyetas T=10 años para la provincia Mayabeque.

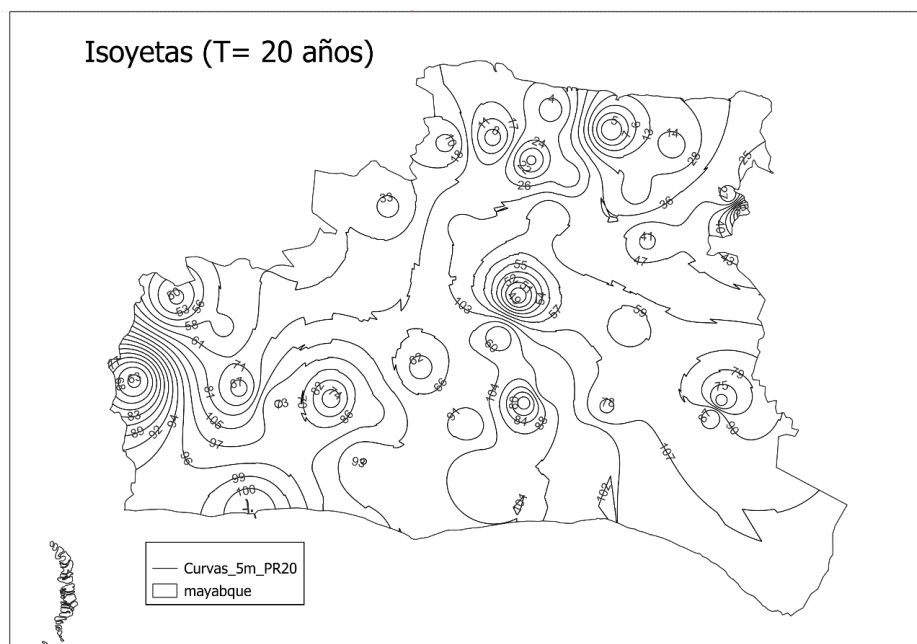


Figura 2.6. Mapa de curvas isoyetas T=20 años para la provincia Mayabeque.

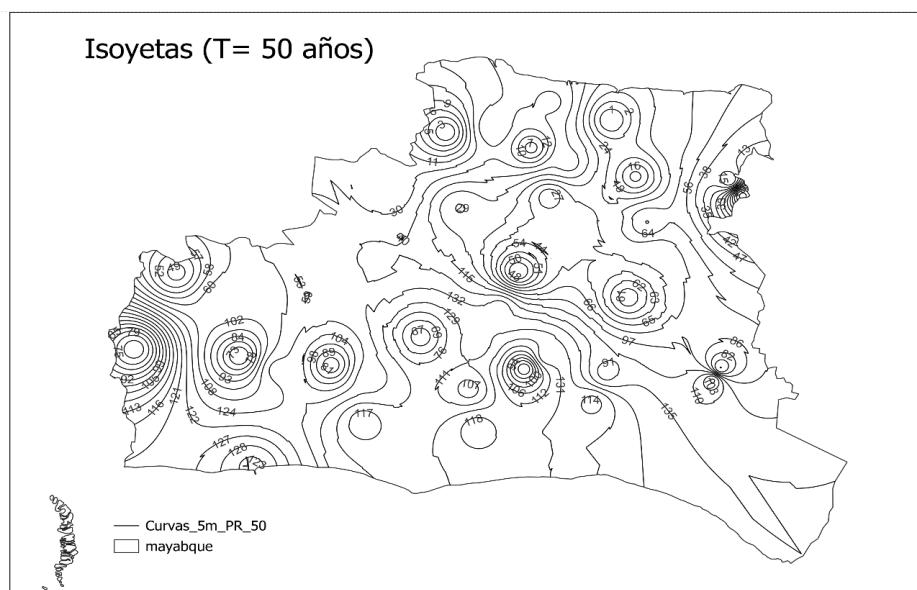


Figura 2.7. Mapa de curvas isoyetas T=50 años para la provincia Mayabeque.

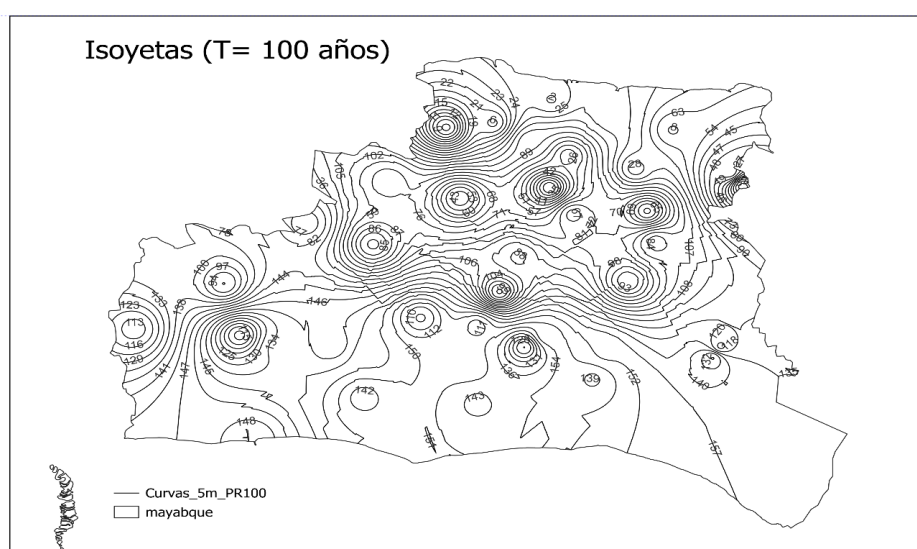


Figura 2.8. Mapa de curvas isoyetas T=100 años para la provincia Mayabeque.

03 CONCLUSIONES

- Se evidenció que la plataforma SGIA es una fuente primaria de datos efectiva, donde se recopilaron 42 registros pluviométricos de la provincia Mayabeque.
- La aplicación del criterio de Campos (1992) para la obtención de máximos anuales resultó esencial para depurar las series de tiempo y asegurar la calidad del dato de entrada para la modelación.
- Se propone y se implementa una metodología basada en RStudio para la creación de mapas de curvas isoyetas, dicha metodología puede ser aplicada a otras provincias del país.
- La combinación del análisis regional que definió 4 regiones y sus respectivas curvas PDF con las herramientas SIG, permitió generar mapas de curvas isoyetas para periodos de retorno de 2 a 100 años.

04 REFERENCIAS

- Álvarez, M., Puertas Agudo, J., Soto, B., & Díaz Fierros, F. (1999). Análisis regional de las precipitaciones máximas en Galicia mediante el método del índice de avenida. *Ingeniería del Agua*, 6(4), 379-386.
- Campos Aranda, D. F. (1992). *Procesos del ciclo Hidrológico*. Universidad Autónoma de San Luis Potosí.
- González Spíndola, L., Jorge Pedreira, M. d. C., Martínez Rodríguez, J. B., & Marrero de León, N. (2008). *Hidrología Superficial para ingenieros*.
- Hosking, J. R. M., & Wallis, J. R. (1997). *Regional Frequency Analysis: An Approach Based on L-Moments*. Cambridge University Press.
- Núñez Cobo, J., & Verbist, K. (2010). *Guía metodológica para la aplicación del Análisis Regional de Frecuencia de Sequías basado en L-momentos y resultados de aplicación en América Latina* (inf. téc.). UNESCO – Programa Hidrológico Internacional (PHI). Montevideo, Uruguay.
- Rodríguez López, Y. (2011). *Modelación hidrológica de avenidas. Caso de estudio: Cuenca del río Zaza* [Tesis de doctorado]. Universidad Tecnológica de La Habana «José Antonio Echeverría», Cujae.
- Sunghun, K., Kyungmin, S., Ju-Young, S., & Jun-Haeng, H. (2025). At-Site Versus Regional Frequency Analysis of Sub-Hourly Rainfall for Urban Hydrology Applications During Recent Extreme Events. *Water*, 17(15).
- Veranes Casero, M. R. (2023). *Análisis Regional de series de precipitaciones utilizando el programa R* [Tesis de diploma]. Universidad Tecnológica de La Habana «José Antonio Echeverría», Cujae.

Conflicto de intereses

Las autoras declaran que no existe ningún conflicto de interés.

Contribución de los autores

Laritz de la Torre Mendoza <https://orcid.org/0009-0009-3937-6009>

Yakelin Rodríguez López <https://orcid.org/0000-0001-8802-6843>