



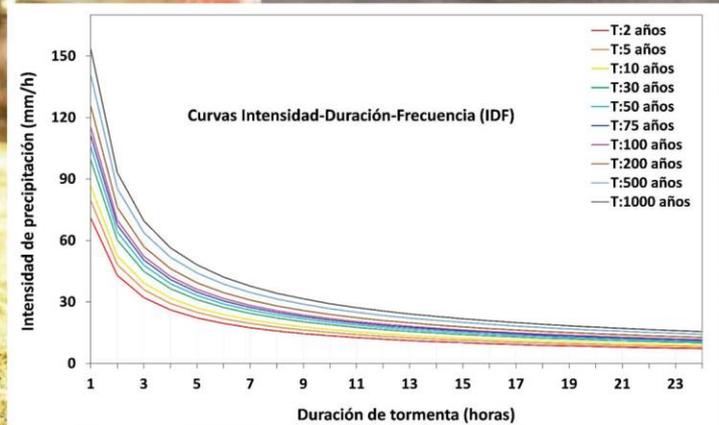
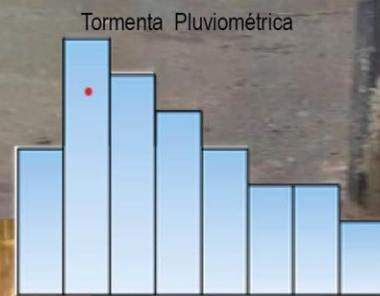
PERÚ

Ministerio del Ambiente



Desarrollo de curvas pluviométricas Intensidad-Duración-Frecuencia (IDF) en Perú

Dirección de Hidrología - DHI
Subdirección de Estudios e
Investigaciones Hidrológicas



Mayo 2023

Desarrollo de curvas pluviométricas Intensidad-Duración-Frecuencia (IDF) en Perú

Autores:

C. Montesinos, W. Lavado, N. Quijada, L. Gutiérrez y O. Felipe
Subdirección de Estudios e Investigaciones Hidrológicas - SENAMHI
Dirección de Hidrología – SENAMHI

Diseño y diagramación por:

M. Casaverde
Subdirección de Predicción Hidrológica - SENAMHI

Derechos Reservados

© Mayo 2023

Citar como:

Montesinos, C; Lavado, W; Quijada, N; Gutiérrez, L & Felipe, O (2023), Desarrollo curvas pluviométricas intensidad-duración-frecuencia (IDF) en Perú. Servicio Nacional de Meteorología e Hidrología del Perú – SENAMHI.

<https://repositorio.senamhi.gob.pe/handle/20.500.12542/2825>

**Desarrollo de curvas pluviométricas
Intensidad-Duración-Frecuencia (IDF)
en Perú**





DIRECTORIO

PhD. Guillermo Antonio Baigorria Paz
PRESIDENTE EJECUTIVO DEL SENAMHI

Ing. Oscar G. Felipe Obando
DIRECTOR DE HIDROLOGÍA DEL SENAMHI

PhD. Waldo Lavado Casimiro
SUBDIRECTOR DE ESTUDIOS E INVESTIGACIONES HIDROLÓGICAS DEL SENAMHI

Elaborado por:

Montesinos Cáceres, Cristian; Lavado Casimiro, Waldo; Quijada Diaz, Natali;
Gutiérrez Lope, Leonardo & Felipe Obando, Oscar.

Revisado por:

PhD. Waldo Lavado Casimiro
Subdirector de Estudios e Investigaciones Hidrológicas

Lima-Perú
Mayo 2023

Contenido

| | |
|--|----|
| RESUMEN..... | 3 |
| 1. INTRODUCCIÓN..... | 4 |
| 2. DATOS Y MÉTODOS | 5 |
| 2.1. Área de estudio | 5 |
| 2.2. Datos..... | 6 |
| 2.2.1. Información climática | 6 |
| 2.3. Metodología | 7 |
| 2.3.1. Análisis regional de las precipitaciones diarias extremas | 7 |
| 2.3.2. Desagregación de precipitaciones diarias mediante e enfoque de las curvas sintéticas de Huff | 11 |
| 3. RESULTADOS Y DISCUSIÓN | 16 |
| 3.1. Resultados del análisis regional de frecuencias basado en los L-momentos | 16 |
| 3.1.1. Identificación de regiones homogéneas..... | 16 |
| 3.1.2. Pruebas bondad de ajuste | 18 |
| 3.1.3. Análisis de frecuencia regional para los extremos de lluvia | 19 |
| 3.2. Resultados de la desagregación de precipitaciones diarias mediante el enfoque de curvas de Huff..... | 21 |
| 3.3. Curvas IDF basadas en condiciones climáticas futuras..... | 23 |
| 4. MÓDULO WEB PARA LA ESTIMACIÓN DE CURVAS IDF. | 25 |
| 5. CONCLUSIONES | 26 |
| 6. REFERENCIAS..... | 27 |
| 7. ANEXOS | 29 |
| 8. MANUAL DEL USUARIO | 34 |

ÍNDICE DE FIGURAS

| | |
|---|----|
| Figura 1. Ubicacion del area de estudio y distribucion espacial de las estaciones pluviometricas seleccionadas | 5 |
| Figura 2. Esquema metodológico adoptado para la generacion de las curvas IDF..... | 10 |
| Figura 3. Esquema metodológico de la desagregacion de precipitaciones diarias..... | 12 |
| Figura 4. Reducción de escala dinámica con WRF-ARW para generar los escenarios climáticos para el ambito peruano. Dominios de simulación para Sudamérica a 50 km y Perú a 12 km de resolución espacial horizontal. Fuente: SENAMHI-DMA/SMN-GCJV, 2021..... | 15 |
| Figura 5. (a) Situación geográfica de las 30 regiones homogéneas identificadas (b) distribución espacial de los cuantiles de precipitación máxima en 24 horas basados en información histórica (c) y (d) cuantiles de precipitación máximas en 24 horas correspondiente al límite de confianza superior e inferior. | 17 |
| Figura 6. (a) Diagrama de ratios de L-momentos y (b) representación gráfica de cuantiles regionales y sus correspondientes intervalos de confianza - región A4. | 19 |
| Figura 7. Probabilidad de ocurrencia de inicio de los eventos de TP a nivel nacional..... | 21 |
| Figura 8. Probabilidad de ocurrencia de la duración de los eventos de TP a nivel nacional..... | 21 |
| Figura 9. Tipos de tormentas pluviométricas (TP) predominantes para cada región..... | 22 |
| Figura 10. Curvas de Huff para cada tipo de tormenta pluviométrica para la región A6. | 23 |
| Figura 11. Cuantiles de precipitación máxima con un periodo de retorno de 50 años, basados en los modelos de cambio climático ACCESS1-3, HadGEM2-ES, MPI-ESM-MR y la Mediana de los modelos en mención. | 24 |
| Figura 12. Interfaz del usuario de la herramienta web IDF-Perú..... | 25 |
| Figura A.1 Módulo del usuario concerniente a la herramienta web IDF-Perú. | 34 |
| Figura A.2 Interacción de mapas y fondos cartográficos..... | 35 |
| Figura A.3 Selección de escenarios climáticos. | 35 |
| Figura A.4 Exportación/descarga de datos..... | 36 |
| Figura A.5 Representación gráfica de precipitaciones máximas y curvas intensidad-duración-frecuencia. | 37 |

ÍNDICE DE TABLAS

| | |
|---|----|
| Tabla 1. Valores de Z^{DIST} para los rangos aceptados por las regiones homogéneas. | 20 |
| Anexo 1. Valores de H_1 , H_2 y H_3 para las regiones homogéneas..... | 29 |
| Anexo 2. Parámetros regionales estimados para distribuciones Kappa, GLO, GEV, GNO, PE3 y GPA. | 30 |
| Anexo 3. Cuantiles regionales para las regiones homogéneas identificadas a nivel nacional. | 31 |
| Anexo 4. Coeficiente de duración adimensional (Región homogénea Andes) correspondiente al cuartil I y probabilidad de ocurrencia de 100%. | 32 |
| Anexo 5. Coeficiente de duración adimensional (Regiones homogéneas Pacifico y Selva) correspondiente al cuartil I y probabilidad de ocurrencia de 100%. | 33 |

RESUMEN

El hietograma de diseño o la definición de tormenta de diseño es una de las partes más importantes de la determinación del caudal de diseño en el caso de cuencas no aforadas. La duración del hietograma de diseño y la distribución temporal de la precipitación pueden tener un gran impacto en los valores de caudal máximo y la forma del hidrograma de escurrentía.

Los modelos para la evaluación de cuencas hidrográficas se están volviendo más sofisticados y requieren entradas temporales de precipitación para impulsar los procesos hidrológicos. Los incrementos de tiempo cortos del orden de minutos son particularmente necesarios, pero rara vez están disponibles o no tienen una buena cobertura espacial. Los datos de precipitación más ampliamente disponibles son precipitaciones totales para períodos de 24 horas.

En el presente estudio, se intenta proporcionar un enfoque para derivar curvas intensidad-duración-frecuencia (IDF) de precipitación en Perú. En particular, se lleva a cabo un análisis regional de precipitaciones extremas, basado en el método del tipo de índice de inundación, para derivar profundidades totales de tormenta de diferentes periodos de retorno. Luego, dichas profundidades de tormenta se distribuyen en el tiempo de acuerdo con hietogramas sintéticos generados por el método de las curvas de Huff, que proporcionan una representación probabilística de las profundidades de tormenta acumuladas para las correspondientes duraciones de tormenta acumuladas expresadas en forma adimensional. Dada su relativa simplicidad, el procedimiento desarrollado se puede extender fácilmente a lugares sin mediciones.

Finalmente, Aquí describimos un marco para cuantificar los impactos del cambio climático en función de la magnitud y la frecuencia de los eventos de precipitaciones extremas utilizando extremos de precipitación proyectados multimodelo e históricos corregidos por sesgo. El enfoque evalúa los cambios en las curvas IDF de precipitación y sus límites de incertidumbre.

1. INTRODUCCIÓN

Los desafíos en la derivación de Intensidad-Duración-Frecuencia de precipitaciones (IDF) a escala regional surgen del hecho de que muchos de los pluviómetros presentan registros de longitud cortos con un alto grado de variabilidad espacial, y los medidores sub diarios a menudo tienen una densidad espacial escasa. A su vez, se tiene antecedentes de inundaciones destructivas en las últimas décadas en nuestro país y es probable que las condiciones meteorológicas que favorecen la aparición de fuertes lluvias aumenten con el calentamiento global en Perú y muchos lugares del mundo. Por ello, las relaciones de las curvas IDF son cruciales para cualquier medida de mitigación de inundaciones, proyectos de ingeniería hidráulica y diseños de ingeniería de recursos hídricos; estas relaciones se utilizan para desarrollar tormentas de diseño para obtener la descarga máxima y la forma del hidrograma en cualquier diseño hidráulico.

Los primeros trabajos de construcción de las curvas IDF a nivel nacional fueron realizados mediante el “Estudio de hidrología del Perú” (IILA-SENAMHI-UNI, 1983), basados en la subdivisión del territorio peruano en zonas pluviométricas, utilizando datos de precipitaciones máximas en 24 horas. En la actualidad, teniendo en cuenta la mayor disponibilidad de información, nueva instrumentación y los avances tecnológicos en el campo de la hidrología urbana; pretendemos proporcionar por primera vez un enfoque general para derivar curvas IDF en lugares sin mediciones pluviométricas del Perú.

El procedimiento propuesto es una combinación de diferentes métodos estadísticos, tomados de la literatura científica. En particular, se lleva a cabo primero un análisis regional de precipitaciones extremas, basado en el método índice de avenida (Dalrymple, 1960), para derivar las profundidades totales de tormentas de diferentes periodos de retorno. Luego, dichas profundidades de tormenta se distribuyen en el tiempo de acuerdo a hidrogramas sintéticos generados por el método de las curvas de Huff (Huff, 1967), que proporciona una representación probabilística de las profundidades de tormentas acumuladas para las correspondientes duraciones acumuladas de tormenta expresadas en forma adimensional.

Además, este estudio tiene como objetivo desarrollar e implementar una herramienta web geográfica que permita a los ingenieros de diseño, tomadores de decisión, la academia y población en general utilizar las curvas IDF incluyendo escenarios de cambio climático para diferentes propósitos. Esta herramienta web consiste en una interfaz fácil de utilizar con un sistema de bases de datos robustos que conlleva a resultados específicos para cualquier usuario.

2. DATOS Y MÉTODOS

2.1. Área de estudio

El área de estudio comprende todo el territorio peruano con una extensión de 1.285 millones de km², se extiende aproximadamente de 0° a 18° 30' S y de 81° 10' a 68° 40' y con elevaciones que van desde 0 a 6433 msnm. El Perú presenta una variabilidad climática muy variada, así como regímenes de precipitación afectados por factores topográficos (Andes) y climáticos (Monzón sudamericano, circulación atmosférica, ENOS, etc.) (Lavado et al., 2012).

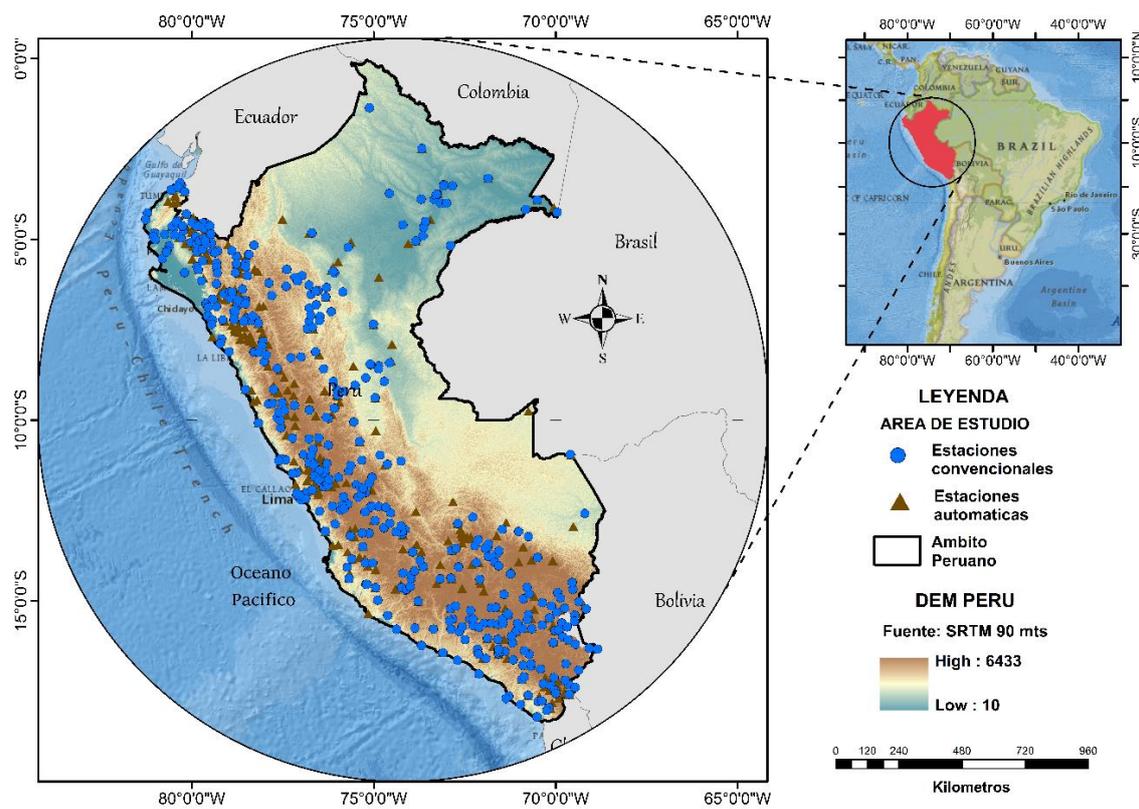


Figura 1. Ubicación del área de estudio y distribución espacial de las estaciones pluviométricas seleccionadas.

Hidrológicamente, el Perú se divide en la vertiente del Pacífico (Pd) bordeando la Cordillera de los Andes por el lado oeste de 3.4° S a 18.4° S, los ríos de esta zona fluyen de este a oeste siguiendo el gradiente altitudinal desde 6400 msnm hasta 0 msnm (Rau et al., 2017), este alto gradiente favorece la ocurrencia de desbordes e inundaciones, así como procesos de erosión durante la época de lluvias (Lavado et al., 2012). También en condiciones normales, toda esta región está influenciada por el anticiclón del Pacífico Sur y la corriente de agua fría de Humboldt,

lo que provoca que la costa peruana esté seca con alta humedad en el aire, siendo árida y desértica. En el lado este de los Andes se encuentra la vertiente del Amazonas (Ad), cuyo régimen hidrológico está influenciado por la migración del Monzón sudamericano, el transporte de humedad del Atlántico y las temperaturas superficiales del Pacífico y el Atlántico. Estos factores generan una gran variabilidad espacial y temporal (interanual) de la precipitación con valores de precipitación entre 6000 y 250 mm/año (Espinoza et al., 2009). Al sur se encuentra la vertiente endorreica del Lago Titicaca (Td) ubicada en el Altiplano, su régimen de precipitaciones está influenciado por una intensa actividad convectiva combinada por una advección de humedad de la cuenca amazónica durante el verano austral (Garreaud et al., 2003) mientras que, durante el invierno austral, el flujo de humedad del este es reemplazado por los vientos del oeste que proporcionan aire seco del Océano Pacífico. Estos factores generan una fuerte estacionalidad que produce cantidades moderadas de precipitación alrededor del lago Titicaca, con mayor abundancia de vapor de agua y precipitaciones superiores a 1000 mm/año (Lavado et al., 2012).

2.2. Datos

2.2.1. Información climática

El conjunto de datos utilizados en el análisis consiste en registros de precipitaciones máximas anuales históricas (PMAH) y precipitaciones horarias (PH), registradas a través de estaciones meteorológicas convencionales (442) y automáticas (286), distribuidas a nivel nacional y gestionadas por el Servicio Nacional de Meteorología e Hidrología del Perú (SENAMHI), la Autoridad Nacional del Agua (ANA) y la Universidad Estatal de Apalaches (EUA).

Determinadas estaciones convencionales presentaron brechas temporales debido a periodos no operativos; a tal efecto, se eligió aquellas con más de 15 años de información de PMAH durante el periodo (1969-2019); Por otra parte, los datos de PH provenientes de estaciones automáticas abarcaron el periodo (2014-2019). En la fase previa se analizaron los datos en mención, mediante la detección de valores atípicos (outliers) y la verificación de supuestos para establecer la estacionariedad e independencia serial de los datos.

Finalmente, la distribución espacial de las estaciones pluviométricas seleccionadas (Figura 1) detalla el escaso número de estaciones (casi nula) en la llanura oriental del Amazonas (departamentos de Loreto, Ucayali y Madre de Dios) frontera con Brasil y al norte cerca de Ecuador, sobre todo en la parte Amazónica.

2.3. Metodología

2.3.1. Análisis regional de las precipitaciones diarias extremas

El análisis regional de frecuencias de precipitación es una técnica utilizada en hidrología y meteorología para analizar y modelar el comportamiento de las precipitaciones en una región específica. El objetivo principal es determinar las características estadísticas de la precipitación en términos de su magnitud y frecuencia. El análisis regional de frecuencias se basa en la premisa de que las series de precipitación en una región comparten ciertas características comunes debido a la influencia de factores geográficos, climáticos y atmosféricos. Por lo tanto, es posible agrupar estaciones de medición cercanas entre sí que presentan patrones de precipitación similares. Para realizar el análisis, se sigue los siguientes pasos:

Identificación de regiones homogéneas

Dado el tamaño relativamente grande y la complejidad geográfica y climática del área de estudio, la regionalización de precipitaciones máximas es fundamental para identificar aquellas áreas con similares patrones de precipitación extrema. La finalidad de formar grupos de estaciones en este estudio, es el de satisfacer la condición de homogeneidad, es decir, que compartan la misma distribución de frecuencias excepto por un factor de escala. Para agrupar las series de precipitación máxima anual de 24 horas (PMA24) en regiones homogéneas, se siguió el procedimiento recomendado por (Hosking & Wallis, 1997) que consistió en el agrupamiento inicial y refinamiento manual de regiones. Así mismo, en este estudio se aplicaron enfoques de agrupamiento de serie de tiempo PMA24 a parte del enfoque convencional basado en características de las estaciones.

Para determinar las regiones homogéneas iniciales mediante el enfoque convencional, se utilizó predictores físicos estandarizados (*p.ej.* Precipitación media anual, altitud, latitud, longitud, tipo de tormenta e intensidad de lluvia); Luego se utilizó el método de agrupamiento jerárquico de Ward en consideración con las estadísticas de los L-momentos, para agrupar las 442 estaciones de precipitación; se examinó el número de agrupaciones calculando 30 índices estadísticos a través del paquete NbClust en el lenguaje de programación R (Charrad et al., 2014). El mejor número de conglomerados se determinó según regla de la mayoría. Finalmente, basado en este último agrupamiento se acondicionan las regiones considerando los estadísticos de Discordancia (Di) y Heterogeneidad (H) propuesto por (Hosking & Wallis, 1997).

L-Momentos

Los L-momentos se utilizan ampliamente para ajustar funciones de distribución al análisis regional (Stedinger et al., 1993). La linealidad de los L-momentos en comparación con los

momentos convencionales tiene la ventaja de ser insensible a los valores extremos (Stedinger et al., 1993). Los L-momentos son combinaciones lineales de momentos ponderados (MP) según la definición de Hosking (1990).

✚ Prueba de homogeneidad para regiones

Para validar la homogeneidad de una región en términos de relaciones de L- momentos, utilizamos la prueba de discordancia propuesta por Hosking y Wallis (1993).

Sea $u_i = [t^{(i)}, t_3^{(i)}, t_4^{(i)}]^T$ el vector que contiene los valores t , t_3 y t_4 en el sitio i donde el superíndice T denota la transposición de un vector o matriz.

Sea: $\bar{u} = N^{-1} \sum_{i=1}^N u_i$ el promedio regional no ponderado de los L-momentos para cada grupo. La medida de discordancia para el sitio i se define entonces como:

$$D_i = \frac{1}{3} (u_i - \bar{u})^T S^{-1} (u_i - \bar{u}) \quad (1)$$

En la ecuación anterior, N es el tamaño de la muestra en cada grupo y S^{-1} es la inversa de la matriz S ,

$$\text{donde: } S = (N - 1)^{-1} \sum_{i=1}^N (u_i - \bar{u})(u_i - \bar{u})^T \quad (2)$$

Hosking y Wallis (1997) propusieron el criterio de $D_i \geq 3$ (Ec. 1) para excluir una estación de la región homogénea.

La relación entre sitios se utiliza para identificar sitios coherentes con una distribución de frecuencia similar. Por consiguiente, la prueba de heterogeneidad H_i (Ec. 3) se usó para comparar las muestras de las relaciones de los L-momentos con los parámetros de distribución kappa; el cual, mide la homogeneidad entre sitios en la misma región. Hosking y Wallis (1997) propusieron la siguiente estadística:

$$H_i = \frac{(V_1 - \mu_v)}{\sigma_v} \quad (3)$$

μ_v y σ_v son la media y la desviación estándar de N_{sim} de los valores simulados de V_1 .

La región se considera “aceptablemente homogéneo” si $H < 1$, “posiblemente heterogéneo” si $1 \leq H < 2$, y «definitivamente heterogéneo» si $H \geq 2$.

H_1 : medida de homogeneidad en términos de L-CV

H_2 : medida de homogeneidad en términos de L-CS

H_3 : medida de homogeneidad en términos de L-CK

✚ Prueba de bondad de ajuste

La estadística Z^{DIST} (Hosking y Wallis 1991) juzga qué tan bien la L-asimetría simulada y la L-curtosis de una distribución ajustada coinciden con el promedio regional de L-asimetría y L-curtosis que fueron obtenidos de valores de los datos observados. El criterio de bondad de ajuste para cada distribución se define mediante el estadístico Z^{DIST} en función de las distintas distribuciones candidatas.

$$Z^{DIST} = (\tau_4^{DIST} - \tau_4^R + B_4) / \sigma_4 \quad (4)$$

Con τ_4^R = valor promedio de τ_4 de los datos de la región.

B_4, σ_4 = sesgo y desviación estándar de τ_4 , respectivamente.

El ajuste se consideró adecuado si Z^{DIST} fue lo suficientemente cercano de cero. Si $|Z^{DIST}| \leq 1.64$ podemos decir que el ajuste es razonable.

Si es aceptable más de una distribución candidata, la que tenga el $|Z^{DIST}|$ más bajo se considera la más adecuada. Además, la elección de la función de distribución y la bondad de ajuste de las funciones de distribución se verifican utilizando el diagrama de L-momentos (Hosking y Wallis 1997) para cada grupo derivado de la regionalización de la precipitación diaria máxima anual de las estaciones en toda el área de estudio. La idea detrás del uso de diagramas de L-momentos se basa en la explotación de combinaciones únicas de coeficientes de asimetría y curtosis, con el fin de identificar gráficamente la función más cercana a la muestra de estudio. Cuando la distribución del diagrama de dispersión está cerca de varias distribuciones, coloca el punto medio de la serie en el diagrama de L-momentos y elige la distribución más cercana a este punto (Kumar et al. 2003; Chen et al. 2006).

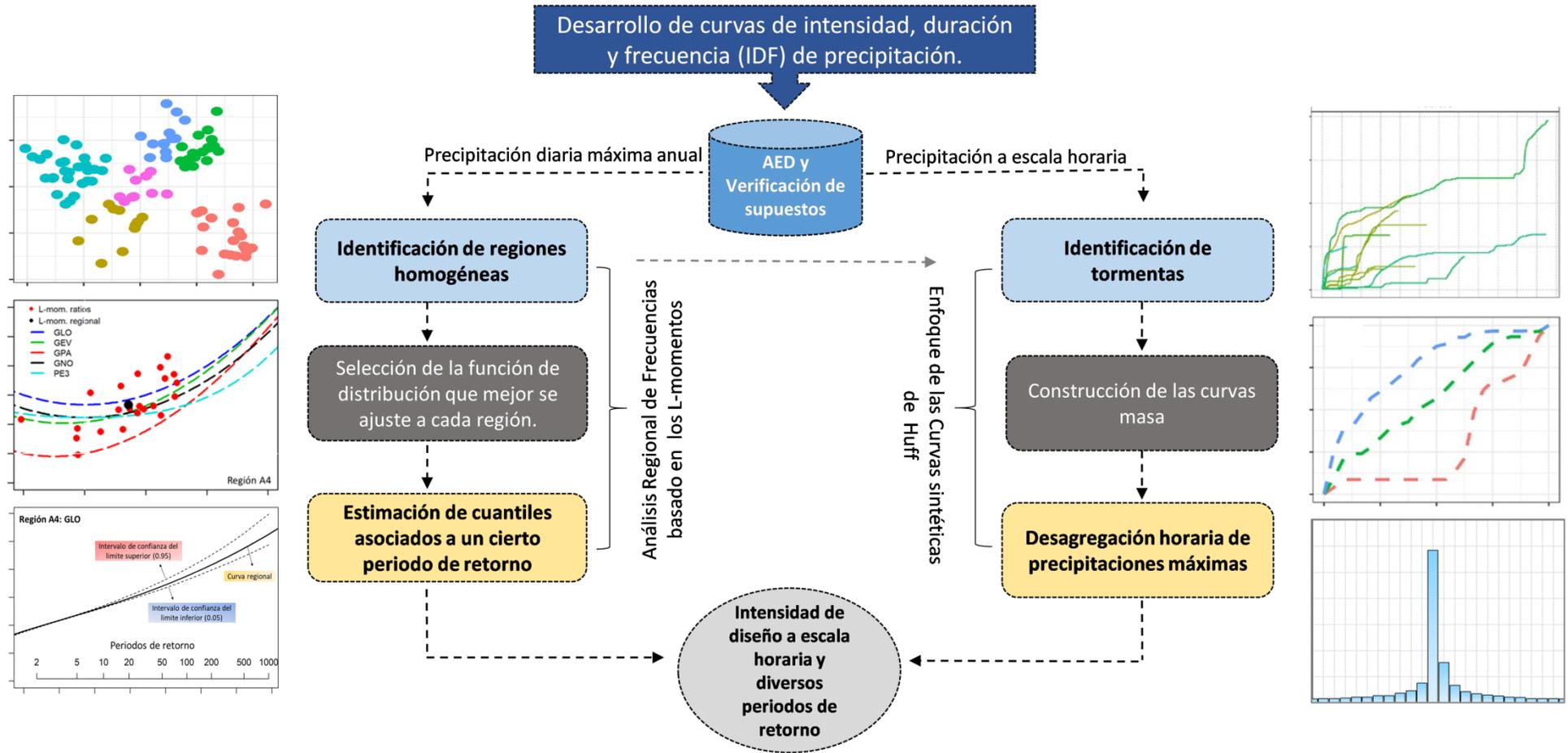


Figura 2. Esquema metodológico adoptado para la generación de las curvas IDF.

Representación de cuantiles de frecuencia

El mapeo nos permite evaluar la variabilidad espacial de los resultados provenientes de la estadística descriptiva (Berthelot 2008). Para una mejor representación espacial de la variabilidad de las precipitaciones, la interpolación es la mejor herramienta técnica. Permite estimar el valor de una variable en un punto dado, utilizando los valores de la variable de estudio medidos en sitios vecinos. A diferencia de las técnicas de interpolación convencionales, la geoestadística utiliza una combinación lineal de datos medidos y también toma en cuenta la posición geográfica del punto en consideración y la naturaleza aleatoria del fenómeno.

En este estudio, optamos por el enfoque geoestadístico (Co-kriging) para representar la variabilidad espacial de la precipitación máxima diaria. Co-Kriging se utiliza ampliamente para la interpolación de una variable regionalizada mediante la introducción de la técnica del variograma experimental. Esto es esencial antes de iniciar la implementación de Co-kriging. El variograma es una herramienta para el análisis estructural de la variable regionalizada con el fin de describir la estructura espacial de esta variable (Serra 1967; Meylan 1986).

Co-Kriging es el método óptimo, en un sentido estadístico, de interpolación y extrapolación. Es el método de estimación más preciso; a diferencia de otros métodos, nos permite calcular el error de estimación. Para evaluar la variabilidad espacial y elaborar una precipitación máxima diaria con las herramientas geoestadísticas, se mide la dependencia espacial de estas lluvias a través del variograma de la ecuación 5:

$$\gamma(h) = \frac{1}{2N(h)} \sum_{i=1}^{N(h)} [Z(x_i) - Z(x_{i+h})]^2 \quad (5)$$

Donde:

$\gamma(h)$ = Variograma

$N(h)$ = número de pares $(Z(x_i), Z(x_{i+h}))$ espaciados por una distancia de h

x_i = posición en el espacio de la variable Z

Z = precipitación máxima diaria en mm relacionada con diferentes periodos de retorno.

2.3.2. Desagregación de precipitaciones diarias mediante e enfoque de las curvas sintéticas de Huff

La metodología aplicada en esta sección es la propuesta por Huff (1967). La misma que se resume en 3 procesos lógicos (Figura 3), explicados a continuación:

✚ Análisis exploratorio de datos

Consiste en verificar que el valor de los datos horarios reportados representa la medición prevista y no se ve afectado por factores ajenos a ella. Dentro del análisis se encontraron problemas que incluyen:

- Estaciones con datos faltantes**, que ocurren comúnmente cuando la estación deja de registrar los datos de lluvia y deja importantes vacíos de información que van desde valores puntuales en algunas horas hasta varios años sin registro. Para lo cual se tomó en consideración que las estaciones tengan por lo menos registros en la época lluviosa correspondiente a los meses septiembre y abril.
- Estaciones con valores atípicos**, que ocurren cuando la lluvia registrada es mucho mayor que la tasa de lluvia normalmente medida. Para dichos casos se evaluó el valor puntual y se comparó si guarda relación con estaciones vecinas o con algún evento El Niño registrado, para tal caso en el que este difería mucho se consideró como valor faltante.
- Estaciones con datos repetitivos**, que ocurren cuando las estaciones registraban el mismo valor de lluvia durante un largo periodo de tiempo. Se identificó que este error sucede para registros menores a 0.2 mm, para lo cual se tomó como umbral que los registros horarios sean superiores a 0.2 mm.

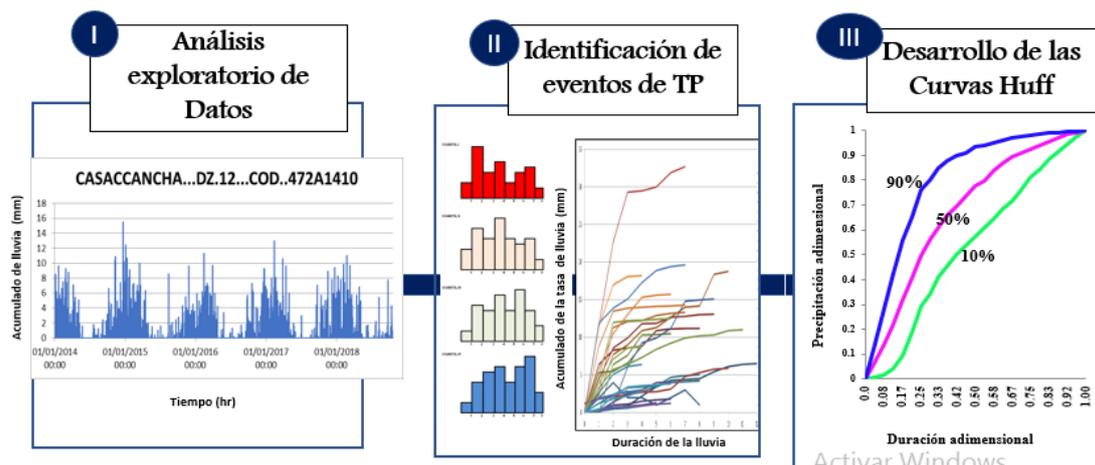


Figura 3. Esquema metodológico de la desagregación de precipitaciones diarias.

✚ Identificación de eventos de tormentas pluviométricas.

Parte primordial del estudio, es la identificación de los eventos de tormentas pluviométricas (TP) individuales de la serie de registros horarios de precipitación a nivel nacional. Para ello un evento de TP es definido bajo el siguiente criterio: (a) Registro de tasa de lluvia mayor a 0.1 mm, (b)

valor de inter-evento, el cual es entendido como el intervalo mínimo sin lluvia presente entre dos TP y (c) duración de la TP mayor o igual a 3 horas.

De los eventos de TP, estos fueron agrupados para cada región de precipitación máxima del Perú. Para de esta manera, identificar características estadísticas relevantes a nivel regional, tales como: duración, tasa de lluvia, intensidad y hora de inicio, así como la identificación del tipo de TP basado en cuartiles en donde ocurre la máxima tasa de lluvia o intensidad (Huff, 1967).

Desarrollo de las curvas Huff

La curva de Huff fue desarrollada para caracterizar las distribuciones temporales de la profundidad de la lluvia en un área y se ha aplicado ampliamente para describir el hietograma de diseño. La curva de Huff es un hietograma adimensional; donde, las duraciones de tormentas se normalizan dividiendo la duración total de la tormenta. Seguidamente, la profundidad de lluvia acumulada dentro de cada intervalo de tiempo, se normaliza dividiendo la profundidad de lluvia total de tormenta.

Al desarrollar la curva de Huff a partir de datos históricos de tormentas, el porcentaje de la profundidad de lluvia acumulada dentro de un intervalo de tiempo se clasifica en orden descendente para todos los eventos de tormentas, y luego el rango de cada tormenta se normaliza en una probabilidad de 0 a 100 % según el recuento de tormentas.

Generalmente las curvas Huff se desarrollan por la probabilidad de un incremento del 10 %. La curva del 50 % (mediana) es la curva más representativa. Sin embargo, para el presente estudio la curva del 100 % fue la más característica. Por otro lado, el número de tormentas en cada cuartil se define de acuerdo con la ocurrencia de precipitaciones máximas en una duración de lluvia normalizada, es decir, la primera (0-25 %), la segunda (25-50 %), la tercera (50-75 %) y el cuarto cuartil (75-100 %). Todas las curvas de Huff se derivan del primer cuartil en este estudio (Anexo 4 y 5).

Un enfoque común es utilizar un hietograma sintético de un patrón fijo de distribución temporal de las intensidades de lluvia dentro de un periodo. Para ello, utilizamos representaciones probabilísticas de las profundidades acumuladas de las tormentas para las correspondientes duraciones acumuladas de tormentas expresadas en forma adimensional, a saber, el concepto de curva de masa desarrollado por (Huff, 1967). Siguiendo este enfoque, la variabilidad de las precipitaciones dentro de un periodo lluvioso se pueden expresar como:

$$H(d) = \frac{1}{V} \int_0^d h(s) ds \quad d \in [0,1] \quad (6)$$

Donde $h(s)$ es la intensidad de la lluvia en el tiempo s , d es una fracción de la duración total de la lluvia t y v es la profundidad total de la lluvia, lo que simplifica el análisis de datos. Antes de caracterizar y desarrollar distribuciones de frecuencia de los datos de duración y profundidad de las tormentas, las tormentas deben identificarse y separarse dentro de los datos de lluvia para formar la base de datos subyacente para desarrollar un modelo conceptual y matemático de las intensidades dentro de la tormenta. En el presente estudio, los eventos de tormenta del conjunto de datos disponibles se seleccionan asumiendo un tiempo entre eventos igual a 1 hora.

Actualización de las curvas IDF basadas en condiciones climáticas futuras.

Un tema relevante incluido en el presente informe, es la actualización de las curvas IDF en condiciones climáticas cambiantes. Dado que, los datos observados y numerosos estudios indican claramente que el clima está cambiando rápidamente. Además, el calentamiento global ha afectado los ciclos hidrológicos y ecológicos del sistema terrestre. Se han observado a escala global modificaciones notables del ciclo hidrológico como el cambio en la frecuencia e intensidad de los eventos de lluvia extrema, que en muchos casos resulta en inundaciones severas. La mayor parte de la infraestructura de recursos hídricos existente en Perú se ha diseñado basándose en el supuesto de que el clima histórico es un buen predictor futuro. Ahora se comprende que el clima histórico no será representativo de las condiciones futuras y los sistemas de recursos hídricos nuevos y existentes deben diseñarse o modernizarse para tener en cuenta las condiciones climáticas cambiantes.

En tal sentido, los modelos climáticos globales (GCM) brindan una comprensión del cambio climático en diferentes escenarios de emisiones futuras, también conocidas como vías de concentración representativas (RCP), y brindan una forma de actualizar las curvas IDF en un clima cambiante.

Para dicho propósito se recurrió a los escenarios climáticos al 2050 para el Perú, desarrollado por el SENAMHI en el marco del Proyecto Apoyo a la Gestión de Cambio Climático Fase II y financiado por el Fondo de Cooperación Suiza para el Desarrollo (COSUDE). Dicha información se basó en la reducción de escala dinámica con el modelo regional Weather Research and Forecasting con núcleo dinámico Advanced Research WRF-ARW (Skamarock et al., 2008). En la configuración de WRF-ARW se utilizó la proyección geográfica Mercator (Figura 4) sobre los dominios Sudamérica (130 ° a 20 ° W y 70 ° S a 15 ° N) con resolución espacial horizontal 50 km y Perú (88 ° a 62 ° W y 23 ° S a 5 ° N) a 12 km. Se consideró 35 niveles verticales desde superficie hasta 5 hPa en la atmósfera.

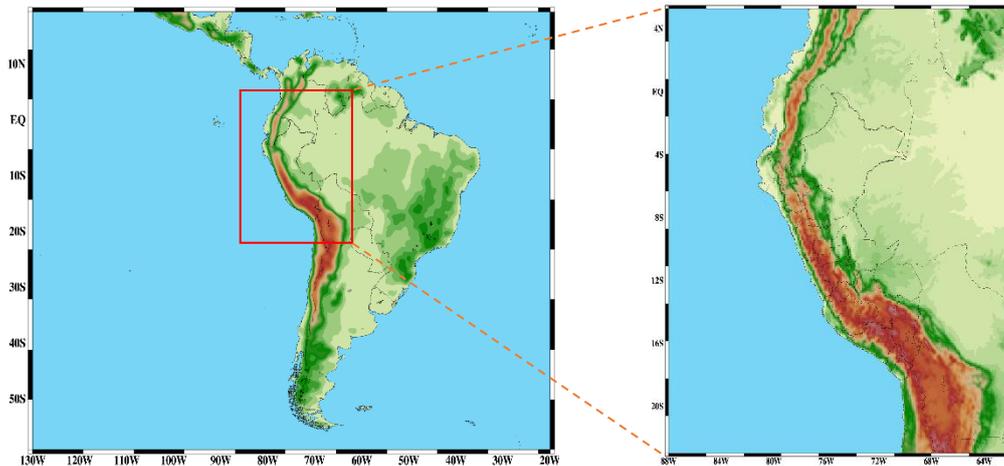


Figura 4. Reducción de escala dinámica con WRF-ARW para generar los escenarios climáticos para el ámbito peruano. Dominios de simulación para Sudamérica a 50 km y Perú a 12 km de resolución espacial horizontal. Fuente: SENAMHI-DMA/SMN-GCJV, 2021.

Las forzantes del modelo WRF-ARW para las simulaciones climáticas fueron los datos de modelos climáticos globales (MCG) de la fase 5 del Proyecto de Intercomparación de Modelos Acoplados (CMIP5), siendo los modelos ACCESS1-0 del Instituto Meteorológico de Australia (Bi et al., 2013), HadGEM2-ES del Met Office Hadley Center y el MPI-ESM-LR del Max Plank Instituto (Jungclaus et al., 2013), correspondientes a los periodos históricos (1981-2005) y futuro (2006-2065) considerando el escenario de altas emisiones RCP8.5. Estos dos MCG tienen buena representación de los patrones de circulación de gran escala sobre Sudamérica, como el Alta de Bolivia, el Anticiclón del Pacífico Sur y el núcleo de la Baja Amazónica; los cuales modulan el clima en el Perú (Barreto, C; Llacza, 2014). Se aplicó la corrección de sesgos sistemáticos a las forzantes con la propuesta de (Brueyre, c; Done, j; Holland, G; Fredrick, 2014), utilizando el reanálisis ERA Interim (Dee et al., 2011).

Si bien es cierto, el número de modelos climáticos utilizados no es lo suficiente para realizar un análisis de la incertidumbre a detalle, estos modelos utilizados provienen de una simulación dinámica robusta lo que garantiza replicar con mayor detalle las características atmosféricas de un país como el Perú en el cual las variabilidades son bastantes marcadas tanto espacial como temporalmente. Estos modelos provienen de los experimentos del CMIP5, pero se espera incorporar próximamente las salidas de los modelos del CMIP6.

En el postproceso, la precipitación, temperatura máxima y mínima de 12 km de resolución espacial fueron corregidos mediante la técnica de Linear Scaling (Luo et al., 2018), utilizando datos del producto grillado PISCO (Aybar et al., 2017), llevándose a 10 km de resolución espacial horizontal. Estos datos fueron complementados con los del modelo WRF-ARW_HadGEM2-ES, el

cual fue llevado a la resolución espacial de 10 km desde su resolución original de 16 km para finalmente obtener los escenarios climáticos para el Perú a 10 km.

Para examinar las proyecciones futuras de las curvas IDF, se utilizó la precipitación diaria de los modelos de cambio climático ACCESS1-0, HadGEM2-ES, MPI-ESM-LR y la Mediana de los tres modelos. Luego, se extrajeron dos periodos de cada modelo, el escenario histórico (1981-2004) y el escenario futuro (2035-2065) con un RCP 8.5. Luego, se obtuvo la precipitación máxima diaria para cada año y se determinó la media de cada periodo.

Sucesivamente, se definió una relación simple entre la media del escenario futuro (PCP_{fut}) y la media del escenario histórico (PCP_{hist}), obteniendo un valor multiplicativo denominado parámetro “K”. Además, se aplicó un filtrado de los valores extremos, propios de divisiones entre precipitaciones menores a 0.1 mm, asignando a los valores superiores al percentil 0.95 el valor de este mismo, con el propósito de definir los escenarios futuros más desfavorables.

$$\frac{PCP_{fut}}{PCP_{hist}} = K$$

Posteriormente, el parámetro K fue multiplicado a los cuantiles de precipitación máxima en 24 horas y finalmente estos valores fueron sometidos a un proceso de desagregación tal como se explica en la sección metodológica de las curvas sintéticas de Huff. Por último, los valores de “K” mayores a 1 fueron incluidos únicamente en esta etapa, con el propósito de representar las zonas con mayor precipitación; En caso, de presentar valores menores a 1, estos se mantuvieron constante adoptando el valor del escenario histórico.

3. RESULTADOS Y DISCUSIÓN

Los resultados obtenidos en este reporte sugieren que la mayoría de las observaciones de precipitación máxima anual en este estudio no presentan tendencias y, por lo tanto, pueden considerarse como series estacionarias. De igual forma, la evaluación de la prueba de independencia serial mostro un nivel de significancia del 5 %. Por lo tanto, las series pueden aceptarse como estacionarias y sin correlación serial, lo que permite aplicar el análisis de frecuencias de precipitación.

3.1. Resultados del análisis regional de frecuencias basado en los L-momentos

3.1.1. Identificación de regiones homogéneas

La identificación de las regiones homogéneas en Perú se realizó en dos pasos según los sugerido por (J. Hosking & Wallis, 1997):

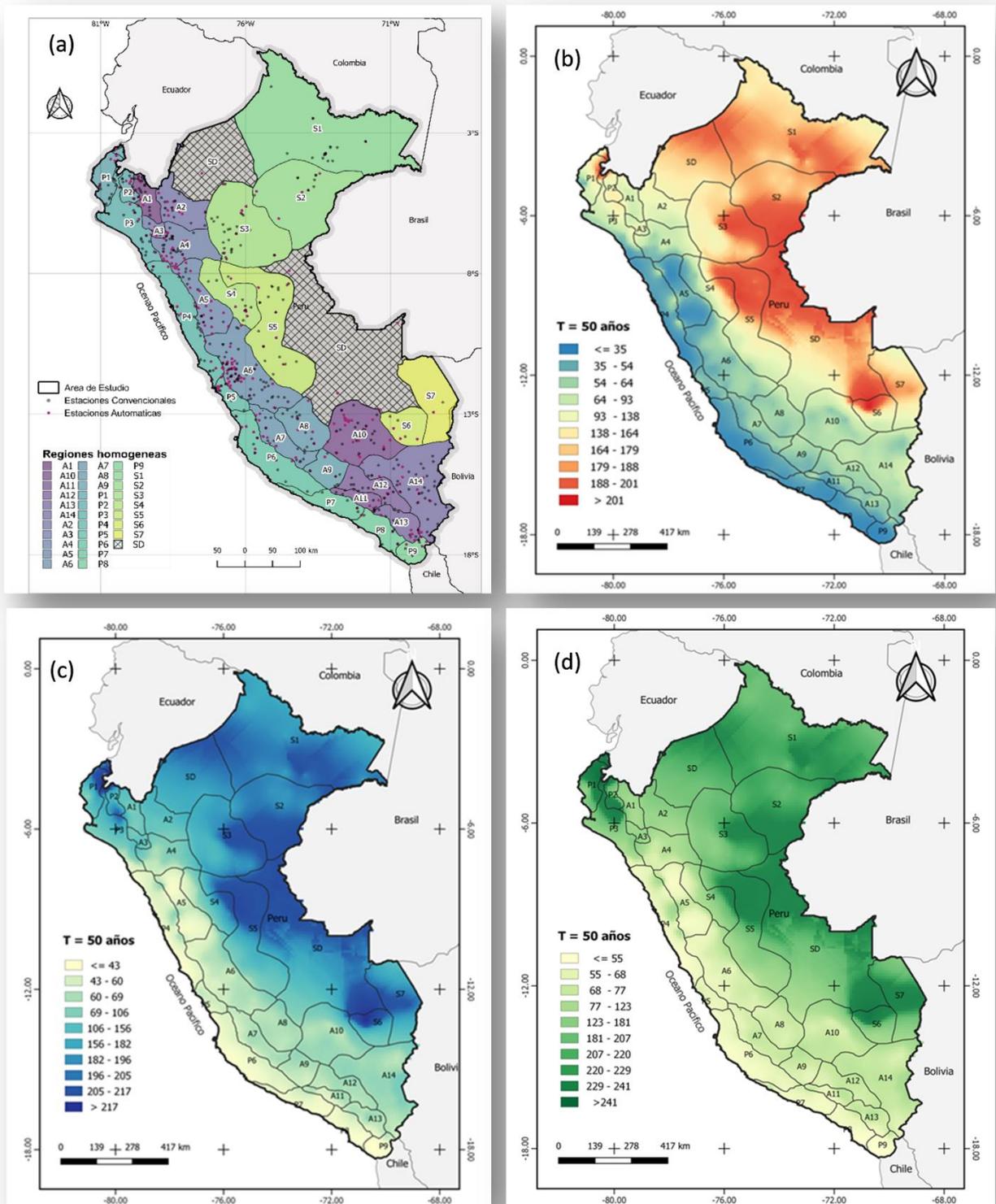


Figura 5. (a) Situación geográfica de las 30 regiones homogéneas identificadas (b) distribución espacial de los cuantiles de precipitación máxima en 24 horas basados en información histórica (c) y (d) cuantiles de precipitación máximas en 24 horas correspondiente al límite de confianza superior e inferior.

- (i) Las regiones homogéneas iniciales se formaron mediante la identificación de conglomerados (agrupamiento) en el espacio de las características del sitio. Las regiones se analizaron para evaluar si son espacialmente continuas y físicamente razonables. Las medidas de discordancia (D_i) y heterogeneidad (H) se calcularon para cada región identificada por el procedimiento de agrupamiento.
- (ii) Las regiones homogéneas se refinaron manualmente. La inspección de los conglomerados se realizó teniendo en cuenta predictores físicos estandarizados, lo que resultó en conglomerados más homogéneos. El conjunto final de regiones se ilustra en la Figura 5a. Las 30 regiones identificadas revelan 9 regiones hacia el (Pacífico) cubriendo áreas entre áridas hacia el sur y tropicales hacia el norte; 14 regiones en los (Andes) y 7 regiones en la (Selva).

3.1.2. Pruebas bondad de ajuste

Los resultados de las medidas de bondad de ajuste se enumeran en la tabla 1, que indican que son satisfactorios con $Z^{DIST} \leq |1.64|$ (J. Hosking & Wallis, 1993, 1997). En la prueba de bondad de ajuste, que es el paso final del proceso de regionalización, cinco distribuciones (GLO: logística generalizada, GEV: valor extremo generalizado, GNO: normal generalizada, GPA: Pareto generalizado, PE3: Pearson tipo III) fueron investigados.

Entre estas cinco distribuciones candidatas, la distribución GLO, GEV se ajustaron mejor en mayor parte del área de estudio con un valor menor que $Z^{DIST} \leq |1.64|$ para diferentes regiones. Además, la distribución espacial de las distribuciones muestra diferencias entre las regiones, indicando variación incluso entre regiones vecinas; excepto en los Andes centrales donde las regiones A9, A10, A11, A12 y A13 están instaladas en GLO. La mejor distribución identificada para cada región en este paso se utiliza para estimar la curva de crecimiento regional y la frecuencia asociada.

Con fines ilustrativos, una forma gráfica de ver el ajuste de la función de distribución probabilística (FDP) son las curvas de “ratios” de L-momentos que muestran la ubicación de los L-momentos promedio regionales con ratios teóricos de L-asimetría/L-curtosis para los diferentes candidatos. De esta manera un ejemplo en la figura 6, describe que las distribuciones ubicadas en la región A4, están más cerca de la curva GLO Y GEV, finalmente elegimos GLO por tener mejor estadístico Z^{DIST} .¹

¹ Las áreas sombreadas en la figura 5a (Regiones SD), presentan menos confiabilidad por la ausencia de estaciones.

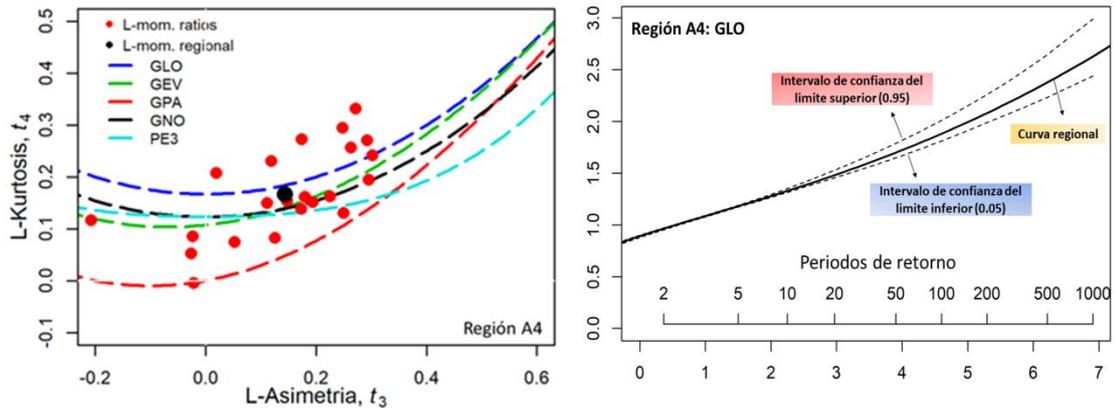


Figura 6. (a) Diagrama de ratios de L-momentos y (b) representación gráfica de cuantiles regionales y sus correspondientes intervalos de confianza – región A4.

3.1.3. Análisis de frecuencia regional para los extremos de lluvia

Para el análisis de frecuencia regional para los extremos de lluvia se utilizó el procedimiento de cuantiles que utiliza la simulación de Monte Carlo. Para cada región, los datos simulados se generaron a partir de la distribución que mejor se ajusta a los datos regionales reales. A continuación, se calcularon los cuantiles de precipitación en 24 horas, para los periodos de retorno T (2, 5, 10, 30, 50, 75, 100, 200, 500 y 1000 años). Después de una gran cantidad de simulaciones (500 en este estudio), las diferencias entre los cuantiles simulados y estimados se utilizaron para aproximar los límites de error (intervalos de confianza) y los errores cuadráticos medios (RMSE) de las estimaciones de cuantiles para evaluar la precisión de los cuantiles estimados. Una demostración para los cuantiles estimados y el sesgo para la región 4 se presenta en la Figura 5b.

Los resultados muestran que los RMSE son lo suficiente fiables como para permitir que las estimaciones de cuantiles se utilicen con confianza cuando los periodos de retorno son inferiores a 200 años. Las estimaciones de periodos de retorno más altos (por ejemplo, 1000 años) requieren de registros históricos suficientes para mejorar la confiabilidad en la estimación de cuantiles.

Tabla 1. Valores de Z^{DIST} para los rangos aceptados por las regiones homogéneas.

| Z^{DIST} | | | | | | |
|------------|------------------------------|----------------------------------|---------------------------|------------------------|---------------------------|-----------|
| Región | Logístico generalizado (GLO) | Valor Extremo Generalizado (GEV) | Normal Generalizado (GNO) | Pearson Tipo III (PE3) | Pareto Generalizado (GPA) | Mejor FDP |
| P1 | 2.78 | 2.42 | 1.19 | -0.91 | 0.85 | GPA |
| P2 | 2.79 | 1.08 | 0.93 | 0.43 | -2.67 | PE3 |
| P3 | 0.97 | 0.13 | -1.05 | -3.1 | -2.51 | GEV |
| P4 | -0.66 | -1.18 | -2.27 | -4.14 | -3.06 | GLO |
| P5 | -0.65 | -1.14 | -1.86 | -3.12 | -2.7 | GLO |
| P6 | 1.72 | 1.3 | 0.32 | -1.36 | -0.26 | GPA |
| P7 | 1.78 | 1.26 | 0.34 | -1.26 | -0.52 | GNO |
| P8 | 1.19 | 0.63 | -0.21 | -1.67 | -1.18 | GNO |
| P9 | 2.27 | 0.81 | 0.41 | -0.38 | -2.62 | PE3 |
| A1 | 1.76 | -1.05 | -1.15 | -1.76 | -7.04 | GEV |
| A2 | 2.77 | 0.69 | 0.39 | -0.35 | -3.96 | PE3 |
| A3 | 0.9 | -1.2 | -1.34 | -1.87 | -5.75 | GLO |
| A4 | 1.02 | -1.91 | -2.03 | -2.69 | -8.18 | GLO |
| A5 | 1.39 | -0.84 | -0.96 | -1.5 | -5.64 | GEV |
| A6 | 0.25 | -3.61 | -4.03 | -5.24 | -12.11 | GLO |
| A7 | 0.25 | -2 | -1.98 | -2.36 | -6.72 | GLO |
| A8 | 1.54 | -0.84 | -0.86 | -1.32 | -5.85 | GEV |
| A9 | 0.68 | -1.57 | -1.31 | -1.45 | -6.03 | GLO |
| A10 | 0.05 | -3.22 | -2.92 | -3.21 | -9.78 | GLO |
| A11 | 0.09 | -0.91 | -1.59 | -2.79 | -3.58 | GLO |
| A12 | -0.3 | -2.55 | -2.98 | -3.94 | -7.7 | GLO |
| A13 | -0.86 | -2.09 | -2.58 | -3.5 | -5.12 | GLO |
| A14 | 2.36 | -1.87 | -2.36 | -3.7 | -11.22 | GEV |
| S1 | 2.66 | -0.21 | -0.19 | -0.69 | -6.23 | GNO |
| S2 | -0.4 | -2.72 | -2.39 | -2.5 | -7.24 | GLO |
| S3 | 2 | -0.85 | -1.24 | -2.24 | -7.21 | GEV |
| S4 | 1.14 | -0.84 | -0.79 | -1.08 | -4.94 | GNO |
| S5 | 1.24 | -0.89 | -1.12 | -1.77 | -5.59 | GEV |
| S6 | -0.76 | -1.42 | -1.6 | -1.96 | -2.96 | GLO |
| S7 | -0.63 | -1.08 | -1.11 | -1.22 | -2.07 | GLO |

3.2. Resultados de la desagregación de precipitaciones diarias mediante el enfoque de curvas de Huff.

El análisis exploratorio de los datos y la identificación de eventos de tormentas pluviométricas (TP) permitió saber que en el rango de 13:00 a 23:00 horas ocurre el 77 % de los eventos de TP (Figura 7), siendo las 16 horas la hora más predominante de inicio de los eventos de TP para cada región de precipitación máxima del Perú. Mientras para las duraciones, se encontró que más del 86.4 % de eventos de TP duran entre 3 y 6 horas, sin embargo, existe registros de eventos de TP que superaron las 12 horas de duración que representa el 17.6 % de 62 959 eventos de TP (Figura 7).

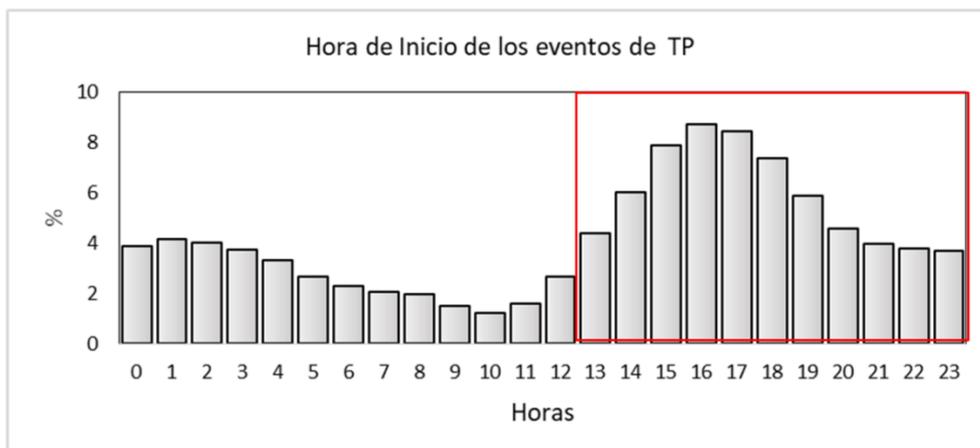


Figura 7. Probabilidad de ocurrencia de inicio de los eventos de TP a nivel nacional.

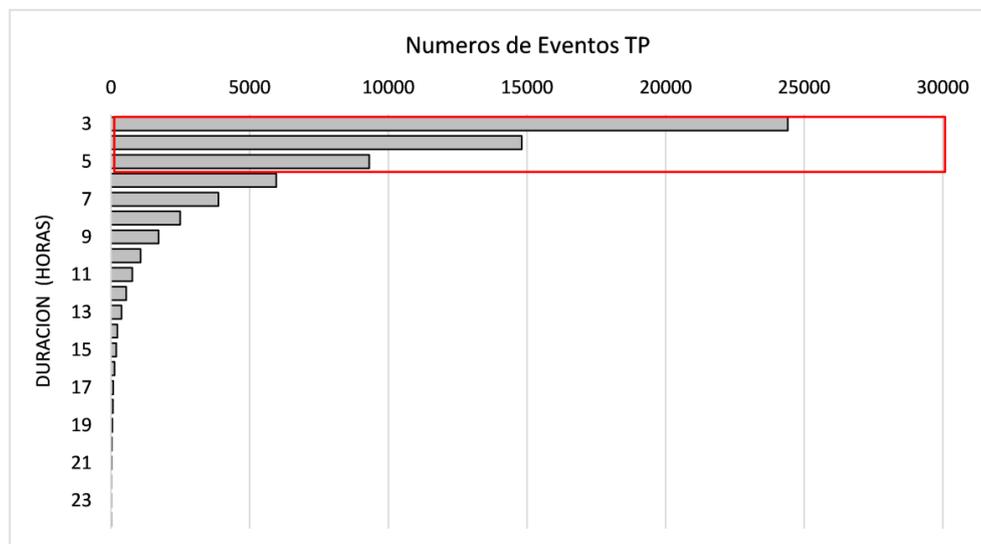


Figura 8. Probabilidad de ocurrencia de la duración de los eventos de TP a nivel nacional.

Las curvas Huff fueron obtenidas para cada región de precipitación máxima (Figura 9). A modo de ejemplo, en la Figura 10, se muestran las curvas de Huff para la región A6.

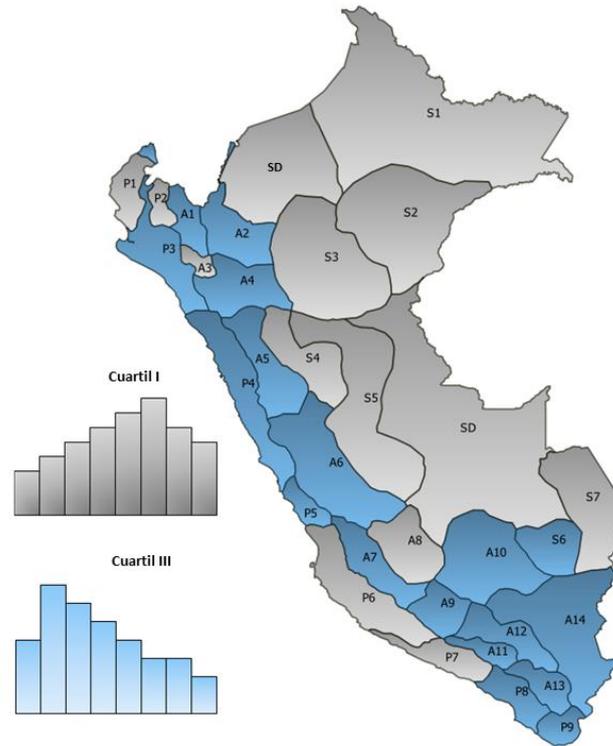


Figura 9. Tipos de tormentas pluviométricas (TP) predominantes para cada región.

Las curvas Huff determinadas para cada región de precipitación máxima representan una amplia variación de las distribuciones de los eventos de TP observadas. Sin embargo, con fines de diseño y también reducir la variedad de posibilidades que el usuario pueda tener para la selección de los perfiles de TP (curvas Huff), se recomienda el empleo de las curvas de la clasificación del evento de TP más predominante y consecuentemente la curva del 90 % de probabilidad. No obstante, las otras curvas les permiten a los usuarios determinar las relaciones de escorrentía para varios tipos de distribuciones que ocurren para las 4 clasificaciones de los eventos de TP.

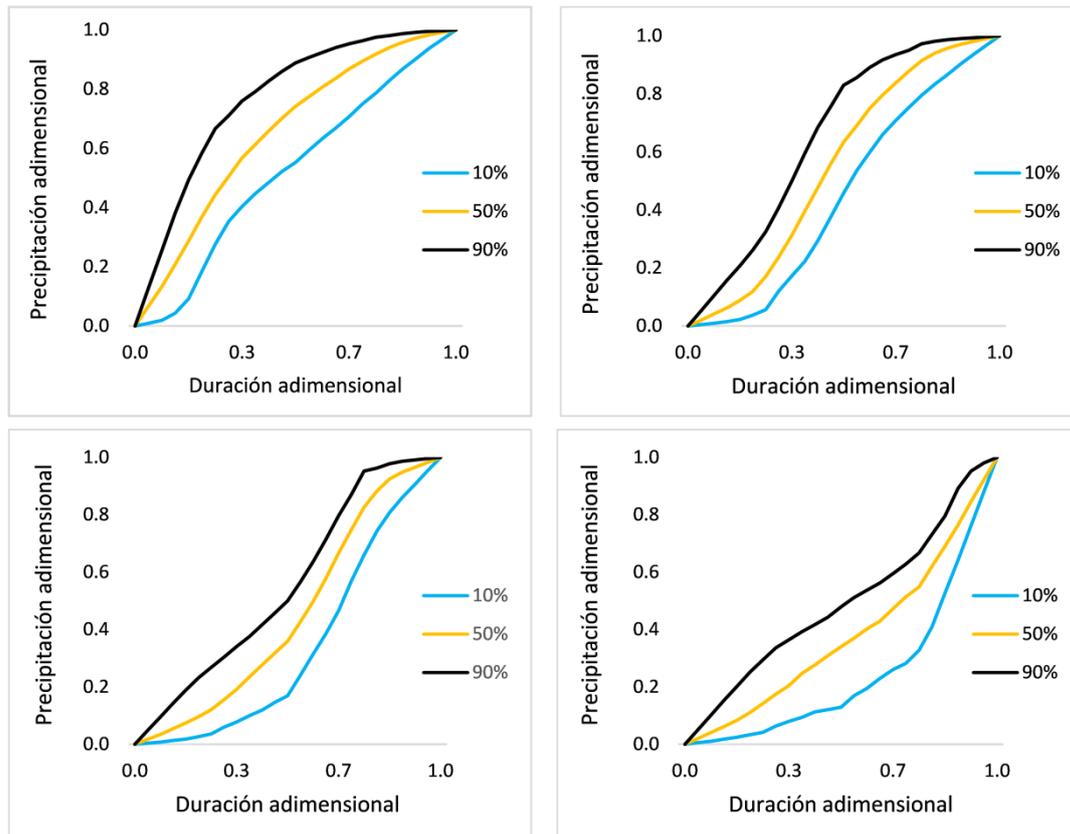


Figura 10. Curvas de Huff para cada tipo de tormenta pluviométrica para la región A6.

3.3. Curvas IDF basadas en condiciones climáticas futuras.

En general, Los cambios proyectados en los cuantiles de precipitación máxima en 24 horas, basados en modelos de cambio climático (RCP 8.5) en el área de estudio, mostraron cambios hacia una mayor frecuencia de fuertes precipitaciones y una mayor acumulación de las precipitaciones.

En ese sentido, es importante resaltar que las características de las precipitaciones son un tema clave en la investigación sobre el clima. La misma cantidad de precipitación con diferentes frecuencias e intensidades, podría dar lugar a diferencias importantes en la escorrentía superficial, la evaporación y la condición del suelo con lo cual se afecta el balance hídrico de largo plazo.

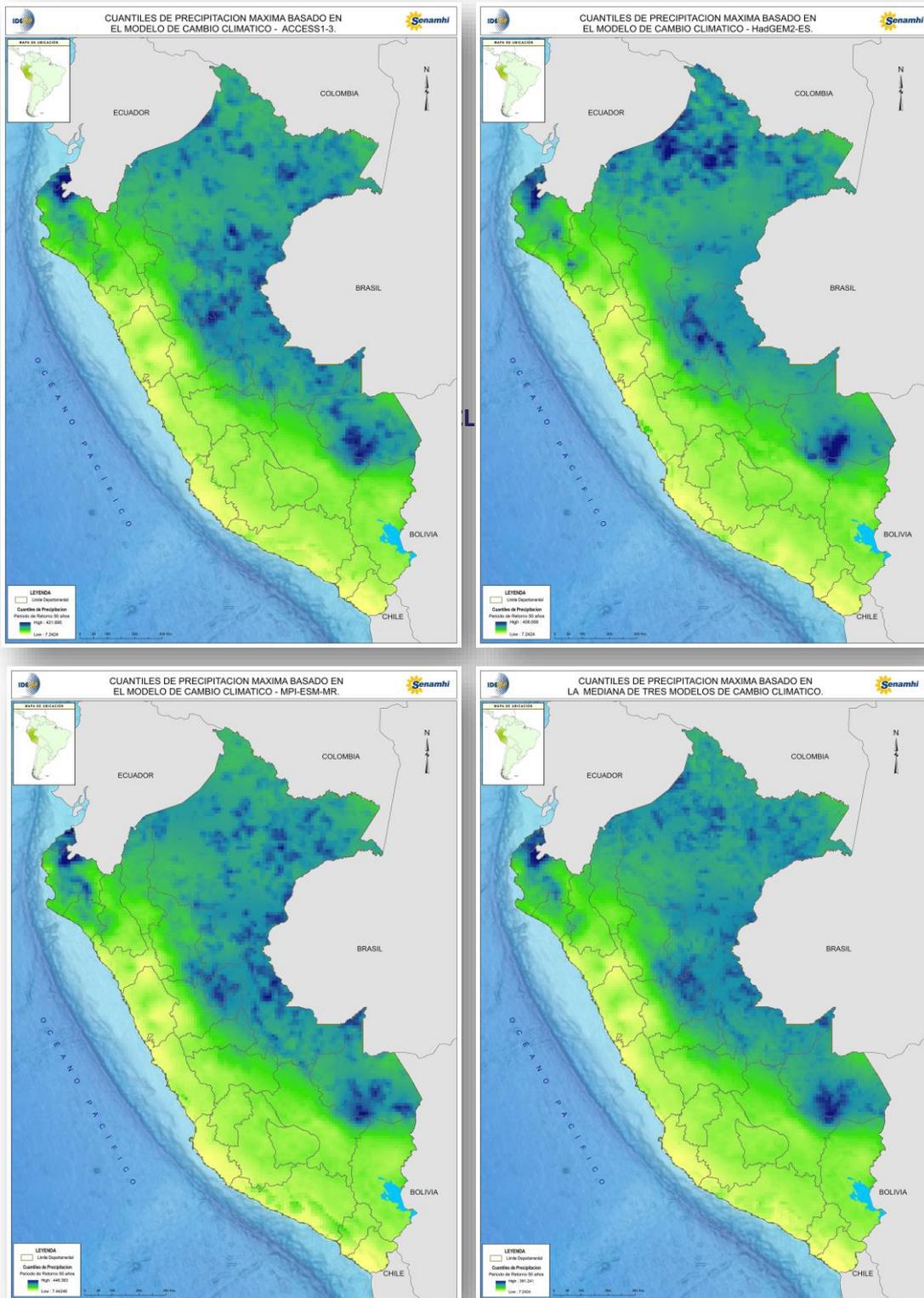


Figura 11. Cuantiles de precipitación máxima con un periodo de retorno de 50 años, basados en los modelos de cambio climático ACCESS1-3, HadGEM2-ES, MPI-ESM-MR y la Mediana de los modelos en mención.

4. MÓDULO WEB PARA LA ESTIMACIÓN DE CURVAS IDF.

Con el propósito de distribuir la información se desarrolló e implementó una herramienta que permite incorporar fácilmente los impactos del cambio climático, en forma de curvas IDF actualizadas, con fines de diseño y gestión de la infraestructura de recursos hídricos. Para lograr esta tarea, se desarrolló un módulo basado en la web, que consiste en una interfaz fácil de usar con un sistema de base de datos versátil y una metodología eficiente para la actualización de las curvas IDF.

La plataforma permite la interacción y descarga de la base de datos, relacionada a las curvas IDF para varios periodos de retorno (2, 5, 10, 30, 50, 100, 200, 500 Y 1000 años), diferentes duraciones generalmente de 1 a 24 horas y sus correspondientes intervalos de confianza. Con el nuevo módulo, los usuarios pueden obtener curvas IDF para cualquier ubicación en el país, incluidas las regiones donde no hay observaciones disponibles. La herramienta basada en la web está diseñada como un sistema de apoyo de decisión, todos los resultados de este estudio, así como la base de datos, están disponibles gratuitamente en el siguiente sitio web:

<https://idesep.senamhi.gob.pe/dhi-idf/>

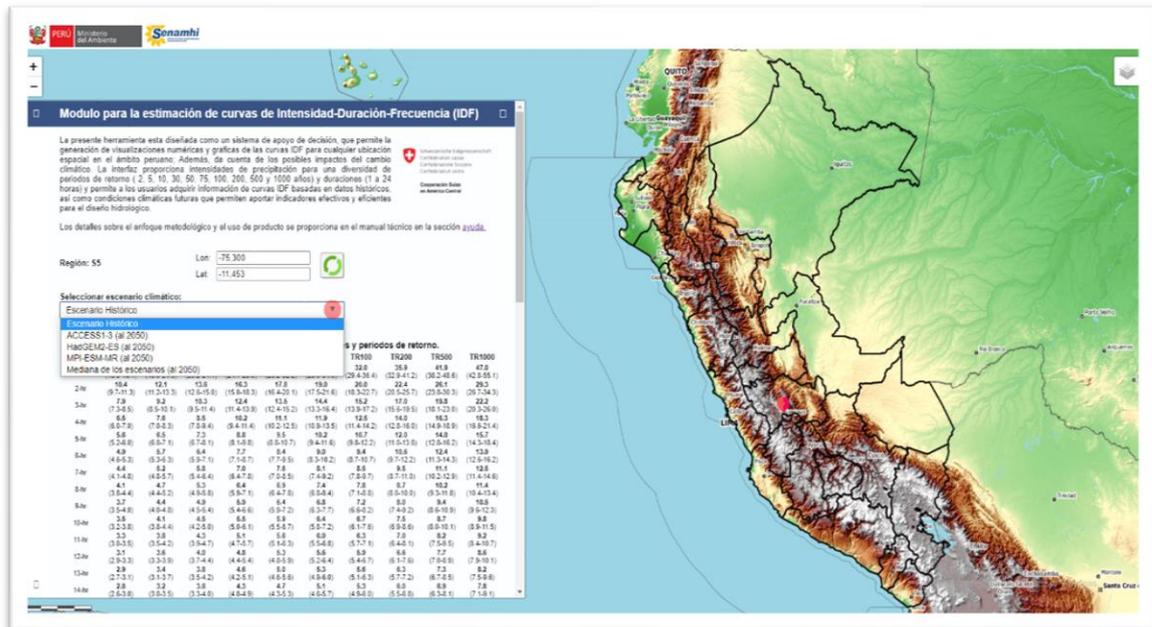


Figura 12. Interfaz del usuario de la herramienta web IDF-Perú.

5. CONCLUSIONES

El ámbito peruano se clasifica en 30 regiones después de la inspección del resultado inicial de la detección de heterogeneidad mediante el análisis de agrupamiento. Los resultados de bondad de ajuste indican que entre las cinco distribuciones candidatas (es decir, GLO: logística generalizada, GEV: valor extremo generalizado, GNO: normal generalizada, GPA: Pareto generalizado, y PE3: Pearson tipo III) las distribuciones GLO y GEV se ajustan mejor a la mayor parte del área de estudio con un valor menor que $Z^{DIST} \leq |1.64|$. Los cuantiles estimados y su sesgo producidos por la simulación de Montecarlo (m=500 veces) demuestran que son confiables para permitir que la estimación de cuantiles se utilice con confianza cuando los periodos de retorno son inferiores a 200 años; sin embargo, las estimaciones para periodos de retorno más extensos requieren mayores longitudes de registros históricos. El mapa de los extremos de precipitación indica que la cantidad de precipitación se incrementa gradualmente hacia el noreste de la vertiente del Atlántico y al noroeste vertiente del Pacífico. Se determinó las curvas de Huff para cada región de precipitación máxima y se sugiere el uso del cuartil con mayor frecuencia y consecuentemente la curva del 100 % de probabilidad.

Bajo los escenarios de cambio climático examinados aquí, los modelos ACCESS1-0, HadGEM2-ES, MPI-ESM-LR y la Mediana, mostraron un cambio hacia una mayor frecuencia de fuertes precipitaciones y una mayor acumulación de las precipitaciones, comparadas con las simulaciones del clima actual.

El uso de estos resultados para propósitos de diseño de ingeniería debe ser tomados con cuidado y siempre considerando las bandas de confianza de la curva de crecimiento regional y teniendo en cuenta que el periodo de las series de tiempo utilizadas en algunas regiones es corto, así como el número de estaciones para cada una de las regiones. El enfoque junto con las pruebas estadísticas utilizadas en este estudio y los hallazgos de la caracterización de los patrones espacio-temporales de variaciones de frecuencia para los extremos de lluvia en Perú, constituyen las principales contribuciones distintas de literaturas pasadas. Este estudio tiene un gran mérito científico y práctico para comprender mejor los patrones espacio-temporales de las precipitaciones extremas para relevar los vínculos subyacentes entre las precipitaciones y las inundaciones en una perspectiva geográfica amplia.

6. REFERENCIAS

- Aybar, C., Lavado-Casimiro, W., Huerta, A., Fernández Palomino, C., Vega-Jácome, F., Sabino Rojas, E., & Felipe-Obando, O. (2017). Uso del producto grillado pisco de precipitación en estudios, investigaciones y sistemas operacionales de monitoreo y pronóstico hidrometeorológico. Nota Técnica N° 001 SENAMHI-DHI-2017. In *Senamhi*.
- Barreto, C; Llacza, A. (2014). *Validation of CMIP5 models by means of representing patterns of mesoscale systems on South America for the summer and winter* (Vol. 1). https://doi.org/http://www.cima.fcen.uba.ar/cordex2/final/Poster_Barreto.pdf
- Bi, D., Dix, M., Marsland, S. J., O'Farrell, S., Rashid, H. A., Uotila, P., Hirst, A. C., Kowalczyk, E., Golebiewski, M., Sullivan, A., Yan, H., Hannah, N., Franklin, C., Sun, Z., Vohralik, P., Watterson, I., Zhou, X., Fiedler, R., Collier, M., ... Puri, K. (2013). The ACCESS coupled model: Description, control climate and evaluation. *Australian Meteorological and Oceanographic Journal*, 63(1), 41–64. <https://doi.org/10.22499/2.6301.004>
- Bruey`re,c; Done, j; Holland, G; Fredrick, S. (2014). Bias corrections of global models for regional climate simulations of high-impact weather. *Climate Dynamics*, 43(7–8), 1847–1856. <https://doi.org/10.1007/s00382-013-2011-6>
- Charrad, M., Ghazzali, N., Boiteau, V., & Niknafs, A. (2014). Nbclust: An R package for determining the relevant number of clusters in a data set. *Journal of Statistical Software*, 61(6), 1–36. <https://doi.org/10.18637/jss.v061.i06>
- Dalrymple, T. (1960). Flood-Frequency Analyses. Manual of Hydrology Part 3. Flood-flow techniques. *Usgeo*, 1543-A, 80. <https://doi.org/doi.org/10.3133/wsp1543A>
- Dee, D. P., Uppala, S. M., Simmons, A. J., Berrisford, P., Poli, P., Kobayashi, S., Andrae, U., Balmaseda, M. A., Balsamo, G., Bauer, P., Bechtold, P., Beljaars, A. C. M., van de Berg, L., Bidlot, J., Bormann, N., Delsol, C., Dragani, R., Fuentes, M., Geer, A. J., ... Vitart, F. (2011). The ERA-Interim reanalysis: Configuration and performance of the data assimilation system. *Quarterly Journal of the Royal Meteorological Society*, 137(656), 553–597. <https://doi.org/10.1002/qj.828>
- Espinoza, J., Ronchail, J., Guyot, J., Cochonneau, G., Naziano, F., Lavado, W., De Olivera, E., Pombosa, R., & Vauchel, P. (2009). Spatio-temporal rainfall variability in the Amazon basin countries (Brazil, Peru, Bolivia, Colombia, and Ecuador). *International Journal of Climatology*, 29(3), 317–319. <https://doi.org/10.1002/joc>
- Garreaud, R., Vuille, M., & Clement, A. C. (2003). The climate of the Altiplano: Observed current conditions and mechanisms of past changes. *Palaeogeography, Palaeoclimatology, Palaeoecology*, 194(1–3), 5–22. [https://doi.org/10.1016/S0031-0182\(03\)00269-4](https://doi.org/10.1016/S0031-0182(03)00269-4)
- Hosking, J., & Wallis, J. (1993). Some Statistics Useful in Regional Frequency Analys. *IBM Research Division, Yorktown Heights, New York*, 29(92), 271–281. <https://doi.org/https://doi.org/10.1029/92WR01980>

- Hosking, J., & Wallis, J. (1997). *Regional Frequency Analysis: An Approach Based on L-moments*. Cambridge University Press. <https://doi.org/10.1017/CBO9780511529443>
- Huff, F. A. (1967). *Time Distribution Rainfall in Heavy Storms*. 3(4), 1007–1019. <https://doi.org/10.1029/WR003i004p01007>
- Jungclaus, J. H., Fischer, N., Haak, H., Lohmann, K., Marotzke, J., Matei, D., Mikolajewicz, U., Notz, D., & Von Storch, J. S. (2013). Characteristics of the ocean simulations in the Max Planck Institute Ocean Model (MPIOM) the ocean component of the MPI-Earth system model. *Journal of Advances in Modeling Earth Systems*, 5(2), 422–446. <https://doi.org/10.1002/jame.20023>
- Lavado, C., Taylor, P., Sven, W., & Guyot, J. L. (2012). *Basin-scale analysis of rainfall and runoff in Peru (1969 – 2004): Pacific , Titicaca and Amazonas drainages Basin-scale analysis of rainfall and runoff in Peru (1969 – 2004): Pacific ,. December 2014*, 37–41. <https://doi.org/10.1080/02626667.2012.672985>
- Luo, M., Liu, T., Meng, F., Duan, Y., Frankl, A., Bao, A., & De Maeyer, P. (2018). Comparing bias correction methods used in downscaling precipitation and temperature from regional climate models: A case study from the Kaidu River Basin in Western China. *Water (Switzerland)*, 10(8). <https://doi.org/10.3390/w10081046>
- Rau, P., Bourrel, L., Labat, D., Melo, P., Dewitte, B., Frappart, F., Lavado, W., & Felipe, O. (2017). Regionalization of rainfall over the Peruvian Pacific slope and coast. *International Journal of Climatology*, 37(1), 143–158. <https://doi.org/10.1002/joc.4693>
- Skamarock, W. C., Klemp, J. B., Dudhi, J., Gill, D. O., Barker, D. M., Duda, M. G., Huang, X.-Y., Wang, W., & Powers, J. G. (2008). A Description of the Advanced Research WRF Version 3. *Technical Report, June*, 113. <https://doi.org/10.5065/D6DZ069T>
- Stedinger, J. R., Vogel, Richard., & Georgiou, E. (1993). Frequency Analysis of Extreme events. *Engineering*. <https://sites.tufts.edu/richardvogel/files/2019/04/frequencyAnalysis.pdf>

7. ANEXOS

Anexo 1: Valores de H_1 , H_2 y H_3 para las regiones homogéneas.

| Regiones | H_1 | H_2 | H_3 |
|----------|-------|-------|-------|
| P1 | 0.63 | 0.74 | 0.44 |
| P2 | 0.35 | 0.72 | -0.31 |
| P3 | 0.97 | 3.03 | 2.73 |
| P4 | 0.92 | 0.39 | -1.16 |
| P5 | 0.62 | 1.09 | 0.49 |
| P6 | 0.6 | 0.83 | 0.6 |
| P7 | 0.95 | 0.94 | 0.12 |
| P8 | 0.77 | 0.52 | -0.4 |
| P9 | 0.61 | 2.92 | 3.25 |
| A1 | 0.77 | 1.64 | 1.34 |
| A2 | 0.41 | 1.04 | 0.01 |
| A3 | 0.01 | 0.92 | 2.15 |
| A4 | 0.23 | 1.75 | 1.9 |
| A5 | 0.54 | 1.11 | 0.32 |
| A6 | 0.73 | 3.12 | 2.84 |
| A7 | 0.89 | 0.95 | 0.23 |
| A8 | 0.86 | -0.67 | -0.23 |
| A9 | 0.68 | 0.99 | 0.77 |
| A10 | 1 | 0.46 | 0.69 |
| A11 | 0.45 | -0.39 | -0.4 |
| A12 | 0.05 | -0.01 | 0.05 |
| A13 | 0.56 | 1.83 | 1.8 |
| A14 | 0.53 | 4.99 | 3.58 |
| S1 | 0.59 | 1.54 | 1.92 |
| S2 | 0.89 | 0.58 | 0.2 |
| S3 | 0.79 | 0.93 | 0.72 |
| S4 | -0.14 | -0.64 | 0.52 |
| S5 | 0.74 | -0.04 | -1.13 |
| S6 | 0.23 | 1.59 | 1.51 |
| S7 | -0.71 | -1.19 | -0.71 |

Nota: H_1 , H_2 y H_3 se refieren a la medida de homogeneidad en términos de L- Coeficiente de variación, L-Asimetría y L-Curtosis respectivamente.

Anexo 2: Parámetros regionales estimados para distribuciones Kappa, GLO, GEV, GNO, PE3 y GPA.

| Región | Kappa | | | | GLO | | | GEV | | | GNO | | | PE3 | | | GPA | | |
|--------|--------|-------|--------|--------|-------|-------|--------|-------|-------|--------|-------|-------|--------|-----|-------|-------|--------|-------|--------|
| | Loc | Scale | S1 | S2 | Loc | Scale | S1 | Loc | Scale | S1 | Loc | Scale | S1 | Loc | Scale | S1 | Loc | Scale | S1 |
| P1 | -0.537 | 1.105 | -0.129 | 1.699 | | | | | | | 0.554 | 0.669 | -1.018 | 1 | 1.302 | 2.867 | -0.003 | 0.724 | -0.278 |
| P2 | 0.594 | 0.654 | 0.115 | 0.297 | | | | 0.702 | 0.53 | 0.016 | 0.896 | 0.614 | -0.328 | 1 | 0.661 | 0.969 | | | |
| P3 | 0.45 | 0.54 | -0.225 | 0.348 | 0.747 | 0.356 | -0.366 | 0.557 | 0.46 | -0.284 | 0.721 | 0.619 | -0.774 | | | | | | |
| P4 | 0.61 | 0.37 | -0.362 | -0.159 | 0.739 | 0.312 | -0.411 | 0.577 | 0.39 | -0.344 | | | | | | | | | |
| P5 | 0.667 | 0.375 | -0.339 | -0.417 | 0.757 | 0.335 | -0.372 | 0.579 | 0.43 | -0.292 | | | | | | | | | |
| P6 | -0.055 | 0.848 | -0.169 | 1.106 | | | | 0.446 | 0.491 | -0.363 | 0.615 | 0.682 | -0.911 | 1 | 1.17 | 2.571 | 0.015 | 0.794 | -0.193 |
| P7 | 0.06 | 0.827 | -0.153 | 0.885 | | | | 0.457 | 0.527 | -0.318 | 0.642 | 0.72 | -0.832 | 1 | 1.132 | 2.354 | -0.018 | 0.891 | -0.125 |
| P8 | 0.262 | 0.696 | -0.191 | 0.564 | 0.701 | 0.412 | -0.372 | 0.482 | 0.53 | -0.292 | 0.669 | 0.715 | -0.788 | | | | -0.002 | 0.917 | -0.085 |
| P9 | 0.615 | 0.558 | 0.019 | 0.275 | | | | 0.701 | 0.469 | -0.058 | 0.873 | 0.564 | -0.43 | 1 | 0.64 | 1.257 | | | |
| A1 | 0.889 | 0.23 | -0.013 | -0.206 | | | | 0.861 | 0.26 | 0.044 | 0.956 | 0.297 | -0.291 | | | | | | |
| A2 | 0.812 | 0.304 | 0.044 | 0.172 | | | | 0.841 | 0.271 | -0.008 | 0.941 | 0.318 | -0.36 | 1 | 0.348 | 1.06 | | | |
| A3 | 0.877 | 0.264 | -0.055 | -0.33 | 0.947 | 0.207 | -0.151 | 0.825 | 0.318 | 0.029 | 0.942 | 0.366 | -0.312 | | | | | | |
| A4 | 0.923 | 0.175 | -0.057 | -0.389 | 0.966 | 0.141 | -0.144 | | | | | | | | | | | | |
| A5 | 0.902 | 0.197 | -0.02 | -0.198 | 0.964 | 0.144 | -0.148 | 0.879 | 0.221 | 0.034 | 0.96 | 0.254 | -0.305 | 1 | 0.271 | 0.902 | | | |
| A6 | 0.932 | 0.172 | -0.126 | -0.64 | 0.957 | 0.154 | -0.166 | | | | | | | | | | | | |
| A7 | 0.926 | 0.223 | -0.081 | -0.643 | 0.958 | 0.198 | -0.126 | | | | | | | | | | | | |
| A8 | 0.902 | 0.207 | 0.001 | -0.196 | 0.967 | 0.149 | -0.133 | 0.878 | 0.234 | 0.058 | 0.963 | 0.264 | -0.274 | 1 | 0.278 | 0.811 | | | |
| A9 | 0.924 | 0.241 | 0.004 | -0.479 | 0.974 | 0.197 | -0.08 | 0.855 | 0.322 | 0.144 | 0.971 | 0.348 | -0.165 | 1 | 0.355 | 0.492 | | | |
| A10 | 0.968 | 0.152 | -0.075 | -0.844 | 0.977 | 0.145 | -0.094 | | | | | | | | | | | | |
| A11 | 0.751 | 0.354 | -0.224 | -0.336 | 0.847 | 0.297 | -0.284 | 0.682 | 0.409 | -0.169 | 0.832 | 0.521 | -0.592 | | | | | | |
| A12 | 0.943 | 0.176 | -0.188 | -1 | 0.943 | 0.176 | -0.188 | | | | | | | | | | | | |
| A13 | 0.89 | 0.265 | -0.236 | -1 | 0.89 | 0.265 | -0.236 | | | | | | | | | | | | |
| A14 | 0.902 | 0.19 | -0.054 | -0.233 | 0.959 | 0.143 | -0.167 | 0.876 | 0.217 | 0.005 | | | | | | | | | |
| S1 | 0.878 | 0.242 | 0.055 | -0.041 | | | | 0.872 | 0.248 | 0.067 | 0.963 | 0.28 | -0.262 | 1 | 0.293 | 0.776 | | | |
| S2 | 0.981 | 0.162 | -0.07 | -1 | 0.981 | 0.162 | -0.07 | | | | | | | | | | | | |
| S3 | 0.89 | 0.199 | -0.042 | -0.138 | | | | 0.874 | 0.216 | -0.006 | 0.953 | 0.253 | -0.358 | | | | | | |
| S4 | 0.917 | 0.189 | 0.008 | -0.243 | 0.972 | 0.139 | -0.12 | 0.889 | 0.219 | 0.08 | 0.969 | 0.245 | -0.246 | 1 | 0.256 | 0.73 | | | |
| S5 | 0.892 | 0.208 | -0.045 | -0.21 | 0.957 | 0.154 | -0.164 | 0.867 | 0.234 | 0.009 | 0.953 | 0.272 | -0.338 | | | | | | |
| S6 | 0.95 | 0.136 | -0.21 | -1 | 0.95 | 0.136 | -0.21 | 0.872 | 0.199 | -0.062 | 0.945 | 0.24 | -0.435 | | | | | | |
| S7 | 0.96 | 0.159 | -0.15 | -1 | 0.96 | 0.159 | -0.15 | 0.866 | 0.245 | 0.032 | 0.956 | 0.281 | -0.308 | 1 | 0.3 | 0.911 | | | |

Nota: Loc=Localización, Scale= Escala, S1=Forma 1 y S2=Forma 2.

Anexo 3: Cuantiles regionales para las regiones homogéneas identificadas a nivel nacional.

| Cuantiles regionales | | | | | | | | | | | |
|----------------------|-------|-------|-------|-------|-------|-------|-------|-------|--------|--------|-------|
| F= | 0.5 | 0.8 | 0.9 | 0.94 | 0.98 | 0.985 | 0.99 | 0.995 | 0.998 | 0.999 | Dist. |
| TR= | 2 | 5 | 10 | 30 | 50 | 75 | 100 | 200 | 500 | 1000 | |
| P1 | 0.550 | 1.467 | 2.333 | 3.088 | 5.124 | 5.769 | 6.769 | 8.765 | 12.069 | 15.192 | GPA |
| P2 | 0.895 | 1.503 | 1.886 | 2.147 | 2.671 | 2.803 | 2.985 | 3.288 | 3.678 | 3.966 | PE3 |
| P3 | 0.735 | 1.418 | 2.007 | 2.508 | 3.843 | 4.264 | 4.918 | 6.223 | 8.390 | 10.446 | GEV |
| P4 | 0.739 | 1.322 | 1.853 | 2.332 | 3.737 | 4.218 | 4.997 | 6.664 | 9.733 | 12.953 | GLO |
| P5 | 0.957 | 1.197 | 1.365 | 1.494 | 1.799 | 1.887 | 2.018 | 2.262 | 2.629 | 2.946 | GLO |
| P6 | 0.604 | 1.515 | 2.319 | 2.985 | 4.660 | 5.160 | 5.915 | 7.351 | 9.570 | 11.530 | GPA |
| P7 | 0.642 | 1.520 | 2.290 | 2.931 | 4.553 | 5.039 | 5.769 | 7.150 | 9.258 | 11.087 | GNO |
| P8 | 0.669 | 1.524 | 2.254 | 2.853 | 4.342 | 4.782 | 5.439 | 6.673 | 8.533 | 10.128 | GNO |
| P9 | 0.943 | 1.222 | 1.421 | 1.576 | 1.951 | 2.061 | 2.225 | 2.536 | 3.013 | 3.432 | PE3 |
| A1 | 0.955 | 1.238 | 1.418 | 1.542 | 1.793 | 1.856 | 1.943 | 2.089 | 2.273 | 2.408 | GEV |
| A2 | 0.940 | 1.261 | 1.466 | 1.607 | 1.892 | 1.964 | 2.064 | 2.231 | 2.445 | 2.605 | PE3 |
| A3 | 0.947 | 1.266 | 1.487 | 1.654 | 2.045 | 2.156 | 2.321 | 2.627 | 3.082 | 3.471 | GLO |
| A4 | 0.966 | 1.182 | 1.330 | 1.441 | 1.700 | 1.773 | 1.882 | 2.082 | 2.378 | 2.628 | GLO |
| A5 | 0.960 | 1.203 | 1.359 | 1.467 | 1.689 | 1.745 | 1.823 | 1.953 | 2.120 | 2.243 | GEV |
| A6 | 0.957 | 1.197 | 1.365 | 1.494 | 1.799 | 1.887 | 2.018 | 2.262 | 2.629 | 2.946 | GLO |
| A7 | 0.958 | 1.258 | 1.459 | 1.609 | 1.953 | 2.049 | 2.190 | 2.448 | 2.824 | 3.138 | GLO |
| A8 | 0.963 | 1.213 | 1.371 | 1.478 | 1.694 | 1.747 | 1.821 | 1.943 | 2.096 | 2.207 | GEV |
| A9 | 0.974 | 1.262 | 1.446 | 1.579 | 1.872 | 1.952 | 2.067 | 2.271 | 2.558 | 2.790 | GLO |
| A10 | 0.977 | 1.192 | 1.331 | 1.432 | 1.658 | 1.720 | 1.810 | 1.970 | 2.199 | 2.385 | GLO |
| A11 | 0.847 | 1.352 | 1.753 | 2.086 | 2.958 | 3.231 | 3.655 | 4.499 | 5.898 | 7.225 | GLO |
| A12 | 0.943 | 1.222 | 1.421 | 1.576 | 1.951 | 2.061 | 2.225 | 2.536 | 3.013 | 3.432 | GLO |
| A13 | 0.890 | 1.324 | 1.653 | 1.916 | 2.580 | 2.782 | 3.089 | 3.684 | 4.633 | 5.500 | GLO |
| A14 | 0.955 | 1.201 | 1.362 | 1.477 | 1.716 | 1.778 | 1.865 | 2.012 | 2.206 | 2.352 | GEV |
| S1 | 0.963 | 1.226 | 1.389 | 1.499 | 1.723 | 1.780 | 1.858 | 1.991 | 2.163 | 2.293 | GNO |
| S2 | 0.981 | 1.217 | 1.367 | 1.474 | 1.707 | 1.770 | 1.861 | 2.021 | 2.244 | 2.423 | GLO |
| S3 | 0.953 | 1.199 | 1.363 | 1.480 | 1.726 | 1.790 | 1.881 | 2.035 | 2.240 | 2.396 | GEV |
| S4 | 0.969 | 1.199 | 1.339 | 1.434 | 1.625 | 1.673 | 1.740 | 1.852 | 1.997 | 2.105 | GNO |
| S5 | 0.953 | 1.216 | 1.389 | 1.511 | 1.765 | 1.831 | 1.923 | 2.079 | 2.283 | 2.436 | GEV |
| S6 | 0.950 | 1.169 | 1.330 | 1.457 | 1.769 | 1.862 | 2.003 | 2.271 | 2.691 | 3.066 | GLO |
| S7 | 0.960 | 1.205 | 1.373 | 1.501 | 1.799 | 1.884 | 2.010 | 2.243 | 2.589 | 2.884 | GLO |

**Anexo 4: Coeficiente de duración adimensional (Región homogénea Andes)
correspondiente al cuartil I y probabilidad de ocurrencia de 100%.**

| Duración Horas | Coeficiente de duración adimensional (Región homogénea Andes) | | | | | | | | | | | | | |
|-------------------|---|-------|-------|-------|-------|-------|-------|-------|-------|-------|-------|-------|-------|-------|
| | A1 | A2 | A3 | A4 | A5 | A6 | A7 | A8 | A9 | A10 | A11 | A12 | A13 | A14 |
| 1 | 0.303 | 0.466 | 0.243 | 0.273 | 0.239 | 0.314 | 0.177 | 0.227 | 0.207 | 0.183 | 0.174 | 0.195 | 0.191 | 0.239 |
| 2 | 0.542 | 0.691 | 0.486 | 0.546 | 0.478 | 0.629 | 0.353 | 0.454 | 0.414 | 0.366 | 0.348 | 0.390 | 0.382 | 0.478 |
| 3 | 0.687 | 0.740 | 0.610 | 0.682 | 0.717 | 0.841 | 0.530 | 0.681 | 0.622 | 0.549 | 0.522 | 0.553 | 0.527 | 0.594 |
| 4 | 0.737 | 0.755 | 0.778 | 0.783 | 0.855 | 0.848 | 0.707 | 0.907 | 0.670 | 0.658 | 0.696 | 0.622 | 0.644 | 0.677 |
| 5 | 0.818 | 0.827 | 0.796 | 0.879 | 0.873 | 0.856 | 0.751 | 0.914 | 0.733 | 0.729 | 0.724 | 0.670 | 0.795 | 0.764 |
| 6 | 0.870 | 0.882 | 0.914 | 0.905 | 0.890 | 0.898 | 0.869 | 0.921 | 0.768 | 0.875 | 0.847 | 0.750 | 0.931 | 0.832 |
| 7 | 0.878 | 0.890 | 0.919 | 0.908 | 0.907 | 0.908 | 0.894 | 0.928 | 0.803 | 0.889 | 0.864 | 0.766 | 0.937 | 0.845 |
| 8 | 0.935 | 0.963 | 0.951 | 0.984 | 0.963 | 0.926 | 0.966 | 0.956 | 0.896 | 0.909 | 0.884 | 0.875 | 0.944 | 0.907 |
| 9 | 0.940 | 0.965 | 0.954 | 0.985 | 0.966 | 0.932 | 0.969 | 0.959 | 0.902 | 0.917 | 0.898 | 0.883 | 0.950 | 0.919 |
| 10 | 0.944 | 0.968 | 0.957 | 0.986 | 0.968 | 0.940 | 0.972 | 0.962 | 0.908 | 0.931 | 0.915 | 0.891 | 0.957 | 0.946 |
| 11 | 0.949 | 0.970 | 0.960 | 0.987 | 0.970 | 0.950 | 0.975 | 0.966 | 0.928 | 0.944 | 0.932 | 0.898 | 0.963 | 0.965 |
| 12 | 0.969 | 0.977 | 0.966 | 0.988 | 0.972 | 0.965 | 0.977 | 0.975 | 0.939 | 0.958 | 0.949 | 0.925 | 0.969 | 0.968 |
| 13 | 0.971 | 0.979 | 0.968 | 0.989 | 0.975 | 0.969 | 0.980 | 0.976 | 0.950 | 0.962 | 0.952 | 0.929 | 0.971 | 0.971 |
| 14 | 0.973 | 0.985 | 0.973 | 0.990 | 0.977 | 0.973 | 0.983 | 0.978 | 0.959 | 0.976 | 0.956 | 0.940 | 0.972 | 0.974 |
| 15 | 0.982 | 0.991 | 0.982 | 0.991 | 0.984 | 0.977 | 0.986 | 0.980 | 0.963 | 0.988 | 0.959 | 0.957 | 0.973 | 0.976 |
| 16 | 0.995 | 0.992 | 0.993 | 0.994 | 0.996 | 0.984 | 0.989 | 0.985 | 0.988 | 0.993 | 0.984 | 0.977 | 0.991 | 0.986 |
| 17 | 0.996 | 0.993 | 0.994 | 0.994 | 0.997 | 0.986 | 0.990 | 0.987 | 0.990 | 0.994 | 0.986 | 0.979 | 0.992 | 0.988 |
| 18 | 0.996 | 0.995 | 0.994 | 0.995 | 0.997 | 0.990 | 0.992 | 0.993 | 0.994 | 0.995 | 0.988 | 0.982 | 0.994 | 0.990 |
| 19 | 0.997 | 0.996 | 0.995 | 0.996 | 0.998 | 0.992 | 0.993 | 0.994 | 0.995 | 0.996 | 0.990 | 0.985 | 0.995 | 0.991 |
| 20 | 0.998 | 0.997 | 0.996 | 0.997 | 0.998 | 0.996 | 0.994 | 0.995 | 0.996 | 0.996 | 0.992 | 0.988 | 0.996 | 0.993 |
| 21 | 0.998 | 0.998 | 0.997 | 0.998 | 0.999 | 0.997 | 0.997 | 0.997 | 0.997 | 0.998 | 0.994 | 0.991 | 0.997 | 0.995 |
| 22 | 0.999 | 0.999 | 0.998 | 0.998 | 0.999 | 0.998 | 0.998 | 0.998 | 0.998 | 0.998 | 0.996 | 0.994 | 0.998 | 0.997 |
| 23 | 0.999 | 0.999 | 0.999 | 0.999 | 1.000 | 0.999 | 0.999 | 0.999 | 0.999 | 0.999 | 0.998 | 0.997 | 0.999 | 0.998 |
| 24 | 1.000 | 1.000 | 1.000 | 1.000 | 1.000 | 1.000 | 1.000 | 1.000 | 1.000 | 1.000 | 1.000 | 1.000 | 1.000 | 1.000 |

Anexo 5: Coeficiente de duración adimensional (Regiones homogéneas Pacífico y Selva) correspondiente al cuartil I y probabilidad de ocurrencia de 100%.

| Duración Horas | Coeficiente de duración adimensional (Regiones homogéneas Pacífico y Selva). | | | | | | | | | | | | | | | |
|-------------------|--|-------|-------|-------|-------|-------|-------|-------|-------|-------|-------|-------|-------|-------|-------|-------|
| | P1 | P2 | P3 | P4 | P5 | P6 | P7 | P8 | P9 | S1 | S2 | S3 | S4 | S5 | S6 | S7 |
| 1 | 0.212 | 0.298 | 0.234 | 0.204 | 0.140 | 0.183 | 0.081 | 0.101 | 0.172 | 0.286 | 0.253 | 0.290 | 0.284 | 0.243 | 0.166 | 0.244 |
| 2 | 0.420 | 0.569 | 0.469 | 0.407 | 0.280 | 0.366 | 0.162 | 0.203 | 0.366 | 0.573 | 0.507 | 0.548 | 0.568 | 0.486 | 0.333 | 0.412 |
| 3 | 0.622 | 0.721 | 0.613 | 0.611 | 0.419 | 0.536 | 0.243 | 0.304 | 0.480 | 0.859 | 0.760 | 0.695 | 0.719 | 0.643 | 0.499 | 0.601 |
| 4 | 0.719 | 0.789 | 0.817 | 0.814 | 0.559 | 0.664 | 0.324 | 0.406 | 0.524 | 0.869 | 0.778 | 0.778 | 0.841 | 0.844 | 0.666 | 0.676 |
| 5 | 0.780 | 0.866 | 0.911 | 0.846 | 0.676 | 0.673 | 0.396 | 0.507 | 0.676 | 0.945 | 0.923 | 0.912 | 0.889 | 0.867 | 0.802 | 0.815 |
| 6 | 0.879 | 0.881 | 0.944 | 0.865 | 0.702 | 0.750 | 0.467 | 0.609 | 0.813 | 0.947 | 0.939 | 0.963 | 0.893 | 0.948 | 0.825 | 0.959 |
| 7 | 0.893 | 0.926 | 0.947 | 0.875 | 0.801 | 0.788 | 0.544 | 0.630 | 0.881 | 0.950 | 0.941 | 0.965 | 0.904 | 0.950 | 0.848 | 0.963 |
| 8 | 0.969 | 0.961 | 0.950 | 0.924 | 0.915 | 0.911 | 0.622 | 0.691 | 0.948 | 0.957 | 0.975 | 0.973 | 0.962 | 0.961 | 0.931 | 0.973 |
| 9 | 0.971 | 0.964 | 0.953 | 0.930 | 0.920 | 0.920 | 0.661 | 0.758 | 0.951 | 0.959 | 0.977 | 0.974 | 0.965 | 0.965 | 0.932 | 0.975 |
| 10 | 0.974 | 0.967 | 0.957 | 0.936 | 0.926 | 0.930 | 0.700 | 0.807 | 0.955 | 0.961 | 0.979 | 0.976 | 0.967 | 0.969 | 0.933 | 0.977 |
| 11 | 0.976 | 0.969 | 0.960 | 0.942 | 0.931 | 0.939 | 0.739 | 0.829 | 0.957 | 0.966 | 0.981 | 0.978 | 0.969 | 0.972 | 0.942 | 0.981 |
| 12 | 0.979 | 0.976 | 0.972 | 0.966 | 0.940 | 0.949 | 0.778 | 0.851 | 0.959 | 0.983 | 0.983 | 0.980 | 0.976 | 0.976 | 0.965 | 0.985 |
| 13 | 0.982 | 0.978 | 0.973 | 0.968 | 0.948 | 0.958 | 0.817 | 0.873 | 0.960 | 0.984 | 0.985 | 0.982 | 0.980 | 0.980 | 0.968 | 0.987 |
| 14 | 0.984 | 0.981 | 0.974 | 0.973 | 0.955 | 0.967 | 0.856 | 0.895 | 0.962 | 0.986 | 0.987 | 0.986 | 0.985 | 0.984 | 0.971 | 0.989 |
| 15 | 0.987 | 0.983 | 0.983 | 0.979 | 0.970 | 0.977 | 0.894 | 0.914 | 0.966 | 0.987 | 0.989 | 0.986 | 0.987 | 0.988 | 0.974 | 0.990 |
| 16 | 0.994 | 0.994 | 0.989 | 0.987 | 0.982 | 0.986 | 0.933 | 0.929 | 0.980 | 0.994 | 0.995 | 0.996 | 0.996 | 0.997 | 0.981 | 0.992 |
| 17 | 0.994 | 0.994 | 0.991 | 0.989 | 0.985 | 0.988 | 0.942 | 0.945 | 0.982 | 0.995 | 0.995 | 0.996 | 0.996 | 0.997 | 0.983 | 0.995 |
| 18 | 0.995 | 0.995 | 0.994 | 0.990 | 0.987 | 0.990 | 0.950 | 0.960 | 0.985 | 0.995 | 0.996 | 0.997 | 0.997 | 0.997 | 0.986 | 0.997 |
| 19 | 0.996 | 0.997 | 0.997 | 0.992 | 0.989 | 0.991 | 0.958 | 0.976 | 0.990 | 0.996 | 0.997 | 0.997 | 0.997 | 0.998 | 0.988 | 0.998 |
| 20 | 0.997 | 0.998 | 0.998 | 0.994 | 0.991 | 0.993 | 0.967 | 0.982 | 0.992 | 0.997 | 0.998 | 0.998 | 0.998 | 0.998 | 0.991 | 0.998 |
| 21 | 0.998 | 0.999 | 0.998 | 0.995 | 0.993 | 0.996 | 0.975 | 0.987 | 0.995 | 0.998 | 0.998 | 0.998 | 0.998 | 0.999 | 0.995 | 0.999 |
| 22 | 0.998 | 0.999 | 0.999 | 0.997 | 0.996 | 0.997 | 0.983 | 0.991 | 0.997 | 0.998 | 0.999 | 0.999 | 0.999 | 0.999 | 0.998 | 0.999 |
| 23 | 0.999 | 1.000 | 0.999 | 0.998 | 0.998 | 0.999 | 0.992 | 0.996 | 0.998 | 0.999 | 0.999 | 0.999 | 0.999 | 1.000 | 0.999 | 1.000 |
| 24 | 1.000 | 1.000 | 1.000 | 1.000 | 1.000 | 1.000 | 1.000 | 1.000 | 1.000 | 1.000 | 1.000 | 1.000 | 1.000 | 1.000 | 1.000 | 1.000 |

8. MANUAL DEL USUARIO

Módulo para la estimación de curvas Intensidad-Duración-Frecuencia (IDF) bajo escenarios climáticos históricos y futuros

Versión 1.0

Este manual describe las principales funcionalidades de la herramienta (curvas IDF) basada en la web. La herramienta está diseñada como un sistema de apoyo de decisión, que permite visualizar información numérica y gráfica de las curvas IDF en cualquier parte del país, especialmente en regiones donde no hay observaciones disponibles; los datos disponibles se integran con las proyecciones obtenidas de los modelos de circulación regional para evaluar los impactos del cambio climático en las curvas IDF.

✚ Iniciando sesión.

Los usuarios podrán ingresar al módulo web mediante el siguiente enlace, en el navegador Google Chrome o Firefox <https://idesep.senamhi.gob.pe/dhi-idf/>

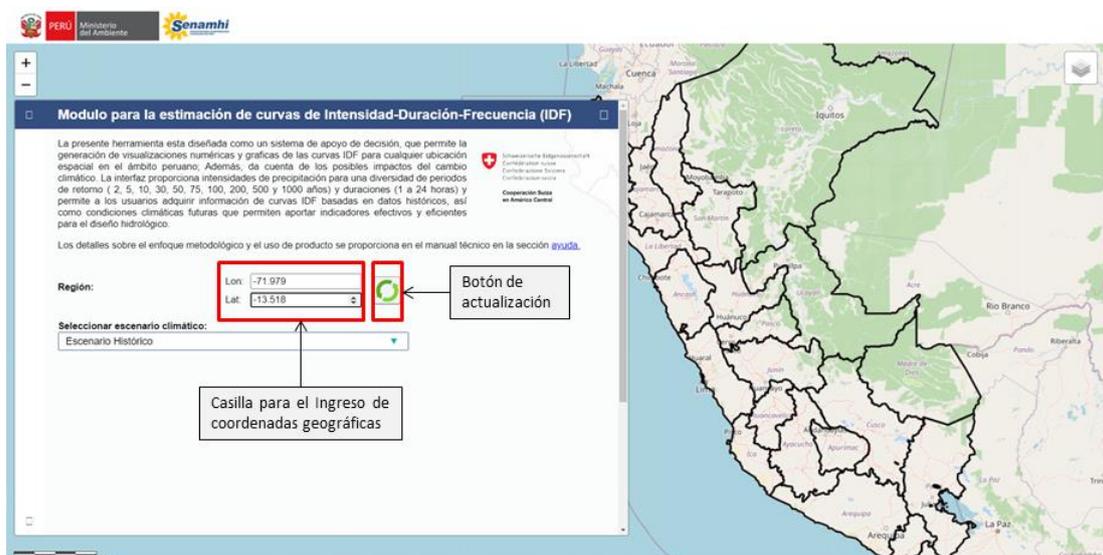


Figura A.1 Módulo del usuario concerniente a la herramienta web IDF-Perú.

✚ Exploración de funcionalidades.

Inicialmente, el usuario deberá seleccionar un lugar de interés mediante la transcripción de coordenadas geográficas (longitud y latitud), una vez ingresado los datos es importante hacer clic en el botón actualizar (color verde), con el propósito de iniciar la visualización de la información. Adicionalmente, el usuario podrá establecer un punto de interés de forma manual, al pasar y ubicar el puntero del mouse sobre el mapa. Por ejemplo, la Figura A.1 presenta una captura de pantalla con las coordenadas de ubicación de la ciudad de Cusco.

Por otro lado, La interfaz proporciona diferentes opciones para los fondos del mapa que difieren en el nivel de detalle; del mismo modo, presenta la opción de activar diversas capas cartográficas (p. ej. regiones de precipitación máxima, departamentos, provincias y cuencas hidrográficas), tal como se detalla en la Figura A.2.



Figura A.2 Interacción de mapas y fondos cartográficos.

Al seleccionar la pestaña “escenario climático” el usuario podrá evaluar las curvas IDF que tengan en cuenta condiciones climáticas históricas y futuras. Para generar los IDF actualizados para el clima futuro, el usuario podrá seleccionar los modelos climáticos (ACCESS1-3, HadGEM-ES, MPI-ESM-MR y la Mediana de los escenarios) de manera individual como se muestra en la Figura A.3 Se alienta a los usuarios a probar diferentes modelos debido a la incertidumbre asociada con el modelado climático.

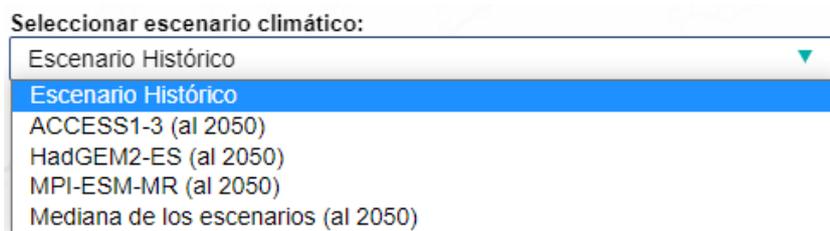


Figura A.3 Selección de escenarios climáticos.

Visualización y exploración de resultados.

Una vez seleccionado la ubicación de preferencia y el escenario climático. A continuación, el módulo brinda información en forma de tablas, referente a intensidades de precipitación para diferentes duraciones, periodos de retorno y sus correspondientes intervalos de confianza; La misma que permite exportar/descargar los datos en formato numérico (.xls); mediante el botón

“Exportar a Excel” ubicado en la parte inferior de la tabla. Las IDF se presentan en la forma de tabla tradicional para todas las duraciones (en horas) y periodos de retorno (Tr).²

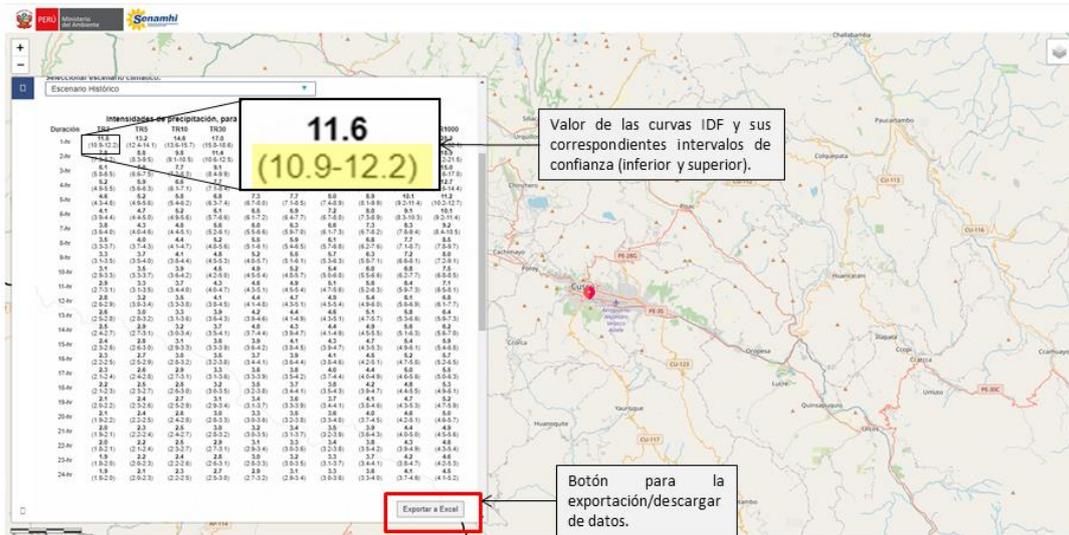


Figura A.4 Exportación/descarga de datos.

Los gráficos se presentan como precipitaciones máximas y curvas intensidad-duración y frecuencia (IDF) como se muestra en la Figura A.5, respectivamente. El usuario podrá ocultar o mostrar las curvas IDF para cada periodo de retorno, haciendo clic en los periodos de retorno individuales en la leyenda debajo del gráfico.

² Metadatos cartográficos correspondiente a regiones homogéneas de precipitación máxima:
<https://idesepe.senamhi.gob.pe/geonetwork/srv/eng/catalog.search#/metadata/9aa01480-9f76-4663-b0a7-000930a27552>

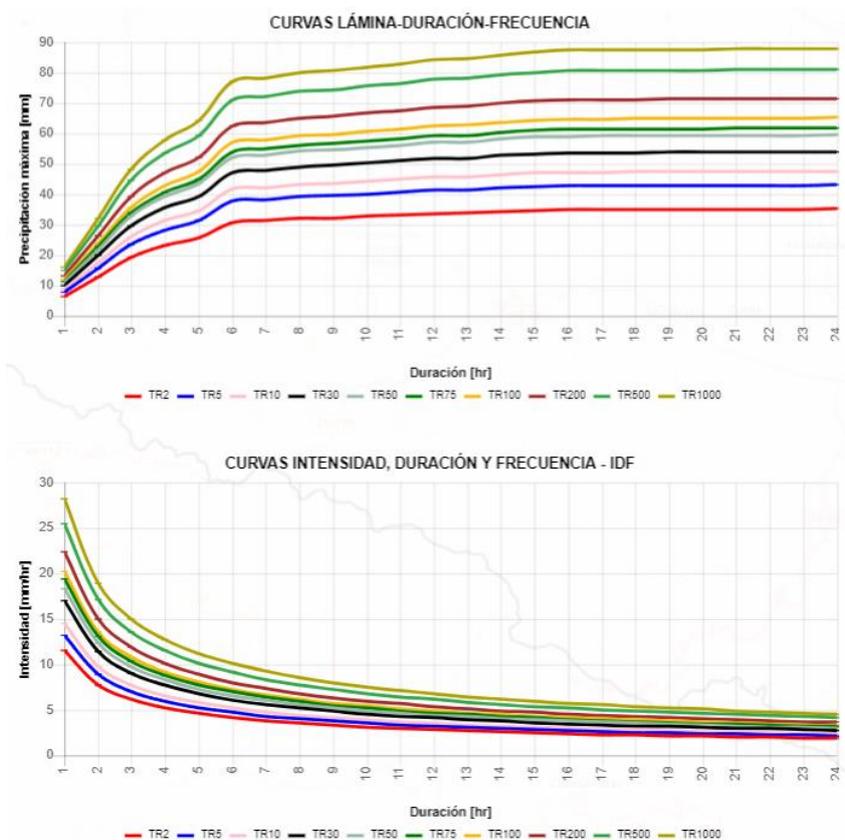


Figura A.5. Representación gráfica de precipitaciones máximas y curvas intensidad-duración-frecuencia.

Finalmente, los metadatos cartográficos en formatos (ráster y shapefile) correspondiente a regiones homogéneas de precipitación máxima y cuantiles de precipitación máxima histórica y futura, podrán ser descargados mediante el catálogo de metadatos del IDESEP-SENAMHI.

³ Cuantiles de Precipitación Máxima Basado en Información Climática Histórica:

<https://ideseq.senamhi.gob.pe/geonetwork/srv/eng/catalog.search#/metadata/90ba4db9-dcaa-4d11-a3a5-aed36084f170>

⁴ Cuantiles de Precipitación Máxima Basado en el Modelo de Cambio Climático HadGEM2-ES

<https://ideseq.senamhi.gob.pe/geonetwork/srv/eng/catalog.search#/metadata/8909fae7-14ce-4493-bba2-4aadae97f9f0>

⁵ Cuantiles de Precipitación Máxima Basado en el Modelo de Cambio Climático - ACCESS1

<https://ideseq.senamhi.gob.pe/geonetwork/srv/eng/catalog.search#/metadata/9721a999-9d2f-498d-b43d-b826abb48080>

⁶ Cuantiles de Precipitación Máxima Basado en la Mediana de Tres Modelos de Cambio Climático:

<https://ideseq.senamhi.gob.pe/geonetwork/srv/eng/catalog.search#/metadata/93215993-26c3-47f6-8f55-dc81e44a613f>

⁷ Cuantiles de Precipitación Máxima Basado en el Modelo de Cambio Climático - MPI-ESM-MR

<https://ideseq.senamhi.gob.pe/geonetwork/srv/eng/catalog.search#/metadata/34d04d5d-e914-47f3-b259-35ddc3c6840c>