UNIVERSIDAD ANDRÉS BELLO

Facultad de Ingeniería

Escuela de Obras Civiles

Metodología para el Desarrollo de Hietogramas de Diseño en una Zona Urbana bajo el contexto del Cambio Climático. Caso: Barrio La Chimba, Santiago.

Memoria de pregrado para optar al título profesional de Ingeniero Civil

Realizado por:

Jaime Darío Bustos Silva

Profesor Tutor: Victor Cuevas Velásquez, Ingeniero Civil

AGRADECIMIENTO

Quiero expresar mi más profundo agradecimiento a mi familia, Jaime, Digna, Karen y Darí, por su apoyo incondicional y constante durante todos los años de esta ardua y desafiante carrera de Ingeniería Civil. Su enseñanza y respaldo han sido fundamentales para alcanzar esta meta.

A mis amigos y compañeros universitarios, quienes con su compañerismo y conocimientos enriquecieron mi formación académica. En particular, agradezco a Joel y Rodolfo, por su dedicación y esfuerzo compartido en los trabajos y proyectos que enfrentamos juntos durante estos años.

Extiendo mi gratitud al profesor Víctor Cuevas, por su orientación y por compartir su invaluable sabiduría, especialmente en los temas relacionados con esta memoria profesional. Su guía fue clave para el desarrollo de este trabajo.

Finalmente, agradezco a Sebastián Aedo, por sus aportes significativos y por compartir sus conocimientos especializados que fueron esenciales para la realización de esta investigación.

A todos ustedes, mi sincero reconocimiento y aprecio.

CONTENIDO

AGRADECIMIENTO 2
RESUMEN 4
1. INTRODUCCIÓN 6
1.1. Contexto y Antecedentes 7
1.2. Objetivos y Alcance de la Investigación 7
1.3. Justificación 8
1.4. Fuentes y Datos Climáticos 8
1. METODOLOGÍA 10
2.1. Downscaling para Modelos Climáticos Globales 10
2.2. Evaluación con KGE 14
2.3. Construcción del Hietograma de Diseño 15
2. RESULTADOS 18
3.1. Valores del KGE 18
3.2. Tormenta de Diseño 21
3.2.1. Proyecciones 2020-2050. 24
3.2.2. Proyecciones 2068-2098. 25
3.2.3. Comparación entre horizontes temporales. 26
3.3. Curvas IDF 28
3.4. Hietograma de Diseño 29
3. CONCLUSIÓN 40
4. REFERENCIAS 42
5. ANEXOS 46

RESUMEN

El cambio climático trae consigo consecuencias trascendentales, y se espera que las precipitaciones intensas ocurran con mayor frecuencia en muchos sectores del mundo. El objetivo de esta investigación fue analizar la variabilidad de los hietogramas de diseño para el barrio La Chimba, en Santiago de Chile, utilizando 26 modelos climáticos globales (GCM's) de la Sexta Fase de Intercomparación de Modelos Acoplados (CMIP6) y considerando cuatro escenarios de concentración de gases de efecto invernadero y Trayectorias Socioeconómicas Compartidas (SSP por su sigla en inglés) SSP1-2.6, SSP2-4.5, SSP3-7.0 y SSP5-8.5. Como referencia local, se utilizaron datos históricos de precipitación diaria (1984-2014) provenientes de la estación meteorológica Quinta Normal, debido a su proximidad con el área de estudio. Los datos de precipitación diaria extraídos de los GCM's se corrigieron con el método de Mapeo Cuantil Imparcial (UQM). Para mejorar la precisión del análisis, se empleó el coeficiente de Kling-Gupta (KGE) como medida de eficiencia para seleccionar los modelos climáticos más adecuados. Posteriormente, se evaluaron los periodos de retorno futuros a través de análisis de frecuencia, generando las curvas Intensidad – Duración – Frecuencia (IDF) y tormentas de diseño mediante el método de bloques alternantes. Los hietogramas se confeccionaron para dos periodos futuros: cercano (2020-2050) y lejano (2068-2098).

La revisión concluye que, si bien persisten incertidumbres en la proyección de patrones de precipitación extrema, los resultados evidencian una tendencia general al aumento en la intensidad de las precipitaciones extremas en distintos escenarios climáticos, sin una correlación lineal con los niveles de emisiones. Se observaron incrementos significativos incluso en trayectorias de bajas emisiones, así como reducciones en escenarios intermedios, lo que resalta la alta variabilidad y complejidad de las proyecciones futuras. Estas tendencias subrayan la creciente relevancia de integrar el cambio climático como un factor determinante en la planificación hidrológica, especialmente en zonas urbanas vulnerables como La Chimba, donde los impactos de eventos extremos podrían intensificarse en el futuro.

La evolución del clima nos obliga a replantear los enfoques tradicionales, haciendo de los hietogramas un componente central para nuevas estrategias de gestión.

En base a lo anterior, existe la intención de integrar los resultados de esta investigación a un proyecto que habla de las multi-vulnerabilidades del patrimonio construido de la Chimba, ante multi-amenazas, ayudando a la planificación y mitigación de riesgos futuros.

1. INTRODUCCIÓN

El cambio climático es una realidad que no podemos ignorar. Según el reporte de la Dirección Meteorológica de Chile (DMC, 2023) existen tendencias y anomalías que indican cambios significativos en el clima, proporcionando evidencia clara sobre cómo el cambio climático está afectando los patrones de precipitación. Esta situación ha generado preocupación sobre la frecuencia y la intensidad de eventos hidrometeorológicos extremos, como son las precipitaciones intensas. Además, investigaciones internacionales han demostrado de manera consistente un aumento en la magnitud de estos eventos en distintas partes del mundo, lo que respalda las proyecciones realizadas por los modelos climáticos (Alfieri et al., 2016; Patra et al., 2018).

El aumento de los eventos de precipitación extrema incrementa el riesgo para la población, afectando viviendas, servicios públicos, la economía y el medio ambiente. Aunque las lluvias torrenciales son fenómenos naturales, su impacto suele verse agravado por actividades humanas como la urbanización descontrolada, el uso inadecuado del suelo, el cambio climático y la infraestructura insuficiente (Vidal & Romero, 2010). Investigaciones recientes han subrayado la relevancia de considerar el impacto de los eventos climáticos extremos en áreas urbanas, donde factores como la alta densidad poblacional y el deterioro del entorno urbano agravan los efectos de las precipitaciones (Arnbjerg-Nielsen et al., 2013; Kundzewicz et al., 2020).

El barrio La Chimba, debido a su vulnerabilidad, es un área de interés particular para evaluar los posibles cambios en los patrones de precipitación extrema bajo diferentes escenarios climáticos. Este vecindario, ubicado al norte del centro histórico de Santiago, cuenta con un valioso patrimonio arquitectónico y cultural, destacándose tanto por sus valores tangibles como intangibles, como edificaciones de gran valor histórico y la convergencia de diversas culturas (San Martin, 2018). La necesidad de proteger este patrimonio frente a los efectos del cambio climático hace que sea fundamental comprender cómo las precipitaciones extremas podrían evolucionar en el futuro. En este sentido, diversas revisiones metodológicas han señalado que la actualización de las curvas de intensidad-

duración-frecuencia (IDF) es esencial para capturar los cambios en la intensidad y frecuencia de las lluvias en entornos urbanos (Tramblay et al., 2020; Walsh et al., 2020).

1.1. Contexto y Antecedentes

En Santiago de Chile, la investigación sobre el impacto del cambio climático en eventos hidrometeorológicos extremos ha sido limitada, salvo algunos estudios enfocados en modelos climáticos en la Macrozona Central de Chile (Felipe Gateño et al., 2023). Esta falta de información limita la capacidad de planificar y diseñar infraestructuras resilientes que puedan enfrentar los cambios climáticos previstos. En este contexto, surge la necesidad de desarrollar una metodología para analizar la variabilidad de los hietogramas de diseño bajo escenarios climáticos futuros, proporcionando información relevante para la adaptación urbana. Dado que los tiempos de concentración en las cuencas urbanas son generalmente mucho menores a 24 horas, resulta más relevante estudiar las intensidades de lluvia en intervalos de tiempo más cortos que la precipitación máxima diaria. Este enfoque permite entender mejor cómo responden las áreas urbanas a eventos de lluvia intensa y facilita un diseño más efectivo de los sistemas de drenaje y control de inundaciones (Steiner, Caro, & Catalán, 1989). Adicionalmente, la incorporación de modelos no estacionarios en el análisis de eventos extremos ha demostrado mejorar la representación de la variabilidad climática, lo que es crucial para el desarrollo de hietogramas de diseño (Hosseinzadehtalaei et al., 2018; Requena et al., 2021a).

1.2. Objetivos y Alcance de la Investigación

El objetivo principal de esta investigación es analizar la variabilidad de los hietogramas de diseño bajo diferentes escenarios climáticos en el barrio La Chimba. Los objetivos específicos son los siguientes:

- Generar información de precipitaciones extremas a nivel local a partir de la corrección de sesgo (downscaling) de los resultados de los modelos

climáticos globales (GCM).

- Identificar los modelos climáticos más adecuados para representar eventos extremos de precipitación en el área de estudio, a partir de una evaluación comparativa de su desempeño.
- Representar el posible comportamiento futuro de las precipitaciones extremas en la zona analizada, mediante hietogramas de diseño construidos para distintos horizontes temporales y escenarios climáticos (SSP's).
- Determinar el impacto potencial del cambio climático sobre la intensidad de las precipitaciones extremas en el territorio estudiado, a partir del análisis comparativo de hietogramas proyectados bajo distintos escenarios futuros.

1.3. Justificación

El desarrollo de hietogramas de diseño bajo diferentes escenarios climáticos es clave para mejorar la planificación de infraestructuras en áreas urbanas vulnerables como La Chimba. Estos hietogramas permitirán a urbanistas e ingenieros diseñar sistemas de drenaje más efectivos, capaces de adaptarse a las proyecciones climáticas futuras. De esta manera, se podrán construir estructuras más resilientes que garanticen la protección y el bienestar de la sociedad frente a los desafíos ambientales. La incorporación de información climática precisa y contextualizada contribuirá a una planificación urbana que minimice el riesgo de desastres y optimice la gestión de los recursos hídricos. La evidencia recopilada en diversas revisiones internacionales respalda la necesidad de integrar estos nuevos métodos en la planificación urbana, lo que resulta especialmente relevante en contextos de alta vulnerabilidad y cambios acelerados en los patrones de precipitación (Tramblay et al., 2020; Walsh et al., 2020).

1.4. Fuentes y Datos Climáticos

Para este estudio se seleccionó la estación meteorológica de Quinta Normal, debido a su proximidad con el barrio La Chimba, para obtener datos de precipitación diaria en el periodo 1984-2014. Esta información fue obtenida a través de la Dirección General de Aguas (DGA), asegurando la confiabilidad y

calidad de los datos. Dado que no se requiere ajuste adicional, se ha evitado la aplicación de factores de corrección recomendados por la Organización Meteorológica Mundial (OMM, 2008).

Además, se utilizaron 26 Modelos Climáticos Globales (GCM) de la base de datos del proyecto NEX-GDDP-CMIP6 (Thrasher et al., 2021), actualizados recientemente en Marzo de 2024. Esta nueva generación de modelos climáticos incluye proyecciones basadas en cuatro escenarios: SSP1-2.6, SSP2-4.5, SSP3-7.0 y SSP5-8.5. Estas proyecciones, conocidas como Trayectorias Socioeconómicas Compartidas (Shared Socioeconomic Pathways, SSP), reflejan distintas dinámicas de desarrollo económico, demográfico y tecnológico. Cada una de ellas influye en las emisiones de gases de efecto invernadero y otros factores climáticos proyectados hasta el año 2100 (IPCC, 2021). Los SSP se basan en los anteriores RCP (Representative Concentration Pathways) y mantienen una clasificación similar en términos de forzamiento radiactivo proyectado, expresado por los números 2.6, 4.5, 7.0 y 8.5. Estos valores indican los niveles estimados de forzamiento radiactivo para el año 2100 (en W/m^2), lo que refleja distintos niveles de emisiones y sus impactos en el clima (Tabla 1). Sin embargo, los SSP van más allá al considerar también aspectos socioeconómicos, proporcionando una visión más integral y detallada del futuro climático bajo diferentes trayectorias de desarrollo. Al final de este documento (Anexo, tabla A1), se exhibe una tabla resumen de los GCM's usados, sus características y procedencia.

Tabla 1. Características de Trayectorias Socioeconómicas Compartidas (IPCC, 2021).

Escenario de emisiones	Descripción	CO2 en el año 2100 (ppm)	Resumen del Impacto
SSP1-2.6	Sostenibilidad, politicas agresivas de reduccion de emisiones.	~ 450	Aumento de temperatura limitado a menos de 2 °C.
SSP2-4.5	Desarrollo intermedio con mitigación moderada.	600 - 650	Aumento de temperatura de entre 2-3 °C.
SSP3-7.0	Rivalidad regional, alta fragmentación y bajas politicas ambientales.	850 - 950	Calentamiento significativo, aumento de temperatura de más de 3 °C.
SSP5-8.5	Crecimiento económico rápido sin mitigación.	>1000	Calentamiento extremo, aumento de temperatura de 4-5 °C.

2. METODOLOGÍA

2.1. Downscaling para Modelos Climáticos Globales

Los GCM's operan a resoluciones espaciales aproximadas de 100~200 kilómetros, lo cual limita la precisión para aplicaciones locales, resultando inadecuado para análisis a resoluciones espaciales menores. Para superar esta limitación, se han desarrollado técnicas de reducción de escala, o downscaling, que proyectan la información climática de gran escala a una escala regional más detallada (Maraun et al., 2010). En particular, el downscaling estadístico emplea métodos matemáticos para relacionar datos observacionales locales con proyecciones de modelos climáticos, ajustando patrones globales a un contexto específico, asegurando que los datos resultantes no solo capturen la información de los GCM, sino que también sean coherentes con las condiciones climáticas locales, lo que mejora su aplicabilidad en estudios de impacto regional.

Se corrigió el sesgo a escala diaria de los 26 GCM's utilizando un método llamado Unbiased Quantile Mapping (UQM, Chadwick et al., 2023), que busca ajustar estos modelos mientras se conserva la variabilidad de los cambios en la media y la desviación estándar. Este enfoque asegura que se mantenga la señal de variación entre los periodos futuro e histórico simulados. El método UQM es una modificación del mapeo cuantil tradicional (QM). El QM se fundamenta en una transformación de equiprobabilidad que utiliza exclusivamente la información del período de referencia. Es decir, se ajusta la distribución de los datos modelados para que coincida con la distribución observada, lo que se realiza mediante la siguiente ecuación:

$$X^* = \mathrm{F}_{obs}^{-1}(F_{mod}(X))$$

- X : Valor modelado sin corregir.
- F_{mod} : Función de distribución del modelo.
- F_{obs}^{-1} : Función cuantil obtenida de los datos observados.
- X^* : Valor corregido.

Esta transformación se basa exclusivamente en la información histórica, ajustando de forma conjunta la media y la desviación estándar según las probabilidades de ocurrencia observadas. No obstante, al apoyarse únicamente en los datos del período de referencia, se asume que la distribución de la variable es estacionaria. Esto significa que, si en el futuro se registran valores fuera del rango histórico, estos se asignarán sistemáticamente a la cola de la distribución, lo que puede provocar que se subestimen los extremos.

El método UQM se desarrolla para superar esta limitación, incorporando ajustes dinámicos a la media y la desviación estándar que permiten preservar la variabilidad proyectada por los modelos climáticos. De esta manera, la corrección no se basa únicamente en la información histórica, sino que también integra los cambios anticipados, ofreciendo una representación más realista de los valores extremos en el futuro.

Para la corrección de los modelos se consideró como periodo histórico observado las precipitaciones diarias desde 1984 hasta el 2014, este intervalo se eligió por dos razones principales. En primer lugar, se buscó contar con al menos 30 años de datos observados (OMM, 2011), un umbral que facilita su aplicación en distintas regiones de Chile, donde algunas estaciones pueden tener registros menos extensos. Aunque la estación de Quinta Normal cuenta con datos desde 1866, este rango de fechas permite una metodología aplicable de manera más universal. En segundo lugar, el corte en 2014 se estableció porque los modelos del CMIP6 consideran dicho año como el límite de su periodo histórico, y a partir de 2015 incluyen proyecciones basadas en escenarios de concentración de gases de efecto invernadero (clima futuro).

Para cada GCM, se estima el cambio en la media de la precipitación $\Delta\mu(t)$ y el cambio en la desviación estándar $\Delta\sigma(t)$, utilizando la técnica de promedios móviles y comparándolos con el periodo histórico de referencia.

$$\Delta\mu(t) = \frac{\overline{X_m}(t) - \overline{X_{m,h}}}{\overline{X_{m,h}}}$$

- $\overline{X_m}(t)$: Media móvil proyectado por el modelo GCM en el tiempo futuro t.
- $\overline{X_{m,h}}$: Media histórica del modelo GCM.
- $\Delta\mu(t)$: Cambio relativo proyectado en la media respecto al periodo histórico.

Esta fórmula calcula el cambio relativo de la media proyectada para un periodo futuro respecto a la media histórica, expresado como una fracción porcentual.

$$\Delta\sigma(t) = \frac{\widehat{X_m}(t) - \widehat{X_{m,h}}}{\widehat{X_{m,h}}}$$

- $\widehat{X_m}(t)$: Desviación estándar móvil proyectada por el modelo GCM en el tiempo futuro t.
- $\widehat{X_{m,h}}$: Desviación estándar histórica del modelo GCM.
- $\Delta\sigma(t)$: Cambio relativo proyectado en la variabilidad (desviación estándar).

Similar al cambio en la media, esta fórmula mide cuánto cambia la dispersión de los datos proyectados respecto al periodo histórico.

Una vez calculados Δμ(t) y Δσ(t), estos se utilizan para ajustar las expresiones dependientes del tiempo de la media (μ*(t)) y la desviación estándar (σ*(t)), en términos de los valores históricos:

$$\mu^*(t) = \mu(1 + \Delta\mu(t))$$
$$\sigma^*(t) = \sigma(1 + \Delta\sigma(t))$$

- μ : Media histórica observada.
- σ : Desviación estándar histórica observada.
- $\mu^*(t)\ y\ \sigma^*(t)$: Media y desviación estándar ajustadas para el periodo futuro.

Este ajuste asegura que las proyecciones futuras reflejen los cambios relativos en la media y la variabilidad simulados por los GCM's, pero adaptados al contexto histórico local.

Finalmente, los datos de precipitaciones ajustados $(\widetilde{X_m}(t))$ se obtienen utilizando una versión modificada de la función inversa de la distribución acumulativa observada $(\mathrm{F}_{o,h}^{*(t)-1})$, la cual incorpora los parámetros dependientes del tiempo $(\mu^*(t)\ y\ \sigma^*(t))$ calculados previamente. Este enfoque deriva directamente del método de mapeo cuantil, pero introduce ajustes dinámicos que consideran los cambios proyectados en la media Δμ(t) y la variabilidad Δσ(t) de los datos climáticos.

La fórmula utilizada para calcular los datos ajustados es la siguiente:

$$(\widetilde{X_m}(t)) = \mathrm{F}_{o,h}^{*(t)-1}(Prob_m(t), \theta_{o,h}^*(t))$$

- $(\widetilde{X_m}(t))$: Representa el dato de precipitación ajustado para el tiempo t en el modelo GCM después de aplicar el método UQM.
- $\mathrm{F}_{o,h}^{*(t)-1}$: Es la función inversa de la distribución acumulativa observada corregida.
- $Prob_m(t)$: Es la probabilidad de no excedencia del dato proyectado del modelo GCM en el tiempo t.
- $\theta_{o,h}^*(t)$: Conjunto de parámetros dependientes del tiempo que caracterizan la distribución observada corregida $(\mu^*(t)\ y\ \sigma^*(t))$.

El método UQM se llevó a cabo a través de la librería climQMBC (climatic variables Quantile Mapping Bias Correction) desarrollada por Chadwick et al. (2023) en el lenguaje de programación R. El código fuente está disponible en GitHub (Aedo et al., 2024).

2.2. Evaluación con KGE

Para evaluar la precisión de los modelos climáticos y seleccionar aquellos que mejor representen las condiciones de precipitación en el área de estudio, se utiliza el Coeficiente de Kling-Gupta (KGE) (Gupta et al., 2009). En este análisis, se han utilizado las precipitaciones máximas de 24 horas anuales, lo que permite enfocar la selección en los eventos extremos de lluvia que son más relevantes para el diseño de hietogramas y la planificación de infraestructura. El KGE permite evaluar la calidad de los modelos en función de tres componentes clave: correlación, sesgo en la media y relación de la variabilidad entre los datos simulados y observados. Estas tres métricas combinadas ofrecen una medida integral de desempeño, facilitando la identificación de los modelos que reproducen con mayor precisión estos eventos de precipitación extrema en el barrio La Chimba.

El cálculo del KGE se basa en la siguiente fórmula:

$$KGE = 1 - \sqrt{(r-1)^2 + (\frac{\mu_s}{\mu_o} - 1)^2 + (\frac{\sigma_s}{\sigma_o} - 1)^2}$$

Donde:

- r: coeficiente de correlación entre los datos observados y simulados.
- $\mu_s \; y \; \mu_o$: medias de las series simulada y observada, respectivamente.
- $\sigma_s \; y \; \sigma_o$: desviaciones estándar de las series simulada y observada.

El KGE varía desde valores negativos hasta 1, donde 1 representa una coincidencia perfecta entre el modelo y los datos observados. En esta investigación, se seleccionan los modelos que obtienen valores de KGE más próximos a 1, lo cual indica que estos modelos reproducen de manera confiable los patrones de precipitación observados. Esta metodología permite filtrar los GCM's corregidos por downscaling, priorizando aquellos que mantengan la precisión necesaria para los análisis posteriores.

2.3. Construcción del Hietograma de Diseño

Para desarrollar la tormenta de diseño en el barrio La Chimba, se realizó un análisis de frecuencia de los eventos de precipitación, seguido de la construcción de las curvas Intensidad-Duración-Frecuencia (IDF) y la generación de la tormenta de diseño mediante el método de bloques alternantes. Este último proceso se ajustó a la metodología establecida en el Plan Maestro de Aguas Lluvias del Gran Santiago, el cual define el tiempo de concentración en intervalos de 2 y 6 horas (Ministerio de Obras Públicas [MOP], 2001).

Para realizar el análisis de frecuencia, se utilizó la serie de precipitación máxima anual de 24 horas, obteniendo un conjunto de 31 datos para cada uno de los intervalos de estudio. Este análisis se aplicó a tres periodos específicos: 1984-2014, 2020-2050 y 2068-2098, permitiendo comparar los eventos extremos de precipitación entre el pasado y los escenarios proyectados de futuro cercano y futuro lejano. Para cada temporada, se evaluó la probabilidad de ocurrencia de eventos de diferentes intensidades utilizando las distribuciones teóricas: Normal, Lognormal, Gamma 2 parámetros, Pearson Tipo III, Log Pearson Tipo III y Gumbel. La selección de la distribución más adecuada se realizó mediante el test de Kolmogorov-Smirnov (K-S), aplicando un nivel de significancia del 5%. Este nivel permitió evaluar si los datos se ajustaban bien a las distribuciones teóricas probadas, identificando la mejor representación estadística para cada periodo. La distribución que mostró el mejor ajuste y significancia estadística se empleó para estimar los valores de precipitación asociados a los periodos de retorno seleccionados (5, 10, 20, 30, 40, 50, 60, 75, 100, 200 y 500 años).

.

Con estos valores, se procedió a la construcción de las curvas IDF para cada periodo de retorno. En este proceso, se utilizó la ecuación de intensidad propuesta originalmente por Bernard (1932), la cual ha sido aplicada y desarrollada en Chile por Pizarro et al. (2007) para la elaboración de curvas IDF a nivel nacional. La ecuación establece la relación entre la intensidad I, la duración D, y el periodo de retorno T de la siguiente manera:

$$I = \frac{K \cdot T^m}{D^n}$$

Donde:

- I: Intensidad de precipitación [mm/hr].
- T: Periodo de retorno [años].
- D: Duración del evento [minutos].
- K, m, n: Parámetros ajustados mediante regresión lineal múltiple a los datos de precipitación del sector.

Además, para intervalos menores a 24 horas, se utilizó la fórmula de Grunsky, ampliamente aplicada en Chile y mencionada en el libro *Fundamentos de Hidrología Aplicada* (Stowhas, 2017) que se expresa como:

$$i(t) = i_{24} \cdot \sqrt{\frac{24}{t}}$$

Donde:

- $i(t)$: Intensidad para una duración t, en [mm/hr].
- i_{24}: Intensidad media en 24 horas, en [mm/hr].
- t: Duración en horas.

Finalmente, los resultados obtenidos se validaron comparando las curvas IDF construidas con las presentadas en el texto de Pizarro et al. (2007), titulado *"Curvas Intensidad Duración Frecuencia para las regiones Metropolitana, Maule y Biobío. Intensidades desde 15 minutos a 24 horas"*. Esta comparación permitió verificar la similitud en los parámetros K, m y n, asegurando que las estimaciones de intensidades de precipitación para la zona de estudio sean consistentes con los valores previamente documentados en la literatura.

Para representar la distribución temporal de la precipitación, se utilizó el método de bloques alternantes, una técnica ampliamente recomendada en hidrología

aplicada para la generación de hietogramas de diseño (Chow et al., 1988; Pilgrim & Cordery, 1993). Este método permite una representación conservadora de la tormenta de diseño al distribuir cronológicamente la precipitación en bloques de tiempo, asegurando que la suma de todos los bloques sea igual a la precipitación total prevista para el evento (Stowhas, 2017).

El Manual de Obras de Vialidad, Pavimentación y Aguas Lluvias (Serviu Metropolitano, 2020) señala que en Chile no existen relaciones validadas específicamente para el cálculo del tiempo de concentración en cuencas urbanas, recomendando el uso de fórmulas empíricas a criterio del proyectista, lo que permite ajustar la metodología a las características y particularidades de cada cuenca urbana. En este caso, se definieron hietogramas para duraciones de 2 y 6 horas, siguiendo los lineamientos del Plan Maestro de Aguas Lluvias del Gran Santiago. El proceso consistió en calcular los valores de precipitación acumulada para intervalos específicos, de modo que el bloque central contuviera la máxima intensidad. Los valores de los bloques se ubicaron alternadamente antes y después del bloque central, en orden descendente, lo que garantiza una distribución simétrica que resulta crítica para analizar diferentes tiempos de concentración en la cuenca (Stowhas, 2017).

3. RESULTADOS

3.1. Valores del KGE

Los resultados obtenidos se organizan siguiendo el proceso metodológico descrito. En primer lugar, se trabajó con 26 GCM's, a los cuales se aplicó un procedimiento de downscaling estadístico mediante el método UQM. Posteriormente, se evaluó la precisión de las simulaciones mediante el índice de KGE. Para ello, se calcularon los valores de KGE comparando las precipitaciones observadas con las simuladas por los 26 GCM's, tanto en su versión original (sin reducción de escala) como ajustadas después de aplicar el UQM (Tabla A2 del Anexo).

Tabla 2. Comparación de los valores de KGE para los GCM's seleccionados.

GCM	KGE Sin Downscaling	KGE Con Downscaling	Mejora Absoluta
MPI-ESM1-2-LR	0,23	0,40	+0,17
ACCESS-ESM1-5	0,26	0,31	+0,05
GFDL-ESM4	0,12	0,31	+0,19
CMCC-CM2-SR5	0,07	0,29	+0,22
EC-Earth3-Veg-LR	0,05	0,17	+0,12

Los valores obtenidos indican una clara mejora en el ajuste de las simulaciones respecto a las observaciones tras la aplicación de la técnica de reducción de escala. Antes del ajuste, los valores del índice de eficiencia para los modelos seleccionados oscilaban entre 0.05 y 0.26, lo cual indica que la capacidad predictiva de los modelos para representar las precipitaciones observadas era limitada. Sin embargo, luego de aplicar el procedimiento de ajuste estadístico, los valores se incrementaron, alcanzando un rango de 0.17 a 0.40, lo cual posiciona a 5 modelos en un nivel de desempeño que, si bien no cuenta con una escala oficial o universalmente aceptada para el índice KGE, puede ser considerado como 'satisfactorio' tomando como referencia los rangos sugeridos para el coeficiente Nash-Sutcliffe (NSE) en la literatura (Molnar, 2011) (Tabla 2). Sin embargo, se

aclara que el KGE no posee un punto de referencia propio, ni cuenta con una escala de interpretación universal. En esta investigación, dicha referencia se utiliza solo como criterio orientativo para facilitar la interpretación de los resultados, reconociendo que ambos índices no son completamente equivalentes y que su comparación debe realizarse con cautela (Knoben et al., 2019).

De los 26 modelos analizados, 11 arrojaron resultados negativos en el índice de eficiencia, lo que indica un ajuste deficiente incluso después del proceso de downscaling. Otros modelos, aunque mejoraron, mantuvieron valores inferiores a 0.2, quedando fuera del rango considerado como satisfactorio. Entre los modelos analizados, el MPI-ESM1-2-LR destaca por su desempeño, alcanzando un valor de 0.40 después del ajuste, lo cual sugiere una buena capacidad predictiva para representar las condiciones de precipitación en el barrio. Este modelo muestra una mejora de +0.17 unidades en el índice KGE, situándose como el más confiable en términos de precisión tras la reducción de escala.

Asimismo, los modelos CMCC-CM2-SR5 y GFDL-ESM4 presentan mejoras absolutas de +0.22 y +0.19 en el índice KGE, respectivamente, lo que indica una alta efectividad del proceso de ajuste en estos casos. Por otro lado, el modelo ACCESS-ESM1-5 mostró una mejora más modesta de +0.05, aunque aún se ubica dentro del rango que puede considerarse satisfactorio después de la reducción de escala.

La mejora visual en el ajuste de los modelos seleccionados puede apreciarse en la Figura 1 (sin corrección) y en la Figura 2 (con corrección mediante UQM), donde se observa una representación más cercana a los valores observados.

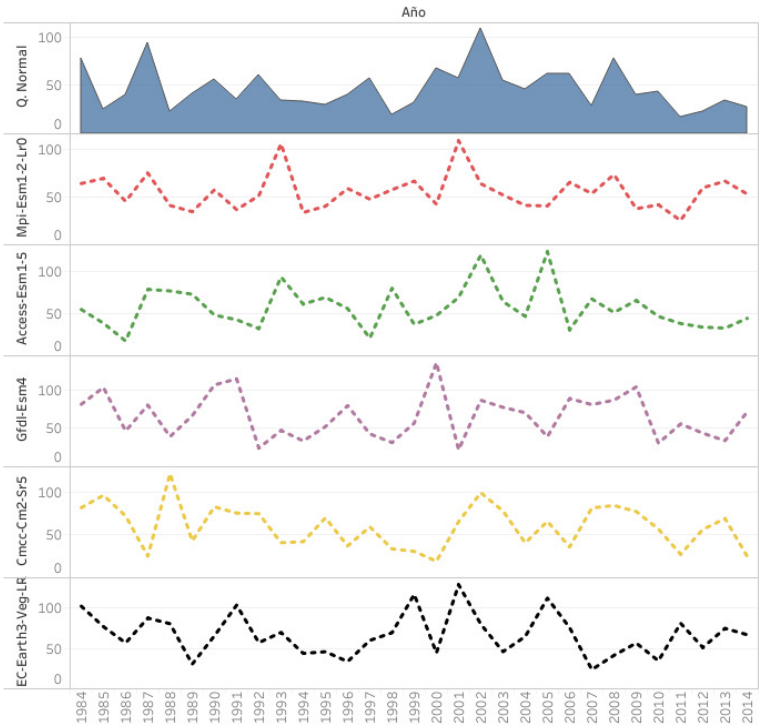


Figura 1. Comparación de precipitaciones Observadas en estación Quinta Normal con los 5 GCM's sin corrección de sesgo. (1984-2014).

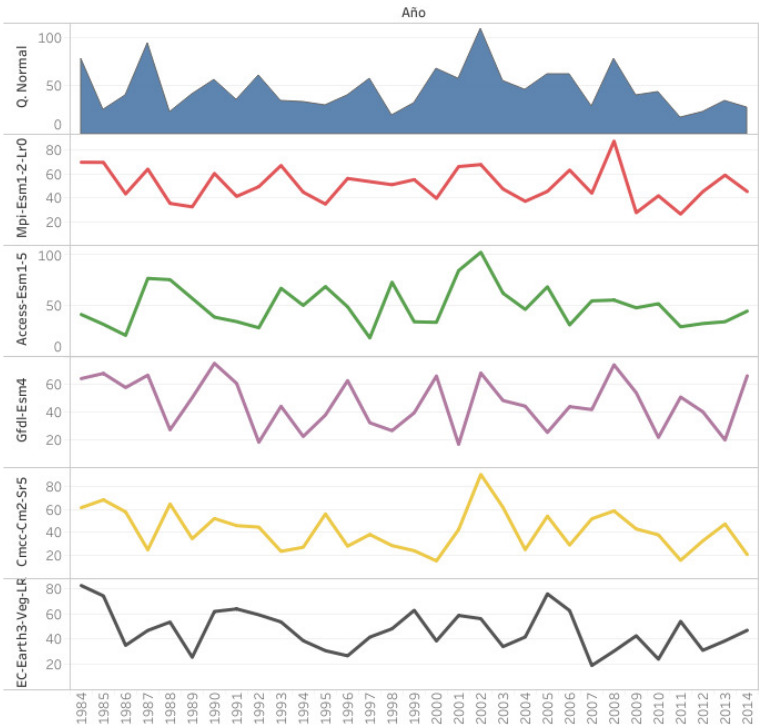


Figura 2. Comparación de precipitaciones Observadas en estación Quinta Normal con los 5 GCM's con corrección de sesgo. (1984-2014)

3.2. Tormenta de Diseño

Se realizó un análisis de frecuencia para estimar los periodos de retorno asociados a la distribución de mejor ajuste, lo que permitió identificar los valores de precipitación máxima en 24 horas en distintos escenarios climáticos. A continuación, se presentan los resultados obtenidos para los escenarios SSP1-2.6, SSP2-4.5, SSP3-7.0 y SSP5-8.5. Estas proyecciones están divididas en dos periodos temporales: 2020-2050 y 2068-2098, permitiendo analizar las tendencias en distintos horizontes futuros. Los valores que superan las estimaciones históricas se destacan en rojo, facilitando su identificación y análisis comparativo.
Las proyecciones, ajustadas mediante el método UQM, corresponden a valores calculados a partir de 5 GCM's seleccionados según el criterio de eficiencia KGE. En las tablas 3 y 4 se incluyen, además de los resultados individuales por modelo, los percentiles 50 y 95% obtenidos de la distribución conjunta de los 5 GCM's.

Estos valores ofrecen una representación tanto de las condiciones medias como de los extremos, proporcionando un panorama integral de las posibles intensidades en eventos de precipitación extrema para el Barrio La Chimba.

Los resultados detallados del test de Kolmogorov-Smirnov aplicados a cada modelo GCM bajo los distintos escenarios climáticos se presentan en el Anexo (Figuras A1a a A20b). Estas figuras muestran gráficamente el ajuste de las distribuciones teóricas a los datos simulados, respaldando la selección estadística empleada en esta investigación.

Tabla 3. Precipitaciones máximas diarias (24 horas) estimadas para diferentes periodos de retorno y escenarios climáticos (2020-2050).

Predicción Pcp 24 h 2020-2050 [mm]	Histórico	SSP1-2.6					Percentil de los 5 GCM	
		MPI-ESM1-2-LR	GFDL-ESM4	EC-Earth3-Veg-LR	CMCC-CM2-SR5	ACCESS-ESM1-5	50% (mediana)	95%
5 años	64	69	65	66	71	59	66	70
10 años	77	79	73	79	84	67	79	83
20 años	89	86	80	91	96	74	86	95
30 años	95	90	84	98	103	78	90	102
40 años	100	93	86	103	107	81	93	106
50 años	103	95	88	106	111	83	95	110
60 años	106	97	89	109	113	84	97	113
75 años	110	99	91	113	117	86	99	116
100 años	114	101	93	117	121	89	101	120
200 años	125	106	98	128	130	94	106	130
500 años	138	113	103	142	142	102	113	142

Predicción Pcp 24 h 2020-2050 [mm]	Histórico	SSP2-4.5					Percentil de los 5 GCM	
		MPI-ESM1-2-LR	GFDL-ESM4	EC-Earth3-Veg-LR	CMCC-CM2-SR5	ACCESS-ESM1-5	50% (mediana)	95%
5 años	64	66	60	65	66	62	65	66
10 años	77	81	71	82	77	77	77	82
20 años	89	95	80	99	86	92	92	98
30 años	95	103	86	108	91	101	101	107
40 años	100	108	89	115	95	107	107	114
50 años	103	113	92	120	97	111	111	119
60 años	106	116	94	125	99	115	115	123
75 años	110	120	96	130	102	120	120	128
100 años	114	125	99	137	105	125	125	134
200 años	125	137	107	153	112	139	137	150
500 años	138	153	116	174	121	157	153	170

Predicción Pcp 24 h 2020-2050 [mm]	Histórico	SSP3-7.0					Percentil de los 5 GCM	
		MPI-ESM1-2-LR	GFDL-ESM4	EC-Earth3-Veg-LR	CMCC-CM2-SR5	ACCESS-ESM1-5	50% (mediana)	95%
5 años	64	67	56	62	65	60	62	66
10 años	77	83	67	69	80	67	69	82
20 años	89	97	77	73	95	72	77	97
30 años	95	105	82	75	103	75	82	105
40 años	100	111	86	76	109	77	86	110
50 años	103	115	89	77	113	78	89	115
60 años	106	118	91	78	117	79	91	118
75 años	110	123	94	79	121	81	94	122
100 años	114	128	98	80	127	82	98	128
200 años	125	140	106	82	140	86	106	140
500 años	138	156	117	84	156	91	117	156

Predicción Pcp 24 h 2020-2050 [mm]	Histórico	SSP5-8.5					Percentil de los 5 GCM	
		MPI-ESM1-2-LR	GFDL-ESM4	EC-Earth3-Veg-LR	CMCC-CM2-SR5	ACCESS-ESM1-5	50% (mediana)	95%
5 años	64	68	69	70	72	60	69	71
10 años	77	83	77	79	85	69	79	85
20 años	89	98	85	87	97	78	87	98
30 años	95	107	88	91	104	82	91	106
40 años	100	113	91	94	109	85	94	112
50 años	103	117	93	96	112	88	96	116
60 años	106	121	94	98	115	90	98	120
75 años	110	126	96	100	119	92	100	124
100 años	114	132	98	102	123	95	102	130
200 años	125	146	103	107	133	101	107	143
500 años	138	164	109	114	147	109	114	160

Tabla 4. Precipitaciones máximas diarias (24 horas) estimadas para diferentes periodos de retorno y escenarios climáticos (2068-2098).

Predicción Pcp 24 h 2068-2098 [mm]	Histórico	SSP1-2.6					Percentil de los 5 GCM	
		MPI-ESM1-2-LR	GFDL-ESM4	EC-Earth3-Veg-LR	CMCC-CM2-SR5	ACCESS-ESM1-5	50% (mediana)	95%
5 años	64	77	63	66	58	62	63	75
10 años	77	96	71	80	65	74	74	93
20 años	89	116	76	92	71	84	84	111
30 años	95	128	80	99	75	90	90	122
40 años	100	136	82	103	77	94	94	129
50 años	103	143	83	107	78	97	97	135
60 años	106	148	84	109	80	99	99	140
75 años	110	155	86	113	81	102	102	146
100 años	114	164	88	117	83	106	106	154
200 años	125	186	92	127	88	115	115	174
500 años	138	216	96	140	93	126	126	201

Predicción Pcp 24 h 2068-2098 [mm]	Histórico	SSP2-4.5					Percentil de los 5 GCM	
		MPI-ESM1-2-LR	GFDL-ESM4	EC-Earth3-Veg-LR	CMCC-CM2-SR5	ACCESS-ESM1-5	50% (mediana)	95%
5 años	64	65	59	53	60	57	59	64
10 años	77	73	71	63	73	70	71	73
20 años	89	81	81	72	84	82	81	83
30 años	95	85	87	77	90	89	87	90
40 años	100	87	91	80	94	93	91	94
50 años	103	89	95	83	98	97	95	97
60 años	106	91	97	85	100	100	97	100
75 años	110	93	100	87	103	103	100	103
100 años	114	95	104	91	107	108	104	108
200 años	125	101	113	98	117	119	113	118
500 años	138	107	125	108	129	133	125	132

Predicción Pcp 24 h 2068-2098 [mm]	Histórico	SSP3-7.0					Percentil de los 5 GCM	
		MPI-ESM1-2-LR	GFDL-ESM4	EC-Earth3-Veg-LR	CMCC-CM2-SR5	ACCESS-ESM1-5	50% (mediana)	95%
5 años	64	72	61	57	60	63	61	70
10 años	77	89	70	65	74	77	74	87
20 años	89	106	77	72	86	90	86	103
30 años	95	116	81	75	93	97	93	112
40 años	100	123	83	78	98	102	98	119
50 años	103	128	85	79	102	106	102	124
60 años	106	133	87	81	105	109	105	128
75 años	110	138	88	83	108	113	108	133
100 años	114	145	91	85	113	118	113	139
200 años	125	161	95	89	124	129	124	155
500 años	138	183	101	95	138	143	138	175

Predicción Pcp 24 h 2068-2098 [mm]	Histórico	SSP5-8.5					Percentil de los 5 GCM	
		MPI-ESM1-2-LR	GFDL-ESM4	EC-Earth3-Veg-LR	CMCC-CM2-SR5	ACCESS-ESM1-5	50% (mediana)	95%
5 años	64	52	62	79	57	54	57	75
10 años	77	61	76	98	64	64	64	94
20 años	89	70	89	117	70	72	72	111
30 años	95	75	97	128	73	77	77	122
40 años	100	78	102	135	76	80	80	129
50 años	103	80	106	141	77	83	83	134
60 años	106	82	109	146	78	85	85	139
75 años	110	85	113	152	80	87	87	144
100 años	114	88	118	159	82	90	90	151
200 años	125	95	130	178	86	97	97	168
500 años	138	104	145	201	91	106	106	190

3.2.1. Proyecciones 2020-2050.

La siguiente tabla muestra los valores históricos de precipitación máxima en 24 horas junto con las proyecciones para el percentil 95% bajo diferentes escenarios de cambio climático en el periodo 2020-2050, desglosado por diferentes periodos de retorno. Cada escenario incluye tanto los valores absolutos proyectados como el porcentaje de incremento respecto a los valores históricos, lo que permite un análisis de las tendencias proyectadas, tal como se resume en la Tabla 5.

Tabla 5. Proyecciones de Precipitaciones Extremas [mm] y sus Incrementos (2020-2050).

Categoria	Periodo de retorno [años]				
	20	30	50	100	500
Histórico	89	95	103	114	138
SSP1-2.6 - 95%	95	102	110	120	142
incremento	6,7%	7,4%	6,8%	5,3%	2,9%
SSP2-4.5 - 95%	98	107	119	134	170
incremento	10,1%	12,6%	15,5%	17,5%	23,2%
SSP3-7.0 - 95%	97	105	115	128	156
incremento	9,0%	10,5%	11,7%	12,3%	13,0%
SSP5-8.5 - 95%	98	106	116	130	160
incremento	10,1%	11,6%	12,6%	14,0%	15,9%

En términos generales, los resultados indican una clara tendencia hacia el aumento de las precipitaciones extremas en todos los escenarios. Sin embargo, los incrementos más significativos se presentan consistentemente bajo el escenario SSP2-4.5, superando a los demás escenarios en todos los periodos de retorno analizados. Esta tendencia no es uniforme entre escenarios, lo que pone de manifiesto la naturaleza probabilística de los modelos climáticos y la incertidumbre asociada a las proyecciones de largo plazo.

El escenario de bajas emisiones (SSP1-2.6) muestra incrementos más moderados en comparación con los demás, aunque no elimina completamente el riesgo de precipitaciones extremas, debido a la inercia climática, que mantiene ciertos efectos incluso tras una mitigación significativa. Por otro lado, los escenarios de

altas emisiones (SSP3-7.0 y SSP5-8.5) proyectan aumentos relevantes, especialmente en los periodos de retorno más largos, reflejando el impacto acumulativo de las emisiones continuas.

La incertidumbre asociada a los modelos también se refleja en la discrepancia observada dentro del propio escenario SSP2-4.5, el cual, a pesar de ser intermedio en términos de emisiones, presenta los mayores incrementos porcentuales en todos los periodos de retorno (por ejemplo, un 23,2% a 500 años), superando incluso al escenario de mayores emisiones SSP5-8.5. Esto sugiere que, en contextos de políticas mixtas, la variabilidad climática proyectada podría ser más difícil de predecir, lo que refuerza la necesidad de considerar múltiples trayectorias posibles en la evaluación de riesgos futuros.

3.2.2. Proyecciones 2068-2098.

La siguiente tabla presenta las precipitaciones máximas históricas junto con las proyecciones para el percentil 95% bajo diferentes escenarios de cambio climático en el periodo 2068-2098, categorizadas por periodos de retorno. Al igual que en el análisis anterior, se incluyen tanto los valores absolutos proyectados como el porcentaje de incremento o decremento respecto a los valores históricos, lo que facilita una comprensión clara de las tendencias climáticas en un horizonte más lejano, tal como se muestra en la Tabla 6.

Tabla 6. Proyecciones de Precipitaciones Extremas [mm] y sus Incrementos (2068-2098).

Categoria	Periodo de retorno [años]				
	20	30	50	100	500
Histórico	89	95	103	114	138
SSP1-2.6 - 95%	111	122	135	154	201
incremento	24,7%	28,4%	31,1%	35,1%	45,7%
SSP2-4.5 - 95%	83	90	97	108	132
incremento	-6,7%	-5,3%	-5,8%	-5,3%	-4,3%
SSP3-7.0 - 95%	103	112	124	139	175
incremento	15,7%	17,9%	20,4%	21,9%	26,8%
SSP5-8.5 - 95%	111	122	134	151	190
incremento	24,7%	28,4%	30,1%	32,5%	37,7%

En términos generales, los resultados muestran un comportamiento diferenciado entre los escenarios analizados. Por un lado, los escenarios de bajas emisiones, como el SSP1-2.6, proyectan aumentos significativos en todos los periodos de retorno, lo que reafirma la persistencia de eventos extremos incluso bajo estrategias activas de mitigación. Por otro lado, escenarios intermedios como el SSP2-4.5 evidencian un comportamiento anómalo con reducciones en las precipitaciones proyectadas, destacándose como un caso único que resalta la alta incertidumbre y variabilidad inherente a las trayectorias climáticas moderadas.

Finalmente, los escenarios de altas emisiones, SSP3-7.0 y SSP5-8.5, reflejan incrementos progresivos en todos los periodos de retorno, con una intensidad especialmente marcada en eventos de baja frecuencia, lo que subraya la relación directa entre las emisiones continuas y la amplificación de eventos extremos.

3.2.3. Comparación entre horizontes temporales.

En el periodo cercano, los incrementos proyectados son moderados, oscilando entre un 2,9% y un 23,2%, dependiendo del escenario y el periodo de retorno. Los escenarios intermedios y de altas emisiones, como SSP2-4.5 y SSP5-8.5, destacan por sus tendencias ascendentes. Sin embargo, la magnitud de estos incrementos está aun parcialmente contenida, lo que podría reflejar un sistema climático que responde de manera gradual a las emisiones acumuladas.

En contraste, el periodo lejano muestra un aumento más sustancial en los valores proyectados. Por ejemplo, en SSP1-2.6, los incrementos pasan de un máximo del 2,9% (2020–2050) a un 45,7% (2068–2098) en el periodo de retorno de 500 años. De manera similar, SSP5-8.5, que ya presenta incrementos considerables en el futuro cercano, amplifica aún más sus valores, alcanzando un 37,7% en eventos extremos de 500 años. Este comportamiento evidencia cómo el calentamiento acumulativo y el cambio climático continúan intensificando los eventos extremos con el tiempo.

En síntesis:

- Intensificación progresiva: La mayoría de los escenarios muestra incrementos significativamente mayores en el futuro lejano, con porcentajes

que, en algunos casos, superan ampliamente los registrados en el primer horizonte temporal.

- Excepción – Escenario SSP2-4.5: A diferencia del resto, este escenario presenta sus mayores incrementos en el futuro cercano, con una disminución posterior en el periodo lejano. Este comportamiento resalta la sensibilidad de los escenarios intermedios a factores de incertidumbre y políticas mixtas.
- Escenarios de altas emisiones: SSP3-7.0 y SSP5-8.5 muestran un comportamiento consistente de intensificación, con valores más altos en ambos periodos y una tendencia creciente hacia finales del siglo.
- Escenario SSP1-2.6: Los incrementos en las precipitaciones proyectadas se intensifican significativamente en el futuro lejano. Este comportamiento refleja las incertidumbres inherentes a los modelos de proyección, que capturan la complejidad de las dinámicas atmosféricas y los impactos acumulativos del cambio climático.

3.3. Curvas IDF

En este apartado se presentan las ecuaciones de las curvas Intensidad-Duración-Frecuencia (IDF) construidas a partir de los datos históricos y proyectados, considerando los periodos de retorno establecidos (Tabla 7). Estas ecuaciones permiten analizar la evolución de las intensidades de precipitación en función de la duración (D) y el periodo de retorno (T).

Tabla 7. Ecuaciones IDF Derivadas para Distintos Horizontes Temporales y Escenarios Climáticos.

Horizonte Temporal	Escenario	K	m	n	Ecuación IDF
Histórico	Histórico	83,89	0,1639	0,5000	$I = \frac{83{,}89 \cdot T^{0,1639}}{D^{0,5}}$
2020-2050	SSP1-2.6	93,50	0,1514	0,5000	$I = \frac{93{,}5 \cdot T^{0,1514}}{D^{0,5}}$
	SSP2-4.5	82,23	0,2029	0,5000	$I = \frac{82{,}23 \cdot T^{0,2029}}{D^{0,5}}$
	SSP3-7.0	85,89	0,1825	0,5000	$I = \frac{85{,}89 \cdot T^{0,1825}}{D^{0,5}}$
	SSP5-8.5	90,37	0,1752	0,5000	$I = \frac{90{,}37 \cdot T^{0,1752}}{D^{0,5}}$
2068-2098	SSP1-2.6	91,11	0,2111	0,5000	$I = \frac{91{,}11 \cdot T^{0,2111}}{D^{0,5}}$
	SSP2-4.5	81,37	0,1581	0,5000	$I = \frac{81{,}37 \cdot T^{0,1581}}{D^{0,5}}$
	SSP3-7.0	88,30	0,1956	0,5000	$I = \frac{88{,}30 \cdot T^{0,1956}}{D^{0,5}}$
	SSP5-8.5	94,74	0,1979	0,5000	$I = \frac{94{,}74 \cdot T^{0,1979}}{D^{0,5}}$

En el periodo histórico, el valor de K es 83,89, mientras que en los horizontes proyectados se observan variaciones significativas. En 2020-2050, el parámetro K incrementa en SSP1-2.6 (93,50) y SSP5-8.5 (90,37) en comparación con el valor histórico, mientras que SSP2-4.5 muestra un valor inferior (82,23). Estas variaciones reflejan una respuesta diferenciada en la intensidad de las precipitaciones según el escenario climático.

Para el horizonte 2068-2098, se registran incrementos más notables en K, destacando SSP5-8.5 con el valor más alto (94,74). En contraste, SSP2-4.5 mantiene un K menor (81,37). El parámetro m también evidencia modificaciones

entre escenarios, sugiriendo alteraciones en la distribución temporal de las precipitaciones extremas. El parámetro n permanece constante en 0,5 en todos los casos, dado que se utilizó el método de Grunsky para distribuir la precipitación en duraciones inferiores a 24 horas.

3.4. Hietograma de Diseño

A partir de las ecuaciones IDF presentadas, se elaboraron los hietogramas de diseño utilizando el método de bloques alternantes, considerando duraciones de 2 horas y 6 horas, tal como lo establece el criterio del *Plan Maestro de Aguas Lluvias del Gran Santiago*. Se trabajó con un período de retorno de 100 años, siguiendo la recomendación del *Manual de Obras de Vialidad, Pavimentación y Aguas Lluvias* (2020), que establece considerar tormentas de verificación para evaluar situaciones extremas.

Se presenta a continuación una comparación de los resultados obtenidos entre el periodo histórico y los escenarios proyectados, destacando las diferencias en la magnitud y distribución de las intensidades de precipitación. Las Figuras 3 a 20 muestran los hietogramas generados para el periodo histórico (1984–2014) y los distintos escenarios climáticos proyectados, organizados por horizonte temporal (2020–2050 y 2068–2098), duración del evento (2 y 6 horas) y un periodo de retorno de 100 años.

Intervalo [min]	Precipitación [mm]
0-30	6,8
30-60	16,3
60-90	5,2
90-120	4,4

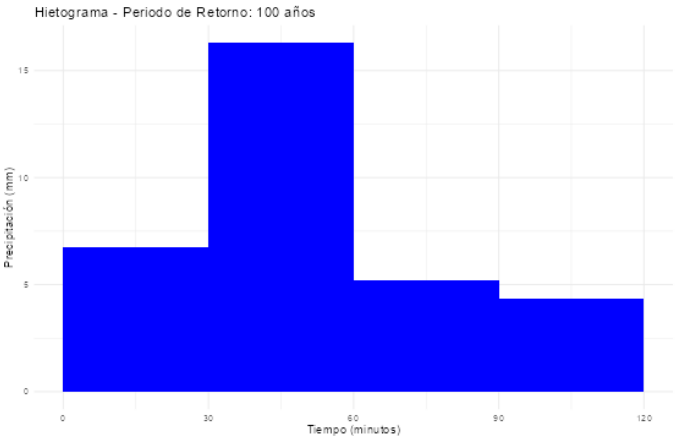


Figura 3. Hietograma de diseño 1984-2014, Histórico, T=100 años y Duración de 2 hrs.

Intervalo [min]	Precipitación [mm]
0-30	2,6
30-60	3,0
60-90	3,5
90-120	4,4
120-150	6,8
150-180	16,3
180-210	5,2
210-240	4,4
240-270	3,2
270-300	2,8
300-330	2,5
330-360	2,4

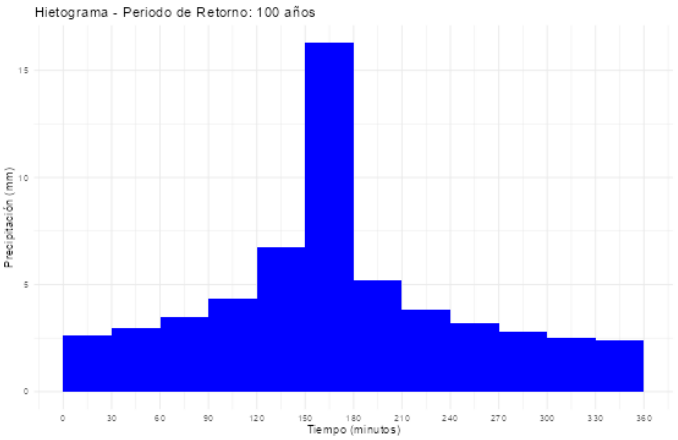


Figura 4. Hietograma de diseño 1984-2014, Histórico, T=100 años y Duración de 6 hrs.

Intervalo [min]	Precipitación [mm]
0-30	7,1
30-60	17,1
60-90	5,5
90-120	4,6

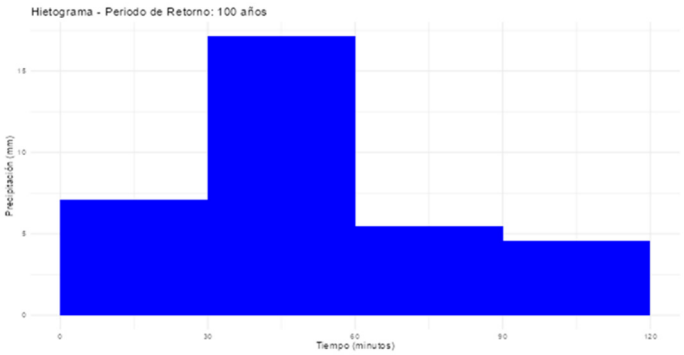


Figura 5. Hietograma de diseño 2020-2050, SSP1-2.6, T=100 años y Duración de 2 hrs.

Intervalo [min]	Precipitación [mm]
0-30	2,8
30-60	3,1
60-90	3,7
90-120	4,6
120-150	7,1
150-180	17,1
180-210	5,5
210-240	4,1
240-270	3,4
270-300	2,9
300-330	2,7
330-360	2,5

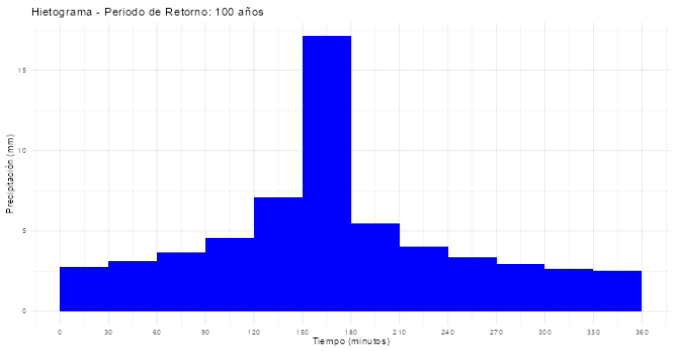


Figura 6. Hietograma de diseño 2020-2050, SSP1-2.6, T=100 años y Duración de 6 hrs.

Intervalo [min]	Precipitación [mm]
0-30	7,9
30-60	19,1
60-90	6,1
90-120	5,1

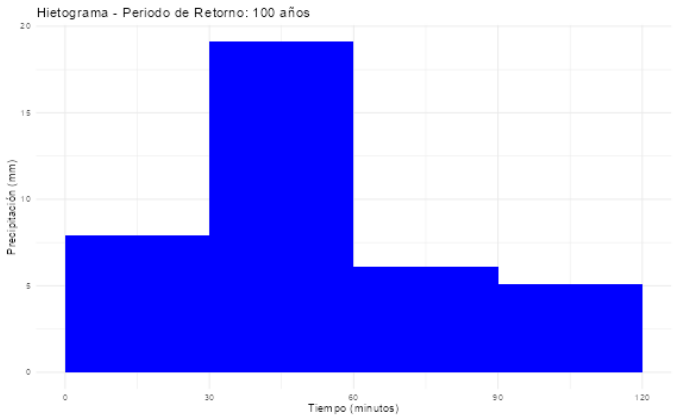


Figura 7. Hietograma de diseño 2020-2050, SSP2-4.5, T=100 años y Duración de 2 hrs.

Intervalo [min]	Precipitación [mm]
0-30	3,1
30-60	3,5
60-90	4,1
90-120	5,1
120-150	7,9
150-180	19,1
180-210	6,1
210-240	4,5
240-270	3,8
270-300	3,3
300-330	3,0
330-360	2,8

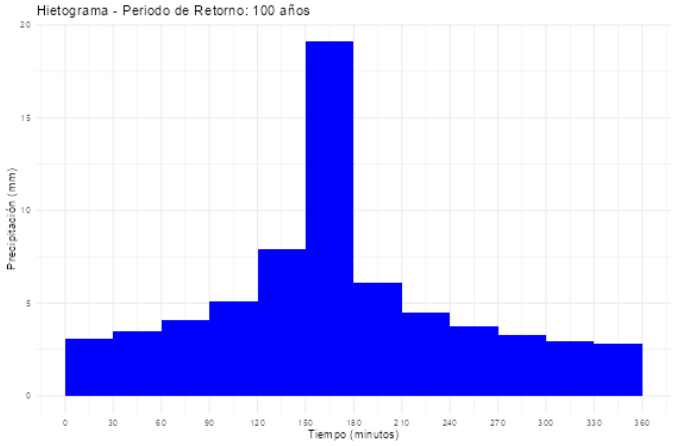


Figura 8. Hietograma de diseño 2020-2050, SSP2-4.5, T=100 años y Duración de 6 hrs.

Intervalo [min]	Precipitación [mm]
0-30	7,5
30-60	18,2
60-90	5,8
90-120	4,9

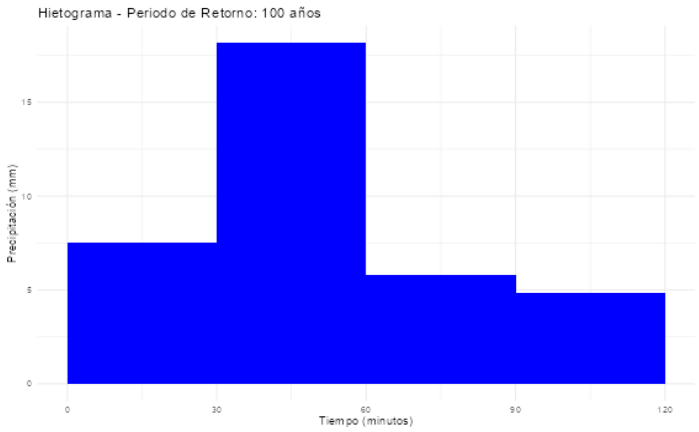


Figura 9. Hietograma de diseño 2020-2050, SSP3-7.0, T=100 años y Duración de 2 hrs.

Intervalo [min]	Precipitación [mm]
0-30	3,0
30-60	3,3
60-90	3,9
90-120	4,9
120-150	7,5
150-180	18,2
180-210	5,8
210-240	4,3
240-270	3,8
270-300	3,1
300-330	2,8
330-360	2,7

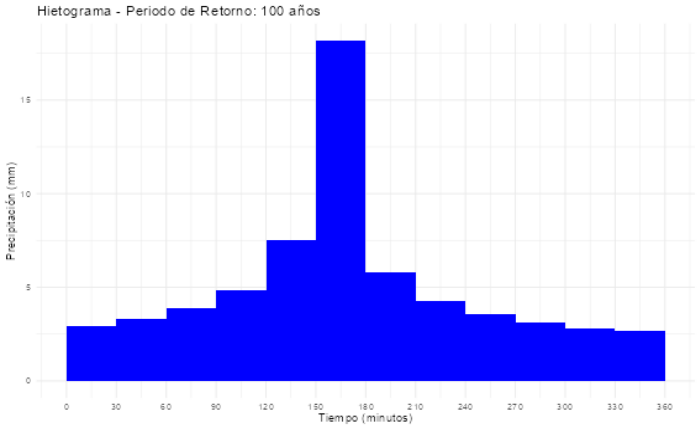


Figura 10. Hietograma de diseño 2020-2050, SSP3-7.0, T=100 años y Duración de 6 hrs.

Intervalo [min]	Precipitación [mm]
0-30	7,7
30-60	18,5
60-90	5,9
90-120	5,0

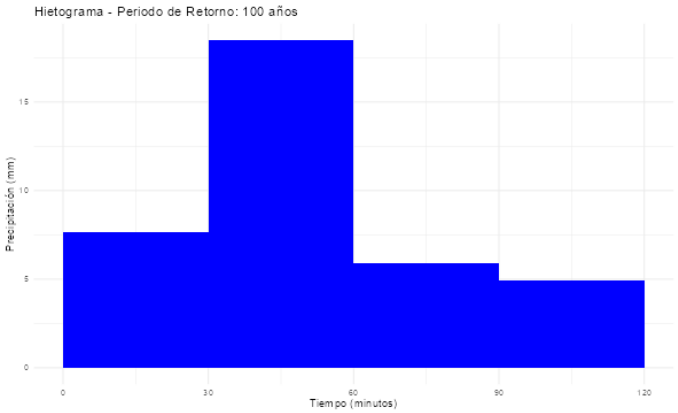


Figura 11. Hietograma de diseño 2020-2050, SSP5-8.5, T=100 años y Duración de 2 hrs.

Intervalo [min]	Precipitación [mm]
0-30	3,0
30-60	3,4
60-90	4,0
90-120	5,0
120-150	7,7
150-180	18,5
180-210	5,9
210-240	4,4
240-270	3,6
270-300	3,2
300-330	2,9
330-360	2,7

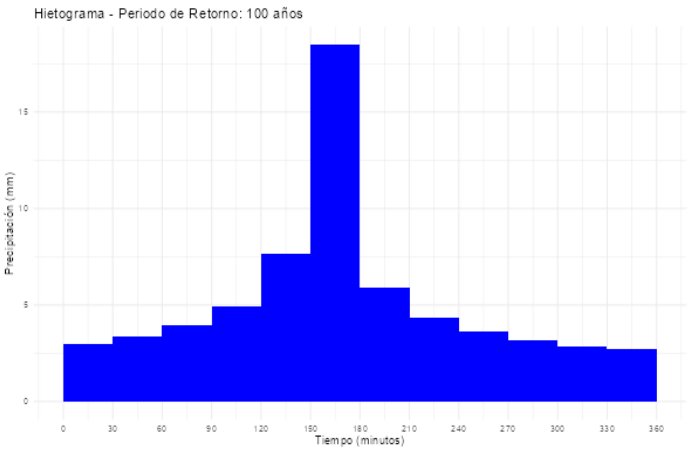


Figura 12. Hietograma de diseño 2020-2050, SSP5-8.5, T=100 años y Duración de 6 hrs.

Intervalo [min]	Precipitación [mm]
0-30	9,1
30-60	22,0
60-90	7,0
90-120	5,9

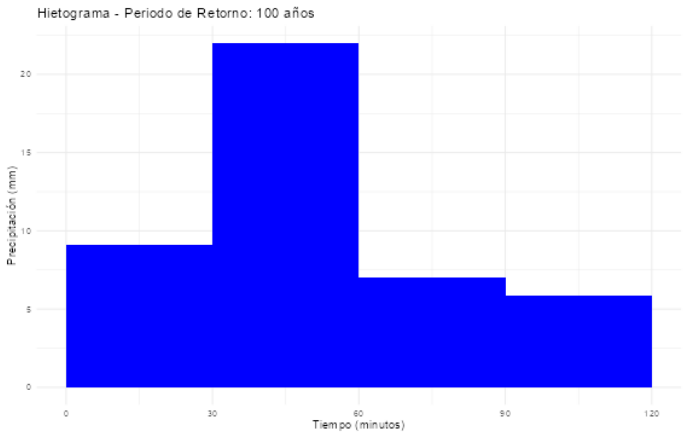


Figura 13. Hietograma de diseño 2068-2098, SSP1-2.6, T=100 años y Duración de 2 hrs.

Intervalo [min]	Precipitación [mm]
0-30	3,6
30-60	4,0
60-90	4,7
90-120	5,9
120-150	9,1
150-180	22,0
180-210	7,0
210-240	5,2
240-270	4,3
270-300	3,8
300-330	3,4
330-360	3,2

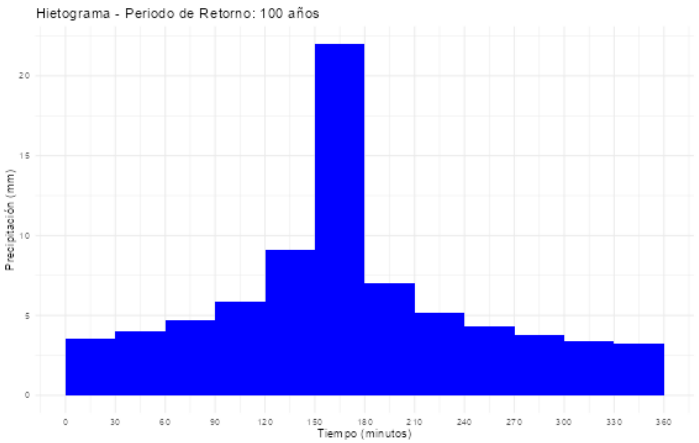


Figura 14. Hietograma de diseño 2068-2098, SSP1-2.6, T=100 años y Duración de 6 hrs.

Intervalo [min]	Precipitación [mm]
0-30	6,4
30-60	15,4
60-90	4,9
90-120	4,1

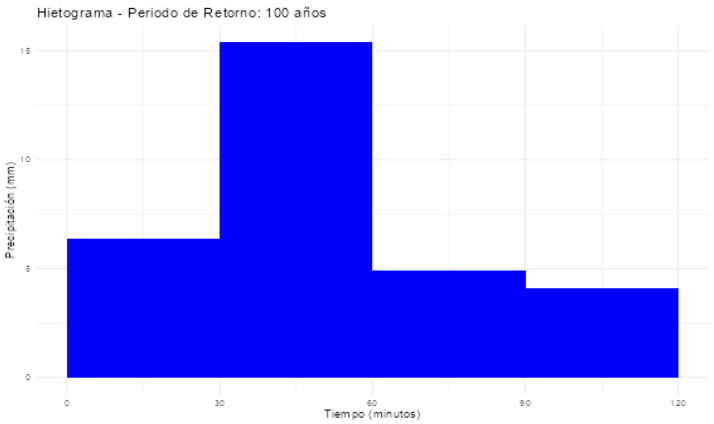


Figura 15. Hietograma de diseño 2068-2098, SSP2-4.5, T=100 años y Duración de 2 hrs.

Intervalo [min]	Precipitación [mm]
0-30	2,5
30-60	2,8
60-90	3,3
90-120	4,1
120-150	6,4
150-180	15,4
180-210	4,9
210-240	3,6
240-270	3,0
270-300	2,6
300-330	2,4
330-360	2,3

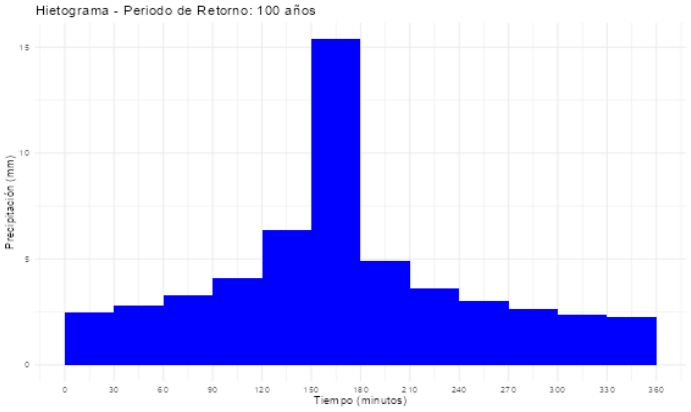


Figura 16. Hietograma de diseño 2068-2098, SSP2-4.5, T=100 años y Duración de 6 hrs.

Intervalo [min]	Precipitación [mm]
0-30	8,2
30-60	19,9
60-90	6,3
90-120	5,3

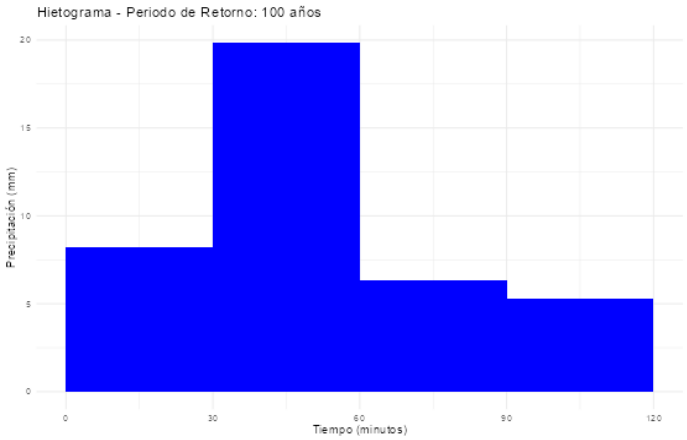


Figura 17. Hietograma de diseño 2068-2098, SSP3-7.0, T=100 años y Duración de 2 hrs.

Intervalo [min]	Precipitación [mm]
0-30	3,2
30-60	3,6
60-90	4,4
90-120	5,3
120-150	8,2
150-180	19,9
180-210	6,3
210-240	4,7
240-270	3,9
270-300	3,4
300-330	3,1
330-360	2,9

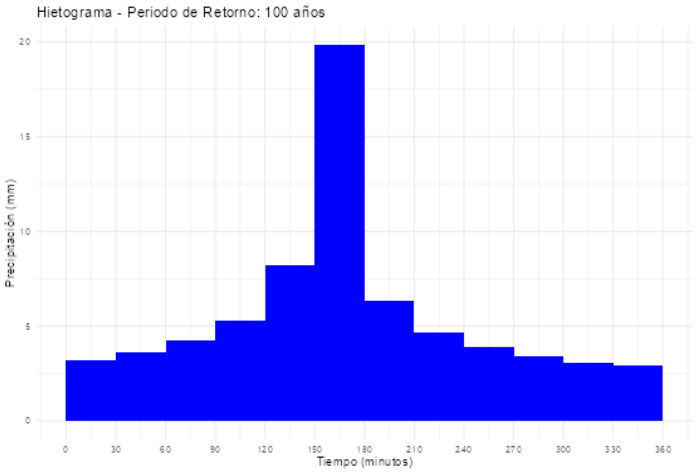


Figura 18. Hietograma de diseño 2068-2098, SSP3-7.0, T=100 años y Duración de 6 hrs.

Intervalo [min]	Precipitación [mm]
0-30	8,9
30-60	21,5
60-90	6,8
90-120	5,8

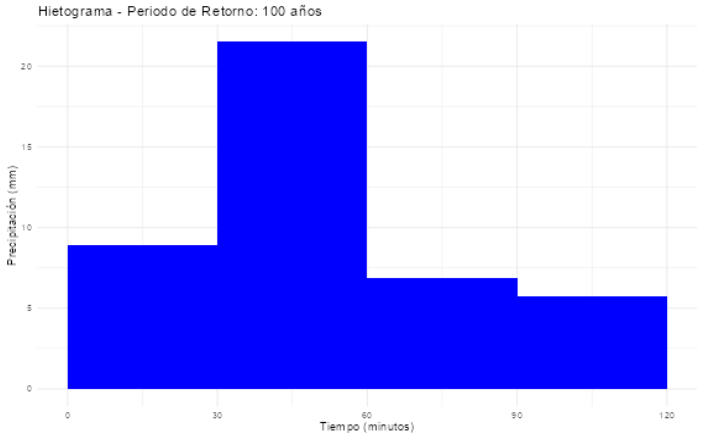


Figura 19. Hietograma de diseño 2068-2098, SSP5-8.5, T=100 años y Duración de 2 hrs.

Intervalo [min]	Precipitación [mm]
0-30	3,5
30-60	3,9
60-90	4,6
90-120	5,8
120-150	8,9
150-180	21,5
180-210	6,8
210-240	5,1
240-270	4,2
270-300	3,7
300-330	3,3
330-360	3,2

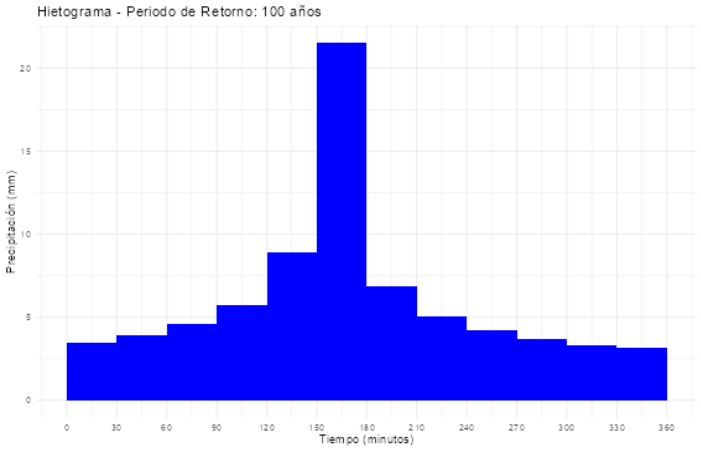


Figura 20. Hietograma de diseño 2068-2098, SSP5-8.5, T=100 años y Duración de 6 hrs.

Con base en los resultados extendidos de los hietogramas para eventos de 2 y 6 horas y considerando distintos escenarios climáticos en los horizontes temporales 2020-2050 y 2068-2098, se observan las siguientes variaciones respecto al periodo histórico (Tabla 8):

En el horizonte 2020-2050, se observan incrementos en la precipitación acumulada total en todos los escenarios analizados respecto al periodo histórico. El escenario SSP2-4.5 es el más crítico tanto para eventos de 2 horas como de 6 horas, seguido del SSP5-8.5. El SSP1-2.6 muestra incrementos menores, lo que sugiere menor intensificación de eventos extremos en este escenario.

En el horizonte lejano, los aumentos son más pronunciados, especialmente en los escenarios de menor y mayor emisión (SSP1-2.6 y SSP5-8.5). Le sigue de cerca el SSP3-7.0, con valores también elevados.

Tabla 8. Variación de la precipitación acumulada para eventos de 2 y 6 horas en distintos horizontes y escenarios climáticos.

Horizonte	Escenario	Duración	Precipitación Total [mm]	Variación Absoluta [mm]	Variación Porcentual [%]
1984-2014	Histórico	2 horas	32,7	0.0	0.0
2020-2050	SSP1-2.6	2 horas	34,3	1,6	5
	SSP2-4.5	2 horas	38,2	5,5	17
	SSP3-7.0	2 horas	36,4	3,7	11
	SSP5-8.5	2 horas	37,1	4,4	13
2068-2098	SSP1-2.6	2 horas	44	11,3	35
	SSP2-4.5	2 horas	30,8	-1,9	-6
	SSP3-7.0	2 horas	39,7	7	21
	SSP5-8.5	2 horas	43	10,3	31
1984-2014	Histórico	6 horas	57,1	0.0	0.0
2020-2050	SSP1-2.6	6 horas	59,5	2,4	4
	SSP2-4.5	6 horas	66,3	9,2	16
	SSP3-7.0	6 horas	63,3	6,2	11
	SSP5-8.5	6 horas	64,3	7,2	13
2068-2098	SSP1-2.6	6 horas	76,2	19,1	33
	SSP2-4.5	6 horas	53,3	-3,8	-7
	SSP3-7.0	6 horas	68,9	11,8	21
	SSP5-8.5	6 horas	74,5	17,4	30

4. CONCLUSIÓN

Este estudio aborda la generación de hietogramas de diseño para el barrio La Chimba, en Santiago, considerando los efectos del cambio climático en las precipitaciones extremas. Los resultados permiten identificar una tendencia general hacia el incremento en la intensidad y frecuencia de estos eventos, con aumentos relevantes observados en distintos escenarios y horizontes temporales. Sin embargo, esta tendencia no es homogénea, ya que también se evidencian reducciones y comportamientos anómalos en ciertos casos, lo que refleja la complejidad e incertidumbre inherente a las proyecciones climáticas. Esta diversidad de respuestas climáticas subraya la importancia de incorporar múltiples trayectorias de emisión en los procesos de planificación y diseño urbano.

El análisis de las precipitaciones acumuladas para eventos de 2 y 6 horas en los horizontes 2020-2050 y 2068-2098 evidencia cambios sustanciales respecto al periodo histórico (1984-2014). En el horizonte cercano, los incrementos más notables se observan en el SSP2-4.5, con aumentos de hasta un 17% y 16% para eventos de 2 y 6 horas, respectivamente, mientras que en el SSP1-2.6 los incrementos son más moderados. En el horizonte lejano, los aumentos alcanzan valores máximos del 35% en el SSP1-2.6 y del 31% en el SSP5-8.5, reflejando la persistencia de eventos extremos incluso bajo escenarios de bajas emisiones, así como una aceleración de impactos en trayectorias de altas emisiones. Por su parte, el SSP2-4.5 presenta anomalías con reducciones de la intensidad de precipitación proyectadas, resaltando la complejidad de los escenarios intermedios.

La metodología presentada, basada en técnicas como el downscaling estadístico y el análisis del KGE, constituye una herramienta efectiva para estimar precipitaciones extremas a escala local, incorporando el principio de no estacionariedad de la hidrología. Esto permite capturar la influencia de las condiciones climáticas cambiantes, facilitando la identificación de escenarios críticos y la planificación de estrategias más robustas frente a amenazas de inundación. Las proyecciones obtenidas son esenciales para anticipar escenarios futuros y fortalecer la resiliencia de zonas urbanas ante los desafíos asociados al

cambio climático.

Asimismo, este trabajo se inserta como una contribución específica al proyecto *"Evaluación de las multi-vulnerabilidades de Patrimonio Construido de la Chimba (PCC) en Santiago, ante multi-amenazas"*, liderado por Chiara Palazzi, con un enfoque particular en la amenaza de inundación. Los datos generados permiten no solo evaluar la efectividad de otras metodologías, sino también comparar resultados y refinar los análisis en estudios futuros. Este aporte reafirma la importancia de continuar desarrollando herramientas científicas que protejan el patrimonio urbano frente a los impactos del cambio climático, promoviendo una planificación adaptativa y sostenible.

5. REFERENCIAS

IPCC, (2021). Cambio climático 2021: impactos, adaptación y vulnerabilidad. Contribución del Grupo de trabajo II al sexto informe de evaluación del Grupo Intergubernamental de Expertos sobre el Cambio Climático [H.-O. Pörtner, DC Roberts, M. Tignor, ES Poloczanska, K. Mintenbeck, A. Alegría, M. Craig, S. Langsdorf, S. Löschke, V. Möller, A. Okem, B. Rama (eds.)]. Cambridge University Press. Cambridge University Press, Cambridge, Reino Unido y Nueva York, NY, EE. UU., 3056 pp., doi: 10.1017/9781009325844.

San Martin K (2018). Renovación urbana en áreas patrimoniales: La manzana como unidad de planificación y diseño urbano para la protección del Barrio Recoleta-Dominica, La Chimba. PUC.

Dirección General de Aeronáutica Civil. (2023). Reporte anual de la evolución del clima en Chile: Informe climático del año 2022. Oficina de Cambio Climático, Sección Climatología de la Dirección Meteorológica de Chile.

Maraun, D., Wetterhall, F., Ireson, A. M., Chandler, R. E., Kendon, E. J., Widmann, M., ... & Rust, H. W. (2010). Precipitation downscaling under climate change: Recent developments to bridge the gap between dynamical models and the end user. Reviews of Geophysics, 48(3).

Steiner T., A., Caro C., R., & Catalán H., G. (1989). *Modelos para el cálculo de colectores de aguas lluvias*. Presentado en el IX Congreso Chileno de Ingeniería Hidráulica, Santiago, Chile.

Vidal, C., & Romero, H. (2010). *Efectos ambientales de la urbanización de las cuencas de los ríos Biobío y Andalién sobre los riesgos de inundación y anegamiento de la ciudad de Concepción*. En Pérez, L. & Hidalgo, R. (Eds.), *Concepción metropolitano (AMC). Planes, procesos y proyectos*. Serie GEOlibros, Instituto de Geografía, Pontificia Universidad Católica de Chile.

Gupta, H. V., Kling, H., Yilmaz, K. K., & Martinez, G. F. (2009). Decomposition of the mean squared error and NSE performance criteria: Implications for improving hydrological modelling. *Journal of Hydrology, 377*(1-2), 80-91.

Ministerio de Obras Públicas (MOP). (2001). *Plan Maestro de Evacuación y Drenaje de Aguas Lluvias del Gran Santiago: Informe Final* (Consultoría PM-01). CADE-IDEPE. Dirección de Obras Hidráulicas (DOH).

Pizarro, R., Cisternas, R., Salgado, R., & Valdés, R. (2007). *Curvas intensidad-duración-frecuencia para las regiones Metropolitana, Maule y Biobío. Intensidades desde 15 minutos a 24 horas.* Dirección General de Aguas, Ministerio de Obras Públicas, Chile.

Stowhas, L. (2017). *Fundamentos de Hidrología Aplicada.* Departamento de Obras Civiles, Universidad Técnica Federico Santa María, Valparaíso, Chile.

Chow, V. T., Maidment, D. R., & Mays, L. W. (1988). *Applied Hydrology.* McGraw-Hill.

Pilgrim, D. H., & Cordery, I. (1993). *Flood Runoff.* En D. R. Maidment (Ed.), *Handbook of Hydrology* (Cap. 9). McGraw-Hill.

Molnar, P. (2011). On the typical range, sensitivity, and normalization of Mean Squared Error and Nash–Sutcliffe Efficiency type metrics. *Water Resources Research, 47*(10), W10521.

Serviu Metropolitano. (2020). Manual de Obras de Vialidad, Pavimentación y Aguas Lluvias. Subdirección de Pavimentación y Obras Viales. Recuperado de http://pavimentacion.metropolitana.minvu.cl/mpall3.asp

Thrasher, B., Wang, W., Michaelis, A., Melton, F., Lee, T., & Nemani, R. (2021).

NASA Global Daily Downscaled Projections**,** CMIP6. NASA Earth Exchange. *NEX-GDDP-CMIP6: High-resolution climate projections*. Recuperado de https://nex-gddp-cmip6.s3.us-west-2.amazonaws.com/index.html

Chadwick, C., Gironás, J., González-Leiva, F., y Aedo, S. (2023). Corrección de sesgo y la importancia de preservar los cambios en la variabilidad: mapeo cuantil imparcial (UQM), una nueva corrección de sesgo. Reunión de otoño de la American Geophysical Union.

Alfieri, J. G., Ban, N. C., Lettenmaier, D. P., & Porporato, A. (2016). Precipitation extremes under climate change: A review of current research. Journal of Hydrometeorology, 17(2), 345–367.

Patra, A. K., et al. (2018). Changing patterns of precipitation extremes in a warming climate. *Environmental Research Letters, 13*(5), 055003.

Arnbjerg-Nielsen, K., et al. (2013). Urban flood risks and climate change: A review. *Urban Climate, 2*, 93–104.

Kundzewicz, Z. W., et al. (2020). Flood risk and climate change: Global and regional perspectives. *Hydrological Sciences Journal, 65*(1), 1–20.

Tramblay, Y., et al. (2020). Revisiting intensity–duration–frequency relationships under climate change. *Journal of Hydrology, 586*, 124–136.

Walsh, P. D., et al. (2020). Updated intensity–duration–frequency curves for urban design under climate change. *Water Resources Research, 56*(5), 1–15.

Aedo, S., Chadwick, C., Gonzalez-Leiva, F., & Gironas, J. (2024). climQMBC: Quantile Mapping Bias Correction for Climate Variables [Repositorio en GitHub]. https://github.com/saedoquililongo/climQMBC

Organización Meteorológica Mundial. (2011). Guía de prácticas climatológicas (OMM-N° 100). Ginebra, Suiza.

Organización Meteorológica Mundial. (2008). Guía de prácticas hidrológicas, Volumen I: Hidrología: de la medición a la información hidrológica (OMM-Nº 168).

Bernard, M. M. (1932). Formulas for rainfall intensities of long durations. Transactions of the American Society of Civil Engineers, 96, 592–606.

Itia Research Team. (s.f.). Hydrognomon (Versión 4) [Software]. National Technical University of Athens. https://hydrognomon.openmeteo.org/

Gateño, F., Mendoza, P., Vásquez, N., Jiménez, H., Jerez, C., Lagos-Zúñiga, M., Vargas, X., Rubio-Álvarez, E., & Montserrat, S. (2023). Diagnóstico de modelos del CMIP6 para evaluar el impacto del cambio climático en Chile. En XXVI Congreso Chileno de Ingeniería Hidráulica. Sociedad Chilena de Ingeniería Hidráulica.

Hosseinzadehtalaei, P., Tabari, H., & Willems, P. (2018). Precipitation intensity–duration–frequency curves for central Belgium with an ensemble of EURO-CORDEX simulations, and associated uncertainties. Atmospheric Research, 200, 1–12.

Requena, A. I., Burn, D. H. & Coulibaly, P. (2021a). Technical guidelines for future intensity-duration-frequency curve estimation in Canada. Can. Water Resour. J. 46, 87-104.

Knoben, W. J. M., Freer, J. E., & Woods, R. A. (2019). Technical note: Inherent benchmark or not? Comparing Nash–Sutcliffe and Kling–Gupta efficiency scores. Hydrology and Earth System Sciences, 23(10), 4323–4331.

6. ANEXOS

En la sección de anexos se incluyen tablas, gráficos y resultados complementarios que amplían y detallan la información presentada en el cuerpo principal de esta investigación. Estos elementos adicionales respaldan los análisis y conclusiones del estudio.

Tabla A1. Características de los modelos de circulación general (GCM) seleccionados para esta investigación.

#	Nombre del Modelo	Centro de Desarrollo	Resolución Espacial (grados)
1	ACCESS-CM2	CSIRO y Bureau of Meteorology, Australia	1.875° × 1.25°
2	ACCESS-ESM1-5	CSIRO y Bureau of Meteorology, Australia	1.875° × 1.25°
3	BCC-CSM2-MR	Beijing Climate Center, China	1.125° × 1.125°
4	CanESM5	Canadian Centre for Climate Modelling and Analysis, Canadá	2.8125° × 2.8125°
5	CESM2	National Center for Atmospheric Research, EE.UU.	1.25° × 0.9375°
6	CMCC-CM2-SR5	Centro Euro-Mediterraneo sui Cambiamenti Climatici, Italia	1.0° × 1.0°
7	CMCC-ESM2	Centro Euro-Mediterraneo sui Cambiamenti Climatici, Italia	1.0° × 1.0°
8	CNRM-CM6-1	Centre National de Recherches Météorologiques, Francia	1.40625° × 1.40625°
9	CNRM-ESM2-1	Centre National de Recherches Météorologiques, Francia	1.40625° × 1.40625°
10	EC-Earth3	EC-Earth Consortium, Europa	1.125° × 1.125°
11	EC-Earth3-Veg-LR	EC-Earth Consortium, Europa	1.125° × 1.125°
12	FGOALS-g3	Institute of Atmospheric Physics, China	1.25° × 1.25°
13	GFDL-ESM4	Geophysical Fluid Dynamics Laboratory, EE.UU.	1.0° × 1.0°
14	GISS-E2-1-G	Goddard Institute for Space Studies, EE.UU.	2.0° × 2.5°
15	IITM-ESM	Indian Institute of Tropical Meteorology, India	1.0° × 1.0°
16	INM-CM4-8	Institute of Numerical Mathematics, Rusia	1.5° × 2.0°
17	INM-CM5-0	Institute of Numerical Mathematics, Rusia	1.5° × 2.0°
18	IPSL-CM6A-LR	Institut Pierre-Simon Laplace, Francia	2.5° × 1.25°
19	MIROC6	Japan Agency for Marine-Earth Science and Technology, Japón	1.4° × 1.4°
20	MIROC-ES2L	Japan Agency for Marine-Earth Science and Technology, Japón	1.4° × 1.4°
21	MPI-ESM1-2-HR	Max Planck Institute for Meteorology, Alemania	0.9375° × 0.9375°
22	MPI-ESM1-2-LR	Max Planck Institute for Meteorology, Alemania	1.875° × 1.875°
23	MRI-ESM2-0	Meteorological Research Institute, Japón	1.125° × 1.125°
24	NorESM2-LM	Norwegian Climate Centre, Noruega	1.875° × 2.5°
25	NorESM2-MM	Norwegian Climate Centre, Noruega	1.0° × 1.0°
26	TaiESM1	Research Center for Environmental Changes, Taiwán	1.0° × 1.0°

Tabla A2. Valores de KGE con y sin Downscaling para los modelos seleccionados.

N°	MODELOS	KGE Sin Downscaling	KGE Con Downscaling
1	ACCESS-CM2	-0,23	-0,12
2	ACCESS-ESM1-5	0,26	0,31
3	BCC-CSM2-MR	-0,01	0,09
4	CanESM5	-0,01	0,10
5	CESM2	-0,17	-0,06
6	CMCC-CM2-SR5	0,07	0,29
7	CMCC-ESM2	0,02	0,13
8	CNRM-CM6-1	-0,13	0,06
9	CNRM-ESM2-1	0,22	0,17
10	EC-Earth3	-0,16	-0,03
11	EC-Earth3-Veg-LR	0,05	0,17
12	FGOALS-g3	0,03	-0,10
13	GFDL-ESM4	0,12	0,31
14	GISS-E2-1-G	0,09	0,06
15	IITM-ESM	-0,24	-0,21
16	INM-CM4-8	-0,22	-0,31
17	INM-CM5-0	-0,13	-0,14
18	IPSL-CM6A-LR	-0,06	0,06
19	MIROC6	-0,05	-0,05
20	MIROC-ES2L	-0,12	-0,11
21	MPI-ESM1-2-HR	-0,06	-0,06
22	MPI-ESM1-2-LR	0,23	0,40
23	MRI-ESM2-0	-0,08	-0,02
24	NorESM2-LM	-0,12	-0,16
25	NorESM2-MM	-0,02	0,06
26	TaiESM1	0,07	0,06

Los análisis de frecuencia fueron realizados utilizando el software Hydrognomon 4 (Itia Research Team, s.f.). En particular, la selección de la distribución de probabilidad se llevó a cabo mediante la prueba de Kolmogorov-Smirnov, permitiendo determinar el ajuste más adecuado para los datos. Asimismo, la estimación de las precipitaciones asociadas a diferentes períodos de retorno fue ejecutada dentro del entorno de este software, facilitando el cálculo y visualización de los resultados. Los gráficos generados a partir de estos análisis se presentan a continuación:

Test Kolmogorov-Smirnov	a=5%	Obtuvo un	DMax
Normal	ACCEPT	85,4%	0,102
LogNormal	ACCEPT	43,4%	0,150
Gamma	ACCEPT	64,9%	0,126
Pearson III	ACCEPT	85,4%	0,102
EV1-Max (Gumbel)	ACCEPT	50,0%	0,142

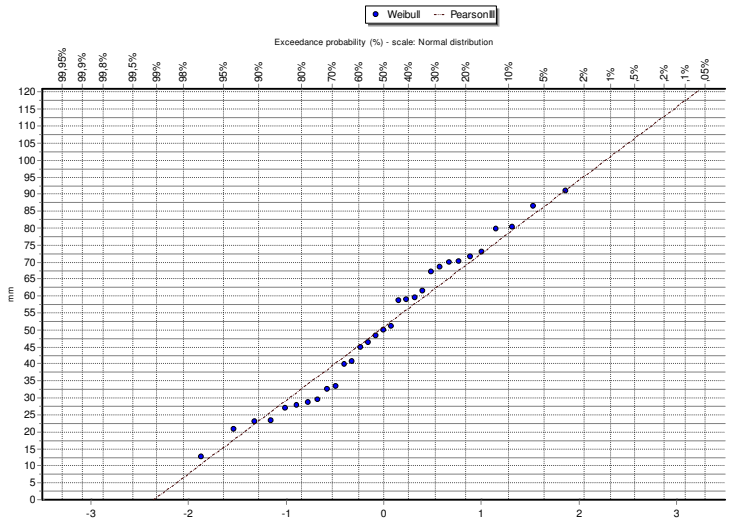


Fig.A1a. Test K-S, Modelo MPI-ESM1-2-LR, SSP1-2.6 [2020-2050].

Test Kolmogorov-Smirnov	a=5%	Obtuvo un	DMax
Normal	ACCEPT	29,3%	0,169
LogNormal	ACCEPT	71,5%	0,118
Gamma	ACCEPT	49,0%	0,143
Pearson III	ACCEPT	53,1%	0,138
EV1-Max (Gumbel)	ACCEPT	60,2%	0,131

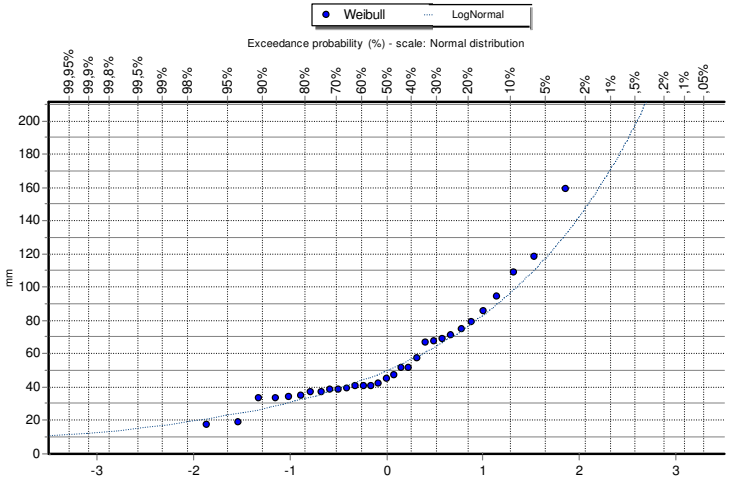


Fig.A1b. Test K-S, Modelo MPI-ESM1-2-LR, SSP1-2.6 [2068-2098].

Test Kolmogorov-Smirnov	a=5%	Obtuvo un	DMax
Normal	ACCEPT	97,1%	0,081
LogNormal	ACCEPT	86,2%	0,101
Gamma	ACCEPT	97,0%	0,081
Pearson III	ACCEPT	97,1%	0,081
EV1-Max (Gumbel)	ACCEPT	89,0%	0,097

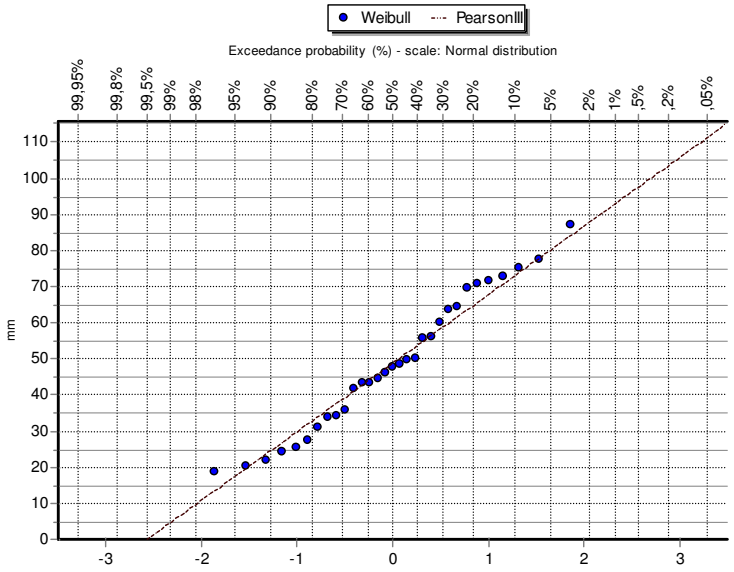


Fig.A2a. Test K-S, Modelo GFDL-ESM4, SSP1-2.6 [2020-2050].

Test Kolmogorov-Smirnov	a=5%	Obtuvo un	DMax
Normal	ACCEPT	92,0%	0,092
LogNormal	ACCEPT	50,9%	0,141
Gamma	ACCEPT	69,0%	0,121
Pearson III	ACCEPT	92,0%	0,092
EV1-Max (Gumbel)	ACCEPT	44,1%	0,149

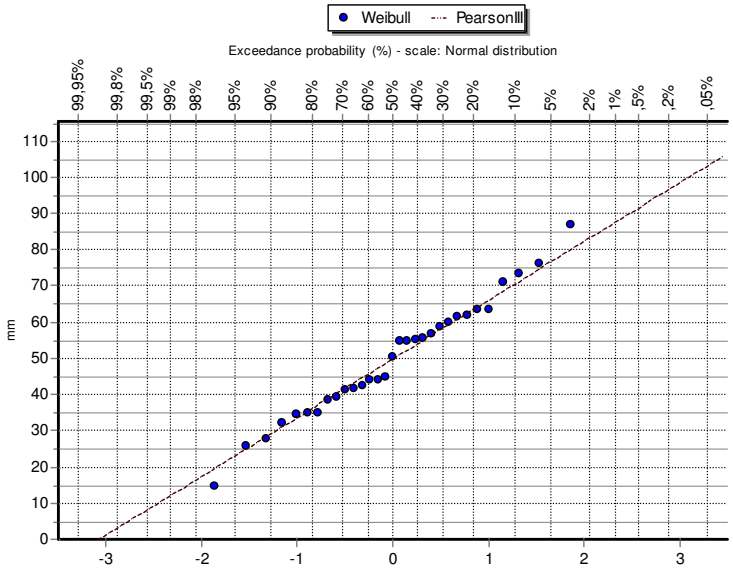


Fig.A2b. Test K-S, Modelo GFDL-ESM4, SSP1-2.6 [2068-2098].

Test Kolmogorov-Smirnov	a=5%	Obtuvo un	DMax
Normal	ACCEPT	22,2%	0,182
LogNormal	ACCEPT	45,1%	0,148
Gamma	ACCEPT	44,7%	0,148
Pearson III	ACCEPT	52,2%	0,139
EV1-Max (Gumbel)	ACCEPT	40,6%	0,153

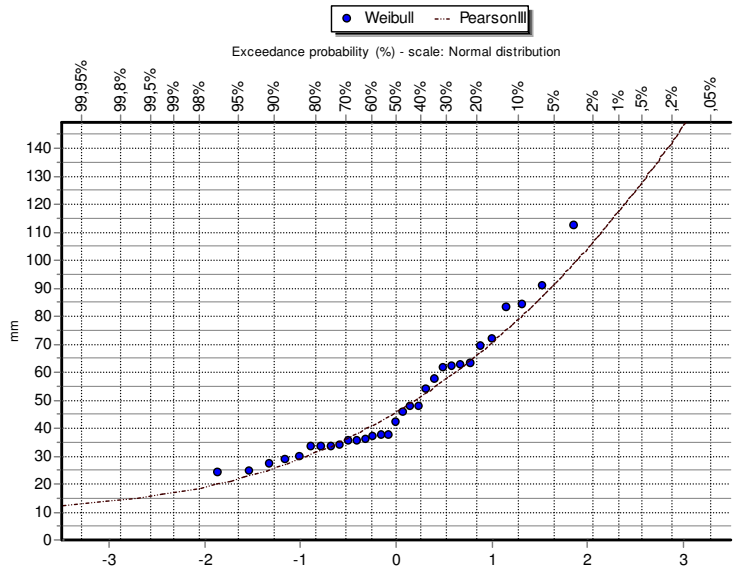


Fig.A3a. Test K-S, Modelo EC-Earth3-Veg-LR, SSP1-2.6 [2020-2050].

Test Kolmogorov-Smirnov	a=5%	Obtuvo un	DMax
Normal	ACCEPT	89,2%	0,097
LogNormal	ACCEPT	89,7%	0,096
Gamma	ACCEPT	99,8%	0,064
Pearson III	ACCEPT	99,9%	0,060
EV1-Max (Gumbel)	ACCEPT	98,6%	0,075

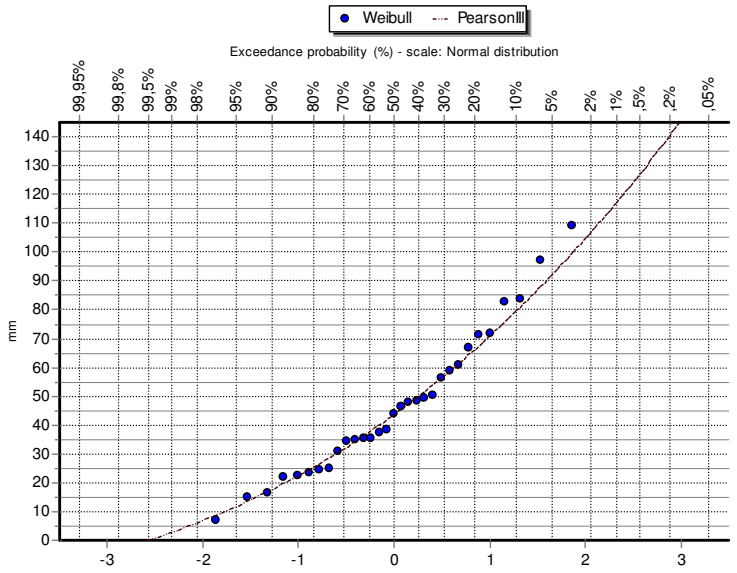


Fig.A3b. Test K-S, Modelo EC-Earth3-Veg-LR, SSP1-2.6 [2068-2098].

Test Kolmogorov-Smirnov	a=5%	Obtuvo un	DMax
Normal	ACCEPT	77,7%	0,112
LogNormal	ACCEPT	46,4%	0,146
Gamma	ACCEPT	80,5%	0,108
Pearson III	ACCEPT	91,6%	0,093
EV1-Max (Gumbel)	ACCEPT	76,1%	0,113

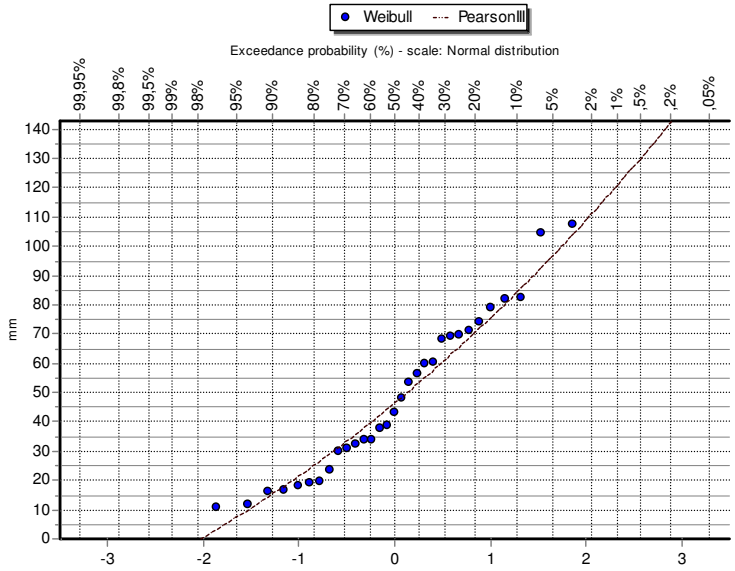


Fig.A4a. Test K-S, Modelo CMCC-CM2-SR5, SSP1-2.6 [2020-2050].

Test Kolmogorov-Smirnov	a=5%	Obtuvo un	DMax
Normal	ACCEPT	99,8%	0,063
LogNormal	ACCEPT	53,7%	0,138
Gamma	ACCEPT	76,1%	0,113
Pearson III	ACCEPT	97,3%	0,080
EV1-Max (Gumbel)	ACCEPT	58,6%	0,132

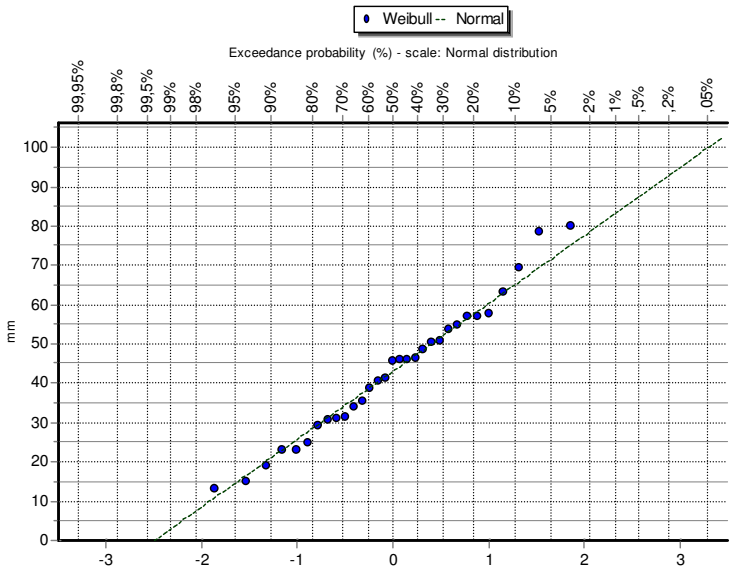


Fig.A4b. Test K-S, Modelo CMCC-CM2-SR5, SSP1-2.6 [2068-2098].

Test Kolmogorov-Smirnov	a=5%	Obtuvo un	DMax
Normal	ACCEPT	80,6%	0,108
LogNormal	ACCEPT	70,9%	0,119
Gamma	ACCEPT	84,8%	0,103
Pearson III	ACCEPT	80,6%	0,108
EV1-Max (Gumbel)	ACCEPT	63,4%	0,127

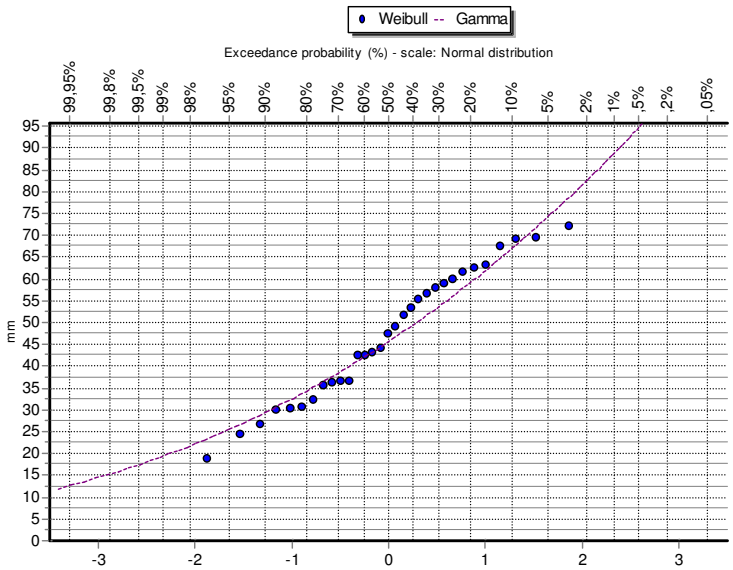


Fig.A5a. Test K-S, Modelo ACCESS-ESM1-5, SSP1-2.6 [2020-2050].

Test Kolmogorov-Smirnov	a=5%	Obtuvo un	DMax
Normal	ACCEPT	86,2%	0,101
LogNormal	ACCEPT	78,2%	0,111
Gamma	ACCEPT	90,4%	0,095
Pearson III	ACCEPT	87,3%	0,100
EV1-Max (Gumbel)	ACCEPT	87,0%	0,100

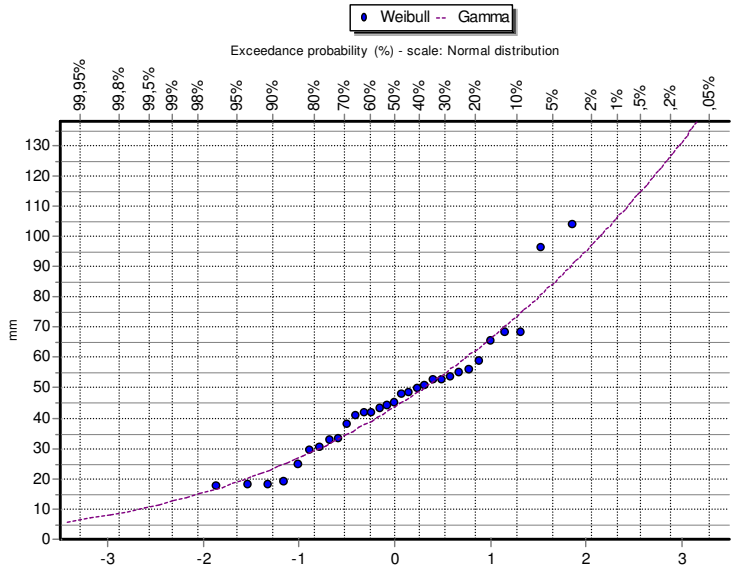


Fig.A5b. Test K-S, Modelo ACCESS-ESM1-5, SSP1-2.6 [2068-2098].

Test Kolmogorov-Smirnov	a=5%	Obtuvo un	DMax
Normal	ACCEPT	68,8%	0,121
LogNormal	ACCEPT	76,2%	0,113
Gamma	ACCEPT	94,2%	0,088
Pearson III	ACCEPT	95,6%	0,085
EV1-Max (Gumbel)	ACCEPT	91,1%	0,094

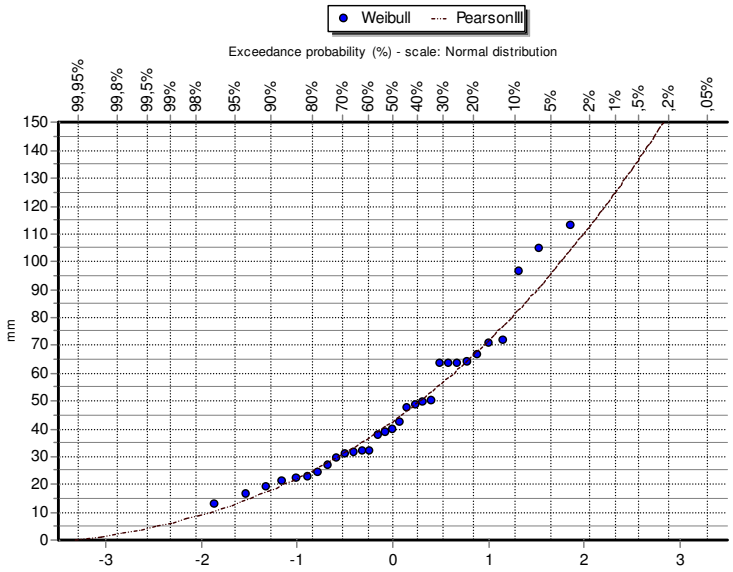


Fig.A6a. Test K-S, Modelo MPI-ESM1-2-LR, SSP2-4.5 [2020-2050].

Test Kolmogorov-Smirnov	a=5%	Obtuvo un	DMax
Normal	ACCEPT	85,0%	0,103
LogNormal	ACCEPT	79,8%	0,109
Gamma	ACCEPT	90,8%	0,094
Pearson III	ACCEPT	93,5%	0,090
EV1-Max (Gumbel)	ACCEPT	75,4%	0,114

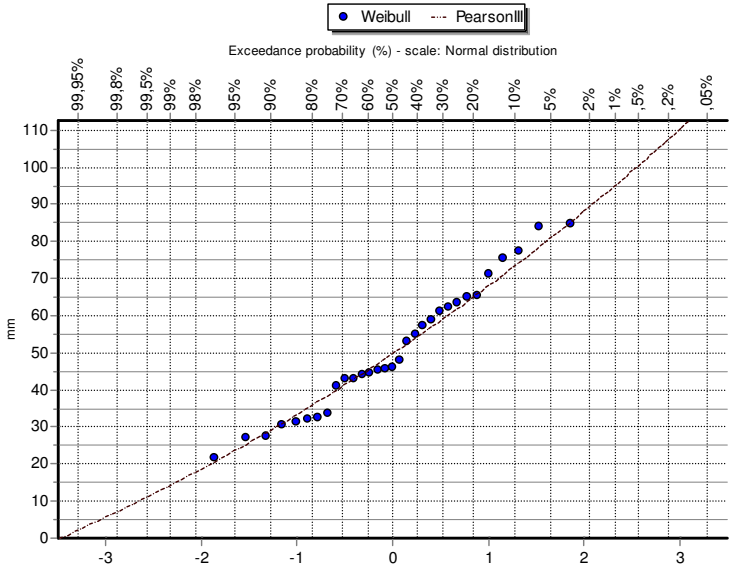


Fig.A6b. Test K-S, Modelo MPI-ESM1-2-LR, SSP2-4.5 [2068-2098].

Test Kolmogorov-Smirnov	a=5%	Obtuvo un	DMax
Normal	ACCEPT	95,3%	0,086
LogNormal	ACCEPT	71,3%	0,119
Gamma	ACCEPT	92,2%	0,092
Pearson III	ACCEPT	99,8%	0,063
EV1-Max (Gumbel)	ACCEPT	87,3%	0,100

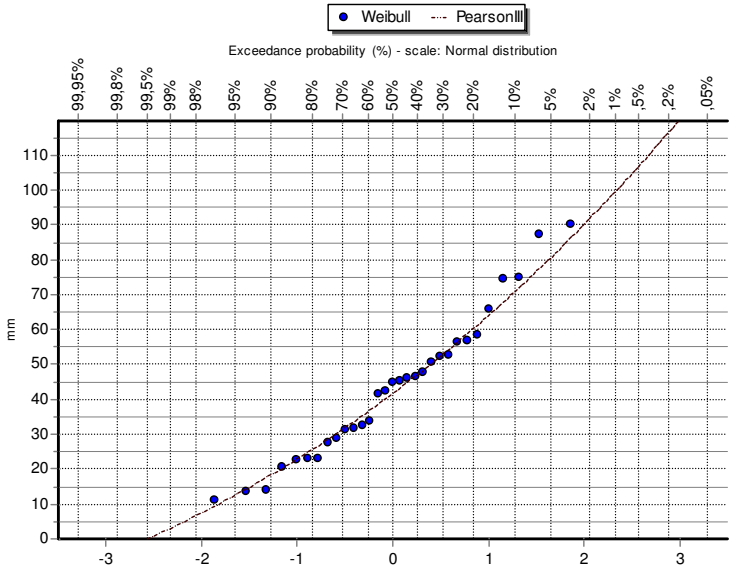


Fig.A7a. Test K-S, Modelo GFDL-ESM4, SSP2-4.5 [2020-2050].

Test Kolmogorov-Smirnov	a=5%	Obtuvo un	DMax
Normal	ACCEPT	80,2%	0,109
LogNormal	ACCEPT	89,7%	0,096
Gamma	ACCEPT	99,7%	0,064
Pearson III	ACCEPT	97,1%	0,081
EV1-Max (Gumbel)	ACCEPT	98,5%	0,075

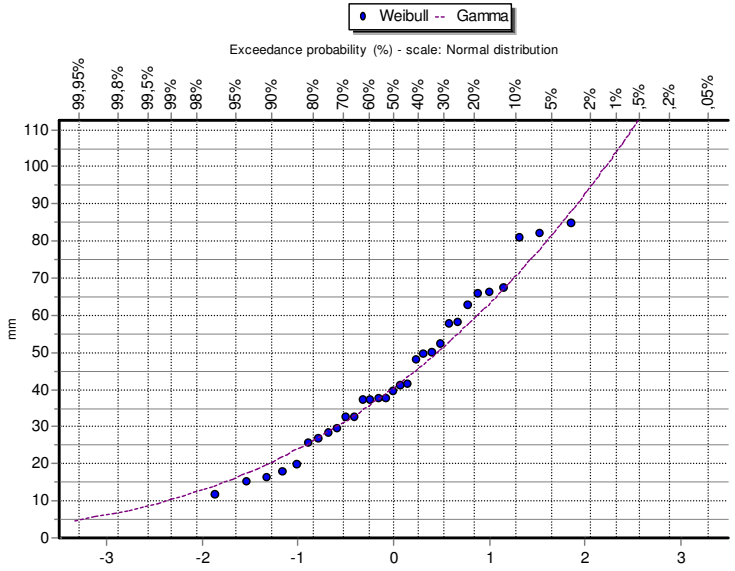


Fig.A7b. Test K-S, Modelo GFDL-ESM4, SSP2-4.5 [2068-2098].

Test Kolmogorov-Smirnov	a=5%	Obtuvo un	DMax
Normal	ACCEPT	14,8%	0,198
LogNormal	ACCEPT	84,4%	0,104
Gamma	ACCEPT	62,4%	0,128
Pearson III	ACCEPT	96,5%	0,083
EV1-Max (Gumbel)	ACCEPT	60,5%	0,130

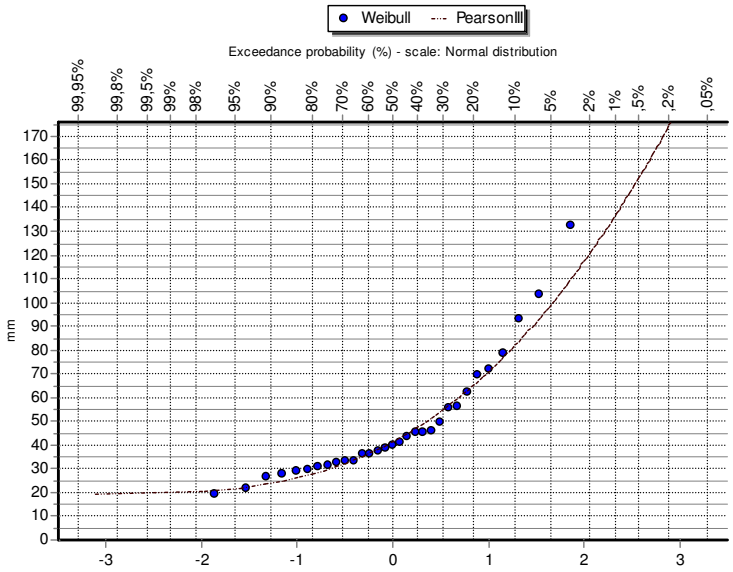


Fig.A8a. Test K-S, Modelo EC-Earth3-Veg-LR, SSP2-4.5 [2020-2050].

Test Kolmogorov-Smirnov	a=5%	Obtuvo un	DMax
Normal	ACCEPT	88,4%	0,098
LogNormal	ACCEPT	83,8%	0,104
Gamma	ACCEPT	97,6%	0,079
Pearson III	ACCEPT	97,3%	0,080
EV1-Max (Gumbel)	ACCEPT	91,2%	0,094

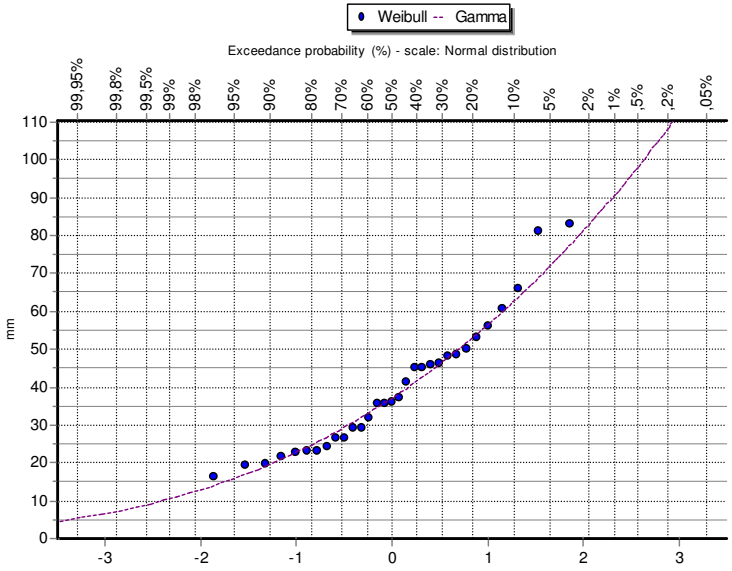


Fig.A8b. Test K-S, Modelo EC-Earth3-Veg-LR, SSP2-4.5 [2068-2098].

Test Kolmogorov-Smirnov	a=5%	Obtuvo un	DMax
Normal	ACCEPT	91,0%	0,094
LogNormal	ACCEPT	78,3%	0,111
Gamma	ACCEPT	98,0%	0,078
Pearson III	ACCEPT	98,2%	0,077
EV1-Max (Gumbel)	ACCEPT	94,2%	0,088

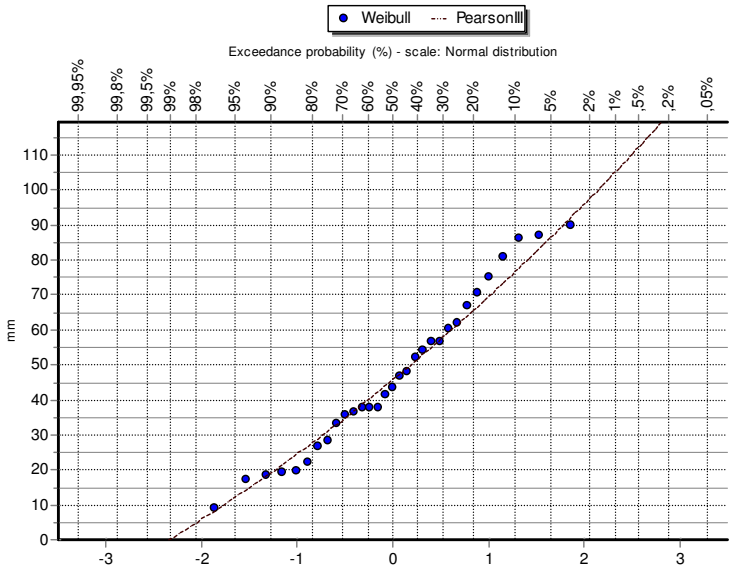


Fig.A9a. Test K-S, Modelo CMCC-CM2-SR5, SSP2-4.5 [2020-2050].

Test Kolmogorov-Smirnov	a=5%	Obtuvo un	DMax
Normal	ACCEPT	64,1%	0,126
LogNormal	ACCEPT	79,6%	0,109
Gamma	ACCEPT	96,4%	0,083
Pearson III	ACCEPT	97,2%	0,081
EV1-Max (Gumbel)	ACCEPT	91,5%	0,093

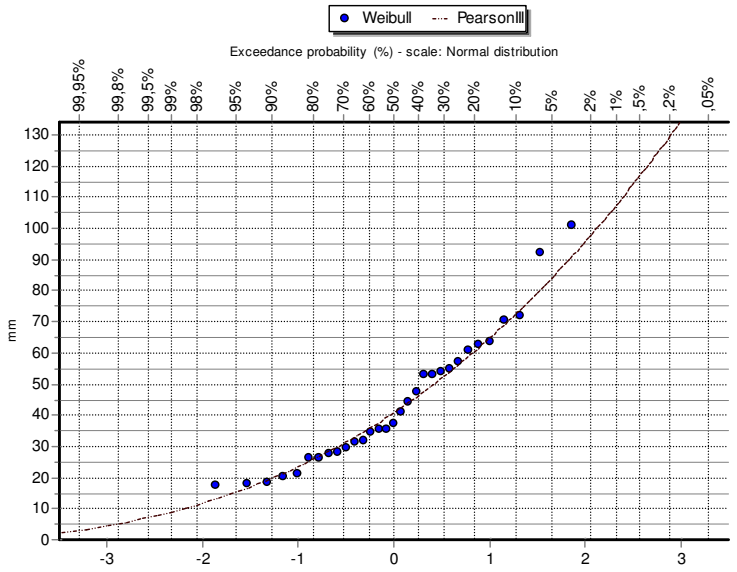


Fig.A9b. Test K-S, Modelo CMCC-CM2-SR5, SSP2-4.5 [2068-2098].

Test Kolmogorov-Smirnov	a=5%	Obtuvo un	DMax
Normal	ACCEPT	32,6%	0,164
LogNormal	ACCEPT	97,6%	0,079
Gamma	ACCEPT	95,7%	0,085
Pearson III	ACCEPT	97,8%	0,078
EV1-Max (Gumbel)	ACCEPT	89,9%	0,096

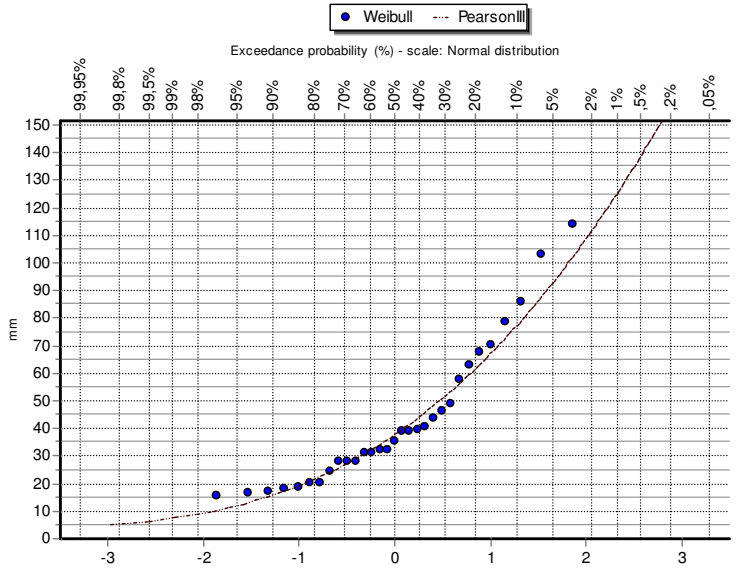


Fig.A10a. Test K-S, Modelo ACCESS-ESM1-5, SSP2-4.5 [2020-2050].

Test Kolmogorov-Smirnov	a=5%	Obtuvo un	DMax
Normal	ACCEPT	46,9%	0,145
LogNormal	ACCEPT	97,0%	0,081
Gamma	ACCEPT	97,1%	0,081
Pearson III	ACCEPT	99,5%	0,068
EV1-Max (Gumbel)	ACCEPT	95,8%	0,085

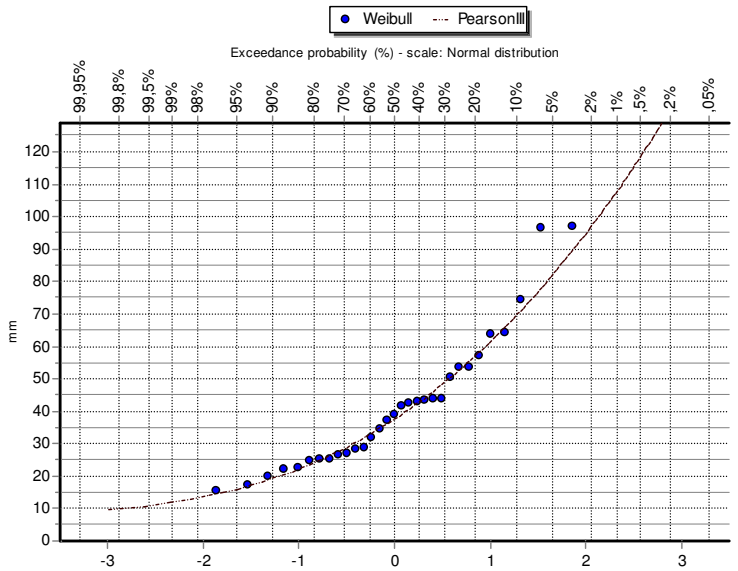


Fig.A10b. Test K-S, Modelo ACCESS-ESM1-5, SSP2-4.5 [2068-2098].

Test Kolmogorov-Smirnov	a=5%	Obtuvo un	DMax
Normal	ACCEPT	97,8%	0,078
LogNormal	ACCEPT	78,9%	0,110
Gamma	ACCEPT	99,6%	0,067
Pearson III	ACCEPT	99,9%	0,062
EV1-Max (Gumbel)	ACCEPT	98,6%	0,075

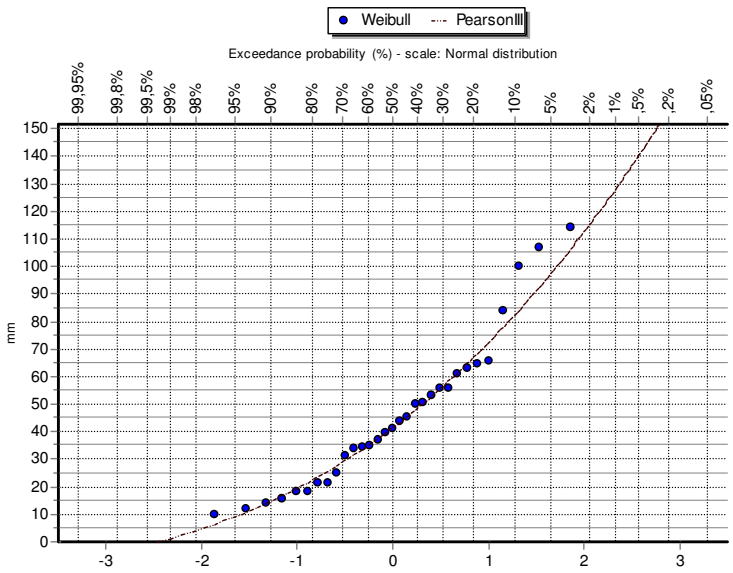


Fig.A11a. Test K-S, Modelo MPI-ESM1-2-LR, SSP3-7.0 [2020-2050].

Test Kolmogorov-Smirnov	a=5%	Obtuvo un	DMax
Normal	ACCEPT	78,6%	0,111
LogNormal	ACCEPT	95,1%	0,086
Gamma	ACCEPT	99,9%	0,062
Pearson III	ACCEPT	97,3%	0,080
EV1-Max (Gumbel)	ACCEPT	100,0%	0,048

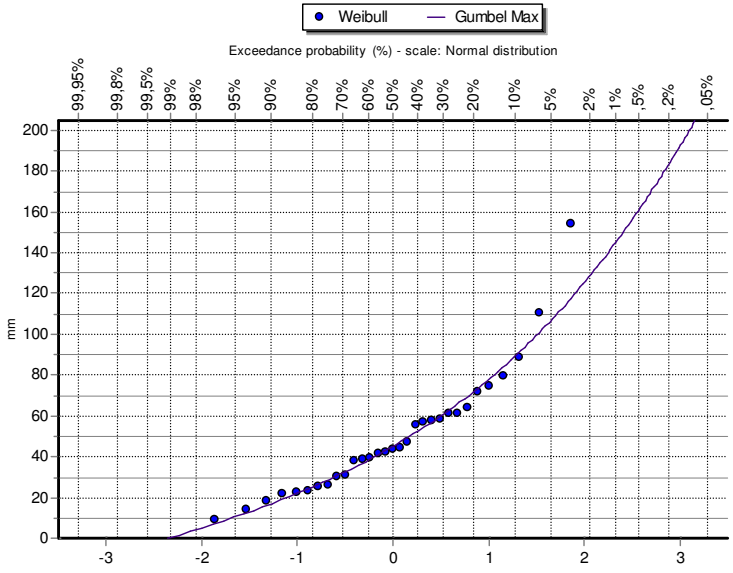


Fig.A11b. Test K-S, Modelo MPI-ESM1-2-LR, SSP3-7.0 [2068-2098].

Test Kolmogorov-Smirnov	a=5%	Obtuvo un	DMax
Normal	ACCEPT	84,3%	0,104
LogNormal	ACCEPT	97,0%	0,081
Gamma	ACCEPT	100,0%	0,053
Pearson III	ACCEPT	100,0%	0,052
EV1-Max (Gumbel)	ACCEPT	99,6%	0,067

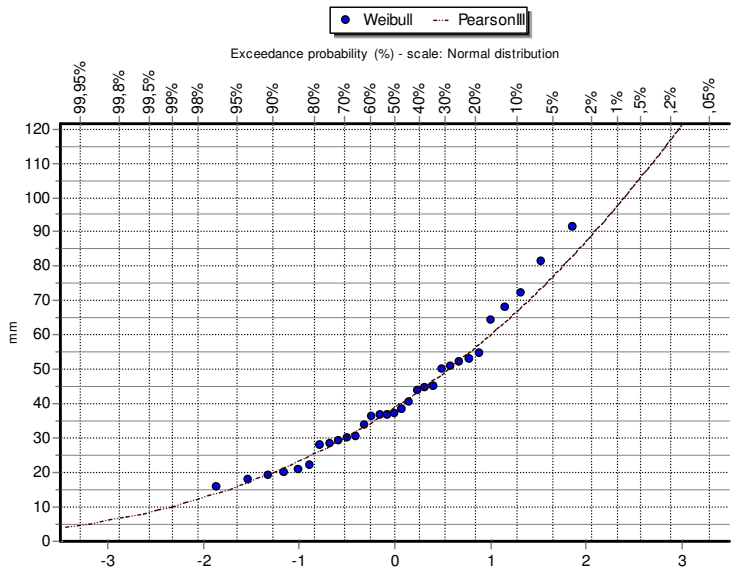


Fig.A12a. Test K-S, Modelo GFDL-ESM4, SSP3-7.0 [2020-2050].

Test Kolmogorov-Smirnov	a=5%	Obtuvo un	DMax
Normal	ACCEPT	99,3%	0,070
LogNormal	ACCEPT	59,3%	0,132
Gamma	ACCEPT	82,3%	0,106
Pearson III	ACCEPT	99,2%	0,071
EV1-Max (Gumbel)	ACCEPT	68,9%	0,121

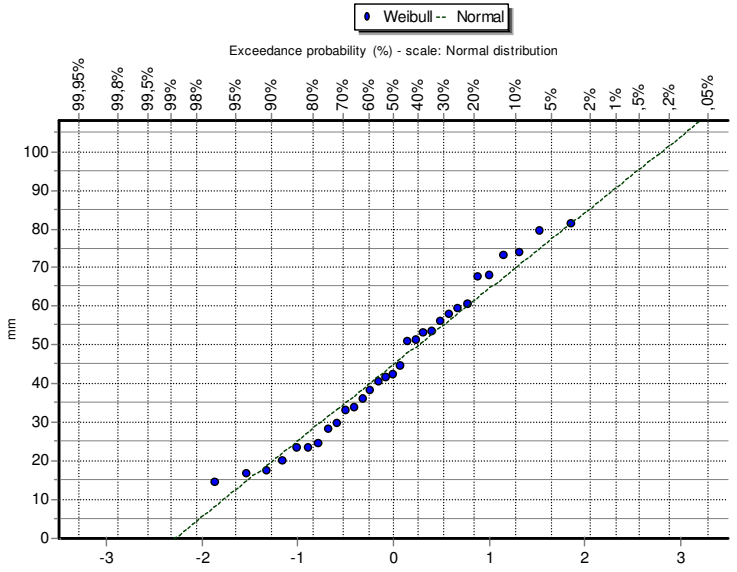


Fig.A12b. Test K-S, Modelo GFDL-ESM4, SSP3-7.0 [2068-2098].

Test Kolmogorov-Smirnov	a=5%	Obtuvo un	DMax
Normal	ACCEPT	16,9%	0,193
LogNormal	ACCEPT	75,2%	0,114
Gamma	ACCEPT	53,4%	0,138
Pearson III	ACCEPT	64,2%	0,126
EV1-Max (Gumbel)	ACCEPT	67,6%	0,123

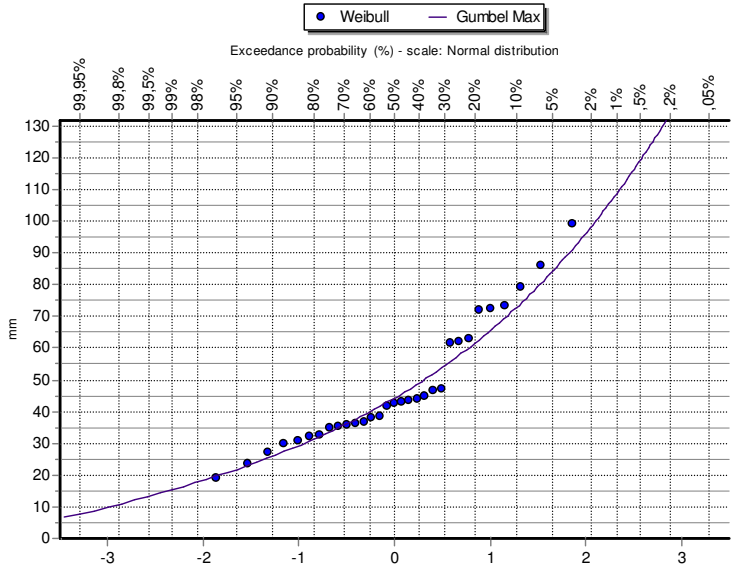


Fig.A13a. Test K-S, Modelo EC-Earth3-Veg-LR, SSP3-7.0 [2020-2050].

Test Kolmogorov-Smirnov	a=5%	Obtuvo un	DMax
Normal	ACCEPT	97,2%	0,081
LogNormal	ACCEPT	30,0%	0,168
Gamma	ACCEPT	50,2%	0,142
Pearson III	ACCEPT	84,2%	0,104
EV1-Max (Gumbel)	ACCEPT	42,1%	0,151

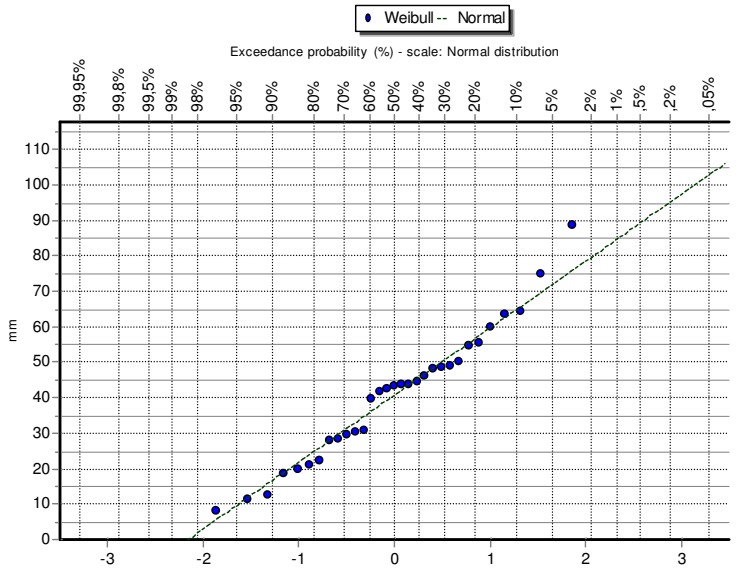


Fig.A13b. Test K-S, Modelo EC-Earth3-Veg-LR, SSP3-7.0 [2068-2098].

Test Kolmogorov-Smirnov	a=5%	Obtuvo un	DMax
Normal	ACCEPT	70,8%	0,119
LogNormal	ACCEPT	98,8%	0,074
Gamma	ACCEPT	100,0%	0,047
Pearson III	ACCEPT	100,0%	0,049
EV1-Max (Gumbel)	ACCEPT	100,0%	0,057

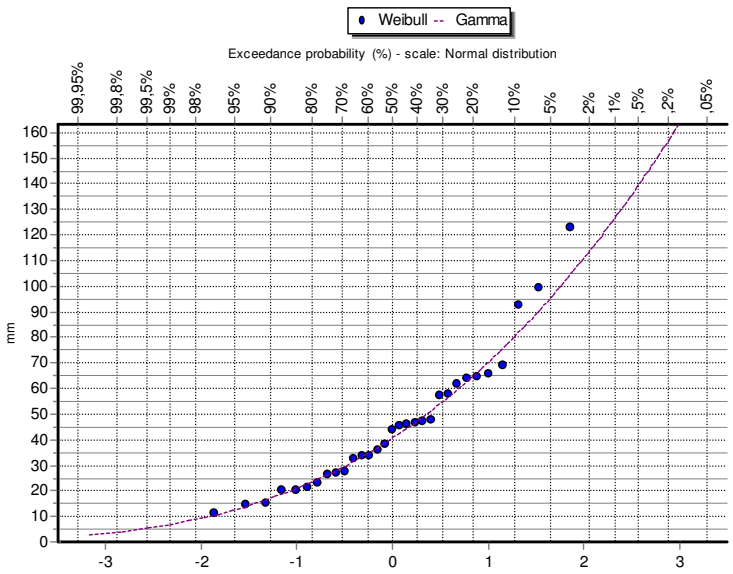


Fig.A14a. Test K-S, Modelo CMCC-CM2-SR5, SSP3-7.0 [2020-2050].

Test Kolmogorov-Smirnov	a=5%	Obtuvo un	DMax
Normal	ACCEPT	62,2%	0,128
LogNormal	ACCEPT	84,9%	0,103
Gamma	ACCEPT	98,5%	0,076
Pearson III	ACCEPT	96,3%	0,083
EV1-Max (Gumbel)	ACCEPT	96,8%	0,082

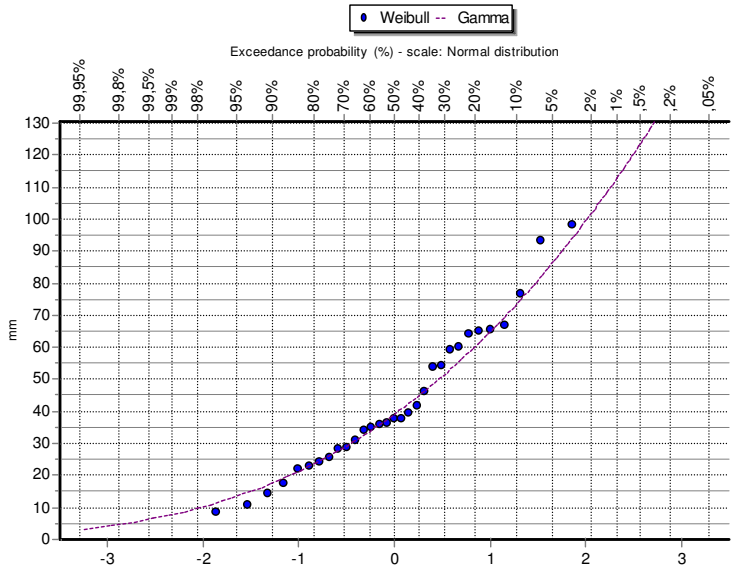


Fig.A14b. Test K-S, Modelo CMCC-CM2-SR5, SSP3-7.0 [2068-2098].

Test Kolmogorov-Smirnov	a=5%	Obtuvo un	DMax
Normal	ACCEPT	99,8%	0,062
LogNormal	ACCEPT	73,1%	0,117
Gamma	ACCEPT	88,0%	0,099
Pearson III	ACCEPT	91,6%	0,093
EV1-Max (Gumbel)	ACCEPT	64,3%	0,126

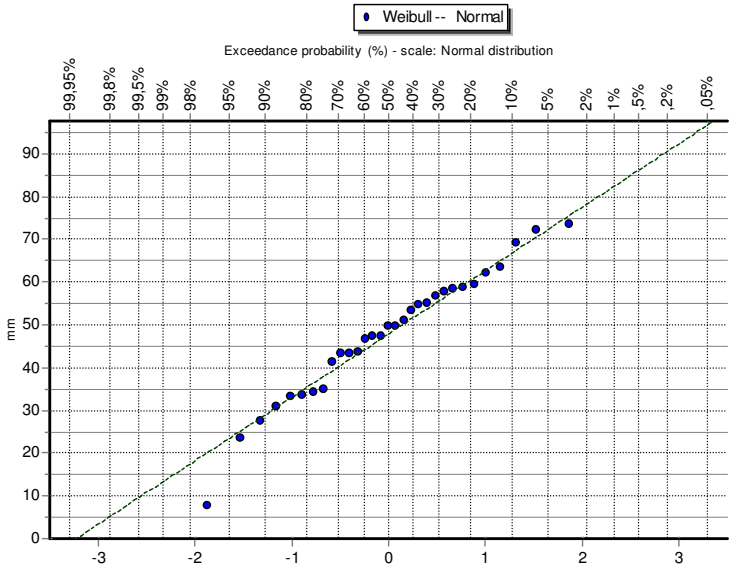


Fig.A15a. Test K-S, Modelo ACCESS-ESM1-5, SSP3-7.0 [2020-2050].

Test Kolmogorov-Smirnov	a=5%	Obtuvo un	DMax
Normal	ACCEPT	29,9%	0,168
LogNormal	ACCEPT	83,7%	0,104
Gamma	ACCEPT	84,1%	0,104
Pearson III	ACCEPT	81,8%	0,107
EV1-Max (Gumbel)	ACCEPT	77,9%	0,111

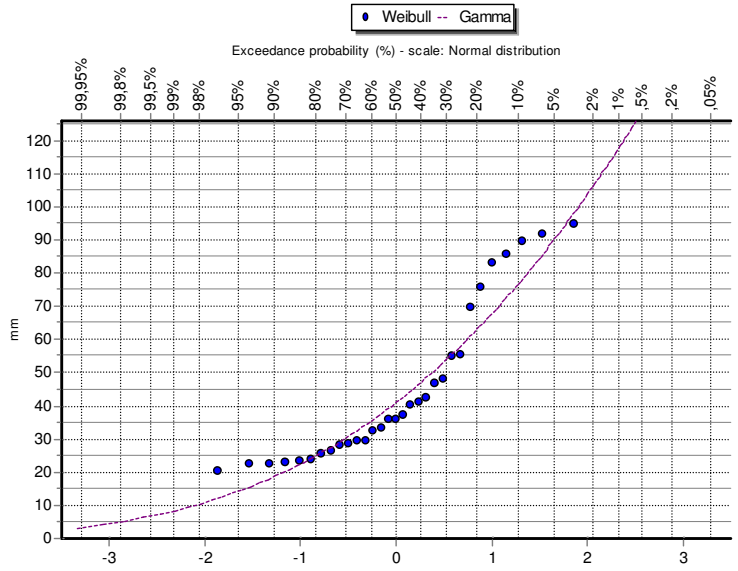


Fig.A15b. Test K-S, Modelo ACCESS-ESM1-5, SSP3-7.0 [2068-2098].

Test Kolmogorov-Smirnov	a=5%	Obtuvo un	DMax
Normal	ACCEPT	66,8%	0,123
LogNormal	ACCEPT	100,0%	0,051
Gamma	ACCEPT	98,2%	0,077
Pearson III	ACCEPT	100,0%	0,048
EV1-Max (Gumbel)	ACCEPT	99,7%	0,065

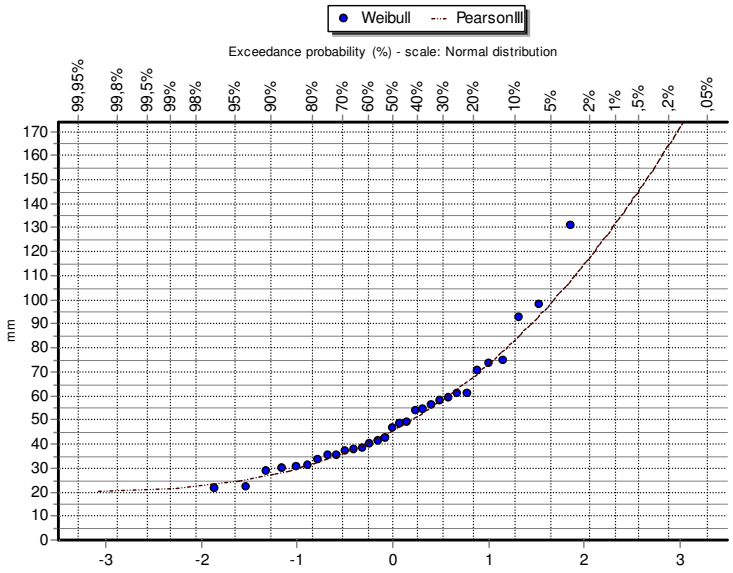


Fig.A16a. Test K-S, Modelo MPI-ESM1-2-LR, SSP5-8.5 [2020-2050].

Test Kolmogorov-Smirnov	a=5%	Obtuvo un	DMax
Normal	ACCEPT	76,5%	0,113
LogNormal	ACCEPT	96,1%	0,084
Gamma	ACCEPT	99,6%	0,067
Pearson III	ACCEPT	95,8%	0,085
EV1-Max (Gumbel)	ACCEPT	98,0%	0,078

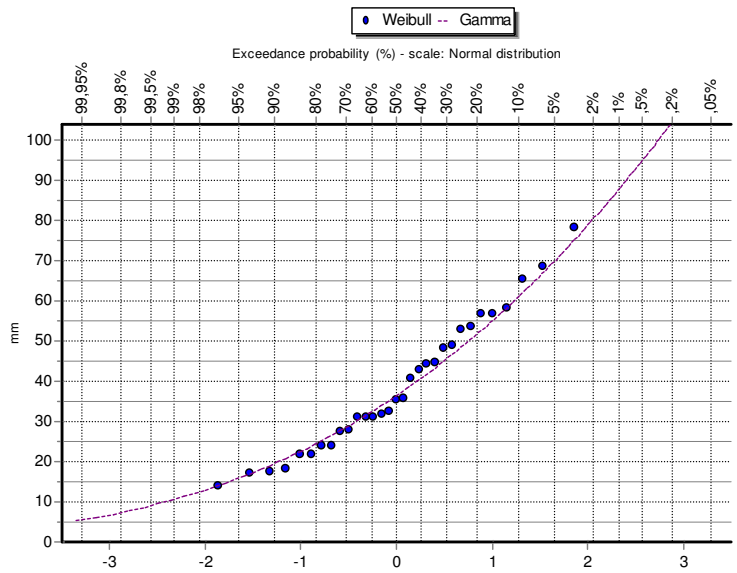


Fig.A16b. Test K-S, Modelo MPI-ESM1-2-LR, SSP5-8.5 [2068-2098].

Test Kolmogorov-Smirnov	a=5%	Obtuvo un	DMax
Normal	ACCEPT	99,9%	0,060
LogNormal	ACCEPT	63,5%	0,127
Gamma	ACCEPT	84,2%	0,104
Pearson III	ACCEPT	99,9%	0,060
EV1-Max (Gumbel)	ACCEPT	65,5%	0,125

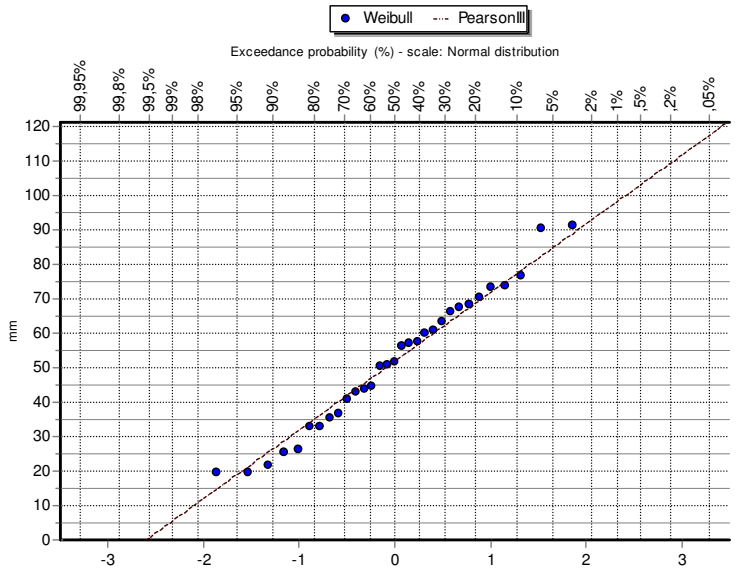


Fig.A17a. Test K-S, Modelo GFDL-ESM4, SSP5-8.5 [2020-2050].

Test Kolmogorov-Smirnov	a=5%	Obtuvo un	DMax
Normal	ACCEPT	69,9%	0,120
LogNormal	ACCEPT	81,5%	0,107
Gamma	ACCEPT	92,7%	0,091
Pearson III	ACCEPT	83,1%	0,105
EV1-Max (Gumbel)	ACCEPT	83,6%	0,105

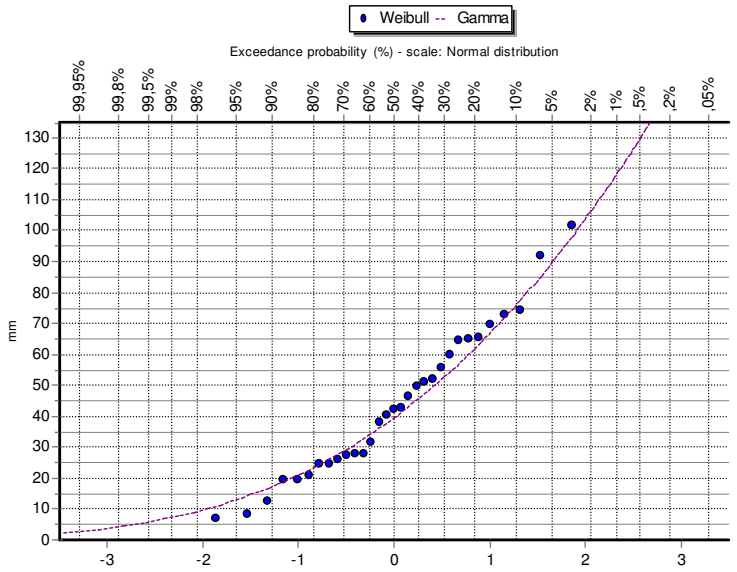


Fig.A17b. Test K-S, Modelo GFDL-ESM4, SSP5-8.5 [2068-2098].

Test Kolmogorov-Smirnov	a=5%	Obtuvo un	DMax
Normal	ACCEPT	99,8%	0,062
LogNormal	ACCEPT	60,8%	0,130
Gamma	ACCEPT	83,4%	0,105
Pearson III	ACCEPT	97,2%	0,081
EV1-Max (Gumbel)	ACCEPT	68,5%	0,122

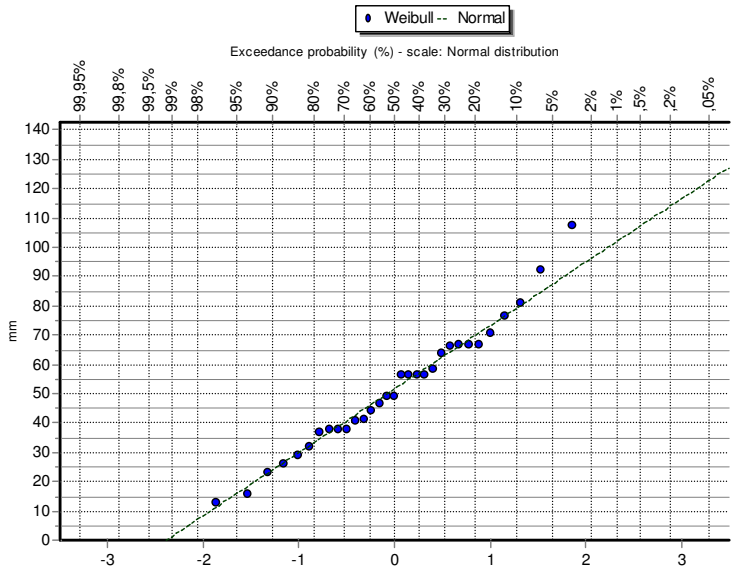


Fig.A18a. Test K-S, Modelo EC-Earth3-Veg-LR, SSP5-8.5 [2020-2050].

Test Kolmogorov-Smirnov	a=5%	Obtuvo un	DMax
Normal	ACCEPT	93,5%	0,090
LogNormal	ACCEPT	73,5%	0,116
Gamma	ACCEPT	96,3%	0,083
Pearson III	ACCEPT	98,1%	0,077
EV1-Max (Gumbel)	ACCEPT	98,2%	0,077

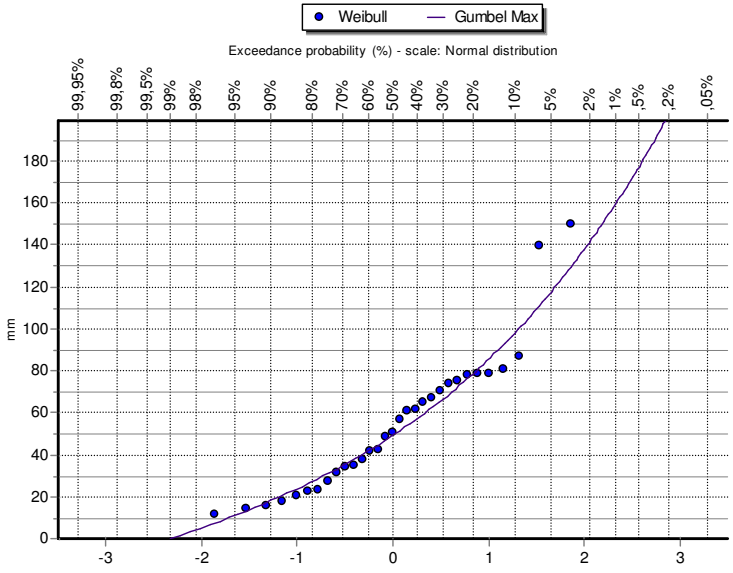


Fig.A18b. Test K-S, Modelo EC-Earth3-Veg-LR, SSP5-8.5 [2068-2098].

Test Kolmogorov-Smirnov	a=5%	Obtuvo un	DMax
Normal	ACCEPT	78,4%	0,111
LogNormal	ACCEPT	99,3%	0,070
Gamma	ACCEPT	99,5%	0,068
Pearson III	ACCEPT	97,5%	0,080
EV1-Max (Gumbel)	ACCEPT	99,4%	0,069

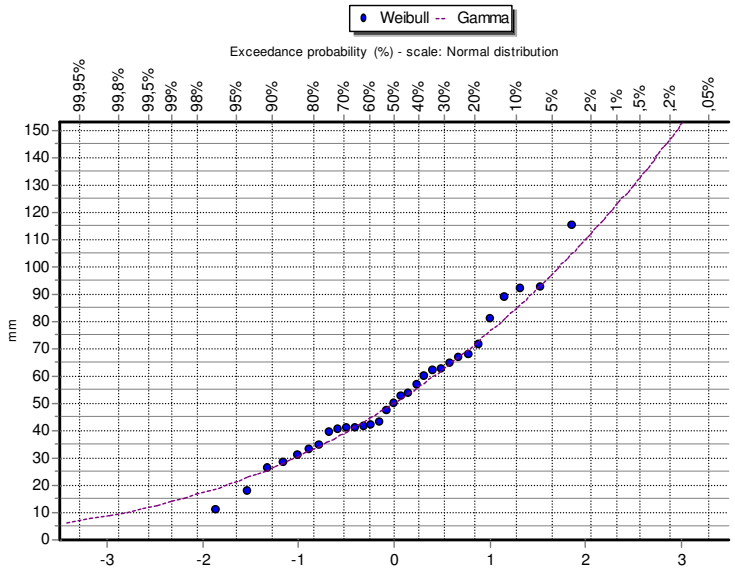


Fig.A19a. Test K-S, Modelo CMCC-CM2-SR5, SSP5-8.5 [2020-2050].

Test Kolmogorov-Smirnov	a=5%	Obtuvo un	DMax
Normal	ACCEPT	70,4%	0,120
LogNormal	ACCEPT	24,8%	0,177
Gamma	ACCEPT	40,5%	0,153
Pearson III	ACCEPT	51,4%	0,140
EV1-Max (Gumbel)	ACCEPT	26,8%	0,173

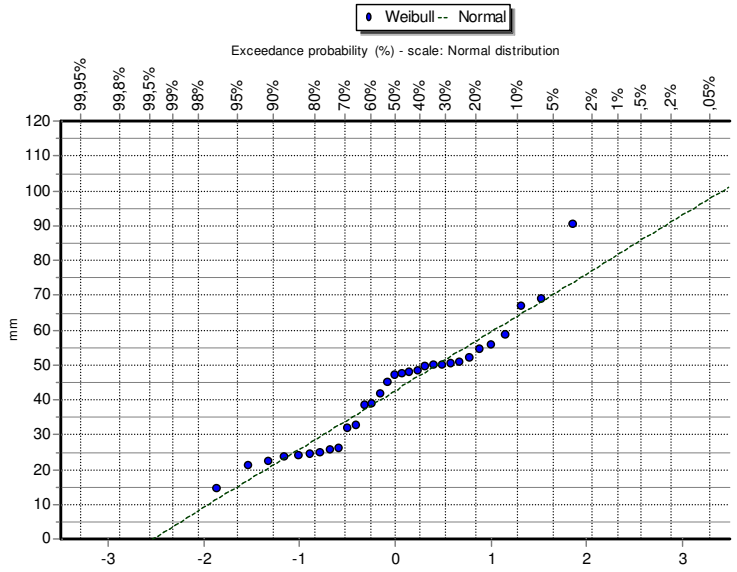


Fig.A19b. Test K-S, Modelo CMCC-CM2-SR5, SSP5-8.5 [2068-2098].

Test Kolmogorov-Smirnov	a=5%	Obtuvo un	DMax
Normal	ACCEPT	91,5%	0,093
LogNormal	ACCEPT	89,6%	0,096
Gamma	ACCEPT	99,5%	0,068
Pearson III	ACCEPT	99,7%	0,066
EV1-Max (Gumbel)	ACCEPT	96,7%	0,082

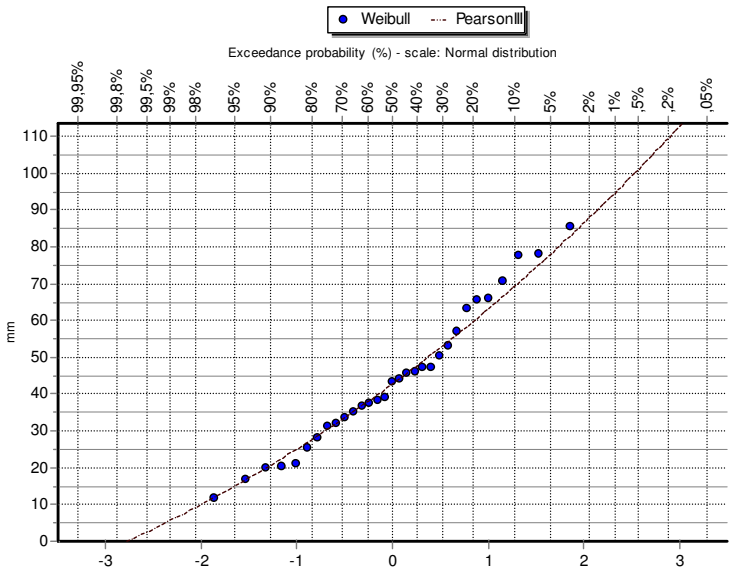


Fig.A20a. Test K-S, Modelo ACCESS-ESM1-5, SSP5-8.5 [2020-2050].

Test Kolmogorov-Smirnov	a=5%	Obtuvo un	DMax
Normal	ACCEPT	97,2%	0,080
LogNormal	ACCEPT	97,2%	0,080
Gamma	ACCEPT	100,0%	0,051
Pearson III	ACCEPT	100,0%	0,046
EV1-Max (Gumbel)	ACCEPT	99,9%	0,061

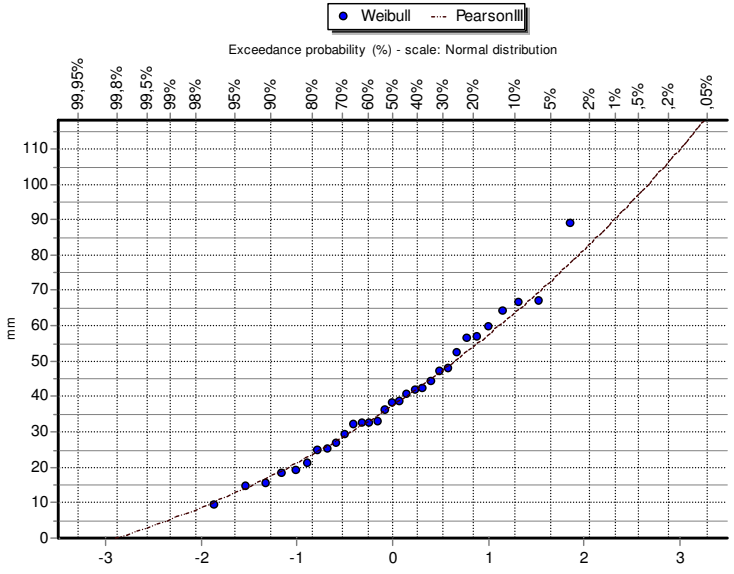


Fig.A20b. Test K-S, Modelo ACCESS-ESM1-5, SSP5-8.5 [2068-2098].