

**SOCIEDAD CHILENA DE INGENIERÍA HIDRÁULICA**  
**XXVI CONGRESO CHILENO DE INGENIERÍA HIDRÁULICA**

**PROYECCIÓN DE PRECIPITACIONES MÁXIMAS Y PRECIPITACIÓN MÁXIMA  
PROBABLE PARA RAPA NUI, ESCENARIOS SSP 2-4,5 Y 5-8,5**

**IGNACIO TORO MENA<sup>1</sup>**  
**HERNÁN MORALES JAMETT<sup>2</sup>**  
**CAMILA LOYOLA VIDAL<sup>3</sup>**  
**CRISTIÁN CHADWICK IRARRÁZAVAL<sup>4</sup>**

**RESUMEN**

Rapa Nui es la isla habitada más aislada del planeta, ubicada en medio del Pacífico Sur y al poseer un área reducida sin cursos de agua superficial permanente, la preocupación por el abastecimiento de agua fresca ha sido una inquietud permanente desde que fue descubierta, dejando en segundo plano la preocupación por el desarrollo de medidas adaptativas relacionadas con eventos extremos de precipitación. Se evalúa el potencial efecto del cambio climático sobre la precipitación máxima y Máxima Probable (PMP) para 24 y 72 horas utilizando 31 modelos globales climáticos (GCM por sus siglas en inglés) bajo dos escenarios de concentraciones de gases de efecto invernadero o trayectorias socioeconómicas compartidas (SSP por su sigla en inglés) 2-4,5 y 5-8,5. Las series de precipitaciones máximas de los GCM's se han corregido con el método Unbiased Quantile Mapping (UQM), evaluando los periodos de retorno futuros a través de análisis de frecuencia y la PMP con la fórmula modificada de Stöwhas ( $K=11$ ) a partir de las series corregidas. Se proyecta consistentemente un aumento en la magnitud de los eventos de precipitación extrema. Se destaca la idoneidad de este tipo de metodologías aplicadas a escala local, incorporando la no estacionariedad de la hidrología en la toma de decisiones relacionadas a adaptación al cambio climático, especialmente en sistemas de alta vulnerabilidad como Rapa Nui.

---

<sup>1</sup>Hidrólogo esp. en cambio climático, Mine Water, WSP Chile – [ignacio.toro@wsp.com](mailto:ignacio.toro@wsp.com), [toromena@hotmail.com](mailto:toromena@hotmail.com)

<sup>2</sup>Hidrólogo, Mine Water, WSP Chile – [hernan.morales@wsp.com](mailto:hernan.morales@wsp.com)

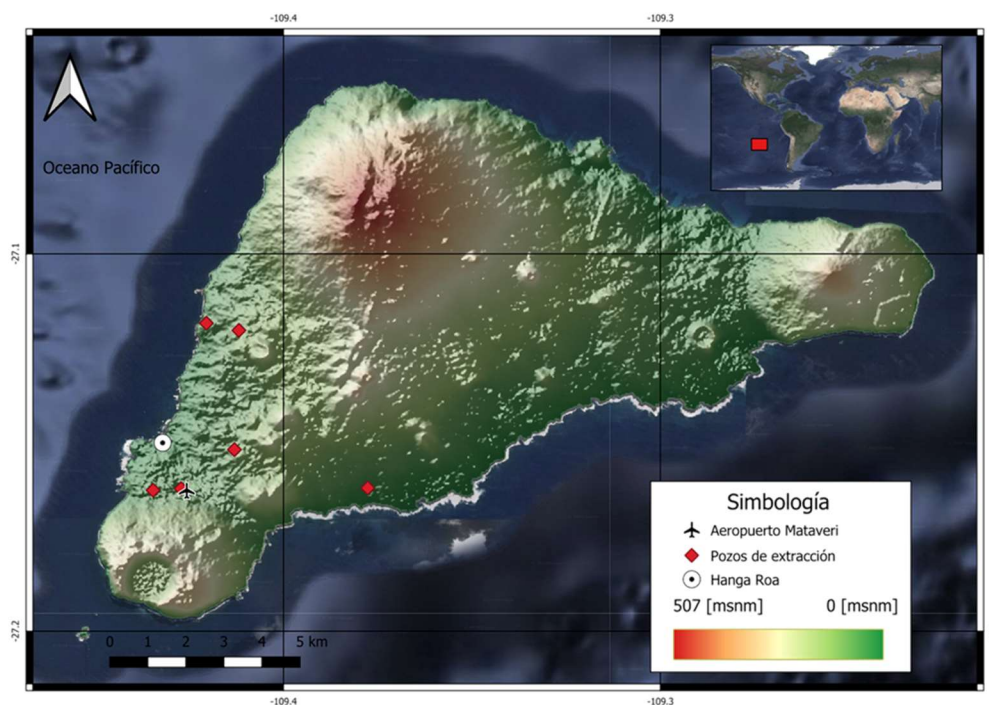
<sup>3</sup>Hidróloga, Mine Water, WSP Chile – [camila.loyola@wsp.com](mailto:camila.loyola@wsp.com)

<sup>4</sup>Profesor Asistente, Facultad de Ingeniería y Ciencias, Universidad Adolfo Ibáñez – [cristian.chadwick@uai.cl](mailto:cristian.chadwick@uai.cl)

## 1. INTRODUCCIÓN

La preocupación por el efecto del cambio climático sobre los eventos hidrológicos extremos aumenta cada vez más. En el caso de Rapa Nui, por tratarse de una isla con un área reducida y sin cursos de agua superficial permanente, la preocupación por el abastecimiento de agua fresca para el consumo humano, ganadería y agricultura ha sido una inquietud permanente desde que fue descubierta por sus primeros habitantes (DGA, 2010). Esto ha dejado en segundo plano el desarrollo de medidas adaptativas relacionadas con eventos extremos de precipitación.

Rapa Nui es la isla habitada más aislada del planeta (Markham et al., 2016), ubicada en medio del Pacífico Sur posee una superficie de 166 km<sup>2</sup> (Figura 1) y de acuerdo con Gatica y Toro (2020) presenta una precipitación media anual del orden de 1.150 mm y una temperatura media anual de 20,6 °C.



**Figura 1.** Ubicación general y puntos de interés – Rapa Nui (Gatica & Toro, 2020)

La situación de vulnerabilidad de la isla de Rapa Nui bajo aspectos como seguridad hídrica, degradación de la costa, entre otros, se encuentra ampliamente documentada y analizada (Milad, 2010), (Quilliam et al., 2014), (Markham et al., 2016). También se ha estudiado las proyecciones de cambio climático relacionadas con la caracterización de sequías, por Gatica y Toro (2020). A nivel nacional, lo que incluye a Rapa Nui, se cuenta con estimaciones históricas y futuras de distintas variables hidrológicas en el marco de la Actualización del Balance Hídrico Nacional (DGA, 2017).

Considerando que existe una carencia de análisis del impacto del cambio climático sobre eventos hidrológicos para la Isla de Rapa Nui, a excepción de estudios relacionados con degradación de la costa (Quilliam et al., 2014), disponibilidad hídrica y sequías (Gatica & Toro, 2020) y estimaciones desarrolladas para sólo 4 modelos y un escenario (RCP 8,5, ya desactualizado) por DGA (2017).

Debido a esto, surge la necesidad de analizar proyecciones en específico para Rapa Nui, basadas en una mayor cantidad de modelos de cambio climático (GCM por General Circulation Models) y para al menos dos escenarios de concentraciones futuras, con el fin de ser utilizadas como base para posibles medidas de adaptación que apunten a hacer frente a los cambios en precipitaciones, en especial para eventos extremos, en un sistema aislado como lo es esta isla, caracterizando apropiadamente la incertidumbre asociada al cambio climático.

El objetivo de este trabajo es calcular y caracterizar las proyecciones de precipitaciones extremas en Rapa Nui, razón por la cual se utilizan los registros de la estación meteorológica Mataveri, ubicada en el aeropuerto del mismo nombre (Figura 1). Dicha estación posee información de larga data (1948 a la fecha) la cual fue complementada con el producto de precipitación de la Actualización del Balance Hídrico Nacional (DGA, 2017) con el fin de completar el año 1990, debido a que no se cuenta con registros diarios para dicho año. En este estudio se analizarán las precipitaciones extremas para varios periodos de retorno, así como la Precipitación Máxima Probable para 24 y 72 horas.

Los resultados se presentan para dos horizontes temporales, mediano (2031-2060) y largo plazo (2071-2100), caracterizando las proyecciones de cambio climático a través de los percentiles 15, 25, 50, 75 y 85%, estimados a partir de las proyecciones de los 31 GCM utilizados en este estudio.

## **2. METODOLOGÍA**

La metodología empleada se resume en tres pasos descritos a continuación. En esta sección se da una explicación general de estos tres pasos metodológicos, para luego entregar más detalle sobre cómo se desarrolla cada uno:

1. Dado que las simulaciones de variables climáticas obtenidas desde los GCM (precipitaciones máximas en 24 y 72 horas) están afectadas por sesgos y operan a escalas mayores a las de los procesos climáticos a escala de la isla (~150 km), se requiere de un método de downscaling para corregirlas y escalarlas.
2. Luego, se estiman las precipitaciones máximas para diferentes periodos de retorno a través de análisis de frecuencias, seleccionando la distribución de probabilidad de mejor ajuste, así como también se calcula la Precipitación Máxima Probable (PMP). Para esto se utiliza, por simplificación, Hershfield (1965) con la consideración de Stöwahas (1983) con  $K=11$ , para cada horizonte temporal, modelo, escenario y duración, con la finalidad de caracterizar las proyecciones futuras para eventos extremos de precipitación.
3. Finalmente, se analizan los resultados obtenidos para las dos ventanas futuras de interés, mediano (2031-2060) y largo plazo (2071-2100), caracterizando la incertidumbre de las proyecciones para los percentiles de los GCM 15, 25, 50, 75 y 85%.

## **Datos**

### *Datos observados*

Para el proceso de escalamiento de las variables climáticas simuladas por los GCM, se requiere una estadística extensa y continua de datos observados, por lo cual se han considerado los registros de la estación Mataverí (ver Figura 1), a cargo de la Dirección Meteorológica de Chile, utilizando los registros de precipitaciones diarias dentro del periodo 1970-2022 por ser el más completo. En particular, el año 1990 no presenta registros, por lo que se utiliza el producto desarrollado por la DGA (2017) en la Actualización del Balance Hídrico Nacional para rellenar este año. Las máximas en 1 y 3 días registradas por Mataverí son transformadas a 24 y 72 horas a través de los factores de ajuste por muestreo recomendados por la WMO (2009), los que corresponden a 1,13 y 1,04.

### *Datos climáticos simulados por GCM*

Para este estudio se considera la base de datos NEX-GDDP-CMIP6 (Thrasher et al., 2021), la que cuenta con 31 GCM a escala diaria, desde 1950 hasta 2100. Estos GCMs corresponden al experimento Coupled Intercomparison Project 6 (CMIP6; Riahi et al. (2017) utilizados en el Sexto Reporte de Cambio Climático (AR6) del IPCC (2021). Se analizan los escenarios SSP 2-4,5 (moderado) y 5-8,5 (pesimista), los que provienen de la combinación de posibles desarrollos de la sociedad (SSP por Social Socioeconomic Pathways) y de concentraciones de gases de efecto invernadero (RCP por Representative Concentration Pathways). Para este estudio se opta por analizar directamente las series de máximas anuales, extrayéndolas desde los modelos y luego corrigiéndolas, como se recomienda en (Srivastav et al., 2014). Existen enfoques más potentes que podrían obtener resultados más robustos, con una mayor complejidad de implementar, para más información se recomienda consultar el trabajo de Kourtis y Tsihrintsiz (2022).

## **Downscaling de Modelos Globales Climáticos**

Se corrigió el sesgo a escala anual de las precipitaciones máximas en 24 y 72 horas de los 31 GCM utilizados, para los SSP 2-4,5 y 5-8,5 mediante el método Unbiased Quantile Mapping (UQM, Chadwick et al., 2023), el cual corrige los GCMs preservando los cambios proyectados por estos sobre la media y la desviación estándar, manteniendo la señal de cambio entre el periodo futuro e histórico simulado. Para la corrección de los modelos se consideró como periodo histórico observado las precipitaciones máximas en 24 y 72 horas de 1970-2022, luego de verificar que ninguna de las series presenta tendencia estadísticamente significativa (test de Mann-Kendall).

En general, al corregir los GCM se considera sólo hasta el término del periodo histórico de simulación, que en este caso corresponde al año 2014, debido a que posterior a dicho año, los GCM utilizan proyecciones de concentraciones de gases de efecto invernadero. En este caso se considera incluir los últimos años registrados (2015-2022) en base a suponer que la diferencia entre las proyecciones de concentraciones y las observadas para estos últimos años no es determinante, en relación con la incorporación de información reciente y valiosa en el contexto de, por ejemplo, la mega sequía.

La corrección se llevó a cabo sobre las máximas en 1 y 3 días simuladas por los modelos, a través de la librería climQMBC (climatic variables Quantile Mapping Bias Correction) desarrollada por Chadwick et al. (2023) en el lenguaje de programación R, la cual consta de varios métodos implementados, ajustando 8 distribuciones de probabilidad para cada paso de tiempo, escogiendo la de mejor ajuste, preservando así para el caso de UQM la media y desviación estándar de cada valor corregido.

### **Análisis de Precipitaciones Extremas**

Con el objetivo de sensibilizar sobre el potencial impacto del cambio climático sobre las precipitaciones extremas, se analizaron las proyecciones de precipitaciones máximas y PMP para la isla de Rapa Nui a partir de los GCM, para duraciones de 24 y 72 horas.

Para estimar las precipitaciones máximas representativas del periodo histórico, se realiza un análisis de frecuencias para las duraciones de 24 y 72 horas, ajustando con el método de Máxima Verosimilitud las distribuciones Normal, LogNormal, Gamma, Pearson 3 y Gumbel, seleccionando en base a los criterios de mejor ajuste gráfico, coeficiente de Nash-Sutcliffe (similar a utilizar  $R^2$ ), evaluación de los intervalos de confianza y el no rechazo de la prueba estadística Anderson-Darling, nivel de significancia de 5%. Se verifica que la elección de las distribuciones de probabilidad mantenga la restricción hidrológica de acuerdo con la cual los periodos de retorno de la duración de 72 horas deben ser mayores o iguales a las estimaciones para 24 horas.

Para estimar la Precipitación Máxima Probable (PMP) en 24 horas, representativa del periodo histórico, se utiliza por simplificación Hershfield (1965) con la consideración de Stöwahas (1983) con  $K=11$ . Para 72 horas, a partir del análisis de frecuencias se calcula el coeficiente de duración entre los periodos de retorno de 10.000 años de 72 y 24 horas. Se obtiene así el coeficiente de duración que se aplica sobre la PMP estimada para 24 horas, calculando la de 72 horas.

Para las proyecciones de precipitaciones máximas y PMP se aplican los mismos criterios utilizados para la caracterización histórica, para cada modelo corregido, escenario, periodo y duración. Se estima el coeficiente de duración de 10.000 años de periodo de retorno para 72 horas para cada modelo, periodo futuro y escenario, el cual se utiliza en la estimación de la PMP de 72 horas, lo cual es relevante debido a que el cambio climático puede modificar la relación entre las duraciones.

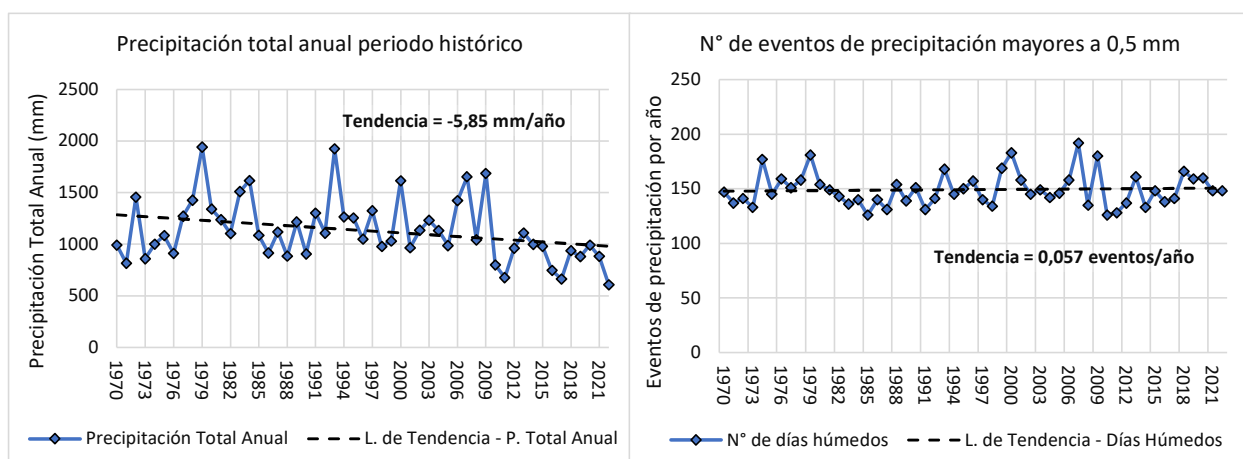
## **3. RESULTADOS**

### **Caracterización Histórica**

Con respecto a las precipitaciones históricas registradas en la estación meteorológica Mataverí en la Isla de Rapa Nui, cabe destacar que a nivel total anual se ha observado una sequía prolongada desde el año 2010, lo cual fue documentado y analizado por Gatica y Toro (2020), coincidiendo con la mega sequía de Chile Central (Boisier et al., 2016). Como parte de este estudio, se actualiza la estadística considerada por Gatica y Toro (2020), caracterizando el periodo 1970-2022.

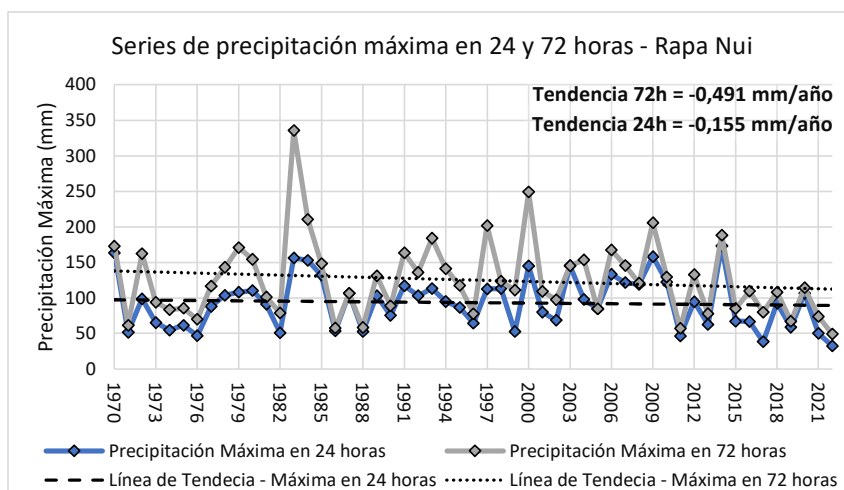
Para el periodo 1970-2022, la precipitación total anual muestra una tendencia estadísticamente significativa (test de Mann-Kendall al 5% de significancia) con una reducción de  $-5,85$  mm/año (Figura 2). La precipitación media anual corresponde a  $1.132$  mm/año para 1970-2022, sin embargo, si se considera solo los primeros o los últimos 30 años, se evidencia una reducción de  $100$  mm ( $1.197$  versus  $1.097$  mm/año). El periodo de mega sequía (últimos 13 años), muestra una reducción de casi  $360$  mm con respecto a la estadística previa a este evento hidrológico extremo.

Al analizar la cantidad de días con precipitación mayor a  $0,5$  mm (Figura 2) no se observa un cambio significativo hacia el aumento o reducción, con  $149$  días húmedos al año en promedio, sin mayor impacto de la mega sequía presente los últimos 13 años. Esto quiere decir que la intensidad diaria promedio ha disminuido durante la mega sequía, dado que la única manera de que baje el total anual con el mismo número de días con precipitación por año es que la intensidad cambie.



**Figura 2.** Precipitación total anual (izq.) y número de días al año con precipitación mayor a  $0,5$  mm (der.) – Rapa Nui

Con respecto a las precipitaciones máximas en 24 y 72 horas, estas muestran una tendencia hacia la reducción (Figura 3), sin embargo, en ningún caso son estadísticamente significativas (test de Mann-Kendall, al 5% de significancia). En promedio, las precipitaciones máximas en 72 horas ( $125$  mm) son  $1,3$  veces la máxima en 24 horas ( $93$  mm). No se identifica un efecto importante de la mega sequía sobre la magnitud de los eventos de precipitación máxima en 24 y 72 horas. Se considera que las series de precipitaciones máximas son estacionarias, razón por la cual el periodo 1970-2022 es representativo del clima histórico de la isla de Rapa Nui.



**Figura 3.** Series de precipitación máxima en 24 y 72 horas – Rapa Nui

A partir de las series de máximas en 24 y 72 horas, se realiza análisis de frecuencia estimando los periodos de retorno para la distribución de mejor ajuste (Gumbel para 24 horas y Gamma para 72 horas), estimando además la PMP para el periodo histórico (ver Tabla 1).

**Tabla 1.** Precipitaciones Máximas y PMP para Rapa Nui, Periodo Histórico, 24 y 72 horas

Precipitaciones Máximas Periodo Histórico	24 horas	72 horas
2 años (mm)	87	113
5 años (mm)	122	165
10 años (mm)	144	199
25 años (mm)	173	242
50 años (mm)	195	273
100 años (mm)	216	304
200 años (mm)	237	334
500 años (mm)	265	373
1.000 años (mm)	286	402
10.000 años (mm)	355	497
Coeficiente de Duración (T=10 años)	1,00	1,38
Coeficiente de Duración (T=10.000 años)	1,00	1,40
PMP (mm)	504	706

### Proyecciones Precipitaciones Máximas y PMP

Los resultados de las proyecciones de precipitaciones máximas y PMP para los SSP 2-4,5 y 5-8,5 se presentan a continuación, diferenciando entre 24 y 72 horas, destacando en **rojo** cuando la proyección es mayor a la estimación histórica.

*Proyecciones 24 horas*

Las proyecciones de precipitaciones máximas y PMP en 24 horas para Rapa Nui, corregidas con el método UQM se presentan en las Tablas 2 y 3, mientras que en particular, las proyecciones y variaciones simuladas por los GCM para la PMP se muestran en la Figura 4. Los resultados presentados corresponden a los percentiles 15, 25, 50, 75 y 85%, estimados a partir de las proyecciones de 31 modelos por cada escenario evaluado.

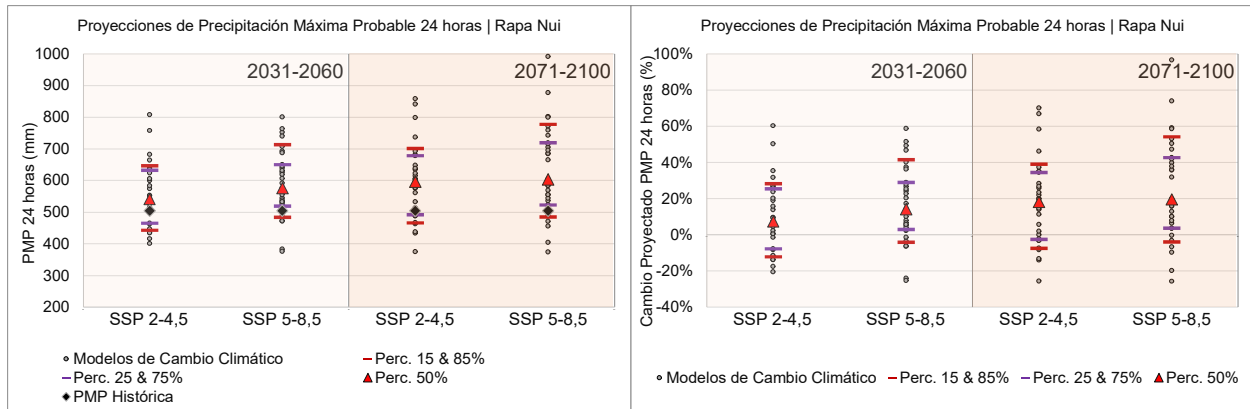
**Tabla 2.** Proyecciones de cambio climático para Precipitaciones Máximas y PMP en Rapa Nui, 24 horas, 2031-2060, SSP 2-4,5 y 5-8,5.

Proyecciones 24h 2031-2060 (mm)	Histórico	SSP 2-4,5					SSP 5-8,5				
		15%	25%	50%	75%	85%	15%	25%	50%	75%	85%
2 años	87	80	81	87	92	97	79	83	90	98	103
5 años	122	109	114	125	133	136	113	117	126	139	150
10 años	144	129	137	147	164	166	134	141	150	171	178
25 años	173	154	161	176	196	205	165	169	183	207	215
50 años	195	172	181	198	219	233	186	191	206	235	246
100 años	216	191	202	220	248	260	206	213	230	263	277
200 años	237	209	223	243	276	287	227	234	254	288	307
500 años	265	233	250	272	314	324	253	261	278	322	348
1.000 años	286	251	268	295	339	351	272	283	301	347	379
10.000 años	355	311	328	368	419	443	338	352	375	432	479
PMP	504	443	465	541	632	646	483	519	576	650	714

**Tabla 3.** Proyecciones de cambio climático para Precipitaciones Máximas y PMP en Rapa Nui, 24 horas, 2071-2100, SSP 2-4,5 y 5-8,5.

Proyecciones 24h 2071-2100 (mm)	Histórico	SSP 2-4,5					SSP 5-8,5				
		15%	25%	50%	75%	85%	15%	25%	50%	75%	85%
2 años	87	76	79	86	94	101	75	79	85	99	101
5 años	122	110	115	124	137	149	112	116	128	143	152
10 años	144	130	137	147	166	182	133	139	153	171	186
25 años	173	156	164	179	200	229	162	169	184	216	227
50 años	195	175	183	203	225	259	182	189	211	248	258
100 años	216	194	203	226	249	289	201	209	235	277	289
200 años	237	214	224	250	274	319	221	229	257	306	320
500 años	265	239	251	281	306	358	247	257	288	344	361
1.000 años	286	258	271	305	332	387	267	278	313	373	392
10.000 años	355	322	335	382	417	485	333	348	396	473	495
PMP	504	466	492	596	678	701	484	523	603	719	777





**Figura 4.** Proyecciones de cambio climático para PMP en Rapa Nui, 24 horas, SSP 2-4,5 y 5-8,5

De los resultados, se debe destacar el nivel de incertidumbre que presentan los modelos de cambio climático. Esto muestra la necesidad de evaluar más de un escenario de concentraciones, así como la mayor cantidad de GCM posibles, caracterizando su dispersión y tomando decisiones en base al nivel de riesgo que se considere adecuado. En términos generales, la incertidumbre aumenta para el largo plazo, apreciándose una mayor dispersión bajo el escenario SSP 5-8,5.

Para 24 horas, el escenario SSP 5-8,5 muestra aumentos más severos que el SSP 2-4,5, tanto para la precipitación máxima como para la PMP para ambos periodos futuros evaluados. El mayor aumento en las precipitaciones extremas se ve presente en el largo plazo, es decir, el efecto del cambio climático sobre los eventos extremos de 24 horas se acentúa hacia fines de siglo.

En la mayoría de las proyecciones climáticas (a excepción del SSP 2-4,5, mediano plazo), independiente del escenario evaluado, los valores históricos son similares a la proyección de percentil 25%. Esto quiere decir que cerca del 75% de los GCM proyecta aumentos de la precipitación máxima y PMP.

Para 2031-2060, al evaluar una proyección climática desfavorable (i.e., percentil 85% de los GCM), el periodo de retorno de 100 años presenta un aumento del 20 al 28% con respecto al histórico, bajo los escenarios SSP 2-4,5 y 5-8,5. Mientras que, para la PMP, el incremento podría situarse entre un 28 y 42% para los mismos escenarios.

Para 2071-2100, al evaluar una proyección climática desfavorable (i.e., percentil 85% de los GCM), el periodo de retorno de 100 años presenta un aumento del 34% con respecto al histórico, para ambos escenarios SSP 2-4,5 y 5-8,5. Mientras que, para la PMP, el incremento podría situarse entre un 39 y 54% para los mismos escenarios.

#### *Proyecciones 72 horas*

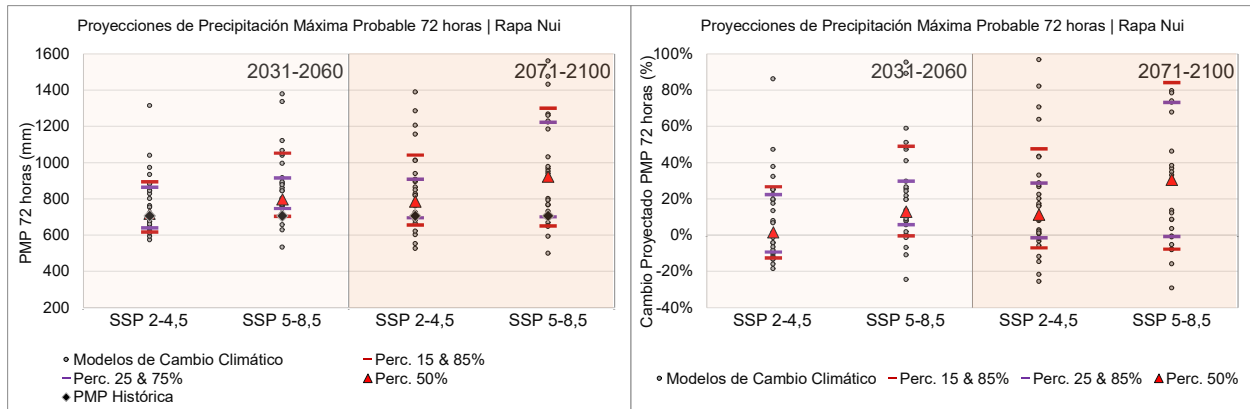
Las proyecciones de precipitaciones máximas y PMP en 72 horas para Rapa Nui, corregidas con el método UQM se presentan en las Tablas 4 y 5, mientras que en particular, las proyecciones y variaciones simuladas por los GCM para la PMP se muestran en la Figura 5. Los resultados presentados corresponden a los percentiles 15, 25, 50, 75 y 85%, estimados a partir de las proyecciones de 31 modelos por cada escenario evaluado.

**Tabla 4.** Proyecciones de cambio climático para Precipitaciones Máximas y PMP en Rapa Nui, 72 horas, 2031-2060, SSP 2-4,5 y 5-8,5

Proyecciones 72h 2031-2060 (mm)	Histórico	SSP 2-4,5					SSP 5-8,5				
		15%	25%	50%	75%	85%	15%	25%	50%	75%	85%
<b>2 años</b>	113	107	110	116	126	132	108	112	123	133	136
<b>5 años</b>	165	149	154	170	183	192	157	162	178	192	199
<b>10 años</b>	199	174	182	202	217	233	192	197	213	234	245
<b>25 años</b>	242	208	220	244	265	283	232	237	259	291	302
<b>50 años</b>	273	233	248	274	302	320	262	268	292	330	342
<b>100 años</b>	304	259	276	305	339	364	292	297	325	364	386
<b>200 años</b>	334	284	304	335	375	406	322	326	359	402	429
<b>500 años</b>	373	317	341	375	421	457	359	364	393	453	485
<b>1.000 años</b>	402	342	367	405	457	495	388	394	419	493	528
<b>10.000 años</b>	497	426	456	505	573	620	471	486	520	624	668
CD <sub>72h</sub> (10.000 años)	1,40	1,17	1,24	1,33	1,47	1,65	1,24	1,30	1,39	1,52	1,74
<b>PMP</b>	706	616	640	717	864	894	703	746	797	916	1.052

**Tabla 5.** Proyecciones de cambio climático para Precipitaciones Máximas y PMP en Rapa Nui, 72 horas, 2071-2100, SSP 2-4,5 y 5-8,5

Proyecciones 72h 2071-2100 (mm)	Histórico	SSP 2-4,5					SSP 5-8,5				
		15%	25%	50%	75%	85%	15%	25%	50%	75%	85%
<b>2 años</b>	113	99	108	118	126	134	89	97	110	127	130
<b>5 años</b>	165	148	156	169	184	198	147	156	164	184	207
<b>10 años</b>	199	175	186	206	227	247	181	189	205	234	256
<b>25 años</b>	242	211	222	245	282	309	221	234	261	297	328
<b>50 años</b>	273	234	248	274	323	358	248	262	293	345	384
<b>100 años</b>	304	258	274	304	363	412	277	293	328	397	439
<b>200 años</b>	334	282	300	335	403	470	306	324	367	449	494
<b>500 años</b>	373	315	334	375	456	544	345	363	417	518	566
<b>1.000 años</b>	402	339	360	406	495	594	373	391	455	571	622
<b>10.000 años</b>	497	420	445	508	626	751	466	483	580	744	808
CD <sub>72h</sub> (10.000 años)	1,40	1,21	1,27	1,35	1,43	1,85	1,28	1,31	1,43	1,67	1,77
<b>PMP</b>	706	656	696	786	909	1.042	651	701	922	1.223	1.301



**Figura 5.** Proyecciones de cambio climático para PMP en Rapa Nui, 72 horas, SSP 2-4,5 y 5-8,5

Al igual que para 24 horas, se muestra la necesidad de evaluar más de un escenario de concentraciones, así como la mayor cantidad de GCM posibles, caracterizando su dispersión y tomando decisiones en base al nivel de riesgo que se considere adecuado.

En términos generales, la incertidumbre aumenta para el largo plazo, apreciándose una mayor dispersión bajo el escenario SSP 5-8,5. Para fines de siglo, en 72 horas los incrementos proyectados por los GCM son más severos que los estimados para 24 horas, en particular para fines de siglo, SSP 5-8,5. En otras palabras, el efecto del cambio climático se magnifica para esta mayor duración.

Se observa dispersión con respecto a los Coeficientes de Duración para 72 horas, 10.000 años de periodo de retorno, lo que repercute en la estimación de la PMP en 72 horas. Es relevante estimar los CD para cada modelo, periodo y escenario, con el propósito de incorporar el efecto del cambio climático sobre este, caracterizando apropiadamente la combinación de PMP en 24 horas y CD de 72 horas, utilizados para la estimación de PMP en 72 horas. Supuestos como mantener el CD histórico pueden llevar a una representación poco precisa de las proyecciones de precipitaciones extremas.

Para 72 horas, el escenario SSP 5-8,5 muestra aumentos más severos que el SSP 2-4,5 para las precipitaciones máximas y PMP en ambos periodos futuros evaluados. El mayor aumento en las precipitaciones extremas se ve presente en el largo plazo, es decir, el efecto del cambio climático sobre los eventos extremos de 72 horas se acentúa hacia fines de siglo.

Para 2031-2060, al evaluar una proyección climática desfavorable (i.e., percentil 85% de los GCM), el periodo de retorno de 100 años presenta un aumento del 20 al 27% con respecto al histórico, bajo los escenarios SSP 2-4,5 y 5-8,5. Mientras que, para la PMP, el incremento podría situarse entre un 27 y 49% para los mismos escenarios.

Para 2071-2100, al evaluar una proyección climática desfavorable (i.e., percentil 85% de los GCM), el periodo de retorno de 100 años presenta un aumento del 20 al 45% con respecto al histórico, para ambos escenarios SSP 2-4,5 y 5-8,5. Mientras que, para la PMP, el incremento podría situarse entre un 48 y 84% para los mismos escenarios.

#### 4. CONCLUSIONES

Para el periodo histórico (1970-2022), la precipitación media anual corresponde a 1.132 mm/año, mostrando una tendencia estadísticamente significativa hacia la reducción (-5,85 mm/año). Esta reducción se vincula con la mega sequía que afecta también a Chile Central desde el 2010.

Por otro lado, el número de días de precipitación no presenta un cambio significativo el último tiempo, mostrando en promedio 149 días húmedos al año, sin mayores variaciones durante la mega sequía. Es por esto que, la intensidad diaria promedio de la precipitación disminuye.

Para el periodo histórico, con respecto a las precipitaciones máximas en 24 y 72 horas, estas muestran una tendencia hacia la reducción, sin embargo, no son estadísticamente significativas. Tampoco se identifica un efecto importante de la sequía sobre la magnitud de los eventos de precipitación máxima. Las series históricas de precipitación máxima son estacionarias, razón por la cual el periodo 1970-2022 se considera representativo del clima histórico de la isla de Rapa Nui.

Cabe destacar el nivel de incertidumbre que presentan los modelos de cambio climático. Por esto, se hace hincapié en la necesidad de evaluar más de un escenario de concentraciones, así como la mayor cantidad de modelos posibles, pues ello permite caracterizar la dispersión de las proyecciones y tomar decisiones en base al nivel de riesgo que se considere adecuado.

En términos generales, la incertidumbre aumenta para el largo plazo, siendo mayor la dispersión de los modelos para el SSP 5-8,5. Se observa que los modelos de cambio climático son consistentes en proyectar aumentos de la precipitación máxima y PMP.

Frecuentemente se tiene que, el escenario SSP 5-8,5 muestra aumentos más severos en relación con el SSP 2-4,5, tanto para la precipitación máxima como para la PMP para ambos periodos futuros evaluados. El efecto del cambio climático sobre los eventos extremos de precipitación se acentúa hacia fines de siglo, en relación con el mediano plazo.

Para 72 horas los incrementos proyectados por los modelos de cambio climático son más severos que los estimados para 24 horas, en particular para fines de siglo, SSP 5-8,5, es decir, a mayor duración, crece el efecto del cambio climático sobre el potencial aumento en la magnitud de eventos extremos de precipitación en Rapa Nui.

Se tiene que el incremento proyectado sobre la PMP en 24 horas es consistentemente más severo que el estimado sobre las precipitaciones máximas. Esto puede estar relacionado con el método considerado para su evaluación, por lo que se recomienda explorar otras fórmulas y así estimar la sensibilidad con respecto al método adoptado.

Las proyecciones de cambio climático tienden en su mayoría a presentar un aumento en la magnitud de las precipitaciones extremas, a pesar de que estos resultados tienen un alto nivel de incertidumbre. La metodología aquí presentada es una alternativa para estimar precipitaciones extremas a escala local, las cuales, permitirían tomar mejores medidas, por medio de incorporar la no estacionariedad de la hidrología en la toma de decisiones relacionadas a adaptación al cambio climático, especialmente en sistemas de alta vulnerabilidad como Rapa Nui.

Como trabajo futuro, a partir de las proyecciones aquí presentadas, se recomienda avanzar en la identificación de zonas de interés que puedan ser vulnerables al potencial aumento de los eventos extremos de precipitación y, por consiguiente, de crecidas extremas, además de probar otras metodologías para estimación de eventos extremos bajo cambio climático y comparar sus resultados. En el caso de Rapa Nui se debe poner especial atención en zonas de importancia patrimonial, así como asentamientos humanos.

## REFERENCIAS

- Boisier, J. P., Rondanelli, R., Garreaud, R. D., & Muñoz, F. (2016). Anthropogenic and natural contributions to the Southeast Pacific precipitation decline and recent megadrought in central Chile. *Geophysical Research Letters*, 43(1), 413-421.
- Chadwick, C., Gironás, J., González-Leiva, F. y Aedo, S. (2023). Bias adjustment to preserve changes in variability: the unbiased mapping of GCM changes, *Hydrological Sciences Journal*, DOI: 10.1080/02626667.2023.2201450.
- DGA. (2017). Actualización del Balance Hídrico Nacional de Chile. Santiago: Dirección General de Aguas. Ministerio de Obras Públicas.
- Gatica, C. y Toro, I. (2020). Proyección de la Frecuencia de Eventos de Sequía para Rapa Nui, Escenarios de Cambio Climático RCP 4,5 y 8,5. XXIV Congreso Chileno de Ingeniería Hidráulica, Sociedad Chilena de Ingeniería Hidráulica. Santiago, Chile.
- Hershfield, D. (1965). Method for Estimating Probable Maximum Rainfall. *Journal American Water Works Association*, Volume 57, 8, 965-972.
- Intergovernmental Panel on Climate Change (IPCC). (2021). *Climate Change 2021: The Physical Science Basis. Contribution of Working Group I to the Sixth Assessment Report of the Intergovernmental Panel on Climate Change*. Cambridge University Press.
- Kourtis, I. y Tsihrintsiz, V. (2022). Update of intensity-duration-frequency (IDF) curves under climate change: a review. *Water Supply*. Vol 22 N°5, 4951. doi: 10.2166/ws.2022.152.
- Markham, A., Osipova, E., Lafrenz Samuels, K., & Caldas, A. (2016). *World Heritage and Tourism in a Changing Climate*. Paris, France: United Nations Environment Programme, Nairobi, Kenya and United Nations Educational, Scientific and Cultural Organization.
- Milad, C. (2010). Diagnóstico de los Recursos Hídricos Subterráneos de Isla de Pascua. Memoria para Optar al Título de Ingeniero Civil. Departamento de Ingeniería Civil, Universidad de Chile.
- Quilliam, L., Cox, R., Campbell, P., & Wright, M. (2014, Mayo). Coastal climate change impacts for Easter Island in 2100. *Rapa Nui Journal*, 28, 60-67.
- Riahi, K., Van Vuuren, D., Kriegler, E., Edmonds, J., O'Neill, B., Fujimori, S., et al. (2017). The Shared Socioeconomic Pathways and their energy, land use, and greenhouse gas emissions implications: An overview. *Global Environmental Change*, 42, 153-168. doi: <https://doi.org/10.1016/j.gloenvcha.2016.05.009>.
- Srivastav, R., Schardong, A. y Simonovic, S. (2014). Equidistance Quantile Matching Method for Updating IDF Curves under Climate Change. *Water Resources Management* 28, 2539–2562. <https://doi.org/10.1007/s11269-014-0626-y>
- Stöwhas, L. (1983). Precipitaciones Máximas Diarias en Chile. VI Congreso Nacional Sociedad Chilena de Ingeniería Hidráulica. Santiago, Chile.
- Thrasher, B., Wang, W., Michaelis, A. et al. (2022). NASA Global Daily Downscaled Projections, CMIP6. *Sci Data* 9, 262. <https://doi.org/10.1038/s41597-022-01393-4>.
- WMO. (2009). *Manual on Estimation of Probable Maximum Precipitation*. N°1045, page 68.