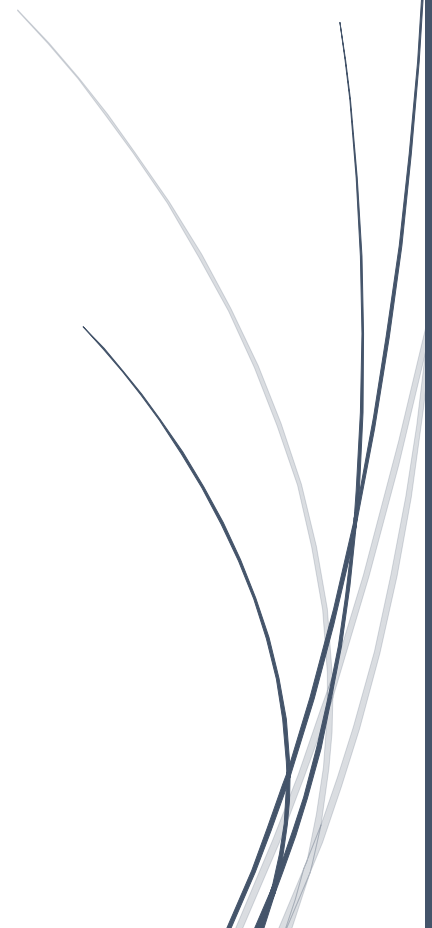


# *LA ELABORACIÓN DE UN PLAN MAESTRO PARA EL SECTOR HÍDRICO DE LA PROVINCIA DE SAN JUAN*

## **Informe 2 - Proyecciones De La Oferta**

**2025**



## Informe 2 - Proyecciones De La Oferta

## Informe 2 - Proyecciones De La Oferta

<b>1.</b>	<b>RESUMEN</b>	<b>6</b>
<b>2.</b>	<b>RESUMEN EJECUTIVO</b>	<b>6</b>
<b>3.</b>	<b>OBJETIVO DEL INFORME</b>	<b>7</b>
<b>4.</b>	<b>RESUMEN DEL POTENCIAL HÍDRICO DISPONIBLE</b>	<b>8</b>
4.1.	AGUA SUPERFICIAL DISPONIBLE	8
4.2.	AGUA SUBTERRÁNEA	10
4.3.	AGUA TRATADA*	11
<b>5.</b>	<b>INFORME CAMBIO CLIMATICO</b>	<b>11</b>
5.1.	INTRODUCCIÓN	11
5.2.	METODOLOGÍA	14
5.3.	RESULTADOS	17
5.4.	DISCUSIÓN Y CONCLUSIONES	28
<b>6.</b>	<b>AGUA DISPONIBLE PROYECTADA PARA 2030, 2040, 2050</b>	<b>30</b>
6.1.	AGUA SUPERFICIAL	30
6.2.	AGUA SUBTERRÁNEA	33
6.3.	RESUMEN DEL AGUA DISPONIBLE PROYECTADA	35
<b>7.</b>	<b>CONCLUSIONES</b>	<b>37</b>
<b>8.</b>	<b>BIBLIOGRAFÍA</b>	<b>38</b>
8.1.	BIBLIOGRAFÍA CAPÍTULO 5	38
8.2.	BIBLIOGRAFÍA CAPÍTULO 6	38

## Informe 2 - Proyecciones De La Oferta

### Lista de Tablas

Tabla 2-1: Agua disponible proyectada Río San Juan .....	6
Tabla 2-2: Agua disponible proyectada Río Jáchal .....	7
Tabla 2-3: Balance hídrico del acuífero de Tulum.....	7
Tabla 4-6: Agua Disponible - Cuenca del río San Juan .....	10
Tabla 4-7: Agua Disponible - Cuenca del río Jachal, Iglesia y Valle Fértil .....	10
Tabla 4-8: Suministro de agua potable (Hm <sup>3</sup> ) .....	11
Tabla 5-1: Modelos climáticos globales y regionales que se utilizaron en el estudio .....	17
Tabla 5-2: Cambios esperados en los parámetros hidro climáticos en la provincia de San Juan para los diferentes períodos con respecto a 2000-2020 .....	27
Tabla 5-3: Cambios esperados en el agua disponible en la provincia de San Juan para los diferentes períodos con respecto a 2000-2020 .....	27
Tabla 6-1: Agua disponible anual observada vs. prevista en la provincia de San Juan .....	31
Tabla 6-2: Agua disponible Río San Juan, percentiles anuales - Agua disponible (Hm <sup>3</sup> ) .....	31
Tabla 6-3: Probabilidad de Ocurrencia .....	32
Tabla 6-4: Probabilidad de Ocurrencia – Años Secos.....	32
Tabla 6-5: Agua disponible Río Jáchal, percentiles anuales - Agua disponible (Hm <sup>3</sup> ) .....	32
Tabla 6-6: Cambio en las precipitaciones con respecto a 2000-2020 .....	33
Tabla 6-7: Escenarios Futuros - Acuífero Tulum .....	35
Tabla 6-8: Potencial hídrico disponible - Valle de Tulum .....	36
Tabla 6-9: Balance Acuífero Ullum - Zonda (Percentiles 50%).....	36

### Lista de Figuras

Figura 5-1: La cordillera de los Andes en la provincia de San Juan.....	13
Figura 5-2: Los principales ríos de la provincia de San Juan .....	14
Figura 5-2a: Los principales ríos de la provincia de San Juan.....	15
Figura 5-3: Anomalía de las temperaturas medias para el período 2020-2040 con respecto a la línea de base .....	18
Figura 5-4: Temperaturas medias anuales en los Andes de San Juan a una altitud de 4.752 m.....	18
Figura 5-5: Temperaturas mínimas anuales en los Andes de San Juan a una altura de 4.752 m.....	19
Figura 5-6: Evaporación anual en la región de Calingasta, San Juan, 1665m .....	19
Figura 5-7: Anomalía de precipitación (%) para el período 2030-2050 con respecto a la Línea de base 1970-2000 .....	21
Figura 5-8: Precipitación anual simulada en las regiones de los Andes de gran elevación en San Juan.....	21
Figura 5-9: Anomalía de precipitación mensual (%) para el período 2030-2039 con respecto a la línea de base 1995-2014.....	22
Figura 5-10: Desviación estándar de la precipitación anual para San Juan (regiones de gran elevación).....	22

## Informe 2 - Proyecciones De La Oferta

Figura 5-11: El índice de sequía SPEI (precipitación y evaporación)) para diferentes escenarios climáticos para San Juan.....	23
Figura 5-12: Acumulación anual de nevadas: Calingasta - San Juan, 1665m .....	24
Figura 5-13: Los volúmenes de agua superficial disponibles en San Juan .....	25
Figura 5-14: Anomalía de los volúmenes medios anuales de caudal para el período 2030-2050 con respecto a la línea de base de 1970-2000.....	26
Figura 5-15: Cambios mensuales (%) en los volúmenes de agua del río San Juan para los períodos 2030, 2050 y 2070 con respecto al período de referencia de 1970-2000 .....	26
Figura 5-16: Cambios (%) en los volúmenes de agua disponibles de San Juan para los períodos 2030, 2050 y 2070 con respecto al período de referencia de 2000-2020 .....	27
Figure 6-1: Cambio de precipitaciones en 2030 con respecto a 2000-2020 .....	33

## Informe 2 - Proyecciones De La Oferta

## Informe 2 - Proyecciones De La Oferta

### 1. RESUMEN

Este informe presenta los cálculos del abastecimiento de agua proyectado en la provincia de San Juan, para los años 2030, 2040 y 2050.

Las proyecciones se han realizado en base a los cálculos de agua disponible presentados en el informe 1 y según el informe sobre cambio climático (capítulo 5).

- Agua Superficial: proyecciones de disponibilidad de agua superficial para 2030, 2040 y 2050.
- Agua Subterránea: Estimaciones del cambio en el almacenamiento de agua subterránea debido a los efectos del cambio climático para 2030, 2040 y 2050.
- Agua Tratada: presentación del potencial del Agua Tratada según las proyecciones de demanda de agua potable (Informe 3) para 2030, 2040 y 2050.

### 2. RESUMEN EJECUTIVO

El Informe 2 trata de las proyecciones de los recursos hídricos para la Provincia de San Juan. Las proyecciones se realizaron para los años 2030, 2040 y 2050.

Las proyecciones se realizaron con base en la disponibilidad actual de agua (agua superficial y subterránea) y con los cambios previstos tal como se presentan en el informe sobre cambio climático (capítulo 5).

La siguiente tabla presenta el agua superficial disponible proyectada en el río San Juan para los diferentes percentiles.

*Tabla 2-1: Agua disponible proyectada Río San Juan*

Percentiles	5%	10%	25%	50%	75%	90%	95%
<b>2000-2020</b>	795.5	874.5	1040.4	<b>1254.9</b>	1515.3	1784.7	1976.5
<b>2030</b>	696.9	767.4	915.5	<b>1107.7</b>	1341.7	1584.5	1757.8
<b>2040</b>	516.7	577.4	707.7	<b>881.6</b>	1099.6	1332	1501.3
<b>2050</b>	421.1	469.7	574	<b>712.7</b>	886	1070.2	1204

*Fuente: Informe Cambio Climático, Mekorot 2023*

## Informe 2 - Proyecciones De La Oferta

La siguiente tabla presenta el agua superficial disponible proyectada en el río Jáchal para los diferentes percentiles.

Tabla 2-2: Agua disponible proyectada Río Jáchal

Percentiles	5%	10%	25%	50%	75%	90%	95%
2000-2020	230	255.4	303	<b>366.6</b>	443.9	528.3	587.8
2030	201.5	224.1	266.7	<b>323.6</b>	393.1	469.2	523
2040	149.2	168.7	206.2	<b>257.7</b>	322.5	395.4	448.2
2050	121.6	137.3	167.2	<b>208.3</b>	259.8	317.6	359.3

Fuente: Informe Cambio Climático, Mekorot 2023

La siguiente tabla presenta el balance hídrico del acuífero de Tulum:

Tabla 2-3: Balance hídrico del acuífero de Tulum

Acuífero de Tulum						
Año	Agua Disponible Percentiles (%)	Agua Disponible (Hm <sup>3</sup> )	Recarga Superficial Anual (Hm <sup>3</sup> )	Recarga Anual de Aguas Subterráneas (Hm <sup>3</sup> )	Producción Anual de Agua Subterránea (Hm <sup>3</sup> )	Cambio Anual de Almacenamiento de Agua Subterránea (Hm <sup>3</sup> )
2022		671	115.8	36.7	494	-341.5
2030	50%	1,159	118.63	33.48	441.40	-289.29
2040	50%	1,050	118.67	30.34	441.40	-292.39
2050	50%	969	119.01	27.98	447.44	-300.45

Elaboración Propia

En general, la disponibilidad de agua está disminuyendo debido a los efectos del cambio climático, la probabilidad de años secos se vuelve más común en años futuros.

### 3. OBJETIVO DEL INFORME

El Informe N° 2, está enfocado en la evaluación de las proyecciones de los recursos hídricos (Aguas Subterráneas y Superficiales), en San Juan, para las décadas 2030, 2040 y 2050. Junto con el Informe N° 3 (Informe de Proyecciones de Demanda de Agua), se presentará la proyección del balance hídrico.

El Informe N° 4 se enfocará en los BALANCES HÍDRICOS PROSPECTIVOS.

### 4. RESUMEN DEL POTENCIAL HÍDRICO DISPONIBLE

#### 4.1. AGUA SUPERFICIAL DISPONIBLE

El volumen de agua superficial disponible de San Juan se calculó en el informe 1.1.

A continuación, se presenta un resumen del capítulo ASD (Agua Superficial Disponible).

##### 4.1.1. METODOLOGÍA

El agua superficial disponible (ASD) es el concepto de la cantidad neta de agua que es posible utilizar de un determinado depósito. ASD se define como la cantidad total de agua (Volumen de agua que entra =  $V_{in}$ ) que entra en el depósito, menos todos los tipos de pérdidas (Volumen de pérdida de agua =  $V_{perdidas}$ ). Estas pérdidas podrían ser evaporación, filtración hacia el agua subterránea o consumo no fiscalizado.

El siguiente conjunto de ecuaciones explica el uso de ASD y cómo se calculó:

$$Ec1: AD = \sum_{t=1}^n (V_{in} - V_{perdidas})_t$$

La Ecuación 1 establece que el agua disponible en un determinado depósito es igual a todo el volumen que entra en el depósito menos todas las pérdidas de agua de ese depósito durante un período de tiempo definido. Este período se puede definir como una hora, día, mes, año, etc. El período que elija para calcular AD depende de la calidad de los datos que posea y de las proyecciones futuras que desee calcular.

Para un reservorio, el cambio en el volumen de agua durante un período de tiempo definido ( $\Delta V$ ) se define en la ecuación 2:

$$Ec2: \Delta V = \sum_{t=1}^n (V_{in} - V_{out})_t$$

En donde:

$V_{in}$  = Toda el agua que entró en el embalse

$V_{out}$  = Toda el agua que se liberó del depósito,  $V_{out}$  se define en la ecuación 3:

$$Ec3: V_{out} = (V_{salida} + V_{perdidas})$$

En donde:

$V_{salida}$  = Volumen de agua que se liberó/bombeó del depósito y se contó.

## Informe 2 - Proyecciones De La Oferta

$V_{\text{perdidas}}$  = Volumen de agua que se perdió y no se contabilizó (evaporación, filtración, robo, etc.)

Combinando la Ecuación 2 y la Ecuación 3, se puede formar la Ecuación 4:

$$\text{Ec4: } \Delta V = \sum_{t=1}^n (V_{\text{in}} - (V_{\text{salida}} + V_{\text{perdidas}}))_t$$
$$\Delta V + \sum_{t=1}^n (V_{\text{salida}})_t = \sum_{t=1}^n (V_{\text{in}} - V_{\text{perdidas}})_t$$

Volviendo a la ecuación 1 obtenemos:

$$\text{AD} = \sum_{t=1}^n (V_{\text{in}} - V_{\text{perdidas}})_t = \Delta V + \sum_{t=1}^n (V_{\text{salida}})_t$$

Organizando la ecuación, obtenemos la ecuación 5:

$$\text{Ec5: } \text{AD} = \Delta V + \sum_{t=1}^n (V_{\text{salida}})_t$$

Por lo tanto, en la Ecuación 5, el AD del reservorio podría expresarse en función de parámetros operacionales bien medidos. Es el cambio en el volumen de agua ( $\Delta V$ , calculado utilizando el nivel de agua del depósito) y las extracciones de agua del embalse ( $V_{\text{salida}}$ ) durante un período definido.

Del mismo modo, es posible definir AD para el agua subterránea, donde las pérdidas podrían estar relacionadas con fugas y flujos laterales a otras regiones, cuando no existe otra información.

AD es un parámetro operacional que representa con precisión el estado hidrológico de una región. La gran ventaja de utilizar esta variable es la eliminación de la necesidad de calcular variables con altos grados de incertidumbre, como la evaporación y las filtraciones de los embalses.

## Informe 2 - Proyecciones De La Oferta

Tabla 4-6: Agua Disponible - Cuenca del río San Juan

Año	Calingasta	Caracoles	Punta Negra	Ullum		AD = $\Delta V$ + Erogación
	Erogación (HM <sup>3</sup> )	$\Delta V$ (HM <sup>3</sup> )	$\Delta V$ (HM <sup>3</sup> )	$\Delta V$ (HM <sup>3</sup> )	Erogación (HM <sup>3</sup> )	(HM <sup>3</sup> )
2000 - 2001	50	0	0	51	1617	1718
2001 - 2002	50	0	0	34	1574	1658
2002 - 2003	50	0	0	-52	1587	1585
2003 - 2004	50	0	0	68	1602	1721
2004 - 2005	50	0	0	-46	1215	1218
2005 - 2006	50	0	0	13	1724	1787
2006 - 2007	50	0	0	22	1582	1654
2007 - 2008	50	0	0	-36	1539	1554
2008 - 2009	50	89	0	-17	1618	1741
2009 - 2010	50	-31	0	-33	1364	1350
2010 - 2011	50	-2	0	-171	953	830
2011 - 2012	50	-99	0	-3	1027	975
2012 - 2013	50	1	0	-22	1001	1031
2013 - 2014	50	50	0	90	892	1082
2014 - 2015	50	-209	6	3	811	661
2015 - 2016	50	402	178	44	1080	1755
2016 - 2017	50	63	216	132	1303	1764
2017 - 2018	50	-27	-144	-34	1144	988
2018 - 2019	50	-176	-21	-32	1107	927
2019 - 2020	50	-177	-46	-161	976	642
2020 - 2021	50	-118	23	-8	856	803
2021 - 2022	50	-21	-32	-15	671	654

Elaboración propia, Datos - DH

Tabla 4-7: Agua Disponible - Cuenca del río Jachal, Iglesia y Valle Fértil

Año	Iglesia	Valle Fértil	C.D.V	AD
	(HM <sup>3</sup> )	(HM <sup>3</sup> )	(HM <sup>3</sup> )	(HM <sup>3</sup> )
2016 - 2017	30	7	395	432
2017 - 2018	30	7	242	279
2018 - 2019	30	7	237	274
2019 - 2020	30	7	187	224
2020 - 2021	30	7	158	195
2021 - 2022	30	7	160	197

Elaboración propia, Datos - DH

### 4.2. AGUA SUBTERRÁNEA

Según el capítulo 4.3 "DISPONIBILIDAD Y POTENCIAL DE AGUA SUBTERRÁNEA" la producción anual estimada de agua subterránea (2021-2022) es de 509 Hm<sup>3</sup> en Tulum, Ullum y Zonda, y otros 15,6 Hm<sup>3</sup> en la tercera zona.

Se asume que la recarga de aguas superficiales y subterráneas y el balance del acuífero de Tulum es negativo, se pierden 341.5 Hm<sup>3</sup> anuales.

## Informe 2 - Proyecciones De La Oferta

El acuífero Ullum-Zonda tiene un saldo positivo ganando 31.5 Hm<sup>3</sup> y los acuíferos de la tercera zona también, ganando un volumen anual de 143 Hm<sup>3</sup> (ver tabla 4-4)

### 4.3. AGUA TRATADA\*

En el informe 1.1, en el capítulo de calidad del agua, se menciona que:

Hoy en día no hay ningún marco que se expresa en el tema del reúso, no hay regulación determinada y no hay ningún proyecto en la provincia donde se realice el reúso de los efluentes.

Dado que los efluentes reutilizados podrían usarse para riego limitado, se debe presentar el potencial.

Por regla general, el volumen de suministro de agua potable que llega a los consumidores (sin las pérdidas) multiplicado por (2/3), es el potencial de agua tratada. La siguiente tabla presenta el potencial de agua tratada en la provincia:

Tabla 4-8: Suministro de agua potable (Hm<sup>3</sup>)

Año	2030	2040	2050
Agua potable (Hm <sup>3</sup> )	155.58	169.74	182.26
Potencial de agua tratada (Hm <sup>3</sup> )	98.27	103.72	113.16

*Elaboración propia*

## 5. INFORME CAMBIO CLIMATICO

### 5.1. INTRODUCCIÓN

La región central de los Andes donde se ubica la provincia de San Juan se caracteriza por una fuerte influencia de la topografía en el clima regional y local. Se pueden diferenciar dos subregiones distintas en términos de la estacionalidad de la precipitación, la Cordillera de los Andes y las Tierras Bajas (ver figura 6-1). Este sector de la cordillera de los Andes se caracteriza por tener un ancho estrecho, una orientación norte-sur con centro en los 70° O y una elevación media de aproximadamente 4500 m con picos que pueden superar los 6000 m.s.n.m. La precipitación sobre esta región montañosa tiene un régimen mediterráneo, con precipitaciones concentradas principalmente durante la estación fría (abril a septiembre) y una estación cálida seca (octubre a marzo) en respuesta al desplazamiento estacional del Alto Pacífico Suroriental. Por otro lado, la región de Tierras Bajas se caracteriza por un régimen de precipitaciones monzónicas, con una estacionalidad más marcada cerca del piedemonte andino

## Informe 2 - Proyecciones De La Oferta

(Doyle, 2020). Debido al marcado efecto de “Sombra de la lluvia”, el clima en las Tierras Bajas es árido a semiárido en el oeste y subhúmedo en el este, con lluvias convectivas en la estación cálida.

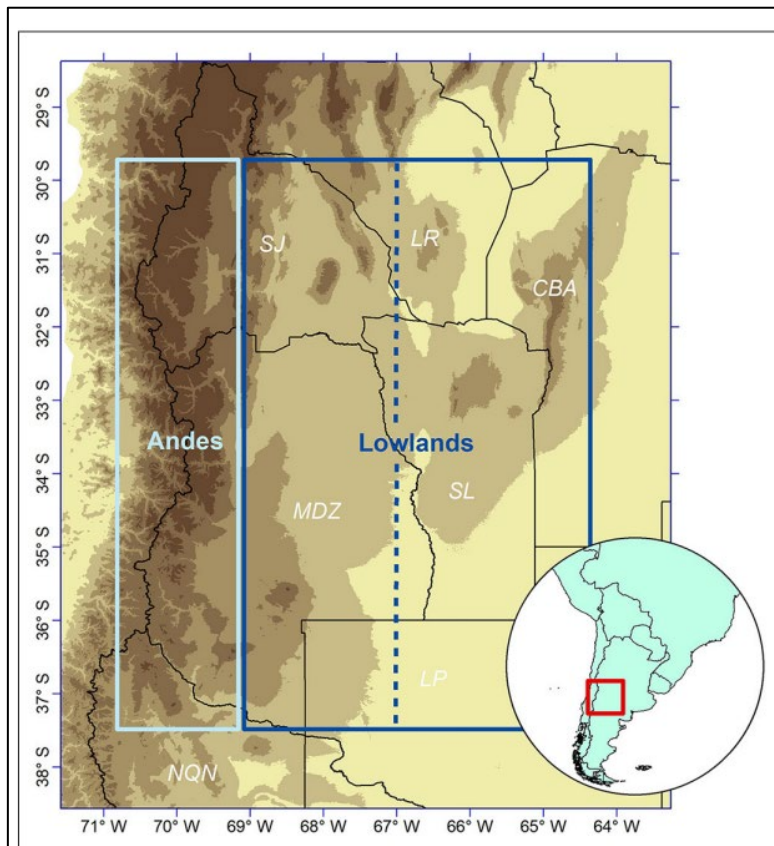
La provincia de San Juan se divide en 2 cuencas principales: la cuenca del río San Juan en la parte sur de la provincia y la cuenca del río Jachal en la parte norte de la provincia. En la cuenca Jachal, la presa Cuesta del Viento está recibiendo agua del río Blanco, desde la Cuesta del Viento el agua fluye por el río Jachal hasta el Derivador Pachimoco, desviada a 3 canales principales que abastecen el agua a las demandas agrícolas. del área, el almacenamiento de la presa es de 192 HM<sup>3</sup> y es la única presa activa en el sistema por lo que se debe calcular el valor del agua disponible para esta presa. El agua superficial juega un papel importante en la gestión de los recursos hídricos de la provincia. El país tiene una alta dependencia del agua proveniente de la cordillera de los Andes. La mayor parte del agua utilizada para el desarrollo de las principales actividades socioeconómicas de la provincia, una región árida a semiárida depende del caudal superficial de varios ríos alimentados por nieve.

Las observaciones de superficie a largo plazo han mostrado tendencias de precipitación que disminuyen a lo largo de la región de los Andes (Rivera y Arnould, 2020), lo que favoreció una pérdida sostenida de masa glaciar en las elevaciones más altas de la cordillera de los Andes (Dussaillant et al., 2019), y tendencias de precipitación en aumento sobre la región de las Tierras Bajas (Maenza et al., 2017; Rivera y Arnould, 2020). Durante la última década (2010-2020), la reducción de la acumulación de nieve sobre las elevaciones más altas de la cordillera de los Andes desencadenó la ocurrencia de sequía hidrológica en la provincia (Rivera et. al, 2021).

El promedio anual de agua disponible en la provincia de San Juan es de alrededor de 1.300 hectómetros cúbicos (en su mayoría provenientes del Río San Juan) para el período 2000-2021. Sin embargo, el agua disponible está disminuyendo drásticamente a lo largo de los años. La provincia perdió alrededor de 500 Hm<sup>3</sup> durante los últimos 20 años de 1.600 a 1.100 hoy (alrededor de 30 Hm<sup>3</sup> cada año). Los cambios climáticos afectan la disponibilidad de los recursos hídricos de varias maneras: una disminución de los recursos hídricos naturales (precipitación, flujo de agua), un aumento en la frecuencia, duración e intensidad de las sequías, por otro lado, un aumento en la evaporación y demandas de agua para todos los sectores, especialmente para agricultura. Para gestionar eficientemente los recursos hídricos en un clima cambiante, es necesario contar con futuras proyecciones hidro-climáticas en el tiempo y el

## Informe 2 - Proyecciones De La Oferta

espacio. El propósito de este trabajo es cuantificar los efectos hídricos y climáticos esperados sobre la disponibilidad de agua en la provincia de San Juan. La principal metodología utilizada en este estudio es la aplicación de resultados de modelos hidrológicos y climáticos de alta resolución para los próximos años y décadas con respecto a las condiciones climáticas de referencia. Dicha información cuantitativa permitirá evaluar el riesgo potencial en términos de recursos hídricos en esta región bajo un clima cambiante.



*Figura 5-1: La cordillera de los Andes en la provincia de San Juan*

*Fuente: Rivera and Arnould, 2020*

## Informe 2 - Proyecciones De La Oferta

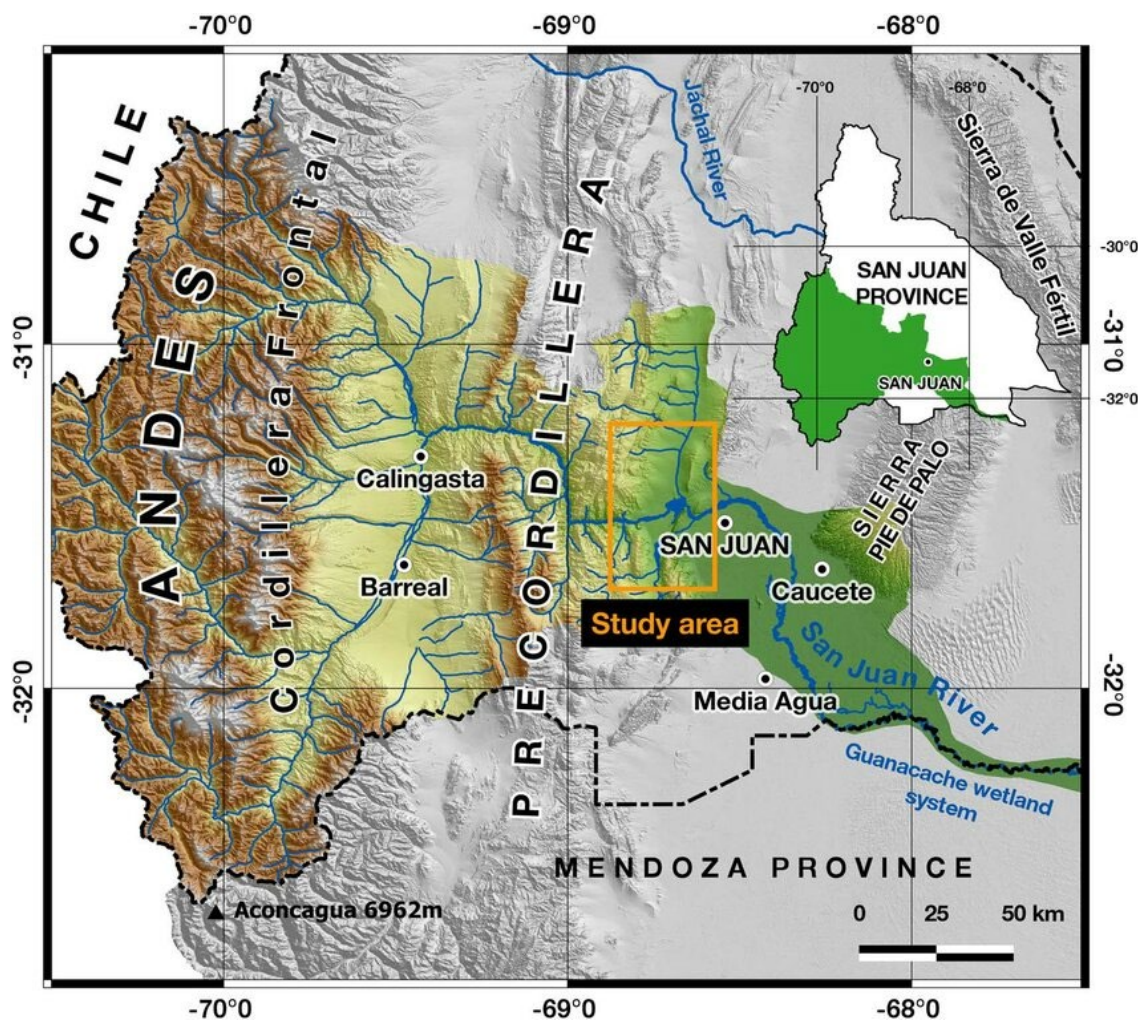


Figura 5-2: Los principales ríos de la provincia de San Juan

### 5.2. METODOLOGÍA

El propósito de este estudio es cuantificar el clima futuro y las condiciones hidrológicas en San Juan para calcular la futura disponibilidad de agua en la provincia con el fin de evaluar los impactos proyectados del cambio climático en los recursos hídricos de San Juan. Los datos iniciales son de un conjunto de datos globales y se analizaron modelos climáticos e hidrológicos regionales para un período de referencia (históricamente 30 años), así como para mediados y finales del siglo XXI. El análisis incluyó proyecciones y tendencias climáticas para diversas variables que afectan el ciclo hidrológico y la disponibilidad de agua del país, como la precipitación total, los cambios en los patrones de precipitación, la temperatura máxima, la evapotranspiración, la humedad del suelo, la escorrentía, las descargas de los ríos y los caudales de agua.

En este estudio se eligió el escenario climático IPCC RCP8.5 (un gráfico de emisiones de gases de efecto invernadero comparativamente altas). Usamos la media del conjunto de 5 modelos

## Informe 2 - Proyecciones De La Oferta

regionales para reducir las incertidumbres relacionadas con el modelo. Se analizaron las tendencias hidro-climáticas futuras vs. los resultados históricos de referencia (2020-2040 y 2040-2070 con respecto al periodo 1970-2000). Posteriormente, se calculó el cambio relativo entre los períodos futuros y el período de referencia para cada variable para el período futuro. La resolución de la cuadrícula espacial de los modelos climáticos fue de 20 km<sup>2</sup>.

Este escenario representa emisiones de gases de efecto invernadero comparativamente altas para la segunda mitad del siglo. El escenario se encuentra en el extremo superior del rango de escenarios futuros disponibles en la literatura. Responde a un desarrollo basado en el uso de combustibles fósiles, característico de la familia RCP (ahora llamado “SSP5”). Este escenario es el único con emisiones lo suficientemente altas como para producir un forzamiento radiativo de 8,5 W/m<sup>2</sup> para 2100, lo que generaría un calentamiento global superior a los niveles preindustriales de más de 4°C para finales del siglo XXI (ver Figura 5-1a).

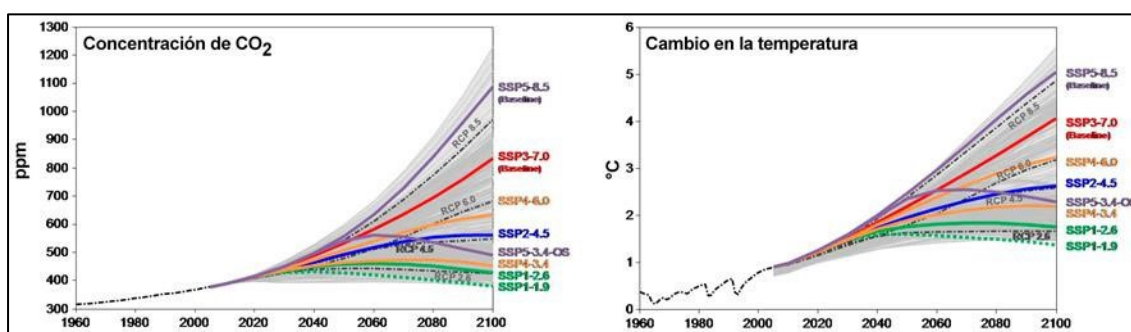


Figura 5-2a: Los principales ríos de la provincia de San Juan

La decisión sobre qué escenario RCP (“SSP5”) elegir está abierta a discusión. Elegimos utilizar el RCP8.5 porque refleja mejor que los otros escenarios de los niveles de emisiones globales observados en el pasado y en la actualidad. La Autoridad del Agua de Israel adoptó este escenario como escenario principal de su plan maestro para las próximas décadas.

El conjunto completo de las variables hidro-climáticas contiene análisis de anomalías para los siguientes parámetros:

- Temperaturas (Temperaturas medias, mínimas y máximas anuales)
- Evaporación potencial anual
- Cantidades de precipitación anual y la desviación estándar de la precipitación
- El índice de sequía (SPEI) para diferentes escenarios climáticos

## Informe 2 - Proyecciones De La Oferta

- Nevadas acumuladas para diferentes evaluaciones en las partes altas de la vertiente oriental de los Andes
- Los caudales esperados mensuales y anuales en los ríos de la provincia
- Volúmenes futuros de agua disponible en las provincias con respecto a la situación actual
- Se simularon los caudales anuales de 2 ríos de la provincia (agua disponible) con base en el modelo empírico desarrollado en este estudio y se utilizan variables meteorológicas como predictores del caudal:
  - A. Profundidad de la capa de nieve en las zonas altas de las cuencas de los ríos (4.000 metros, año presente y anterior).
  - B. Temperaturas (media anual y máxima)
  - C. Precipitación

Los caudales anuales interanuales (décadas) se basan en los modelos hidrológicos HYPE y VIC (Lindström et al., 2010). El modelo HYPE (modelo de predicciones hidrológicas para el medio ambiente) es un modelo de captación semi-distribuido basado en procesos físicos, que simula el flujo de agua y las sustancias en su camino desde la precipitación a través de diferentes compartimentos de almacenamiento y flujos hacia el mar.

Los modelos climáticos regionales reducidos utilizados en este estudio tienen una resolución de hasta 20 kilómetros y son del grupo de trabajo "HighResMip", que forma parte del proyecto IPCC CMIP6. En este estudio, utilizamos datos para analizar la temperatura, la evaporación y la precipitación de un conjunto de 5 modelos climáticos diferentes para el período 1950-2050 (consulte los detalles de los modelos climáticos en la Tabla 5-1).

Además de los indicadores climáticos de los modelos, en este estudio se seleccionaron indicadores de sequía cuantitativos y medibles para analizar las futuras condiciones hidroclimáticas y agroclimáticas en San Juan. Dichos indicadores/índices que contienen series temporales de largo plazo pueden mostrar tendencias y permitir analizar el clima futuro esperado con respecto a sus promedios de largo plazo (período base).

Para cuantificar los cambios en los patrones de precipitación y no solo las cantidades totales anuales, se analizaron las tendencias de desviación estándar diaria y anual.

## Informe 2 - Proyecciones De La Oferta

Tabla 5-1: Modelos climáticos globales y regionales que se utilizaron en el estudio

Nombre global del Modelo	Nombre del Modelo regional	Origen De Datos Del Modelo
EC-EARTH	KNMI-RACMO22E	Netherlands meteorological service
EC-EARTH	SMHI-RCA4	Swedish meteorological service
HadGEM2-ES	SMHI-RCA4	Swedish meteorological service
CM5A	IPSL-WRF33	U.S National Center for Atmospheric science
MPI-ESM-LR	CSC-REM	Max Planck Institute, Germany

### 5.3. RESULTADOS

#### 5.3.1. TENDENCIAS EN LOS PARÁMETROS HIDRO CLIMÁTICOS

##### 5.3.1.1. Temperatura y evaporación

Las figuras 5-3 – 5-7 muestran los cambios esperados (anomalías) para los principales parámetros hidro-climáticos en la provincia de San Juan. Los resultados muestran los cambios para el período 2020-2040 con respecto al período de referencia de 1970-2000. Las figuras 5-3 y 5-4 muestran el aumento esperado de las temperaturas medias en las próximas décadas, mientras que la figura 5-5 muestra las temperaturas mínimas anuales en los Andes de San Juan a una altura de 4.752 m.

Se puede observar en la figura 5-3 que se espera que las temperaturas aumenten en la provincia más que en muchas otras regiones de Argentina. La temperatura mínima en elevaciones altas en los Andes va a aumentar rápidamente (figura 5-5), a un ritmo más alto que la temperatura promedio, lo que significa un mayor derretimiento de la nieve en las próximas décadas.

Las figuras 5-6 muestran el resultado esperado del aumento de las temperaturas: una tendencia creciente en la evaporación. Se puede ver, por ejemplo, que se espera que la evaporación potencial anual en la región de Calingasta, San Juan, a la altura de 1.665 m aumente de 1.240 mm a alrededor de 1.300 mm al año para 2050.

## Informe 2 - Proyecciones De La Oferta

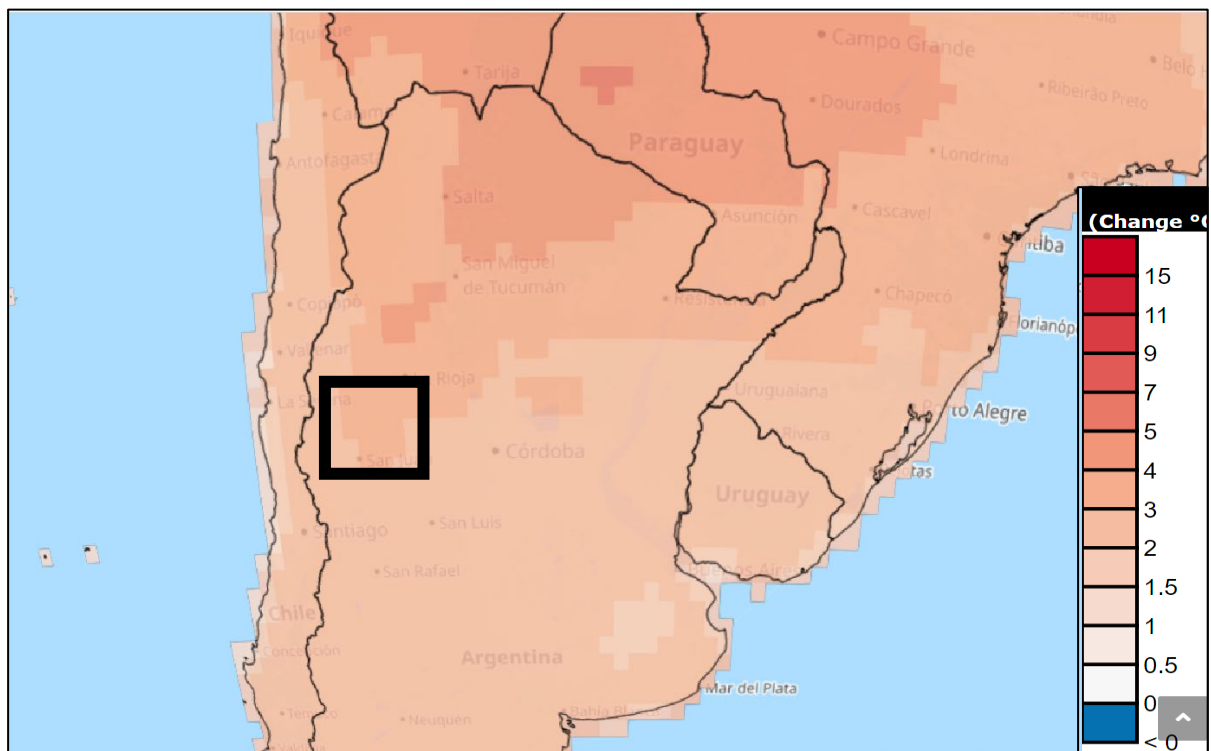


Figura 5-3: Anomalía de las temperaturas medias para el período 2020-2040 con respecto a la línea de base

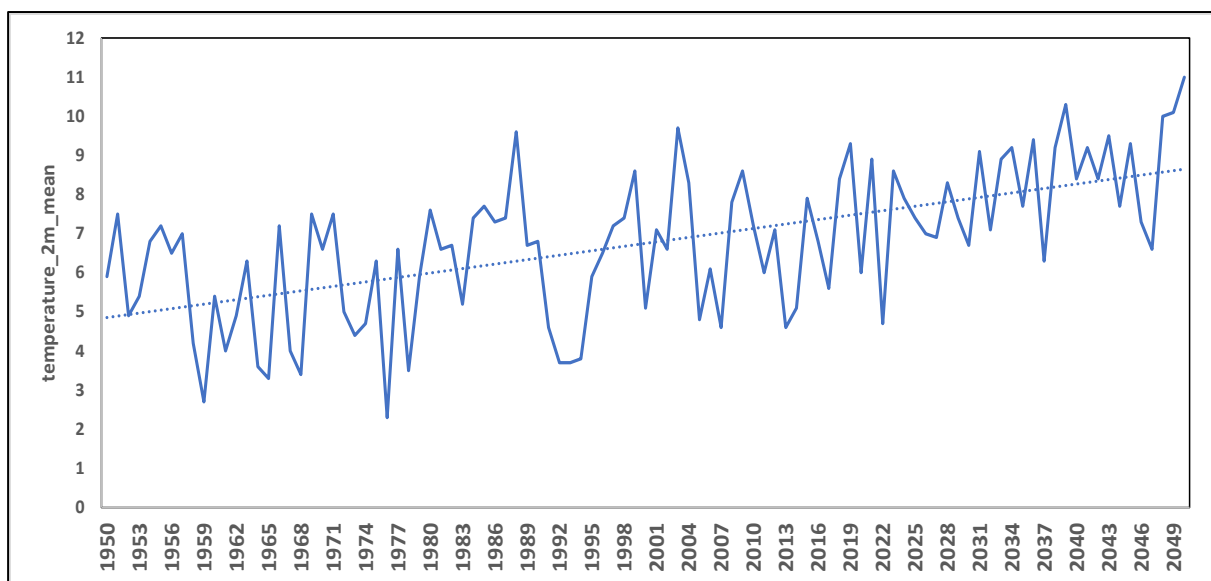


Figura 5-4: Temperaturas medias anuales en los Andes de San Juan a una altitud de 4.752 m

## Informe 2 - Proyecciones De La Oferta

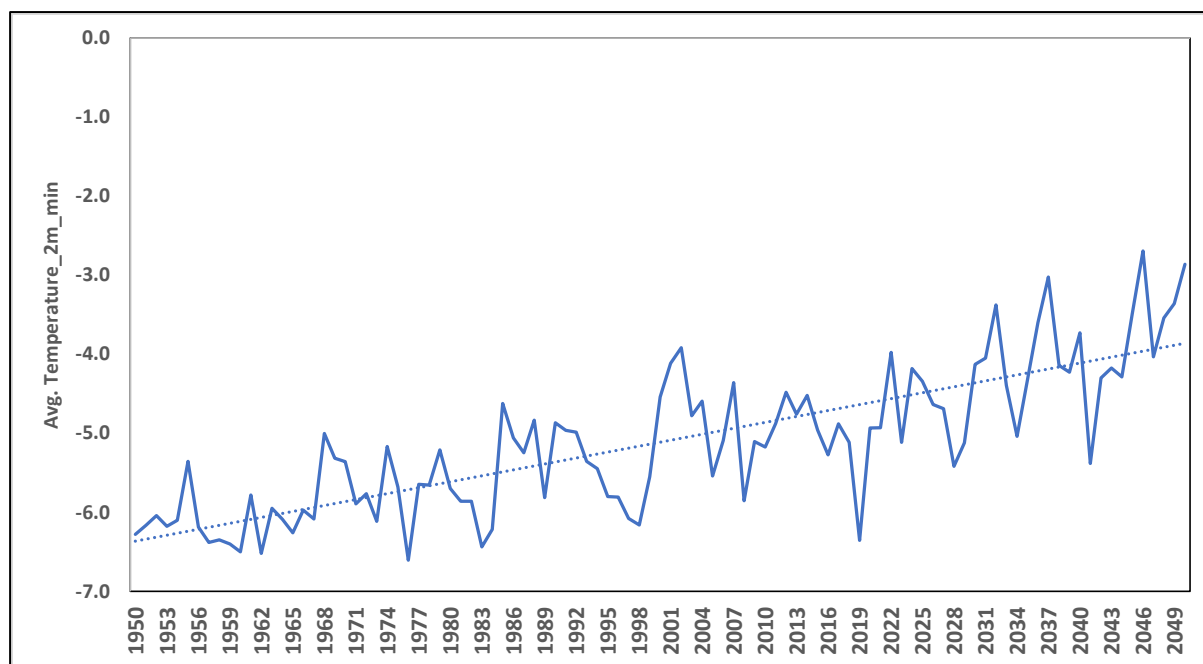


Figura 5-5: Temperaturas mínimas anuales en los Andes de San Juan a una altura de 4.752 m

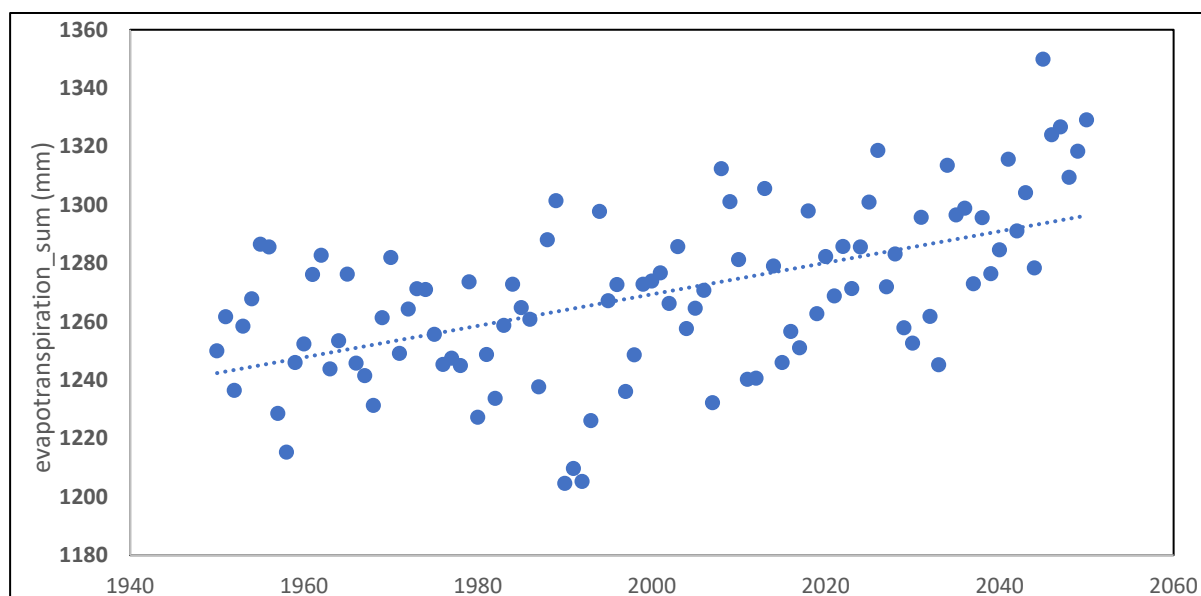


Figura 5-6: Evaporación anual en la región de Calingasta, San Juan, 1665m

### Precipitación

La Figura 5-7 muestra la anomalía total de precipitación en la región andina argentina para el período 2030-2050 con respecto a la línea de base 1970-2000. Se puede observar que se espera que la precipitación anual disminuya alrededor del 10% en toda la cordillera de los Andes, incluida la elevación alta en la provincia de San Juan (en triangular negro en la figura 5-7 y en

## Informe 2 - Proyecciones De La Oferta

la figura 5-8) para el período 2020-2040. La figura muestra la anomalía de precipitación mensual (%) para el período 2030-2039 con respecto a la línea de base 1995-2014. Se puede ver que la disminución de las precipitaciones en los Andes tendrá lugar principalmente durante los meses de invierno y primavera. Las cantidades anuales y mensuales de precipitación son un componente importante del ciclo hidrológico y en la gestión de los recursos hídricos, pero por importante que sea, no es el único factor que necesita ser analizado. El análisis adicional que puede ayudar a comprender el comportamiento y la propagación de la precipitación futura son los valores de la desviación estándar de la precipitación (STD). La Figura 6-10 muestra la desviación estándar de la precipitación anual simulada para San Juan (regiones de gran elevación) de 1950 a 2050. Se puede ver que la STD está aumentando a lo largo de los años de alrededor de 206 mm en el período de referencia de 1950 a aproximadamente 317 mm en 2050. Esta tendencia esperada significa una mayor variabilidad interanual de la precipitación en San Juan y, por lo tanto, en la disponibilidad de agua. Un aumento en las desviaciones estándar significa que podemos esperar tener años húmedos más extremos junto con años secos en San Juan en las próximas décadas.

La sequía es un factor importante en la gestión de los recursos hídricos. La información sobre la frecuencia, duración e intensidad esperadas de la sequía es muy importante para los sectores de la agricultura y el agua. El Índice Estandarizado de Evapotranspiración de Precipitación (SPEI) es un indicador de sequía, que calcula la sequía en función de la desviación estándar de la precipitación acumulada de la media a largo plazo, incluida la evapotranspiración. Los valores positivos indican condiciones positivas de balance hídrico (o húmedo) y los valores negativos indican condiciones negativas de balance hídrico (o secas). Este indicador muestra la frecuencia e intensidad de las sequías observadas a los 12 meses (períodos de acumulación). Los índices de sequía, como el SPEI, generalmente se calculan en diferentes escalas de tiempo para adaptarse a los diferentes tiempos de respuesta de los sistemas afectados por la sequía. Este indicador excluye otros factores que influyen en la sequía, como la geología y los suelos, el flujo de los arroyos, el derretimiento de los glaciares y la evapotranspiración. La Figura 5-11 presenta el índice de sequía SPEI en 5 escenarios climáticos diferentes para la provincia de San Juan. Los resultados muestran la media conjunta de todos los modelos globales CMAP6 del IPCC (los modelos climáticos más actualizados disponibles). Se puede observar que según el índice SPEI, se espera que las condiciones de sequía sean más frecuentes y dominantes en la provincia.

## Informe 2 - Proyecciones De La Oferta

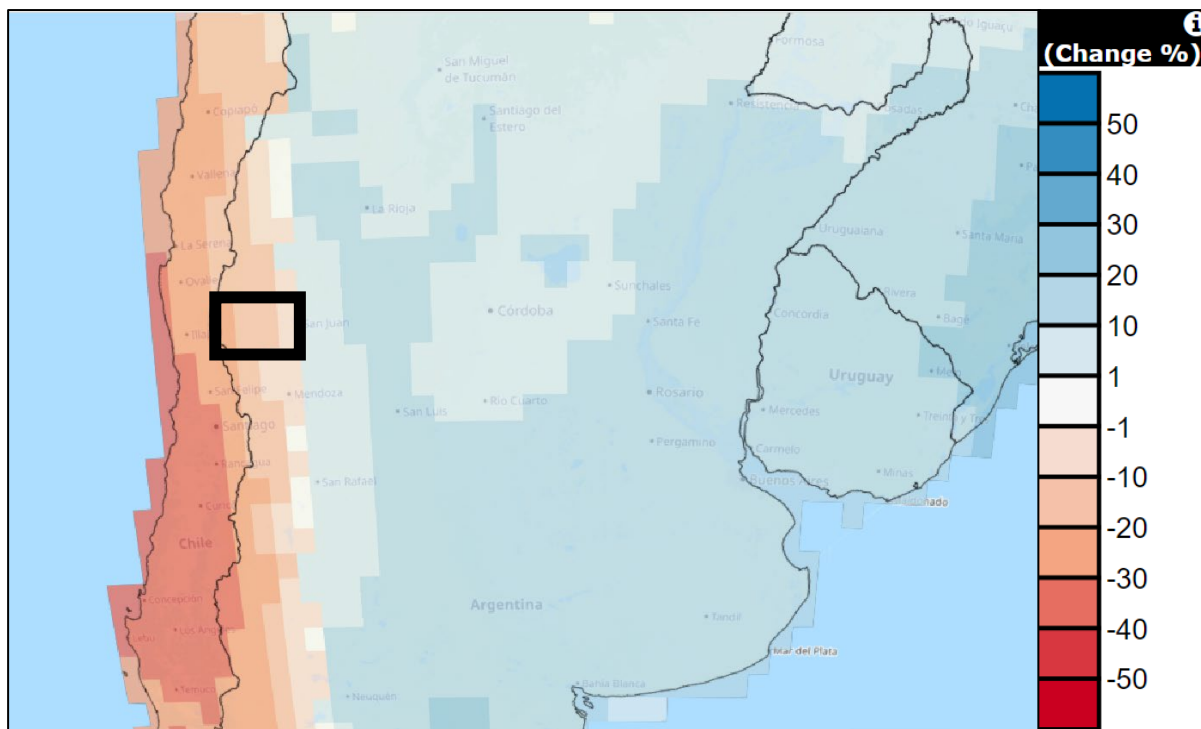


Figura 5-7: Anomalia de precipitación (%) para el periodo 2030-2050 con respecto a la Línea de base 1970-2000

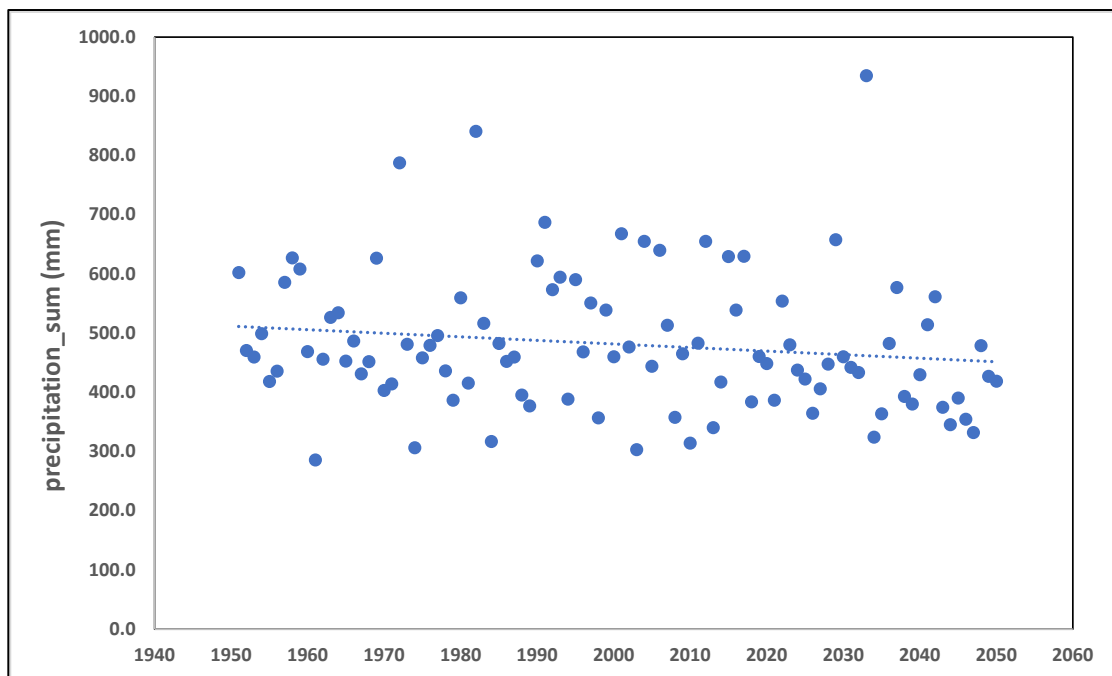


Figura 5-8: Precipitación anual simulada en las regiones de los Andes de gran elevación en San Juan

## Informe 2 - Proyecciones De La Oferta

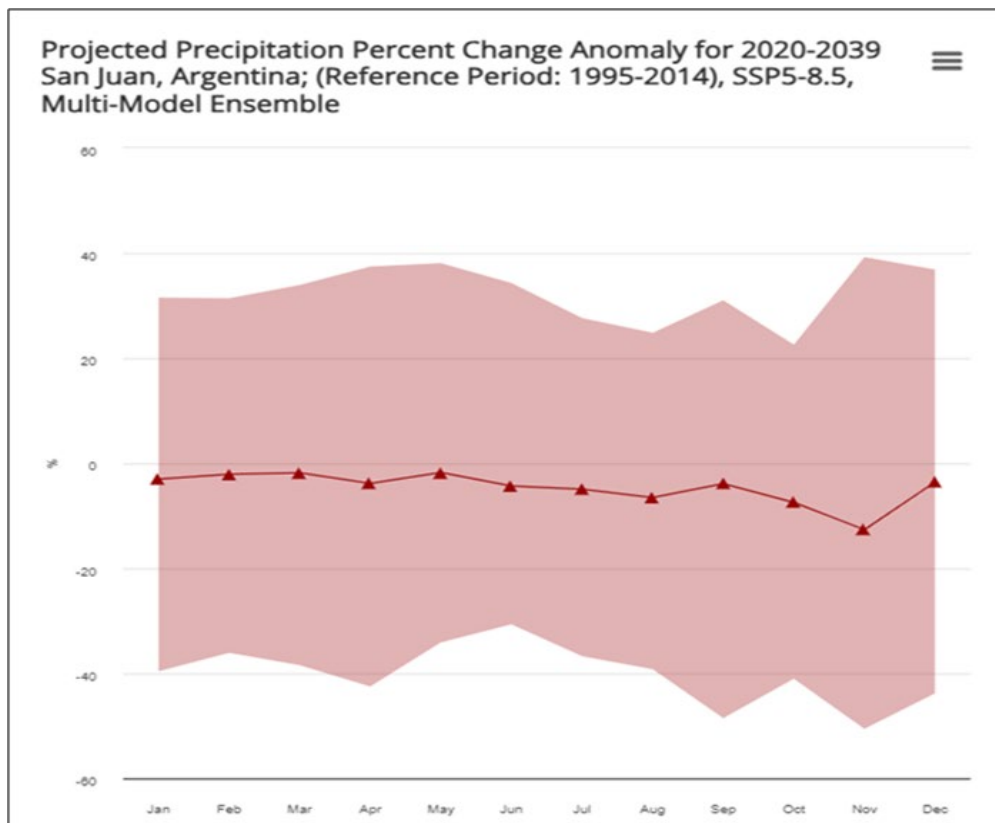


Figura 5-9: Anomalía de precipitación mensual (%) para el periodo 2030-2039 con respecto a la línea de base 1995-2014

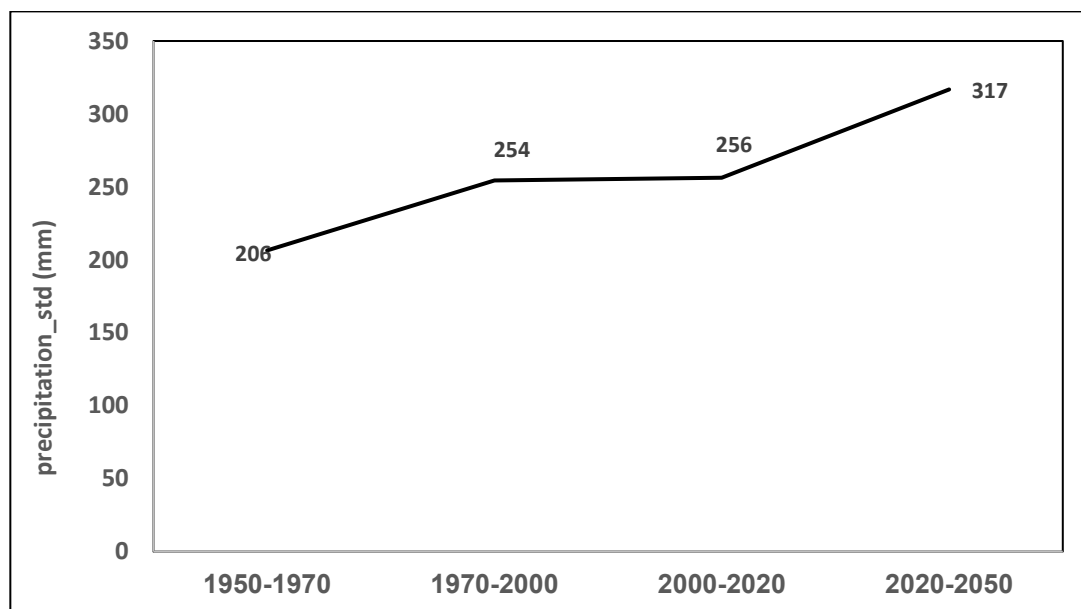


Figura 5-10: Desviación estándar de la precipitación anual para San Juan (regiones de gran elevación)

## Informe 2 - Proyecciones De La Oferta

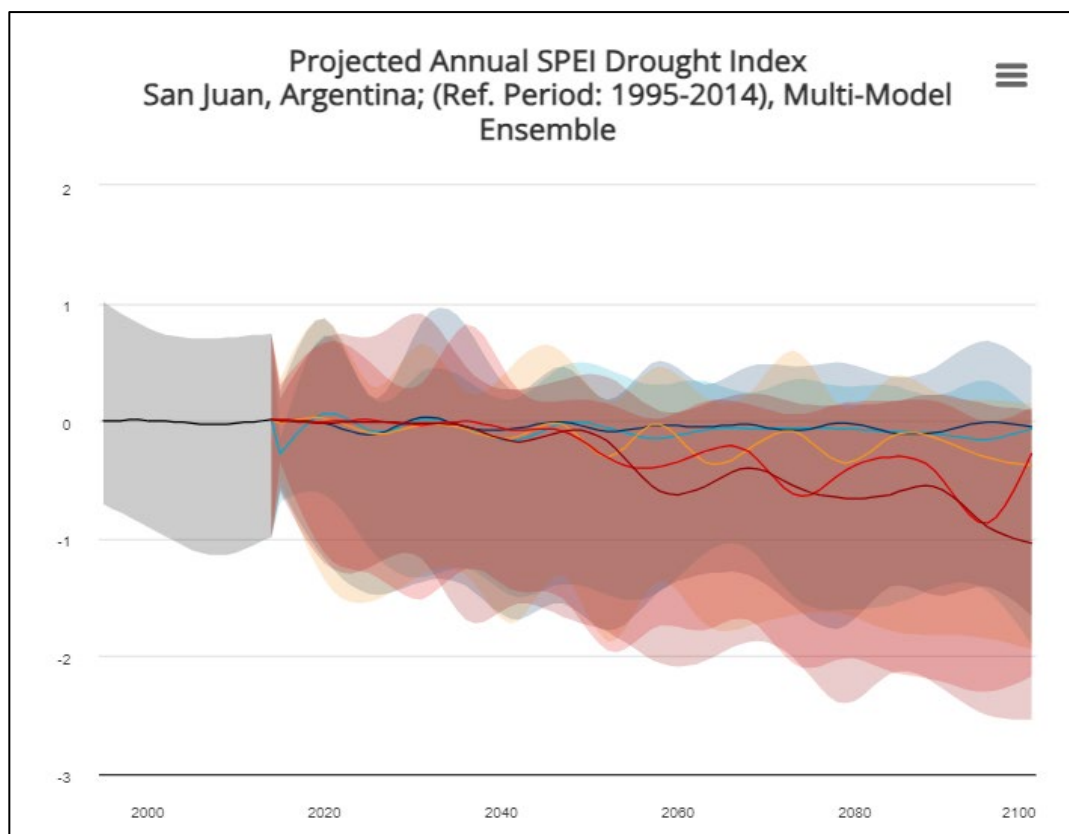


Figura 5-11: El índice de sequía SPEI (precipitación y evaporación) para diferentes escenarios climáticos para San Juan

### Nieve

La acumulación de nieve en los Andes es el principal recurso hídrico para la provincia de San Juan. El derretimiento de la nieve alimenta el flujo de la corriente que drena desde las laderas occidentales de los Andes río abajo, y se utiliza para la agricultura. Los efectos combinados del aumento de las temperaturas y la disminución de las precipitaciones ya causaron una disminución en la acumulación de nieve en los Andes y se espera que continúen disminuyendo. La Figura 5-12 muestra la tendencia de acumulación de nieve en elevación de nivel medio en los Andes (1665 m). Se puede observar que la acumulación de nieve disminuyó en alrededor del 50% de 20 cm en 1950 a 10 cm en 2050.

## Informe 2 - Proyecciones De La Oferta

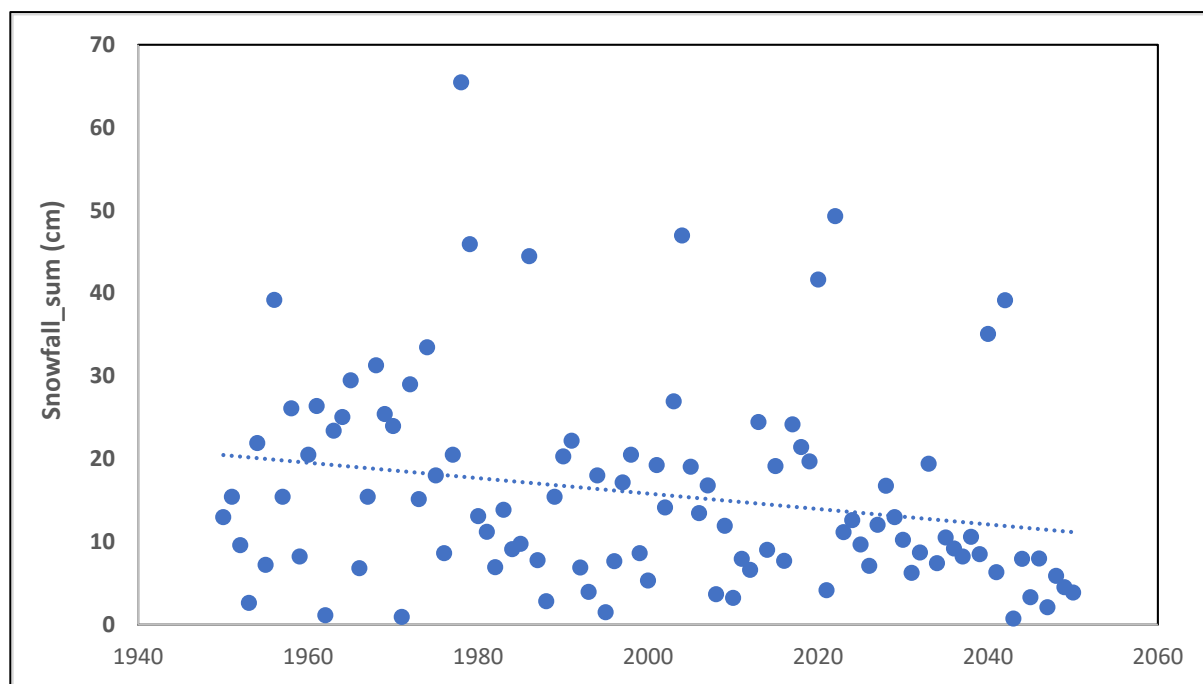


Figura 5-12: Acumulación anual de nevadas: Calingasta - San Juan, 1665m

La tendencia de las nevadas que se muestra en la Figura 5-12 (Acumulación anual de nevadas: Calingasta - San Juan, 1665 m) se basa en datos de nieve acumulada anual de la base de datos de reanálisis de EU ERA5. El conjunto de datos ERA5 combina datos observados de estaciones meteorológicas, aviones, boyas, radares y observaciones satelitales para crear un registro completo de las condiciones climáticas pasadas. Estos conjuntos de datos pueden llenar vacíos mediante el uso de modelos matemáticos para estimar los valores de diversas variables climáticas. Como resultado, los conjuntos de datos de reanálisis pueden proporcionar información meteorológica histórica detallada para lugares que pueden no haber tenido estaciones meteorológicas cercanas.

Más detalles sobre la base de datos ERA5<sup>12</sup>

<sup>1</sup> Hersbach, H., Bell, B., Berrisford, P., Biavati, G., Horányi, A., Muñoz Sabater, J., Nicolas, J., Peubey, C., Radu, R., Rozum, I., Schepers, D., Simmons, A., Soci, C., Dee, D., Thépaut, JN. (2023). Datos horarios ERA5 en niveles únicos desde 1940 hasta la actualidad. CEMPM.

<sup>2</sup> Muñoz Sabater, J. (2019). ERA5-Datos horarios terrestres desde 2001 hasta la actualidad. CEMPM.

## Informe 2 - Proyecciones De La Oferta

### 5.3.1.2. Tendencias en los parámetros hidrológicos

El promedio anual de agua disponible en la provincia de San Juan para el período 2000-2022 es de alrededor de 1.300 hectómetros cúbicos (el total de agua superficial del flujo de la corriente). Sin embargo, el agua disponible está disminuyendo drásticamente a lo largo de los años. La provincia perdió alrededor de 500 Hm<sup>3</sup> durante los últimos 20 años, de 1.600 Hm<sup>3</sup> a 1.100 Hm<sup>3</sup> en la actualidad, alrededor de 30 Hm<sup>3</sup> por año, como se puede ver en la figura 5-13. La figura 5-14 muestra la tendencia futura esperada para los volúmenes medios anuales de caudal para el período 2030-2050 con respecto a la línea de base de 1970-2000. Se puede observar que se espera una nueva disminución del agua disponible de alrededor del 20% en la provincia en las próximas décadas, como se puede observar en las figuras 5-15 y 5-16 que muestran los cambios mensuales y anuales (%) en los volúmenes de agua del río San Juan para los períodos 2030, 2050 y 2070 con respecto al período de referencia de 1970-2000.

Las Tablas 5-2 y 5-3 resumen los resultados del análisis climático e hidrológico y muestran los cambios esperados en los parámetros hidro-climáticos (tabla 6-2) y el agua disponible (tabla 5-3) en la provincia de San Juan para los diferentes períodos con respecto a 2000-2020.

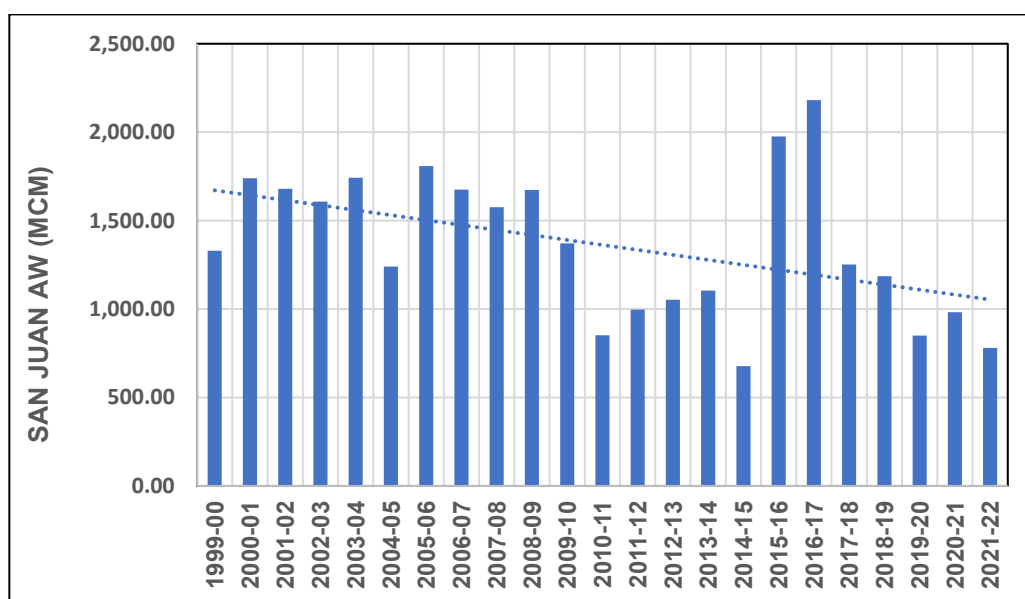


Figura 5-13: Los volúmenes de agua superficial disponibles en San Juan

Elaboración propia, Datos - DH

## Informe 2 - Proyecciones De La Oferta

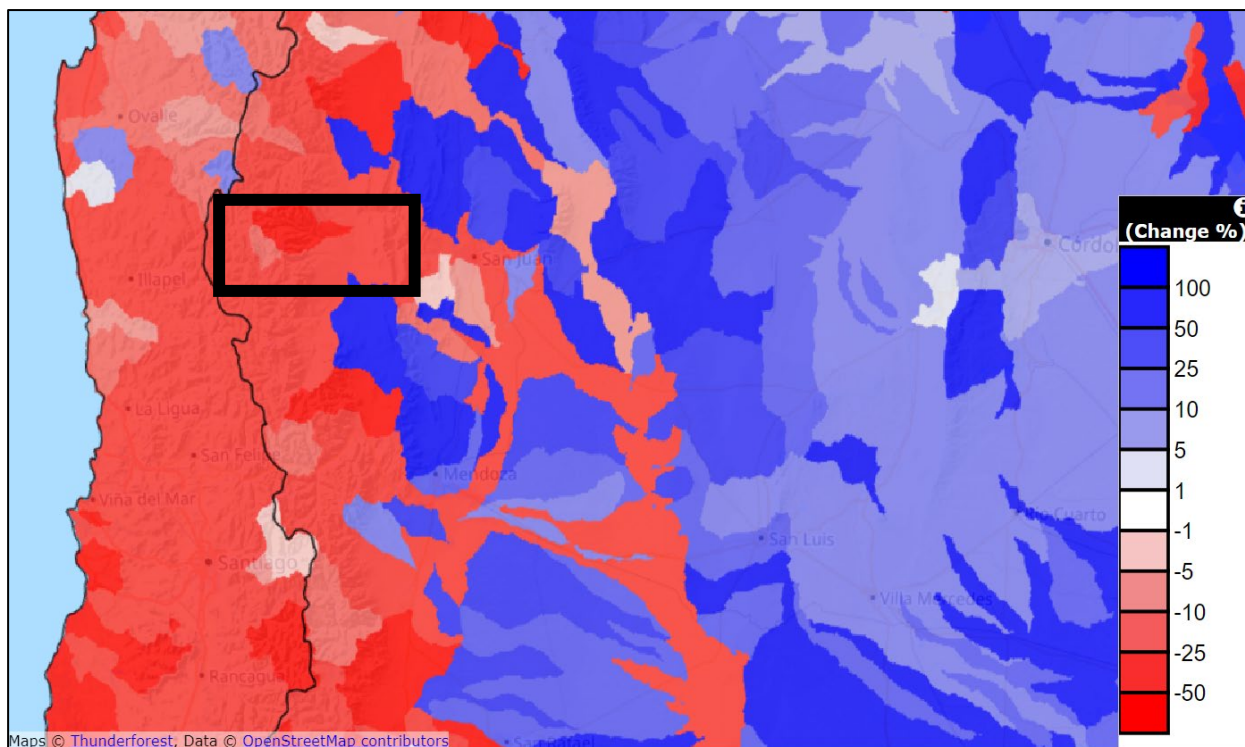


Figura 5-14: Anomalia de los volúmenes medios anuales de caudal para el periodo 2030-2050 con respecto a la línea de base de 1970-2000

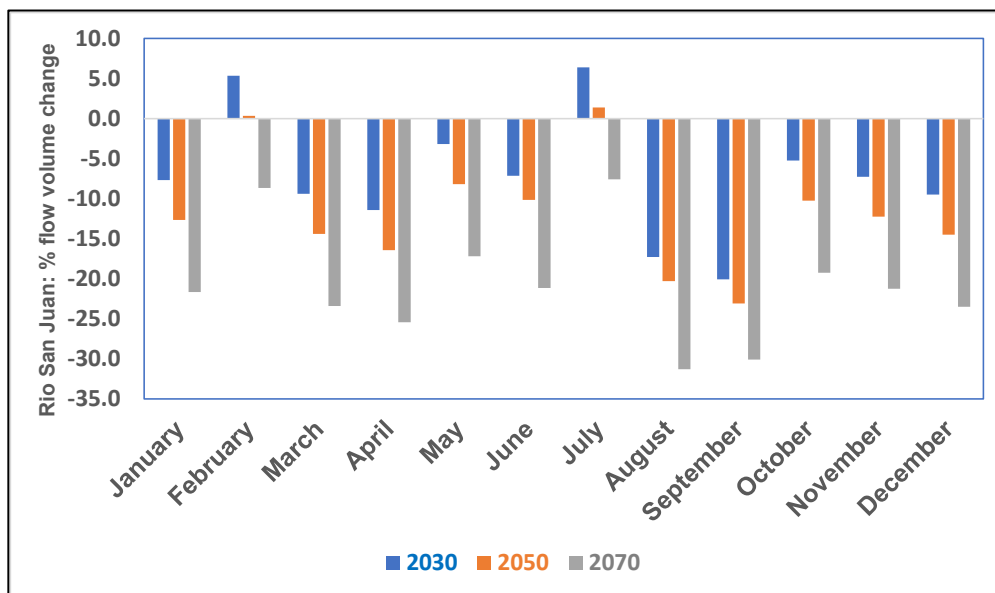


Figura 5-15: Cambios mensuales (%) en los volúmenes de agua del río San Juan para los periodos 2030, 2050 y 2070 con respecto al periodo de referencia de 1970-2000

## Informe 2 - Proyecciones De La Oferta

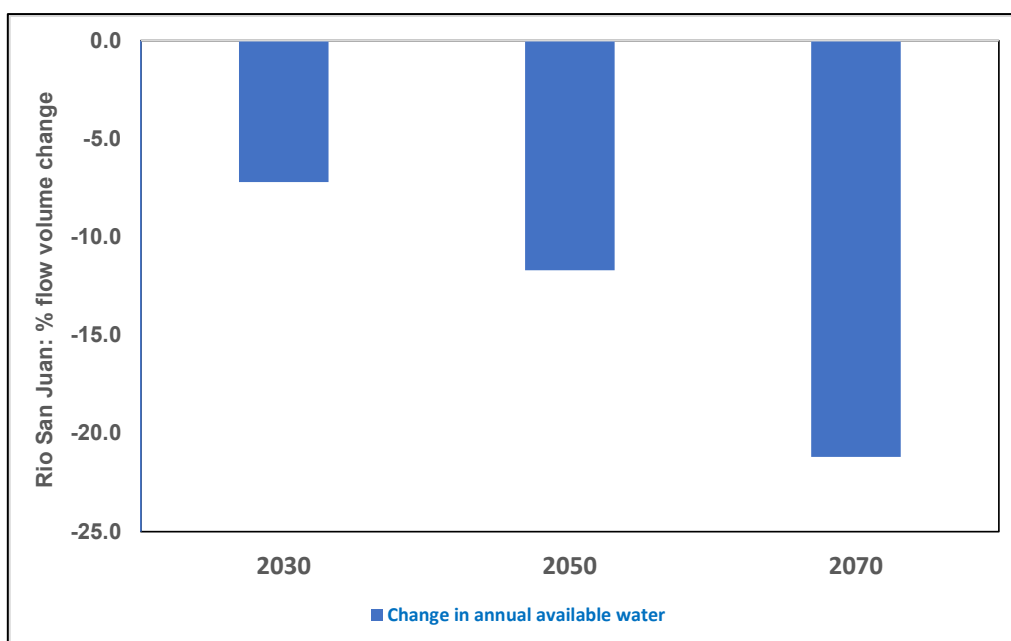


Figura 5-16: Cambios (%) en los volúmenes de agua disponibles de San Juan para los periodos 2030, 2050 y 2070 con respecto al periodo de referencia de 2000-2020

Tabla 5-2: Cambios esperados en los parámetros hidro climáticos en la provincia de San Juan para los diferentes periodos con respecto a 2000-2020

Periodo	Max. Temperaturas	Annual Precipitación	Evaporación	Volúmenes De Agua Disponibles
	(°C)	(%)	(%)	(%)
2030	0.9	-4%	2%	-8%
2050	1.7	-8%	4%	-12%
2070	2.6	-13%	7%	-21%

Tabla 5-3: Cambios esperados en el agua disponible en la provincia de San Juan para los diferentes periodos con respecto a 2000-2020

Periodo	Promedio anual de AW en Río San Juan (Hm <sup>3</sup> )	Variación (%) con respecto a 2000-2020
2000-2020	1,362	
2030	1,267	-8%
2050	1,199	-12%
2070	1,103	-21%

## Informe 2 - Proyecciones De La Oferta

### 5.4. DISCUSIÓN Y CONCLUSIONES

Los resultados presentados en este estudio muestran una clara tendencia al calentamiento en San Juan y la cordillera de los Andes. El aumento de las temperaturas y los cambios en las cantidades y patrones de precipitación conducirán a una mayor evaporación, aridez, derretimiento temprano de la nieve y menores valores más húmedos del suelo en el país. Nuestros hallazgos con respecto a la temperatura y precipitación están de acuerdo con otros estudios realizados en la región por Rivera et. al (2020), Arnould (2020), Dussaillant et al., (2019) y Maenza et al., (2017).

Además, el índice de sequía futura (SPEI) muestra una clara tendencia de sequía más frecuente e intensa. Se espera que esas tendencias proyectadas conduzcan a un aumento de alrededor del 5% en las demandas de agua para el riego agrícola en San Juan. Los resultados del modelo hidrológico presentes aquí muestran que se espera que disminuyan los volúmenes de flujo de corriente que fluyen desde los Andes hacia las tierras bajas de las provincias. Esta tendencia esperada conducirá a una reducción de 7.2% en 2030, 11.7% en 2050 y 21.2% hasta 2070 en el total de agua superficial disponible en la provincia. El conjunto de múltiples modelos climáticos también muestra una tendencia positiva de aumento de las precipitaciones sobre la región de las tierras bajas, principalmente debido al aumento de las tormentas convectivas en las estaciones relativamente cálidas. Sin embargo, un aumento de unos pocos porcentajes en las estaciones de transición y las precipitaciones de verano (precipitaciones monzónicas de verano) en la zona semiárida de la provincia será pequeño y apenas afectará los balances de recursos hídricos en la provincia. En todo caso, conducirá a inundaciones repentinas dañinas debido a mayores intensidades precipitantes.

La provincia de San Juan se verá afectada por efectos similares al cambio climático que otras regiones en el lado negativo de la circulación celular de Hadley alrededor de las latitudes 30 en el norte y sur de Hampshire (Rivera et. al, 2020).

La célula de Hadley, también conocida como circulación de Hadley, es una circulación atmosférica tropical a escala global en la que el aire se eleva cerca del ecuador, fluye hacia los polos cerca de la tropopausa a una altura de 12 a 15 km sobre la superficie de la Tierra, se enfría y desciende en el subtropicales a unos 25 grados de latitud y luego regresando hacia el ecuador cerca de la superficie. Es una circulación térmica directa dentro de la troposfera que surge debido a las diferencias de insolación y calentamiento entre los trópicos y subtrópicos. La célula de Hadley del hemisferio sur es ligeramente más fuerte en promedio que su contraparte del norte y se extiende ligeramente más allá del ecuador hacia el hemisferio norte. Durante los

## Informe 2 - Proyecciones De La Oferta

meses de verano e invierno, la circulación de Hadley está dominada por una única célula transecuatorial con aire que asciende en el hemisferio de verano y desciende en el hemisferio de invierno.

El clima global está muy influenciado por la estructura y el comportamiento de la circulación de Hadley. Las ramas que se hunden de las células de Hadley dan lugar a las dorsales oceánicas subtropicales y suprimen las precipitaciones. Muchos de los desiertos y regiones áridas de la Tierra están ubicados en los subtrópicos coincidiendo con la posición de las ramas que se hunden.

Varios estudios (Cai et al., 2012, Villamayor et al., 2019; Rivera y Arnould, 2020; Rivera et al., 2020) han observado en varias regiones de latitudes medias del hemisferio sur una disminución sostenida de las precipitaciones a largo plazo a lo largo de la Cordillera de los Andes, probablemente atribuida a la expansión hacia los polos de la rama descendente de la Circulación Hadley. Demostraron que la circulación de células de Hadley se ha expandido hacia el sur a lo largo de los años debido al cambio climático que provocó la supresión de las precipitaciones en lugares como San Juan. Se espera que los cambios proyectados en los patrones de circulación regional, como la expansión hacia el sur de la Circulación de Hadley, favorezcan la continuidad de la disminución de las precipitaciones que se ha observado desde el siglo pasado, lo que conducirá a condiciones de sequía más frecuentes (Cook et al., 2020; Fahad et al., 2020; Rivera et al., 2020; Spinoni et al., 2020).

La disminución del agua disponible además del aumento de la evaporación conducirá a un aumento de las demandas de riego para la agricultura con respecto a las condiciones actuales. La provincia no podrá suministrar la cantidad actual de agua para satisfacer las demandas. Los efectos combinados de una disminución en los volúmenes naturales de agua, además del aumento en el consumo aguas arriba de la cuenca, pueden conducir a una pérdida de alrededor del 20% del agua disponible de San Juan para 2050 y del 25% para 2070.

Incluso en un escenario que tiene las mismas demandas totales de agua, será necesario mejorar las estrategias de mitigación para hacer frente a las condiciones de sequía actuales y futuras. De lo contrario, el sector agrícola en la provincia necesitará volúmenes adicionales de agua en las próximas décadas debido a un aumento en la evaporación y una disminución en el agua superficial disponible.

### 6. AGUA DISPONIBLE PROYECTADA PARA 2030, 2040, 2050

#### 6.1. AGUA SUPERFICIAL

La proyección de agua superficial disponible se realizó como parte del estudio de cambio climático, se utiliza el modelo empírico desarrollado en este estudio y variables meteorológicas como predictores de caudal:

- a) Profundidad de la capa de nieve en las zonas altas de las cuencas de los ríos (4.000 metros, año actual y anterior).
- b) Temperaturas (media anual y máxima)
- c) Precipitación

La siguiente tabla muestra el agua disponible observada en San Juan (2000-2020) en comparación al agua disponible calculada (2000-2020) y pronosticada (2020-2050) en la provincia de San Juan, La tabla muestra el agua disponible observada (2000-2021) y simulada (2000-2050). El agua disponible simulada se calculó con base en un modelo desarrollado especialmente para este estudio. El resultado del modelo son los volúmenes de caudal anuales. Los datos de entrada que alimentan el modelo son tres variables meteorológicas que sirven como predictores de los volúmenes de caudal. Las fuentes de los datos meteorológicos son los modelos climáticos utilizados en este estudio (consulte la descripción de los modelos climáticos en la tabla 5.1).

A. Predicción de la profundidad del manto de nieve (cm) en las zonas de gran elevación de los Andes (4.000 metros) ubicadas en las cuencas de los ríos San Juan y Jáchal. La acumulación de nieve representa el contenido de agua que se está transportando al Río.

B. Temperaturas en las partes superiores de la cuenca para representar el deshielo (temperatura media anual y máxima en la cuenca)

C. Cantidades de precipitación anual. La precipitación representa el potencial de la cantidad total de agua superficial en la cuenca (menos la evaporación y la infiltración).

Mediante la aplicación de regresión de múltiples variables utilizando las series históricas de tiempo de agua disponible observada para cada río, se establecieron los coeficientes de regresión para cada variable (nieve, temperatura y precipitación). Con base en esos coeficientes, se calcularon los volúmenes de caudal.

## Informe 2 - Proyecciones De La Oferta

Esta metodología es aceptable en otros lugares del mundo y se utilizó para calcular la deambulaci3n pasada y futura en la nieve en lugares como Italia y California<sup>345</sup>

Tabla 6-1: Agua disponible anual observada vs. prevista en la provincia de San Juan

Año	AD, Rio San Juan (HM <sup>3</sup> )	Proyecci3n de AD, Rio San Juan (HM <sup>3</sup> )	Año	AD, Rio San Juan (HM <sup>3</sup> )	Proyecci3n de AD, Rio San Juan (HM <sup>3</sup> )
2000	1,718	1607	2026		880
2001	1,658	1518	2027		1113
2002	1,585	1876	2028		1067
2003	1,721	1721	2029		684
2004	1,218	1328	2030		1553
2005	1,787	1588	2031		1924
2006	1,654	1554	2032		1205
2007	1,554	1693	2033		702
2008	1,741	1271	2034		1307
2009	1,350	1125	2035		1477
2010	830	1250	2036		1019
2011	975	998	2037		664
2012	1,031	1089	2038		1129
2013	1,082	1061	2039		1391
2014	661	758	2040		969
2015	1,755	1739	2041		568
2016	1,764	1821	2042		1050
2017	988	961	2043		1191
2018	927	903	2044		936
2019	642	836	2045		793
2020	803	686	2046		663
2021	654	864	2047		481
2022		1122	2048		533
2023		1433	2049		487
2024		1459	2050		582
2025		802			

Fuente: Informe Cambio Climático, Mekorot 2023

Los volúmenes de agua disponibles previstos nos permiten calcular los percentiles<sup>6</sup>

La siguiente tabla presenta los percentiles calculados:

Tabla 6-2: Agua disponible Rio San Juan, percentiles anuales - Agua disponible (Hm<sup>3</sup>)

Percentiles	5%	10%	25%	50%	75%	90%	95%
2000-2020 (Hm <sup>3</sup> )	795.5	874.5	1040.4	1254.9	1515.3	1784.7	1976.5
2030 (Hm <sup>3</sup> )	696.9	767.4	915.5	1107.7	1341.7	1584.5	1757.8
2040 (Hm <sup>3</sup> )	516.7	577.4	707.7	881.6	1099.6	1332	1501.3
2050 (Hm <sup>3</sup> )	421.1	469.7	574	712.7	886	1070.2	1204

3 Meloyund, V., Leira, B., H3iseth, KV y Liso, KR (2007). Predicci3n de la densidad de la nieve utilizando datos meteorol3gicos. Aplicaciones meteorol3gicas, 14(4), 413-423.

4 Jonas, T., Marty, C. y Magnusson, J. (2009). Estimaci3n del equivalente en agua de la nieve a partir de mediciones de la profundidad de la nieve en los Alpes suizos. Revista de Hidrología, 378(1-2), 161-167.

5 Hill, D. F., Burakowski, E. A., Crumley, R. L., Keon, J., Hu, J. M., Arendt, A. A., Wikstrom Jones, K. y Wolken, G. J.: Conversi3n de la profundidad de la nieve en equivalente de agua de nieve utilizando variables climatol3gicas. The Cryosphere, 13, 1767-1784.

6 un percentil es un valor en la distribuci3n que contiene un porcentaje específico del grupo debajo de él.

La definici3n general es que el pth percentil es el valor que contiene el p% de los valores por debajo de él.

## Informe 2 - Proyecciones De La Oferta

*Elaboración propia*

Los percentiles representan la probabilidad de que ocurra el evento, por ejemplo:

En los últimos 20 años, la probabilidad de que el Volumen de agua disponible anual sea de 795 Hm<sup>3</sup> es de una vez en 20 años, de la misma manera para los otros percentiles.

*Tabla 6-3: Probabilidad de Ocurrencia*

Percentiles	5%	10%	25%	50%	75%	90%	95%
Probabilidad de Ocurrencia	Cada 20 años	Cada 10 años	Cada 4 años	Cada 2 años	Cada 4 años	Cada 10 años	Cada 20 años

Se pueden analizar diferentes escenarios según la tabla 7-2, por ejemplo:

En la próxima década (2020 - 2030) la probabilidad de que el volumen de agua disponible sea de 1.757 Hm<sup>3</sup> o más, es de una vez cada 20 años, en ese caso la provincia deberá estar preparada en cuanto a la disponibilidad de almacenamiento de agua.

El otro evento opcional que puede ocurrir una vez en 20 años es que el volumen de agua disponible será de 697 Hm<sup>3</sup> o menor, que es menos que el año más seco en los últimos 20 años. En ese caso la provincia debería tener un plan de acción para reducir el suministro de agua a todos los sectores.

Otra tendencia que se puede observar es que en el futuro la probabilidad de tener un año seco (percentiles 25%, 10%, 5%) es cada vez más relevante, el evento de una vez cada 20 años durante la década de 2030 pasa a ser una vez cada 4 años en 2040.

*Tabla 6-4: Probabilidad de Ocurrencia – Años Secos*

Percentiles	5%	10%	25%	50%	75%	90%	95%
2000-2020 (Hm <sup>3</sup> )	795.5	874.5	1040.4	1254.9	1515.3	1784.7	1976.5
2030 (Hm <sup>3</sup> )	696.9	767.4	915.5	1107.7	1341.7	1584.5	1757.8
2040 (Hm <sup>3</sup> )	516.7	577.4	707.7	881.6	1099.6	1332	1501.3
2050 (Hm <sup>3</sup> )	421.1	469.7	574	712.7	886	1070.2	1204

*Elaboración propia*

*Tabla 6-5: Agua disponible Rio Jáchal, percentiles anuales - Agua disponible (Hm<sup>3</sup>)*

Percentiles	5%	10%	25%	50%	75%	90%	95%
2000-2020 (Hm <sup>3</sup> )	230	255.4	303	366.6	443.9	528.3	587.8
2030 (Hm <sup>3</sup> )	201.5	224.1	266.7	323.6	393.1	469.2	523
2040 (Hm <sup>3</sup> )	149.2	168.7	206.2	257.7	322.5	395.4	448.2
2050 (Hm <sup>3</sup> )	121.6	137.3	167.2	208.3	259.8	317.6	359.3

*Elaboración propia*

## Informe 2 - Proyecciones De La Oferta

### 6.2. AGUA SUBTERRÁNEA

Para calcular la disponibilidad de agua subterránea prevista, debemos actualizar el balance del acuífero (Tabla No. 8-4, Capítulo 8, Informe 1) de acuerdo con los efectos del cambio climático:

la disminución prevista de las precipitaciones anuales disminuirá el componente de infiltración al acuífero, la siguiente tabla presenta la disminución de las precipitaciones para el 2030,40,50:

Tabla 6-6: Cambio en las precipitaciones con respecto a 2000-2020

2030	Cuenca	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11	12	Annual
	SJ	-2%	-3%	-1%	-4%	-1%	-5%	-7%	-10%	-5%	-9%	-15%	-2%	-5%
	Jachal	2%	4%	5%	-2%	-1%	-5%	-7%	-7%	-4%	-7%	-10%	0%	-3%

2040	Cuenca	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11	12	Annual
	SJ	-2%	-3%	-1%	-4%	-3%	-6%	-8%	-10%	-8%	-9%	-15%	-2%	-6%
	Jachal	2%	4%	5%	-2%	-1%	-5%	-8%	-8%	-5%	-7%	-10%	0%	-3%

2050	Cuenca	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11	12	Annual
	SJ	-2%	-3%	-1%	-4%	-5%	-7%	-9%	-10%	-11%	-9%	-15%	-2%	-7%
	Jachal	2%	3%	4%	-2%	0%	-5%	-9%	-8%	-6%	-7%	-10%	0%	-3%

Fuente: Informe Cambio Climático, Mekorot 2023

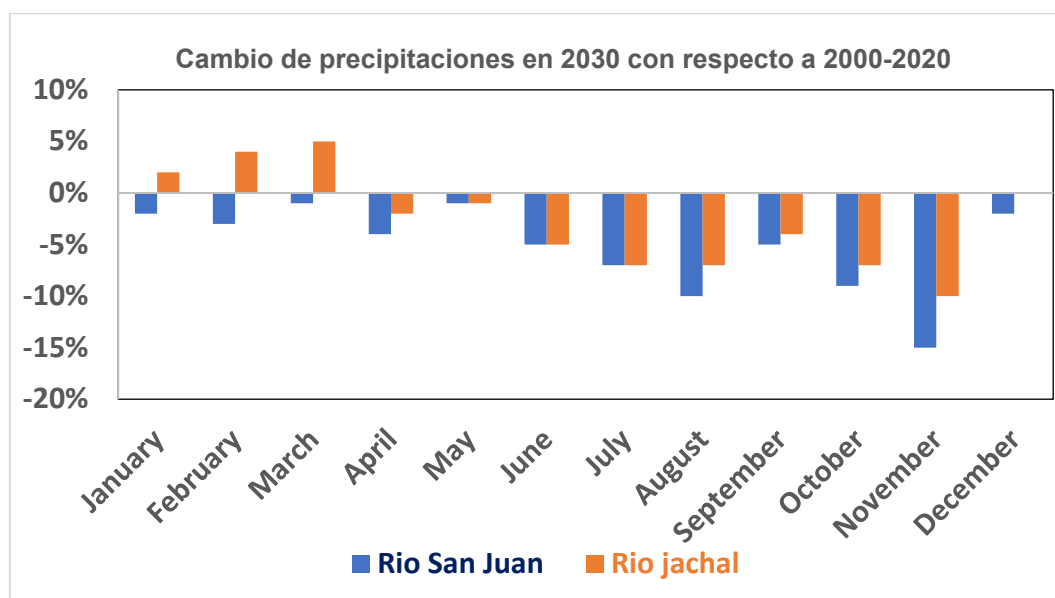


Figure 6-1: Cambio de precipitaciones en 2030 con respecto a 2000-2020

Fuente: Informe Cambio Climático, Mekorot 2023

## Informe 2 - Proyecciones De La Oferta

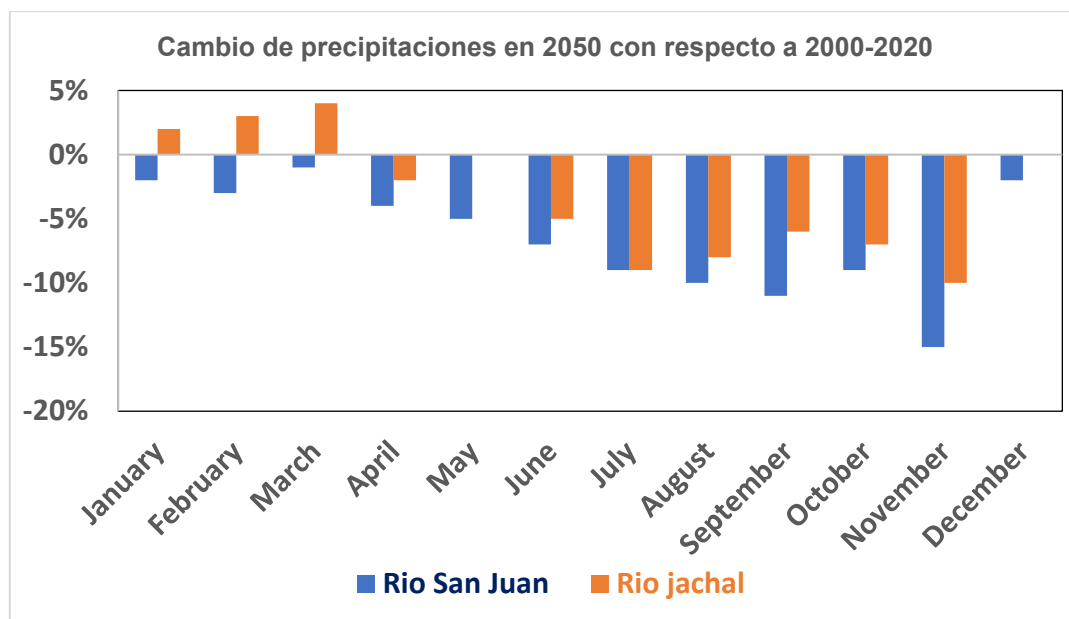


Figure 6-2: Cambio de precipitaciones en 2050 con respecto a 2000-2020

Fuente: Informe Cambio Climático, Mekorot 2023

La recarga anual de agua superficial resultante de las infiltraciones del riego agrícola y las pérdidas dentro de la red de suministro de agua potable, estos componentes pueden calcularse de acuerdo con la demanda proyectada (informe 3 - proyecciones de demanda).

La demanda agrícola va en aumento debido al aumento de la evapotranspiración que es el factor que determina la demanda de cultivos.

La siguiente tabla presenta los valores proyectados de producción de agua subterránea y la recarga proyectada al acuífero para las décadas 2030-2040-2050, según los valores proyectados de agua disponible de los percentiles 50%, 25% y 10%.

## Informe 2 - Proyecciones De La Oferta

Tabla 6-7: Escenarios Futuros - Acuífero Tulum

Tulum confinado + freático						
Año	Agua Disponible Percentiles (%)	Agua Disponible (Hm <sup>3</sup> )	Recarga Superficial Anual (Hm <sup>3</sup> )	Recarga Anual de Aguas Subterráneas (Hm <sup>3</sup> )	Producción Anual de Agua Subterránea (Hm <sup>3</sup> )	Cambio Anual de Almacenamiento de Agua Subterránea (Hm <sup>3</sup> )
2022		671	115.8	36.7	494	-341.5
2030	50%	1,159	118.63	33.48	441.40	-289.29
	25%	821	113.62	33.48	476.91	-329.81
	10%	689	111.65	33.48	506.25	-361.12
2040	50%	1,050	118.67	30.34	441.40	-292.39
	25%	664	112.92	30.34	513.47	-370.21
	10%	587	111.78	30.34	530.47	-388.35
2050	50%	969	119.01	27.98	447.44	-300.45
	25%	663	114.45	27.98	515.34	-372.92
	10%	512	112.22	27.98	548.63	-408.44

*Elaboración propia*

El almacenamiento estimado del acuífero de Tulum es de 7142 Hm<sup>3</sup> (INA), según tabla 6-7, sin ningún ajuste a los equipos de bombeo, el almacenamiento durará hasta por 18 a 24 años.

### 6.3. RESUMEN DEL AGUA DISPONIBLE PROYECTADA

El Informe N° 2 se enfoca en la evaluación de las proyecciones de recursos hídricos (aguas subterráneas y superficiales), para la Provincia de San Juan, para los años decenales 2030, 2040 y 2050. Junto con el Informe N° 3 (Proyecciones de Demanda de Agua), se presentará el balance de agua.

Como se explica, los datos disponibles sobre aguas subterráneas en San Juan no son suficientes. se desconoce el número de pozos en la provincia, las mediciones de niveles de agua están disponibles solo para los años 2021 - 2022, pero diferentes temporadas y para diferentes pozos, por lo tanto, no son útiles.

No se mide la extracción de agua subterránea, el valor mencionado se estima a través de la demanda agrícola.

El almacenamiento de agua subterránea fue estimado por el INA, pero sólo al acuífero de Tulum.

## Informe 2 - Proyecciones De La Oferta

Por todas estas razones, es posible preparar un balance de aguas subterráneas sólo en el Valle de Tulum.

*Tabla 6-8: Potencial hídrico disponible - Valle de Tulum*

Fuente de agua / Año	2030	2040	2050
Agua Superficial (Percentiles 50%)	1,159	1,050	969
Agua Subterránea (Percentiles 50%) *	310.5	310.5	310.5
Potencial de Agua Tratada**	91	97	106
<b>Total</b>	<b>1561.0</b>	<b>1457.3</b>	<b>1384.6</b>

\*Volumen de agua subterránea - valor calculado según la demanda proyectada

\*\* No es una fuente disponible

*Elaboración propia*

El acuífero Ullum - Zonda es, según los cálculos, un acuífero sustentable, con una recarga anual estimada de agua superficial superior al volumen anual extraído.

*Tabla 6-9: Balance Acuífero Ullum - Zonda (Percentiles 50%)*

Ullum-Zonda	2022	2030	2040	2050
Recarga Superficial Anual (Hm <sup>3</sup> )	46.5	46.3	45.8	45.8
Producción anual de agua subterránea (Hm <sup>3</sup> )	15	12.3	12.3	12.3
Cambio anual de almacenamiento de agua subterránea (Hm <sup>3</sup> )	31.5	34	33.5	33.5

*Elaboración propia*

### 7. CONCLUSIONES

De la proyección del agua disponible se puede inferir que en el futuro los caudales de agua superficial disminuirán hasta en un 24% respecto al promedio de los últimos 20 años.

También se puede inferir que la probabilidad de tener un año seco será mayor en el futuro, si comparando con el presente, el año 2022 con 671 Hm<sup>3</sup> para la agricultura fue el año más seco de los últimos 20 años, en el futuro será común. con probabilidad de ocurrir cada 4 años en 2040.

En cuanto a las tendencias del agua subterránea, dado que la información disponible sobre los acuíferos (niveles de agua, volumen extraído, etc.) no es adecuada, es imposible presentar valores concretos, sin embargo, dado que la recarga del agua subterránea se debe principalmente a aguas superficiales, podemos concluir que este recurso disminuirá en consecuencia.

### 8. BIBLIOGRAFÍA

#### 8.1. BIBLIOGRAFÍA CAPÍTULO 5

Battistella (2022) Informe De Avance “Plan De Estudio Y Monitoreo De Agua Subterránea En Los Acuíferos De Los Valles De Tulum Y Ullum-Zonda”, Provincia De San Juan, Calidad De Agua Subterránea Mediciones Realizadas En Octubre, Noviembre Y diciembre 2021. Technical Report No. IT-406, INA/SCRAS.

Battistella and Luna (2022) Informe Final “Plan De Estudio Y Monitoreo De Agua Subterránea En Los Acuíferos De Los Valles De Tulum Y Ullum-Zonda. Provincia De San Juan”, Caracterización Hidroquímica e Hidrológica de la Red de Monitoreo. Technical Report No. IT-413, INA/SCRAS.

CFI-Mekorot-DH (2023) La Elaboración De Un Plan Maestro Para El Sector Hídrico De La Provincia De San Juan, Informe No. 1.1 - Análisis de la Situación Actual de los Recursos Hídricos.

Victoria et al. (2009) Informe Final, Investigación Hidrogeológica Del Área Cerrilo Valdivia-Ramblon, Departamento: Sarmiento, Provincia de San Juan. Technical Report No. IT-279, INA/SCRAS.

#### 8.2. BIBLIOGRAFÍA CAPÍTULO 6

Dussaillant, I., Berthier, E., Brun, F., Masiokas, M., Hugonnet, R., Favier, V., et al. (2019). Two decades of glacier mass loss along the Andes. *Nat. Geosci.* 12, 802–808. doi: 10.1038/s41561-019-0432-5.

Doyle, M. E. (2020). Observed and simulated changes in precipitation seasonality in Argentina. *Int. J. Climatol.* 40, 1716–1737. doi: 10.1002/joc.6297.

Lindström, G., Pers, C.P., Rosberg, R., Strömqvist, J., Arheimer, B. 2010. Development and test of the HYPE (Hydrological Predictions for the Environment) model – A water quality model for different spatial scales. *Hydrology Research*, 41.3-4:295-319.

Rivera JA, Naranjo Tamayo E and Viale M (2020) Water Resources Change in Central-Western Argentina Under the Paris Agreement Warming Targets. **Front. Clim.** 2:587126. doi: 10.3389/fclim.2020.587126.

## Informe 2 - Proyecciones De La Oferta

Rivera, J. A., and Arnould, G. (2020). Evaluation of the ability of CMIP6 models to simulate precipitation over Southwestern South America: climatic features and long-term trends (1901-2014). *Atmosph. Res.* 241:104953. doi: [10.1016/j.atmosres.2020.104953](https://doi.org/10.1016/j.atmosres.2020.104953).

Rivera JA, Otta S, Lauro C and Zazulie N (2021) A Decade of Hydrological Drought in Central-Western Argentina. *Front. Water* 3:640544. doi: [0.3389/frwa.2021.640544](https://doi.org/0.3389/frwa.2021.640544).

Maenza, R. A., Agosta, E. A., and Bettolli, M. L. (2017). Climate change and precipitation variability over the western ‘Pampas’ in Argentina. *Int. J. Climatol.* 37, 445–463. doi: [10.1002/joc.5014](https://doi.org/10.1002/joc.5014).

Cai, W., Cowan, T., and Thatcher, M. (2012). Rainfall reductions over Southern Hemisphere semi-arid regions: the role of subtropical dry zone expansion. *Sci. Rep.* 2:702. doi: [10.1038/srep00702](https://doi.org/10.1038/srep00702),

Cook, B. I., Mankin, J. S., Marvel, K., Williams, A. P., Smerdon, J. E., and Anchukaitis, K. J. (2020). Twenty-first century drought projections in the CMIP6 forcing scenarios. *Earths Future* 8:e2019EF001461. doi: [10.1029/2019EF001461](https://doi.org/10.1029/2019EF001461).

Spinoni, J., Barbosa, P., Buccignani, E., Cassano, J., Cavazos, T., Christensen, J. H., et al. (2020). Future global meteorological drought hotspots. A study based on CORDEX data. *J. Clim.* 33, 3635–3661. doi: [10.1175/JCLI-D-19-0084.1](https://doi.org/10.1175/JCLI-D-19-0084.1)

Villamayor, J., Khodri, M., Rivera, J. A., Naranjo, E. B., and Daux, V. (2019). The expanding tropics impact on central Andes precipitation. In: EGU General Assembly Conference Abstracts 21, EGU2019–17403.