Cálculo de la recarga de caudal en la cuenca de los salares Cauchari y Olaroz.

Resumen ejecutivo:

El presente informe detalla la información y los métodos de cálculo empleados para estimar la recarga de las subcuencas que aportan a los Salares de Cauchari y Olaroz. Primero, se presenta un análisis de la información de precipitaciones, evaporación y caudales observados en la zona. Después se explican los detalles de la metodología utilizada para completar la información existente para ser usada en el modelo hidrológico HEC-HMS para estimar los caudales de recarga de cada subcuenca. Finalmente, se presentan conclusiones de este trabajo y se hacen recomendaciones para complementar y mejorar los resultados de este análisis en el futuro.

1. Área de Interés

La cuenca de los salares Cauchari y Olaroz se encuentra en el Noroeste Argentino, principalmente en la provincia de Jujuy, entre las latitudes 22°47'00"S y 24°21'00"S, y longitudes 66°26'00"O y 67°03'00"O (sistema de coordenadas geográficas mundial WGS 84). Esta cuenca se puede dividir en dos subcuencas: en la parte norte la subcuenca del salar Olaroz y en la parte sur la subcuenca del salar Cauchari. La separación física de las cuencas Olaroz y Cauchari la constituye el río Archibarca, en cuyo extremo distal ha construido un dilatado cono (Cono Archibarca) que provoca la separación de los salares de Olaroz y Cauchari. Ambas subcuencas están conformadas por cursos fluviales de régimen temporario que en ningún caso llegan hasta el salar debido a la extrema aridez climática y elevada permeabilidad de los conos y abanicos aluviales.

1.1 Cuenca del salar de Olaroz

La superficie ocupada por esta subcuenca se extiende principalmente hacia el Norte y el Oeste del salar homónimo. Esta cuenca está conformada por cursos fluviales de régimen temporario que escurren con dirección NO-SE y NE-SO a excepción del Rio Rosario que posee una marcada dirección de escurrimiento Norte – Sur. El río Rosario se forma con la conjunción de los ríos Pairique y Agua Caliente a unos 45 km de la influencia del río Rosario en el Salar de Olaroz.

La mayoría de los cursos que drenan estas laderas son de régimen torrencial, poseen agua durante el período de lluvia y luego infiltran sin llegar de forma superficial al salar. Por otro lado, también existen vegas que se encuentran en las laderas orientales de la estivación Noreste del salar cercanos al volcán Granada, posiblemente sin tener influencia superficial sobre el rio Rosario, pero si pueden llegar subterráneamente.

Las serranías del flanco Oeste están constituidas por los depósitos marinos del Ordovícico sobre los que se depositan conos aluviales de gran desarrollo. Hacia el Este las sierras están constituidas por los depósitos de edad Terciaria sobre los que se superponen abanicos aluviales y conos. Son frecuentes los depósitos de pie de monte que se extienden desde las laderas montañosas en forma de conos, abanicos aluviales y rampas detríticas de escasa pendiente, hasta alcanzar las márgenes del salar e incluso invadirlo.

Desde el sector oeste y de forma difusa, llega el río Ola del cual es muy difícil a qué salar aporta agua. Este río forma el cono de Archibarca, el cual supera los 10 km de longitud y constituyen una unidad de acumulación sedimentaria formada por gravas y arenas gruesas que hacia los sectores distales pasan a sedimento más fino.

1.2 Cuenca del salar de Cauchari

Esta subcuenca pertenece casi en su totalidad a la Provincia de Jujuy; recibiendo de la Provincia de Salta los aportes por el Sureste, de una serie de quebradas que conforman un gran cono aluvial a la altura de la localidad de Olacapato. Esta subcuenca se extiende principalmente hacia el Sur y Este del salar homónimo, y está conformada por cursos fluviales de régimen temporario que por la extrema aridez del clima y la alta permeabilidad de los materiales provoca que estos cursos se insuman rápidamente en los abanicos aluviales por infiltración. Las sub-subcuencas delimitadas en este sistema hídrico son Tocomar-Antuco, Quevar, Guayaos y Tuzgle. El colector más importante, por su longitud y caudales, es el río Tocomar, originado en las cabeceras por numerosos manantiales termales.

El río Tocomar o Salado es el único curso de escurrimiento permanente. Sólo en la temporada estival el río descarga su caudal en el salar de manera superficial, conjuntamente a otros manantiales.

Así mismo, circula por un valle muy amplio y sumado el gran espesor de los depósitos aluviales, provocan que su recorrido no llegue más allá de Esquina Azul (Punta de Antuco) ya que se produce la rápida pérdida del caudal por infiltración.

Los principales afluentes del río Tocomar que se unen por margen izquierda son los ríos Antuco, Olacapato y Potreros. Los ríos Olacapato y Potreros drenan la falda norte del nevado de Quevar el que presenta profundos valles y paredes muy empinadas. Estos afluentes reciben el aporte de las aguas de deshielo del Nevado de Quevar, sistema Nevado de Los Pastos Grandes y de las escasas precipitaciones de la región. Debido al trazado de la red de escurrimiento que presenta el nevado de Quevar el mismo puede clasificarse como un sistema de drenaje radial e invertido.

Sobre las laderas occidentales del salar de Cauchari, el escurrimiento se organiza a partir del flanco oriental de la sierra de Guayaos, a través de numerosos cursos elementales, cuyo sistema de drenaje es en su mayoría paralelo. En este sector se generan abanicos aluviales coalescentes generando un sistema pedemontano con la clásica selección granulométrica gravitacional desde el ápice hacia los bordes.

Las sierras del sector Este están caracterizadas por Bajadas de Pie de Monte y Abanicos aluviales, conformados por potentes acumulaciones de gravas y arenas que hacia la parte distal se hacen limosos y sedimentos evaporíticos. Estos depósitos son los que rellenan la cubeta o fosa tectónica.

1.1 Características geométricas

Las subcuencas elementales aportantes a los salares Cauchari y Olaroz han sido agrupadas en 8 subcuencas mayores como se muestra en la Figura 1-1:

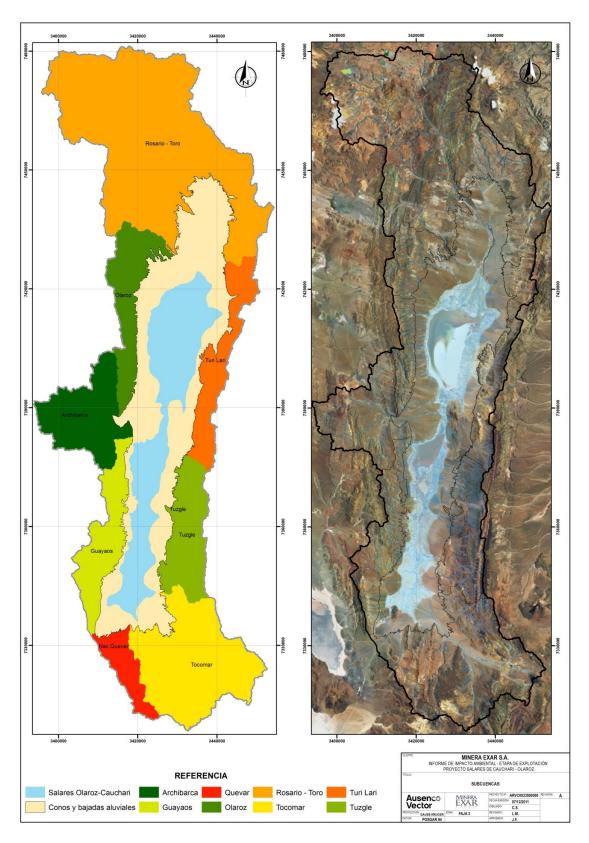


Figura 1-1. Agrupación de subcuencas mayores de los salares Cauchari y Olaroz [Ref. 2].

En la Tabla 1-1 se resumen las características geométricas de las subcuencas aportantes a los salares Cauchari y Olaroz. Los parámetros que se presentan en esa tabla corresponden a:

- Rc: Relación de circularidad (Miller, 1953): Adimensional entre 0 y 1. Mientras más cercano a la unidad el tiempo de concentración será menor.
- Kc: Coeficiente de Compacidad (Gravelius, 1914): Adimensional igual o mayor a la unidad, de modo que cuanto más cercano a la unidad, más se aproxima la forma de la cuenca a un circulo. Mayores probabilidades de producir crecidas con caudales elevados.
- HI: Integral hipsométrica. Indicador entre 0 y 1 del estado de la cuenca, en cuanto a los procesos erosivos o depositación. > 0.6 juventud; <0.6 y >0.4 madurez; <<0.4 vejez.

Cuenca	Subcuenca	Área	Perímetro	H máx	H mín.	Н	Desnivel	Pend	Rc	Kc	HI
principal		(km2)	(km)	(msnm)	(msnm)	media (m)	(m)	(%)			
Olaroz-	Total	5758	765	6151	3761	4292	2390	15		2.82	
Cauchari	Archibarca (Ola)	373	157	4867	4041	4345	826	16	0.189	2.3	0.37
Olaroz	Rosario- Toro	1582	477	5856	4038	4483	1818	18	0.087	3.5	0.24
	Olaroz	304	240	4988	4040	4302	948	20	0.067	3.8	0.28
	Turi Lari	285	227	4757	4030	4238	727	12	0.070	3.8	0.29
Cauchari	Quevar	136	111	6154	4039	4556	2115	20	0.138	2.7	0.24
	Guayaos	293	203	4838	4021	4300	817	22	0.090	3.3	0.34
	Tuzgle	311	178	5068	4043	4300	1025	16	0.124	2.8	0.25
	Tocomar	685	234	6152	4019	4599	2133	21	0.157	2.5	0.27

Tabla 1-1. Características geométricas de las subcuencas de los salares Cauchari y Olaroz [Ref. 2].

2. Disponibilidad de información

La recopilación de datos hidrometeorológicos se redujo a datos del Servicio Meteorológico Nacional de Argentina (SMN), Subsecretaría de Recursos Hídricos de Argentina (SSRH) y estaciones privadas de Exar S.A.

3. Clima

Un clima severo se forma en la región de los salares de Cauchari y Olaroz como consecuencia de su ubicación geográfica: baja latitud, elevaciones próximas a los 4000 m de altura y la influencia de dos grandes sistemas de presión planetarios semipermanente que originan diferentes circulaciones de vientos convergiendo al continente Sudamericano: el Anticiclón del Pacífico, que actúa principalmente en invierno, proporcionando aire muy seco en los salares porque este anticiclón posee aire más seco que el del Atlántico, y además el aire antes de llegar a los salares recorre antes el desierto de Atacama, conocido como la región más árida del planeta. El otro sistema de presión que interactúa en la región, especialmente en verano es el ya mencionado Anticiclón del Atlántico, que posee aire con características más cálidas y húmedas. La convergencia de ambos sistemas genera la Baja Continental Sudamericana, que durante el verano como consecuencia del mayor aporte de energía solar se profundiza y también su centro desciende en el continente Sudamericano aumentando la latitud Sur, alcanzando incluso la región de los Salares, lo cual provoca un gran incremento de la humedad y el desarrollo de nubosidad vertical en la forma de nubosidad convectiva causando abundantes precipitaciones convectivas del tipo chubascos [Ref. 3].

Este clima conocido como La Puna es propicio para la extracción de algunos minerales como el litio y otros compuestos a través de procesos que dependen de la evaporación provocada por las

condiciones severas o extremas de inmensas oscilaciones térmicas e higroscópicas debido a la gran cantidad de radiación solar y la gran rapidez de los vientos imperantes durante la mayor parte del año.

3.1 Temperatura del aire

3.1.1 Temperatura media mensual

La temperatura media mensual del aire se caracterizó utilizando las estaciones meteorológicas de la Tabla 3-1.

Nombre	Lat	Lon	msnm	Frec	Periodo	Fuente
Vaisala	23°42'00"S	66°45'36"W	3900	Diaria	2011/2015	Exar S.A.
Olacapato	24°07'00"S	66°43'00"W	4100	Mensual	1950/1990	SMN
S.A.Cobres	24°13'00"S	66°19'00"W	3775	Mensual	1949/1990	SMN
Susques	23°26'00"S	66°30'00"W	3675	Mensual	1972/1996	SMN

Tabla 3-1. Registro disponible de temperatura del aire

En la Tabla 3-2 se observa que los valores máximos mensuales de temperatura del aire se concentran en los meses de diciembre, enero y febrero, con un máximo de 11.3°C, mientras que los valores mínimos en junio, julio y agosto, con un mínimo de 0°C.

ESTACION	msnm	sep	oct	nov	dic	ene	feb	mar	abr	may	jun	jul	ago	anual
Vaisala	3900	5.1	6.8	9.3	11.3	10.7	10.3	9.4	6.8	3.0	0.9	0.0	2.1	5.9
Olacapato	4100	5.9	8.2	9.9	10.6	10.8	10.7	9.9	7.5	4.2	2.2	1.6	3.9	7.1
S.A.Cobres	3775	6	8.2	10.0	10.8	11.0	10.8	10.0	7.5	4.2	2.3	1.7	3.9	7.2
Susques	3675	6.6	8.9	10.4	11.1	11.3	11.2	10.5	8.1	4.9	3.0	2.5	4.6	7.8

Tabla 3-2. Temperatura mensual representativa de las condiciones térmicas que prevalecen en la zona de estudio.

3.1.1 Temperatura diaria

La interpretación cambia si se evalúa la temperatura diaria (Figura 3-1). La estación Vaisala, que se encuentra dentro de la cuenca de los salares de Cauchari y Olaroz, presenta registros de temperatura diario con gran amplitud, con valores que oscilaron entre -18.0°C y 25.8°C.

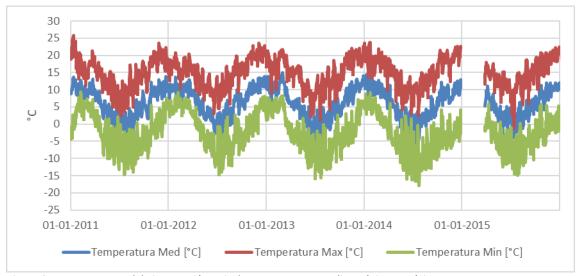


Figura 3-1. Temperatura del aire estación Vaisala. Temperatura media, máxima y mínima.

3.2 Precipitación

Las precipitaciones de mayor magnitud se originan entre los meses de diciembre y marzo, cuando la Baja Continental Sudamericana se acerca a la región de la Puna, incursionando aire más cálido y húmedo proveniente de la selva de El Amazonas, que, al encontrarse con aire muy seco de los salares, ocasiona gran actividad convectiva y abundante desarrollo nuboso. En la Tabla 3-3 se presenta el registro pluviométrico disponible en la zona de estudio:

ID	Nombre	Lat	Lon	msnm	Frec.	Fuente	Disponibilidad de información
1	Colanzuli	22°53'17"S	65°13'27''W	3575	D	SSRH	1992-2013
2	Iruya	22°47'44'S	65°12'57''W	2741	D	SSRH	1983-2015
3	San	22°45'24"S	65°14'30"W	2956	D	SSRH	1984-2105
	Isidro						
4	El Pabellón	22°33'13"S	65°20'21"W	4265	D	SSRH	1985-2015
5	Tuc Tuca	22°24'16"S	65°16'03"W	3950	D	SSRH	1983-2015
6	Vaisala	23°42'00"S	66°45'36"W	3900	D	Exar	2011-2015
7	Metboros	23°27'36"S	66°37'48"W	3915	D	Exar	2010-2011
8	Metsulfatera	23°43'12"S	66°48'00"W	3915	D	Exar	2010-2011
9	Abra Laite	23°11'00"S	65°47'00''W	3620	М	SMN	1972-1990 (1974-1978)
10	Abra Pampa	22°49'00"S	65°48'00''W	3450	M	SMN	1969-1990
	INTA						
11	Castro	23°21'00"S	66°04'48"W	3438	М	SMN	1972-1990 (1973,1974,
	Tolay						1978-1981)
12	Coranzuli	23°02'00"S	66°24'00"W	4100	М	SMN	1972-1992 (1979-1982)
13	Mina	24°12'00"S	66°24'00''W	3770	М	SMN	1950-1990 (1966,1970)
	Concordia						
14	Olacapato	24°07'00"S	66°43'00''W	4100	M	SMN	1950-1990 (1966,1971,
							1980,1983,1989)
15	Puesto	23°55'00"S	66°34'00''W	3920	M	SMN	1973-1990 (<mark>1978</mark>)
	Sey						
16	Salar	24°23'00"S	67°00'00''W	3600	M	SMN	1950-1990 (1951,1952,1956,
	Pocitos						1958,1966,1970,1982,1983,1989)
17	S.A.Cobres	24°13'00"S	66°19'00''W	3775	М	SMN	1949-1990
18	Susques	23°26'00"S	66°30'00"W	3675	М	SMN	1972-1996

Tabla 3-3. Registro disponible de precipitaciones. Sistema SWG 84. Entre paréntesis, años sin información.

La Figura 3-2 muestra la ubicación de las estaciones meteorológicas respecto al salar de Cauchari y Olaroz.

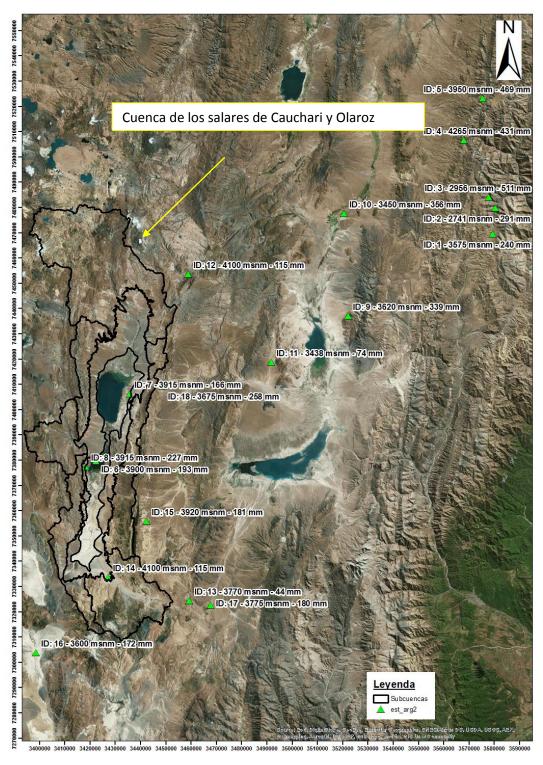


Figura 3-2. Ubicación estaciones meteorológicas. Para cada estación se reporta el código utilizado para identificarla en la Tabla 3.3, su altitud y la precipitación media anual.

3.2.1 Precipitación total anual

Debido a que hubo periodos sin información en los registros, se calcularon varios totales anuales para realizar la comparación de la precipitación en el Noroeste Argentino (Tabla 3-4). El total anual consideró el año desde septiembre hasta agosto del siguiente año, por ejemplo, 2011 significa la suma de los valores desde septiembre 2011 hasta agosto de 2012.

		1950-1987 (1949-1952,				
Fuente	Nombre	1955-1958,1965,1966,	1984-1987	1991-1995	1991-2011	2011-2015
		1969-1971,1979,1983)				
SSRH	Colanzuli			232	242	
SSRH	Iruya		332	263	280	323
SSRH	San Isidro		664	503	457	392
SSRH	El Pabellón			399	403	339
SSRH	Tuc Tuca		613	324	422	507
Exar	Vaisala					187
Exar	Metboros					
Exar	Metsulfatera					
SMN	Abra Laite		380			
SMN	Abra Pampa INTA		424			
SMN	Olacapato	83	85			
SMN	Mina Concordia	128	116			
SMN	Salar Pocitos	48	22			
SMN	S.A.Cobres	126	126			
SMN	Susques		228	161		
SMN	Puesto Sey		193			
SMN	Castro Tolay		104			
SMN	Coranzuli		284	193		

Tabla 3-4. Precipitación total anual (mm) según periodos. En color rojo se señalan los años faltantes.

Al comparar los promedios de los totales anuales, se llega a las siguientes conclusiones:

- 1. El promedio depende fuertemente de los años que se consideren. Por ejemplo, para la estación Susques, al considerar dos periodos para calcular el promedio hubo una disminución de 228 mm a 161 mm (30% de diferencia).
- 2. Al comparar los valores de los promedios de 1984 1987, se observa que las estaciones del SSRH presentan valores de precipitación más altos que el SMN. Lo anterior se atribuye que las estaciones del SSRH en un sector más húmedo de la Puna Argentina. En particular, la estación San Isidro es la más húmeda. Esto se verifica también entre los años 1991 -1995 donde las estaciones del SSRH registraron precipitaciones mayores a dos estaciones de la Puna: Susques y Coranzuli.
- 3. La estación Salar Pocitos es la más seca, con precipitaciones cercanas a un tercio de la estación que le sigue (Olacapato). Esta estación se encuentra ubicada en el extremo Suroeste de la Puna.
- 4. La estación Vaisala muestra aproximadamente la mitad del registro de las estaciones del SSRH para el mismo periodo. Esto es esperable porque las estaciones del SSRH se encuentran en la zona más húmeda.
- 5. Las estaciones Vaisala, Metboros, Metsulfatera y Olacapato se encuentran dentro de la cuenca de los salares Cauchari y Olaroz, pero las tres primeras tienen registros de corta duración y sólo a partir de 2010, mientras que Olacapato tiene información sólo hasta el año 1990. Por lo tanto, los registros de estas estaciones no son suficientes para caracterizar la precipitación de manera continua en el tiempo.

La Tabla 3-5 muestra la correlación anual (desde septiembre hasta agosto) entre todas las estaciones)

	Colanzuli	Iruya	San Isidro	El Pabellón	Tuc Tuca	Vaisala	Metboros	Metsulfatera	Abra Laite	Abra Pampa INTA	Olacapato	Mina Concordia	Salar Pocitos	SA Cobres	Susdues 0.82	Puesto Sey	Castro Tolay	Coranzuli
Colanzuli	1.00	0.51	0.28	0.42	0.36										0.82			0.74
Iruya	0.51	1.00	0.28	0.35	0.32				0.48	0.48	0.75	0.26	0.48	0.32	0.07	0.34	0.27	0.24
San Isidro	0.28	0.28	1.00	0.32	0.05				0.16	0.27	0.20	0.69	0.52	0.55	0.01	0.24	0.46	0.11
El Pabellón	0.42	0.35	0.32	1.00	0.19	0.07					0.98	0.05	0.77	0.12	0.01	0.39	0.50	
Tuc Tuca	0.36	0.32	0.05	0.19	1.00	0.25			0.11	0.11	0.09	0.33	0.15	0.15	0.10	0.35	0.19	0.17
Vaisala				0.07	0.25	1.00												
Metboros																		
Metsulfatera																		
Abra		0.48	0.16		0.11				1.00	0.91	0.16	0.54	0.06	0.79	0.49	0.68	0.74	0.58
Laite		0.48	0.27		0.11				0.91	1.00		0.45	0.01	0.37	0.37	0.52	0.38	0.24
Abra Pampa INTA		0.48	0.27		0.11				0.91	1.00		0.45	0.01	0.37	0.37	0.52	0.38	0.24
Olacapato		0.75	0.20	0.98	0.09				0.16		1.00	0.06	0.22	0.24	0.65	0.41	0.21	0.46
Mina		0.26	0.69	0.05	0.33				0.54	0.45	0.06	1.00	0.05	0.51	0.51	0.55	0.55	0.24
Concordia Salar		0.48	0.52	0.77	0.15				0.06	0.01	0.22	0.05	1.00	0.13	0.20	0.14	0.84	0.31
Pocitos																		
SA Cobres		0.32	0.55	0.12	0.15				0.79	0.37	0.24	0.51	0.13	1.00	0.49	0.66	0.77	0.55
Susques	0.82	0.07	0.01	0.01	0.10				0.49	0.37	0.65	0.51	0.20	0.49	1.00	0.76	0.43	0.73
Puesto		0.34	0.24	0.39	0.35				0.68	0.52	0.41	0.55	0.14	0.66	0.76	1.00	0.69	0.85
Sey		0.07	0.46	0.50	0.10				0.74	0.00	0.24	0.55	0.04	0.77	0.40	0.60	1.00	0.70
Castro Tolay		0.27	0.46	0.50	0.19				0.74	0.38	0.21	0.55	0.84	0.77	0.43	0.69	1.00	0.73
•	0.74	0.24	0.11		0.17				0.58	0.24	0.46	0.24	0.31	0.55	0.73	0.85	0.73	1.00
Coranzuli																		

Tabla 3-5. Correlación anual entre distintas estaciones.

Al analizar la correlación existente entre las distintas estaciones se observa que:

- 1. Colanzuli correlaciona de mejor manera con estaciones del SMN: Susques y Coranzuli.
- 2. Las estaciones del SSRH no muestran buena correlación entre sí.
- 3. Las estaciones: SA Cobres (San Antonio de los Cobres), Susques, Puesto Sey, Castro Tolay y Coranzuli son las que mejor se encuentran correlacionadas.
- 4. Metboros y Metsulfatera tienen registro por un año, por lo tanto, no permiten correlacionar con otras estaciones.

3.2.2 Distribución mensual de la precipitación

La Figura 3-3 muestra la distribución mensual de precipitación en el Noroeste Argentino. Se decidió agrupar por comportamiento para facilitar su interpretación.

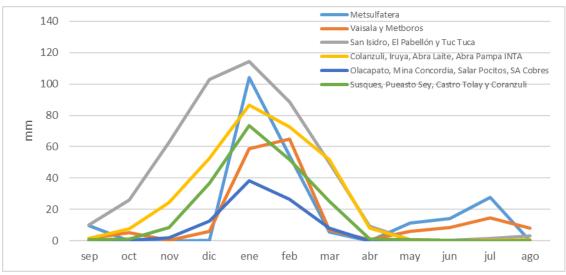


Figura 3-3. Distribución mensual de precipitación

Al analizar la distribución mensual de precipitación, se observa que:

- 1. Las estaciones San Isidro, El Pabellón y Tuc Tuca son las más húmedas, mostrando un desarrollo de las precipitaciones a partir de septiembre hasta marzo.
- 2. Las estaciones Colanzuli, Iruya, Abra Laite y Abra Pampa INTA son las siguientes más húmedas, mostrando un desarrollo de precipitaciones desde octubre hasta marzo.
- 3. Las estaciones Susques, Puesto Sey, Castro Tolay y Coranzuli presentan precipitación desde noviembre hasta marzo.
- 4. Las estaciones Vaisala y Metboros presentan precipitación desde diciembre hasta marzo, pero con precipitaciones significativas entre mayo y agosto.
- 5. Olacapato, Mina Concordia, Salar Pocitos y SA Cobres son las más secas, presentando desarrollo de precipitaciones entre diciembre y marzo.
- Metsulfatera presenta un comportamiento similar al de Vaisala y Metboros, pero de mayor intensidad.
- 7. Los meses de mayor precipitación son diciembre, enero y febrero.
- 8. En conclusión, dada la ubicación geográfica de las estaciones (Figura 3-2), es en la parte este de la Puna donde empieza la precipitación (septiembre), a medida que avanzan los meses, estos fenómenos de precipitación alcanzan las estaciones ubicadas al extremo oeste de la Puna (diciembre), pero con menor magnitud que en el extremo este de la Puna.
- 9. Es importante notar que no se cuenta con registro de precipitación sólida en ninguna estación, por lo tanto, el aporte de las nevadas entre junio y agosto no se está considerando.

3.2.3 Precipitación en la cuenca de los salares Cauchari y Olaroz

En conclusión, la precipitación en el salar inicia entre noviembre y diciembre, los máximos de precipitación se alcanzan en los meses de enero y febrero, y el término de la precipitación ocurre en marzo. No se descartan posibles eventos precipitación líquida o sólida de menor magnitud en los meses entre junio y agosto.

Respecto a la magnitud, la parte centro-norte de los salares es más húmeda que el sur. En promedio, en la parte norte (Rosario) precipita aproximadamente 180-200 mm (Susques-Vaisala) mientras que el sur (Tocomar), se tiene un descenso de la precipitación, y la precipitación media anual registrada en la estación de Olacapato es de aproximadamente 85 mm .

3.3 Evaporación Potencial

En el salar de Cauchari se instaló la estación Vaisala que calcula la evaporación potencial a través de un método indirecto. Además, en la misma ubicación, se instalaron dos tanques cilíndricos del tipo evaporímetros PAN los cuales efectúan mediciones directas de evaporación potencial de agua fresca y salmuera. Por otra parte, el SSRH cuenta con registro de la estación Colanzuli (no se especifica el tipo de evaporímetro). La Tabla 3-6 muestra las características el registro de evaporación.

Estación	Lat	Lon	msnm	Frec	Fuente	Disponibilidad de Información
Colanzuli	22°53'17"S	65°13'27"W	3575	D	SSRH	nov 1992-abr 2013.
Vaisala (indirecto)	23°42'00"S	66°45'36"W	3900	D	Exar S.A.	2011-2015 (ene-feb 2015)
Vaisala (agua)	23°42'00"S	66°45'36"W	3900	D	Exar S.A.	Mar2011-2015
Vaisala (salmuera)	23°42'00"S	66°45'36"W	3900	D	Exar S.A.	Mar2011-2015

Tabla 3-6. Registro disponible de evaporación potencial. Sistema SWG 84. En paréntesis se señalan los meses faltantes.

3.3.1 Evaporación potencial anual

Debido a la inconsistencia en el largo de los registros y a los meses sin información, se calculan varios totales anuales para realizar la comparación de la evaporación potencial en el Noroeste Argentino (Tabla 3-7). El total anual considera el año desde septiembre hasta agosto del siguiente año, por ejemplo, 2011 significa la suma de los valores desde septiembre 2011 hasta agosto de 2012.

Fuente	Nombre	1993-2011	2011	2012
SSRH	Colanzuli	1906 (1131-2457)	2038	
Exar S.A.	Vaisala (indirecto)		1646	1862
Exar S.A.	Vaisala (agua)		2238	2321
Exar S.A.	Vaisala (salmuera)		1497	1640

Tabla 3-7. Evaporación potencial anual (mm). Entre paréntesis, el mínimo y máximo registrado.

En la Tabla 3-7 se observa que la evaporación potencial anual puede cambiar de forma significativa dependiendo del año (ver máximos y mínimos de estación Colanzuli). Esto también se observa en menor medida en la estación Vaisala, por el aumento desde entre el año 2011 y 2012 de las mediciones "indirecto", "agua" y "salmuera".

3.3.2 Evapotranspiración Potencial Anual (PET)

La Ref. 4 proporciona la siguiente expresión para estimar la evapotranspiración potencial anual en función de la altitud,

$$PET_{anual} = 0.9 * (4364 - 0.59 * A) (R^2 = 0.93)$$

donde A es la altura media en msnm.

Por lo tanto, suponiendo que la expresión es válida para la cuenca de los salares Cauchari y Olaroz, y aplicando la expresión para obtener la PET para la estación Vaisala (3900 msnm) se obtiene un valor de 1857 mm.

3.3.3 Distribución mensual de la evaporación potencial

En la Tabla 3-8 se presenta la distribución mensual de la evaporación potencial de las estaciones previamente mencionadas:

Estación	sep	oct	nov	dic	ene	feb	mar	abr	may	jun	jul	ago	Total
Colanzuli	160	171	168	170	153	134	146	159	163	163	165	166	1919
Vaisala (indirecto)	156	192	201	191	159	114	158	138	116	96	101	136	1759
Vaisala (agua)	238	277	320	250	170	80	185	207	170	145	138	198	2377
Vaisala (salmuera)	160	204	192	157	91	50	123	133	120	118	104	158	1609

Tabla 3-8. Evaporación media mensual (mm).

El registro indica una fuerte variación de la evaporación potencial para distintos meses. En general, febrero es el mes con menor evaporación, pero como se vio en la Figura 3-3, también es uno de los meses con mayor precipitación. Por lo tanto, la baja evaporación potencial podría explicarse por la nubosidad asociada a los fenómenos de precipitación, que disminuyen la radiación necesaria para evaporar el agua. Respecto al máximo encontrado, este ocurre entre los meses de octubre y diciembre.

3.3.4 Evaporación potencial media diaria

La Figura 3-4 muestra la evaporación potencial media diaria de las estaciones Colanzuli y Vaisala. Se aprecia que, según valor medio diario, entre 4 y 5 mm de agua podrían ser capturados por la atmósfera por día, no visualizándose posteriormente en los cauces superficiales ni en el almacenamiento del suelo.

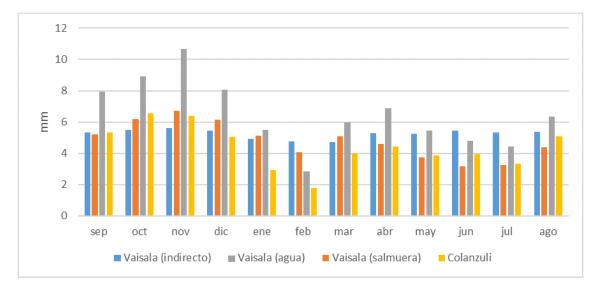


Figura 3-4. Evaporación potencial media diaria (mm).

3.4 Registro limnimétrico y aforos

3.4.1 Estación Sayate (SSRH)

La estación Sayate se encuentra en la cuenca del río Miraflores ubicada al este de los salares Cauchari y Olaroz, y presenta aforos desde 2009 hasta 2016:

Estación	Río	Latitud	Longitud	msnm	Frecuencia	Periodo	Fuente
Sayate	Miraflores	22°54'03"S	65°50'58''W	3440	Aforos mensuales	2009-2016	SSRH

Tabla 3-9. Registro disponible de aforos.

La Figura 3-5 muestra el promedio, mínimo y máximo por mes de los aforos realizados. Se observa que los mayores caudales se producen entre enero y marzo, periodo coincidente con las máximas precipitaciones mostradas en la Figura 3-3. Existe una alta variabilidad de caudales en el registro, ya que el mínimo caudal aforado fue de 27 L/s mientras que el máximo fue de 16,2 m³/s, o sea el caudal máximo observado corresponde a 600 veces el caudal mínimo medido.

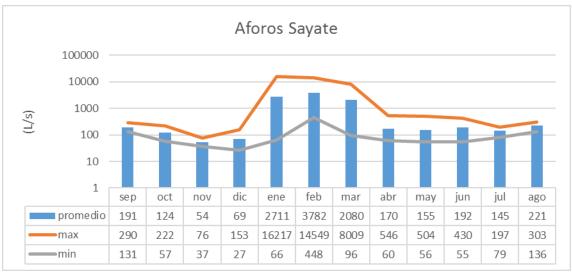


Figura 3-5. Promedio de aforos agrupados por mes en el punto Sayate ubicado sobre río Miraflores.

3.4.2 Registro de aforos realizados por Exar S.A.

Exar SA realizó una serie de mediciones instantáneas de caudal en la cuenca de los salares de Cauchari - Olaroz en los años 2010, 2011, 2012 y 2016. En la Tabla 3-10 se detallan estos puntos.

Nombre	Subcuenca	Área	Е	N	Descripción
CSW-01	Cauchari	48	3427472	7347313	Qda.SE (Afluente E1)
CSW-02	Cauchari	29	3443076	7325887	Tocomar Norte
CSW-03	Cauchari	82	3443023	7325800	Tocomar Sur
CSW-04	Cauchari	134	3438517	7326202	Tocomar AAB Puente
CSW-05	Cauchari	26	3433525	7323817	Rio Antuco
CSW-06	Cauchari	366	3430917	7330875	Rio Tocomar Puente Esquina Azul
CSW-07	Cauchari	61	3427099	7330144	Rio Quevar
CSW-08	Cauchari	31	3426085	7329866	Quebrada Los Berros
CSW-09	Cauchari	231	3420189	7350036	Puente Centro Sur Cauchari
CSW-10	Cauchari	37	3419088	7348788	Vert. Centro Sur Cauchari 1
CSW-11	Cauchari	231	3418228	7344331	Vert. Centro Sur Cauchari 2
CSW-12	Cauchari	13	3408803	7349479	Quebrada Arizaro

Nombre	Subcuenca	Área	Е	N	Descripción
CSW-13	Cauchari	3	3407835	7341824	Quebrada Guayar
CSW-14	Cauchari		3421128	7388236	Archibarca cruce R Nº 70
OSW-01	Olaroz	961	3431991	7443033	Rio Rosario Puente AAR
OSW-02	Olaroz	333	3413444	7388236	Vega Archibarca
OSW-03	Olaroz	1901	3436765	7423601	R. Rosario cruce R16
OSW-06	Olaroz		3448528	7436453	Vertiente Puesto Tanque
OSW-07	Olaroz		3436101	7436407	Afluente 3 NW Ruta 70
OSW-08	Olaroz		3445472	7424701	Lari Paraje La Vicuñita
OSW-09	Olaroz		3446731	7419719	Rio Lari chico

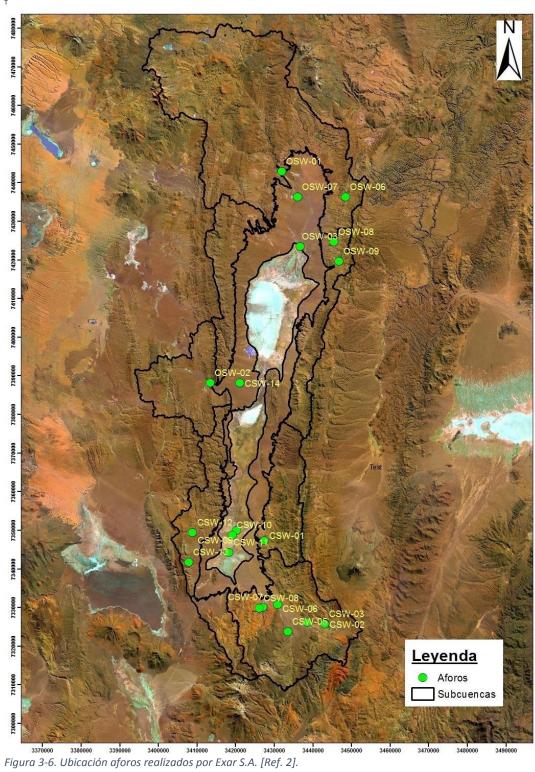
Tabla 3-10. Registro de Aforos realizados por Exar S.A. Proyección Posgar 94/ Argentina 3.

En la Tabla 3-11 se indica el número de aforos realizados.

Punto	sep	oct	nov	dic	ene	feb	mar	abr	may	jun	jul	ago
OSW-01	1	1	3	2	3	0	1	7	4	9	3	5
OSW-02	0	2	3	2	1	3	2	5	3	5	3	3
OSW-03	0	0	0	0	0	19	5	2	0	0	0	0
OSW-06	0	0	0	0	1	0	0	0	0	0	0	0
OSW-07	0	0	0	0	0	0	2	0	0	0	0	0
OSW-08	0	0	0	0	1	0	1	0	0	0	0	0
OSW-09	0	0	0	0	1	0	0	0	0	0	0	0
CSW-01	1	2	2	1	1	2	4	4	4	6	2	5
CSW-02	1	2	3	2	1	4	5	4	5	5	2	4
CSW-03	2	3	4	3	1	3	3	6	8	9	2	5
CSW-04	1	1	3	2	1	3	4	3	5	5	1	3
CSW-05	1	2	3	2	1	3	3	4	4	5	1	5
CSW-06	0	0	0	0	0	0	1	2	0	0	0	1
CSW-07	1	1	1	2	1	3	2	5	5	6	2	5
CSW-08	1	2	2	1	0	3	2	4	4	5	2	4
CSW-09	1	2	3	1	0	1	4	4	3	5	1	3
CSW-10	0	0	2	1	0	0	1	0	0	0	0	0
CSW-11	0	0	0	0	0	0	0	1	0	0	0	1
CSW-12	0	2	3	2	1	3	2	3	5	6	0	4
CSW-13	0	2	3	2	1	3	2	3	5	6	2	5
CSW-04	0	1	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0
Olaroz (O)	1	3	6	4	7	22	11	14	7	14	6	8
Cauchari (C)	9	20	29	19	8	28	33	43	48	58	15	45
Total	10	23	35	23	15	50	44	57	55	72	21	53

Tabla 3-11 Número de aforos realizados.

La Figura 3-6 muestra la ubicación de los aforos puntuales:



Cuenca Olaroz:

OSW-01

Dado que el punto OSW-01 no tiene registro en febrero y que el punto OSW-03 se encuentra aguas abajo del punto OSW-01, los caudales aforados en OSW-03 se han transpuesto por un factor de área (igual a 0.51) al punto OSW-01 para completar la estadística anual del punto OSW-01. La Figura 3-7 se muestra que los registros presentan un comportamiento muy similar al observado en la estación Sayate; en la cual los caudales de crecida ocurren en el periodo de mayor precipitación. En términos de magnitud, los caudales de crecida observados son un orden de magnitud mayor respecto al mínimo registrado.

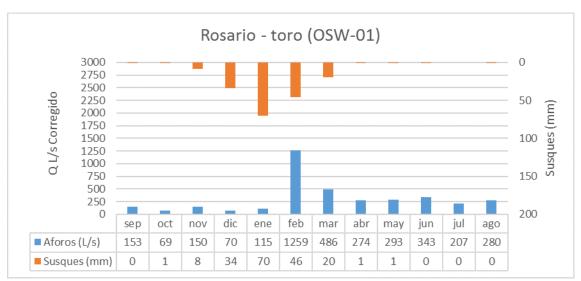


Figura 3-7. Promedio de caudales aforados en el punto OSW-01 ubicado sobre el río Rosario y precipitación media anual registrada en estación Susques.

OSW-02

La Figura 3-8 muestra el promedio de los caudales registrados en una sección de control ubicada cerca del ápice del Cono de Archibarca (OSW-02). En este caso, los caudales máximos se registran principalmente en diciembre, pero debido a que no se observa una diferencia significativa en magnitud entre los caudales, no se puede inferir que los caudales registrados corresponden efectivamente a los caudales de crecidas. Por lo tanto, se considera que los aforos realizados no son suficientes para caracterizar correctamente el comportamiento de los caudales de esta subcuenca.

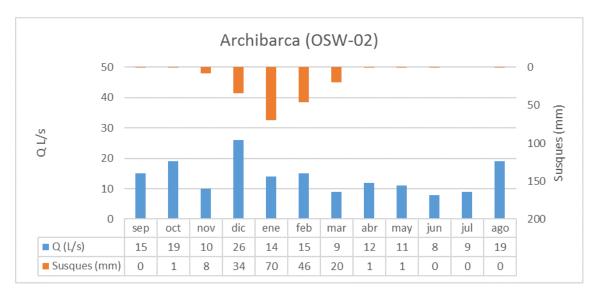


Figura 3-8. Aforos promedio en punto OSW-02 ubicado sobre río Archibarca y precipitación media anual registrada en estación Susques.

Otros puntos de aforos

La Tabla 3-12 presenta el promedio de los aforos realizados en otros puntos de la cuenca de los salares de Cauchari y Olaroz. De la tabla se infiere que:

- Los valores registrados en el punto CSW-07 muestran una crecida de gran magnitud en el mes de marzo.
- El punto CSW-14 ubicado aguas abajo del punto OSW-02 (Archibarca) evidencia una crecida de gran magnitud en el río Ola (Archibarca).
- La escasa información para el resto de los puntos de aforos no permite identificar con claridad el comportamiento hidrológico de las cuencas.

Punto	sep	oct	nov	dic	ene	feb	mar	abr	may	jun	jul	ago
CSW-01	1.6	1.3	1.6	1.1	1.5	1.3	1.7	1.6	3.3	2.9	1.7	2.7
CSW-02	14.6	19.2	10.3	25.9	14.4	15	9	11.5	11	7.9	9	18.7
CSW-03	50.2	31.4	29.2	54.4	35.5	66.1	24.6	36.2	41.6	40.4	25	34.7
CSW-04	57.8	49.8	41	74.8	74.2	114.6	48.4	52.1	61.5	55.6	55.2	57.3
CSW-05	11	10.9	11.3	12.9	11.6	12.2	9.1	11	11.6	12	14.3	16
CSW-06							11.1	1.9				45
CSW-07	44.7	44	26.5	47.4	24.4	40.4	3807.8	47.9	61.2	61	368.3	64.5
CSW-08	2.5	2.8	4	3.7		3.3	2.5	8.4	2.5	2	3	7.6
CSW-09	13.3	3.3	6.6	0.3		6.6	5.3	2.6	4.6	3.8	3.8	4.5
CSW-10			0.1	0.2			0.1					
CSW-11								5.9				0.4
CSW-12		1	0.8	1.5	0.1	1	0.3	0.5	1	0.7		1
CSW-13		0.5	0.4	0.3	0.2	0.2	0.4	0.9	0.7	1.1	0.4	0.8
CSW-14						1170.8						

Punto	sep	oct	nov	dic	ene	feb	mar	abr	may	jun	jul	ago
OSW-06					0.4							
OSW-07							1.5					
OSW-08					0.7		1.4					
OSW-09					0.3							

Tabla 3-12. Aforos promedio (L/s) realizados en otros puntos de la cuenca de los salares Cauchari y Olaroz.

3.5 Estimación de caudales de recarga a través del modelo hidrológico HEC HMS

En la zona de los Salares de Cauchari y Olaroz la evapotranspiración potencial es superior a la precipitación durante todo el año, lo que podría interpretarse como que toda la precipitación se pierde por evapotranspiración, lo cual no es cierto debido a la presencia de corrientes de agua en los cursos de la zona. Existe agua que se infiltra más allá de la zona de evaporación del suelo permitiendo un flujo base subterráneo durante la estación seca, además, durante las tormentas se presentan aumentos significativos de caudal en los cauces.

Para el cálculo de los caudales de recarga se utilizó el software de simulación hidrológica HEC-HMS, desarrollado por el Hydrologic Engineering Center of US Army Corps of Engineers. El mismo es un software que permite simular la transformación de lluvia (histórica o hipotética) en escurrimiento, a través de un sistema que integra diferentes métodos hidrológicos distribuidos en subcuencas. Un esquema simplificado de esta conceptualización se presenta en la Figura 3-9. Internamente, el modelo considera un balance volumétrico de agua en el cual la precipitación está sujeta a la demanda evapotranspirativa de la atmósfera y la diferencia corresponde a la escorrentía directa más el flujo base. La escorrentía directa y el flujo base se calculan a través de un marco teórico de base empírica, es decir, no se pueden medir en campo los parámetros del modelo.

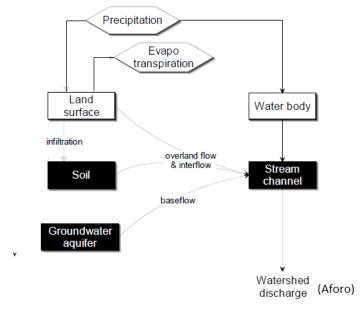


Figura 3-9. Esquema conceptual modelo hidrológico HEC HMS [Ref. 6].

3.5.1 Calibración del modelo

A continuación, se mencionan algunos puntos importantes dentro de la calibración del modelo hidrológico:

- Para la caracterización de las subcuencas se utilizaron los parámetros morfométricos de la Tabla 1-1.
- Dado que no existe ninguna estación pluviométrica vigente que tenga registro durante los últimos 30 años dentro de la zona de estudio, se aplicaron métodos estadísticos para reconstruir estaciones que permitieran reproducir el comportamiento pluviométrico.
- El gradiente de precipitación se obtuvo de estaciones vecinas con el supuesto que entre ellas no existen variaciones en las mediciones afectadas por latitud ni longitud.
- La evaporación potencial se obtuvo de los datos medidos en Vaisala corregidos por altitud.
- SI bien el modelo se aplicó a partir del año 1972, La calibración del modelo se realizó en el periodo que hubo aforos (2010 -2012) para luego extenderse hasta el año 1972. El primer año fue eliminado en el cálculo de caudales de recarga para disminuir influencia de condiciones de borde.

Precipitación diaria

Para la precipitación se utilizó el registro de Susques (1972-1996) reconstruido con Colanzuli (1991-2013). La correlación anual entre Colanzuli y Susques desde septiembre 1991 hasta agosto 1996 entregó un $R^2 = 0.82$ (Figura 3-10):

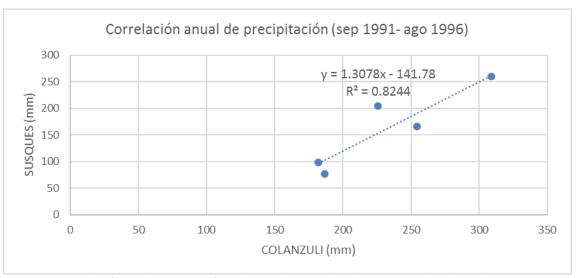


Figura 3-10. Correlación para la precipitación media anual registrada en las estaciones de Colanzuli y Susques.

La Figura 3-11 muestra la curva de variación estacional de la estación Susques reconstruida:

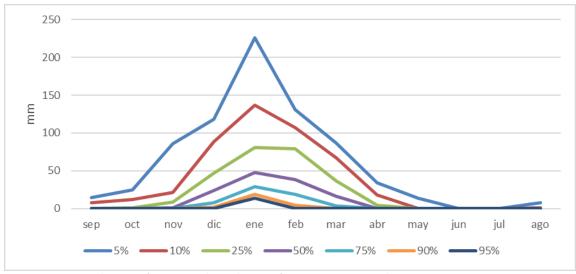
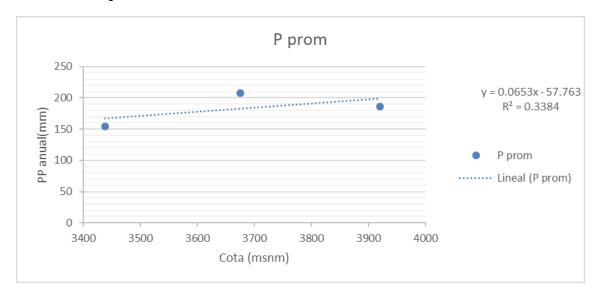


Figura 3-11. Curva de variación estacional para la estación Susques reconstruida

Gradiente de precipitación versus altitud

Utilizando el promedio anual de precipitación registrada en las estaciones de Susques, Puesto Sey y Castro Tolay, se obtuvo un gradiente de precipitación en la zona (R²=0.34), este gradiente permitió ajustar los valores diarios de precipitación de la estación Susques y Olacapato reconstruida según las distintas cotas medias de las subcuencas.



Si bien el valor de R² es bajo, son las estaciones que mejor representan el comportamiento de la precipitación con la altura dado su cercanía para así evitar efectos de la latitud y longitud.

Corrección de precipitación por ubicación

Debido a que la estación Olacapato se encuentra en el extremo sur de la cuenca en la cual se observa una importante disminución de precipitación comparado con Susques, se corrigió la precipitación para esa zona a partir de la relación encontrada entre Olacapato y la estación base Susques. Al correlacionar los valores anuales de precipitación entres Susques y Olacapato, se

obtiene la relación de la Figura 3-12, la cual permite extender la serie de precipitaciones observada en Olacapato hasta el año 2013.

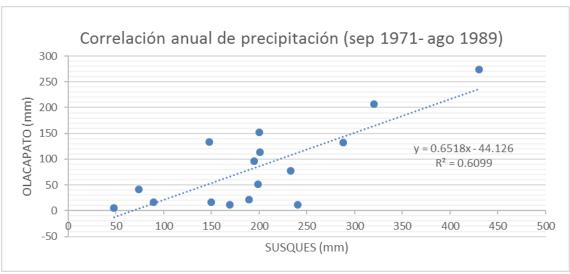


Figura 3-12. Correlación Susques y Olacapato.

Por lo tanto, dada la diferencia de precipitación entre Susques y Olacapato, se decidió que las cuencas ubicadas en el salar de Olaroz tengan como estación representativa de precipitación a Susques, mientras que para las de Cauchari y Archibarca se considera la estación Susques corregida por Olacapato; considerando además para cada subcuenca la corrección por gradiente de precipitación versus altitud.

Transformación de precipitación mensual a diaria

Las estaciones de Susques y Olacapato tienen sólo registro mensual de precipitación, por lo que fue necesario utilizar el generador climático MODAWEC para obtener una serie de precipitaciones a escala diaria. Este generador climatológico usa el número de día húmedos por mes obtenido de las estaciones de Exar S.A. y el total mensual, para generar una serie estocástica de valores de precipitación diaria. Dicho trabajo se obtuvo de Ref. 5.

Evapotranspiración Potencial

La evapotranspiración potencial (PET) en cada una de las subcuencas aporte al salar, se tomó del promedio mensual de la estación Vaisala. Dado que este valor varía con la altura, se corrigió según la expresión dada en Ref. 4.

PET_{anual} = $0.9 * (4364 - 0.59 * A) (R^2 = 0.93)$ (A = altura media de la subcuenca en msnm.)

Parámetros del modelo

El modelo requiere como input el área (km²) de las subcuencas, condiciones iniciales del flujo y varios parámetros según las distintas componentes del modelo.

La Tabla 3-13 y Tabla 3-5 resume los parámetros de las cuencas definidas por los aforos CSW01, CSW02, CSW03, CSW04, CSW05, CSW07, CSW08, CSW12, OSW01 (Subcuenca de Rosario Toro) y OSW02 (Subcuenca de Archibarca). La Tabla 3-14 resume los parámetros asociados a las subcuencas para el cálculo de la recarga.

Aforo	Subcuenca	Área	Cota media	Corrección Gradiente	EVPOT anual mm
		km ²	msnm	Precipitación	
CSW01	Tuzgle	48	4366	1.08 (x PP _{Olacapato})	1520
CSW02	Tocomar	29	4610	1.16 (x PP _{Olacapato})	1400
CSW03	Tocomar	82	4618	1.16 (x PP _{Olacapato})	1400
CSW04	Tocomar	134	4585	1.15 (x PP _{Olacapato}))	1410
CSW05	Tocomar	26	4732	1.20 (x PP _{Olacapato})	1350
CSW07	Tocomar	61	4952	1.27 (x PP _{Olacapato})	1240
CSW08	Tocomar	31	4607	1.16 (x PP _{Olacapato})	1400
CSW12	Guayaos	13	4369	1.08 (x PP _{Olacapato})	1520
OSW01	Rosario Toro	961	4567	1.32 (x PP _{Susques})	1430
OSW02	Archibarca	333	4319	1.07 (x PP Olacapato)	1550

Tabla 3-13. Parámetros de cuencas asociados a los aforos. PP Susques: Precipitación Susques. PP Olacapato: Precipitación Susques corregida por Olacapato.

Cuenca	Área	Cota media	Corrección Gradiente	EVPOT anual mm
	km ²	msnm	Precipitación	
Rosario-Toro	1582	4483	1.29 (x PP _{Susques})	1530
Archibarca	373	4345	1.08 (x PP Olacapato)	1540
Olaroz	304	4302	1.22 (x PP _{Susques})	1400
Turi Lari	285	4238	1.20 (x PP _{Susques})	1410
Tocomar	685	4599	1.16 (x PP Olacapato)	1350
Tuzgle	311	4300	1.06 (x PP Olacapato)	1240
Guayaos	293	4300	1.06 (x PP Olacapato)	1400
Nac. Quevar	136	4556	1.14 (x PP Olacapato)	1520

Tabla 3-14. Parámetros de cuencas para cálculo de la recarga. PP Susques: Precipitación Susques. PP Olacapato: Precipitación Susques corregida por Olacapato.

Los parámetros y las condiciones iniciales que se calibran en el modelo HEC HMS se muestran en la Tabla 3-15:

Componente del modelo	Canopy	Surface	Loss	Baseflow
Condiciones iniciales	-Initial Storage (%)	-Initial Storage (%)		-GW 1 Initial (m³/s) -GW 2 Initial (m³/s)
Parámetros	-Max Storage (mm) -Crop Coefficient -Uptake method	-Max Storage (mm)	-Soil (%) -Groundwater 1 (%) -Groundwater 2 (%) -Max Infiltration (mm/hr) -Impervious (%) -Soil Storage (mm) -Tension storage (%) -Soil percolation (mm/hr) -GW 1 Storage (mm) -GW 2 Storage (mm) -GW 2 Percolation (mm/hr) -GW 2 Coefficient (hr)	-GW 1 Coefficient -GW 1 Reservoirs -GW 2 Coefficient -GW 2 Reservoirs

Tabla 3-15. Parámetros del modelo hidrológico.

4. Resultados

4.1 Resultados calibración puntos de aforo

Los parámetros obtenidos de la calibración del modelo en los puntos de aforo se muestran en la Tabla 4-1:

			Simple	Canop	у	Simple	Surface	Loss (Soil Moisture Accounting)								Baseflow											
Aforo	Área	Initial Storage(%)	Max Storage (mm)	Crop Coef	Uptake Method	Initial Storage (%)	Max Storage (mm)	Soil(%)	GW1(%)	GW2(%)	Max Infil (mm/hr)	Impervious (%)	Soil Storage (mm)	Tension Storage (mm)	Percolation (mm/hr)	GW1 Storage (mm)	Percolation (mm/hr)	GW1 Coef (hr)	GW2 Storage (mm)	Percolation (mm/hr)	GW2 Coef (hr)	GW1 Initial (m3/s)	GW1 Coef	GW1 Reservoirs	GW2 Initial (m3/s)	GW2 Coef	GW2 Reservoirs
CSW-01	48	50	15	1	None	50	1000	50	50	50	10	0	600	500	20	120	0.5	80	100	0.3	300	0.3	10	8	0.6	825	5
CSW-02	29	50	7	1	None	50	1000	50	50	50	10	0	600	500	20	120	1	80	100	0.3	300	0.3	10	8	0.6	825	5
CSW-03	82	50	7	1	None	50	1000	50	50	50	10	0	600	500	20	120	1	80	100	0.3	300	0.3	10	8	0.6	825	5
CSW-04	134	50	7	1	None	50	1000	50	50	50	10	0	600	500	20	120	1	80	100	0.3	300	0.3	10	8	0.6	825	5
CSW-05	26	50	7	1	None	50	1000	50	50	50	10	0	600	500	20	120	1	80	100	0.3	300	0.3	10	8	0.6	825	5
CSW-07	61	50	1	1	None	50	1000	50	50	50	10	0	600	500	20	120	2	80	100	0.3	300	0.3	10	8	0.6	825	5
CSW-08	31	50	15	1	None	50	1000	50	50	50	10	0	600	500	20	120	0.5	80	100	0.3	300	0.3	10	8	0.6	825	5
CSW-12	13	50	15	1	None	50	1000	50	50	50	10	0	600	500	20	120	0.5	80	100	0.3	300	0.3	10	8	0.6	825	5
OSW-01	841	50	60	1	None	50	1000	50	50	50	10	0	600	500	20	120	1	80	100	0.3	300	0.3	10	8	0.6	825	5
OSW-02	333	50	19	1	None	50	1000	50	50	50	10	0	600	500	20	120	0.5	80	100	0.3	300	0.3	10	8	0.6	825	5

Tabla 4-1. Resultados de parámetros de calibración.

La Tabla 4-2 resume el promedio de los caudales medios mensuales simulados:

Punto	Caudal promedio simulado (L/s)	Área (km²)	Rendimiento (L/s/km²)
OSW-01	794	961	0.83
OSW-02	75	333	0.23
CSW-01	18	48	0.38
CSW-02	26	29	0.90
CSW-03	74	82	0.90
CSW-04	119	134	0.89
CSW-05	25	26	0.96
CSW-07	110	61	1.80
CSW-08	14	31	0.45
CSW-12	5	13	0.38

Tabla 4-2. Resultados caudales simulados en puntos de aforo

A continuación, para cada uno de los puntos de aforos señalados en la Tabla 4-2, se presentan los caudales diarios simulados versus los caudales aforados y la precipitación diaria en la cuenca. Como puede visualizarse desde la Figura 4-1 hasta Figura 4-10, no hubo suficiente información de aforos para representar el comportamiento de los caudales entre diciembre y marzo, por lo tanto, para dicho periodo, uno de los parámetros asociado a la escorrentía directa (Impervious) se mantuvo igual a cero para ser conservador en el cálculo de caudales de crecidas, sin embargo, para el periodo comprendido entre abril y noviembre, se ha considerado que los caudales aforados son representativos de la respuesta hidrológica de cada una de las subcuencas.

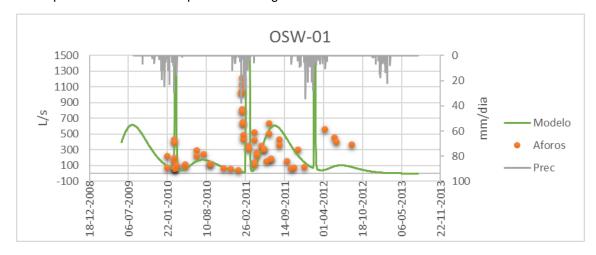


Figura 4-1. Resultados de la simulación. Valores medios diarios de caudales en OSW-01.

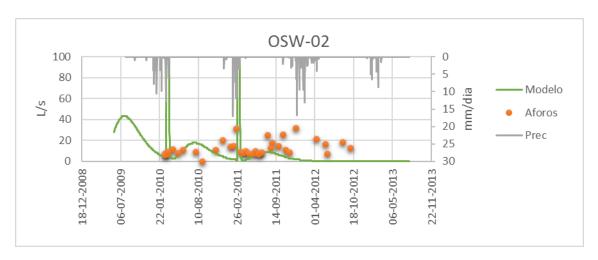


Figura 4-2. Resultados de la simulación. Valores medios diarios de caudales OSW-02.

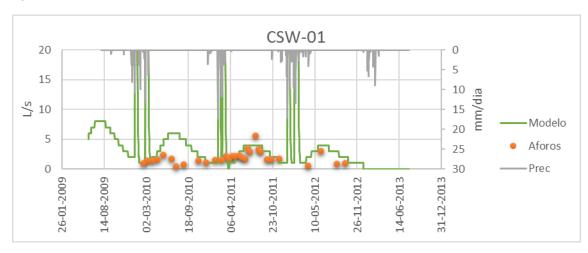


Figura 4-3. Resultados de la simulación. Valores medios diarios de caudales CSW-01.

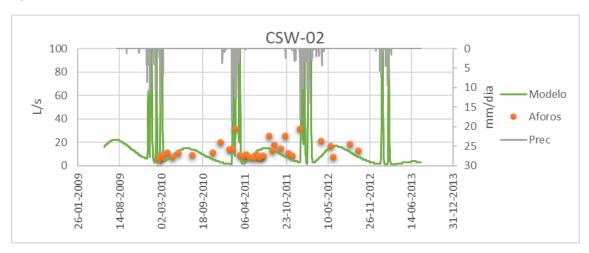


Figura 4-4. Resultados de la simulación. Valores medios diarios de caudales CSW-02.

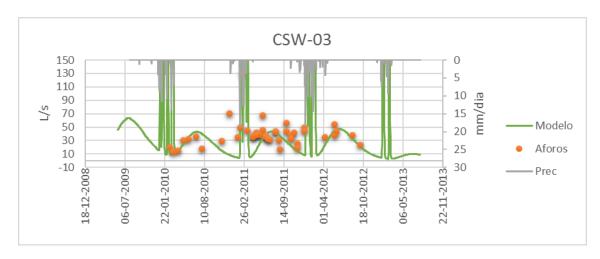


Figura 4-5. Resultados de la simulación. Valores medios diarios de caudales CSW-03.

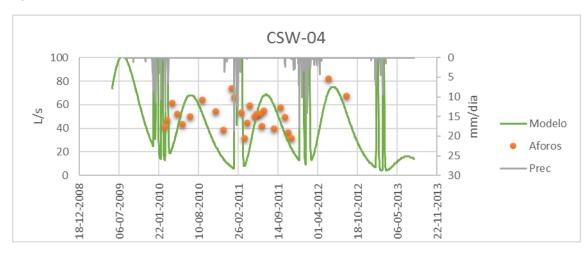


Figura 4-6. Resultados de la simulación. Valores medios diarios de caudales CSW-04.

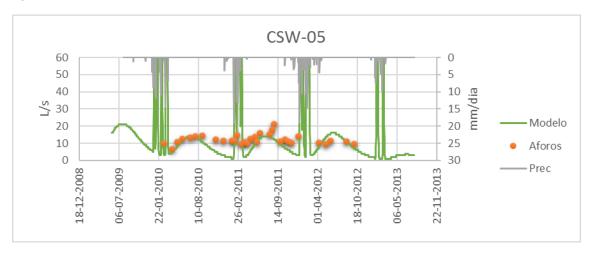


Figura 4-7. Resultados de la simulación. Valores medios diarios de caudales CSW-05.

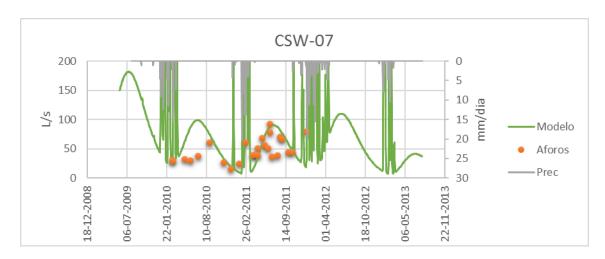


Figura 4-8. Resultados de la simulación. Valores medios diarios de caudales CSW-07.

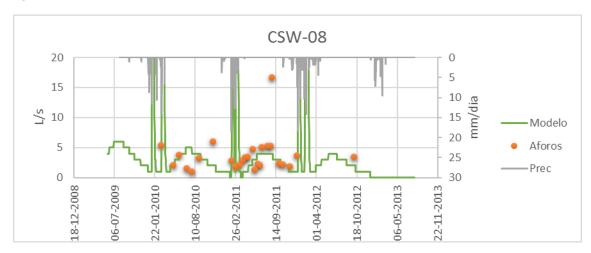


Figura 4-9. Resultados de la simulación. Valores medios diarios CSW-08.

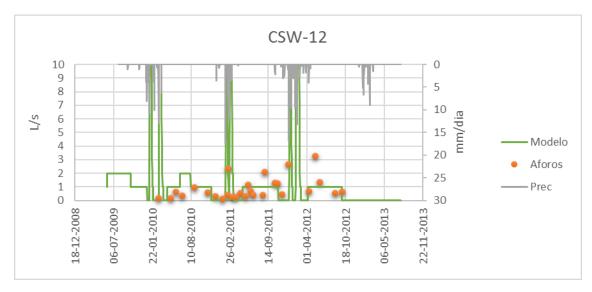


Figura 4-10. Resultados de la simulación. Valores medios diarios CSW-12.

4.2 Validación con valores observados en estación Sayate

Para sustentar la existencia de caudales de crecidas, la Figura 4-11 presenta la comparación entre los caudales medios mensuales simulados en OSW-01 y los caudales medios mensuales aforados en Sayate. Ambos casos mostraron un aumento significativo de caudales entre diciembre y marzo.

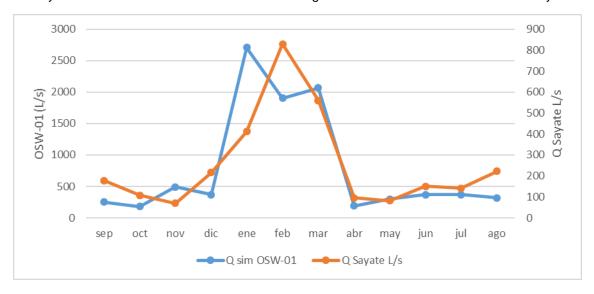


Figura 4-11. Comparación de caudales simulados OSW-01 y Sayate

Los datos de la estación Sayate pueden descargarse del siguiente enlace:

http://www.mininterior.gov.ar/obras-publicas/subsecretaria-rh.php

4.3 Cálculo de recarga

Una vez calibrados los parámetros para distintas cuencas con puntos de aforos, los resultados se extrapolan a las distintas subcuencas que son parte de la recarga al salar:

			Simple	Canop	у	Simple	Surface	Loss (Soil Moisture Accounting)							Baseflow												
Aforo	Área	Initial Storage(%)	Max Storage (mm)	Crop Coef	Uptake Method	Initial Storage (%)	Max Storage (mm)	Soil(%)	GW1(%)	GW2(%)	Max Infil (mm/hr)	Impervious (%)	Soil Storage (mm)	Tension Storage (mm)	Percolation (mm/hr)	GW1 Storage (mm)	Percolation (mm/hr)	GW1 Coef (hr)	GW2 Storage (mm)	Percolation (mm/hr)	GW2 Coef (hr)	GW1 Initial (m3/s)	GW1 Coef	GW1 Reservoirs	GW2 Initial (m3/s)	GW2 Coef	GW2 Reservoirs
Rosario	1582	50	60	1	None	50	1000	50	50	50	10	0	600	500	20	120	1	80	100	0.3	300	0.3	10	8	0.6	825	5
Archibarca	372	50	19	1	None	50	1000	50	50	50	10	0	600	500	20	120	0.5	80	100	0.3	300	0.3	10	8	0.6	825	5
Olaroz	304	50	60	1	None	50	1000	50	50	50	10	0	600	500	20	120	1	80	100	0.3	300	0.3	10	8	0.6	825	5
Turi Lari	286	50	60	1	None	50	1000	50	50	50	10	0	600	500	20	120	1	80	100	0.3	300	0.3	10	8	0.6	825	5
Tocomar	685	50	7	1	None	50	1000	50	50	50	10	0	600	500	20	120	1	80	100	0.3	300	0.3	10	8	0.6	825	5
Tuzgle	311	50	15	1	None	50	1000	50	50	50	10	0	600	500	20	120	0.5	80	100	0.3	300	0.3	10	8	0.6	825	5
Guayaos	293	50	15	1	None	50	1000	50	50	50	10	0	600	500	20	120	0.5	80	100	0.3	300	0.3	10	8	0.6	825	5
Quevar	136	50	15	1	None	50	1000	50	50	50	10	0	600	500	20	120	0.5	80	100	0.3	300	0.3	10	8	0.6	825	5

En la Tabla 4-3 se presentan los caudales medios obtenidos para la recarga durante el periodo comprendido entre 01-09 1973 y 31-08-2013 (40 años):

Subcuenca	Caudal L/s	Área (km²)	Rendimiento	PP	Recarga/PP
			(L/s/km ²)	(L/s)	
Rosario	1193	1582	0.75	11446	10.42%
Archibarca	87	373	0.23	907	9.59%
Olaroz	173	304	0.57	2087	8.29%
Turi Lari	144	285	0.50	1927	7.47%
Tocomar	611	685	0.89	1794	34.06%
Tuzgle	108	311	0.35	749	14.43%
Guayaos	102	293	0.35	705	14.46%
Quevar	59	136	0.43	352	16.76%
Total	2477	3969	0.51	19968	12.41%

Tabla 4-3. Caudales de recarga simulados (L/s) y precipitación media estimada (PP) para cada subcuenca expresada como caudal promedio continuo.

En la Figura 4-12, se observa que Rosario es el que presenta el mayor aporte de caudal (48%). Otro aporte importante de caudal se observa en Tocomar (25%), mientras que el resto de las subcuencas se comporta similar (entre 2% y 7%). Sin embargo, notar que Rosario es la subcuenca con mayor área.

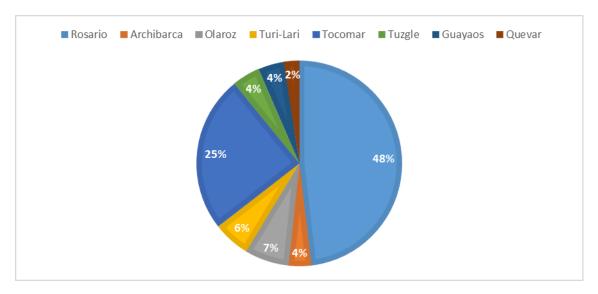


Figura 4-12. Recarga aportada por cada subcuenca como porcentaje de la recarga total.

Finalmente, la magnitud del valor del rendimiento obtenido en las distintas subcuencas es similar al valor registrado por la estación operada por la Dirección General de Aguas de Chile en la Cuenca del Salar de Atacama para la Estación "Río San Pedro en Cuchabrachi". Dicha estación registra desde 1975 hasta 2015 en promedio un caudal de 716 L/s y tiene un área aportante de 933 km², por lo tanto, el caudal por unidad de área o rendimiento es **0.77 L/s/km²** [Ref. 1]. (www.dga.cl)

5. Conclusiones

El número de aforos fue insuficiente para caracterizar, solamente con ellos, los caudales de recarga de la cuenca de los salares de Cauchari y Olaroz, sin embargo, utilizando un modelo hidrológico y estaciones meteorológicas cercanas, fue posible estimar los caudales de recarga considerando los siguientes supuestos:

- Los mayores caudales se presentan entre diciembre y marzo, periodo coincidente con las mayores precipitaciones. Para tener resultados conservadores, se ajustó un parámetro del modelo que disminuyó el aporte de escorrentía directa para no sobreestimar el recurso.
- Entre abril y noviembre, se consideró que los caudales aforados eran representativos de los caudales en dichos meses. Si bien se presentan aportes nivales entre abril y noviembre, como estos no han sido cuantificados, no se consideraron en el cálculo de los caudales de recarga.
- No se consideró el aporte de las precipitaciones sobre el área de los núcleos de los salares y la zona de los conos y abanicos a la recarga.
- La magnitud del rendimiento entre el río San Pedro en Chile y el río Rosario en Argentina son similares, lo cual es posible porque ambos son cauces mayores de carácter permanentes en el Altiplano.

Antecedentes bibliográficos

[Ref. 1] Servicios hidrometeorológicos, estadística hidrológica en línea (Dirección General de Agua, Chile).

[Ref. 2] Informe de Impacto Ambiental. Capítulo II. Proyecto Salares Cauchari – Olaroz Minera Exar S.A. 2011.

[Ref. 3] Informe Climatológico para el Climate Report "Lithium Americas Corp." Proyecto Cauchari-Olaroz. 2012.

[Ref. 4] Evaporation in the Atacama Desert: An empirical study of spatio-temporal variations and their causes. Houston, J. (2006). Journal of Hydrology 330, 402–412.

[Ref. 5] Technical Memorandum "Water Balance and Freshwater Inflow Estimation for the Cauchari-Olaroz Watersheds", Julio 2011.

[Ref. 6] Manual técnico de HEC-RAS.