

Alto Maipo Project

METODOLOGÍA ACTUALIZACIÓN CAPACIDADES DE TRATAMIENTO PLANTAS DE AGUAS AFLORADAS DEL PHAM ANEXO –2

Marzo 2019

ALTO MAIPO

Estimación de Caudales para las Plantas de Aguas Afloradas

Tres tipos de proyecciones de caudales de agua aflorada:

- Caudales medios esperados según el Modelo Hidrogeológico.
- Caudales máximos proyectados en base al Modelo Hidrogeológico.
- Caudales esperados de las tasas de afloramiento promedio según proyección estadística.

Principales Consideraciones Previas

- **El Modelo Hidrogeológico representa valores medios mensuales**
- **Los registros históricos presentan un comportamiento normal o de distribución gaussiana**
- **Las capacidades de tratamiento operacional deben ser capaces de atender los flujos diarios máximos reales/proyectados**
- **Diferentes métodos de excavación con grado de flexibilidad diferente**

Estimación de Caudales para las Plantas de Aguas Afloradas

Antecedentes

El presente documento corresponde a una explicación metodológica para estimación de caudales para las plantas de aguas afloradas incluida en el Anexo A del 20190130-MA-RPT, para lo cual se utilizan dos bases de registros: Túnel L1 que sirve como ejemplo del desarrollo metodológico, y V1 que explica el origen y adaptación de los caudales estimados para el Túnel El Volcán.

Modelo Hidrogeológico y Resgistros Históricos

- Informe del modelo hidrogeológico HIDROMAS
- Registro histórico Febrero 2016 a julio 2018
- Registro histórico Portal V1-Túnel Volcán, Abril a Diciembre de 2018.

Ejemplo mes de Diciembre 2016
de registro de caudales diarios en
Túnel Las Lajas – Portal L1

(Base del Modelo Hidrogeológico)

01-12-2016	17,87	18-12-2016	21,63
02-12-2016	18,10	19-12-2016	20,36
03-12-2016	16,25	19-12-2016	18,64
04-12-2016	19,42	20-12-2016	19,17
05-12-2016	17,76	20-12-2016	19,13
06-12-2016	17,73	21-12-2016	21,10
07-12-2016	18,17	21-12-2016	20,62
08-12-2016	19,94	22-12-2016	20,97
08-12-2016	20,72	22-12-2016	18,46
09-12-2016	21,05	23-12-2016	20,67
09-12-2016	21,32	23-12-2016	22,89
10-12-2016	20,44	24-12-2016	20,77
10-12-2016	19,76	24-12-2016	20,31
11-12-2016	20,41	25-12-2016	20,20
11-12-2016	20,93	25-12-2016	19,94
12-12-2016	20,01	26-12-2016	19,61
12-12-2016	18,84	26-12-2016	20,07
13-12-2016	20,18	27-12-2016	21,40
13-12-2016	20,27	27-12-2016	19,98
14-12-2016	22,26	28-12-2016	20,90
14-12-2016	16,62	28-12-2016	19,27
15-12-2016	23,04	29-12-2016	21,17
15-12-2016	18,38	29-12-2016	18,60
16-12-2016	19,42	30-12-2016	19,05
17-12-2016	19,87	30-12-2016	28,17
17-12-2016	18,20	31-12-2016	21,89
18-12-2016	19,27	31-12-2016	20,87

Las referencias de tablas corresponden a
las del Anexo A

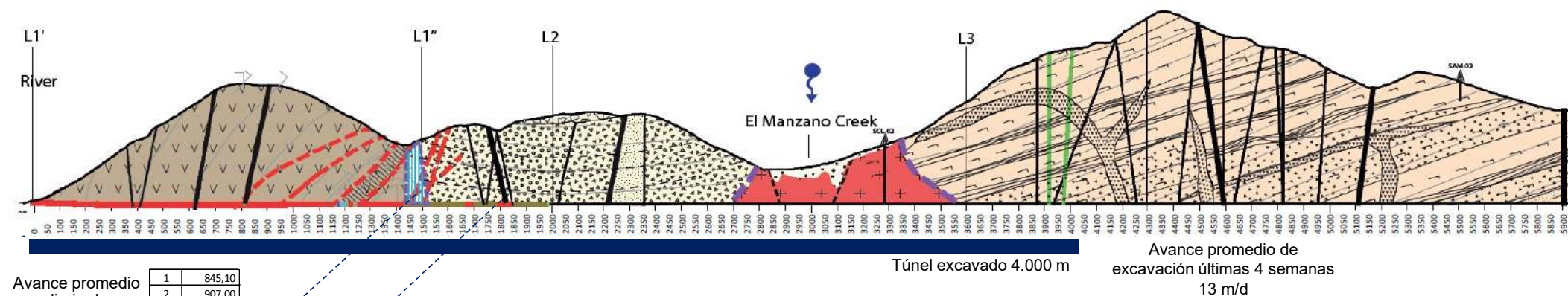
(Registros complementarios)

Túnel Volcán Portal V1 (Abril-Diciembre 2018)					
Meses 2018	PK	Promedio Mensual	Máximo Mensual	Diferencia Promedio / Máximo Operacional	
		l/s	l/s	l/s	%
Abril	2111	8,87	10,12	1,24	14,01
Mayo	2244	8,89	9,77	0,88	9,94
Junio	2304	5,99	8,47	2,48	41,42
Julio	2349	5,20	8,28	3,08	59,22
Agosto	2504	4,62	13,84	9,22	199,33
Septiembre	2605	10,68	23,25	12,57	117,73
Octubre	2666	19,41	25,32	5,91	30,45
Noviembre	2755	22,34	26,01	3,67	16,43
Diciembre	2786	23,36	26,70	3,34	14,30

5.5 Tablas A.5 Flujos medidos mensuales en portal V1
(Registro diarios en Anexo A - 5.4)

ALTO MAIPO

Comportamiento de la Excavación y Tasas de Afloramiento Promedio en Túnel L1



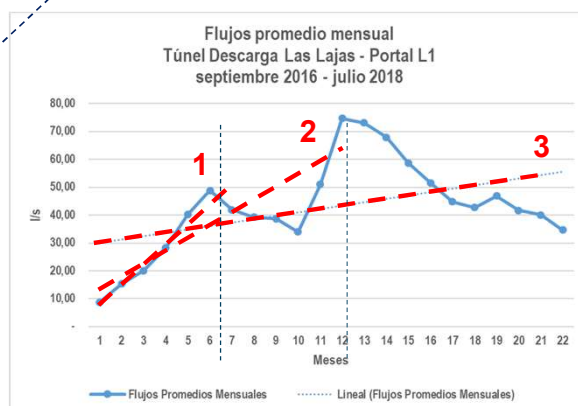
Avance promedio diario de excavación

1	845,10
2	907,00
3	1.043,00
4	1.149,80
5	1.240,80
6	1.449,20
7	1.666,70
8	1.718,80
9	1.759,10
10	1.826,20
11	1.871,60
12	1.891,10
13	1.976,00
14	2.094,90
15	2.123,30
16	2.166,50
17	2.166,50
18	2.166,50
19	2.213,20
20	2.354,40
21	2.500,60
22	2.638,50

0.67 m/d

4.86 m/d

Avance acumulado mensual de excavación en Túnel L1



Tasas de Afloramiento Promedio Reales en L1

Período Amulado	Kilometraje Acumulado (m)	Tasa de Afloramiento Promedio (l/s/m)	Caudal Promedio Registrado (l/s)	Máximo Registrado (l/s)
Hasta los 6 meses	1.449	0,067	26,89	61,57
Hasta los 12 meses	1.891	0,036	36,73	87,56
Hasta los 22 meses	2.639	0,018	42,86	87,56

Tabla 4.5 Afloramiento Promedio por metro de túnel Descarga Las Lajas - Portal L1

La tasa de avance de la excavación depende directamente de la calidad de la roca y cantidad de fortificación a instalar

ALTO MAIPO

Tecnología de Excavación – TBM Abierta (Similar Túnel L1)



TBM Abierta - Herrenknecht

ALTO MAIPO

Estimación de Caudales para las Plantas de Aguas Afloradas

Tres tipos de proyecciones de caudales de agua aflorada:

- Caudales medios esperados según el Modelo Hidrogeológico.
- Caudales máximos proyectados en base al Modelo Hidrogeológico.
- Caudales esperados de las tasas de afloramiento promedio según proyección estadística.

Caudales Máximos Proyectados

Cálculo de los caudales máximos proyectados en tres pasos:

- **Comportamiento estadístico:**
Relación entre los promedios de las medias, los promedios de los máximos y los máximos.
- **Seguridad operacional:**
Dependiente del sistema o tecnología de excavación.
- **Factor de seguridad operacional:**
Aplicado sobre los promedios determinados por el modelo hidrogeológico para obtener los máximos proyectados.

Caudales Máximos Proyectados

- **Comportamiento estadístico** de los caudales promedios máximos respecto de los promedios de las medias mensuales.

01-12-2016	17,87	18-12-2016	21,63
02-12-2016	18,10	19-12-2016	20,36
03-12-2016	16,25	19-12-2016	18,64
04-12-2016	19,42	20-12-2016	19,17
05-12-2016	17,76	20-12-2016	19,13
06-12-2016	17,73	21-12-2016	21,10
07-12-2016	18,17	21-12-2016	20,62
08-12-2016	19,94	22-12-2016	20,97
08-12-2016	20,72	22-12-2016	18,46
09-12-2016	21,05	23-12-2016	20,67
09-12-2016	21,32	23-12-2016	22,89
10-12-2016	20,44	24-12-2016	20,77
10-12-2016	19,76	24-12-2016	20,31
11-12-2016	20,41	25-12-2016	20,20
11-12-2016	20,93	25-12-2016	19,94
12-12-2016	20,01	26-12-2016	19,61
12-12-2016	18,84	26-12-2016	20,07
13-12-2016	20,18	27-12-2016	21,40
13-12-2016	20,27	27-12-2016	19,98
14-12-2016	22,26	28-12-2016	20,90
14-12-2016	16,62	28-12-2016	19,27
15-12-2016	23,04	29-12-2016	21,17
15-12-2016	18,38	29-12-2016	18,60
16-12-2016	19,42	30-12-2016	19,05
17-12-2016	19,87	30-12-2016	28,17
17-12-2016	18,20	31-12-2016	21,89
18-12-2016	19,27	31-12-2016	20,87

Túnel Descarga Las Lajas (L1 - O-TBM)					
Meses	Fecha	Promedio Mensual	Máximo Mensual	Diferencia Promedio / Máximo Operacional	
		l/s	l/s	l/s	%
1	01-09-2016	8,66	9,92	1,26	14,58
2	01-11-2016	15,29	17,20	1,91	12,47
3	01-12-2016	20,04	28,17	8,13	40,57
4	01-01-2017	28,37	34,28	5,90	20,81
5	01-02-2017	40,23	52,48	12,25	30,44
6	01-03-2017	48,77	61,57	12,80	26,25
7	01-04-2017	41,92	49,02	7,10	16,94
8	01-05-2017	39,23	44,99	5,76	14,68
9	01-06-2017	38,64	49,86	11,22	29,03
10	01-07-2017	33,93	50,73	16,80	49,50
11	01-08-2017	51,04	68,67	17,63	34,51
12	01-09-2017	74,67	87,56	12,89	17,26
13	01-10-2017	73,15	86,40	13,24	18,11
14	01-11-2017	67,89	85,31	17,42	25,66
15	01-12-2017	58,76	69,42	10,66	18,14
16	01-01-2018	51,55	53,64	2,09	4,06
17	01-02-2018	44,82	48,77	3,95	8,81
18	01-03-2018	42,68	45,76	3,08	7,22
19	01-04-2018	46,84	57,22	10,39	22,17
20	01-05-2018	41,71	43,45	1,74	4,17
21	01-06-2018	40,05	42,34	2,30	5,73
22	01-07-2018	34,63	35,92	1,29	3,71

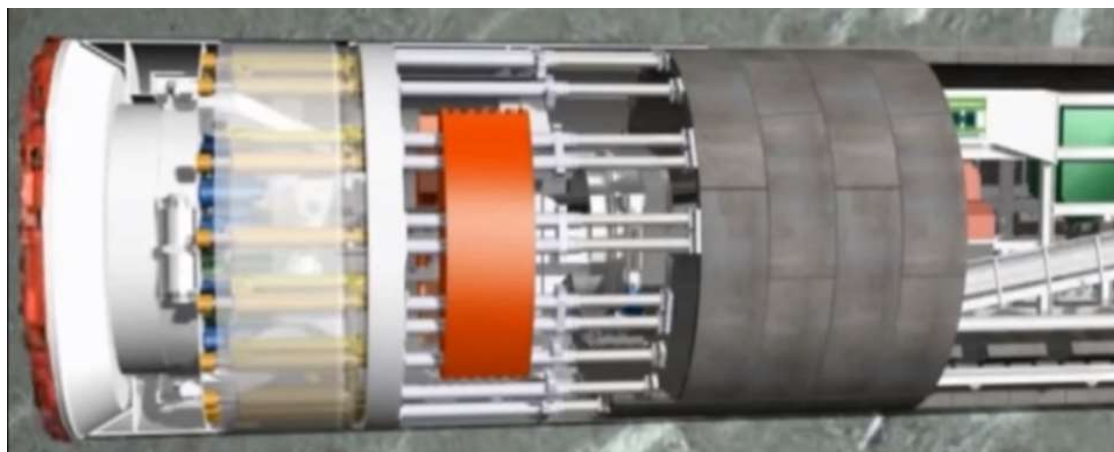
5.1 Tablas A.1 Registro de flujos medidos por portal

- Sin considerar proyecciones, sólo los datos históricos, indican que la necesidad de tratamiento de aguas de afloramiento varió entre 8,66 l/s y 87,56 l/s.

RELACION ENTRE LOS CAUDALES PROMEDIOS Y MAXIMOS MENSUALES (febrero 2016 - julio 2018)					
Túnel	Portal	Caudales Mensuales (l/s)			
		Promedio caudales medios	Promedio caudales máximo diario	Diferencia promedio mensual	Desviación estándar de las diferencias
Volcán	V1	8,02	10,83	2,81	1,42
	V5	8,19	10,67	2,48	1,53
Alfalfal	VA4	5,87	12,82	6,95	6,52
	VA2	3,92	6,11	2,18	2,31
Las Lajas	L1	42,86	51,85	8,99	7,89
	VL4	52,21	65,52	13,31	7,77
	VL5	11,41	14,80	3,39	3,77
	VL2				
	VL7				

Tabla 4.2 Relación entre caudales promedio y máximos mensuales

Tecnología de Excavación – TBM Cerrada



Primera Línea de Perforadoras
depende del modelo y fabricante de
la TBM (Referencia general 10 m
desde la frente)



Segunda Línea de Perforadoras
depende del modelo y fabricante de
la TBM (Referencia general 100-
190 m desde la frente)



Segunda Línea de Perforadoras
depende del modelo y fabricante de
la TBM (Referencia general 160-
300 m desde la frente)

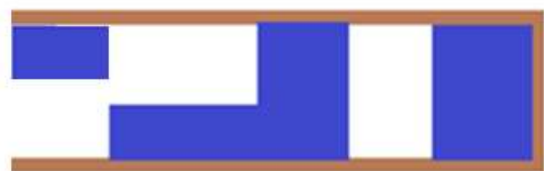
TBM Doble Escudo - Herrenknecht

ALTO MAIPO

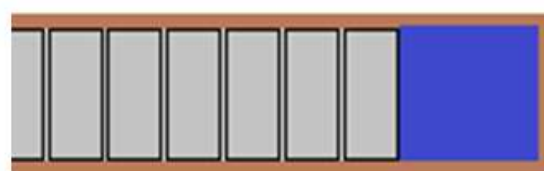
Caudales Máximos Proyectados



D&B



TBM ABIERTA



TBM CERRADA

Postgrouting
después de
excavar



Pregrouting
antes de
excavar



Seguridad Operacional

Método Constructivo	Necesidad Operacional de Tratamiento Aguas Afloradas
Perforación y Voladura (D&B)	75%
TBM Abiertas	90%
TBM Cerradas o con escudo(s)	100%

Tabla 4.4 Necesidad operacional de tratamiento aguas afloradas según método constructivo



METODOLOGIAS DE EXCAVACION ACTUAL Y PROGRAMADA				
Túnel	Portal	Metodología de Excavación		Necesidad Operacional
		Actual	Programada	
Volcán	V1	D&B	TBM c/Escudo	100%
	V5	D&B	TBM c/Escudo	100%
Alfalfal	VA4	TBM Abierta	TBM Abierta	90%
	VA2	TBM Abierta	TBM Abierta	90%
Las Lajas	L1	TBM Abierta	TBM Abierta	90%
	VL4	D&B	TBM c/Escudo	100%
	VL5	D&B	D&B	75%
	VL2	D&B	D&B	75%
	VL7	-	-	-

Tabla 4.6 Metodologías de excavación y necesidad operacional

ALTO MAIPO

Caudales Máximos Proyectados

Factor de Seguridad Operacional

- Aplicación de los factores de ajuste o seguridad a los caudales promedios esperados del modelo hidrogeológico para proyectar los máximos esperables.

$$F.S. = 1 + (Pd + Sd * Fg) / Pm \quad (\text{Fórmula 4.1})$$

Túnel Descarga Las Lajas (L1 - O-TBM)							
Nivel de Confianza	Factor de la Tabla Gaussiana	Caudal Promedio	Ajuste por Desviación Estándar	Capacidad Corregida	Capacidad Adicional s/Promedio	Capacidad Adicional s/Promedio	Factor de Seguridad
%	n	l/s	l/s	l/s	%	n	n
75,00%	0,68	42,86	14,36	57,22	33,50%	0,3350	1,3350
80,00%	0,84	42,86	15,62	58,48	36,45%	0,3645	1,3645
84,00%	1,00	42,86	16,88	59,74	39,40%	0,3940	1,3940
90,00%	1,29	42,86	19,17	62,03	44,74%	0,4474	1,4474
95,00%	1,65	42,86	22,02	64,87	51,37%	0,5137	1,5137
99,00%	2,33	42,86	27,38	70,24	63,89%	0,6389	1,6389
100,00%	N/A	42,86	44,70	87,56	104,30%	1,0430	2,0430

5.2 Tablas A.2 Factores de seguridad para cada portal de cada túnel

F.S.: Factor de Seguridad. Multiplica el promedio mensual de los flujos medios mensuales registrados, para proyectar el máximo mensual esperado para un cierto nivel operacional.

Pd: Promedio de las diferencias de flujos mensuales entre el máximo diario mensual y el promedio mensual de un determinado mes.

Sd: Desviación estándar de las diferencias de los flujos mensuales, entre el máximo diario mensual y el promedio mensual de un determinado mes.

Pm: Promedio mensual de un determinado mes de los flujos registrados en un portal específico.

Fg: Factor gaussiano asociado a un determinado nivel de confianza o nivel de cobertura operacional requerido.

Estimación de Caudales para las Plantas de Aguas Afloradas

Tres tipos de proyecciones de caudales de agua aflorada:

- Caudales medios esperados según el Modelo Hidrogeológico.
- Caudales máximos proyectados en base al Modelo Hidrogeológico.
- Caudales esperados de las tasas de afloramiento promedio según proyección estadística.

Tasas de Afloramiento Promedio

Metodología de Cálculo:

- **Comportamiento real** de las aguas de afloramiento con medidas de control, y
- **Proyección estadística** en base a la regresión lineal de los datos registrados

Tasas de Afloramiento Promedio

- Regresión lineal a los registros de flujos de aguas afloradas, equivalente a la **tasa de afloramiento promedio (l/s/m)**.

Período Amulado	Kilometraje Acumulado (m)	Tasa de Afloramiento Promedio (l/s/m)	Caudal Promedio Registrado (l/s)	Máximo Registrado (l/s)
Hasta los 6 meses	1.449	0,067	26,89	61,57
Hasta los 12 meses	1.891	0,036	36,73	87,56
Hasta los 22 meses	2.639	0,018	42,86	87,56

Tabla 4.5 Afloramiento Promedio por metro de túnel Descarga Las Lajas – Portal L1

- La tasa de afloramiento promedio (l/s/m) a una cierta longitud de excavación, la definimos como la **tasa de infiltración residual-temporal (l/s)**
- Con una tasa de afloramiento promedio de **0,018 l/s/m** en caso de excavar **7.300 m** en el **túnel L1**, deberíamos tener **144 l/s de aguas afloradas**.
- Con una tasa de afloramiento promedio de **0,018 l/s/m** en caso de excavar **10.500 m** en el **túnel L1**, deberíamos tener **203 l/s de aguas afloradas**.

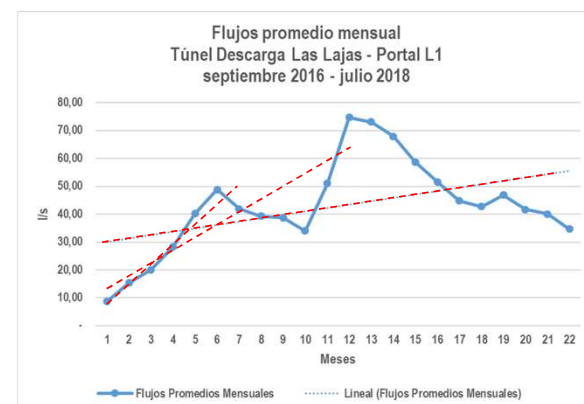


Gráfico 4.1 Comportamiento de los afloramientos promedio de agua en Portal L1 (Con líneas de tendencia lineal por tramo).

Selección de los Caudales de Tratamiento

- **Máximo caudal con medidas de control:** entre el promedio esperado (modelo hidrogeológico), el máximo esperado (necesidad operacional) y el afloramiento residual-temporal (tasa de afloramiento esperada).
- **Capacidad Operacional:** mayor valor entre el máximo con medidas de control y con caudales medios esperados sin medidas de control.

CAPACIDADES DE TRATAMIENTO OPERACIONALES EN BASE A PROMEDIO Y MÁXIMO DIARIO MENSUAL										
MODELO HIDROGEOLÓGICO				NECESIDAD OPERACIONAL			TASA DE INFILTRACIÓN ESPERADA	CAPACIDAD INSTALADA REQUERIDA		
Túnel	Portal	Caudal Medio por Portal/Túnel (l/s)		Nivel Operacional	Factor Seguridad	Maximo Corregido (l/s)	Infiltración Residual-Temporal (l/s)	Capacidad Requerida (l/s)	Capacidad Modular	Capacddad por Túnel (l/s)
		S/G	C/G	%	N	C/G	C/G	Max S/G & C/G	l/s	C/G
Volcán	V1 (4)	17	16	100	2,04	33	98	98	100	250
	V5	92	78	100	1,74	135		135	150	
Alfalfal	VA4 (1)	32	23	90	2,32	53		53	50	125
	VA1 (2)	-	-	-	-	-		25	25	
	VA2	39	26	90	2,32	60		60	50	
Las Lajas	L1	183	127	90	1,45	184	144	184	200	
	VL4	207	101	100	1,67	169		207	200	525
	VL5	24	20	75	1,52	30		30	25	
	VL2 (3)	91	60	75	1,67	100		100	100	
	VL7-VL8	3	3	75	-	-		-	-	
TOTAL CAPACIDAD INSTALADA REQUERIDA										900

5.6 Tabla A.6 Capacidades Operacionales de Tratamiento para las Aguas Afloradas

Notas:

1. Capacidad Requerida. Equivalente a "Estimación capacidad operacional por portal".
2. Capacidad Requerida. Capacidad modular determinada en múltiplos más cercanos de 25 l/s.
3. Capacidad por Túnel. Equivalente a "Capacidad operacional máxima por sistema de túneles".

Tasas de Afloramiento Promedio

- La tasa de afloramiento promedio, entre Abril y Diciembre de 2018, por el **portal V1** fue de **0,024 l/s/m**. En función de esto, la proyección de la tasa de infiltración residual-temporal esperada a los **6.000 m** es de **98 l/s** de agua aflorada.

Túnel Volcán Portal V1 (Abril-Diciembre 2018)					
Meses 2018	PK	Promedio Mensual	Máximo Mensual	Diferencia Promedio / Máximo Operacional	
		l/s	l/s	l/s	%
Abril	2111	8,87	10,12	1,24	14,01
Mayo	2244	8,89	9,77	0,88	9,94
Junio	2304	5,99	8,47	2,48	41,42
Julio	2349	5,20	8,28	3,08	59,22
Agosto	2504	4,62	13,84	9,22	199,33
Septiembre	2605	10,68	23,25	12,57	117,73
Octubre	2666	19,41	25,32	5,91	30,45
Noviembre	2755	22,34	26,01	3,67	16,43
Diciembre	2786	23,36	26,70	3,34	14,30

5.5 Tablas A.5 Flujos medidos mensuales en portal V1
(Registro diarios en Anexo A - 5.4)

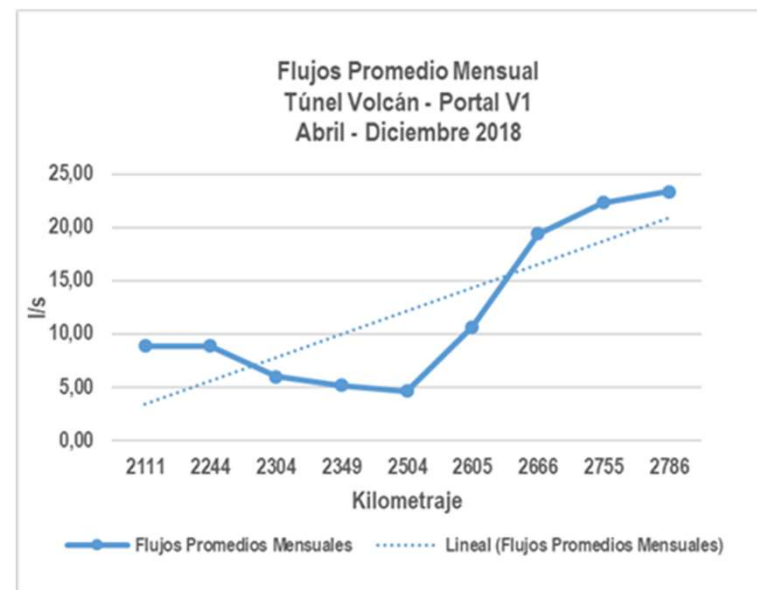


Gráfico 4.2 Comportamiento de los afloramientos promedio de agua en Túnel Volcán – Portal V1

Selección de los Caudales de Tratamiento

- **Máximo caudal con medidas de control:** entre el promedio esperado (modelo hidrogeológico), el máximo esperado (necesidad operacional) y el afloramiento residual-temporal (tasa de afloramiento esperada).
- **Capacidad Operacional:** mayor valor entre el máximo con medidas de control y con caudales medios esperados sin medidas de control.

CAPACIDADES DE TRATAMIENTO OPERACIONALES EN BASE A PROMEDIO Y MÁXIMO DIARIO MENSUAL										
MODELO HIDROGEOLÓGICO				NECESIDAD OPERACIONAL			TASA DE INFILTRACIÓN ESPERADA	CAPACIDAD INSTALADA REQUERIDA		
Túnel	Portal	Caudal Medio por Portal/Túnel (l/s)		Nivel Operacional	Factor Seguridad	Maximo Corregido (l/s)	Infiltración Residual-Temporal (l/s)	Capacidad Requerida (l/s)	Capacidad Modular	Capacidad por Túnel (l/s)
		S/G	C/G							
Volcán	V1 (4)	17	16	100	2,04	33	98	98	100	250
	V5	92	78	100	1,74	135		135	150	
Alfalfal	VA4 (1)	32	23	90	2,32	53		53	50	125
	VA1 (2)	-	-	-	-	-		25	25	
	VA2	39	26	90	2,32	60		60	50	
Las Lajas	L1	183	127	90	1,45	184	144	184	200	525
	VL4	207	101	100	1,67	169		207	200	
	VL5	24	20	75	1,52	30		30	25	
	VL2 (3)	91	60	75	1,67	100		100	100	
	VL7-VL8	3	3	75	-	-		-	-	
TOTAL CAPACIDAD INSTALADA REQUERIDA										900

5.6 Tabla A.6 Capacidades Operacionales de Tratamiento para las Aguas Afloradas

Notas:

1. Capacidad Requerida. Equivalente a "Estimación capacidad operacional por portal".
2. Capacidad Requerida. Capacidad modular determinada en múltiplos más cercanos de 25 l/s.
3. Capacidad por Túnel. Equivalente a "Capacidad operacional máxima por sistema de túneles".

Selección de los Caudales de Tratamiento

Límite Ambiental: Caudales Esperados Promedios en base al Modelo Hidrogeológico (769 l/s)

Límite Operacional: Capacidad de Tratamiento Operacional (900 l/s)

Margen de seguridad: Entre ambos límites es del 17%.

Sistema de túneles	Portal	Caudales Esperados Promedio (l/s)	Capacidad operacional por sistema de túneles(l/s)
Volcán ³	V1	190	250
	V5		
Alfalfal	VA4	71	125
	VA1		
	VA2		
Las Lajas	L1	508	525
	VL4		
	VL5		
	VL2		
	VL7-VL8		
Capacidad operacional total requerida para tratamiento de aguas de afloramiento PHAM			900

Tabla 4.7 Capacidades operacionales de tratamiento requeridas para las aguas de afloramiento

Gracias

ALTO MAIPO