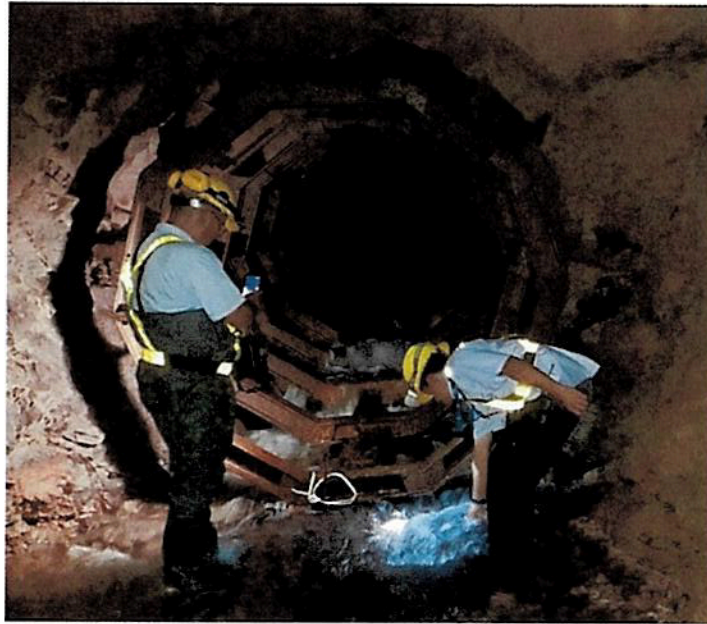


INSTITUTO COSTARRICENSE DE ACUEDUCTOS Y ALCANTARILLADOS
UEN GESTIÓN AMBIENTAL
ÁREA FUNCIONAL DE HIDROGEOLOGÍA



*ESTUDIO GEOLÓGICO, GEOMECÁNICO E HIDROGEOLÓGICO DE SISTEMA DE TÚNELES
PUENTE MULAS*



ELABORÓ:


Geól. Jorge A. Salazar Chacón


Revisión y aprobación
MSc. Viviana Ramos Sánchez
Dirección UEN Gestión Ambiental

Enero, 2020





Instituto Costarricense de Acueductos y Alcantarillados
Centro de Documentación e Información
UEN Investigación y Desarrollo



**AUTORIZACIÓN INSTITUCIONAL PARA PUBLICAR TESIS, ESTUDIOS,
ARTÍCULOS Y/O INFORMES PROPIEDAD INTELECTUAL DE AyA EN EL
REPOSITORIO DIGITAL DEL CEDI**

Yo, Eric Alonso Bogantes Cabezas

N° Cédula: 5-251-0327

Dependencia: Gerencia General

Autorizo como Gerente General y representante legal del Instituto Costarricense de Acueductos y Alcantarillados (AyA) cédula jurídica 4-000-042138 al Centro de Documentación e Información (CEDI) de la UEN Investigación y Desarrollo la inclusión, publicación y difusión en su Repositorio Digital y Catálogo en línea (OPAC).

Se trata de estudios y documentos cuyos derechos intelectuales y de uso son exclusivos de nuestra institución.

E-mail: gerenciageneral@aya.go.cr N° Teléfono: 2242-5090



Firmado digitalmente
por ERIC ALONSO
BOGANTES CABEZAS
(FIRMA)
Fecha: 2021.06.16
17:21:24 -06'00'

Firma: _____



INSTITUTO COSTARRICENSE DE ACUEDUCTOS Y ALCANTARILLADOS
San José, Costa Rica
Apartado 1097-1200. Teléfono 2242-6516. vramos@aya.go.cr

MEMORANDO

PARA: Ing. Rolando Rojas
UEN Producción y Distribución-GAM

FECHA: 17 de enero, 2020

Ing. Emerson Campos Sandoval
UEN Producción y Distribución-GAM

Ing. Ana Catalina Vargas
Salud Ocupacional

Ing. Adrián Rojas Barrantes
UEN Gestión Ambiental

DE: MSc. Viviana Ramos Sánchez
UEN Gestión Ambiental



No. UEN-GA-2020-00137

ASUNTO: ESTUDIO GEOLÓGICO, GEOMECÁNICO E HIDROGEOLÓGICO DE SISTEMA DE TÚNELES PUENTE MULAS.

Se hace entrega del estudio elaborado por el Geól. Jorge Salazar Chacón denominado: Estudio geológico, geomecánico e hidrogeológico del sistema de túneles de Puente Mulas.

- C Yamileth Astorga Espeleta, Presidencia Ejecutiva
Manuel Salas Pereira, Gerencia General
Florentino Fernández Venegas, Subgerencia Ambiental, Investigación y Desarrollo
Gerardo Rivas Rivas, UEN Programación y Control.
Alina Trabado Sagot, UEN Gestión Ambiental
Christian Delgado Segura, UEN Gestión Ambiental
Jorge Salazar Chacón, UEN Gestión Ambiental.
Archivo AFH 28

INDICE

1.INTRODUCCIÓN	1
1.1 Objetivo General.....	1
1.2 Objetivos específicos.....	1
1.3 Metodología	1
1.4 Ubicación.....	2
2. CONDICIONES GEOLÓGICAS.....	4
3. CONDICIONES GEOMECAÑICAS.	6
3.1 Macizo rocoso lavas fracturadas Túnel 3.....	6
3.2 Macizo rocoso Autobrechas Túnel 3	6
3.3 Sostenimiento de túneles.....	8
3. CONDICIONES HIDROGEOLÓGICAS	10
3.1 Túnel 1	10
3.2 Túnel 3	11
4. PROPUESTA PARA REALIZAR TRABAJOS DE MANTENIMIENTO EN TÚNEL 3.	13
5. PROPUESTA PARA ALTERNATIVA DE AUMENTAR CAUDAL DE APROVECHAMIENTO EN TÚNEL 3.	15
6. CONCLUSIONES.....	17
7. RECOMENDACIONES	18

INDICE DE FIGURAS

Figura N° 1 Figura de ubicación del sistema de túneles Puente Mulas.....	3
Figura N° 2 Esquema de intervención planeado para mantenimiento de túnel 3 desde pozo de acceso desde camino.....	14
Figura N° 3 Detalle de sección de túnel y dimensiones de cargador pequeño tipo bobcat.	15
Figura N° 4 Detalle de propuesta de perforaciones de exploración en topes de túnel 3 con el objetivo de aumentar el caudal captado.	16

INDICE DE TABLAS

Tabla N° 1 Principales características de sistema de túneles de Puente Mulas.....	2
Tabla N° 2 Clasificación geomecánica RMR para macizo rocoso conformado por lavas fracturadas en Túnel 3	6
Tabla N° 3 Clasificación geomecánica RMR para macizo rocoso conformado por autobrechas en Túnel 3.....	7

1.INTRODUCCIÓN

Debido a la necesidad de ingreso al sistema de túneles de Puente Mulas se solicitó a un grupo multidisciplinario por parte del área de Salud Ocupacional la inspección de estos, con el objetivo de realizar una valoración e identificar los riesgos a los que se podrían eventualmente ver expuestos los trabajadores durante la ejecución de las diferentes labores. Una de las áreas que periódicamente ingresa es el área funcional de estudios básicos de la UEN Gestión Ambiental los cuales deben de realizar diferentes mediciones.

Antes esto el día viernes 8 de noviembre del 2019 en compañía de personal de Salud Ocupacional, personal de la UEN Producción Distribución y personal de la UEN Gestión Ambiental se procedió a hacer el ingreso a estos túneles.

Como parte de la visita, adicional a la solicitud de Salud Ocupacional, se aprovecha para realizar una inspección geológica, geomecánica e hidrogeológica preliminar del sistema de túneles de Puente Mulas que permita emitir recomendaciones hacia las diferentes áreas del AyA interesados en el mantenimiento de las obras subterráneas, así como en una eventual optimización del proceso de captación subterráneo.

Por recomendaciones de Salud Ocupacional no fue posible inspeccionar el túnel 2 ni la totalidad del túnel 3.

1.1 *Objetivo General*

- Valorar las condiciones geológicas, geomecánicas e hidrogeológicas del sistema de túneles Puente Mulas.

1.2 *Objetivos específicos*

- Identificar los principales riesgos hacia el personal que ingrese a los túneles a realizar labores desde un punto de vista geológico-geomecánico
- Analizar desde un punto de vista geológico-geomecánico la condición actual de los túneles.
- Analizar las características hidrogeológicas de los túneles.

1.3 *Metodología*

A continuación, se detallan las labores realizadas para la elaboración del siguiente estudio:

- Caracterización geológica general de túneles
- Caracterización geomecánica de macizo rocoso.
- Caracterización de condiciones hidrogeológicas.

- Identificación de riesgos asociados a condiciones geológicas-geomecánicas
- Elaboración de recomendaciones asociadas a mantenimiento y eventual optimización de sistemas de captación subterránea.

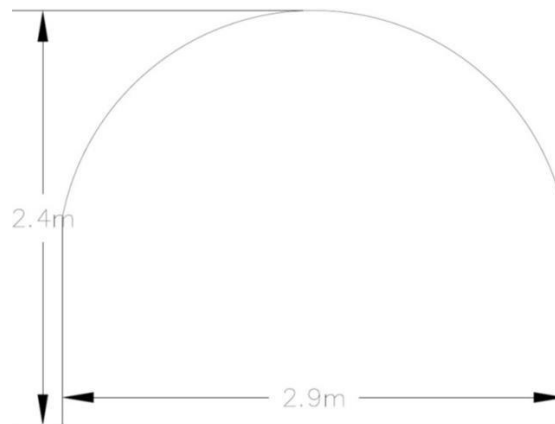
1.4 Ubicación

En la Figura N°1 se muestra la ubicación del sistema de túneles de Puente Mulas. En la tabla N°1 se muestran las principales características del sistema de túneles con base en la información recopilada y levantada durante la inspección, información más detallada deberá de ser obtenida mediante levantamientos topográficos.

Tabla N° 1 Principales características de sistema de túneles de Puente Mulas.

Nombre	Longitud (m)	Caudal (l/s)
Túnel 1	84.25 m	33.97*
Túnel 2	71.78 m túnel principal y 27.90 m túnel secundario	No pudo ser aforado
Túnel 3	110 m inspeccionados de túnel principal (pendiente 68 m), 104 m de galería secundaria y 39.0m de galería secundaria.	299.89*

Sección esquemática de túneles



*Valores de caudal obtenidos a partir de los aforos realizados por el área de estudios básicos de la UEN Gestión Ambiental el día de la inspección.

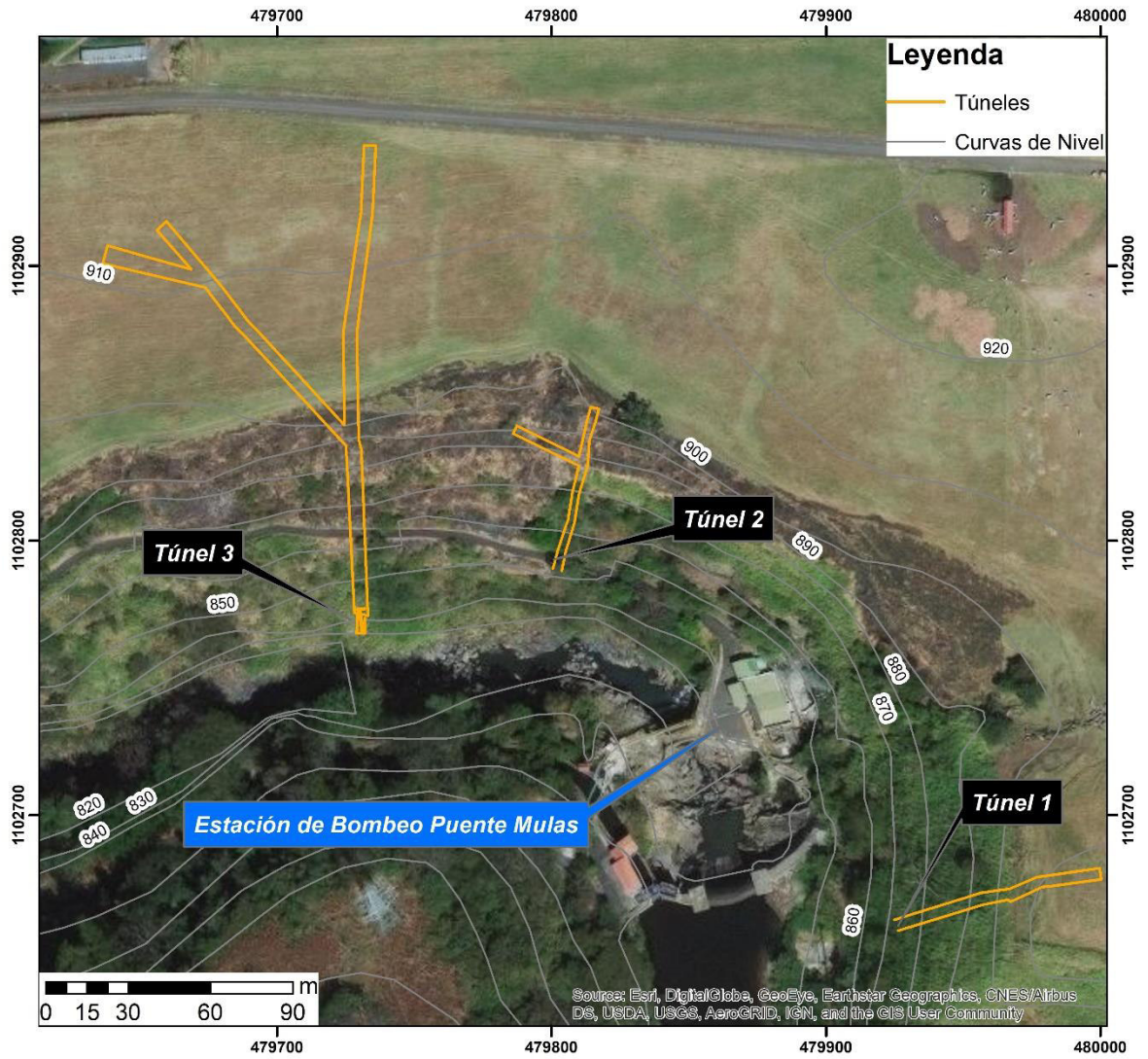


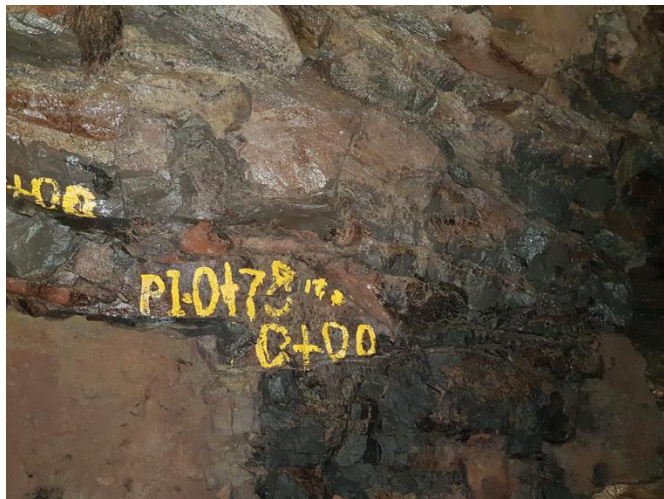
Figura N° 1 Figura de ubicación del sistema de túneles Puente Mulas.

2. CONDICIONES GEOLÓGICAS.

El sistema de túneles Puente Mulas se localiza dentro de la secuencia volcánica correlacionada con la Formación Colima descrita en detalle por diferentes autores (Echandi 1981, Kussmaul, 1988, Denyer & Arias, 1991) la cual de manera general se subdivide en tres miembros: Miembro Inferior, Miembro Puente de Mulas y Miembro Superior.

Particularmente los túneles se presentan en el Miembro Superior el cual está conformado por depósitos de andesitas piroxénicas de grano fino y estructuras de flujo bien desarrolladas con un núcleo central denso. (Echandi, 1981).

Tanto en el túnel 1 como en el túnel 3 se evidenciaron la presencia de flujos lávicos fracturados (Fotografía N°1), autobrechas de progresión (Fotografía N°2) y contactos quemados. (Fotografía n°4).



Fotografía N° 1 Lavas fracturas en estación 0+78 de galería secundaria de túnel 3.



Fotografía N° 2 Autobrecha conformada por bloques volcánicos en matriz limo-arcillosa de color rojiza-morada en túnel 3



Fotografía N° 3 Contacto quemado de color rojizo en túnel 1

3. CONDICIONES GEOMECÁNICAS.

Mediante el uso de la clasificación Geomecánica RMR (Bieniawski, modificación Romana 2001) se realiza una valoración general de los macizos rocoso que atraviesan los túneles de Puente Mulas, para tal caso se analizan dos casos particulares:

3.1 Macizo rocoso lavas fracturadas Túnel 3

En la tabla N°2 se detalla la clasificación geomecánica realizada para este tipo de macizos rocoso, de manera general se obtiene un valor de macizo rocoso de clase Media a Buena, específicamente este valor podrá variar según las condiciones de discontinuidades presentes para cada sitio, así como la condición de afluencia de agua. En lugares con mayor grado de fracturamiento y presencia de agua se obtienen valores de roca de clase Media a Mala.

Tabla N° 2 Clasificación geomecánica RMR para macizo rocoso conformado por lavas fracturadas en Túnel 3

Parámetro	Rango de valor escogido	Valoración
Compresión inconfiada de la roca	100-250 (MPa)	12
RQD	25-50	8
Separación de discontinuidades	0.06-0.2m	8
Condición de la discontinuidad	Persistencia (1-3m) Apertura (<0.1 mm) Rugosidad (Rugosa). Relleno (sin relleno) Alteración (Ligeramente alterada)	25
Agua Subterránea		15
Ajuste por orientación de discontinuidades	Desfavorable	-10
Puntaje: 58 Clase: IIIb (Media a Buena)		

3.2 Macizo rocoso Autobrechas Túnel 3

En la tabla N°3 se detalla la clasificación geomecánica realizada para este tipo de macizos rocoso, de manera general se obtiene un valor de macizo rocoso de clase Buena a Media, en zona con presencia de agua se obtiene valores de roca de Media a Buena.

Tabla N° 3 Clasificación geomecánica RMR para macizo rocoso conformado por autobrechas en Túnel 3

Parámetro	Rango de valor escogido	Valoración
Compresión inconfiada de la roca	5-25 (MPa)	2
RQD	75-90	17
Separación de discontinuidades	0.6-2.0m	15
Condición de la discontinuidad	Persistencia (<1m) Apertura (cerrada) Rugosidad (Rugosa). Relleno (sin relleno) Alteración (Ligeramente alterada)	26
Agua Subterránea	Seco	15
Ajuste por orientación de discontinuidades	Desfavorable	-10
Puntaje: 65 Clase: IIb (Buena a Media)		

3.3 Sostenimiento de túneles.

Actualmente los túneles se presentan en gran parte en roca desnuda, con sectores aislados con presencia de pernos puntuales (Fotografía N°4) y arcos de acero (Fotografía N°5). Debido a las condiciones de oxígeno presentes en el túnel 3 no fue posible analizar en detalle la zona de arcos de acero presentes en este túnel. Con respecto al túnel 1 se evidenció que el tramo de arcos de acero no está trabajando de manera adecuada ya que el terreno no está siendo apoyado sobre los mismos y por el contrario se presenta una socavación importante en la corona y hastiales izquierdos del túnel por efecto del agua.



Fotografía N° 4 Pernos puntuales en corona de túnel 3.



Fotografía N° 5 Tramo de arcos de acero en túnel 1.

A partir de las clasificaciones geomecánicas es posible indicar que estos macizos rocosos se comportan de buena manera y el riesgo de colapso del túnel es mínima, sin embargo, con el objetivo de garantizar el buen funcionamiento de los mismo a largo plazo a partir de las valoraciones realizada se recomienda la colocación de pernos puntuales con malla electrosoldada en los sectores en los que se evidencian la formación de cuñas en techo y hastiales, así como la colocación de una capa de concreto lanzado drenada de al menos 5 cm a lo largo del túnel para limitar la descompresión del macizo rocoso, la cual provoca la caída esporádica de fragmentos de roca de la corona del túnel, eventualmente de colocarse esta capa de concreto lanzado la misma deberá de ser drenada. Esta propuesta deberá de ser evaluada por parte del departamento de ingeniería de la UEN PyC.

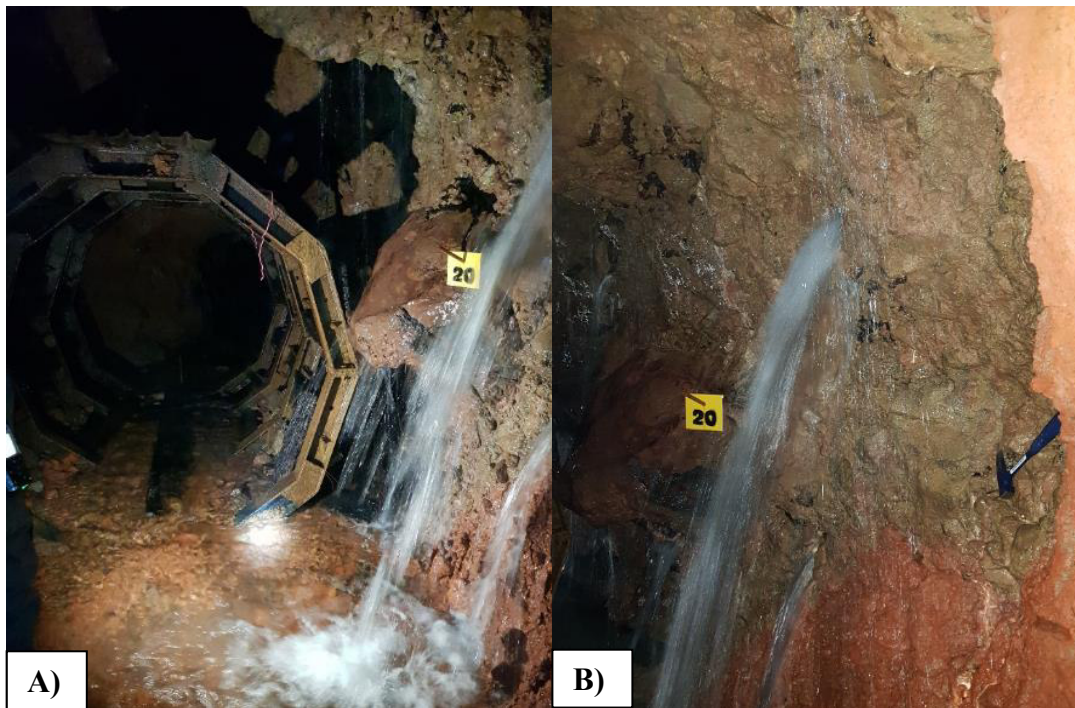
De igual manera se recomienda estabilizar de mejor manera el sector de arcos de acero del túnel 1 para evitar a largo plazo un colapso del túnel en dicho sector.

3. CONDICIONES HIDROGEOLÓGICAS

Durante la inspección realizada se identificaron de manera general los principales puntos de afluencia de agua a lo largo de los sectores de los túneles inspeccionados. Tal como se ha indicado con anterioridad no fue posible inspeccionar el túnel 2 ni parte del túnel 3, de este último específicamente el sector en él se tiene una mayor afluencia de agua.

3.1 Túnel 1

La afluencia de agua en el túnel 1 se correlaciona con un contacto entre una brecha lávica con una permeabilidad aparente alta y un contacto quemado de baja permeabilidad. (Fotografía N°6). El contacto se presenta de manera vertical a lo largo del túnel. Esta afluencia de agua ocurre a lo largo de 20 m del túnel en su pared izquierda concentrándose la mayor cantidad de agua en las cercanías del contacto, se observa la presencia de pátinas de oxidación a lo largo del macizo rocoso.



Fotografía N° 6 Sector de afluencia de agua en túnel 1 por contacto entre brecha lávica y contacto quemado

3.2 Túnel 3

Se identificaron sectores con goteo leve y humedad en corona, así como sectores con afluencia leve de agua asociado a contactos entre brechas lávicas de alta permeabilidad aparente y autobrechas de matriz limo-arcillosa de baja permeabilidad aparente. (Fotografía N°7)



Fotografía N° 7 Sector de afluencia leve de agua en túnel 3 contacto entre brecha lávica y autobrecha.

Sectores de afluencia alta de agua se identificaron en brecha lávicas (Fotografía N°8) y en colada de lava fracturada en contacto con autobrecha de baja permeabilidad aparente. (Fotografía N°9)

Tal como se ha indicado no fue posible inspeccionar el tramo del túnel 3 con mayor afluencia de agua para identificar las condiciones hidrogeológicas del mismo.

Cabe recalcar que las afluencias de agua se presentan en la pared derecha del túnel coincidente con la dirección de las líneas de flujo del acuífero Colima Superior que tienen una dirección preferencial local hacia el suroeste.



Fotografía N° 8 Sector de afluencia alta de agua en túnel 3 en brecha lávica



Fotografía N° 9 Sector de afluencia alta de agua en túnel 3 en contacto entre colada de lava fracturada y autobrecha.

4. PROPUESTA PARA REALIZAR TRABAJOS DE MANTENIMIENTO EN TÚNEL 3.

Actualmente el sistema de túneles Puente de Mulas es de vital importancia para el abastecimiento de agua potable de la GAM, dada esta condición es poco probable visualizar una intervención de los túneles que detenga el suministro de agua, a partir de este escenario se propone de manera esquemática que se evalúe la opción de la excavación de un pozo de 3 m de diámetro y de aproximadamente 10 m de profundidad desde el camino de acceso a la estación de bombeo, el cual permitiría acceder al túnel 3 sin necesidad de intervenir las obras actuales de suministro. Las condiciones geológicas-geomecánicas permiten la excavación de este tipo de obra en donde la misma se estabilizaría con anillos de acero y concreto lanzado, previo al inicio de una eventual excavación es necesario reforzar el interior del túnel 3 con arcos de acero. En la figura N°2 se presenta el esquema de intervención planteado.

Esta propuesta deberá de ser analizada inicialmente con un levantamiento topográfico detallado que permita garantizar que existe el espacio suficiente para la ejecución de las obras y las elevaciones respectivas-

Como aspecto de referencia dada las dimensiones del túnel 3 durante un proceso de mantenimiento y limpieza de este solamente es posible el ingreso de un cargador pequeño tipo bobcat (Figura N°3), el cual tendría que ingresar por medio de una grúa en el pozo para colaborar con los trabajos de acarreo de materiales y extracción.

La implementación de esta propuesta o similares deberá de ser analizada en detalle desde un punto de vista constructivo, que permita garantizar una intervención y mantenimiento del túnel 3 con afectación mínima del suministro de agua.

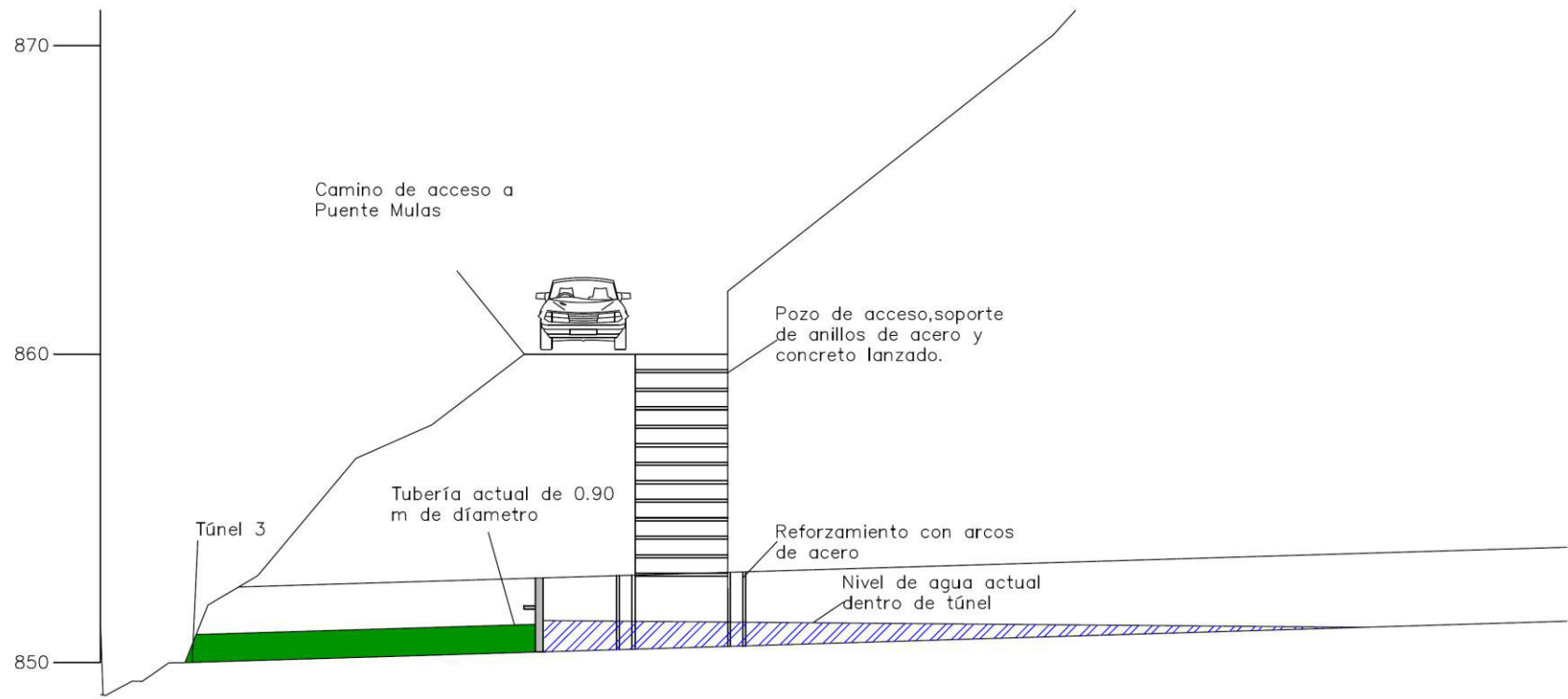


Figura N° 2 Esquema de intervención planeado para mantenimiento de túnel 3 desde pozo de acceso desde camino.

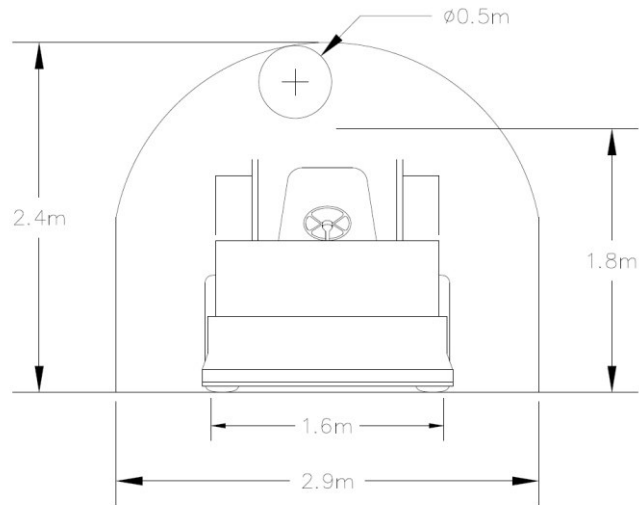
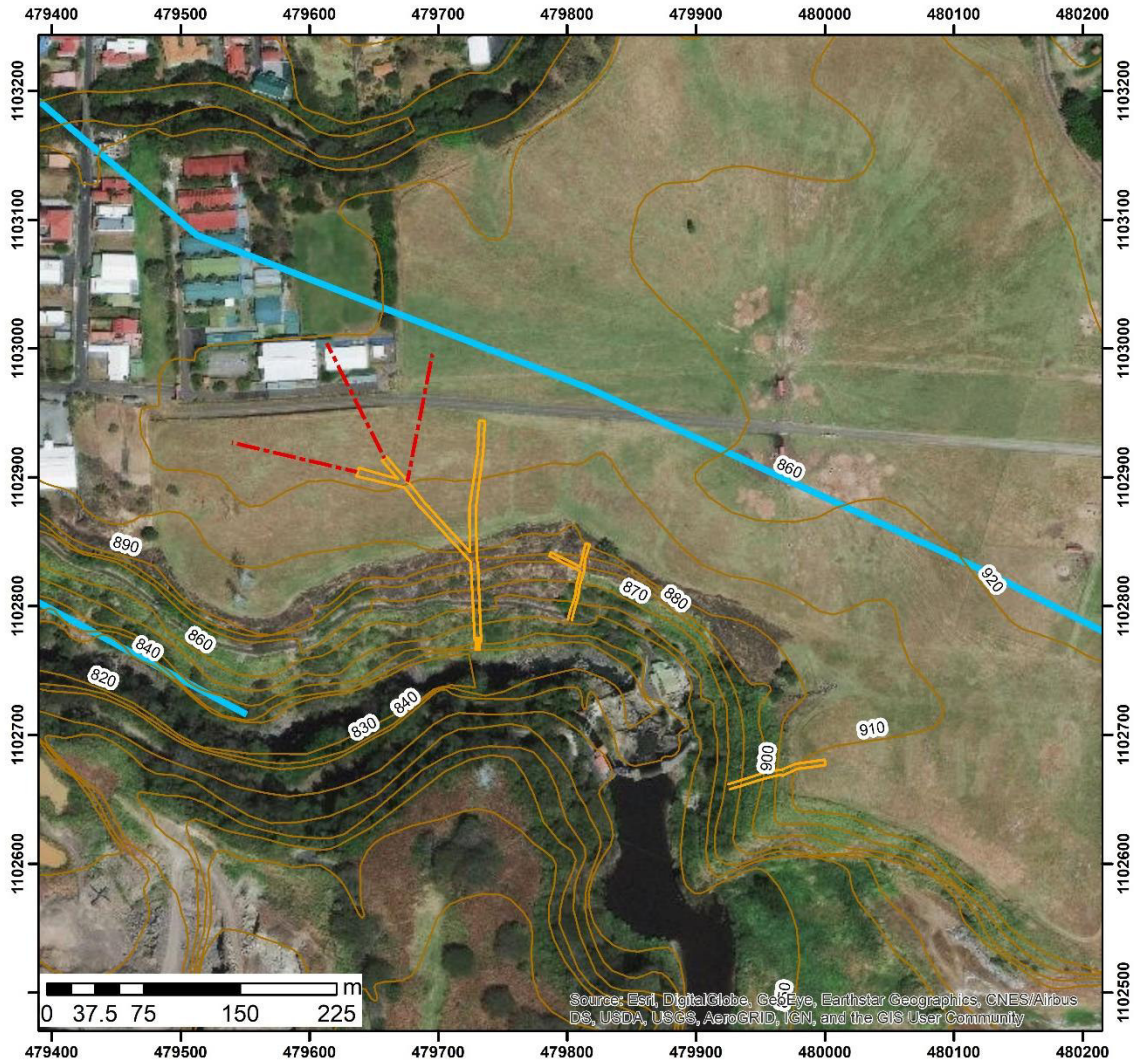


Figura N° 3 Detalle de sección de túnel y dimensiones de cargador pequeño tipo bobcat.

5. PROPUESTA PARA ALTERNATIVA DE AUMENTAR CAUDAL DE APROVECHAMIENTO EN TÚNEL 3.

De realizarse un acceso al túnel 3 que permita el ingreso de maquinaria es posible mediante equipos de perforación pequeños la ejecución de perforaciones de rotación con recuperación de núcleos en los topes de los túneles que permitan la intersección de mayor cantidad de líneas de flujo generando un mayor ingreso de agua hacia los mismos, inicialmente se proyectan tal como se muestra en la figura N°4 la eventual ejecución de tres perforaciones de exploración de 100 m de profundidad a partir de las cuales podrá diseñarse un sistema de captación subterránea por medio de drenajes orientados hacia los túneles que aumenten la capacidad del sistema.



Leyenda

- Túneles
- - - Propuesta de perforaciones
- Curva de nivel
- Equipotenciales Colima Superior (BGS)

Figura N° 4 Detalle de propuesta de perforaciones de exploración en topos de túnel 3 con el objetivo de aumentar el caudal captado.

6. CONCLUSIONES

1. El sistema de túneles de Puente Mulas fue excavado en las rocas volcánicas correlacionados con la formación Colima Superior, en los túneles se observan litologías relacionadas con flujos lávicos fracturados, brechas lávicas, autobrechas y contactos quemados.
2. De manera general se identifican y caracterizan los dos macizos rocoso-principales en los que se excavaron los túneles, lo cuales corresponden con macizo rocoso conformado por lavas fracturas que clasifica como macizo de clase Media a Buena y macizo rocoso conformado por autobrechas que clasifica como macizo de clase Buena a Media, ambos macizos pueden presentar calidades inferiores en presencia de agua y/o mayor cantidad de discontinuidades orientadas de manera desfavorable.
3. Los túneles se presentan en gran parte roca desnuda, con sectores puntuales con presencia de pernos o arcos de acero.
4. A partir de las clasificaciones geomecánicas es posible indicar que estos macizos rocosos se comportan de buena manera y el riesgo de colapso del túnel es mínima, sin embargo, con el objetivo de garantizar el buen funcionamiento de los mismo a largo plazo a partir de las valoraciones realizada se recomienda la colocación de pernos puntuales con malla electrosoldada en los sectores en los que se evidencian la formación de cuñas en techo y hastiales, así como la colocación de una capa de concreto lanzado drenado de al menos 5 cm a lo largo del túnel para limitar la descompresión del macizo rocoso, la cual provoca la caída esporádica de fragmentos de roca de la corona del túnel, eventualmente de colocarse esta capa de concreto lanzado la misma deberá de ser drenada, esta propuesta deberá de ser valorada por el área de ingeniería estructural de la UEN PyC.
5. La afluencia de agua en los túneles se identificó principalmente en sectores en donde existe un contacto litológico con diferentes permeabilidades. El agua fluye en las brechas lávicas con poca matriz y en los flujos lávicos fracturados.

7. RECOMENDACIONES

A partir de las valoraciones realizadas se indican las siguientes recomendaciones para las diferentes áreas a saber:

a) Área funcional de Estudios Básicos-UEN Gestión Ambiental.

1. En el sector en el que se realiza la revisión de la estación hidrológica en el túnel 3 no se identifican riesgos relacionados con la estabilidad del túnel, por lo tanto, es posible dar el mantenimiento periódico necesario del equipo siempre y cuando se utilice el equipo de protección personal y se sigan las directrices o protocolos de seguridad establecidos por Salud Ocupacional.
2. Los sectores en los que se puede realizar las mediciones de caudal (aforos) en el túnel 3 y 2 no presentan mayores problemas de riesgo relacionados con la estabilidad de la obra, por lo que se puede realizar la medición y monitoreo de caudales de manera periódica siguiendo las directrices o protocolos de seguridad establecidos por Salud Ocupacional.

b) Salud Ocupacional

1. A pesar de que los túneles no presentan un riesgo inminente de colapso, al no tenerse en gran parte de los mismos ningún tipo de soporte, existe una alta probabilidad de caída de bloques por lo que no se recomienda el ingreso a los túneles por parte de funcionarios del AyA y/o personal externo que no vayan a realizar ningún trabajo específico en estos.
2. Todo personal que ingrese a la obra deberá de inspeccionar de manera previa la corona del túnel durante los ingresos con el objetivo de identificar cualquier potencial bloque o cuña suelta que pueda caer.
3. Limitar el acceso al sector de arcos de acero del túnel 1 dada las condiciones inestabilidad observadas.

c) UEN Producción y Distribución-GAM.

1. El sistema de túneles de Puente Mulas requiere de un mantenimiento apropiado con el objetivo de garantizar y prolongar la vida útil de los mismos. Actualmente el mantenimiento realizado a los túneles es mínimo por lo que se recomienda realizar las siguientes labores:

• **Acciones a corto plazo.**

- A. Adquisición e instalación de sistema de ventilación para túnel de pequeño diámetro específicamente para túnel 3. Estos sistemas consisten por lo general de un ventilador que se coloca en la parte externa del túnel y una manga o ducto abatible que es colocada y anclada a la corona del túnel.
- B. Instalación de sistema de iluminación dentro del túnel. (lámparas o bombillos)
- C. Mantenimiento inicial remoción de restos de madera (tablas) y desechos olvidados durante la construcción de los túneles.

Las actividades anteriores no involucran la necesidad de interrumpir el suministro de agua potable, pueden ser realizadas tanto durante los paros programados anuales de mantenimiento o a lo largo del año con las precauciones adecuadas y bajo la supervisión de Salud Ocupacional.

• **Acciones mediano-largo Plazo.**

- A. Con el objetivo de garantizar una mayor vida útil al sistema de túneles es necesario realizar trabajos de reforzamiento de estos tales como colocación de pernos puntuales, arcos de acero y concreto lanzado, dado que no es posible realizar una interrupción prolongada del sistema de abastecimiento será necesario evaluar alternativas como las propuestas en el informe para acceder al túnel sin alterar el suministro de agua potable. Una intervención de este tipo deberá ser valorada en detalle desde un punto de vista técnico-constructivo.
- B. Una vez realizada las labores de mantenimiento del túnel será posible evaluar alternativas de perforación como la presente en el informe para aumentar el caudal captado que ingresa al túnel.

d) Recomendaciones Generales

- A. Tal como se ha indicado a lo largo del informe no fue posible realizar la inspección completa del túnel 3 ni la inspección del túnel 2 por restricciones de Salud Ocupacional, se recomienda una vez se cuente con el equipo de seguridad adecuado para deficiencias de oxígeno y una vez se haya colocado la protección del tubo del túnel 2 solicitada por Salud Ocupacional, realizar las inspecciones respectivas con el objetivo de obtener un diagnóstico inicial completo del sistema de túneles de Puente Mulas.
- B. A partir del diagnóstico inicial es posible establecer un plan de auscultación periódico de la obra como parte de un plan de gestión del riesgo de la misma.