



Laboratorio Nacional de
Materiales y Modelos Estructurales

Programa de Infraestructura del Transporte
Unidad de Gestión y Evaluación de la Red Vial Nacional

INFORME DE EVALUACIÓN DEL ESTADO DEL PUENTE DE PIEDRA - GRECIA

LM-PI-UGERVN-13-2014

PUENTE DE PIEDRA GRECIA

San José, Costa Rica
Diciembre, 2014



Documento generado con base en el Art. 6, inciso c) de la Ley 8114 y lo señalado en el Capítulo II, Artículo 14 del Reglamento del Art. 6 de la precitada ley, publicada mediante Decreto DE-37016-MOPT.

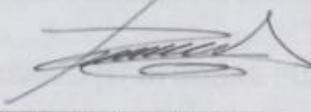
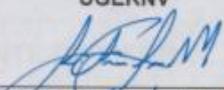
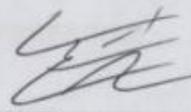
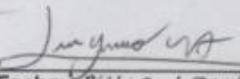
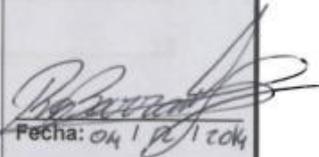
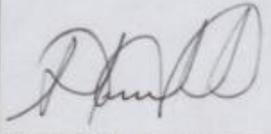
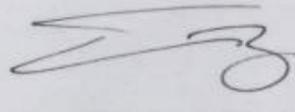
1. Informe LM-PI-UGERVN-13-2014		2. Copia No.1	
3. Título INFORME DE EVALUACIÓN DEL ESTADO DE PUENTE DE PIEDRA - GRECIA		4. Fecha del Informe Diciembre 2014	
5. Organización y dirección Laboratorio Nacional de Materiales y Modelos Estructurales Universidad de Costa Rica, Ciudad Universitaria Rodrigo Facio San Pedro de Montes de Oca, Costa Rica Tel: (506) 2511-2500 / Fax: (506) 2511-4440			
6. Notas complementarias No aplica			
7. Resumen <i>Funcionarios de la Unidad de Gestión y Evaluación de la Red Vial Nacional, Unidad de Gestión Municipal y la Unidad de Puentes, realizaron en el mes de octubre del presente año una gira de evaluación para determinar el estado del Puente de Piedra en el cantón de Grecia, esta estructura es patrimonio de natural de Costa Rica y su preservación es muy importante para el disfrute de las generaciones futuras. Entre los principales problemas que se encontraron están: La erosión producida por río Poró y drenajes en los taludes del puente, esto lo está afectando seriamente. La superficie de ruedo del puente y de las aproximaciones presentan problemas que generan infiltración de agua que afecta las rocas que forman el puente. La vegetación está teniendo un impacto negativo directo en el deterioro del puente. Las raíces de los árboles y plantas están aprovechando los espacios entre las columnas de las ignimbritas para crecer. Esto causa un ensanchamiento de las fracturas y genera el desprendimientos de la roca. La seguridad vial del puente es deficiente, especialmente por un montículo de suelo y roca alterada en el sector oeste del puente que representa un serio problema de visibilidad. Se hacen recomendaciones para reducir el impacto de la meteorización biológica, la erosión fluvial y como mejorar la seguridad vial del puente.</i>			
8. Palabras clave Puente de Piedra Grecia		9. Nivel de seguridad: Bajo	10. Núm. de páginas 29
11. Preparado por:			
Geólogo Paulo Ruiz C., Ph.D. UGERVN  Fecha: 41/12/2014	Ing. Ronald Naranjo U. UGERVN  Fecha: 41/12/2014	Ing. José Francisco Garro Mora, M.Geo. Ingeniero Civil UGERVN  Fecha: 41 de 12014	Ing. Christian Valverde UGERVN  Fecha: 04/12/14
Ing. Josué Quesada. UGM  Fecha: 8/12/14	Ing. Luis Guillermo Vargas. UP  Fecha: 04/12/2014	Ing. Jorge Muñoz Barrantes., Ph.D. UP  Fecha: 04/12/2014	Ing. Roy Barrantes Jiménez Coordinador UGERVN  Fecha: 04/12/2014
12. Revisado por: Lic. Miguel Chacón A. Asesor Legal  Fecha: 8/12/2014		13. Aprobado por: Ing. Guillermo Loría S., Ph.D. Coordinador General PITRA  Fecha: 41/12/2014	

TABLA DE CONTENIDO

1. POTESTADES.....	4
2. OBJETIVO DE LA EVALUACIÓN.....	4
3. METODOLOGÍA, ALCANCES Y LIMITACIONES DE LA EVALUACIÓN.....	4
4. INTRODUCCIÓN.....	5
5. CARACTERIZACIÓN GEOLÓGICA DEL PUENTE DE PIEDRA.....	7
6. ANÁLISIS Y EVALUACIÓN DEL PUENTE DE PIEDRA.....	9
6.1 Sección Aguas Arriba.....	11
6.2 Sección Superior, inferior y central de la estructura.....	14
6.3 Sección aguas abajo.....	23
7. TRANSITO PROMEDIO DIARIO (TPD) SOBRE PUENTE DE PIEDRA.....	25
8. CONCLUSIONES.....	27
9. RECOMENDACIONES.....	27
10. AGRADECIMIENTOS.....	28
11. REFERENCIAS.....	28



1. POTESTADES

El Laboratorio Nacional de Materiales y Modelos Estructurales, es una dependencia de la Universidad de Costa Rica especializada en la Ingeniería Civil. La ley N°8114 en sus artículos 5 y 6, encomienda al LanammeUCR una serie de funciones en materia de evaluación, fiscalización, asesoría y capacitación, entre otras, para garantizar la máxima eficiencia de la inversión pública en la reconstrucción y conservación de la red vial costarricense.

Considerando la importancia histórica y patrimonial del puente de Piedra, obra que se ubica en una ruta cantonal el sitio que es objeto de esta evaluación, así como la importancia comercial y turística del cantón de Grecia, los aportes técnicos derivados del presente informe se enmarcan dentro de las funciones de ley N°8114 y de los principios de investigación, acción social y transparencia de tecnología que le confieren al LanammeUCR.

2. OBJETIVO DE LA EVALUACIÓN

El objetivo de la evaluación de este puente es aportar a la Municipalidad del Cantón de Grecia elementos a considerar en la toma de decisiones y en la ejecución de trabajos de mantenimiento para asegurar la preservación del Puente de Piedra, y además, constatar la integridad del puente para dar seguridad a los usuarios de esta estructura natural.

3. METODOLOGÍA, ALCANCES Y LIMITACIONES DE LA EVALUACIÓN

Para la elaboración de este informe, inicialmente se realizó una investigación bibliográfica de la zona y del sitio en específico. Posteriormente, el día 13 de octubre del presente año se realizó una gira de campo para hacer una evaluación detallada del puente. En esta gira, se efectúa un levantamiento con el escáner lidar de la estructura para así tener una memoria digital lo más precisa posible de la geometría y del estado actual del puente. Aunque esta estructura natural funciona actualmente como un puente, el protocolo típico para estas estructuras no es utilizable ya que su morfología y materiales son únicas, por lo tanto el alcance de este trabajo se limita a una evaluación visual de los elementos que pueden estar contribuyendo al deterioro de la estructura y no a un estudio estructural detallado del macizo rocoso. Se hicieron observaciones sobre los problemas que pueden estar poniendo en riesgo la seguridad de sus usuarios. Finalmente se realizó un levantamiento de datos de tránsito promedio diario (TPD) que circula sobre el puente. Los resultados presentados en este trabajo podrían ser considerados para definir estrategias de mantenimiento y preservación del puente.

4. INTRODUCCIÓN

El Puente de Piedra, puede considerarse como un arco natural o como un puente natural que se ha formado por la erosión diferencial de las rocas de origen volcánico que lo forman. El río que fluye por debajo de esta estructura natural es el río Poró. Esta estructura se ubica en la comunidad Puente de Piedra localizada al noreste de Raiceros, en el Cantón de Grecia, provincia de Alajuela.. La ubicación geográfica según la hoja topográfica Puente de Piedra, escala 1:10 000 del Instituto Geográfico Nacional es 46174 N/ 1110357 E CRTM-2005 (Figura 1).

El área de estudio está dentro del mapa geológico escala 1: 50 000 de la hoja Naranja (Huapaya & Rojas 2012). La zona donde se ubica el puente se caracteriza por tener laderas con pendientes muy suaves a suaves ($4-16^{\circ}$). Los drenajes han erosionando poco a poco los materiales de estas laderas hasta llegar a generar valles fluviales con pendientes un poco más pronunciadas con ángulos entre $16-35^{\circ}$ (Figura 1). Geomorfológicamente las laderas de esta zona se clasifican como laderas de denudacionales de origen volcánico con pendiente moderada a suave. La red de drenaje es dendrítica con ríos que presentan un comportamiento meándrico que se caracteriza por cambios abruptos de dirección en poca distancia. La estructura del Puente de Piedra, presenta pendientes muy altas, con paredes casi verticales tanto aguas arriba y como aguas abajo (Figura 1).

El uso de suelo de la zona tradicionalmente ha correspondido con sembradíos de caña y café principalmente. Hasta hace pocos años en la zona los núcleos urbanos eran relativamente pequeños y dispersos. Recientemente se ha dado un proceso de mayor urbanización de la zona y ha cambiado paulatinamente el uso de la tierra, pasando de zonas agrícolas a proyectos habitacionales. Esto puede generar varios problemas que podrían afectar directamente el puente, por ejemplo: un aumento en el tránsito de vehículos sobre la estructura e impermeabilización de los suelos por el cambio de uso; esto se genera mayor escorrentía aumentando el caudal de los ríos de la zona lo que genera problemas de erosión.

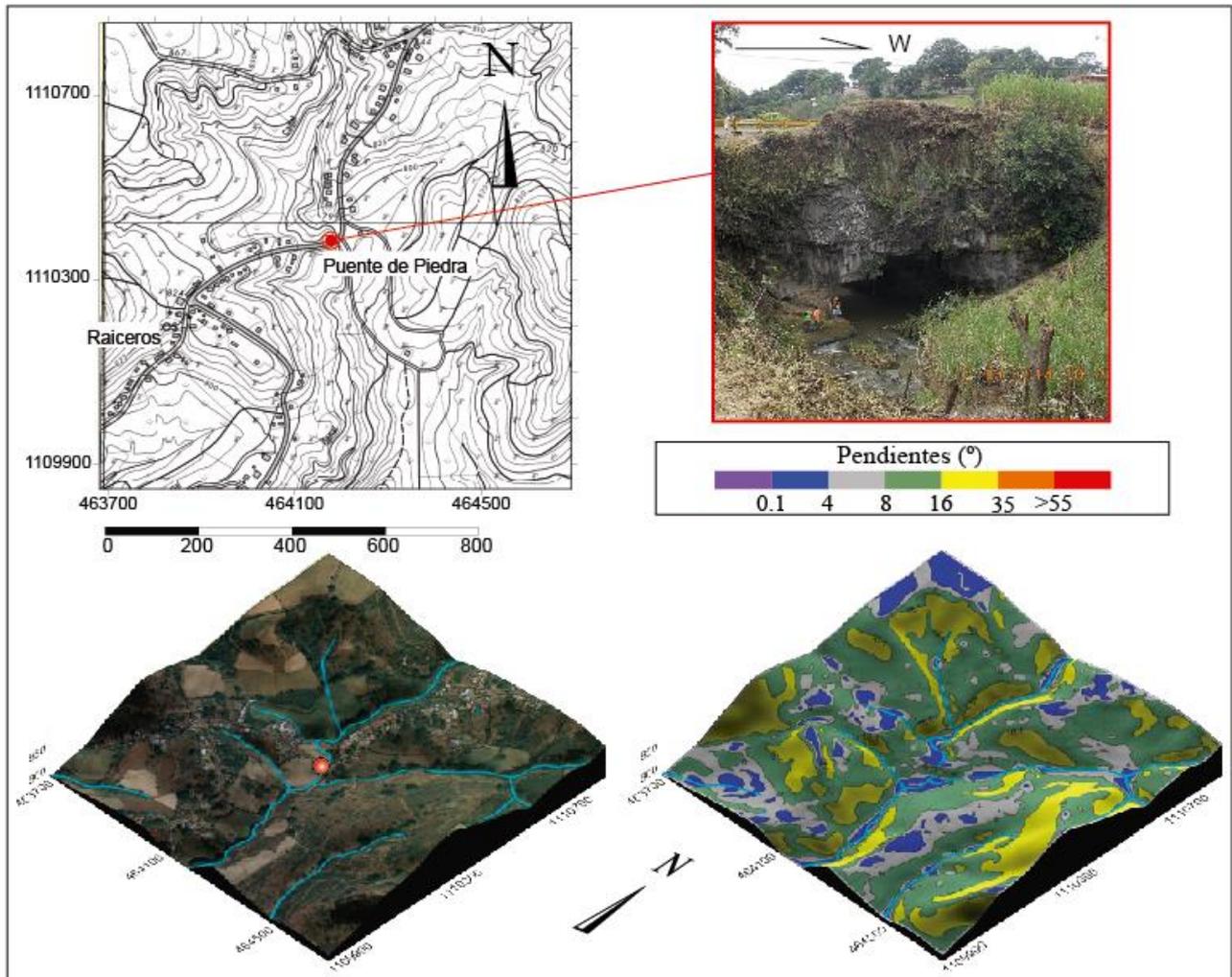


Figura 1. Se muestra la ubicación del sitio Puente de Piedra en un segmento de la Hoja Cartográfica con el mismo nombre del IGN 1: 10 000, un fotografía oblicua mostrando la sección del puente aguas arriba y un modelo de elevación digital con una fotografía aérea que muestra los drenajes y diferencias topográficas (la exageración vertical del DEM es 1.5 x). Sobre el mismo DEM se presentan las pendientes de la zona que varían entre suaves a moderadas.

5. CARACTERIZACIÓN GEOLÓGICA DEL PUENTE DE PIEDRA

El Puente de Piedra está compuesto por material piroclástico, derivado de explosiones volcánicas en forma de enormes flujos ignimbríticos (nubes ardientes) y caída de cenizas. Este proceso ocurrió hace unos 390-320 mil años (Marshall et al., 2003) y se puede relacionar con la explosión de la caldera del volcán Barva (Pérez, 2000). La temperatura de los flujos ignimbríticos es extremadamente alta ($> 600\text{ }^{\circ}\text{C}$), y al enfriarse lentamente originan una disposición de las rocas en forma de columnas prismáticas.

Según Pérez 2000, Mora et al. (2003) y Mora 2004, las rocas de Puente de Piedra pertenecen a la Formación Tiribí, procedente del volcán Barva. El macizo superior corresponde con una roca ignimbrítica columnar fuertemente soldada de color gris oscuro, con textura ignimbrítica granular, está compuesta por ceniza, líticos, pómez y fragmentos de obsidiana de tamaños milimétricos y formas angulares de alta esfericidad. Tiene una matriz de 90% de ceniza y cristales angulares de plagioclasa de tamaño milimétrico, así como 10% de fragmentos de lava con tamaños milimétricos, al meteorizarse presenta colores pardos. También contiene estructuras fluidas de color amarillento. En la parte superior del flujo, las estructuras son granulares, gruesas y el tamaño de los fiammes de obsidiana es mayor, además se han observado fragmentos de madera algunos de gran tamaño en el techo del Puente de Piedra. En total tiene un espesor de 7 m y se diferencian tres unidades de enfriamiento, donde la parte inferior forma columnas de 5 a 6 caras, la parte intermedia es blocosa y la superior es columnar con 4 a 6 caras. Su aspecto columnar se debe al rápido enfriamiento, la parte superior se encuentra cubierta por una capa de suelo originado por la alteración de las rocas (regolito) y depositación de cenizas más recientes (Figura 2).

En la base de la ignimbrita se observa un depósito laminado y con gradación normal correspondiente con tobas masivas, caracterizada como roca blanda con un espesor de 3,5 m. Contiene fragmentos milimétricos de obsidiana de color negro y pómez de color blanca ambas muy alteradas, dentro de una matriz de ceniza de color café. El contacto superior es gradacional con la ignimbrita columnar y podría tratarse de un evento de caída muy localizado.

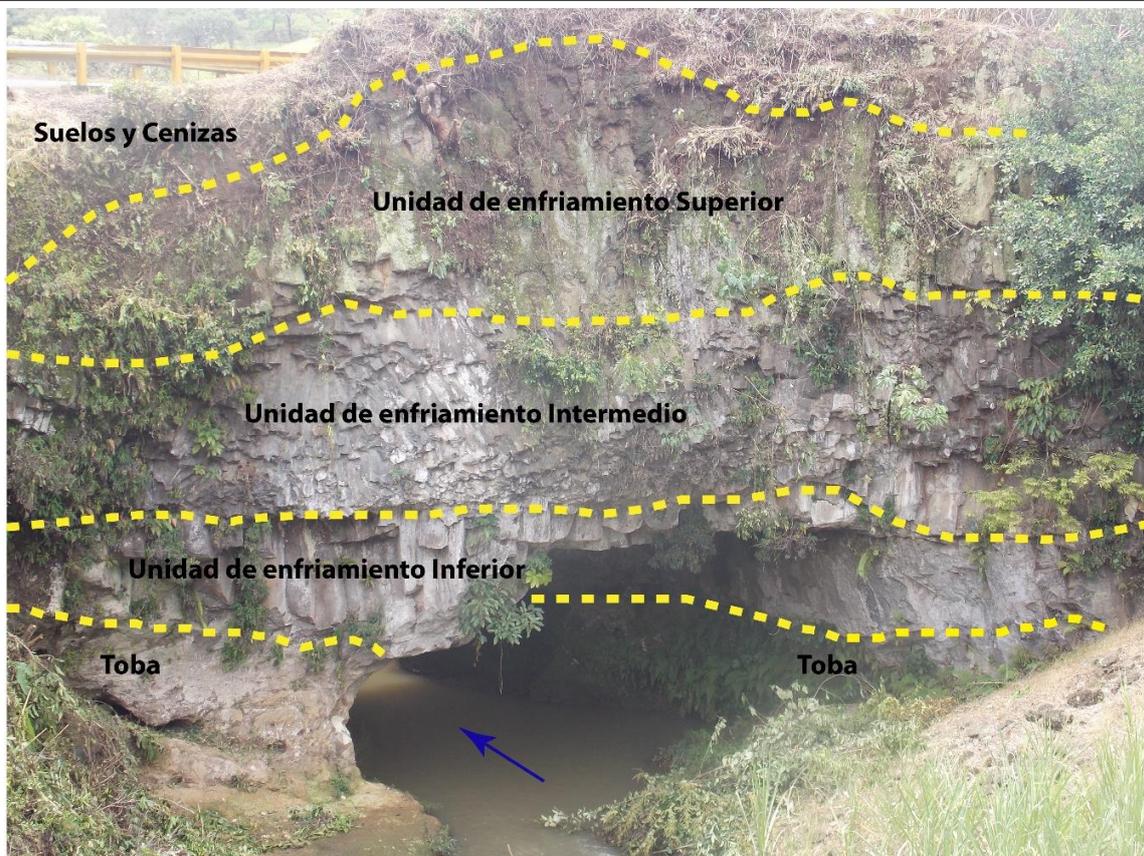


Figura 2. Delimitación de las unidades de roca que constituyen el Puente Piedra. La parte inferior está constituida por una la unidad de tobas poco soldadas; posteriormente hay una ignimbrita que se puede subdividir en tres unidades de acuerdo a su grado de diaclasamiento que es en parte producto del enfriamiento de los materiales (unidad de enfriamiento inferior, unidad de enfriamiento intermedio, unidad de enfriamiento superior) y por último la parte superior se encuentra cubierta por una capa de suelo originado por la alteración de las rocas (regolito) y depositación de cenizas más recientes.

Según el estudio de caracterización geológica y geotécnica del Puente de Piedra realizado por la Escuela Centroamérica de Geología en el año 2003, (Mora et al., 2003), la condición del puente en ese momento, desde el punto de vista de la resistencia de la toba masiva, se consideró segura; pues el factor de seguridad que se determinó fue superior a un valor de 2.5. En ese mismo trabajo se realizaron recomendaciones de proteger la base del puente ante la erosión causada por el río Poró durante sus crecidas, mediante la utilización de estructuras diseñadas por un profesional en Ingeniería Civil. Sin embargo, hasta la fecha no se han realizado estas obras de protección y como

se describirá más adelante el deterioro de esta capa se ha incrementado, aumentando la vulnerabilidad del puente.

En el trabajo de Mora et al. 2003, también se evaluó la calidad del macizo rocoso fracturado, este se clasificó como pobre, de acuerdo con el sistema RMR, y muy pobre según el sistema Q. De igual forma se hicieron recomendaciones para la implementación de algún tipo de soporte y asegurar su estabilidad. Entre las recomendaciones que se hicieron estaban: Instalar pernos sistemáticos, activos, cementados, de 4 m de longitud y 1 m de espaciamiento en la ignimbrita y colocar concreto lanzado de 10 cm de espesor, reforzado con malla electrosoldada en la toba. Ninguna de estas recomendaciones fue seguida y la vegetación ha generado problemas nuevos problemas en esta unidad.

6. ANÁLISIS Y EVALUACIÓN DEL PUENTE DE PIEDRA

El análisis de la estructura se realizó en tres secciones: Aguas arriba del puente o sector norte, aguas abajo o sector sur y lo que corresponde con la parte central que incluye un análisis de la parte de abajo del arco de piedra y la sección superior del puente que está cubierta por asfalto. En la figura 3, se muestran estas tres secciones para facilitar la comprensión de las descripciones que se hacen más adelante.

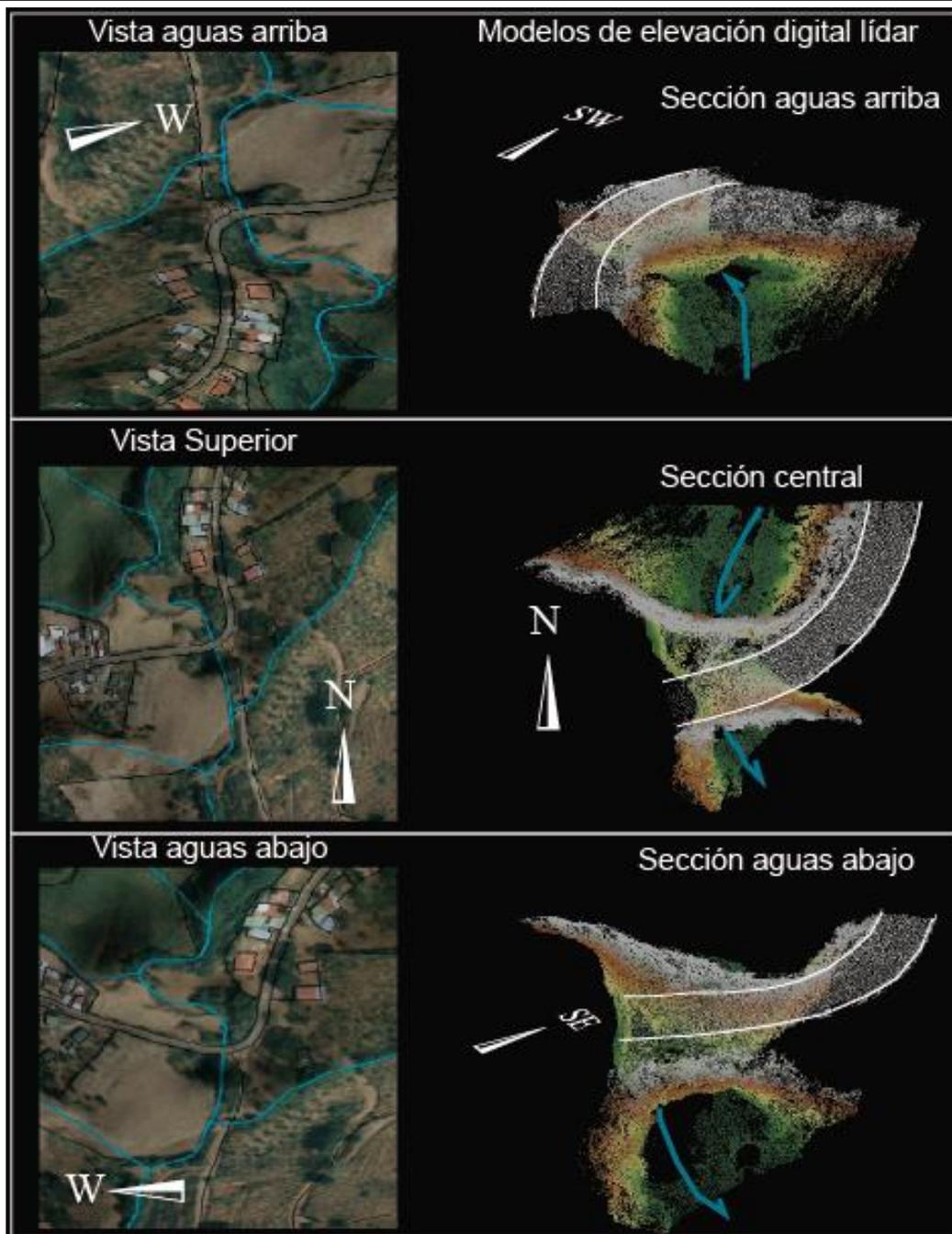


Figura 3. A la izquierda se muestran las diferentes vistas de la zona del puente en el modelo de elevación digital de la zona con una fotografía aérea. A la derecha se muestran las secciones del Puente de Piedra levantadas con el escáner Lídár y que fueron analizadas en detalle en este informe.

6.1 Sección Aguas Arriba

En este apartado, se analizan los problemas encontrados en la sección aguas arriba del puente. El río Poró es un río de montaña con una pendiente moderada, presenta un comportamiento de tipo meándrico, esto se puede notar especialmente antes de llegar a la zona del puente de Piedra donde el curso del río tiene cambios bruscos de dirección. Algunos de estos cambios de dirección pueden ser de casi 70° aunque, también se observaron otros menos bruscos con ángulos entre ($30-45^\circ$). Los cambios de dirección en un río como este, hacen que sus aguas fluyan con una velocidad considerable y que se originen en sus laderas zonas de erosión y frente a ellas zonas de depositación.

En las zonas de erosión se dan procesos de socavación, debido a la velocidad que trae el agua y la turbulencia que se genera al golpear la superficie con un ángulo que puede ser superior a los 45° . Los materiales removidos se depositan en las zonas donde la energía de las aguas es menor, usualmente esto ocurre en zonas relativamente planas que se ubican perpendicularmente frente a los sitios de erosión (Figura 4).

En la estación lluviosa (entre mayo y noviembre), el caudal del río aumenta y el área de afectación por los procesos erosivos fluviales también aumenta, especialmente durante crecidas relacionadas con tormentas torrenciales. La energía del agua puede aumentar y acarrear materiales (rocas, troncos, basura, etc) que pueden contribuir a generar mayor erosión en las laderas fluviales.

Los cambios de dirección de flujo y el carácter meándrico del río Poró afectan directamente el Puente de Piedra en dos sitios aguas arriba. Primero, en la zona inferior izquierda de la entrada del arco y segundo, en la parte inferior interna del arco (Figura 4).



Figura 4. Vista del Río Poró aguas arriba del puente de Piedra, las fotografías superiores corresponden a una vista que hay desde el puente, mientras que las fotografías inferiores son viendo el río desde la carretera y sobre el cauce. En estas imágenes se nota el cambio de dirección del curso del río, esto origina zonas de erosión y zonas de depositación. Hay dos zonas de erosión que están afectando directamente el puente, ambas se muestran en la fotografía inferior derecha.

En la sección aguas arriba del Puente de Piedra se identificó un daño puntual importante por erosión directamente en el pie de la estructura en su lado izquierdo. Se trata de un orificio que atraviesa de lado a lado el macizo rocoso, formando un pequeño arco de unos 47 cm de alto, por 33 cm de ancho y 6,3 m de largo (Figura 5). Por las evidencias observadas en el campo, se interpreta que las aguas superficiales de los drenajes que discurren hacia la margen izquierda y al

pie del macizo, están efectuando un proceso de erosión hídrica sobre el material de la parte inferior (Unidad Toba) del puente (Figura 6). Este orificio no fue descrito en el trabajo de Mora et al 2003, por lo que se considera que su formación es de la última década. De no tratar adecuadamente y en forma oportuna este problema de erosión hídrica, es muy probable que el orificio en la unidad de toba se siga expandiendo y que llegue a unirse con el arco principal haciéndolo más amplio. Esta nueva condición podría propiciar el colapso de segmentos del techo en la unidad de las ignimbritas, ya que esta es la condición estable del macizo.

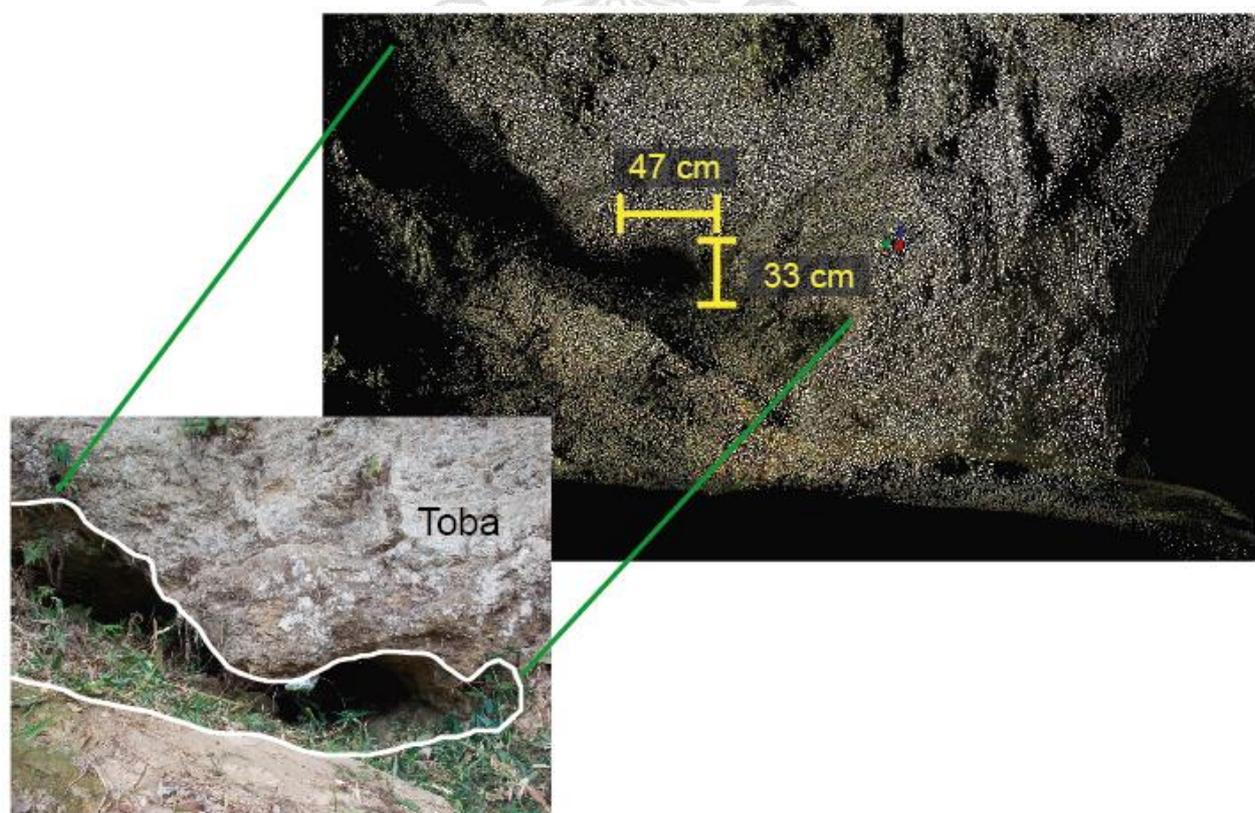


Figura 5. Detalle de orificio ubicado aguas arriba en la parte inferior del macizo al margen izquierdo del cauce, producido por la erosión hídrica sobre la unidad de tobas, que debido a su textura blanda y granulometría, el aporte de agua por las crecidas del río y las aguas superficiales que descienden por el macizo provocan el lavado del material, originando esta situación.



Figura 6. En la margen izquierda del río Poró, las aguas superficiales y las que se recogen en la superficie de ruedo del puente, se dirigen hasta el cauce por un costado del macizo provocando erosión de esta pared y afectando principalmente la unidad de tobas. La ruta que tienen estas aguas de escorrentía facilitan el crecimiento de un orificio que atraviesa de lado a lado la estructura.

6.2 Sección Superior, inferior y central de la estructura

Aquí se analizan los problemas encontrados sobre y bajo el Puente de Piedra. En la parte superior se incluye lo que son las aproximaciones y lo que sería equivalente a la estructura superior de ruedo del puente. En la parte inferior se analiza el arco interno la entrada y la salida. Además se mencionan algunos problemas de señalización y seguridad vial de toda la estructura.

Las capas que constituyen los niveles superiores del puente son regolitos y cenizas, más abajo se encuentra la ignimbrita columnar que forma el arco. Los niveles superiores están expuestos directamente a los factores atmosféricos que promueven la generación de suelo. En ambientes tropicales, como el nuestro, la profundización de la meteorización y afectación de la roca se

favorece por la cantidad de lluvia (3000 - 4000 m/año) y las altas temperaturas (25-30° C). El crecimiento de la vegetación y la profundización de las raíces, aceleran este proceso. La meteorización del macizo rocoso puede verse favorecido también por procesos biológicos, como crecimiento de plantas, profundización de raíces y oxigenación de suelos y roca por medio de insectos. (Figuras 7 y 8).

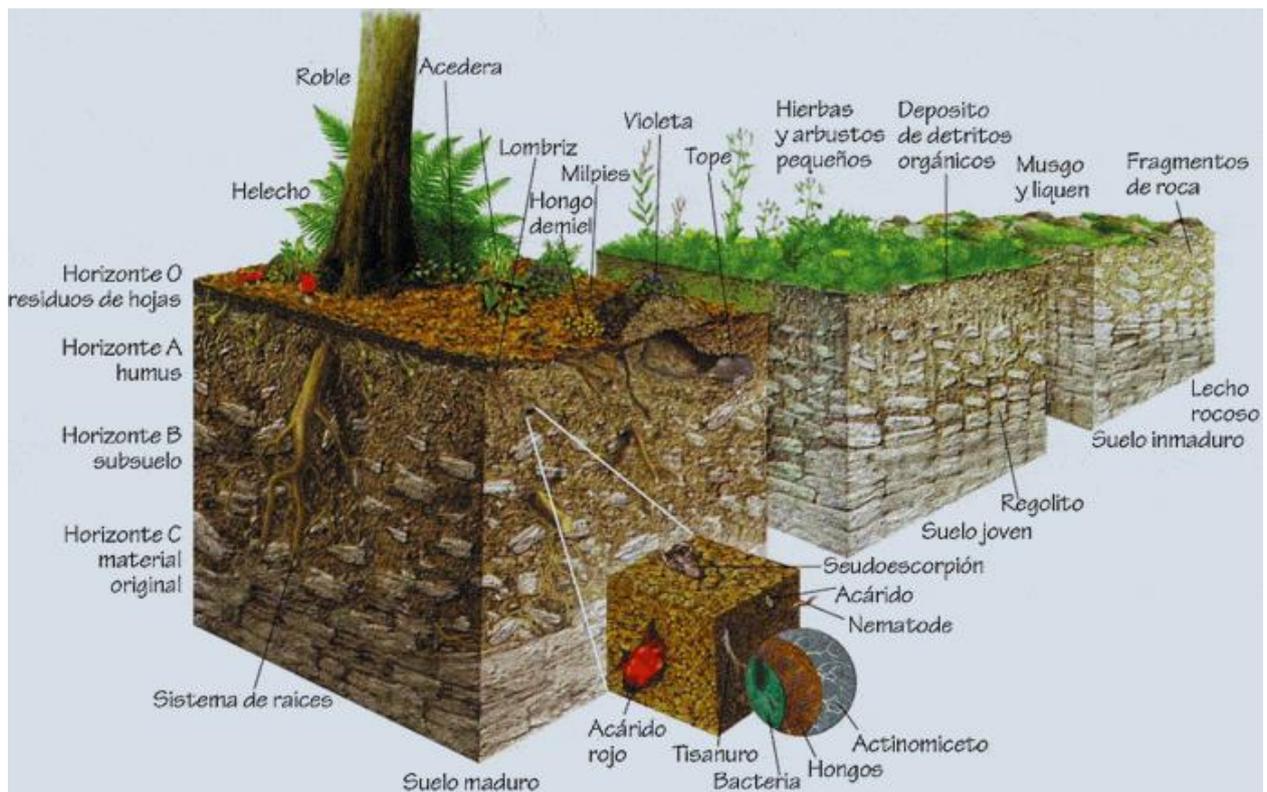


Figura 7. Esquema de la evolución de profundización de generación de suelo sobre un macizo rocoso ante el efecto de la meteorización física y biológica. La parte superior está expuesta a los factores atmosféricos que promueven la generación de suelo. El crecimiento de la vegetación y la profundización de las raíces, aceleran este proceso, en el que resulta un espesor considerable de suelo y limitando la calidad del macizo (Gutiérrez 2009).



Horizonte de residuos,
hojas, pasto

Sistema de raíces

Musgo y vegetación
mantiene en condiciones
húmedas la roca

Roca sana pero con
vegetación en las fracturas

Figura 8. Sección del puente donde se muestra como la vegetación y la generación de suelos está afectando la roca que forma el arco natural. También el montículo de materiales representa un peligro para la seguridad vial, ya que obstruye la visibilidad del tránsito en ambos sentidos.

Como se puede ver en la figura 8, el "horizonte de residuos" constituye un obstáculo para los usuarios de la vía, por lo que es recomendable removerlos y aumentar los estándares de seguridad de la estructura. Esta condición se agrava durante la noche ya que no se cuenta con iluminación adecuada aumentando la susceptibilidad por accidentes de tránsito.

En la zona inferior del arco (bajo el puente), la margen izquierda presenta una mayor vulnerabilidad estructural que el lado derecho. Esto debido a que el lado izquierdo presenta una morfología más esbelta en la sección que corresponde con el material de la unidad de toba (Figura 9). Este sector está siendo erosionado y afectado directamente por la erosión fluvial tanto de las aguas del río como del drenaje que baja por el costado de la estructura. Este sitio debería de considerarse para revestirlo con concreto y protegerlo de la erosión.

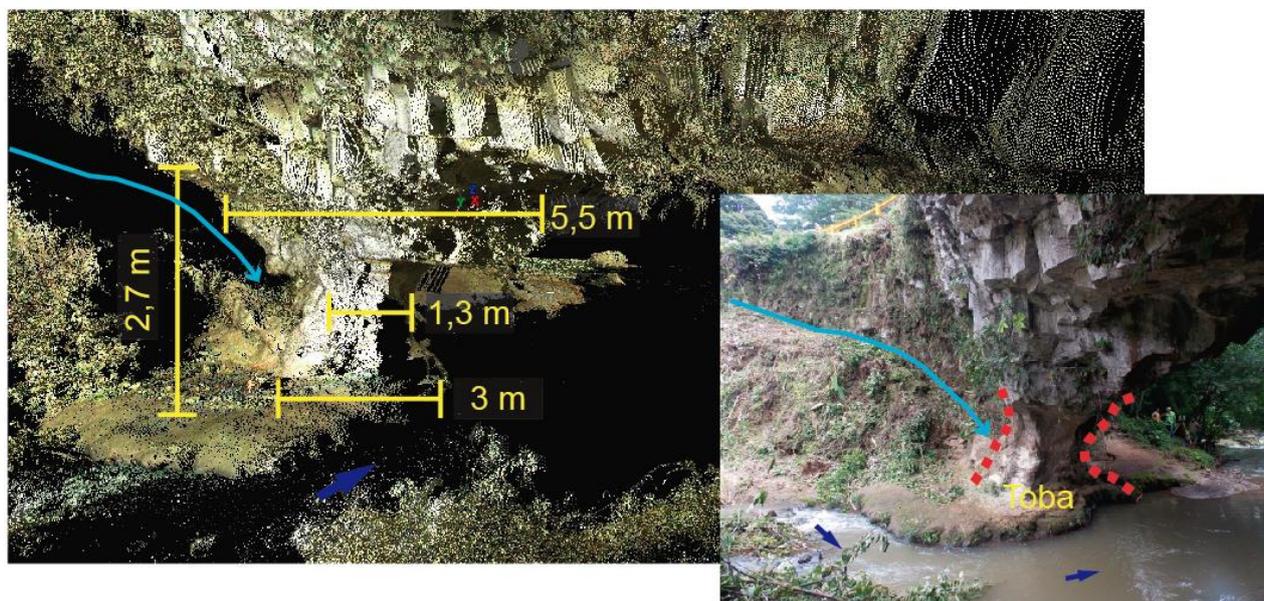


Figura 9. Adelgazamiento en el margen izquierdo, debido a la erosión del río y la escorrentía que desciende por los márgenes del macizo que afectan directamente a la unidad de tobas.

La margen derecha del arco es más robusta con casi 6 m en la base. Sin embargo también se presenta erosionada la parte inferior que corresponde con la unidad de tobas, ya que recibe el impacto frontal del agua. Para esta zona también debería de considerarse un revestimiento con concreto lanzado y malla electro soldada para protegerla de la erosión. La unidad de ignimbritas presenta fracturas verticales y algunas horizontales (Figura 10).

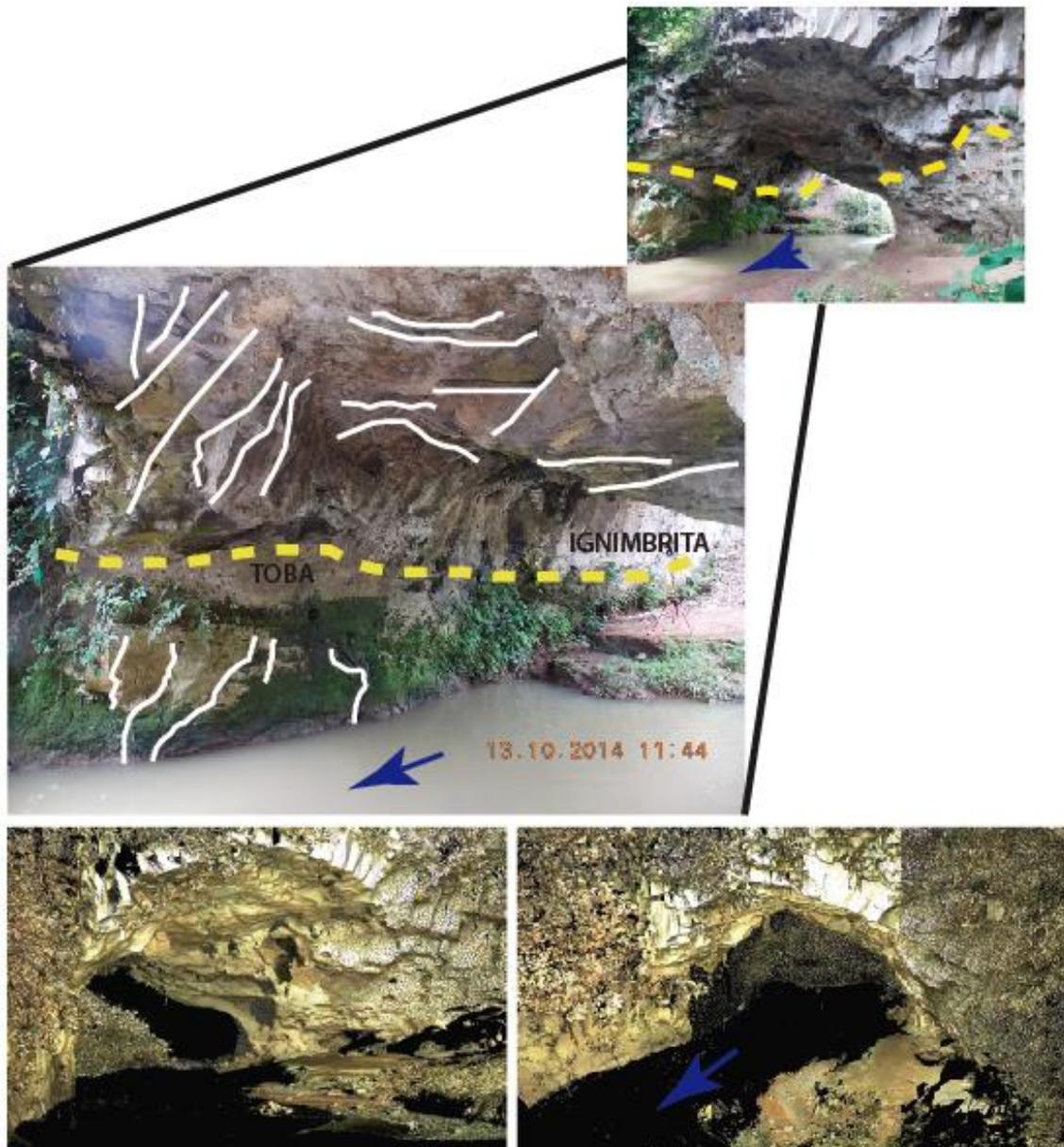


Figura 10. Se aprecia la pared del margen derecho del río que es más robusta (6 m). Tanto en la unidad de tobas como de ignimbrita se nota el crecimiento de vegetación que favorece la meteorización física y posteriormente la remoción de materiales. En ambas unidades se observan fracturas casi verticales favoreciendo el corte de la pared mientras que en la unidad de ignimbritas localizadas en el techo las fracturas horizontales son provocadas por la descompresión.

En la salida del arco aguas abajo, el principal problema que se identificó es el crecimiento de vegetación entre las columnas de la unidad de ignimbritas (Figura 11). Las raíces, al crecer la planta van ensanchando los espacios entre las columnas hasta provocar el colapso. Las tobas están erosionadas por plantas, insectos y vandalismo de las personas que han tallado todo tipo de dibujos y nombres sobre esta unidad. Se considera que es recomendable también revestir esta zona. Se podría utilizar concreto lanzado con malla electro soldada para revestir esta zona. Para el acabado del concreto se debe de generar algún tipo de textura para que se mantenga el aspecto natural del puente.



Figura 11. La vegetación crece entre las fracturas de la ignimbrita, ayudadas por la humedad contenida en estas, ocasiona un ensanchamiento de las fracturas que posteriormente puede producir un desprendimiento de bloques.

Sobre el asfalto de las aproximaciones del puente y la superficie de ruedo se encontraron los siguientes problemas que facilitan la infiltración de agua y posteriormente problemas en el macizo rocoso. En la figura 12 se muestran algunos de los problemas que se encontraron y que se mencionan a continuación.

- Huecos en el asfalto
- Bacheos mal elaborados
- Piel de lagarto
- Hay baches sobre zonas con piel de lagarto

- Fisuras de borde por falta de confinamiento. Esto origina una pérdida de soporte del material e infiltración de agua.
- Desprendimiento de asfalto.
- Descalzamiento al borde de la superficie de ruedo que se encuentra con un nivel de severidad media.

Problemas de drenajes y manejo de aguas de lluvia sobre el puente que pueden afectar la roca.

- No existe un sistema de manejo de aguas de lluvia adecuado que conduzca el agua pluvial de manera adecuada. Lo que está ocurriendo actualmente es que el agua baja directamente sobre el macizo rocoso y está contribuyendo con la erosión.

Se observan entre otros los siguientes problemas de seguridad vial (Figura 12)

- No hay aceras para peatones y solo existe un pequeño espacio donde crece vegetación como pasto y maleza entre la guarda vía y la carretera.
- En el sector oeste del puente hay un montículo de suelo y rocas que impide la visibilidad de los usuarios de la vía hacia el otro lado del puente. La situación se agrava al ser un puente en curva.
- El guardavía a ambos lados no tiene un abatimiento apropiado. Los postes metálicos que la sostienen están mal utilizados porque se trato de darles rigidez.
- El guardavía que está localizada aguas arriba, está dañado por impactos y debería evaluarse se remplazo.
- Falta de iluminación pública adecuada.
- Se observó postes metálicos de publicidad al lado de la vía que podrían ser un obstáculo visual.
- No existe demarcación horizontal sobre la superficie de ruedo.
- Este es un puente, tiene espacio para que sea transitado solamente un por sentido a la vez. En el sitio, se observó casos de dos vehículos transitando en sentido opuesto al mismo tiempo. Esto es originado por la falta de visibilidad de los vehículos debido al montículo de piedra y suelo del sector oeste del puente.



Figura 12. Se muestran diferentes elementos que afectan la seguridad vial sobre el puente y problemas en la superficie de ruede. Las fotografías superiores corresponden con el acceso del lado de La Argentina, mientras que las fotografías inferiores corresponden con el acceso del lado de Poró.

Del escaneo lidar que se realizó en el Puente de Piedra, se extrajeron tres cortes de la zona por donde atraviesa el agua, estas secciones son: Sección de entrada, sección intermedia y sección de salida (Figura 13). Los resultados muestran que el perfil de la sección de entrada, presenta el ancho más grande de las tres con 12,3 m y también la altura más grande con 6,3 m. El perfil de la sección intermedia presenta las dimensiones más reducidas de las tres, con solamente 8,1 m de ancho y 4,6 m de alto. Las dimensiones del perfil de la sección de salida son 10,7 m de ancho por 5,6 m de altura. Con base en esta información, se considera que durante las crecidas del Río Poró, las paredes de la sección intermedia son las podrían estar sufriendo mayor desgaste por la erosión fluvial.

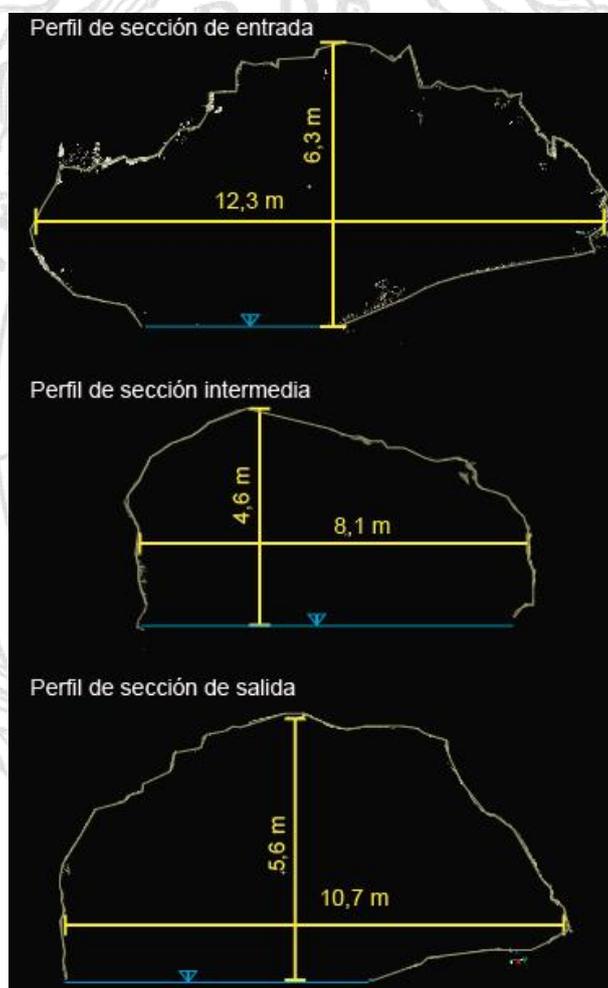


Figura 13. Perfiles de tres distintas secciones del arco, de arriba hacia abajo se muestra el perfil de la entrada, un perfil intermedio y el perfil de la sección de salida. La sección intermedia es la que presenta la menor capacidad hidráulica de las tres.

6.3 Sección aguas abajo

En esta sección, el principal problema que se identificó al igual que en otras secciones del puente, fue el crecimiento de vegetación entre las columnas de la unidad de ignimbritas. El crecimiento de la raíces ensancha los espacios de las diaclasas, además la descomposición de materia orgánica puede generar ciertos ácidos que facilitan la alteración de la roca y favoreciendo la erosión (Figura 14). La vegetación puede generar caída de rocas de todos los tamaños. (Figura 15).

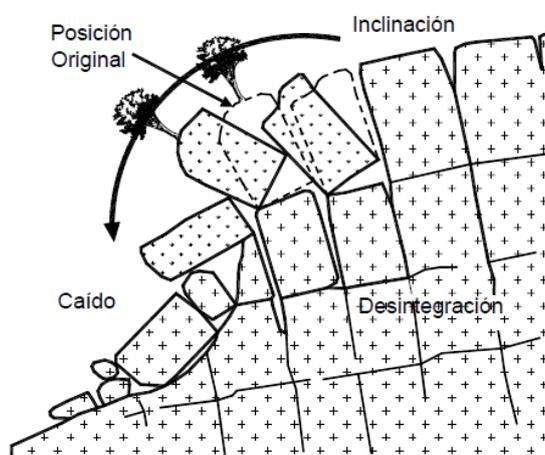


Figura 14. Esquema de desintegración, inclinación y caídos en un macizo rocoso. El crecimiento de raíces dentro de las fracturas de un macizo, ocasiona el ensanchamiento y la descompresión de estas, lo que produce un desprendimiento de los bloques (Tomado de Suarez 2000).



Figura 15. La vegetación dentro de las fracturas de la ignimbrita tienen un efecto negativo en la macizo, al causar un ensanchamiento de las fracturas que promueve el desprendimiento de la roca.

Debido al fácil acceso que tienen las personas a este sector del puente, se observó vandalismo (tallado de rocas) en la Unidad de Tobas (Figura 16). Se considera que sería bueno revestir esta zona con concreto y darle algún tipo de textura para que se mantenga el aspecto natural del puente y proteger la base de la estructura.

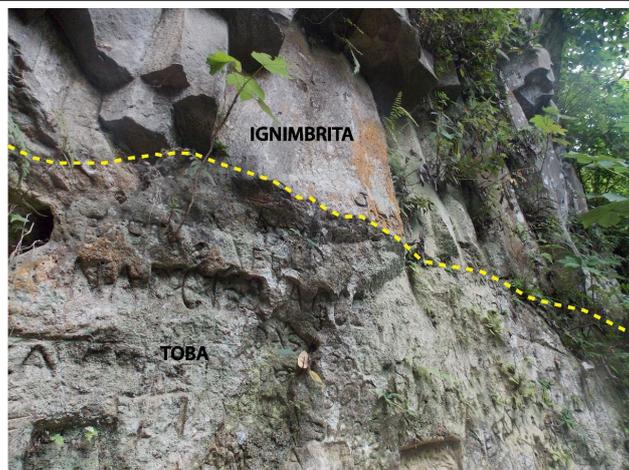


Figura 16. Se observa las diferencias y características en el comportamiento de las dos unidades. Siendo la unidad de ignimbritas una roca masiva con diaclasado pentagonal, facilitando el crecimiento de vegetación en sus fracturas. La unidad inferior de tobas, se caracteriza por tener un textura granular y blanda por lo tanto se erosiona con más facilidad.

7. TRANSITO PROMEDIO DIARIO (TPD) SOBRE PUENTE DE PIEDRA

Se presentan los resultados del conteo de tránsito de vehículos que se realizó en este trabajo sobre el Puente de Piedra. Los datos fueron obtenidos por medio de un contador electrónico, que funciono 24 horas entre el 21 y 29 de octubre del presente año. Sin embargo los datos más representativos corresponden a los días entre el 22 y 26 de octubre (Cuadro 1.).

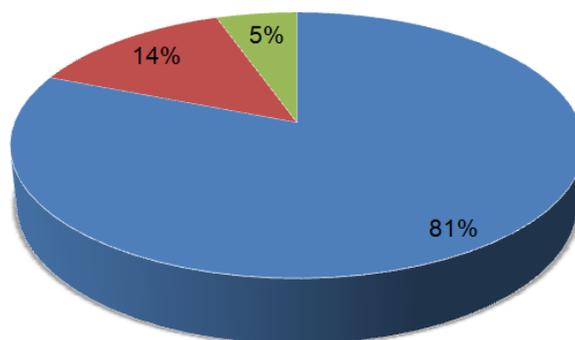
Fecha	Ubicación	TPD	Livianos	Motos	C2 C2 Bus C2+	C3	T3 S2	Pesados
			Porcentage					
22/10/2014	Puente Piedra	2739	80.32	13.65	5.29	0.47	0.26	6.02
23/10/2014	Puente Piedra	2831	78.95	14.45	5.86	0.42	0.32	6.61
24/10/2014	Puente Piedra	2779	80.60	12.41	5.90	0.40	0.68	6.98
25/10/2014	Puente Piedra	2621	81.11	13.89	4.39	0.31	0.31	5.00
26/10/2014	Puente Piedra	1914	84.17	13.58	1.72	0.21	0.31	2.25
	Total	2576.8	81.03	13.60	4.63	0.36	0.38	5.37

Cuadro 1. Datos de Transito Promedio Diario de Puente de Piedra entre el 22 y 26 de Octubre 2014

De los datos recolectados, se aprecia como la gran mayoría de los vehículos que transitan sobre el puente corresponden a automóviles livianos 81,03 %, luego siguen las motocicletas con 13,6 % y solamente un 5,37 % corresponden con automotores pesados. El promedio del TPD que transitan por el puente es de 2576,8 esto corresponde con bajo volumen vehicular (Figura 17). Estos datos son congruentes con los observado en el sitio e indican que la cantidad de vehículos es muy reducida en la zona. Los vehículos pesados son en su mayoría autobuses, y su flujo es limitado y esporádico. Según el Padrón Minero de la Dirección de Geología y Minas de Costa Rica, en un radio de 2 km de distancia del puente hay dos concesiones de extracción de materiales, por lo tanto es muy probable que parte de los vehículos pesados registrados correspondan con vagonetas que acarrean materiales extraídos de estos tajos.

Al no existir datos de TPD previos a este trabajo, no es posible realizar una comparación estadística. Sin embargo, según la percepción de los vecinos y por un aumento en la población de la zona, si consideramos posible que en los últimos 10 años el TPD de la zona haya presentado un incremento. Pese a este posible incremento, los valores presentados actualmente siguen siendo bajos, aun para una ruta cantonal. Sin embargo, se considera que es importante que se hagan más análisis de este tipo en el futuro y que se tome en cuenta esta ruta dentro del plan regulador del Cantón de Grecia y las implicaciones que este podría tener en el transito sobre la vía y el puente.

Distribución de tipo de vehículos que circula por el Puente de Piedra



■ Vehículos Livianos ■ Motocicletas ■ Vehículos Pesados (Bus, C3, T3 S2)

Figura 17. Grafico de datos de TPD de Puente de Piedra. El mayor tránsito de vehículos corresponde con automóviles livianos, seguido por motocicletas y vehículos pesados.

8. CONCLUSIONES

La erosión causada por las aguas del río Poró y un drenaje natural ubicado al pie del talud izquierdo del puente ha generado la socavación de la unidad de tobas dejando un orificio que atraviesa de lado a lado un costado del puente y que podría generar inestabilidad en la unidad de ignimbritas. Un eventual colapso produciría un ensanchamiento del arco del puente.

La superficie de ruedo del puente y de las aproximaciones presentan problemas que generan infiltraciones de agua generando deterioro en el macizo rocoso.

La vegetación está teniendo un impacto negativo directo en el deterioro del puente. Las raíces de los árboles y plantas están aprovechando los espacios entre las columnas de las ignimbritas para crecer. Esto causa un ensanchamiento de las fracturas y genera desprendimientos de la roca.

Hay un montículo de suelo y roca alterada en el sector oeste del puente que representa un serio problema de seguridad vial para los usuarios del puente.

El TPD actual sobre el Puente de Piedra no representa un problema sobre la estructura, sin embargo sí consideramos importante tomar en cuenta que un aumento de este parámetro en el futuro sí podría tener consecuencias directas sobre la preservación del puente.

9. RECOMENDACIONES

Controlar el crecimiento de la vegetación en todos los sectores del puente, taludes aguas arriba y aguas abajo y al lado de la superficie de ruedo. Limpiar con agua o aire a presión y sellar con un impermeabilizante todos los espacios entre las columnas para evitar el crecimiento de vegetación.

Remover completamente el montículo suelo y rocas alteradas que hay en el sector oeste del puente. Con esto se mejoraría la visibilidad de los conductores y peatones en ambos sentidos de la ruta. Una vez removido este material se debería impermeabilizar el terreno con un sello de concreto para evitar el crecimiento de vegetación y la infiltración de agua en las capas inferiores. Los trabajos de limpieza de esta montículo tienen que ser controlados y realizados manualmente. Esto debido a que el uso de maquinaria podría dañar la estructura del puente.

Se podría analizar la posibilidad de instalar un semáforo a ambos lados del puente, o bien colocar un espejo cóncavo en la curva para poder observar el acercamiento de vehículos en cada sentido de la vía.

Revestir con concreto lanzado y malla electrosoldada el material que funciona como la base del puente (Unidad de tobas) para evitar que se erosione por acción del agua. Al recubrimiento se le podría dar una textura natural para que el puente no pierda su aspecto natural.

Para los problemas identificados en la superficie de ruedo del puente y las aproximaciones, es recomendable sustituir la capa de mezcla asfáltica y conformar las capas inferiores en los casos que se requiera para dar soporte a la estructura de pavimento. Mejorar la iluminación del puente.

Construir cunetas y drenajes sobre el puente que realicen un manejo adecuado de aguas superficiales y las lleven a sitios donde el agua no afecte la estructura del puente y los taludes.

Explotar el potencial turístico que esta estructura natural tiene, de esta forma hasta se podrían conseguir fondos para su mantenimiento y preservación. Este uno de los pocos puentes naturales en el mundo que está en funcionamiento. Las acciones recomendadas anteriormente alargaría su vida útil y disfrute de más generaciones.

10. AGRADECIMIENTOS

Se agradece a la Municipalidad de Grecia por la colaboración brindada para realizar la inspección de campo y el levantamiento con el escáner lidar. En la realización de este informe y el levantamiento de datos, colaboraron, Carolina Suarez y Karen Herrera asistentes de ingeniería y geología de la Unidad de Evaluación de la Red Vial Nacional.

11. REFERENCIAS

DIRECCIÓN DE GEOLOGÍA Y MINAS DE COSTA RICA. Padrón minero de la Hoja Naranjo, http://www.geologia.go.cr/mineria/padron_minero/padron_minero/n/naranjo.png

GUTIÉRREZ, M., E., 2009: Geomorfología. Universidad de Zaragoza España, Pearson Hall.

HUAPAYA, S & ROJAS, V., 2012: Mapa Geológico de Hoja Naranjo (3346-III) – Escala 1: 50 000, Dirección de Geología y Minas, San José, Costa Rica.

MARSHALL, J., IDLEMAN, B., GARDNER, T. Y FISHER, D., 2003: Landscape evolution within a retreating volcanic arc, Costa Rica, Central America. *Geology*, 31 (5): 419-422.



MORA, R., CHAVEZ, J., ALVARADO, M., CAMACHO, D., MURILLO, D., BARRANTES, M. & HERRERA, P., 2003: Caracterización geológica y geotécnica del Puente de Piedra, Grecia, Alajuela: de la leyenda a la realidad geológica - 15 págs. G-4213 Mecánica de Rocas, Escuela Centroamericana de Geología, Universidad de Costa Rica.

MORA, R., 2004 El puente de piedra de Grecia: ¿Un arco o un puente natural? Revista Geológica de América Central, 31: 61-66.

PÉREZ, W., Vulcanología y petroquímica del evento ignimbrítico del Pleistoceno Medio (0,33 M.a.) del Valle Central de Costa Rica. 170 págs. Escuela Centroamericana de Geología, Universidad de Costa Rica (tesis Lic.).

SUAREZ, J., 2000: Análisis geotécnico Volumen 1. tomado de www.erosion.com.co

