

#### IV. CONCLUSIONES ZONIFICACION Y PRIORIZACION DE OBRAS

4.1 Los estudios de Fase II, muy buenos todos, confirman la preocupación de AyA y los conceptos del suscrito establecidos en el informe de Fase I sobre la conducción del acueducto de Orosi que es altamente vulnerable bajo el efecto de diferentes tipos de riesgo que se pueden agrupar en tres grupos principales:

- a. Riesgo Geotécnico
- b. Riesgo Sísmico
- c. Riesgo Hidrológico, Hidráulico y Estructural

4.2 Es posible, y es el objetivo de este informe de Fase III, diseñar y recomendar obras que minimicen algunos de estos riesgos dentro de parámetros económicos que produzcan los mayores beneficios, teniendo siempre la limitación de orden práctico de no poder suspender el servicio de este acueducto de Orosi por un término mayor de una semana, pues no se cuenta con suministro alterno para el abastecimiento regular de la ciudad.

4.3 Teniendo en cuenta las limitaciones económicas y de orden práctico se establecen a continuación los criterios para determinar las zonas de mayor vulnerabilidad y las prioridades de inversión que producen el mayor beneficio; lo que en este caso es lo mismo, las obras que evitan los mayores perjuicios o daños.

a. Pérdida de Vidas Humanas.

No se considera inminente la pérdida de vidas humanas en caso de rotura de la conducción. Los sitios más graves serían los primeros 4 km de la conducción que se encuentran sobre la población de Orosi y podrían causar avalanchas de lodos. Una falla en el sitio de máxima

presión, el sifón sobre el río Navarro, descargaría caudales instantáneos de 16 m<sup>3</sup>/s hasta desocupar los 21.000 m<sup>3</sup> de la tubería (en unos 20 minutos) que son fácilmente manejados por el cauce del río Navarro.

b. Pérdida del Entorno

Una rotura de la tubería en las laderas que conducen al sifón del río Navarro especialmente la margen izquierda del río (norte) ocasionaría deslaves que destruirían no solo el tramo inferior de la tubería y el sifón sino la misma ladera, haciendo muy difícil la reconstrucción y reparación de la conducción. En menor escala, en los 4 km primeros de la conducción también se causarían pérdidas del terreno y del acceso que haría más difícil la reconstrucción.

c. Difícil Reparación

En razón de los accesos, las laderas que conducen al sifón del río Navarro son de difícil reparación en caso de daño especialmente la ladera norte. También una falla destruiría puntualmente el acceso en los 4 km primeros de la conducción.

d. Probabilidad de Ocurrencia.

La historia sísmica de Costa Rica muestra que se deben esperar eventos con gran frecuencia en los 50 años de vida útil, con aceleraciones de 0.30 g que afectarían la estabilidad de la conducción. Esto combinado con el hecho de que las condiciones de estabilidad geotécnica de los 4 km primeros de la conducción están muy cerca al límite de falla, (de hecho ya ocurrió en El Tapón 1991, sin sismo) hacen de esta zona la de mayor probabilidad de ocurrencia de falla. Por lo contrario, no es evidente que los eventos sísmicos causen problemas de licuación en los depósitos del valle de Coris pues el

evento de 1990 con aceleración registrada superior a 0.3 g no causó daños en la conducción.

e. Vulnerabilidad Estructural de la Conducción.

Los 5 km primeros de la conducción consisten en una tubería de hierro con uniones de campana y espigo que la hacen mucho más vulnerable a los movimientos que los otros tramos donde la tubería es de acero y soldada o es túnel como conducción. Otros tramos estructuralmente vulnerables a los desplazamientos son aquellos donde el movimiento está restringido por apoyos fijos como es el caso de cruces elevados sobre corrientes de agua.

4.4 Zonas de Mayor Vulnerabilidad

Teniendo en cuenta los criterios anteriores se ha zonificado la conducción en zonas por grados de vulnerabilidad siendo la mayor 3 y la menor cero donde prácticamente la conducción es segura. Estas zonas se ilustran en el mapa de la Figura 1 que cubre toda la conducción desde el embalse del Llano hasta la planta de Tres Ríos y se resumen a continuación:

4.4.1 Zonas Muy Vulnerables - Grado 3

a. Los primeros kilómetros entre el K1 y K4 constituyen la zona más vulnerable de la conducción por las siguientes razones:

- Por estar localizada sobre la población de Orosi un rompimiento podría causar avenidas y avalanchas de lodos que podrían causar pérdida de vidas humanas y bienes especialmente bajo el sitio de Los Vados (Q. Jucó) y El Tapón.

- El rompimiento de la tubería muy probablemente causaría la destrucción parcial del camino de acceso que es así mismo la banca de la tubería haciendo muy difícil su reconstrucción.
- Un deslizamiento en este tramo es de muy probable ocurrencia bajo la combinación de factores desfavorables como que ocurrió en el sitio de El Tapón en 1991. Ref. 1
- En este tramo la tubería estructuralmente es débil pues sus uniones no son soldadas sino de campana y espigo, y por lo tanto no soporta esfuerzos a tensión.

b. Sifón sobre el Río Navarro

Es este uno de los puntos más críticos de la conducción por su alta presión interna (52 kg/cm<sup>2</sup>), por tener soportes sometidos a erosión y crecientes del río, por estar muy cerca una falla activa, por ser el punto más bajo de la conducción donde una ruptura causaría el mayor derrame y por ser de difícil reparación. Se considera muy importante hacer unas obras de bajo costo que tendrán un efecto grande para reducir la vulnerabilidad de la conducción en este sitio.

- En el cruce del río entre dos anclajes la tubería está soportada por dos pilas que restringen el libre movimiento del tubo especialmente una de ellas, haciendo inoperante la junta de expansión que se encuentra cerca del estribo izquierdo.
- Por otra parte, el cruce del río está sujeto a un riesgo hidrológico de probable ocurrencia en la vida útil de la conducción cual es la socavación de la pila derecha (sur) por degradación progresiva del lecho del río.

#### 4.4.2 Zonas Vulnerables - Grado 2

Se pueden establecer varias zonas vulnerables a lo largo de la conducción a saber:

##### a. Ladera Norte del Río Navarro

- La tubería en este tramo está sometida a un alto esfuerzo estructural bajo una presión hidrostática de 500 metros.
- Se estima que aproximadamente en el K7+000 cruza una falla activa que en el evento de un corrimiento podría ocasionar la rotura de la tubería y en esta ladera ocurrirían pérdida de bienes y del entorno.
- Un daño en este sitio es de difícil reparación por no tener acceso adecuado.

##### b. Entrada del Túnel de La Carpintera

Existe una amplia zona de reptación, flujo lento de suelos en estado semilíquido, que comienza en el K23+000 y se prolonga por unos 500 m hasta cerca a la entrada del túnel. La condición de inestabilidad descrita anteriormente (ref. 2) se debe a la saturación de los suelos blandos superficiales puesto que la pendiente transversal es muy baja: 15° aproximadamente. El riesgo consiste en que la reptación continuada afecte los suelos más profundos, bajo 2 m, profundidad donde se encuentra la tubería. En este momento se pudo observar que el muro de gaviones de 2 m de alto y 160 m de largo muestra "barrigas" pronunciadas señal inequívoca de altas presiones de tierra. Aunque la rotura de la tubería en este sitio no sería catastrófica, si haría daños al entorno y es de ocurrencia más que probable pues el fenómeno está en proceso.

c. Salida del Túnel de la Carpintera

En el K24+500 aprox. la tubería cruza una zona muy localizada de unos 100 m que presentó inestabilidad en el pasado y que en febrero de 1994 se había solicitado (Ref.2) monitorear por medio de un indicador de talud que a la fecha no se ha colocado y la medición de niveles freáticos en piezómetros que tampoco se han instalado. El riesgo geotécnico hace la conducción vulnerable en este sitio porque:

- La tubería cruza la parte alta del deslizamiento y una rotura causaría la pérdida de bienes y más remotamente de vidas pues hay viviendas en la parte baja de la cuenca.
- La ocurrencia de un deslizamiento es probable pues sería la reactivación de un fenómeno que ya ocurrió.

d. Cruces Elevados de los Ríos Tiribí y Q. Molina

Estos cruces consisten en un viaducto semejante al del río Navarro con anclajes en ambas riveras, una junta de expansión y apoyos restrictivos al movimiento longitudinal. Además del riesgo estructural que esto implica, el principal riesgo es hidrológico pues en el río Tiribí la pila se encuentra en medio del río que presenta crecientes importantes que podrían afectar la pila arrastrando la tubería, como se ilustra en la Foto 4. En la Q. Molina la situación es semejante puesto que la pila recibe todo el impacto del flujo en una vuelta que está socavando la rivera Foto 5.

e. Cruce del Río Reventado

Existen diferencias de opinión entre los estudios de Fase II. Ref. 3 y 4, pues mientras Geomatrix clasifica esta zona como de muy alto

potencial de licuación, J. Durán, pag. VII-10 "No se puede concluir que haya una clara vulnerabilidad de la conducción ante posibles fenómenos de licuación... en el tramo K12 a K21 de los valles de El Guarco y Coris". Es la opinión del autor que la tubería sería vulnerable a licuación en el sitio del Reventado por efecto del peso del bloque de concreto que en caso de licuación se asentaría aplicando grandes esfuerzos de corte a la tubería liviana que no se asentaría. Sin embargo, concuerdo con el Ing. Durán en que hay que comprobar primeramente que las condiciones del subsuelo son las necesarias para que el sitio sea susceptible a licuación.

#### 4.4.3 Zona de Baja Vulnerabilidad - Grado 1

Se han detectado algunos sitios en la conducción que son vulnerables aunque con baja probabilidad de falla.

##### a. Cruce de las Fallas Agua Caliente y Coris

Entre el K7+000 y K9+000 la conducción cruza dos fallas activas determinadas en el campo Ref. 3 y que históricamente han sido foco de movimientos telúricos. Un corrimiento de cualquiera de las dos fallas podría imponer esfuerzos excesivos en la tubería de acero especialmente considerando que por su ángulo de cruce los esfuerzos serían de compresión. Sin embargo, la magnitud de los corrimientos sería muy pequeña (entre 10 y 20 cm) y se cree que el relleno actual y la tubería pueden soportarlo. Por otra parte, aún en el caso de rompimientos, no se considera catastrófico pues la zona es plana con buen acceso para reparaciones y el vertimiento sería pequeño y no causaría grandes pérdidas.

b. Licuación Colonia El Tejar y López

En el tramo donde la conducción cruza el valle de Coris, se identificaron (Ref. 3 pag. 65), dos zonas con alto potencial de licuación: López y Colonia El Tejar. Se estima que la probabilidad de falla por causa de este fenómeno es baja pues en el sismo de 1990 no hubo problemas visibles. No se visualizan asentamientos de la tubería enterrada pues el conjunto tubo-agua es más liviana que el medio circundante. Por otra parte, cualquier reparación es relativamente fácil.

c. Corrosión

Se han efectuado estudios y mediciones de resistividad en algunos tramos de la conducción para determinar la agresividad de los suelos donde la tubería de acero está enterrada. Por lo contrario, no hay datos sobre la acidez del suelo que es otro factor importante para determinar el riesgo de corrosión sobre la tubería. El Ing. E. Silva, basado en las investigaciones de K.G.C. Berkeley de fines de 1988, sugiere que se acoja la recomendación de instalar en tres sitios, K1+057, K21+600 y K26+620, centros de protección catódica.

Es la opinión del suscrito que la vulnerabilidad de la tubería por corrosión es baja y que los recursos económicos disponibles deben invertirse prioritariamente en zonas de alta vulnerabilidad. Sin embargo, el grupo de consultores no tiene idea ni aproximada del costo de una protección catódica como la recomendada. Por esta razón, sería interesante que AyA solicitara una propuesta económica a una firma especializada para luego tomar una decisión definitiva y fundamentada.

#### 4.4.4 Zonas No Vulnerables - Grado 0

Aunque no hay tal cosa como una obra invulnerable se considera que el resto de la conducción con excepción de las zonas descritas anteriormente, no es vulnerable. Especialmente seguro el tramo plano donde la tubería enterrada atraviesa el valle de Coris. También es muy seguro el túnel de la Carpintera excavado en roca sana a pesar de cruzar algunas fallas pues un corrimiento no causa consecuencias perjudiciales.

En relación con la frontera tubería - anclajes cuyo comportamiento bajo sismo podría presentar problemas de concentración de esfuerzos al corte por la diferencia de inercias, el consultor E. Silva, Ref. 5, es claro en descartar la necesidad de uniones flexibles. El suscrito acoge este concepto pues de otra manera sería necesario comprar un alto número de uniones flexibles para cada situación anclaje - tubería con la dificultad adicional de los inconvenientes de instalación pues había que suspender el servicio en cada caso.

#### 4.5 Priorización de las Obras

De la zonificación por vulnerabilidad de la conducción e introduciendo el criterio de Beneficio/Costo que no es cuantificable matemáticamente pero si cualitativamente en bajo, mediano y alto Beneficio en concepto del suscrito son prioritarias los siguientes grupos de obra:

##### 4.5.1 Bajo Costo y Mediano Beneficio

Se considera que con obras de muy bajo costo se puede reducir a un mínimo la vulnerabilidad de las zonas de entrada y salida del túnel La Carpintera y los sitios de cruce del río Tiribí, Q. Las Molinas. Las obras son más preventivas que remediales y muy sencillas y económicas.

#### 4.5.2 Mediano Costo y Mediano Beneficio

También con beneficios preventivos más que remediales son obras prioritarias las que reducen la vulnerabilidad de la conducción en forma apreciable como son:

##### a. Cruce del Río Navarro

Como se ha expresado por el suscrito. Ref. 2 y los consultores independientes Geomatrix y E. Silva. Ref. 3 y 5, no es conveniente que la tubería en los cruces de ríos este restringida por sus sistema de apoyo en las pilas entre anclajes primeramente por los apoyos fijos no permiten el funcionamiento de la unión flexible y segundo porque en caso de movimiento de una pila, por sismo o por cualquier razón arrastraría a la tubería rompiéndola; mientras que aún en caso de desaparición de las pilas la tubería tiene mejor oportunidad de sostenerse suelta como viga autorportante.

Existe en este cruce un problema adicional pues el río Navarro golpea directamente la margen derecha donde está cimentada peligrosamente cerca una pila de soporte. Además, el cauce tiene en este sitio una tendencia a degradarse o profundizarse. Aunque el riesgo no es inminente, es conveniente tener el sitio en observación y en el futuro construir la presa "india" para recobrar el cauce.

##### b. Cruce de la Falla Navarro

De acuerdo con Geomatrix, Ref. 3, la conducción cruza tres fallas activas, Navarro, Agua Caliente y Coris La que más peligro de corrimiento presenta para la conducción es la Navarro, pues se calcula que tendría el mayor desplazamiento y está situada cerca al K7 donde una ruptura causaría mucho daño. Por esta razón se

considera conveniente invertir en medidas para reducir vulnerabilidad de la tubería aquí.

#### 4.5.3 Alto Costo - Alto Beneficio

La zona de más alta vulnerabilidad requiere de la alta inversión para reducir dentro de lo prácticamente posible el riesgo de rotura de la conducción en el tramo del K1+000 al K3+950. Los sitios más críticos han sido identificados claramente por los ingenieros de AyA, por el suscrito en el informe de Fase I y por los tres consultores especialistas en los estudios de Fase II y son Los Vados, El Queque y El Tapón. Por el alto costo de las obras se detallan a continuación las razones que soportan esta priorización y justifican las recomendaciones correspondientes.

- a. La razón de orden general es que el riesgo geotécnico en este tramo es muy alto pues la estabilidad de los taludes es precaria y los cálculos muestran que puede llegar al punto de falla bajo la combinación de saturación y un evento sísmico con aceleración horizontal superior a 0.2 g. Son especialmente críticos aquellos taludes altos con pendientes superiores a 35° como son los sitios de Los Vados (Q. Jucó) y El Tapón. En este último sitio los cálculos teóricos se cumplieron con el deslizamiento ocurrido en 1991.
- b. Se repite que una falla de la tubería en el tramo K1 a K4 sería la de mayores perjuicios a bienes y que podría poner en peligro vidas humanas. También, la falla destruiría parcialmente el camino de acceso dificultando la reparación.
- c. Sitio El Tapón K3+ 840. En el sitio de El Tapón se resolvió el deslizamiento en 1991 con la construcción de una combinación de muros de cantiliver anclado el más alto, soportado en su

cimentación por otro muro de concreto ciclopeo y en la parte baja dos muros de gaviones como se ilustra en la Fig. 3 y las Fotos 1 y 2.

Las obras mencionadas se han comportado satisfactoriamente por cinco años y mantienen estable el estrato A de roca meteorizada donde se halla enterrada la tubería. Sin embargo, en su informe (Ref. 2) el Ing. Jorge Durán cuestiona la seguridad de la tubería pues el plano de falla podría subyacer al estrato A y el Ing. Durán recomienda modificar el alineamiento hacia estratos más profundos de roca sana. Sin desconocer la validez e indudable seguridad de esta recomendación, el suscrito considerando el muy alto costo de esta solución y su dificultad práctica por suspensión del servicio, opina (lo mismo que en 1991) que es posible mantener la estabilidad de la ladera por medio de muros anclados, subdrenaje, drenaje superficial, etc. como se ha venido haciendo.

Sin embargo, el inclinómetro No. 1 instalado sobre el camino muestra una leve tendencia de desplazamiento muy pequeño 0.5 mm a una profundidad de 22 metros que parece corresponder al contacto del estrato A con el B. Este indicio todavía incierto es necesario comprobarlo con mediciones más cuidadosas y seguimiento continuo graficando la información. Los datos del inclinómetro No. 4 instalado en la pata del muro, son demasiado erráticos y no se pueden interpretar.

Bajo condiciones de saturación y aceleración sísmica mayor de 0.3 g que según Geomatrix (Ref. 3) es de probable ocurrencia este talud de 120 m de altura y 39° de pendiente sufriría deformaciones (falla) catastróficas para la tubería. Por esta razón, es imperativo mantener el talud bien drenado con nivel freático por debajo de 20 m medidos desde la superficie (no

desde el fondo del piezómetro) y se debe mejorar la resistencia al deslizamiento entre los estratos A y B en la zona cercana a la conducción; esto se puede lograr por medio de anclajes como se recomienda más adelante.

El Tapón no debe identificarse solamente como el sitio donde se construyó el muro después del deslizamiento en 1991, la ladera anterior unos 200 m en el K3+600 aproximadamente tiene similares características de altura y pendiente. También, bajo una combinación de factores desfavorables de fuertes lluvias y en sismo de fuerte de probable ocurrencia y con epicentro cercano, este talud de acuerdo con cálculos teóricos, fallaría con daño potencial a la conducción. Por lo tanto, es imperativo instalar un buen sistema de subdrenaje por medio de filtros horizontales para mantener el nivel freático por debajo de los 20 metros y controlado por medio de piezómetros. No se considera necesario en este momento instalar indicadores de talud, pues no hay evidencia de movimiento.

- d. Los Vados K1+320. Este sitio casi tan crítico como El Tapón tiene una altura de 80 m y una pendiente de  $38^\circ$  que teóricamente bajo un sismo de una aceleración superior a  $3.3 \text{ m/seg}^2$  y aún con buen drenaje presentaría deformaciones que la conducción no podría soportar. Como agravante este sitio está limitado por la Q. Juco que recoge los vertimientos del embalse El Llano cuando se limpia. La pata del talud está sometida a la acción continua de flujo erosivo. Estas condiciones tan desfavorables produjeron desplazamientos hace unos tres años que pusieron en peligro la conducción. Como medida remedial se instaló una fila de pequeños pilotes de unos 12 metros de profundidad anclados al estrato A. También se instaló un inclinómetro No. 2 y zanjas de drenaje superficial.

Las lecturas graficadas del inclinómetro No. 2 muestran una clara tendencia de movimiento en ambos ejes; en el sentido de la pendiente se midieron 5 mm entre enero de 1994 y agosto de 1995; en el eje transversal la mitad del movimiento en el mismo tiempo. Este movimiento tuvo su expresión superficial en una grieta justo detrás de la fila de pilóticos que por estar anclados con tensores a la roca no se movieron.

Los análisis de estabilidad efectuados por el Ing. Durán, Ref.4 muestran que bajo condiciones desfavorables de saturación o evento sísmico o la combinación de ambos se debe esperar un movimiento general de este talud y es evidente que la defensa de pilotes en el área de A la tubería es inadecuada para garantizar la seguridad de la conducción. Por lo tanto, se necesita acometer obras mayores para reducir el riesgo geotécnico que será de dos tipos: subdrenaje por medio de filtros horizontales para mantener el nivel freático bajo en toda el área y un control de erosión efectivo en la pata encauzando la Q. Jucó; también es importante el balance de las masas activas en la parte alta y el bloque resistente en la pata.

- e. El Queque K2+800. Este es un deslizamiento activo bien diferente a los dos anteriores pero que también presenta riesgo para la seguridad de la conducción. Es un talud con una pendiente moderada de  $25^\circ$  y una altura de 120 m. Los movimientos fueron causados por la colocación inadecuada de botaderos durante construcción. A mitad de la pendiente, un promontorio firme de roca divide el talud en dos vertientes de comportamiento diferente: la cañada más oriental se comporta como una sola masa mientras que la occidental presenta características de reptación escalonada.

En la actualidad el terreno se halla muy bien arborizado y se ha construido un sistema de zanjas revestidas para el manejo de las aguas superficiales. Además, se construyó un muro de gaviones de unos 6 m de altura en la pata del movimiento oriental y otro en la parte alta de la ladera bastante ineficaz, pues se encuentra cimentado sobre la masa inestable y se movería en conjunto con ella.

El Ing. Durán propone hacer un movimiento de tierras de magnitud apreciable para balancear el bloque de empuje con el bloque resistente, o sea excavar un volumen importante de tierra en la parte superior y colocarla en la pata previa la construcción de un muro de gaviones de mayor altura. Después de la visita al sitio, el suscrito opina que siendo la arborización tan buena, no se debe disturbar el terreno con excavaciones extensas y que con otras medidas más simples es posible mantener el talud estable y bajo observación.

El inclinómetro No. 3 instalado sobre el camino registra variaciones a una profundidad de 16.5 m pero muy erráticas de las cuales no se puede deducir una tendencia clara al movimiento. Tampoco se observan grietas en el camino ni evidencias de movimiento que indiquen un peligro eminente para la conducción. Sin embargo, los análisis de estabilidad teóricos indican que bajo la combinación de factores desfavorables como lluvias fuertes y un evento sísmico con epicentro cercano esté talud presentaría deformaciones intolerables para la tubería. Por lo tanto, es conveniente mejorar la estabilidad de la ladera con obras que se recomiendan más adelante.

## V. RECOMENDACIONES

Con base en los informes de los consultores de los estudios de Fase II, en la visita de campo, en la revisión de información actualizada, en las valiosas observaciones de los funcionarios de Ay A, y en los análisis y conclusiones presentados en el capítulo anterior, el autor de este informe se permite hacer las recomendaciones siguientes para reducir la vulnerabilidad de la conducción del acueducto de Orosi.

### 5.1 Estabilidad de Taludes

#### 5.1.1 El Tapón K3+850

Considerando que este sitio continua siendo el mayor riesgo geotécnico por su altura de 130 m y pendiente de 39° y teniendo en cuenta que ya se ha hecho una inversión considerable en obras de contención en la zona específica de la tubería, se recomienda reforzar estas obras, que han tenido un buen comportamiento en lugar de considerar un cambio de alineamiento. Además se debe asegurar un buen drenaje para mantener la posición del nivel freático tan bajo como sea posible. Las obras inmediatas que se ilustran en las figuras 2, 3 y 4 serían:

- Instalar una red de medición piezométrica con tubería ranurada de PVC,  $\varnothing$  1 1/2" y 20 m de profundidad en los sitios señalados en la Fig. 2 en cuatro filas cada 25 m verticales. La parte ranurada, 10 m más profundos, será protegida por geotextil y el resto sellado con arcilla.
- Instalar dos inclinómetros adicionales sobre el eje AA, uno en la pata del muro de gravedad cota 1460 aprox y otro en la cota 1420 aprox. de 25 m de profundidad.

- Revisar y reparar si es del caso las cunetas superficiales de drenaje y colocar un pluviómetro en un sitio de fácil acceso para tomar las lecturas.
- Una vez que el sistema de piezómetros esté instalado y las lecturas correlacionadas con lluvias se recomienda instalar cuatro filas de filtros horizontales (subdrenajes) sobre las cotas 1390 - 1415 - 1440 - 1465 o sea cada 25 m verticales. Cada fila tendrá filtros espaciados tentativamente cada 30 m, espacio que se podrá subdividir si se encuentra gran cantidad de agua o la respuesta de los piezómetros no es adecuada.

Los filtros tendrán una leve inclinación de 5° sobre la horizontal, una longitud mínima de 30 m y un diámetro perforado de 3" y revestidos con PVC de 1 1/2" ranurado y protegido por geotextil en toda su longitud.

- En menor escala, las recomendaciones anteriores se deberán aplicar en forma preventiva al talud, muy similar, inmediatamente anterior al sitio de El Tapón o sea unos 200 antes. Se puede comenzar con las filas de subdrenes de las cotas 1440 y 1465.
- La red de control del nivel freático será efectiva pero es necesario medir semanalmente los piezómetros y el pluviometro y gráficar los resultados en forma comprensible. Se recomienda que el grupo encargado de este y los otros controles de movimiento (inclinómetros) prepare informes mensuales sobre este y otros sitios críticos. El suscrito tendrá gran interés en revisarlos.
- Con el fin de reducir el riesgo (Ref.4) de desarrollo de un plano de falla profundo entre los estratos A y C o sea sobre la roca

sana, lo que afectaría la tubería de conducción, se recomienda aumentar la presión normal sobre este plano en unas 2500 ton por medio de anclajes; se estima que el factor de seguridad, del talud subiría a  $FS=13$  en la zona de la tubería minimizando la vulnerabilidad bajo un sismo fuerte. Los anclajes serán perforados desde el muro de concreto cíclopeo que ofrece una buena superficie para aplicar la presión de los gatos y el bulbo de anclaje se colocaría por lo menos 3 metros dentro de la roca sana. Se estima en 45 el número de anclajes con una tensión de trabajo de 60 ton cada uno.

Aunque los detalles de instalación se deberán adaptar a la geometría irregular del muro y al sistema del contratista que se seleccione; en la Figura 4 se muestra un anclaje típico de esta capacidad como es usualmente instalado. Las características de un anclaje serían:

- Inclinación:  $5^\circ$  por debajo de la horizontal. Aunque la longitud a la roca sana es mayor que si se perforan normales a los planos, la componente y se resta a la fuerza deslizante.
- Capacidad: Tensión Ult. 100 ton. Tensión trabajo 12 T por torón, 60 T/anclaje
- Distribución: 9 por bahía a 2.0 m uno de otro en sentido horizontal aproximadamente.
- Diámetro: 4" para alojar 5 cables dentro de una camisa de PVC de 3".
- Cables: 5 de 1/2" alta resistencia 270.000 lb/in<sup>2</sup>  $Q_{ult} = 20 T$ ,  $Q_{ad} = 12T$  Total = 60 ton/anclaje.

- Bulbo: Se recomienda adherencia última de 8 kg/cm<sup>2</sup> (120 psi) para arenisca friable. Tentativamente, el bulbo tendría la longitud de 5 m (incluye FS=2) pero es necesario ensayar los dos primeros anclajes en sitios diferentes al doble de la capacidad de trabajo, 100 T mínimo. para ajustar esta longitud si es necesario.
- Resinas o cementos epóxicos expansivos para anclar el bulbo. Tensionar con gatos después de 7 días y terminar de inyectar el anclaje, según procedimiento convenido con el contratista.

#### 5.1.2 Los Vados K1+320

El segundo sitio de estabilidad geotécnica más crítica es este de Los Vados con una pendiente de 38° y 80 m de altura. Los análisis teóricos se corroboran por los movimientos detectados en 1992 y recientemente por una grieta a nivel de carretera; también el inclinómetro No. 2 muestra una clara tendencia de movimiento muy lento en este momento. Para reducir el riesgo de falla bajo la combinación de factores como sismo, lluvias fuertes y caudales grandes en la Quebrada Juco se recomiendan las siguientes obras:

- Se debe encauzar la Q. Jucó por medio de un tubo de gran diámetro ARMCO o similar, metálico que permita la limpieza interior (2.50 m). En mi opinión es preferible un cajón de concreto de 2.0 x 2.0 m en forma de "U" con tapas prefabricadas también de concreto. En esta forma se evitará la erosión en la pata del talud en el tramo más crítico y la sección tendrá una buena capacidad hidráulica y podrá ser limpiada cuando se necesite.

- Se recomienda balancear las masas activas y pasivas del talud cortando selectivamente los montones de tierra apilados al lado de la vía y colocandolos en la pata como bloque resistente. En esta forma se reducirá la pendiente unos grados.
- Para resistir el bloque pasivo "la pata" y considerando que es difícil hacer excavaciones extensas en la parte alta, se recomienda colocar un contrafuerte de roca o piedras sobre el cajón de concreto en la forma ilustrada en las Fig. 5 y 6.
- Para conservar el talud seco se debe construir un sistema de drenaje superficial de canales revestidos que entreguen a la entrada del cajón en la Q. Jucó. Además esta conservación superficial se debe complementar con arborización semejante al sitio de El Tapón.
- Para mantener el nivel freático por debajo de un posible plano de falla se recomienda instalar un sistema de filtros o drenes horizontales, controlando su eficiencia por medio de piezómetros de tubo abierto. Este sistema de subdrenaje se ilustra en las Fig. 5 y 6.
- Se recomienda instalar dos inclinómetros adicionales, sobre las cotas 1495 y 1540, este último unos 10 m por debajo de la carretera. Es muy importante efectuar lecturas bimensuales de los indicadores y analizar los datos en forma gráfica. En caso de que la tendencia al movimiento continúe, será aplicable la siguiente recomendación.
- Si con las medidas anteriores, no se logra una total estabilización de esta ladera, será necesario proteger la zona local donde se encuentra la tubería construyendo un muro de concreto de unos 8 m de altura, usando la fila de pilóticos como soporte temporal.

El muro sería anclado a los estratos de roca sana con tensores de 60 ton semejantes a los recomendados para El Tapón.

### 5.1.3 Vuelta de El Queque K2+800

El tercer sitio que es un riesgo geotécnico en esta zona de alta vulnerabilidad de la conducción está localizado en una vuelta pronunciada del camino donde se aloja la conducción y consiste en dos deslizamientos separados por un pequeño morro a la cota 1460 o sea unos 50 metros abajo del camino.

El deslizamiento derecho en el sentido del flujo es una sola masa que obedece a la mecánica clásica de un bloque de suelos deslizando sobre la roca meteorizada y por lo tanto se puede tratar con las medidas tradicionales de balance de masas y drenaje tanto superficial como subsolar.

El deslizamiento izquierdo, por el contrario, es más del tipo de flujo o reptación de masas independientes y a veces estos movimientos son difíciles de tratar. Se presentan escalones y grietas numerosas con tendencia a retrogresión que puede llegar a afectar el camino donde está la tubería. El remedio más efectivo es el drenaje superficial y profundo.

El suscrito concuerda con la mayoría de las recomendaciones dadas por el Ing. Jorge Durán, Ref. 4 en su informe de Fase II excepto que no es fácil y posiblemente contraproducente hacer una excavación extensa de el botadero remanente que ya está bien arborizado, en el deslizamiento derecho. Por lo tanto, se hacen las siguientes recomendaciones principales:

- Se debe instalar una red de piezómetros de 25 m desde la cota 1505 aproximadamente en el borde exterior del camino hasta la

1430 distribuidos cada 50 metros para determinar la posición del nivel freático y su variación con las lluvias y el efecto de los subdrenes.

- Se recomienda perforar e instalar un sistema de filtros horizontales desde las cotas 1400 y 1490 en el deslizamiento derecho y en cotas similares en la parte alta del izquierdo, como se ilustra en la Figura 7. Cada fila tendrá filtros de 30 m de largo, espaciados cada 30 m inicialmente y este espacio se podrá subdividir si se encuentra mucha agua o la respuesta de los piezómetros no es adecuada.
- Se recomienda hacer un programa extenso de cunetas revestidas con mantenimiento continuo para evitar la infiltración de las aguas superficiales dentro de la masa de suelos. Esta medida es especialmente necesaria en el flujo de la izquierda donde debe ser complementada con arborización de especies hidrófilas como el eucalipto. Es necesario adquirir el predio.
- Los muros de gaviones existentes en la parte alta no tienen futuro pues están cimentados sobre la masa móvil. El muro en la pata del deslizamiento derecho parece que está soportando la presión de tierra y se debe reforzarlo con gaviones o enrocado como se muestra en la Fig. 8. También es conveniente construir otro muro de gaviones sobre el deslizamiento izquierdo donde hay un quiebre notable de pendiente en la cota 1460 aproximadamente como se muestra en la Fig. 7.
- La masa izquierda que fluye bajo la cota 1460 debe drenarse por medio de zanjas filtrantes en disposición de espina de pescado de acuerdo con los detalles de la Fig. 11.

- El control del movimiento por indicadores se considera inoperante por la velocidad apreciable de la reptación que es más bien superficial. Se prefiere en este caso que se instalen controles topográficos y se presenten los datos en forma gráfica.

## 5.2 Sifón del Río Navarro

Como se analizó anteriormente, este es un sitio crítico donde con modificaciones pequeñas en los apoyos se puede reducir en forma notable el riesgo de ruptura de la tubería.

### 5.2.1 Soportes

Se recomienda que todos los soportes entre los dos anclajes en ambas márgenes del río, sean móviles y permitan el movimiento longitudinal que será absorbido por la unión flexible que se instaló cerca al anclaje de la margen izquierda.

Por otra parte, se considera conveniente también que el soporte permita cierto desplazamiento transversal pues en caso de corrimiento, colapso o vibración de una pila no debe estar la tubería amarrada a la pila y soportar esfuerzos que podrían romperla.

Por lo tanto, se recomienda cambiar todos los soportes actuales por el tipo rodillo de acuerdo con la Fig. 9 que es la misma presentada por el consultor Ing. E. Silva en su informe de Fase II.

### 5.2.2 Válvulas y Uniones Flexibles

Se consideró la idea de colocar sendas válvulas de cierre automático en ambos brazos del sifón para controlar el derrame en caso de rotura en el sifón. Sin embargo, como lo analizó el Dr. Silva. El derrame lo puede tomar el río sin mayores problemas y por otra parte la

instalación de válvulas implican necesariamente una suspensión de la conducción por un período de dos o tres semanas que no se justifica.

En igual forma, aunque no se menosprecia la utilidad de una unión flexible en la frontera de un bloque rígido con la tubería, como entrada del túnel, estación de Coris, bloque subfluvial del Reventado, no se justifica el corte del servicio del sistema Orosi para colocar estas uniones cuya necesidad no es prioritaria.

### 5.3 Cruce de Fallas

En razón de que los estudios de Fase II han demostrado que la conducción cruza tres fallas activas que pueden presentar corrimientos además de ser fuentes probables de eventos sísmicos, se recomienda mitigar la vulnerabilidad de la tubería por desplazamientos de falla por medio de las siguientes medidas:

#### 5.3.1 Falla Navarro

Se debe permitir cierta libertad a la tubería para moverse sin que un desplazamiento de una falla cause deformación no tolerable. Esto se puede lograr dejando la tubería libre centro de un cajón de concreto cuando la falla es un plano perfectamente definido. En el caso de la falla de Navarro donde la falla tiene dos brazos y comprende una zona de más de 100 o 200 m, se recomienda:

- ⊖ Definir en campo con la ayuda del Dr. W. Montero la zona de falla en la ladera izquierda del río donde se estima que la conducción la cruce
- ⊖ Construir una carretera de acceso desde la vía principal con pendiente de 10% aproximadamente hacia el oriente que podría servir para evacuar un derrame en caso de ruptura de la

tubería. Este camino sería la vía para construcción y acarreo de materiales.

- ⊖ Excavar una zanja en "V" hasta descubrir la tubería y luego rellenarla con grava de gradación uniforme, redondeada y tamaño máximo de 2 1/2. No considero prudente levantar la tubería para colocar relleno debajo, ver Fig. 10.

### 5.3.2 Fallas de Aguas Calientes y Coris

Aunque sería conveniente repetir los procedimientos anteriores en las fallas de Agua Caliente y Coris, no se considera necesario en este momento hacer esta inversión por la magnitud pequeña estimada del corrimiento.

### 5.4 Licuefacción

La información disponible no es suficiente para recomendar medidas de mitigación en los sitios identificados por Geomatrix como de alto potencial de licuefacción. En todo caso en opinión del suscrito, el cruce del río Reventado es el único punto donde el fenómeno podría romper la tubería por efecto del peso del bloque de concreto. Por lo tanto, se recomienda:

- Hacer dos sondeos de 20 m en cada extremo del cruce con muestreo muy cuidadoso cada 1.0 m haciendo ensayos de penetración estándar y conservando la muestra representativa para laboratorio.
- En el laboratorio se harán ensayos de granulometría determinando la fracción pasa el tamiz No. 200 en todas las muestras y sobre los finos por hidrómetro se determinarán los coloides por lo menos en dos muestras representativas.

- Antes de abandonar los sondeos se medirá el nivel freático durante tres días consecutivos hasta tener seguridad de su posición.
- Se debe determinar la profundidad de cimentación del bloque de concreto y relacionarla al perfil de subsuelo.

## 5.5 Portales Túnel La Carpintera

No hay evidencia de que ocurran filtraciones en el Túnel de la Carpintera pero es un hecho que en ambos portales se encuentran zonas de gran humedad; posiblemente se deba a acuíferos naturales que se recargan en la parte alta del cerro de la Carpintera y brotan en forma de manantiales en la parte del cerro donde se encuentra la tubería. Es conveniente hacer algunas obras de bajo costo para prevenir el desarrollo de problemas mayores. Fotos 3 y 3A.

### 5.5.1 Entrada del Túnel K23+000

- a. Se recomienda construir un sistema de subdrenaje por medio de zanjas rellenas con grava, protegidas con geotextil, como se muestra en la Fig. 11.
- b. Las zanjas serán casi perpendiculares al muro de gaviones existente cuya cresta servirá como colector de las aguas drenadas. La profundidad será de 2.0 - 2.5 m aproximada. El espaciamiento entre zanjas será de unos 2.0 m de tal manera que se estima serán unas 8 a 10 zanjas en la zona de reptación.
- c. Como complemento a la red de subdrenaje, se recomienda arborizar los espacios entre zanjas con especies hidrófilas como eucalipto o pinos.

### 5.5.2 Salida de Túnel K24+500

- a. Ya se han construido cunetas en la parte plana alta que recogen una buena cantidad de agua superficial. Se debe hacer mantenimiento periódico de estos drenajes.
- b. Se observa que las palmas que se han sembrado en la pendiente no progresan. Es necesario arborizar con especies como eucaliptos o pinos.
- c. Se insiste en la conveniencia de instalar un indicador de talud de 25 m de profundidad en la parte alta cerca a la pendiente para tener aviso oportuno en caso de reactivación del movimiento y para medir el nivel freático periódicamente.
- d. En caso de encontrarse alto el nivel freático se recomienda instalar tres filtros horizontales a mitad de talud de unos 30 metros de longitud.

### 5.6 Cruces del Río Tiribó y Q. Los Molinos

Son cruces de pequeños cauces de agua semejantes estructuralmente al cruce del río Navarro, como se ilustra en las Fotos 4 y 5.

- 5.6.1 Es conveniente aplicar la misma recomendación y cambiar el sistema de soportes por el de rodillos para que la junta de expansión pueda operar.
- 5.6.2 En ambos cruces se observa que una de las pilas puede ser socavada y golpeada en caso de crecientes. En el río Tiribí la pila se encuentra en medio del cauce y se debe construir una defensa de gaviones. En

la Q. Molina, hay una pila que recibe el impacto del flujo y está siendo socavada; también se debe proteger con un muro de gaviones.

#### 5.7 Protección Catódica

Existe una recomendación de un experto, Ing. Berkeley de instalar tres centros de protección en distintos lugares de la tubería.

Sin desconocer la ventaja indudable de proteger la tubería contra la corrosión, el suscrito no puede en este momento recomendar una obra no prioritaria cuyo costo se desconoce.

Por lo tanto, se recomienda conseguir una propuesta económica de una firma especializada para poder tomar una decisión.

#### 5.8 Recomendaciones Generales

Aunque los temas siguientes están fuera del objeto de este informe y con el mejor ánimo de colaborar con una entidad como AyA y sus funcionarios, por la cual el suscrito tienen gran estimación y respeto, se hacen a continuación algunas recomendaciones de orden general, soportadas por 35 años de trasegar con este tipo de problemas que puedan afectar la infraestructura de una ciudad o un país.

##### 5.8.1 Estudio de Alternativas

Las obras de mitigación recomendadas en este informe reducirán la vulnerabilidad del sistema Orosi reconocida por todos los consultores que han estudiado sus especiales características y los riesgos latentes que amenazan la conducción. Es mi opinión que las obras deben construirse a la mayor brevedad, es posible hacerlas todas en un tiempo de un año. Una vez efectuadas todas las obras, la conducción de Orosi aumentará su seguridad hasta donde es posible en una país

de alto riesgo sísmico. Sin embargo, bajo terremotos con fuente cercana, lo cual entra dentro de lo probable, el sistema Orosi es aún vulnerable.

Sin embargo, reducir la vulnerabilidad del sistema no significa aumentar su confiabilidad al punto que la ciudad la requiere. Considero que la ciudad de San José no puede prescindir del 50% del suministro de agua potable. Por lo tanto es necesario contar con un sistema alternativo de suplencia así sea parcial o transitoria en caso de un corte del acueducto de Orosi. Este corte no ocurrirá necesariamente por una falla sino por razones de mantenimiento normal, instalación de válvulas o uniones flexibles o cualquier otra razón.

Preferiblemente el sistema alternativo debería ser al mismo tiempo una expansión del sistema de agua potable acorde con el crecimiento de la ciudad. Entiendo, que hay planes para desarrollar nuevas fuentes de acuíferos subterráneos y con respecto a los estudios que se han efectuado, se cuestiona el que otras ciudades grandes como México y Los Angeles estén tratando de reemplazar sus pozos de bombeo por fuentes superficiales.

Respetuosamente sugiero que se hagan estudios de prefactibilidad para identificar proyectos de nuevas fuentes de suministro y sobre la misma cuenca alta del río Orosi - Reventazón plantear líneas de conducción alternativas y embalses de almacenamiento de agua cruda que puedan atender el suministro un tiempo de por lo menos tres meses.

#### 5.8.2 Compra de Equipos de Perforación

Las recomendaciones contenidas en este informe incluyen la perforación de una longitud muy grande de drenes horizontales,

piezómetros, inclinómetros y sondeos exploratorios. Posiblemente, la longitud total es mayor de 2000 metros. Los precios internacionales de perforación están alrededor de US\$100/ml de manera que el costo total de perforación será de unos US\$200.000. Creo que con esta suma se pueden adquirir dos taladros adecuados con todos sus accesorios y estos equipos serán de gran utilidad para AyA en el futuro.

Quiero hacer énfasis en que operar con eficiencia estos equipos no es una tarea fácil y requiere personal capacitado y agilidad suficiente para la compra de suministros y repuestos.

### 5.8.3 Organización del Grupo Encargado

Buena parte de las recomendaciones de este informe se refieren a la necesidad de monitoreo del nivel freático por medio de los piezómetros y movimientos anormales por medio de inclinómetros además de pluviómetros, sismógrafos y observación continua.

Estos sistemas de prevención y alarmas se harán en lecturas periódicas (a criterio del ingeniero a cargo) no mayores de una vez por mes en inclinómetros, bimensual en piezómetros, semanal por pluviómetros (diario en época lluviosa) y cuando ocurran movimientos sísmicos en los aparatos que se instalen. Estas mediciones requieren de un grupo de dos personas permanentemente en el campo y un sistema de nomenclatura que permita identificar fácilmente la localización del instrumentos sin recurrir a un mapa.

No es suficiente con un buen sistema de lecturas, pues se requiere su procesamiento continuo y su presentación en forma gráfica que permita una fácil revisión y análisis. Por ejemplo, en el sitio de El Tapón se pueden preparar gráficos que incluyan y relacionen lluvia - nivel freático - inclinómetro a través del tiempo, 24 o 36 meses. El

autor se ofrece para revisar el formato y analizar los primeros datos de los tres sitios geotécnicamente críticos.

*Gerardo Lafina*  
Nov. 1995