

El Túnel de Yacambú
Informe para Miembros de ACADING
(Borrador elaborado por J. Grases, 7-12-14)

Buena parte de la información contenida en este resumen está esencialmente sustentada gracias a la generosidad del doctor Diego Ferrer F. (1926-2013), quién nos facilitó parte de su Memoria Personal escrita sobre las primerísimas etapas de este proyecto (Ferrer, 2011). Las secciones subsiguientes se sustentan en los documentos que se citan y, muy especialmente, en las enriquecedoras entrevistas celebradas con el Ingeniero Rafael Guevara (Guevara, 2011), autor de múltiples contribuciones que se dan en las referencias.

1.- Introducción

Desde inicios de los años 60, los acuíferos existentes en el fértil valle del Quibor no bastaban para las extensas áreas bajo regadío. Surgió así la idea de emplear los recursos del río Yacambú que drenaban hacia el Acarigua, con la finalidad de ser utilizados mediante un trasvase con fines de riego y suministro de agua a la creciente capital de estado Lara y poblaciones aledañas. En partes de la autobiografía que preparaba el Ingeniero Diego Ferrer, dejó constancia del origen de este ambicioso proyecto dado que el ancho de la falla transcurrente de Boconó alcanzaba en esa zona algo más de 1000 metros (Guevara, 2011).

En esa época existía la *Fundación para el Desarrollo de los Estados Centro Occidentales* (FUDECO), organismo planificador presidido por el Ingeniero Froilán Álvarez Yepes. Este experimentado profesional entró en conversaciones con el Ingeniero Carpóforo Olivares de la empresa OTEHA para que estudiara la posibilidad de trasvasar las aguas del río Yacambú hacia la cuenca de Quibor. Con ese fin, además de construir un embalse en el flanco sur-este de la cordillera, en ese momento se consideraron dos alternativas: bombear para sobrepasar una cordillera que alcanzaba los 1.200 m sobre el nivel del río Yacambú o cruzarla con un túnel de algo más de 20 km lo cual implicaba atravesar la falla geológica activa de Boconó (Ferrer, 2011).

Además del Ingeniero Olivares, OTEHA contaba con los Ingenieros Manuel Isava y Edmundo Ruf. Vista la magnitud del problema esta empresa se asoció con GIMSA de los Ingenieros Diego Ferrer F. y Ernesto Alcaíno. Colaboraban en esta segunda empresa los Geólogos Sergio Bajetti y Roque García. En las visitas de campo pudieron constatar el espectáculo impresionante del cañón por donde discurría el río Yacambú: con unos 200 metros de altura aproximadamente, las paredes del mismo eran casi verticales. Con base a las visitas de campo y la información suministrada por FUDECO, se elaboró una oferta de trabajo, que consistió en la ejecución de un estudio preliminar, estudios de campo, evaluación geológica y lo necesario para establecer la factibilidad del proyecto.

Para evaluar distintas alternativas se decidió contratar los servicios de la empresa Woodward, Lungreen & Associates, quienes designaron a los geólogos: William T. Black, especialista en construcción de túneles y Lloyd S. Cluff especialista en ingeniería sísmica. Este último ya había trabajado para GIMSA, cuando se estudiaron los problemas geológicos de la presa Dos Cerritos en las cercanías de la población de El Tocuyo, estado Lara.

La alternativa de construir un túnel que cruzara la falla de Boconó era un reto para la ingeniería venezolana sobre la cual los geólogos Black y Cluff, luego de recorrer el área junto con los geólogos venezolanos y analizar la información disponible, prepararon dos informes:

- (i) En el primero se hizo énfasis en la importancia de que un contratista experimentado realizase la construcción. Los contratos debían ser hechos en tal forma que permitiesen cambios durante el periodo de construcción. Se indicaba también que dadas las características de las rocas, debía recurrirse a la flexibilidad de los métodos convencionales debido a la ausencia de equipos para excavar túneles en América Latina.

Se consideraba en el informe, que lo métodos convencionales con: perforaciones, voladuras y retiro de escombros con apuntalamiento, sería lo más económico. Se indicaba también en el informe que debía considerarse el uso de revestimiento prefabricado en algunas zonas y que era posible que se consiguiesen zonas de sobre excavación. También se advertía que, en caso de que ocurriese un movimiento de la falla, el túnel sería dañado y no cumpliría con la función para el cual estaba diseñado; en esa eventualidad el túnel debía ser restablecido por métodos mineros (Black, 1972).

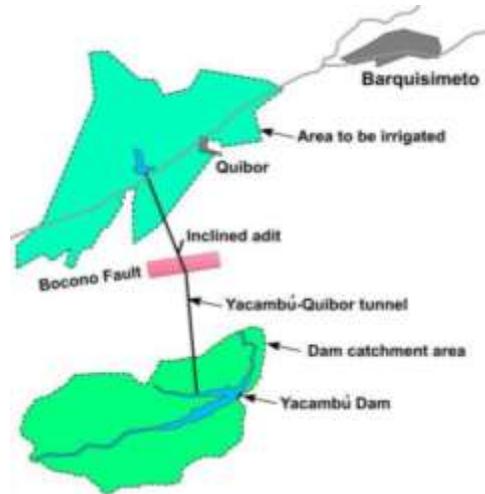


Figura 1.- Ubicación del embalse de Yacambú al sur del valle del Quibor y Cruce del túnel de trasvase con la falla de Boconó (Fuente: Hoek and Guevara, 2008).

(2) En el informe presentado por el geólogo Lloyd S. Cluff se hicieron las siguientes observaciones: debido a que la falla de Boconó era reconocida como la falla más activa de Venezuela y cruzaba el área del túnel, la ruptura del mismo durante su vida útil era una

posibilidad no remota a considerar. Indicaba también que el ancho de la zona donde podía ocurrir la rotura -desplazamiento permanente entre los planos de la falla-, se encontraba entre los 200 y 300 metros aproximadamente. Se apuntó allí que el mayor desplazamiento probable de la falla en un periodo de retorno de unos cien años se estimaba en el orden de los 3 m en el sentido lateral, acompañado de un movimiento de un metro de desplazamiento vertical (Cluff, 1972).

2.- Alternativas

Con toda la información obtenida y con los resultados del estudio hidrológico realizado, en diciembre de 1972 se presentó a FUDECO un informe con los resultados del estudio preliminar, en el cual se proponía la construcción de una represa en arco en el sitio de presa Yacambú y planteaban tres posibles soluciones para el trasvase de las aguas. Un esquema de estas soluciones se indican indica en la figura anexa.

- Solución 1: conducción de las aguas por gravedad mediante un túnel el de unos 20 km de longitud atravesando la falla de Boconó;
- Solución 2: construcción túnel de 14 km que terminaría antes de la falla, o sea que no la cruzaría; para ello se requería un bombeo para llevar las aguas desde la torre toma ubicada

en el embalse, hasta el portal de entrada del túnel y desde el portal de la salida llegaría por gravedad hasta el valle de Quíbor;

- Solución 3: conducción desde una torre toma ubicada en el embalse Yacambú, mediante una estación de bombeo con un túnel corto para cruzar la divisoria, descargando las aguas a un pequeño embalse que permitiera conducir las aguas a través de una tubería forzada hasta una sala de máquinas que permitiese la generación de energía hidroeléctrica; las aguas descargarían en un embalse compensador ubicado en las cercanías del valle de Quíbor y de este modo se recuperaría parte de la energía utilizada en el bombeo.

Cuando OTEHA inició las conversaciones con FUDECO para la ejecución del proyecto definitivo, el Ministerio de Obras Públicas decidió realizar los estudios pues los que había realizado OTEHA, en opinión de dicho ministerio, no eran los adecuados “...lo cual constituyó una tremenda injusticia como tantas que se han cometido en este país” (Ferrer, 2011). Optó por la construcción del túnel de 24,3 kilómetros de longitud atravesando la falla, prepararon los planos y especificaciones, y se inició la licitación de la obra especificando que se utilizara excavación con ‘topo’. Esta especificación contradecía la opinión del especialista Black (1972) quien, explícitamente, había recomendado que se excavara el túnel por métodos convencionales como finalmente hubo que hacer.

La licitación se llevó a cabo, la ganó una firma no especializada en construcción de túneles, el contratista inició la construcción en 1.975 con un topo que había sido utilizado en España y el resultado fue que, en diciembre de 1.979, el topo quedó atascado en la roca. Fue necesario paralizar el trabajo de excavación en ese sector del túnel, durante largo tiempo (Ferrer, 2011).

En un artículo de abril de 1974 firmado por el Ingeniero José María Ochoa titulado ‘*La Obra de Yacambú*’, se describió el potencial que representaba almacenar las aguas en la vertiente sureste de la divisoria de aguas. De nuevo, citando al Ingeniero Ochoa, cuando se mencionó el túnel: “...hubo personeros oficiales y técnicos que mostraron reacciones de escepticismo y asombro. Una publicación habla del túnel como un proyecto ‘utópico’” (Ochoa, 1974, p. 760). De acuerdo con Ferrer (2011) el punto de partida del Proyecto fue un meticuloso estudio hecho por parte del Ingeniero José Ochoa, conocedor de los problemas del valle del Quíbor, en el cual se justificaba plenamente los objetivos del mismo.

A continuación el Ingeniero Ochoa hizo referencia a un conjunto de túneles: “...que presentan condiciones mucho más difíciles de construcción”. Los que fueron citados son: (i) el túnel de las Pampas de Olmos, Chiclayo, Perú, de 40 kilómetros de largo que en un futuro “...deberá cruzar numerosas fallas activas en una región que es la verdadera ‘Madre de los Terremotos’...”; (ii) túneles de minería en Sur-África de 40 y 50 km de largo a una profundidad de : “...3 kilómetros debajo de la superficie terrestre...”; (iii) proyecto Snowy-Mountain, Australia, de 44 kilómetros que “...atraviesa varias zonas de fallas”; (iv) túnel del Metro que va de San Francisco a Oakland, ya construido, “...pasando por debajo de la bahía de San Francisco y atravesando una de las regiones más sísmicas del mundo.”; (v) túnel de 17 kilómetros para el complejo Hidroeléctrico de Santo Domingo, Mérida, “...actualmente en construcción” y finalizada a finales de la década de los años 70 (Ochoa, 1974, pp. 761-763).

Ya bautizado como Túnel de Yacambú, el Ingeniero Ochoa estimó que este podría iniciarse entre 1976 y 1977. Finalmente, en el citado trabajo del Ingeniero Ochoa se procedió a presentar los resultados de la evaluación de costos, partiendo de una estimación para la ejecución de la presa en el Cañón de la Angostura que estaría entre 30 y 50 millones de bolívares. El autor anotó: “...si tomamos un costo medio muy elevado para el túnel del Yacambú de 4.5 millones de bolívares por kilómetro tendríamos 108 millones de bolívares” (Ochoa, 1974, p. 781).

No se indicó en ese extenso trabajo el tiempo necesario para la construcción del túnel. En cualquier caso, tomada la decisión de construir el túnel, en julio de 2008 se concluyó la excavación del mismo. Sin embargo, hasta el presente no se ha concluido su revestimiento definitivo y aún no pasa agua por el mismo.

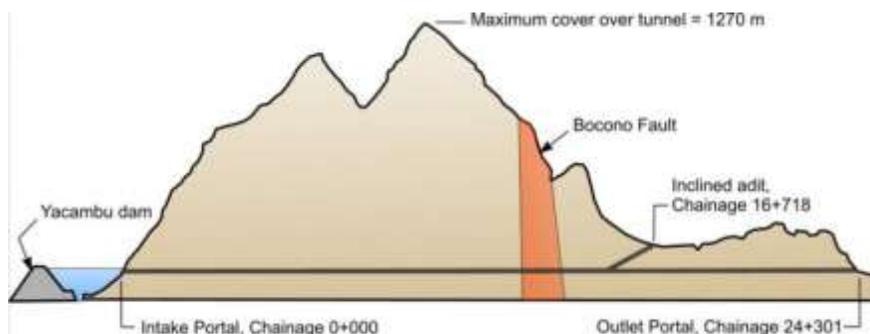


Figura 2.- Sección transversal en dirección aproximada N-S. La anchura de la falla, al sur de la ventana inclinada es del orden de 1000 m (Fuente: Hoek and Guevara, 2008)

3.- Breve Descripción de la Secuencia de Ejecución

En la **Tabla 1** se da un resumen de la secuencia constructiva y avance en el tiempo, así como de problemas que surgieron durante su ejecución.

4.- Problemas Durante la Fase de Construcción

Este túnel de 4.80 m de diámetro y 23.3 km de largo fue diseñado para cruzar la cordillera de Los Andes, desde Yacambú en la vertiente sur, al valle de clima semiárido pero fértil de Quibor ubicado en la vertiente opuesta. Las condiciones geológicas de las profundidades de excavación, hasta 1270 m debajo de la superficie, solo se conocieron en la medida que se progresó en la excavación la cual no superó los 300 m. Debe destacarse que por el flanco norte de la cordillera pasa la falla de Boconó, de tipo transcurrente dextral, de rumbo suroeste-noreste.

Al entrar en formaciones de filitas gráficas (esquistos metamorfoseados), se presentaron problemas extremos de encogimiento de la sección, que los sistemas de sostenimiento no eran capaces de soportar. Según Hoek and Guevara (2008, p. 35) a lo largo de 32 años se probaron alrededor de 30 sistemas diferentes de soporte; en condiciones de roca competente, muchos de estos sistemas resultaron adecuados. En su construcción intervinieron 8 contratistas a lo largo de 32 años culminando en Julio de 2008 (véase la **Tabla 1** y el artículo de Loyola y Ambrosi, 1996).

A lo largo del tiempo se emplearon diferentes métodos de excavación y selección de secciones, adoptándose finalmente la sección circular. Esta permitió procedimientos de construcción rutinarios independientemente de las condiciones locales de la roca. Aspectos resaltantes de los problemas encontrados y soluciones adoptadas durante la construcción se dan en Guevara (2004), Guevara et al. (2004) y, Hoek and Guevara (2008).

Tabla 1 Secuencia Constructiva del Túnel de Yacambú

(Fuentes para la elaboración: Guevara, 2011; Hoek and Guevara, 2009)

Contrato (Extensión Temporal)	Portal de Entrada (P.E.)	Portal de Salida (P.S.)	Observaciones
N° 1 (1976, Inicio)	Inicio con el TBM1 (Robbins).	Inicio con el TBM2 (Robbins)	Equipos para taladrar túnel de 4.8 m de diámetro. Inicio de excavación de Ventana Inclinada (V.I.) a unos 6 km del (P.S.), por métodos convencionales
N°1 (1977, Final del Contrato)	Avance de 700 m desde el P.E.	Avance de 1000 m desde el P.S.	
N° 2 (1978-79)	Avance hasta 1700 m desde el P.E. Interrupción de la excavación. El TBM1 quedó aprisionado en un área con 425 m de cobertura	Avance hasta 1850 m del P.S. El TBM2 fue retirado temporalmente del túnel	En 1979 se constatan serios problemas en la excavación en las zonas de filitas grafiticas. En la V.I. se emplearon soportes con juntas deslizantes con capacidad de deformarse bajo la acción compresiva sin perder su capacidad portante
N° 3 (1981-84)	No hubo actividades en este lado del túnel	La excavación avanzó hasta 4350 m del P.S.	La V.I. avanzó hasta 1900 m
N° 4 (1984-1988)	Se avanzó 1000 m desde la V.I. hacia el P.E. Se retiró el TBM1	Se avanzó 1000 m desde la V.I. hacia el P.S.	Culminada la V.I., desde allí se iniciaron perforaciones en sentidos opuestos: hacia al P.E. y hacia el P.S.
N° 5 (1991-1997)	Se empleó un 'road-header' alcanzando hasta 5200 m del P.E.	Se utilizó perforación convencional y explosivos. Se unió el T.S. con la V.I.	El contrato N° 5 se extendió hasta 2002; luego se firmó el contrato N° 6 hasta 2005 y el N° 7 hasta 2008. Todos fueron con la misma empresa Venezolana, empleando métodos convencionales y explosivos
N° 6; N° 7; N° 8 (1997-2008)	El 27 de julio de 2008, el túnel fue concluido		

TBM = Tunnel Boring Machine; V.I. = ventana inclinada; P.E. = portal de entrada; P.S. = portal de salida

5.- Solución al Problema

En las débiles filitas grafiticas, a profundidades de unos 1200 m debajo de la superficie, los acortamientos en el diámetro de la excavación solo pudieron ser absorbidos por medio de soportes circulares, con capacidad para ceder de modo controlado. La necesidad de colocar sistemas de protección para los obreros requirió el diseño de uno cuya capacidad portante fuese: (i) lo suficientemente robusto para suministrar apoyo de emergencia en el evento de un colapso cercano a la cara de excavación, y; (ii) a la vez suficientemente flexible para absorber los progresivos acortamientos previsibles. Es decir, que retardase lo suficiente la activación de su capacidad de soporte, en este caso, hasta una distancia de 3 diámetros de túnel. En el citado trabajo de Hoek and Guevara (2008) se describió la solución adoptada y el desempeño de los primeros anillos instalados.



Figura 3.- La solución de anillos con diámetros ajustables toleró las deformaciones visco-plásticas del terreno (Fuente: Hoek and Guevara, 2008)

6.- Información Conocida el Año 2014

El 20 de Septiembre del presente año, el Ingeniero Rafael Guevara pasó copia a un grupo de colegas para informarles sobre la respuesta un a declaraciones del diputado Guillermo Palacios publicadas en el periódico *El Impulso* (Guevara, 2014). Se indica allí que la solución propuesta por el Dr. Evert Hoek trabajando para SHYQ C.A. no se construyó pues un nuevo informe de la firma AF de Ingenieros Civiles del año 2010 decidió la colocación de una membrana y no de los anillos propuestos. Debe destacarse que la CAF trajo al Ing. Alberto Marulanda de Colombia, quién opinó que la membrana no era necesaria ni conveniente (Guevara, 2014).

El 16 de noviembre del presente año, el periódico *El Nacional* de Caracas publica un largo artículo titulado: *En riesgo 40 años de obras y 1000 millones de dólares en Yacambú* suscrito por Félix Cordero Peraza, Director de la Empresa *Sistema Hidráulico Yacambú-Quibor*, cuyo contenido esencialmente coincide con lo anotado más arriba. También se plantean allí alternativas empleando otros embalses de la región. El mismo día, en el diario *El Universal* titula en primera página “*Daños en Yacambú desafían la ingeniería*”. El 23 de Noviembre y en este último rotativo Cordero Peraza publica a media página de la de Opinión, un artículo titulado: “*¡Derrumbe en Yacambú conmociona a Lara*” en el cual se extiende a otros aspectos.

7.- Lecciones Útiles a la Ingeniería Estructural

Como se señaló al comienzo las propiedades mecánicas de los materiales por donde debía pasar el túnel no se lograron estudiar sino hasta 300 m bajo la superficie, de un material que aún tenía más de 1000 m sobre el túnel que lo debía atravesar. Sus propiedades e información propia de material triturado por una falla como la de Boconó, se fueron conociendo a medida que se avanzaba en la ejecución del proyecto. Resultaron ser sustancialmente distintas de las que se habían explorado y estudiado en la etapa de investigación con geología superficial: pocas perforaciones y algunos registros geosísmicos. La solución para lograr soportes adecuados a las fuertes reducciones de diámetro por la presencia de materiales visco-plásticos en extensiones importantes de la obra, fue un proceso que: (i) obligó a desechar la excavación por medio de TBM y pasar a procedimientos convencionales; (ii) modificar el diseño de los soportes que por su rigidez y fallas no dúctiles, resultaban inadecuados, hasta alcanzar la solución de soportes con juntas ajustables.

El caso Yacambú revela una vez más la importancia que tiene el reconocimiento de información incierta en la toma de decisiones por parte del profesional de la Ingeniería. Esto ha sido ilustrado con la naturaleza incierta de la resistencia de los materiales y de los miembros portantes de las estructuras, de las acciones externas como es el caso de los sismos y de otras acciones descritas como patología, fallas y accidentes. De aquí que en las nuevas Normas internacionales (ISO) para el Proyecto de Obras de Infraestructura ya se han venido incorporando exigencias para que el Projectista evalúe la naturaleza incierta de algunas variables en cálculos (ad.hoc) de confiabilidad estructural; o sea, en el complemento de la probabilidad de ruina o de un desempeño indeseable.

Por último y citando de nuevo al doctor Diego Ferrer: “*En cuanto a la concepción misma del proyecto de trasvasar las aguas mediante un túnel, creo que todos los que estuvimos involucrados en ese proyecto no nos percatamos de algo muy importante cual es el de atravesar la falla de Boconó, que es la más activa de Venezuela. Cuando se inició la construcción del túnel solamente teníamos como referencia sísmica el terremoto ocurrido en Caracas 1967, pero....las implicaciones desastrosas que tiene el movimiento de una falla de esta magnitud.durante el periodo de operación del túnel, lo cual representará grandes demoras y elevados costos de su reparación. Reconozco que es una reflexión tardía, pero que debe servir de ejemplo para futuros proyectos.*” (Ferrer, 2011).

Caracas, José Grases, 6-12-2014

Referencias Consultadas

- BLACK, W. T. (1972). Practical Aspects of the construction of the Yacambú Tunnel. July, W.L.A., California.
- FERRER F., D. (2011). *Yacambú*. Extracto de las Memorias del doctor Diego Ferrer F. En preparación, Caracas, 5 p + 2 figuras.
- GUEVARA B., R. (2004). Aspectos sobre diseño y construcción en los últimos 4.6 km del Túnel de Yacambú. *Memorias XVIII Seminario Venezolano de Geotecnia (Geoinfraestructura: “La Geotecnia en el Desarrollo Nacional”)*. Septiembre, Caracas, p. 65 y CD.
- GUEVARA B., R. (2011). Conversaciones con el Ingeniero Rafael Guevara B. durante abril de 2011.
- GUEVARA B., R. (2014). Copia del correo enviado al Diputado Guillermo Palacios del día 20-9-2014, en el cual le anexa su comunicación de 9 de enero de 2011 con aclaratorias técnicas sobre el tema. (Esta copia fue remitida a un grupo de diez colegas, algunos pertenecientes a Academias del país).
- GUEVARA B., R., CERDA, M. y CARRERO, L. (2004). Túnel Yacambú-Quibor, experiencia de construcción-reparación del tramo entre las progresivas 12+800 a 12+950. *Memorias XVIII Seminario Venezolano de Geotecnia (Geoinfraestructura: “La Geotecnia en el Desarrollo Nacional”)*. Septiembre, Caracas, CD.
- HOEK, E. and GUEVARA B., R. (2008). Overcoming squeezing in the Yacambú-Quibor tunnel, Venezuela. *Rock Mechanics and Rock Engineering*, submitted (37 p ampliamente ilustrado).
- LOYOLA, P. y AMBROSI, G. (1996). Experiencias en la construcción del túnel de trasvase Yacambú-Quibor. *Memorias del XIV Seminario de Geotecnia*, Sociedad Venezolana de Geotecnia, 7 - 10 de octubre, Caracas.
- OCHOA, J. M. (1974). La obra de Yacambú. En: *Sobre 20 Años de Actividades*, Asociación Venezolana de Productores de Cementos (1976), pp. 755-783. Caracas.