



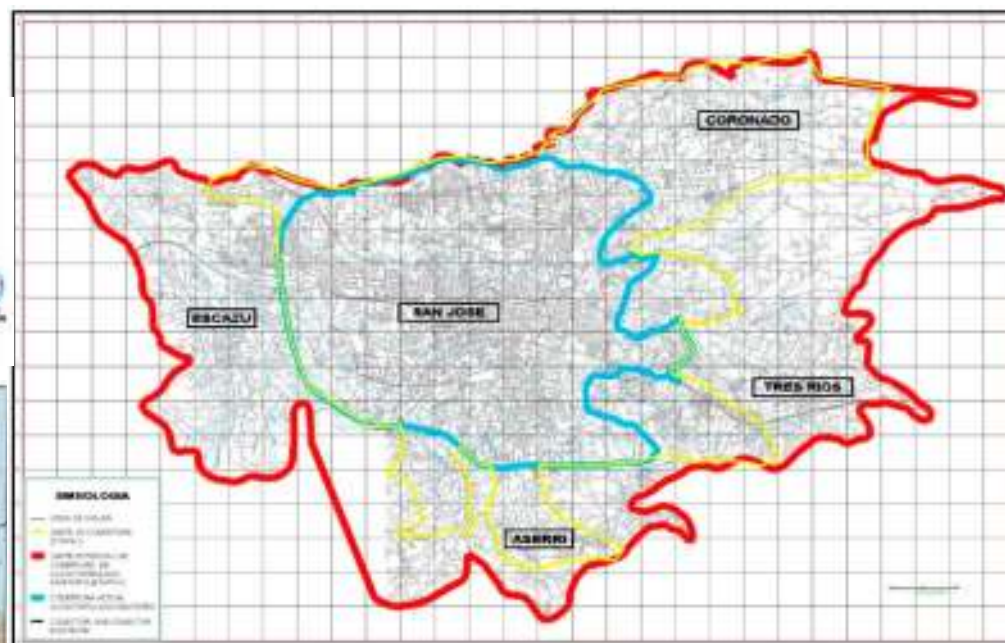
Túnel metropolitano para el trasvase de aguas residuales de San José (Costa Rica)

John Diaz (Bessac Andina)

Agosto 2018

El Proyecto de Mejoramiento Ambiental

- Proyecto de Mejoramiento ambiental del Área Metropolitana de San José (Costa Rica)

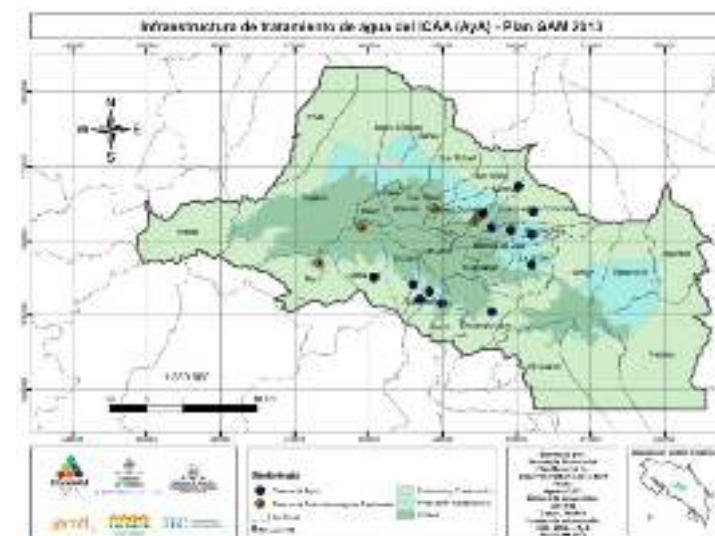


El Proyecto de Mejoramiento Ambiental

La paradoja de Costa Rica:

- Referente mundial en el campo ecológico (biodiversidad, protección de naturaleza y parques, turismo, etc.)
- Acceso de sus ciudadanos al agua potable: 97% (100% Urb., 91% Rur.)
- Tratamiento de aguas residuales: **3% de las aguas residuales (2014)**

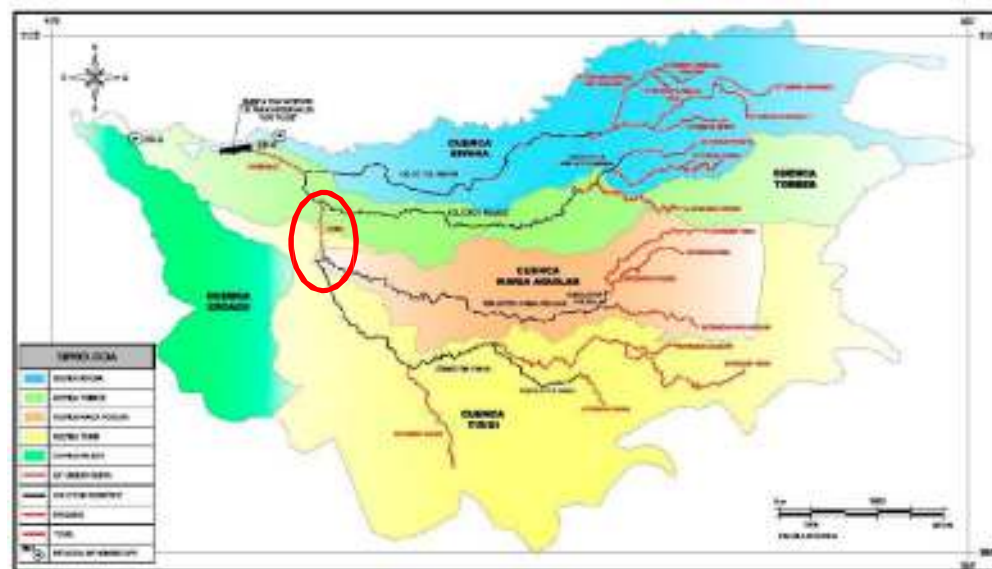
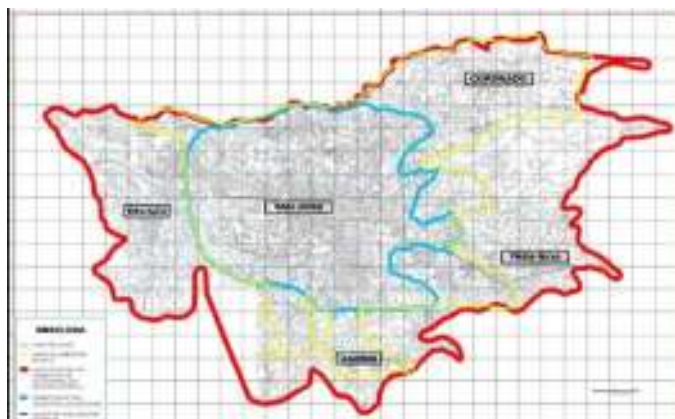
Como resultado de ello: Costa Rica pasó repentinamente del puesto **5** a nivel mundial (en 2013), al puesto **54** (en 2014) en la clasificación del Índice de Desarrollo Ambiental (EPI) publicado cada dos años por la Universidad de Yale, Estados Unidos, cuando ésta pasó a incluir el **tratamiento de las aguas residuales, indicadores de saneamiento ambiental, regulación de agroquímicos y de salud humana relacionados con la calidad del aire (EFE).**



El Proyecto de Mejoramiento Ambiental

Medidas de actuación:

- Se contempla la rehabilitación y ampliación de los colectores existentes, además de la construcción de un **túnel de trasvase de 2,50m de diámetro interior y 1.750m de longitud**, en la zona Oeste de la capital, además de un emisario y la construcción de la Planta de Tratamiento de Aguas Residuales Los Tajos, en la Uruca (PTAR).



El Túnel de Trasvase

- La obra más significativa del PMAMSJ es el Túnel de Trasvase entre el Rio María Aguilar y el Rio Torres:
 - **Cliente:** AyA (Acueductos y Alcantarillados) de Costa Rica
 - **Financiación:** Fondos JBIC (Banco Japonés de Cooperación Internacional) + JICA (Agencia de Cooperación Internacional de Japón)+ BID (Banco Interamericano de Desarrollo)+ Banco Nacional de CR+ Instituto Costarricense de Acueductos y Alcantarillados (AyA)
 - **Diseño:** Geodata Engineering (Italia)
 - **Contratista:** BESSAC (Francia)



El Túnel de Trasvase

- La obra más significativa del PMAMSJ es el Túnel de Trasvase entre el Rio María Aguilar y el Rio Torres:
 - Longitud: 1.750m
 - Diámetro Interior: 2.500mm
 - Método constructivo: Excavación mecanizada mediante TBM tipo EPB



Primera excavación urbana con
TBM (EPB) en Costa Rica

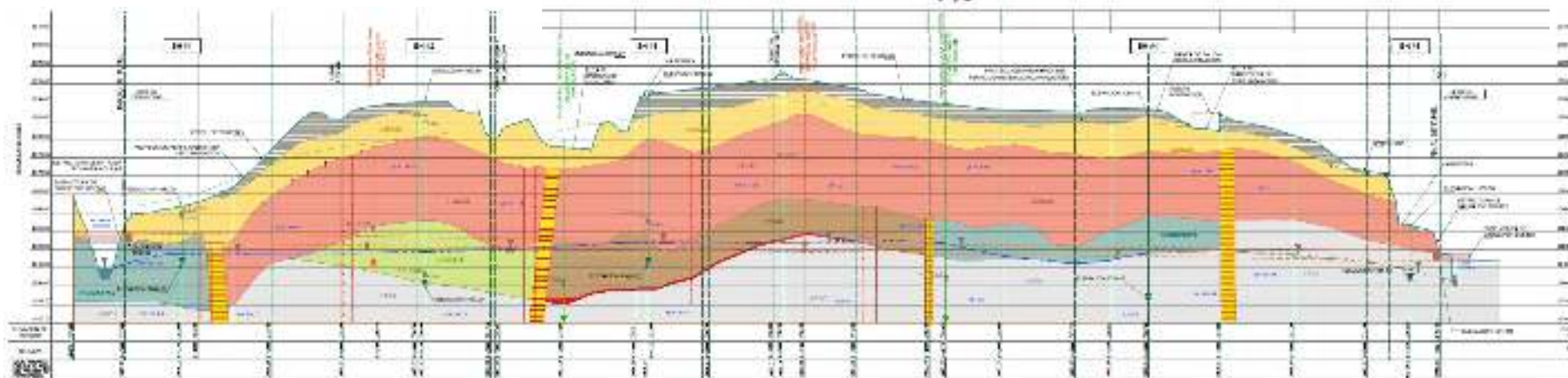
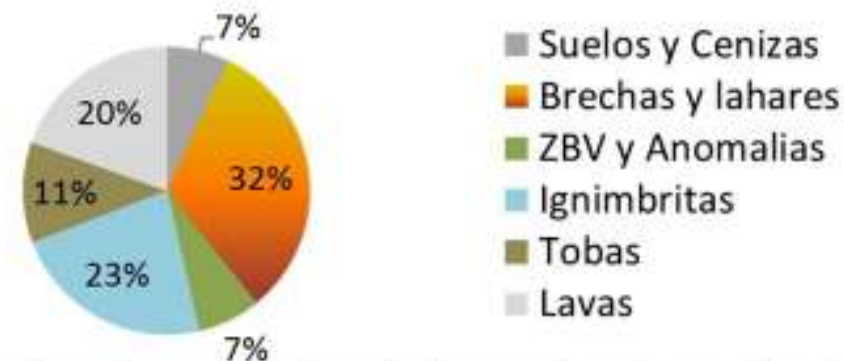
Perfil geológico

- El terreno a atravesar presenta una elevada **heterogeneidad** con varios tipos de **rocas volcánicas de bajo RMR** y **previsión de cruce de fallas**

Heterogeneidad:

3 Fallas

Coberturas variables entre 0 y 45m



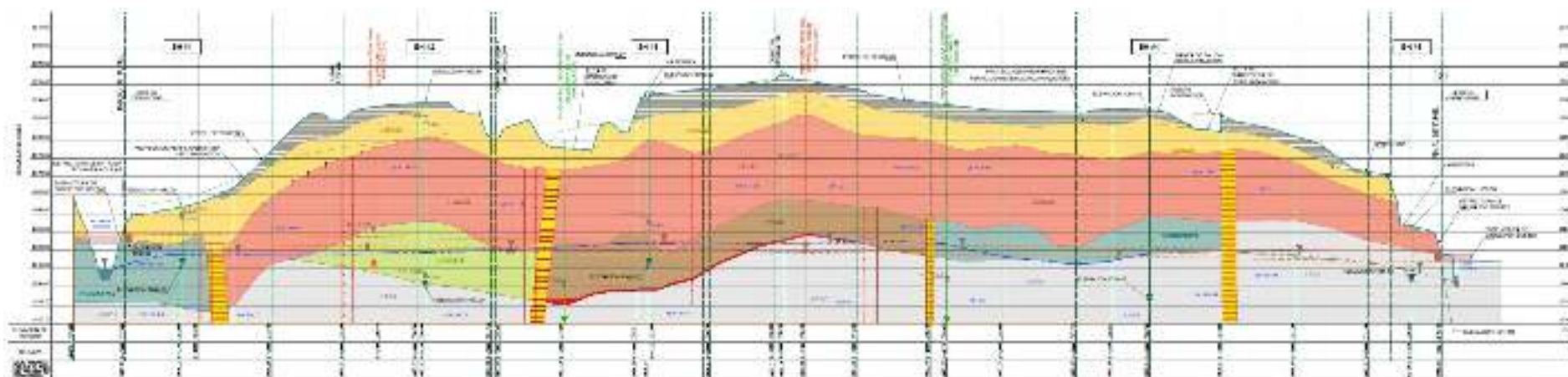
Perfil Geológico

- El terreno a atravesar presenta una elevada **heterogeneidad** con varios tipos de **rocas volcánicas** de **bajo RMR** y previsión de **cruce de fallas**

- Características**

- geotécnico-geomecánicas:**

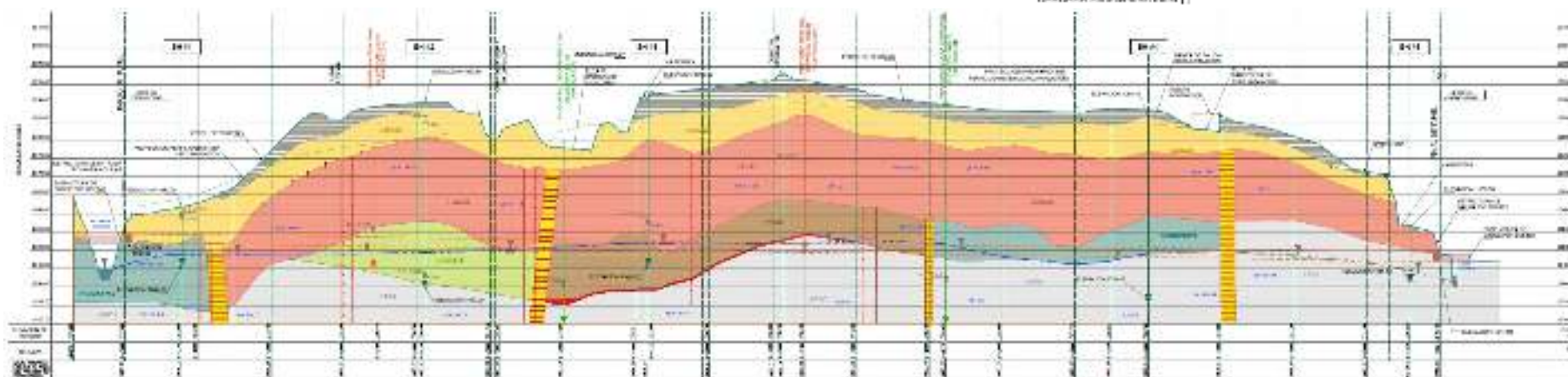
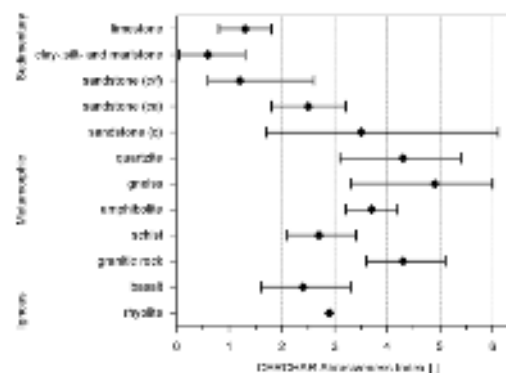
Ceniza y suelo	Brechas y lazares	Ignimbritas	Toba	Lava
$\varphi = 20^{\circ}$	$\varphi = 35^{\circ}$	$\varphi = 40^{\circ}$	$\varphi = 45^{\circ}$	$\varphi = 45^{\circ}$
$c' = 0.01 \text{ MPa}$	$c' = 0.08 \text{ MPa}$	$c' = 0.25 \text{ MPa}$	$c' = 0.92 \text{ MPa}$	$c' = 0.91 \text{ MPa}$
$E = 0.07 \text{ GPa}$	$E = 0.1 \text{ GPa}$	$E = 1.3 \text{ GPa}$	$E = 2.2 \text{ GPa}$	$E = 4.2 \text{ GPa}$
$\gamma = 15.5 \text{ kN/m}^3$	$g = 17.2 \text{ kN/m}^3$	$\gamma = 18.0 \text{ kN/m}^3$	$\gamma = 22.0 \text{ kN/m}^3$	$\gamma = 25.4 \text{ kN/m}^3$



Perfil Geológico

- El terreno a atravesar presenta una elevada **heterogeneidad** con varios tipos de **rocas volcánicas de bajo RMR** y **previsión de cruce de fallas**

Lava muy abrasiva: CAI >4

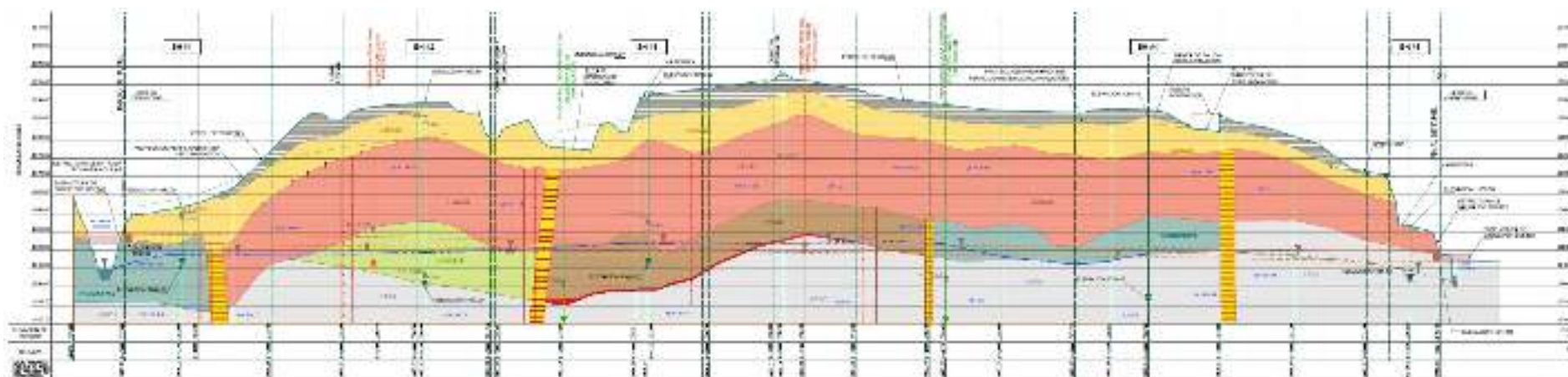


Perfil Geológico

- El terreno a atravesar presenta una elevada **heterogeneidad** con varios tipos de **rocas volcánicas de bajo RMR** y **previsión de cruce de fallas**

Nivel freático

- Nivel Freático: máx. 2,50 bar (importante)
- Permeabilidad: $k=5 \times 10^{-3}$ m/s (muy alta)



Selección de la máquina



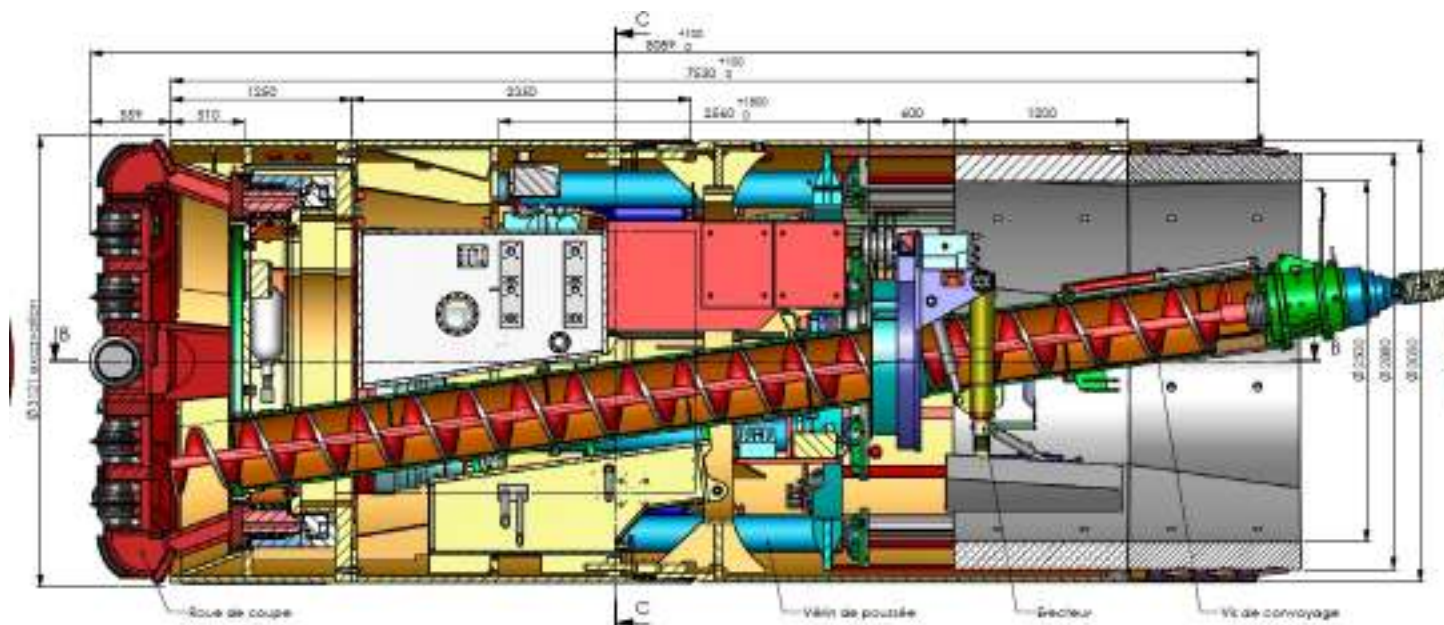
- La máquina seleccionada es del tipo Earth Pressure Balance (EPB), debido a la presencia de nivel freático, edificaciones en las proximidades, bajas características geomecánicas del terreno.



- Fabricante: BESSAC
- Diámetro Excavación: 3.120 mm
- Diámetro Escudo: 3.060 mm
- Longitud Escudo: 9,50 m
- Peso Escudo: 86 t (incluida cabeza)
- Max empuje: 8.800 kN
- Max Torque: 860 kNm
- Revestimiento: anillo de dovelas $\text{Ø}2.880/\text{Ø}2.500 \times 1.200 \text{ mm (5+1)}$

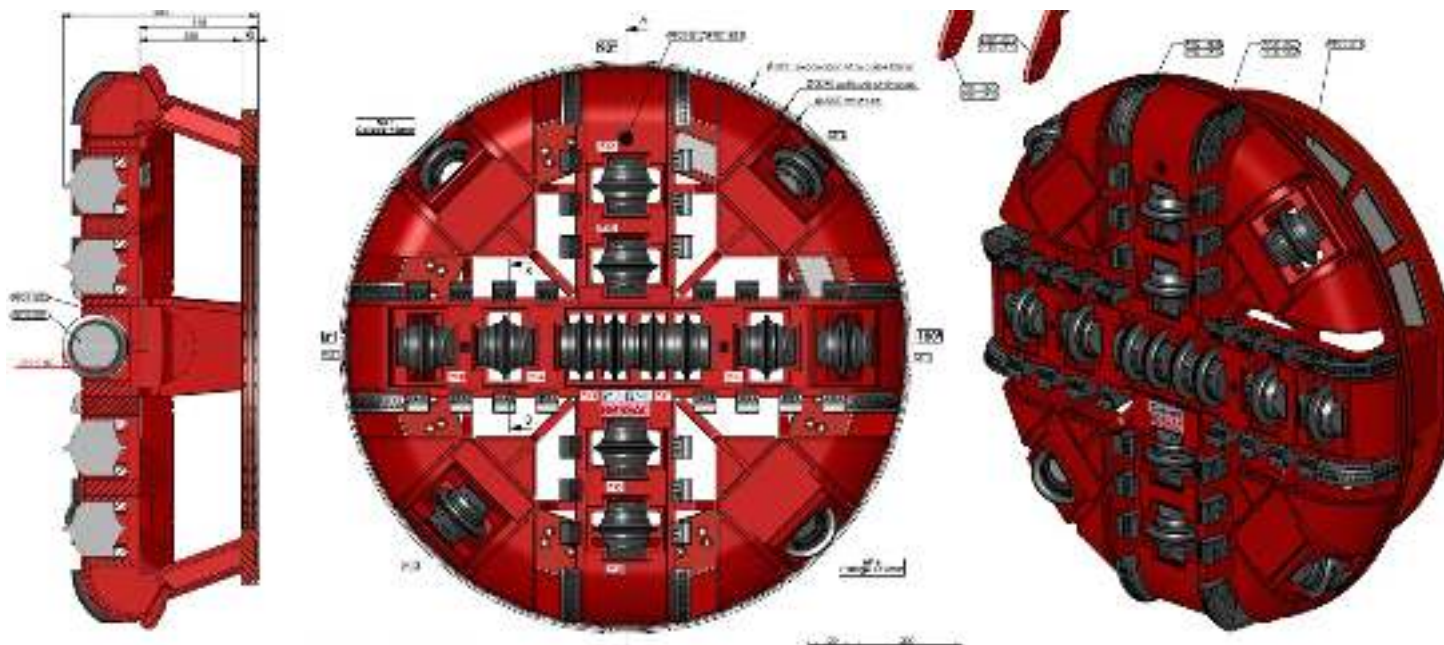
Selección de la máquina

- La máquina seleccionada es del tipo Earth Pressure Balance (EPB), debido a la presencia de nivel freático, edificaciones en las proximidades, bajas características geomecánicas del terreno.



Selección de la máquina

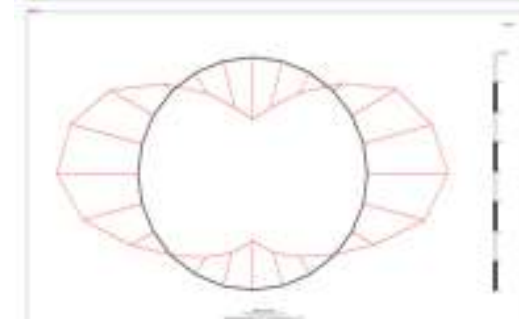
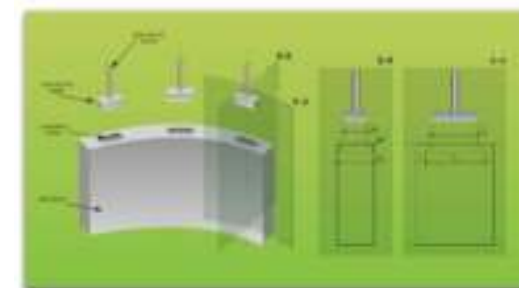
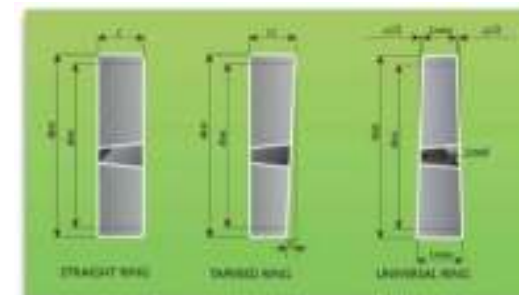
- Características de la cabeza de corte:
 - Diámetro Excavación: 3.120mm
 - Diámetro Cabeza: 3.070mm
 - Apertura: 20%
 - Rotación: 0-4 rpm
 - Herramientas: 18 cutters 14” + 28 cuchillas + 8 herramientas periféricas



Diseño del revestimiento

- Dovelas prefabricadas, anillo universal (5+1)

Categoría	Ítem	Verificación
Fabricación	Unión del revestido	Se debe verificar la fuerza bajo la carga para la sección 99%
	Misocromatismo	Se debe verificar la fuerza bajo la carga de 100% de las juntas
	Módulo de juntas	Se debe verificar la fuerza en la junta de módulo
Anillo URS	Cargas URS	Se debe verificar la fuerza generada por las cargas de 100% de la URS.
	Formación de juntas separadas y el anillo	
Espejado	Diseño del espejado	Se debe verificar la fuerza del espejado, según el tipo y el tipo de carga que se está aplicando en cada una de las juntas de espejado. Se debe verificar la fuerza que se genera en la junta de espejado, según el tipo de espejado que se está aplicando.



- Verificación a “bursting” en las juntas
- Verificación sísmica de las Dovelas
- Etc.

Predicción de los asentamientos y BRA

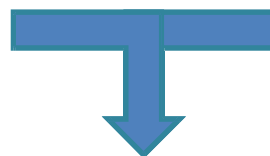
- Para la estimación de la deformación del suelo debido a la excavación en TBM se realizaron
 1. Predicción de los asentamientos en condiciones de *greenfield* y definición de la zona de influencia.
 2. Estimación de la vulnerabilidad específica y el riesgo relativo de las construcciones existentes, fuera de la zona de influencia (Diseño de la vulnerabilidad específica y el riesgo relativo de edificios y construcciones).
 3. Proyecto e instalación de monitoreo geotécnico-estructural, para el control de los edificios/construcciones que podrían verse afectados, lo que garantiza el monitoreo de los asentamientos totales y diferenciales, deformaciones angulares, desviaciones de las deformaciones verticales, horizontales, etc.

Predicción de los asentamientos y BRA

- Para la estimación de la deformación del suelo debido a la excavación en TBM se realizaron
 - predicción de los asentamientos* en condiciones de *greenfield* y definición de la zona de influencia.

tramo	Chainage (m)	sección tipo
Rio Maria Aguilar		
línea recta	10.000	A
	150.000	
	150.000	B
	760.000	
	760.000	C
	880.000	
	880.000	D
	1010.000	
	1010.000	C
	1100.000	
1100.000	B	
1200.000		
curva	1200.000	
	1300.000	
línea recta	1300.000	B
	1500.000	
	1500.000	
	1786.473	D
Rio Torres		

sección tipo	
A	Excavacion en Ceniza
B	Excavacion en Lahar-Brecha-Ignimbrita
C	Excavacion en Toba
D	Excavacion en Lava



Parametros de entrada para el calculo de isolinneas de asentamientos verticales			Volume perdido [%]					
			caso 1		caso 2		caso 3	
Geologia	Coefficiente K del suelo		Linea recta	Curva	Linea recta	Curva	Linea recta	Curva
A	Excavacion en Ceniza	0.30	0.5	0.7	1.0	1.0	1.5	1.5
B	Excavacion en Lahar-Brecha-Ignimbrita	0.40						
C	Excavacion en Toba	0.50						
D	Excavacion en Lava	0.60						

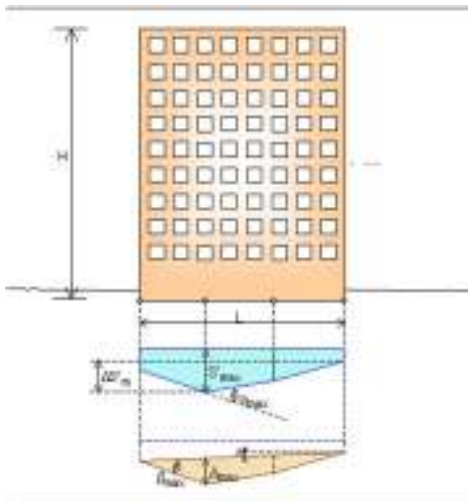


Isolinneas de asentamientos

*según Mair Taylor, 1997

Predicción de los asentamientos y BRA

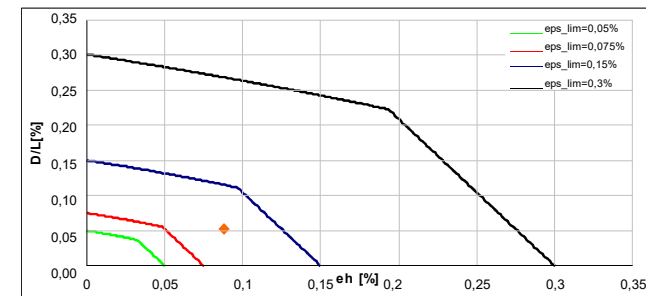
- Para la estimación de la deformación del suelo debido a la excavación en TBM se realizaron
 2. estimación de la vulnerabilidad específica y el riesgo relativo de las construcciones existentes, fuera de la zona de influencia (Diseño de la vulnerabilidad específica y el riesgo relativo de edificios y construcciones).



Definición de los daños en un edificio (Burland et al., 1977)

CATEGORÍA DE DAÑO	DESCRIPCIÓN DEL GRADO DE DAÑO	DESCRIPCIÓN DE UN TÍPICO DAÑO Y FORMA POSIBLE DE REPARACIÓN DE EDIFICIO TÍPICO EN MAMPOSTERÍA	S_{max} [mm]	β_{lim} [%]	MAX. ESFUERZO DE TRACCIÓN ϵ_{lim} [%]	ANCHO DE GRIETA APROX. [mm]
0	Despreciable	Grietas finas			Menos de 0.05	
1	Muy leve	Grietas finas fácilmente tratados durante redecoraciones normales. Tal vez fractura leve aislada en la construcción. Las grietas en la mampostería exterior con visible solo con una inspección cercana.	10	0.002	0.05a 0.075	0.1 a 1
2	Leve	Grietas se llenan fácilmente. Probablemente sea necesario una redecoración. Varias fracturas leves en el interior del edificio. Grietas exteriores visibles: un poco de redireccionamiento puede ser necesario para estanquidad a la intemperie. Las puertas y ventanas pueden salir del eje levemente.	50	0.005	0.075 a 0.15	1 a 5
3	Moderado	Las grietas pueden requerir ser cortadas y remendadas. Las grietas recurrentes pueden ser enmascaradas con revestimientos adecuados. Posiblemente sea necesaria la sustitución de una pequeña cantidad de ladrillos exteriores. Las puertas y ventanas	75	0.02	0.15 a 0.3	5 a 15 o a un número de grietas mayor que 3

Clasificación del daño (Burland, 1977, y Boscardin y Cording (1989)



Relaciones de límite entre Δ/L (%) y eh

Predicción de los asentamientos y BRA



- Para la estimación de la deformación del suelo debido a la excavación en TBM se realizaron
 2. estimación de la vulnerabilidad específica y el riesgo relativo de las construcciones existentes, fuera de la zona de influencia (Diseño de la vulnerabilidad específica y el riesgo relativo de edificios y construcciones).

Sl.No	Building ReferenceNo.	Vp=0.5%		Vp=1.0%		Degree of Damage	Category	Degree of Damage	Category
		S _{max}	Max tensile strain	S _{max}	Max tensile strain				
1	Edif 4A	3.16E-09	1.21	6.08E-09	1.80	Negligible	0	Negligible	0
2	Edif 4B	4.14E-09	.1	8.28E-09	1.50	Negligible	0	Negligible	0
3	Edif 4D	5.12E-09	0.9	1.02E-08	2.10	Negligible	0	Negligible	0
4	Edif 1	6.10E-09	0.8	1.22E-08	1.90	Negligible	0	Negligible	0
5	Edif 1C	7.08E-09	1.0	1.42E-08	1.80	Negligible	0	Negligible	0
6	Edif 2	8.06E-09	1.0	1.62E-08	1.70	Negligible	0	Negligible	0
7	Edif 8B	9.04E-09	0.9	1.82E-08	1.80	Negligible	0	Negligible	0
8	Edif 3	1.002E-08	10.9	2.02E-08	1.80	Negligible	0	Negligible	0
9	Edif 8A	1.100E-08	0.9	2.22E-08	1.80	Negligible	0	Negligible	0
10	Edif 8C	1.198E-08	0.9	2.42E-08	1.80	Negligible	0	Negligible	0
11	Edif 8D	1.296E-08	0.9	2.62E-08	1.70	Negligible	0	Negligible	0
12	Edif 8E	1.394E-08	0.9	2.82E-08	1.40	Negligible	0	Negligible	0
13	Edif 13	1.492E-08	0.8	3.02E-08	1.40	Negligible	0	Negligible	0
14	Edif 14	1.590E-08	0.7	3.22E-08	1.30	Negligible	0	Negligible	0
15	Edif 11	1.688E-08	0.7	3.42E-08	1.60	Negligible	0	Negligible	0
16	Edif 15	1.786E-08	0.7	3.62E-08	2.60	Negligible	0	Negligible	0
17	Edif 12	1.884E-08	0.8	3.82E-08	1.30	Negligible	0	Negligible	0
18	Edif 19	1.982E-08	1.3	4.02E-08	1.90	Negligible	0	Negligible	0
19	Edif 17	2.080E-08	0.6	4.22E-08	1.50	Negligible	0	Negligible	0
20	Edif 18	1/81398	1.0	0.00165	0	Negligible	0	Negligible	0
21	Edif 20	1/113510	0.7	0.00107	0	Negligible	0	Negligible	0

Evaluación de riesgos para las 52 estructuras existentes, considerando Vp=0,5%, Vp=1,0%, Vp=1,5%:



Mapas temáticos

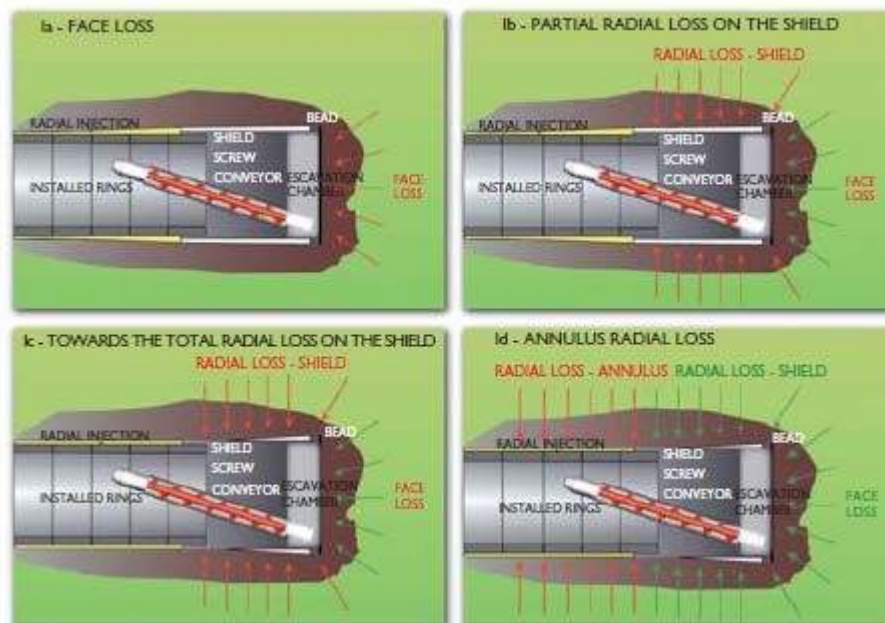
Predicción de los asentamientos y BRA

- Para la estimación de la deformación del suelo debido a la excavación en TBM se realizaron
 3. proyecto e instalación de monitoreo geotécnico-estructural, para el control de los edificios/construcciones que podrían verse afectados, lo que garantiza el monitoreo de los asentamientos totales y diferenciales, deformaciones angulares, desviaciones de las deformaciones verticales, horizontales, etc.



Predicción de los asentamientos y BRA

- Para que la predicción de los asentamientos en fase de proyecto tenga eficacia en la fase de construcción, deben ser definidos los parámetros operativos de excavación que mantengan la pérdida de volumen en los rangos previstos



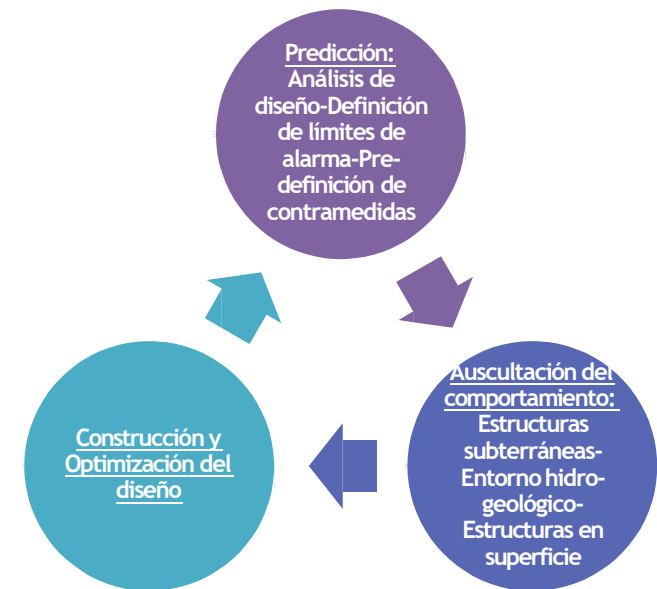
Factores que contribuyen a la pérdida de volumen (V_p) en la excavación mecanizada

Diseño de los parámetros de avance: elPAT

- La estabilidad del frente es uno de los factores más importantes en la selección del método adecuado de excavación de un túnel mediante EPB
 - En suelos no estables, existe una pérdida de estabilidad en el frente del terreno que se contrarresta creando una presión de soporte.
 - El suelo se afloja mediante los cortadores en la cabeza de corte, cae a través de las aberturas de la cabeza de corte en la cámara de excavación y se mezcla con el suelo plástico ya presente. La penetración incontrolada del terreno del frente del túnel en la cámara de excavación se impide con la fuerza de los cilindros de empuje sobre la pared estanca (bulk head) hacia el terreno.
 - Se alcanza un estado de equilibrio cuando el suelo en la cámara de excavación no se puede compactar más solo debido al terreno y a la presión de agua.

Diseño de los parámetros de avance: elPAT

- Como consecuencia lógica, la evaluación de la presión estabilizante del frente es un nodo crítico tanto para el diseño como para la fase de construcción
- El **Protocolo de Avance en el Túnel (PAT)** es el documento que provee las conexiones dinámicas entre el Proyecto y la Construcción, y permite obtener un modelo de predicción óptimo de los riesgos gracias a su continua retroalimentación y actualización: representa una guía viva para conducir la excavación mecanizada del túnel hacia un avance exitoso



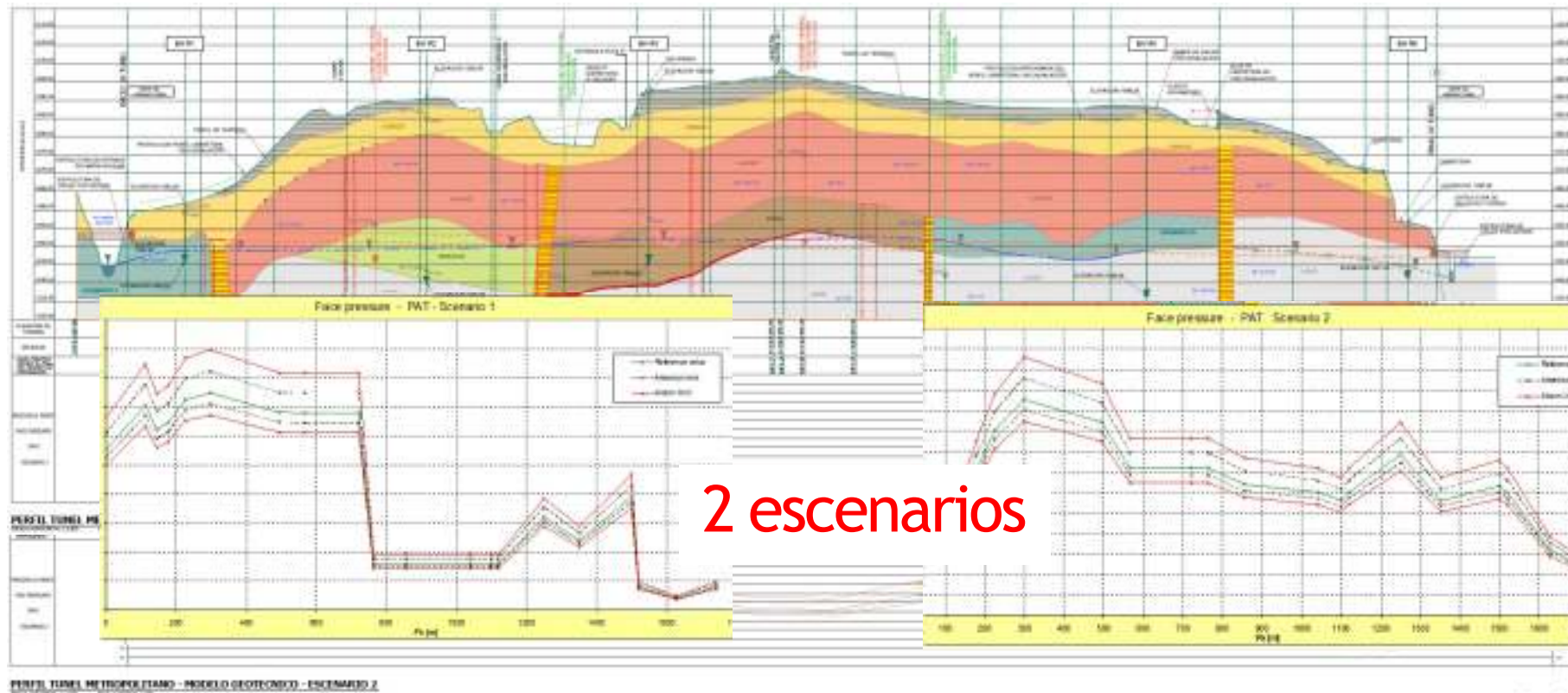
Diseño de los parámetros de avance: el PAT



- Se estudiaron dos escenarios: escenario con nivel freático de referencia y escenario con nivel freático mas alto, definido en base a las investigaciones del 20 de Noviembre 2010
- Diferentes métodos de análisis se aplicaron para la definición de los perfiles de presión de soporte al frente y los escenarios siguientes de deformación en el frente del túnel fueron considerados:
 - P(K0): Presión basada en K0 (coeficiente de presión a reposo del terreno): los desplazamientos del frente no son permitidos;
 - P(Ka): Presión basada en Ka (coeficiente de presión activo del terreno): los desplazamientos del frente están en campo elástico
 - P(w): Presión hidráulica: condición de equilibrio hidro-geológico
 - P(COB): Presión basada en el método de COB (recomendaciones del Dutch Centre Underground Bowen) : $P(Ka)+20kPa$
 - P(Caquot FoS=1,2,3): Presión basada en los límites superior e inferior de los teoremas de plasticidad con FoS=1,2,3 (FoS = Factor de Seguridad)
 - P(Anagnostou): Presión basada en el método del equilibrio límite.

Diseño de los parámetros de avance: elPAT

- Entre los resultados, se dispone de un perfil de rangos de presiones al frente, a mantener durante la excavación, con umbrales claros de atención y alarma



Diseño y preparación de portales



Rio Torres



Fase de excavación



- Comienzo excavación: 22/04/2015
- Finalización excavación : 17/01/2016



Conclusiones

- El proyecto persigue una necesaria mejora en el sistema de recolección de aguas residuales de la capital
- El método de excavación representa una novedad para las excavaciones urbanas en Costa Rica, y por su eficacia y eficiencia está abriendo paso a nuevos proyectos en el mismo ámbito y en otros campos de excavación urbana
- No se ha verificado ningún problema mayor (subsidiencias, etc.)
- Cliente satisfecho

Muchas Gracias

