

CORPORACIÓN PARA LA INVESTIGACIÓN ENERGÉTICA, C.I.E.

**EL PROCESO DE EROSIÓN REGRESIVA DE LA CASCADA DE SAN
RAFAEL Y LAS IMPLICACIONES SOBRE LOS DEPÓSITOS DE AGUAS
ARRIBA y LAS OBRAS EXISTENTES.**

Autor: Vladimir Játiva Sevilla

Quito, 2020 05 15

CONTENIDO

- 1 RESUMEN EJECUTIVO**
- 2 BREVE DESCRIPCIÓN DE LA HISTORIA GEOLÓGICA DEL RÍO COCA ENTRE LA EX CASCADA DE SAN RAFAEL Y LA TOMA DE LA CCCS**
- 3 EL PROCESO EROSIVO EN EL RÍO COCA**
 - 3.1 Materiales existentes
 - 3.2 Generalidades de la erosión
 - 3.2.1 Dinámica fluvial aproximada para el río Coca
 - 3.2.1.1 Comentarios
 - 3.3 EN LAVAS BASÁLTICAS
 - 3.3.1 La transformación de cascada de San Rafael
 - 3.3.1.1 El proceso erosivo retrocedente y sus implicaciones
 - 3.4 EN DEPÓSITOS DE AVALANCHAS VOLCÁNICAS 2
 - 3.4.1 Velocidad de avance erosivo
 - 3.4.1.1 Análisis
 - 3.5 LA EROSIÓN EN DEPÓSITOS FLUVIO LACUSTRES
 - 3.5.1 Erodabilidad
 - 3.5.2 Velocidad erosiva
 - 3.5.3 Puente de acceso a Ventana 2
 - 3.5.3.1 Análisis
- 4 MORFOLOGÍA FLUVIAL**
 - 4.1 Cauce actual
 - 4.2 Cauce anterior
 - 4.3 Tramo entre la ex cascada y el Km. 6.5
 - 4.4 Conclusiones
- 5 OBRAS EN RIESGO**
 - A.- POBLACIONES, ESCUELAS, CENTROS COMUNITARIOS
 - B.- L/T 138 KV
 - C.- OBRAS VIALES Y PUENTES
 - D.- CONDUCCIONES PETROLERAS (SOTE, OCP, POLIDUCTO)
 - E.- PUENTE DE ACCESO A VENTANA 2
 - F.- TOMA Y DESARENADOR DE LA CCCS
 - G.- CANAL DE RESTITUCIÓN, PUENTE Y ACCESOS
- 6 OBRAS PROBABLES PARA DETENCIÓN DEL PROCESO EROSIVO**
 - 6.1 Vertedero para la disipación de energía hidráulica
 - 6.2 Dique en pedraplén
- 7 CONCLUSIONES Y SUGERENCIAS**
 - 7.1 Conclusiones
 - 7.2 Sugerencias

8 REFERENCIAS BIBLIOGRÁFICAS

9 ANEXOS:

- “Un ejemplo de erosión retrocedente: la cascada de Agoyán”, Jorge Sevilla M., Primer Simposio Latinoamericano de Desastres Naturales, Quito, 1985
- « Un exemple d’importants glissements du terrain en Equateur », J. Sevilla M., 6to. Congreso Internacional de la AIGI, 06 au 10 aug. 1990, Amsterdam, Nederland.

Nota : Los recuadros sobre las copias de los papers son del autor de este informe.

CORPORACIÓN PARA LA INVESTIGACIÓN ENERGÉTICA, CIE

EL PROCESO DE EROSIÓN REGRESIVA DE LA CASCADA DE SAN RAFAEL Y LAS IMPLICACIONES SOBRE LOS DEPÓSITOS DE AGUAS ARRIBA y LAS OBRAS EXISTENTES

Autor: Vladimir Játiva Sevilla

Ingeniero en Geología (Universidad Central del Ecuador)

M.Sc. Ingeniería Geotécnica (Universidad de Bruselas, Bélgica)

1. RESUMEN EJECUTIVO

La Central hidroeléctrica Coca Codo Sinclair consta de Obras de Captación (Toma con vertederos y Desarenadores), Túnel de Conducción, un Embalse Compensador, Pozo vertical de Carga, Casa de Máquinas y Túnel de restitución de las aguas en el río Coca.

La Toma con 2 vertederos y las obras de desarenación se encuentran en el río Coca, a aproximadamente 19 Km aguas arriba de la Cascada de San Rafael siguiendo el talweg del río, estando la abscisa 0+000 en la ex cascada. El nivel de la base de la Toma está a la cota aproximada $c = 1275,50$ msnm (Ref. 2)

La Cascada de San Rafael, de una altura aproximada de 130 m (cota de la base en el río $c = 1030$ msnm y cota de la cima a nivel del agua $c = 1160$ msnm) comenzó su destrucción entre el 02 y 03 de octubre de 2019 con la formación de una chimenea en su costado izquierdo. La destrucción total se produjo el 02 de febrero de 2020 con el desplome de los materiales suprayacentes a las lavas por el peso de los sedimentos y baja resistencia del cascarón de roca volcánica. Ocurrió a una distancia aproximada de 150m aguas arriba de la posición de la cima de la antigua cascada.

El proceso erosivo de la cascada se atribuye a la conjunción de acciones naturales de erosión regresiva en los que intervienen además la fricción de los materiales arrastrados por el río; acciones mecánicas por choque de los bloques transportados en las crecientes especialmente y golpeteo permanente de las aguas en la base rocosa fracturada, lo que generó un socavamiento en la base y volúmenes importantes en posición de voladizo. A estos procesos externos se unen los de sifonamiento por percolación de aguas a través de los materiales permeables subyacentes al derrame lávico (como antiguas playas aluviales y avalanchas de escombros de una edad estimada en más de 19.000 años, a más de brechas volcánicas, piroclastos no consolidados) y fracturas del cuerpo lávico de tipo disyunción columnar y probables fisuras por la acción mecánica de los sacudones sísmicos como los ocurridos el 05 de marzo de 1987 y otros anteriores y posteriores.

La transformación de la cascada de San Rafael de cascada a túnel obedece a procesos naturales de erosión regresiva. La ocurrencia de este suceso natural fue vaticinada en 1985.

Una vez destruida la barrera natural de roca basáltica de San Rafael, se ha iniciado un proceso de erosión regresiva o remontante en los materiales sedimentados que son: avalanchas volcánicas y

luego sedimentos fluvio – lacustres los cuales, por su propio origen tienen baja resistencia a la erosión y cuyo límite propasa las obras de Toma y Desarenadores de la Central Coca.

Cálculos aproximados indican velocidades erosivas entre 3.19 m/s a 3.92 m/s las cuales son muy superiores a los valores de resistencia de los materiales de depósito, mayoritariamente de arenas y gravas con cantos rodados fluviales en menor proporción.

El proceso erosivo retrocedente tiende a llegar al perfil de equilibrio del río, debiendo vencer una altura de 285m en una longitud aproximada por el thalweg del río de 1,3% y caudales que varían entre 300m³/s a picos de 1600m³/s.

La erosión regresiva en los materiales de Avalancha volcánica 2 podría llegar al sitio de depósitos fluvio lagunares (menos resistentes aún a la erosión hídrica) en aproximadamente 5 meses (octubre a noviembre 2020) y si el proceso erosivo mantiene su tasa de transporte actual, podría llegar entre marzo a abril 2022 hasta la zona de obras de la CCCS. Estos datos han sido obtenidos con coeficientes extraídos de la literatura ante la falta de datos del sitio al igual que dimensiones obtenidas en la información disponible en escala 1 / 50.000

El proceso erosivo ha generado y generará gran cantidad de deslizamiento de los taludes con destrucción de las obras construidas, entre las que se hallan en riesgo poblados, escuelas, instalaciones agrícolas, ductos para petróleo, vías principales y accesos, puentes en vías principales, tarabitas.

Para afinar los resultados de las consecuencias de este proceso erosivo se recomienda el desarrollo de investigaciones in situ y análisis pormenorizado de las condiciones geológicas y geotécnicas del río y determinaciones de parámetros físico-mecánicos e hidráulicos para precisar los tiempos de avance hasta la Toma de la CCCS especialmente y también estudiar la posibilidad de la construcción de obras que retarden el proceso natural en curso.

2. BREVE DESCRIPCIÓN DE LA HISTORIA GEOLÓGICA DEL RÍO COCA ENTRE LA EX CASCADA DE SAN RAFAEL HASTA LA TOMA DE LA CCCS

El análisis de la Historia Geológica de un lugar permite obtener calificaciones geotécnicas de los materiales y de su comportamiento frente a las solicitaciones naturales y/o humanas a través de sus obras.

Modernamente se conoce que el río Coca toma ese nombre luego de la unión de los ríos Quijos y Salado. El río Coca fluye en dirección SW – NE y tiene al cráter del actual volcán El Reventador en su lado Norte, a 7 km de distancia, mientras que la ex cascada de San Rafael se ubica a lado ESE del cráter y a 9Km de distancia.

El valle del paleo río Coca probablemente se formó en épocas Pleistocénicas * por la erosión de los flancos de una probable falla geológica regional que permitió la erosión de los flancos y la conformación del cauce. Las discontinuidades geológicas son muy comunes en la zona.

** División temporal del período Cuaternario y que abarca un lapso ente -2,6 millones de años hasta aproximadamente 10.000 años*

En época del Pleistoceno existió un conjunto de edificios volcánicos cuyas actividades futuras modificaron el paisaje.

Por la presencia de emisiones piroclásticas en los 2 lados del actual río Coca se puede afirmar que en el Pleistoceno ya existió el río Coca, pero con un recorrido diferente al actual.

Estudios indican que en el Pleistoceno superior, (≈ 350.000 años, datación K/Ar, Ref. 1) el volcán Reventador emitió lavas, lahares y se produjo una enorme avalancha de escombros denominadas “Complejo Volcánico Basal” denominadas como “Avalanchas 1” y cuyo volumen se estima en $V = 20 \text{ Km}^3$ (Ref. 1).

Esos materiales son actualmente visibles en los costados N, S y W del actual volcán El Reventador. Aquellas avalanchas depositadas en su costado Este, fueron cubiertos por otros depósitos volcánicos más modernos.

En esa época, el aporte volcánico de lavas y de avalanchas de escombros (consecuentes al colapso de la ladera del lado Este del antiguo volcán) represaron al río Coca en varios lugares, desde aguas abajo de la confluencia del actual río Malo hasta un sector medio entre las poblaciones de Reventador y San Francisco; es decir, avanzaron aproximadamente 25 km desde el antiguo centro de emisión hoy no visible.

Procesos erosivos rompieron esos diques naturales y el antiguo río Coca bajó su nivel de base, erosionó dichos materiales hasta encontrar su nivel de equilibrio.

En época del Pleistoceno superior alto (≈ 30.000 a 20.000 años, dataciones C14, Ref. 1), el paleo volcán tuvo eventos eruptivos y aportó al paleo valle Coca con lavas, lahares, aglomerados volcánicos piroclastos y avalanchas de escombros. Al igual que la anterior unidad volcánica de avalancha, ésta segunda debió haber represado en varios tramos del río en eventos eruptivos. *“El último deslizamiento (de la ladera Este del actual volcán El Reventador) se produjo hace 19.000 años y originó el anfiteatro actual...”* (Ref. 1)

“Fuera del anfiteatro afloran lavas ...(de) una composición basáltica ... afloran directamente ... de los depósitos de avalancha de escombros o en el sector meridional (Sur) del volcán donde han confluído las coladas (de lava) más recientes.” (Ref. 1)

Las lavas y aglomerados volcánicos de esa época cuya edad se estima en 19.000 años fueron erosionados y nuevos flujos de basaltos represaron al río y formaron la actual Cascada de San Rafael cuya edad no ha sido definida con exactitud.

El paleo volcán Reventador fue destruido por colapso de su flanco sur-oriental por posible vaciado de la cámara magmática, por una probable violenta erupción volcánica y actividades sísmicas (terremotos) de gran energía. Parte de los productos de estos eventos, ubicados en la base del talud, fueron transportados por las aguas del río Coca con lo cual se aceleró el proceso de deslizamiento. Se estima que la segunda avalancha de escombros que destruyó el edificio del paleo Reventador, tuvo un volumen estimado de $V \approx 8 \text{ Km}^3$ (8000 millones m^3) (Ref. 1)

Los sucesivos procesos ocurridos en la cuenca del río Coca entre los Km 0 (ex cascada de San Rafael) hasta aproximadamente el Km 6,5 (Ver Mapas 1 y 2) con acumulación de materiales volcánicos (avalanchas, emisión de piroclastos y lavas) – erosión hidráulica – acumulación de materiales volcánicos, permitieron la acumulación de sedimentos en una gran laguna entre el Km 6,5 hasta varios kilómetros aguas arriba de la zona de obras de la Toma y Desarenadores. Esos materiales fluvio-lacustres tienen muy baja resistencia a la erosión hídrica y ocupan una longitud aproximada de 12,9 km.

3. EL PROCESO EROSIVO EN EL RÍO COCA

3.1 Materiales existentes

La erosión fluvial se presenta en los ríos y quebradas por la acción física de la fuerza tractiva del agua que vence la resistencia de los materiales, produciéndose procesos de socavación lateral y de fondo. Los procesos movilizan además de arcillas y limos, otros materiales como arenas, gravas, cantos y bloques, en las formas de acarreo y disolución, suspensión y acarreo de fondo.

En ríos como el Coca los volúmenes movilizados por erosión fluvial son altos, formando cauces relativamente anchos y con taludes escarpados. La distancia medida por el talweg del río Coca actual entre la ex cascada de San Rafael y las obras de la Toma y Desarenadores de la Central Coca Codo Sinclair, es de aproximadamente 19.4 Km medido en el Mapa Geológico El Reventador, (Ref. 5) En ese tramo afloran a nivel del río Coca actual los materiales que se indican en el Cuadro N° 1

Cuadro N° 1

TRAMO	LONGITUD APROXIMADA (Km)	MATERIALES AFLORANTES
0+000 hasta 1+500	1,5	Lavas basálticas y andesito-basálticas en las 2 márgenes, suprayacentes a depósitos de avalancha volcánica antigua (Avalancha 1) y al substrato rocoso de la Formación Misahuallí. En el margen izquierdo de la zona de la ex cascada, las lavas se encuentran inicialmente cubiertas en una longitud aproximada de 600m, por depósitos aluviales (cantos rodados, gravas, arenas) próximos al lecho fluvial y depósitos aluviales actuales en la playa. En la orilla derecha, en una longitud de 350m lo conforman materiales aluviales actuales que hacen de un “enchapado” aluvial no consolidado a suelto, sobre el basalto subyacente.
1+500 hasta 6+500	5,0	Orilla izquierda: Depósitos aluviales actuales en una longitud aproximada de 2,75 Km que sobreyacen a avalanchas de escombros volcánicos constituidos por bloques angulosos heterométricos, cantos rodados, gravas y arenas finas y medias mayoritariamente expuestas y piroclastos en general, cuya edad ha sido atribuida a 19.000 años. Son parte de la Avalancha de Escombros 2 indicados en las Referencias 1 y 5 Orilla derecha: Depósitos aluviales actuales en una longitud aproximada de 1Km y terrazas aluviales antiguas en una longitud de 2,5 Km. Depósitos de terrazas aluviales antiguas también entre los Km 4 a 6
6+500 hasta 19+400	12,9	Depósitos aluviales actuales que cubren a depósitos fluviales y lagunares más antiguos, compuestos por estratos no consolidados a poco consolidados de limos, arenas, turbas, rodados aglomerados. Son sedimentos aportados por los ríos Salado y Quijos a un paleo lago formado por el cierre del valle del río Coca ante eventos de avalanchas de escombros volcánicos y eruptivos con la formación de la cascada de San Rafael.

Los materiales antes descritos poseen niveles de litificación variados, desde materiales sueltos (depósitos aluviales y sedimentos lagunares) hasta depósitos ligeramente densificados o de mediana

densidad en la clasificación de Mecánica de Suelos, para los depósitos de avalanchas volcánicas y algunos depósitos de terrazas aluviales antiguas.

Por la composición granulométrica se podría indicar que son materiales de granulometría más fina (arenas finas, limos y arcillas) para los depósitos lagunares y de arenas finas a medias con sectores de arenas gruesas y clastos angulosos y eventuales bloques rocosos. Para los materiales aluviales, estratos de materiales aluviales, arenas finas a medias, limos y algunos sectores con suelos orgánicos han sido detectados en sondeos exploratorios.

Por las razones antes indicadas, los materiales presentan diferentes valores de resistencia a la erosión hídrica, siendo más susceptibles los depósitos fluvio-lagunares; un valor ligeramente mayor para los depósitos de Avalanchas volcánicas 2 y alta resistencia para los sectores de basaltos y avalanchas antiguas consolidadas.

También debe considerarse como de alta susceptibilidad a la erosión hídrica a los depósitos aluviales actuales pues sus cantos están sueltos y con mínima matriz arenosa o limosa entre ellos.

3.2 Generalidades de la erosión

La erosión o denudación es la remoción de partículas de rocas o suelos por un agente dinámico. La erosión y el transporte son 2 procesos simultáneos.

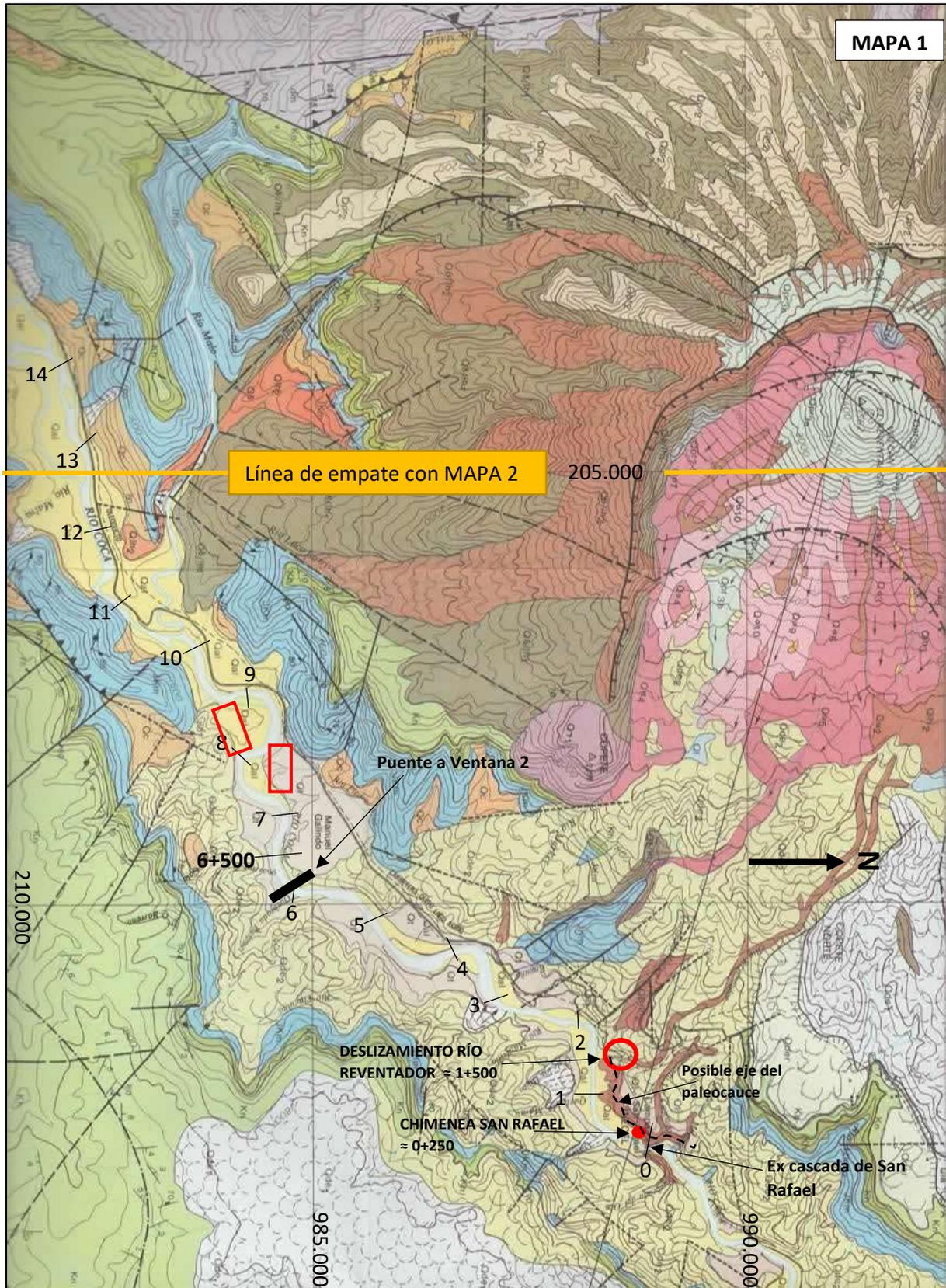
En el caso que nos ocupa, el agente dinámico es el agua del río Coca y también lluvias en la cuenca.

Los factores preponderantes para que se genere erosión en los materiales rocosos o depósitos son, entre los principales:

- Cohesión del material (muy alta en basaltos, baja en depósitos de Avalancha de Escombros volcánicos y muy baja en estratos de arenas finas aluviales)
- Capacidad de carga del agente dinámico. El río Coca ha registrado caudales pico superiores a 1300 m³/s es decir; importante capacidad de arrastre.
- Forma del transporte del material erosionado: por suspensión, saltación, arrastre, tracción; está en función de la velocidad del agente erosivo.
- **Velocidad del agente erosivo.**

La velocidad de una corriente fluvial es una función de la pendiente S_0 del río; de su radio hidráulico R_H ; de su coeficiente de rugosidad η . Para Ven Te Chow (Ref. 10 a) el coeficiente de rugosidad η “... no tiene un método exacto para su definición ... y depende de varios factores...”. “Reconociendo las severas limitaciones (para definir) los factores del coeficiente de rugosidad, Cowan desarrolló un proceso para estimar el valor de η ” (Ref. 10 b): El valor de $\eta = \sum (\eta_1 \rightarrow \eta_4) \eta_5$; es decir por coeficientes por el tipo de material del lecho, del grado de irregularidad, de las variaciones de la sección, de la presencia de obstrucciones y existencia o no de vegetación.

Cabe indicar que la velocidad de la corriente no es constante en toda la sección inundada y que la velocidad media de la corriente es tan solo 6/10 a 8/10 de la velocidad máxima, la que no necesariamente está en el centro del río sino que oscila pasando de una a otra orilla, y en la vertical también varía.



Fuente geológica:

Mapa del Estudio vulcanológico de El Reventador, INECEL – ASOCIACIÓN DE FIRMAS CONSULTORAS, 1988, Quito.

Escala original:

E = 1/50.000.

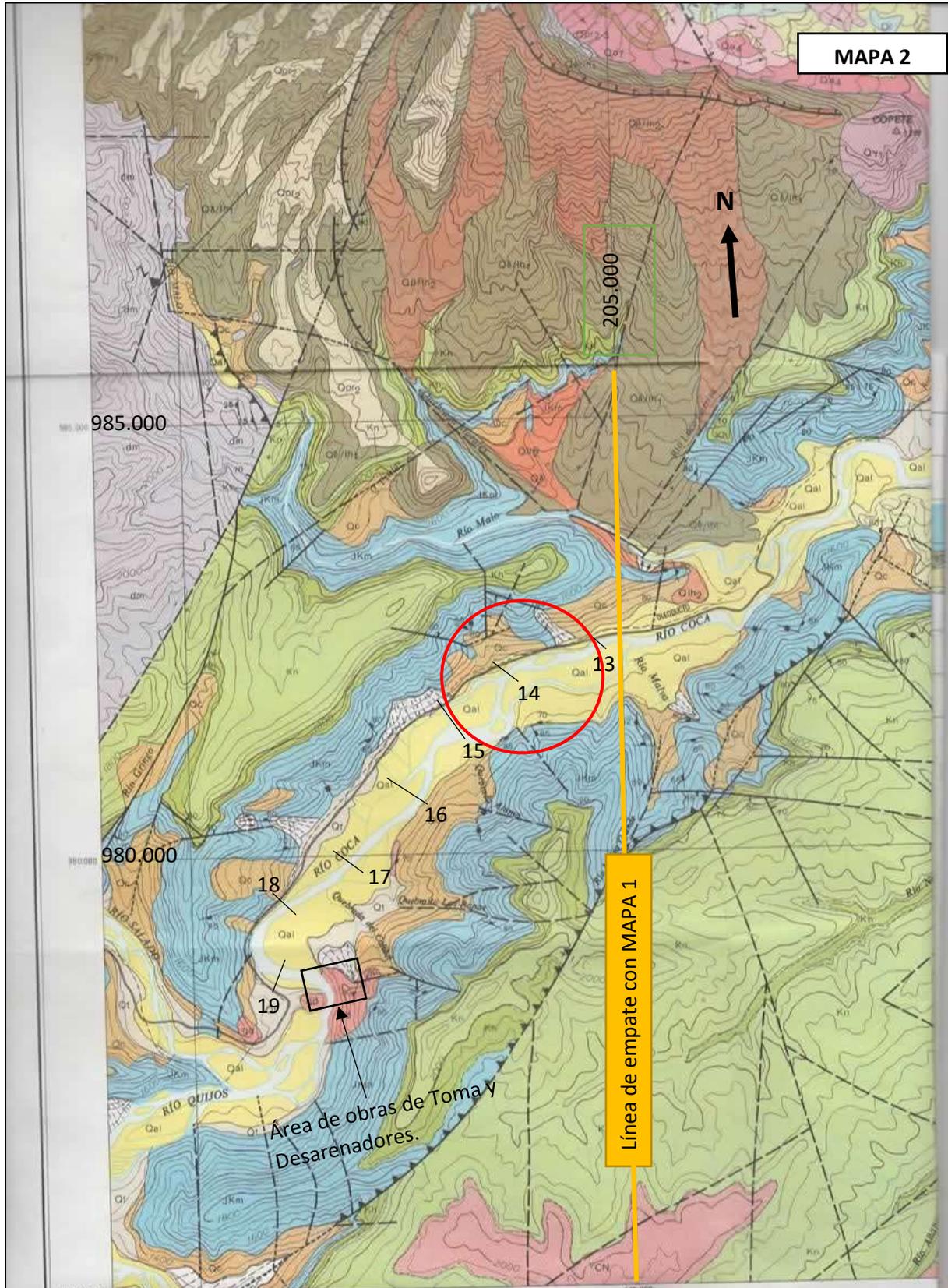
Coordenadas UTM:

Datum mapa SAM – 56

5 ___ =

Km 5 desde la ex cascada de San Rafael

VJ 2020 04 25

**Fuente geológica:**

Mapa del Estudio vulcanológico de El Reventador, INECAL – ASOCIACIÓN DE FIRMAS CONSULTORAS, 1988, Quito.

Escala original:

E = 1/50.000.

Coordenadas UTM:

Datum mapa SAM – 56

19 ___ =

Km 19 desde la ex cascada de San Rafael

VJ 2020 04 25

3.2.1 Dinámica fluvial aproximada para el río Coca.

- Cota aproximada de la base de la ex cascada de San Rafael = 1030 msnm
- Cota de la base de la Toma de la Central Coca = 1275.50 msnm
- Diferencia de altura $h = 245$ m.
- Longitud de recorrido: $L \approx 19.000$ m
- Pendiente $M = 1,289\% \approx 1,29\%$ o un valor $\theta = 0.739^\circ$ Valor $S_o = 0.0129$

Con uso de la ecuación de Manning (Ref. 9) para corrientes en régimen uniforme* la velocidad del agua se expresa por

$$v = 1/n (R_H^{2/3} S_o^{0.5})$$

donde:

n = Coeficiente de Manning para grandes ríos; se toma el coeficiente de Cowan (Ref. 10b) = 0.0978;

R_H = radio hidráulico = 6.32 m

S_o = tangente del ángulo de inclinación = 0.0129

La velocidad media del flujo: **$v = 3.96$ m/s**

Con uso de la ecuación de Chézy (Ref. 9) para corrientes en régimen uniforme* la velocidad del agua se expresa por

$$v = (8g/f)^{0.5} R_H^{0.5} S_o^{0.5}$$

donde:

g = aceleración de la gravedad en el sitio $g = 9,774$ m/s² (para paralelo 0° y 2000msnm);

f = coeficiente de fricción en flujo totalmente turbulento para rugosidad $\epsilon = 400$ mm; $f = 0.6277$;

R_H = radio hidráulico = 6.32 m

$S_o = 0.0129$.

Con la ecuación de Chézy se obtiene que **$v = 3.19$ m/s**

** Las ecuaciones de Ingeniería de Ríos que permiten calcular las velocidades del agua, necesitan datos reales del río, los cuales no se posee al momento de la ejecución de este reporte ya que no ha sido posible obtenerlos en trabajos de campo ni se los ha podido ubicar en la limitada bibliografía sobre el tema.*

3.2.1.1 Comentarios

- Las velocidades del flujo calculadas son homogéneas.
- Las velocidades varían según la sección del río.
- La pendiente del río puede disminuir o aumentar según la sección del río y por ende su velocidad.
- Las velocidades calculadas de $v = 3.96$ m/s y 3.19 m/s son altas para el tipo de materiales existentes en el lecho del río Coca y, por tanto, está asegurada la erosión en el valle. Para comparación, en el Cuadro N° 2 se indica las velocidades máximas del agua para generar erosión en diferentes materiales.

Cuadro N° 2

MATERIAL	Velocidad del agua para iniciar erosión y transporte (m/s)
Arena fina o limo con poca o ninguna arcilla	0.30 a 0.60
Arenas finas y limos	0.4 a 0.6
Arcilla arenosa	0.5 a 0.75
Arcilla	1,2
Grava fina	1.5 a 2.0
Grava gruesa	2.0 a 3.5
Pizarra	1.5
Mampostería	4.5
Concreto y Roca sana	4.5 a 7.0

Fuente: Internet.

Obsérvese que en las arenas y gravas (materiales mayoritarios en los depósitos de Avalancha volcánica 2) la velocidad máxima del agua para generar erosión es de 3.5 m/s y la mínima de 0.3 m/s. En los depósitos fluvio lacustres, las arenas y limos tiene valores de erosión entre 0,3 m/s a 0,6 m/s y, por tanto, son materiales de muy fácil erosión y transporte.

- Las velocidades calculadas son aproximadas y han sido obtenidas considerando al río como un canal; los cálculos no han toma en cuenta la presencia de meandros y desniveles que varían la energía cinética del agua. De todas maneras, estas velocidades son un indicativo de alto poder erosivo hidráulico de los materiales de los depósitos.
- Debe desarrollarse cálculos de Hidráulica de Ríos que defina con mayor precisión y propiedad, a las velocidades aquí indicadas para los cual debería emprenderse, a la máxima brevedad posible, con modelos y ensayos in situ.
- Los 2 valores de la velocidad antes indicados son importantes para la zona de basaltos de la cascada que por su alta resistencia mecánica (alta cohesión) ha resistido un aproximado de 4.000 (?) años sin haber sido destruida.
- La erosión del fondo y laterales del río generan una especie de rápidas que aparentan ser una barrera para el proceso erosivo retrocedente pero esas barreras muy probablemente desaparecerán ante caudales de crecida ordinarios y más rápidamente si son extraordinarios.

3.3 EN LAVAS BASÁLTICAS

Las coladas de lava de basalto emitidas por el volcán El Reventador, siguieron la línea o quebrada de mayor pendiente.

Tazieff y Derruan (Ref. 7, a) aseguran que las coladas de basalto fluyen y desciende “*adquiriendo una sección mayor y frenando (en su descenso) con el enfriamiento y solidificación (posterior). Una velocidad (del flujo) de algunos metros por minuto puede ser considerado como normal. Una colada completamente inmovilizada, solidificada en superficie, puede durar fluida al interior durante muchos meses. La solidificación en las lavas básicas o intermedias se efectúa ... pasando de líquido a sólido, en una veintena de grados centígrados; por ejemplo, alrededor a 1100 grados, ... La colada se inmoviliza y se reviste de una costra que se agrieta y cae en bloques en el curso de la progresión, constituyendo una cama escoriácea sobre la cual la colada avanza. Esta es la ‘brecha de progresión’.* Las ‘brechas de progresión’ ... *contrastan con el aspecto masivo, compacto, del interior.*” “(Sus)...

irregularidades pueden tener formas diferentes (tipo 'tripas' de pahoehoe o rugosas tipo aa. Pueden tener muchos metros de altura"

Las lavas se fragmentan en pedazos de tamaños muy variados, desde gránulos hasta bloques compactos. Una de las formas de fragmentación de las lavas se produce por disyunción columnar térmica en células poligonales. Esta disyunción es *"atribuida a la convección (térmica) ... y se produce a alrededor de los 600° C y la temperatura ambiente..."* (Ref. 7, b). Las columnas de disyunción tienen su eje vertical *"y perpendiculares a las superficies de enfriamiento* (Ref. 7, b)

El proceso de flujo de las lavas básicas y medias y su enfriamiento posterior, generan, en la misma colada de lava, fragmentaciones diferentes por condiciones diferentes de transferencia de calor desde la masa ígnea hacia el exterior. Las intensas lluvias de la zona y el frío del viento del cañón del Coca debieron acelerar la fracturación de las coladas de lava, especialmente en su sector superior.

La fragmentación natural de las lavas es muy importante para los análisis de erosión, pues las fisuras y fracturas constituyen caminos preferentes para la percolación del agua. Estas fisuras pueden haber generado valores de permeabilidad del orden de $1 \times 10^{-2} < K < 1 \times 10^{-1}$ cm/s o mayores.

En superficie las lavas también se descomponen en fragmentos de granulometría de grava y arena, con forma de escamas. Se atribuye su origen a la *"... alteración diferencial, por lavado (lixiviación) de la mesostasea microlítica o vidriosa"* (Ref. 7, c)

Las fracturas y fisuras naturales formadas en las coladas de lava disminuyen su resistencia a la compresión simple y a la erosión. Si a ello sumamos la presencia de sacudones sísmicos, la formación de planos preferentes de rotura de la masa basáltica es muy probable, permitiendo percolaciones de agua subterránea importantes.

3.3.1 La transformación de la cascada de San Rafael

Coladas de lava provenientes del cráter de El Reventador siguieron el curso del río Reventador y otras quebradas y alcanzaron al río Coca y lo taponaron. Este flujo lávico basáltico y andesito-basáltico viscoso y fracturado de una longitud estimada del recorrido de 6 Km desde el cráter, cubrió los depósitos aluviales y de avalanchas volcánicas del paleo río Coca y contribuyó con la altura de una presa natural en una secuencia de materiales desde sueltos a soldados en la base; lavas columnares regulares y lavas columnares muy alteradas.

La longitud de estos depósitos en el paleo cañón del río Coca es de 1,8 Km aproximadamente, medidos desde la desembocadura del río Reventador en el Coca hasta los afloramientos de lavas visibles aguas abajo del sitio de la ex cascada.

Se estima que el volumen de lava pudo tener un $V = 18 \times 10^6$ m³ de los cuales han quedado un estimado de $V = 10 \times 10^6$ m³ entre el sitio de la ex cascada de San Rafael y la desembocadura del río Reventador.

No se ha encontrado un documento de estudio vulcanológico de las lavas que indique fehacientemente su edad y si fue uno o varios los flujos descendidos, detalle geológico importante correlacionable con la condición de permeabilidad.

Las lavas de la zona de la Cascada tienen fracturación en direcciones múltiples y zonas de columnas basálticas y rocas con alteración en los laterales del derrame. En la base de la cascada ha sido evidenciada la presencia de una caverna semiesférica creada por la erosión hídrica y ayudada por el nivel de fracturas de la lava.



Cascada de San Rafael en imagen satelital. Los 2 círculos, son infierrillos por erosión fluvial y el ancho de la cima de la cascada por la cual hubo flujo, se estima en 110m por cobertura de aluviales sobre la roca basáltica.

Fuente: Google Maps; Fecha imagen: 12 23 2013.

La cascada tuvo las siguientes dimensiones aproximadas:

- Cota aproximada de la base: 1030 msnm (Ref. 3)
- Cota aproximada del flujo de agua: 1160 msnm (Deducido)
- Cota estimada del flujo lávico: 1200 msnm
- Ancho estimado de la cascada en su cima: 110 a 120 m

Del Mapa 1 se calcula que la erosión de las aguas abrasivas del río, destruyeron una altura de lava de aproximadamente 40m en un tiempo estimado (no se ha ubicado la edad de estas rocas) de 2000 años.

El flujo lávico de basalto tiene una extensión de 450m (Ref. 5) y abarca a la zona de la cascada y depósitos aguas abajo. Ver Mapa 1

3.3.1.1 El proceso erosivo retrocedente y sus implicaciones

El inicio de la destrucción de la cascada de San Rafael comenzó con la formación de una chimenea a manera de dolina ubicada en el margen izquierdo del río y coincidente con el thalweg del río Coca antiguo. Esta chimenea se encontró a aproximadamente 150m aguas arriba de la cascada y a unos 1200m aguas abajo de la desembocadura del río Reventador actual.

En la siguiente secuencia de imágenes satelitales, al pie de la foto se detalla el proceso erosivo y datos de la magnitud de este evento natural.



Foto 1 Obsérvese la posición de la cascada de San Rafael el 2019 08 30 y la zona marcada en círculo rojo.
Escala aproximada E = 1/20.000 Fuente de la imagen: [www. Planet.com/stories](http://www.Planet.com/stories)



Foto 2 En la imagen satelital se indica en el centro del círculo rojo una dolina o chimenea, la cual pudo haber sido formada el 02 o 03 de octubre / 2019 pocos días antes de la fecha de la imagen. Dista de la zona de la cascada una $L \approx 150\text{m}$

La dolina o chimenea coincide con el talweg del antiguo río Coca y tuvo a la fecha, un diámetro aproximado de $D = 55\text{ m}$. Considerando que la altura del hundimiento de forma cónica fuese de 20m , el volumen de materiales descendido fue de $V = 47.000\text{ m}^3$. Este volumen inicial fue arrastrado por las aguas existentes bajo el farallón de lava en un tiempo estimado de 40 días (hasta el 2019-11-14); es decir, a esa fecha las aguas subterráneas pudieron tener una capacidad de transporte inicial de $C = 1175\text{ m}^3/\text{día}$. Escala aproximada E = 1/20.000
Fuente de la imagen: www. Planet.com/stories



Foto 3 El 2019 12 29 se observa una ampliación del volumen de la dolina o chimenea que a la fecha tuvo un diámetro medio aproximado de 80m. Nótese que le río Coca mantiene su curso sin desviar sus aguas hacia la dolina. Escala aproximada $E = 1/20.000$. Fuente de la imagen: [www. Planet.com/stories](http://www.Planet.com/stories)



Foto 4 Colapso total de la dolina o chimenea. La intercepción entre la pared derecha de la dolina (por incremento del volumen de materiales desplomado desde ésta) con el río, produjo el desvío de sus aguas con ingreso de las mismas por la chimenea, generando un proceso acelerado de erosión regresiva y un gran deslizamiento de los taludes circundantes y pérdida de la cascada el 2020 02 04 con formación de un puente natural. La chimenea de forma cónica, de un diámetro de $D = 100\text{m}$ en superficie y una altura hasta la base del río de $H = 130\text{m}$ desplazó un volumen aproximado de $V = 340.000\text{ m}^3$ a los cuales se debe añadir el volumen de los materiales deslizados ubicados sobre el borde de la chimenea (estimados en $V = 100.000\text{m}^3$) es decir; el V total aproximado pudo ser de $V_t = 440.000\text{ m}^3$. Luego del 2020 02 04 el río Coca tomó curso por debajo de la antigua cascada y desplazó aguas abajo todos los materiales desplomados de la chimenea y de la ladera deslizada. La capacidad de transporte del río entre el 2019 10 04 hasta el 2020 02 05 (121 días) se estima en $C \geq 3600\text{ m}^3 / \text{día}$. Escala aproximada $E = 1/20$. Fuente de la imagen: www. Planet.com/stories



Foto 5 Inicio de la erosión regresiva en el lecho y los taludes del río Coca, con deslizamientos en los 2 márgenes y profundización del lecho del río debidos a baja cohesión de los materiales aluviales y piroclastos, alta pendiente del fondo y caudales voluminosos y rápidos. Escala aproximada E = 1/20.000 Fuente de la imagen: [www. Planet.com/stories](http://www.Planet.com/stories)

La chimenea o dolina formada entre el 02 al 04 de octubre/2019 ubicada a unos 150 m del sitio de la ex cascada de San Rafael y sobre el eje del thalweg del antiguo río Coca por el cual fluyeron los derrames lávicos (Ver Mapa 1) permite considerar como válida la hipótesis de la existencia de zonas vacías tipo “tubos de lava” y/o procesos erosivos por agua y transporte de materiales de fácil evacuación.

Esas zonas vacías y los sectores de alta permeabilidad a través de miles de años debieron generar procesos de socavación por erosión interna.

Esta comunicación subterránea entre la base de la cascada y el hundimiento o ‘chimenea’ permite observar un cascarón lávico.

Aguas abajo de la Cascada, en una longitud aproximada de 350m afloran rocas basálticas litológicamente similares a las de la cascada y cubren en una corta longitud, a lavas y piroclastitas de la Formación Misahuallí y a los depósitos de Avalancha 2. Esta cobertura es similar a un ‘enchapado’ basáltico sobre las rocas Jurásico-Cretácicas de los taludes.

El proceso de erosión de esas lavas probablemente fue similar al ocurrido en la actualidad en la zona de la cascada.

Por lo indicado, se atribuye a causas estrictamente geológicas y naturales los procesos de cambio de la cascada de San Rafael a túnel.

Implicaciones geotécnicas e hidráulicas

La masa basáltica derramada en el río Coca por el volcán El Reventador construyó una presa natural que frenó la acción erosiva del río Coca. Su desaparición permite que dicho río busque su perfil de equilibrio y erosione y transporte los depósitos aguas arriba compuestos por Avalancha Volcánica 2, Depósitos aluviales antiguos y los depósitos fluvio-lagunares sobre los que en parte se asientan las obras de Toma y Desarenadores de la Central Coca.

El fenómeno natural producido en la cascada de San Rafael fue advertido en 1985 cuando se produjo un retroceso de la cascada de Agoyán y se estudió su reforzamiento. (Ref. 6 y 7)

3.4 EN DEPÓSITOS DE AVALANCHA VOLCÁNICA 2



Los materiales que conforman la Avalancha Volcánica 2 (que han sido observados en las orillas del río Coca entre los km. 1.5 hasta el Km. 6.5 y en ríos tributarios (Ver Mapa 1) “... presenta bloques de dimensiones muy variadas incluidos en una matriz muy heterogénea.... incluye megabloques...” (Ref. 1) y tuvo un origen con una “importante contribución de una actividad volcánica explosiva al momento de iniciarse el fenómeno” (Ref. 1)

Los materiales expuestos en el talud izquierdo del río Piedra Fina 2 (UTM: 209413 E / 9'985995 N; WGS – 84) (ver foto anterior) analizados visual-manualmente son desde arriba hacia abajo:

TRAMO (m)	ESPESOR (m)	DESCRIPCIÓN
0.00 a 3.00	3.00	Arena fina volcánica, color café rojizo, baja densidad, granulometría entre 0.5mm a 1.5 mm en un 60% al 70% y limos oscuros no plásticos entre el 30% al 40% . Alta permeabilidad. Baja a incipiente compacidad.
3.00 a 8.00	5.00	Arenas (60%) y gravas volcánicas (40%) angulosas inmersas en las arenas. Densidad media. No consolidados. Permeables.
8.00 a ≈ 18.00	≈ 10.00	Arena fina volcánica, color café rojizo, baja densidad, granulometría entre 0.5mm a 1.5 mm en un 60% al 70% y limos oscuros no plásticos entre el 30% al 40% . Alta permeabilidad. Baja compacidad.

En la base del talud en un coluvio- aluvio de la playa fluvial se observan mega bloques andesíticos esporádicos y sueltos y afloramientos de rocas máficas de grano fino altamente fracturadas y rocas ígneas fracturadas con alto contenido de cuarzo, rojizas y de grano fino. Los mega bloques podrían haber sido derrumbados por el terremoto de marzo 1987.

El talud tiene una inclinación aproximada con la horizontal entre 60° en la base a 80° en la zona superior; presenta fracturas por arranque y numerosas cárcavas de erosión, lo que indica su susceptibilidad a ser erosionadas por el agua.

En la investigación bibliográfica no se ha encontrado parámetros físicos, mecánicos o geofísicos que permitan estimar su resistencia mecánica y a la erosión hidráulica.

Se considera necesario efectuar ensayos de erodabilidad hídrica en modelos in situ o en laboratorio para obtener parámetros que permitan estimar, con algún grado de precisión, el tiempo de erosión de estos materiales ante caudales y gradientes hidráulicos variados.

El volumen estimado de estas avalanchas es de $V = 75 \times 10^6 \text{ m}^3$ para una cuenca trapezoidal de 40m de ancho en la base, taludes a 70° y altura del depósito de 130m

3.4.1 Velocidad de avance erosivo en estos depósitos volcánicos.

Versión verbal de un Ingeniero que acompañó al autor de este reporte quien manifestó:

“La cascada de San Rafael ‘desapareció’ el 30 de enero (2020) y el 11 febrero 2020 se midieron 400m de retroceso” lo que indica un una velocidad de avance de 33 m/día en lava fracturada y de avalancha volcánica.

“Al 08 de abril se produjo el deslizamiento de los taludes del valle y el arrastre de las tuberías del SOTE, OCP y poliducto” La longitud estimada es de 1080m y el lapso transcurrido, de 56 días, es decir una velocidad de erosión en el río de 19 m/día.

Al 08 de mayo 2020 la erosión regresiva ha retrocedido hasta el Km 2.5 (Mapa 1) o punto UTM 9'987200N / 211300E (WGS 84) en una longitud aproximada de $L = 820\text{m}$. El tiempo transcurrido es de 30 días; por tanto, la velocidad de avance de la erosión en los materiales de Avalancha volcánica 2 sobre los que fluye el río Coca en este tramo, es de $v = 27 \text{ m/día}$



Fecha: 08 mayo 2020. Vista de la rápida formada en el río Coca en su avance regresivo. Caudal estimado a esa fecha: $300\text{m}^3/\text{s}$. Ubicación aproximada: Km 2.5 (Mapa 1) o UTM 9'987200N / 211300E (WGS 84) . Materiales: arriba: playa aluvial de un espesor aproximado de 3m a 5m; Composición: cantos rodados $20\text{cm} < D < 40\text{cm}$ sueltos; subyacentes: arenas y gravas con pocos limos y eventuales bloques. Cortesía de Ing. Freddy Calahorrano.



Fecha: 08 mayo 2020. Vista de la rápida formada en el río Coca desde otro ángulo. Ubicación aproximada: Km 2.5 (Mapa 1) o UTM 9'987200N / 211300E (WGS 84). Altura estimada del talud deslizado: $h \approx 65$ a 75 m. Materiales: arenas y gravas con pocos limos y eventuales bloques de Avalancha 2 y aluviales no consolidados en superficie. Cortesía de Ing. Freddy Calahorrano.

3.4.1.1 Análisis:

- a) Si el avance de la erosión sobre los materiales de Avalancha volcánica 2 ha tenido una velocidad media de $v_m = 23$ m/día $[(19 + 27) / 2]$ y considerando un comportamiento erosivo lineal hacia aguas arriba, el tiempo necesario para que la erosión llegue **al Km. 6** (zona límite con los Depósitos fluvio-lacustres altamente erosionables) sería de:

$$\Delta L = 6 \text{ km} - 2.5 \text{ km} = 3.5 \text{ km};$$

$$t = \Delta L / v_m = 3500 \text{ m} / 23 \text{ m/d} = 152 \text{ días} \approx 5 \text{ meses}$$

Tiempo de arribo estimado: **octubre / 2020**

- b) La velocidad de los procesos erosivos regresivos en los ríos, varía según la composición geológica del materia de las laderas, de la pendiente del fondo del río, de la composición geológica del lecho en proceso de erosión, del caudal circundante, de la presencia o no de meandros o codos, vegetación, obstáculos antrópicos, entre otros.
El calculo anterior ha sido desarrollado sobre la base de observaciones del avance y los tiempos de estos, pero predecir el avance implica conocer con detalle las condiciones geológicas del futuro lecho fluvial, valores confiables de coeficientes de fricción, granulometría de los materiales y otros parámetros geotécnicos que a la fecha se desconoce su existencia y caudales medios y máximos.
- c) El cálculo actual considera como de litología homogénea al depósito de Avalanchas de escombros 2 y bajo ese supuesto se ha estimado un posible avance erosivo diario.

- d) El valor del caudal circulante es de fundamental importancia en los procesos de erosión en general y más en erosión regresiva.

Los especialistas en hidrología podrían prever los caudales máximos del río Coca para los siguientes meses.

En la siguiente foto la impronta (zona del talud limpia de vegetación) de una creciente estimada en $600 \text{ m}^3/\text{s}$ ocurrida el 2020 05 03. Tres días después, el caudal observado en la fotografía se estimó en $300 \text{ m}^3/\text{s}$



2020 05 08 Nivel de creciente del río Coca en Km. 2.7 aprox. (Mapa 1)

Altura aproximada de la creciente sobre el nivel de agua actual: $H \approx 4 \text{ m a } 5 \text{ m}$.

La creciente, de un $Q \approx 600 \text{ m}^3/\text{s}$ ha sido registrada el 2020 05 03

VJ 2020 05 07 Foto 1764

3.5 LA EROSIÓN EN DEPÓSITOS FLUVIO-LACUSTRES

Estos materiales han rellenado el valle del río Coca entre el Km 6.5 hasta el Km 19.4 en la zona de la Toma. Esta obra de desviación se encuentra a aproximadamente 750 m aguas abajo de la convergencia de los ríos Salado y Quijos. Estos sedimentos rellena también la parte final de estos ríos. (Ver Mapas 1 y 2) en una longitud no determinada.

Tomando como guía el Informe de Factibilidad, Anexo P (Ref. 8) se conoce las siguientes características de estos depósitos y su posición en el valle bajo las zonas de la Toma y Desarenadores.

UBICACIÓN, DIMENSIONES Y PARÁMETROS FÍSICO-MECÁNICOS DE SEDIMENTOS EN ZONA DE LA TOMA

COTAS TECHO (msnm)	PROF. Z (m)	ESPESOR (m)	VELOCIDAD SÍSMICA (m/s)	COMPOSICIÓN	NOTA
1252	12	12	< 100 160	Material 1: Cantos rodados, gravas, arenas. $\gamma = 2 \text{ T/m}^3$; $c' = 0 \text{ T/m}^2$; $\varphi = 30^\circ$; $E = 3000 \text{ T/m}^2$; $K = 2.7 \times 10^{-4} \text{ cm/s}$	
1240	21	9	< 100	Material 2: Limo gris verdoso $\gamma = 1,9 \text{ T/m}^3$; $c = 10 \text{ T/m}^2$; $\varphi = 0^\circ$; $E = 2500 \text{ T/m}^2$; $K = 1 \times 10^{-7} \text{ cm/s}$	
1231	89	68	250	Material 3: Cantos rodados, gravas, arenas con algunos bloques. $\gamma = 2,1 \text{ T/m}^3$; $c' = 0 \text{ T/m}^2$; $\varphi' = 40^\circ$; $E = 10.000 \text{ T/m}^2$; $K = 5 \times 10^{-6} \text{ cm/s}$	1
1163	112	23		Material 4: Arena fina gris y limos con gravas. $\gamma = 1.9 \text{ T/m}^3$; $c' = 5 \text{ T/m}^2$; $\varphi' = 34^\circ$; $E = 6000 \text{ T/m}^2$; $K = 2.7 \times 10^{-7} \text{ cm/s}$	1
	150		≈ 150		
	195		≈ 310		

NOTAS:

1: Posible error de transcripción en defecto, del valor de la permeabilidad K.

Fuente: Ref. 8, b y c

En general, estos depósitos están conformados por estratos de limos, arenas y aluvios y ha sido medido su espesor en varios sondeos exploratorios, destacándose que "... en la zona del Morro, a la izquierda, más de 200 m de aluviales y fluvio-lacustres ... de los cuales 70m son material aluvional..." (Ref. 8, a)

En la página 37 de la Ref. 8 se indica: "... La permeabilidad del colchón que rellena el paleocauce es bastante alta hasta muy alta en los estratos de granulometría gruesa, en los cuales se intercala, en la parte superior, una capa continua de limo sobreconsolidado de espesor entre 3 a 6m..."

Para todo el tramo de 12,9 Km y considerando un valle de sección trapezoidal con 40m de base, taludes a 45° y una altura $h = 150 \text{ m}$ del espesor de los sedimentos acumulados en el paleo valle, se tendría un $V > 367 \times 10^6 \text{ m}^3$

3.5.1 Erodabilidad

La composición de estos depósitos arenosos, limosos y con niveles de aluvios no consolidados todos, permite aseverar que la erodabilidad de estos sedimentos podría ser de velocidad muy alta, con alta probabilidad mayor a la de los depósitos de Avalancha volcánica 2.

La falta de estudios sobre el nivel de resistencia de estos sedimentos a la erosión hídrica **torna imprescindible la ejecución de ensayos in situ** para obtener parámetros que definan su velocidad erosiva hidráulica.

Trasladar factores o valores de realidades geológicas diferentes a las de la zona, pueden conllevar grandes errores para cuya remediación, parece no existe el tiempo suficiente.

3.5.2 Velocidad erosiva

No existen elementos que permitan emitir una opinión ni aproximada sobre este aspecto en estos sedimentos.

Bajo el supuesto no consentido de que la velocidad erosiva en estos depósitos fluvio-lacustres fuera similar a la de las Avalanchas volcánicas ($v_m = 23$ m/día), el tiempo de arribo de la erosión para la longitud de 12.9 Km hasta la base de la Toma de la CCCS podría ser de:

$$t = 12.9 \text{ km} / 23\text{m/d} = 18,7 \text{ meses (desde Km 6.5 al 12.9)}$$

es decir, hipotéticamente la erosión regresiva podría arribar a la base de la Toma entre los meses de **marzo a abril / 2022**

Debe recalarse que por la composición de los sedimentos fluvio – lacustres, la velocidad erosiva podría ser mayor a la medida en algunos tramos de la Avalancha volcánicas 2.

3.5.3 Puente de Acceso a Ventana 2

Este puente, de $L=130\text{m}$, se localiza en la abscisa 6+750 medido desde el eje de la ex cascada de San Rafael (Mapa 1) y según comentarios sus estribos han sido cimentados sobre pilotes.

No ha sido posible acceder a informaciones geológicas – geotécnicas sobre los estudios para la cimentación de esta obra.

Versiones verbales aseguran que han sido realizadas 2 perforaciones exploratorias, 1 para cada estribo. En el sondeo del margen derecho han sido encontradas 70m de materiales aluviales y lagunares y la cimentación ha sido mediante pilotaje (se desconoce la profundidad de estos) con resistencia probablemente a la punta. Otras versiones indican que fueron pilotes a fricción y que su longitud fue de 20m

3.5.3.1 Análisis

Ante un proceso erosivo regresivo, la morfología del río en el sector del puente afectaría en mayor grado a su estribo derecho, pero con las magnitudes de la socavación observada en los tramos del sector del río Reventador (taludes deslizados de 70m de altura estimada) y otros en la zona del Km 2.5 de más de 50m, puede visualizarse que la cimentación del puente fallaría con solo 10 m de erosión de los taludes.

4. MORFOLOGÍA FLUVIAL

Entre la ex cascada de San Rafael y el sitio de las obras de la Toma y Desarenadores de la Central Coca Codo Sinclair, CCCS, el río tiene una longitud medida por su thalweg de 19,4 km medido en los Mapas 1 y 2 (Ref.5)

En la carta topográfica (Ref.4) se observa que el actual río Coca tiene un flujo con tramos curvilíneos combinado con tramos rectilíneos y un tramo anastomosado relativamente pequeño de 4Km.

Lojtin (Ref. 11) ha propuesto la siguiente clasificación por tramos de un río:

Tipo de cauce	D/S_o	F_r
Alta Montaña	>10	>1
Montaña	>7	0.7 a 1.0
Falda de montaña	>6	0.45 a 0.7
Intermedio	>5	0.2 a 0.45
Planicie río caudaloso	>2	0.7 a 1.0
Planicie río poco caudaloso	>1	0.44 a 0.55

Siendo F_r = Número de Froude expresado por $F_r = U / (g \cdot d)^{0.5}$

Donde: D = diámetro medio de las partículas del fondo, [m]

S_o = Pendiente del tramo [m/m]

U = Velocidad media del flujo

D = tirante medio del agua

g = aceleración de la gravedad en el sitio

4.1 Cauce actual

En dirección del flujo desde las obras de Toma (Km 19.4) de la CCCS hasta la confluencia de los ríos Coca y Malo en el Km 10.2 (L = 9.2 Km) el cauce puede ser clasificado como **Intermedio y de Falda de Montaña** ($D/S_o = 5,75$) y $Fr = 0.27$) y como de **Falda de Montaña** entre Km 10.2 hasta el sitio de la cascada de San Rafael (Km. 0)

4.2 Cauce anterior

No se conoce el thalweg del antiguo río Coca pero suponiendo que siguió el del río actual y ante un proceso erosivo regresivo total, la longitud del recorrido sería de 19,4 Km; el desnivel entre la base de la Toma (1275,5 msnm) y la base de la cascada (1030 msnm) dan una diferencia de altura de 245.5 m

Para esos valores, la relación $D/S_o = 23.7$ califican al cauce como **río de alta montaña**. Para ese tramo y considerando una velocidad media del flujo de $v = U = 3.19$ m/s (valor calculado con aplicación de la ecuación de Chézy) el $Fr = 0.7$ es decir, **río de falda de montaña a río de montaña**.

La calificación del antiguo cauce del río Coca como Río de Montaña; indica una velocidad elevada del flujo, con alta capacidad erosiva en el fondo y en los márgenes y de gran capacidad de transporte en función de su caudal.

4.3 Tramo entre la ex Cascada de San Rafael y el Km 6.5

Entre la ex Cascada (Km 0) y el Km. 6.5 (Ver Mapa 1) se encuentran los siguientes materiales:

- Lavas y piroclastos de flujos de una longitud aproximada de 1.5 Km
- Depósitos de Avalanchas volcánicas 2

El depósito de lavas y piroclastos prácticamente ha desaparecido en el tramo del río y los materiales expuestos a erosión son las arenas (60 %), gravas (20%) y clastos y bloques depositados por la Avalancha volcánica 2 por lo que el cálculo para la calificación del cauce se desarrolla en un solo material: Avalanchas volcánicas 2.

Bajo los siguientes parámetros aproximados, la condición del cauce erosivo es:

Parámetros:

Cota base cascada:	1030 msnm
Cota en abscisa 6+500:	1180 msnm
Desnivel:	H = 150m
Longitud:	L = 6.5 Km
Pendiente	$S_o = 0.0231$ m/m
Diámetro D medio partículas de fondo:	0.3 m
Velocidad del flujo	U = 4.5 m/s (apreciada en el sitio de rápidas, Km. 2.5)
Gravedad	$g = 9.77$ m/s ² (Para una h = 1200m y paralelo 0°)
Tirante medio del agua	d = 4m (apreciada en el sitio de rápidas, Km. 2.5)
Número de Froude	Fr

Cálculos:

$$D / S_o = 12.98 \quad \rightarrow \quad \text{cauce de alta montaña}$$

$$Fr = 0.7198 \quad \rightarrow \quad \text{cauce de montaña}$$

4.4 Conclusiones

De los análisis anteriores se concluye:

- Antes de la desaparición de la Cascada de San Rafael, el río tuvo estabilidad estática y dinámica.
- Por la condiciones actual del río Coca sin el elemento de retención de sedimentos que fue la cascada de San Rafael, se afirma que el río Coca se encuentra en condición de inestabilidad dinámica cuya energía hidráulica actúa para alcanzar su pendiente natural de equilibrio; es decir, en un proceso de erosión cuya velocidad de arrastre es función del caudal de flujo y condiciones geológicas del fondo del cauce.

5. OBRAS EN RIESGO

El riesgo ha sido definido como la posibilidad de una pérdida de vidas humanas y animales; pérdida de propiedades o de la capacidad productiva y pérdidas por afectaciones medio ambientales.

El riesgo tiene 3 factores: el valor, la vulnerabilidad y la peligrosidad.

Como valor se incluye a las vidas humanas, animales y materiales o de la capacidad productiva. La vulnerabilidad es la pérdida de los valores antes indicados y la peligrosidad como la probabilidad que una zona determinada pueda ser afectada en un período y fenómeno determinados.

La erosión regresiva del río Coca, no solamente afecta al fondo del río sino a sus laderas a las cuales inestabiliza por desequilibrio brusco de las fuerzas geostáticas.

El deslizamiento de los taludes afecta a todas las obras que hayan sido construidas sobre ellos.

En este informe, los niveles de riesgo para estas obras han sido calificados en función de las posibilidades de real afectación. Estudios específicos medio ambientales acompañados con aportes geológicos detallados podrán modificar los conceptos presentados en el Cuadro 2.

CUADRO N° 2

OBRAS	DISTANCIA (L) HASTA EL BORDE DEL TALUD ACTUAL DEL RÍO COCA (m)	NIVEL DE RIESGO	RECOMENDACIÓN
POBLACIONES, ESCUELAS, INSTALACIONES	L < 100m	Alto riesgo	Evacuar
	100m < L < 200	En riesgo potencial	Reubicar
	L > 200m	Alerta	Monitoreo
L/T 138 KV	L < 100m	Alto riesgo	Establecer las condiciones reales del riesgo de deslizamiento e inundación
	100m < L < 200	En riesgo potencial	
	L > 200m	Alerta	
CARRETERAS Y VÍAS DE ACCESO EN GENERAL	L < 80m	Alto	Estudios y diseños para estabilización de taludes o de Variante
	80m < L < 150	Medio	Monitoreo
	L > 150m	Bajo	-
PUENTES, TARABITAS SOBRE EL RÍO COCA	0 m	Alto	Alta probabilidad de destrucción
PUENTES SOBRE RÍOS Y QUEBRADAS TRIBUTARIAS	L < 100m	Alto riesgo	Alta probabilidad de destrucción
	100m < L < 200	En riesgo potencial	Probabilidad media de destrucción; evaluación geológica - geotécnica de cada sitio
	L > 200m	Alerta	Monitoreo del talud más cercano a los estribos.
OLEODUCTOS	L < 50m	Alto riesgo	- Monitoreo constante -Reubicación del tramo en el menor tiempo posible por altas probabilidades de pérdidas humanas, destrucción y afectaciones al medio ambiente
	50m < L < 100	En riesgo potencial	-Monitoreo constante - Estudios de riesgo específicos para estabilización
	L > 100m	Alerta	-Monitoreo constante
PUENTE SOBRE RÍO COCA, ACCESO VENTANA 2	0 m	Muy alto a destrucción	Salvando la posibilidad de que la erosión regresiva se detenga ante del sitio de este puente (6+750) las condiciones de erosión observadas en los taludes de aguas abajo, vaticinan su destrucción
TOMA, DESARENADORES CCCS	0 m	Medio a alto	Salvando la posibilidad de que la erosión regresiva se detenga ante del sitio de estas obras, las condiciones de erosión en el fondo y taludes del río Coca en depósitos no consolidados de arenas, limos y estratos de aluvios, prevén graves afectaciones y hasta su destrucción.

A) POBLACIONES, ESCUELAS, CENTROS RELIGIOSOS

La información ha sido obtenida de la carta topográfica El Reventador, Ref. 4

- 1) El **Campamento de San Rafael**, por la distancia al río Coca ($\approx 500\text{m}$) y por su posición elevada, no ha sido ni será afectado.
- 2) La **Escuela Padre Domingo de Loto** se encuentra a 250m del borde sin erosionar. En caso de erosión de la base y deslizamiento del talud, la Escuela estaría a aproximadamente 180m del borde. No se considera en peligro inminente pero debe efectuarse un monitoreo permanente del talud hacia el río Coca.

3) Población Manuel Galindo y escuelas.

El centro de la parroquia a aproximadamente 300m del borde del río Coca.

Las viviendas y negocios de la zona ubicados en la zona sur se encuentran a solo 100m o menos del borde del río Coca y están en riesgo de destrucción por erosión del talud izquierdo del río. Se sugiere la evacuación de las propiedades en alto riesgo.

4) Hacienda Charicana

En parte las instalaciones están a menos de 50m del borde del río. Están en riesgo de ser destruidas por deslizamiento del talud. Se recomienda su evacuación.

5) Escuela Vicente Rocafuerte y cementerio de la localidad

Se localiza a menos de 30m del borde y serán destruidos por deslizamiento del talud. Deben ser evacuados y reinstalados en un sitio seguro.

B) LÍNEA DE TRANSMISIÓN 138 KV

Al sur de la zona afectada por el río Coca en el sector frente al río Reventador, se observa la presencia de una torre de transmisión de 138 kV. No ha sido posible observar otras torres y no se poseyó un mapa de ubicación de las estructuras.

Se recomienda revisar la ubicación de estas obras, especialmente aquellas ubicadas a menos de 300m del borde del río Coca para establecer su nivel de riesgo.

C) OBRAS VIALES y PUENTES

En el Cuadro N° 3 se indican los tramos en algún grado de riesgo por deslizamiento probable del talud izquierdo del río Coca por erosión regresiva.

CUADRO N° 3

SECTOR o UBICACIÓN APROXIMADA	ABSCISA EN RÍO COCA (Mapa 1)	LONGITUD APROXIMADA DEL TRAMO DE VÍA y [DISTANCIA AL BORDE DEL RÍO] (m)	PRESENCIA O NO DE PUENTE	NOTAS	RIESGO
Sector río Engaño	2+400 a 2+600	200m [$\approx 150\text{m}$]	Sobre río Engaño	Puente a L $\approx 150\text{m}$	Erosión regresiva en el río afluente

CUADRO N° 3 continuación

SECTOR o UBICACIÓN APROXIMADA	ABSCISA EN RÍO COCA (Mapa 1)	LONGITUD APROXIMADA DEL TRAMO DE VÍA y [DISTANCIA AL BORDE DEL RÍO] (m)	PRESENCIA O NO DE PUENTE	NOTAS	RIESGO
Sector Río Marker	3+750 a 3+780	200m [50m a 60m]	Sobre río Marker	Puente a L ≈ 100 m	Erosión regresiva en el río afluente
Zona Manuel Galindo	8+500 a 9+100	600m [<50]	-		
-	9+500 a 9+750	250m [<50 a 100m]	Quebrada s/n En río Malo, a 300m		
-	10+500 a 11+100	400m [<50 m]	-		
-	11+500 a 12+900	1400m [<50m]	Quebradillas		
-	13+500 a 13+700	200m [< 50m]	-		
-	14+400 a 14+450	50m [<< 50m]	-	Brazo del río Coca en circulación anastomosada	Se considera de riesgo limitado un proceso erosivo
Sector Toma Desarenadores	18+200 a 18+750	550m [<< 50m]	-		

Fuente topográfica: Mapa topográfico El Reventador (Ref.4) y Mapas 1 y 2 (Ref. 5)

D) OBRAS DE CONDUCCIÓN DE PETRÓLEOS (SOTE, OCP, POLIDUCTO)

En el Cuadro N° 4 se indican los tramos con un grado de riesgo por deslizamiento probable del talud izquierdo del río Coca por erosión regresiva.

CUADRO N° 4

SECTOR o UBICACIÓN APROXIMADA	ABSCISA EN RÍO COCA (Mapas 1 y 2)	LONGITUD APROXIMADA DE LOS DUCTOS y [DISTANCIA AL BORDE DEL RÍO] (m)	PRESENCIA O NO DE ZONAS INESTABLES
Sector río Engaño	2+500 a 4+100	1600m [entre 180m a < 150m]	
-	11+600 a 13+750	1150m [<50m]	Deslizamiento en 13+250
Sector Toma Desarenadores	18+200 a 18+750	550m [<< 50m]	-

Fuente topográfica: Mapa topográfico El Reventador (Ref.4) y Mapa 1 y 2 (Ref. 5)

E) PUENTE DE ACCESO A VENTANA 2

Grado de riesgo indicado en capítulo anterior y cuadro.

F) TOMA Y DESARENADORES CCCS

Grado de riesgo indicado cuadro anterior.

G) CANAL DE RESTITUCIÓN, PUENTE Y ACCESOS

El desplazamiento por arrastre fluvial de cientos de millones de m^3 de sedimentos hacia aguas abajo de antigua cascada de San Rafael, producirá modificaciones importantes en el trazado fluvial del río por elevación temporal del cauce y desvíos del thalweg actual. Esas modificaciones serán importantes en los primeros 25 a 30 km aguas abajo desde la ex cascada.

El Canal de Restitución y las obras conexas incluido el puente sobre el río Coca de acceso a Casa de Máquinas y los accesos vehiculares, se localizan aproximadamente a 37 km agua abajo de la ex cascada. El río Coca presenta un recorrido sinuoso que frenará el avance de los sedimentos.

Por la extensa longitud de recorrido y por las altas pérdidas de energía, se considera que estas obras no serán influenciadas por los desplazamientos fluviales sólidos.

La presencia de elementos en suspensión en el agua podría generar algún grado de problema a la biodiversidad pero estos no tendrán incidencia sobre las obras antes indicadas.

6 OBRAS PROBABLES PARA LA DETENCIÓN DEL PROCESO EROSIVO

El presente informe es de carácter geológico con aportes de la hidrología e hidráulica que estudia la especialización de Geotecnia. Estudios y diseños de Hidráulica de Ríos requieren de la participación de expertos en esta amplia materia.

Se avizora las siguientes posibles obras destinadas a detener o al menos frenar el proceso erosivo retrocedente:

- a) Construcción de un vertedero para la disipación de energía;
- b) Dique en pedraplén.

Se plantea obras para un caudal máximo de $Q = 2000 m^3/s$

6.1 Vertedero para la disipación de energía

Dependiendo de las condiciones geológica del subsuelo y de opiniones favorables de la hidráulica de río, podría ser ubicado en 2 posiciones:

- a) Entre las abscisas **7+200 hasta 8+300** aprovechando un tramo curvo del río. (Ver Mapa 1)
La longitud de este vertedero tendría una $L \approx 500m$ y una sección de base $B = 50m$ para una altura de agua $h_w = 8m$.
El hormigón deberá resistir una velocidad de agua superior o igual a $v = 5 m/s$
- b) Entre las abscisas **7+800 hasta 9+500** aprovechando un tramo curvo del río. (Ver Mapa 1)
La longitud de este vertedero tendría una $L \approx 900m$ y una sección de base $B = 50m$ para una altura de agua $h_w = 8m$.
El hormigón deberá resistir una velocidad de agua superior o igual a $v = 4 m/s$

6.2 Dique de enrocamiento

Con el diseño de esta obra deberá estudiarse la manera de evacuación de los sedimentos retenidos momentáneamente en los Desarenadores ubicados aguas arriba.

Las facilidades de explotación de amplios volúmenes de rocas resistentes inciden en la ubicación de esta hipotética obra para retención de la erosión regresiva.

El Mapa geológico Volcán El Reventador (Ref. 5) indica la existencia de rocas volcánicas agrupadas en la formación Jurásica – Cretácica Misahualli (JK_M) a los 2 lados del río Coca, en el sector entre las abscisas Km 13 al Km 15 del Mapa 2 de ese informe.

Estudios más específicos podrían definir el sitio del cierre así como su altura, inclinación muy tendida del paramento aguas abajo especialmente, proceso constructivo, etc.

En el Mapa N° 2 se indica con círculo la zona de probable implantación de este dique de enrocamiento.

7. CONCLUSIONES Y SUGERENCIAS

7.1 Conclusiones

- El presente informe ha sido desarrollado con uso limitado de la bibliografía y aportes de datos obtenidos en una visita de campo.
- Los cálculos de la erodabilidad de los depósitos, dimensiones, geometrías, resistencia de los materiales y más elementos para evaluación y predicciones tiene el carácter de aproximados.
- La desaparición de la cascada de San Rafael se inició el 02 o 03 de octubre / 2019 con la formación de 1 chimenea o dolina en su margen izquierdo, a aproximadamente 150m de la ex cascada. El incremento del volumen del material desplomado en la chimenea llegó a captar las aguas del río Coca desviándolas de su curso antiguo, hecho sucedido el 30 de enero/2020. El desvío de las aguas a través de la chimenea transformo a la antigua cascada en un puente natural.
- La desaparición de la ex cascada de San Rafael obedece a razones geológicas de erosión natural, al igual que lo sucedido en los depósitos lávicos de aguas abajo de la antigua cascada.
- Para el desarrollo de este informe geológico-geotécnico ha sido necesario abscisar al río Coca desde la ex cascada (Km 0) hacia aguas arriba hasta la zona de las obras del la CCCS en 19.4 Km aproximadamente.
- A lo largo de su historia, el río Coca ha sufrido vario represamientos debido a avalanchas de escombros y derrames de piroclastos y lavas. El deslizamiento a manera de Avalancha de escombros volcánicos 2, ocurrido hace aproximadamente 19.000 años, cerró la cuenca del río Coca en una longitud aproximada de 6.5 Km (medido desde el sitio de la ex cascada) y permitió el depósito de sedimentos en un ambiente fluvio-lacustre de alta a muy alta susceptibilidad a la erosión hídrica y también receptó los flujos de lavas basálticas que formaron la cascada de San Rafael. Este dique natural basáltico contribuyó al incremento en altura y volumen de los materiales aluviales y fluvio – lacustres que existen desde aguas arriba de los río Salado y Quijos hasta aproximadamente 13 Km aguas abajo del río Coca.

- Los materiales que cerraron el cauce tienen diferentes comportamientos mecánicos frente a la erosión hidráulica esperada. Las aguas del río Coca pueden llegar a poseer una velocidad alta a muy alta para la resistencia de los materiales que rellenaron su cuenca inicial y sus caudales son altos y aptos para generar procesos erosivos acelerados.
- Estudios hidráulicos y geotécnicos específicos podrán definir la necesidad o no del desarrollo de obras que contrarresten el proceso de erosión regresiva desencadenado. A la luz de lo que ha sido posible analizar aquí desde el punto de vista geológico y geotécnico no es alentador el proceso erosivo.
- Ante la hipótesis de no ejecución de ninguna obra, se recomienda demostrar numéricamente la improbabilidad de que la erosión regresiva arribe hasta los sedimentos fluvio-lacustres y comprometa la seguridad de las obras de Toma y Desarenadores de la CCCS.

6.2 Sugerencias.

- Desarrollar estudio básico como es el levantamiento topográfico de precisión de todo el río, desde la ex cascada de San Rafael hasta 2 Km aguas arriba de las obras de Toma de la CCCS. El ancho de la faja debería ser de al menos 800m (400m a cada lado del eje del río); curvas de nivel cada metro y georeferenciados.

Este levantamiento topográfico mediante drones, podría demandar 1 semana de trabajo (campo y gabinete) con uso de antenas de GPS de precisión. Su costo no supera los USD \$9000.

- Desarrollar medidas del caudal y velocidad del agua en el sector del puente de Acceso a la Ventana 2
- Sobre la base topográfica, desarrollar los siguientes estudios:
 - o Levantamiento geológico a detalle del río en el tramo antes señalado, que permita ubicar zonas aptas para desarrollar ensayos de erodabilidad que permitan definir la necesidad o no de obras que frenen el proceso erosivo retrocedente existente.
 - o Valoración geotécnica e hidráulica de los sectores más adecuados para implementar una solución a la erosión en curso.
 - o Ensayos in situ de erosión en los sectores de mayor resistencia y factibilidad.
 - o Análisis de estabilidad de laderas en los tramos donde la erosión de los taludes amenaza a obras, especialmente a poblados, vías, puentes, ductos, etc.
- El proceso de erosión regresiva se inició el 02 o 03 de octubre/2019 con la formación de una chimenea y la desaparición de la cascada de San Rafael el 30 enero / 2020; desde esta última fecha ya han transcurrido casi 4 meses y ya debe haber sido desarrollado un plan efectivo que salvaguarde las obras de Toma y Desarenador de la Central más importante y costosa de Ecuador.

7. REFERENCIAS BIBLIOGRÁFICAS

- Ref. 1** “Estudio vulcanológico de El Reventador”, INECEL – ASOCIACIÓN DE FIRMAS CONSULTORAS, 1988, Quito.
- Ref. 2** Proyecto Hidroeléctrico Coca Codo Sinclair, 1500 MW, Compañía Hidroeléctrica Coca Codo Sinclair S.A., s/f.
- Ref. 3** « Un exemple d’importants glissements du terrain en Equateur », J. Sevilla, 6to. Congreso Internacional de la AIGI, 06 au 10 aug. 1990, Ámsterdam, Nederland.
- Ref. 4** Carta topográfica “Volcán El Reventador”, IGM, 1987, escala E = 1/ 50.000, Quito.
- Ref. 5** Mapa geológico “Volcán El Reventador”, escala E = 1/50.000, INECEL – ASOCIACIÓN DE FIRMAS CONSULTORAS, 1988, Quito.
- Ref. 6** “Un ejemplo de erosión retrocedente: la cascada de Agoyán”, Jorge Sevilla M., Primer Simposio Latinoamericano de Desastres Naturales, Quito, 1985
- Ref. 7** « Le volcanisme et sa prévention », Haroun Tazieff y Max Derroau, Masson, 1990, París.
a) Páginas 52, 53 y 54 ; b) pág. 89 y 90; c) pág. 94
- Ref. 8** INECEL, Proyecto Coca – Codo Sinclair, Estudio de Factibilidad, Anexo P, junio 1992, Quito.
a) Pág. 36 b) Pág. 35 c) Pág. 44
- Ref. 9** “Fluid Mechanics” 6th edition, Frank M. White, Mc. Graw Hill, NY.
a) Pág. 699 y siguientes.
- Ref. 10** “Open Chanel Hydraulics”, Ven Te Chow, Mc.Graw Hills Book Co., Tokyo, 1959
a) Pág. 101 b) Pág. 106 c) Pág. 109
- Ref. 11** “Morfología de Ríos”, García J & Maza J, UNAM, Cap.11, México, 1979

Ing. Vladimir Játiva Sevilla

Quito, 2020 mayo 15

vladimirjativa.cie@gmail.com

8.**ANEXOS**

- “Un ejemplo de erosión retrocedente: la cascada de Agoyán”, Jorge Sevilla M., Primer Simposio Latinoamericano de Desastres Naturales, Quito, 1985
- « Un exemple d’importants glissements du terrain en Equateur », J. Sevilla M., 6to. Congreso Internacional de la AIGI, 06 au 10 aug. 1990, Ámsterdam, Neederland.

Nota: Los recuadros sobre los papers son del autor de este informe.

UN EJEMPLO DE EROSION RETROCEDENTE: LA CASCADA AGOYAN

SEVILLA M, Jorge (1985)

RESUMEN

El Río Pastaza bordea el Volcán activo Tungurahua y a la altura de la población de Baños, forma la cascada Agoyán, la misma que constituye un símbolo de la Provincia del Tungurahua. Aproximadamente 1,5 Km aguas arriba de la misma se encuentra en fin de construcción las obras de toma del Proyecto Hidroeléctrico Agoyán, que generará 156 Mw a un costo total de 164 millones de dólares.

En base a información histórica se ha evidenciado que la cascada ha retrocedido unos 800 m en los últimos 30 años y es de esperar que el proceso erosivo retrocedente pueda activarse, pudiendo afectar a largo y mediano plazo el proyecto hidroeléctrico, si no se toman las medidas adecuadas.

Las condiciones geológicas del sector de la obra de Toma y de la Cascada son: un zócalo metamórfico constituyendo un valle en "V", rellenado por aluviales antiguos muy permeables de 60 - 70 m de espesor; descansando encima de éstos se encuentra una capa de lava de 70 - 80 m de espesor, proveniente de una de las múltiples erupciones del Tungurahua, la última de las cuales fue en el año 1918.

El actual Río Pastaza recorre aproximadamente en una longitud de 1 Km, el área de contacto lava-metamórfico y probablemente el espesor de la lava, sobre el aluvial, no supera los 5 - 10 m.

Cuando el Proyecto entre en operación, se producirán continuas limpiezas del reservorio-desarenador, evacuando importantes caudales que podrán incidir en el proceso erosivo retrocedente de la cascada.

INTRODUCCION

El Proyecto Hidroeléctrico Agoyán, actualmente en construcción, está situado aproximadamente a 200 Km al sur de la capital del Ecuador, Quito, en el valle del Río Pastaza y a 50 Km al este de la ciudad de Ambato en la Provincia del Tungurahua. La población más cercana es Baños con 5.000 habitantes y está ubicada a 5 Km del Proyecto. El Río Pastaza con un área de drenaje hasta el sitio de presa, de 8.237 Km², corre hacia el Este y desemboca en el Río Amazonas.

La obra forma parte de un esquema de 4 proyectos a desarrollarse en la cuenca media del indicado río, siendo éstos en su orden desde aguas arriba hacia aguas abajo, los siguientes: Muyo, 134 Mw; Agoyán, 156 Mw; San Francisco, 157 Mw; y Topo, 242 Mw.

La Cascada Agoyán, en el río Pastaza, se localiza aproximadamente a unos 1.500 m de las obras de Toma y a 800 m de la Central.

CARACTERISTICAS DEL PROYECTO AGOYAN

Los elementos principales del aprovechamiento son los siguientes:

Una PRESA de gravedad de hormigón controlada por compuertas, de 43 m de altura, con una longitud de corona en cresta de 310 m. La presa contiene como elementos suyos a 3 vertederos de excesos; 2 desagües de fondo principales, que permitirá la descarga de los sedimentos de fondo y de materiales de arrastre; un desagüe de fondo del desarenador que facilitará la limpieza del material fino sedimentado en el estanque desarenador, y la toma.

La descarga máxima por los tres vertederos de excesos es de 3.800 m³/s y la capacidad máxima de descarga por cada uno de los dos desagües de fondo, localizados dentro del canal de desvío, es de 1.000 m³/s y 880 m³/s, con el embalse al nivel máximo y mínimo

de operación, respectivamente. La descarga máxima del desagüe de fondo del desarenador es de 460 m³/s y 390 m³/s en los niveles máximo y mínimo respectivamente.

Un RESERVORIO de regulación diaria con un volumen total de 1'850.000 m³ de los cuales 760.000 corresponde a un volumen regulado útil para operar la Central y aproximadamente 1'100.000 m³ de volumen muerto.

Un TUNEL DE CONDUCCION a baja presión, de diámetro interior de 6 m y de un largo aproximado de 2.400 m, de los cuales cerca de 500 m consisten de un túnel de hormigón embaulado y el resto de un túnel subterráneo revestido con hormigón.

Una TUBERIA DE PRESION vertical con un largo de 105 m.

Una CASA DE MAQUINAS subterránea con una excavación total de 35.000 m³ albergando 2 turbinas de 78.000 Kw cada una.

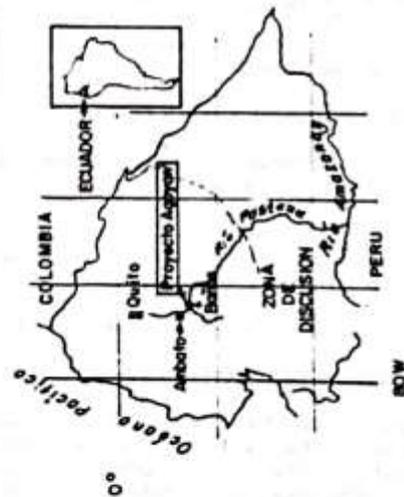
Otros elementos constituyen la Chimenea de Equilibrio, pozos verticales (para transporte, cables de alta tensión, ascensor), túneles de descarga, de accesos, galerías de drenaje, subestaciones, etc.

El costo total del Proyecto asciende a 164 millones de dólares USA.

CAUDALES CARACTERISTICOS DEL RIO PASTAZA

El caudal promedio anual es de 124 m³/s. El caudal firme para una probabilidad del 90% es de 60 m³/s. La crecida instantánea máxima observada es de 954 m³/s en tanto que las crecidas de retorno para 10, 20, 100, 500 y 1.000 años son de 1.000 m³/s, 1.700, 3.450, 5.200 y 6.000 m³/s, respectivamente.

(*) Ingeniero Geólogo del Instituto Ecuatoriano de Electrificación; Profesor de Geología de Presas de la Escuela Politécnica Nacional; Presidente del Comité Ecuatoriano de Ingeniería Geológica; Casilla 110, Sucursal 12 de Octubre - Quito, Ecuador.



UBICACION DEL PROYECTO AGOYAN

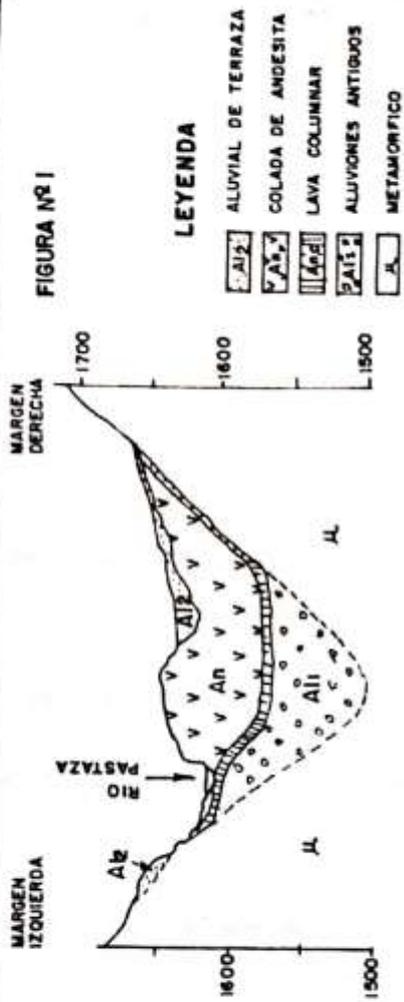
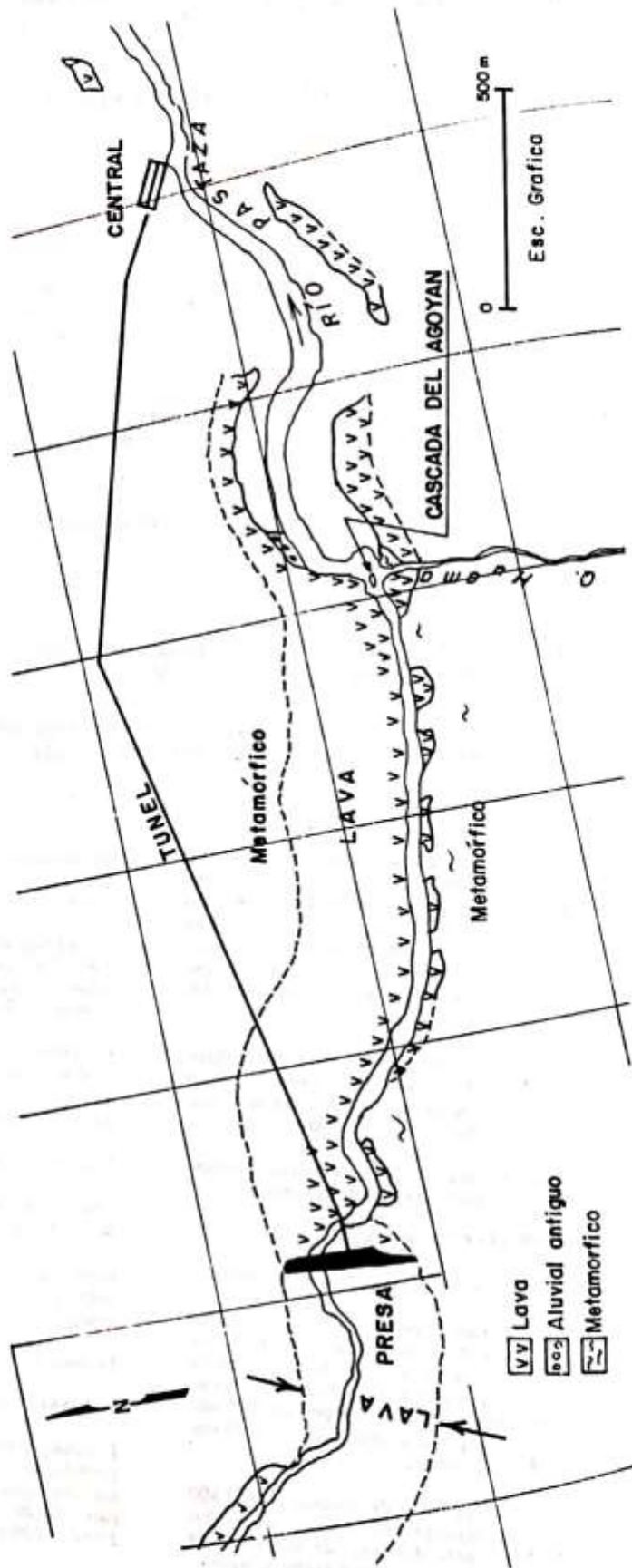


FIGURA Nº 1

LEYENDA

- ALUVIAL DE TERRAZA
- COLADA DE ANDESITA
- LAVA COLUMNAR
- ALUVIONES ANTIGUOS
- METAMORFICO

PERFIL GEOLOGICO EN EL EJE DE PRESA AGOYAN



- LAVA
- Aluvial antiguo
- Metamorfico

MAPA GEOLOGICO SIMPLIFICADO DEL PROYECTO AGOYAN, MOSTRANDO LA PROBABLE DISTRIBUCION DE LA COLADA DE LAVA Y LA CASCADA DEL AGOYAN

GEOLOGÍA DEL SITIO DE PRESA Y LA CASCADA. (Figura Nº. 1)

El sector comprendido entre la Cascada Agoyán y el sitio de presa, presenta una situación bastante clara desde el punto de vista geológico:

Geomorfológicamente, representa un valle en "V" excavado por el Río Pastaza en rocas metamórficas. Este valle ha sido rellenado en tiempos prehistóricos por aluviones y lahares y posteriormente por flujos de lava procedente del Tungurahua. Sobre este material, el Río Pastaza ha vuelto a actuar hasta abrir su cauce actual.

A continuación se describe las unidades litológicas en su orden de génesis: Metamórfico, aluviales antiguos, colada de lava y aluviones de terraza.

METAMORFICO

Entre el sitio de presa y la cascada, la litología es relativamente homogénea y consiste de neises graníticos paleozoicos algo alterados, de grano grueso y de aspecto masivo, compuestos principalmente de cuarzo y feldespato. Un dique básico anfibólico, atraviesa los neises al pie de la cascada.

El metamórfico ha sido intensamente tectonizado y posterior al levantamiento mio-pliocénico ha sido profundamente erosionado.

La foliación tiene una orientación muy regular de rumbo norte-este con buzamiento vertical a muy empinado.

En lo que se refiere a diaclasamiento es notorio las diaclasas paralelas a las laderas del valle.

ALUVIONES ANTIGUOS

Estos aluviones se encuentran rellenando un paleocauce del Pastaza entallado en las rocas metamórficas y por debajo de un flujo de lava del Volcán Tungurahua II.

El origen de estos aluviones parece estar relacionado con la venida de la colada de lava. Es probable que ésta haya sido precedida por lahares provocados, entre otros, por la fusión de la capa de hielo y las eyecciones de piroclastos.

Este material está compuesto de grava y arena de origen volcánico y metamórfico, con elementos que alcanzan diámetros hasta de 25 mm. Tiene poca matriz que pueda cementar los fragmentos, por lo que se le atribuye una alta permeabilidad del orden de 5×10^{-3} cm/s. Es de notar la presencia de algunos bloques, sobre todo hacia el contacto con la lava. No se observa manantiales de agua en las paredes del aluvial antiguo por lo que muy probablemente el agua infiltrada aguas arriba debe correr a niveles más bajos, quizás al nivel del Río Pastaza.

El espesor esperado del aluvial sobre el talweg rocoso en el sector de la cascada se estima superior a los 65 m de acuerdo a las perforaciones realizadas.

COLADA DE LAVA

Durante el Pleistoceno se edifica el Volcán Tungurahua I, el mismo que arroja aglomerados y lavas. Luego el volcán es reactivo en el Cuaternario Reciente y se edifica el Volcán Tungurahua II, actual. Este volcán que sobrepasa los 5.000 m.s.n.m. tiene numerosas erupciones históricas conocidas, manifestadas por lahares, coladas de lavas y emisiones piroclásticas, a veces como nubes ardientes. La última actividad del Tungurahua data del año 1918.

La colada existente en el sector del Proyecto Agoyán corrió sobre una terraza aluvial, con pendiente entre 1.5 y 1.8%, y es prácticamente la misma, tanto en el sitio de presa cuanto en el sitio de la cascada. Su estructura es la siguiente:

En la base de la colada hay un estrato de escoria inferior descansando en el aluvial antiguo, de un espesor máximo de 1.5 m compuesto de fragmentos de andesita con una matriz arenosa. El carácter suelto de esta escoria la hace particularmente erosionable, lo que explica que en muchos lugares haya sido removida, quedando verdaderas

cuevas o túneles del orden de 0.5 a 1.2 m en los contactos laterales de la lava con el metamórfico y hacia el sector de la caverna. Una erosión similar, en profundidad, por corrientes subterráneas es muy posible.

Sobre la escoria descansa una capa de basalto columnar ("columnata inferior") con un espesor variable que hacia el sector de la cascada es del orden de los 7 - 10 m y hacia el sector de la Quebrada Huama es de aproximadamente de 2 m. La disposición de las columnas es perpendicular a la topografía antigua de asentamiento y de enfriamiento.

Sobre el basalto columnar descansa el cuerpo andesítico principal ("entablamiento") con columnas más estrechas teniendo una orientación irregular y con espesor del orden de 40 - 70 m. Las fracturas son numerosas y están interconectadas entre sí; su abertura alcanza hasta los 5 mm, lo que explica su elevada permeabilidad del orden de $3 - 4 \times 10^{-4}$ cm/s. Filtraciones de agua por estas fisuras se observan en muchos afloramientos.

En las laderas del valle, el contacto del "entablamiento" con la "columnata inferior" forma una discontinuidad importante, debido al fuerte ángulo formado por la orientación de las columnas en ambas zonas. Esto explica que a lo largo del Río Pastaza, la erosión fluvial haya seguido de preferencia este contacto, quedando la "columnata inferior" pegada como un enlucido contra la pared del metamórfico.

Finalmente la parte superior está caracterizada por columnas anchas de forma irregular cubiertas por escorias, que han sido casi totalmente erosionadas.

ALUVIONES DE TERRAZA

Están constituyendo capas de espesor variable, hasta 15 m, de gravas de arenas y bloques de origen probablemente también lahárítico y están descansando por encima de la colada de lava.

Aguas abajo de la cascada, en el cauce del río a lo largo de sus orillas hay depósitos de aluviones recientes.

ACTIVIDAD LAHARITICA

En caso de reanudarse la actividad volcánica del Tungurahua grandes cantidades de sedimentos serán eventualmente llevados por los lahares.

Un represamiento natural del Pastaza puede también ocurrir sin causas volcánicas, en el sector de las Juntas por un deslizamiento de magnitud en ese sector, ubicado aguas arriba de la zona del proyecto en la zona de confluencia de los Ríos Patate y Chambo para formar el Pastaza.

EROSION REGRESIVA DE LA CASCADA (Figura Nº. 2)

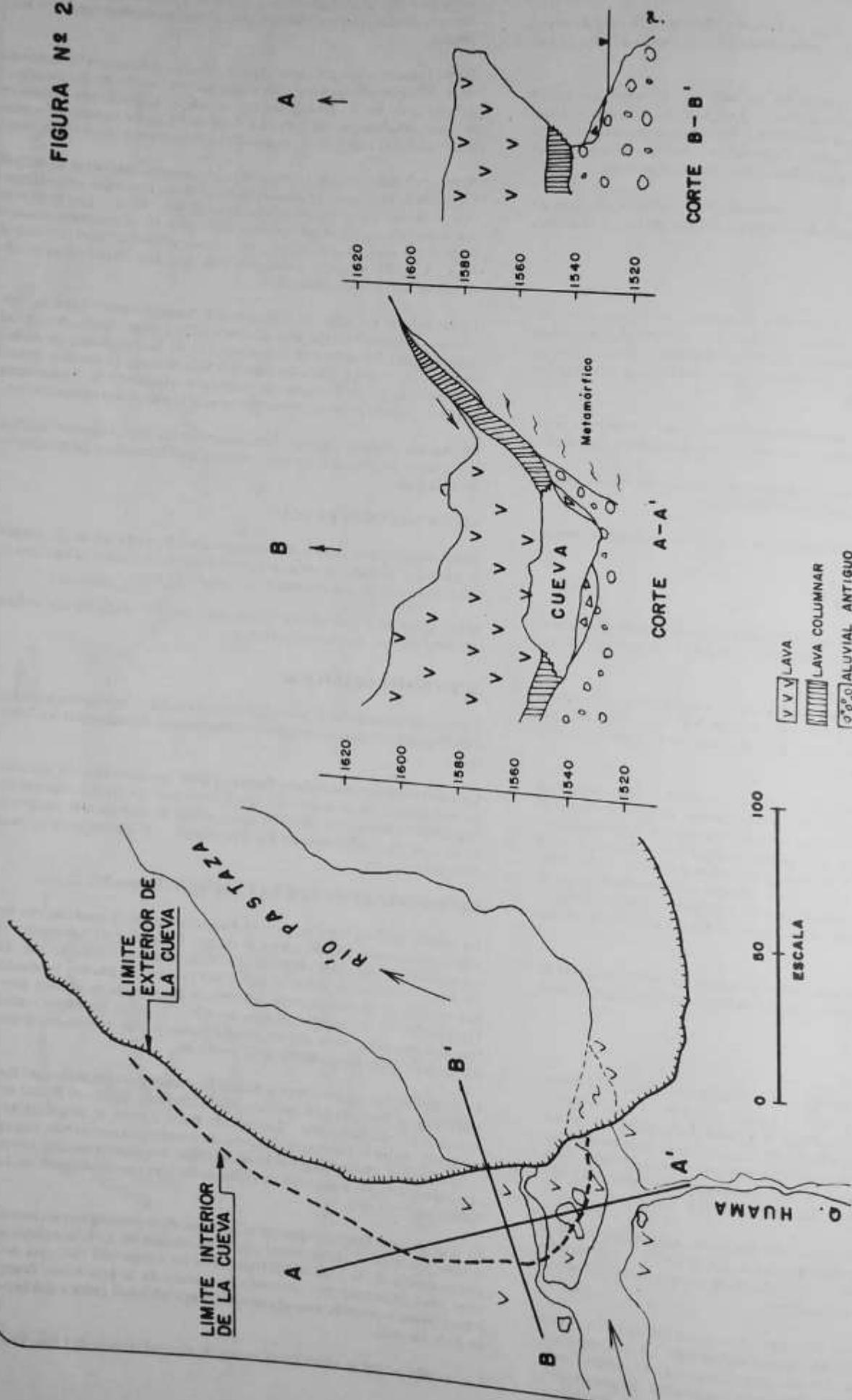
La colada de lava emitida por el Tungurahua en el cuaternario reciente (hace unos 50.000 años) se dirigió hacia el Este siguiendo el curso del antiguo Río Pastaza en una longitud aproximada de 25 Km y se depositó sobre el lecho del río, generalmente ocupado por mantos de aluviones cuyo espesor en la zona de la presa y probablemente en la cascada, alcanza los 65 - 70 m de potencia mientras que el espesor de la colada misma en sus partes menos erosionadas alcanza aproximadamente los 70 - 80 m.

Es probable que en los tramos donde la colada descansaba sobre los aluviones, se formara una cascada, aguas abajo de donde el frente de la lava había desaparecido. La cascada poco a poco se desplazó hacia aguas arriba debido a un proceso de erosión retrocedente, cuyas características principales son la socavación del manto de aluviones al pie de la cascada y la caída de pedazos de lava que quedaban sin la debida sustentación.

Es muy posible también que en el proceso de regresión hayan intervenido fenómenos sísmicos así como la erosión de la lava misma a consecuencia de la acción del transporte de fondo del río; esta acción paulatinamente iría cortando el espesor de la lava hasta llegar a los aluviones creando una situación de inestabilidad crítica del borde de la cascada.

La cascada actual se ubica en el sector de la confluencia del Río Pas-

FIGURA Nº 2



CORTES GEOLOGICOS DE LA CUEVA

SECTOR DE LA CASCADA

taña con la Quebrada Huama, y tiene unos 50 m de altura. La erosión regresiva de la cascada va acompañado de una pérdida de altura y por consiguiente aumentando el gradiente del Río Pastaza hacia aguas arriba. Este aumento del gradiente hace que, la erosión se extienda indefinidamente hasta que el perfil del río encuentre su equilibrio, en su nivel de base. Por otra parte la tubificación (erosión subterránea) de los aluviones antiguos bajo la colada de lava es un hecho que se supone está sucediendo y por lo tanto afectando la posición actual de la cascada. Estos hechos evidencian la necesidad de estabilizar la cascada, ya que de lo contrario, el fenómeno de regresión va a continuar, poniendo en serio peligro las obras del Proyecto Aگویán, específicamente la presa, ubicada a 1.500 m aguas arriba.

Todo el tramo desde el sitio de presa hasta el sitio de la cascada, corresponde a una amplia terraza de lava de unos 250 m de ancho que rellena un paleocauce; el Río Pastaza ha excavado un cauce epigenético aproximadamente por uno de los bordes de esta terraza lávica.

Otro de los factores que ha incidido a que el río excave su cauce hacia el costado derecho actual ha sido la formación de algunos conos de deyección en la margen izquierda, los cuales han contribuido a empujar el cauce del Río Pastaza hasta el pie del declive de la ladera derecha.

Aguas abajo de la cascada, la colada del Pastaza está representado en forma de terrazas laterales a lo largo de las dos laderas del valle constituidas por rocas metamórficas.

HISTORIA RECIENTE DE LA CASCADA

La posición de la cascada actual es de fecha muy reciente ya que ésta se ha desplazado en los últimos 30 años conforme se puede apreciar comparando fotos aéreas actuales con aquellas del año 1956, que muestran a la cascada a unos 800 m aguas abajo del sitio actual, aproximadamente hacia el sector de la casa de máquinas del Proyecto Aگویán, anteriormente descrito, así como por otros documentos históricos. Se indica que hacia Junio, Julio de 1956, con ocasión de lluvias excepcionales que afectaron a la provincia entera, la cascada retrocedió unos 400 m en una sola noche, destruyendo los campos, una hacienda y la carretera existente. La ulterior regresión de la cascada hasta las vecindades del sitio actual fue cumplida en los tres años siguientes. Comparaciones fotográficas, indican que la cascada ha retrocedido desde 1972 a 1976, unos 50 m. Desde dicha fecha hasta 1985, aparentemente el retroceso longitudinal ha sido nulo, no así, la erosión vertical del cauce, el cual ha descendido por lo menos unos 8 m. Todos estos hechos confirman una permanente actividad y además demuestran que el proceso erosivo no sigue una progresión lineal, sino que fundamentalmente abarca períodos cortos de tiempo, coincidentes por lo general, con épocas fuertes de lluvias.

En la zona de la cascada, la erosión del Río Pastaza ha producido un hemicírculo y la lava forma su borde superior.

Esta lava forma el estribo derecho del Río Pastaza y la parte más baja de la Quebrada Huama. En la orilla derecha de la cascada, la lava está en contacto con el metamórfico el cual forma también la zona de impacto del chorro principal del Río Pastaza. Esta roca metamórfica es muy resistente a la erosión, por lo cual en la situación actual, la cascada está estable.

Por debajo del borde superior de la lava, la erosión ha producido, en los últimos 13 años, una caverna hacia el estribo izquierdo de hasta 150 m con una profundidad máxima de unos 40 m en dirección longitudinal. Los hundimientos del techo de la caverna han producido depósitos de escombros cubriendo en gran parte los aluviones antiguos subyacentes a la lava.

Desde el año 1956 a la fecha, el talweg del río en la lava ha descendido por lo menos unos 15 metros en la posición vertical. El espesor actual de la lava en dicho sector del talweg puede estimarse inferior a los 5 m y corresponde a la lava columnar inferior, que se ha indicado como muy fracturada. Hacia el sector del Río Huama el espesor es del orden de 2 - 3 m.

El análisis de las fotografías antiguas indica que la estructura general de la cascada en la posición precedente fue muy similar a la actual, es decir: que el cauce del río estaba en el estribo derecho del valle; que el chorro chocaba sobre el metamórfico; y, que hacia la margen

izquierda de la cascada había una caverna con el techo formado por lava. Es muy posible que una vez que se produjo el colapso de la capa de lava bajo el cauce del río, en coincidencia con la crecida excepcional, quedó libre el contacto metamórfico-lava y se produjo la reactivación de la erosión regresiva.

RIESGOS POTENCIALES

A pesar de la captación de las aguas del Río Pastaza para accionar la central Aگویán y de la existencia de un pequeño embalse antes de la presa, las grandes crecidas del río - que no podrán ser amortiguadas - y sus transportes sólidos, pasarán periódicamente por la cascada. Además la maniobra de las compuertas podrían en ciertos casos excepcionales producir crecidas artificiales de algunos centenares de m^3/s .

Las obras de evacuación de la presa se diseñaron para el caudal correspondiente al período de retorno de 1.000 años, es decir $6.000 m^3/s$ por lo que la estabilidad de la cascada debe quedar asegurada mediante obras cuyo diseño tome en cuenta el mismo caudal ya que recíprocamente dicha estabilidad constituye un elemento crítico para la seguridad de la presa.

Cuando se ponga en operación la central hidroeléctrica; los caudales medios mensuales que pasarán por la Cascada podrán alcanzar hasta $225 m^3/s$ en los meses de Junio y Julio de un año húmedo. El resto de meses tendrán caudales muy bajos incluso de cero m^3/s . Estos caudales medios mensuales sin embargo pueden sufrir variaciones diarias importantes. Además habrá que contar con los caudales adicionales en caso de purgas del embalse para eliminar sedimentos.

El caudal sólido transportado por el Río Pastaza y medido en Baños es de alrededor de 6 millones de ton/año de los cuales se estima que 1,5 millones corresponde al transporte de fondo, cuya acción causa la erosión de la lava. El régimen de circulación de los sólidos de fondo será afectado por la presencia de la presa ya que aquellos serán casi inexistentes cuando las compuertas estén cerradas, pero su volumen será incrementado súbitamente durante los períodos de purga, debido a su concentración.

Es difícil conocer cómo esta modificación alterará el proceso de erosión, pero lo que sí es evidente es que el proceso erosivo continuará como consecuencia del paso obligado del volumen estimado del transporte de fondo.

La estabilidad temporal de la cascada se debe a la especial condición geológica y topográfica encontrada por la cascada en su proceso de retroceso. En efecto en este sitio, en la margen derecha la lava descansa directamente sobre el metamórfico en tanto que en la margen izquierda la lava descansa sobre el manto aluvial.

En el sitio de la cascada, el Río Pastaza forma 2 cauces originados a partir de 1974: uno principal y uno secundario; el primero se encuentra hacia la margen derecha (lado sur) y tiene un espesor pequeño de lava antes de llegar al contacto con el metamórfico. En el año 1972 había un solo cauce y el mismo se encontraba hacia el lado norte.

En lo que respecta al cauce secundario, éste tiene un espesor de lava entre 8 y 10 m por encima de la caverna y las aguas se vierten por dicho cauce cuando el caudal del Pastaza sobrepasa los $100 m^3/s$.

Así, el chorro principal permanente de la cascada cae desde la lava sobre el metamórfico sin afectar el manto aluvial, mientras que el chorro secundario, ocasionalmente cae desde la lava sobre el límite entre el metamórfico y el aluvial. La lava en la sección de la cascada forma un gran arco cuyo apoyo derecho coincide con el sitio del chorro principal.

Dado las condiciones morfológicas actuales es muy posible que esta posición favorable no se repita en algún otro sitio hacia aguas arriba de la cascada, por lo que en caso de reiniciarse la erosión retrocedente, esta sería muy rápida.

Una incisión posterior de estos cauces puede causar el hundimiento de una parte del techo de la caverna y el correspondiente desplazamiento de la cascada hacia el estribo izquierdo, donde bajo la lava está el aluvial antiguo que está formado por materiales sueltos sin

resistencia alguna a la erosión.

En varios sitios de la margen derecha del Río Pastaza entre el sitio de presa y la cascada, el río ha logrado erosionar la capa de lava y llegar al metamórfico, por lo que el contacto se encuentra en el cauce mismo del río, lo que representa una situación muy crítica. Se puede observar que en dichos sitios el río ha erosionado el contacto entre las 2 rocas, y que la capa de escoria inferior ya ha desaparecido, dejando en su lugar una abertura entre la lava columnar y el metamórfico, de un ancho entre 0.4 y 1.2 m. Si dichas secciones correspondieran a la cascada, la erosión a través del plano de contacto sería muy rápida y el agua, luego de un corto tiempo, pasaría a atacar el aluvial. Un plano de esta naturaleza se encuentra apenas a 100 m aguas arriba de la cascada.

Por lo indicado el riesgo mayor está dado por el hundimiento del arco de lava que sería el comienzo de una nueva fase de retroceso de la cascada. Tal hundimiento puede suceder por las siguientes razones:

- a) Por la continuación del proceso normal erosivo del río sobre el apoyo del arco, en la margen derecha hasta cortar la capa de lava la cual es muy delgada y también por la acción de un sismo de intensidad suficiente, probablemente de magnitud $M > 7$, con epicentro en las vecindades de la cascada. La erosión total de una caverna similar a la actual pero ubicada en el estribo derecho del río Pastaza, aguas abajo del Huama, existente en 1970, permitió descubrir el metamórfico, donde cae el actual chorro principal.
- b) Otro factor sería las grandes crecidas del Río Pastaza que ampliaría el ancho de la cascada, especialmente hacia la margen izquierda en donde la lava descansa sobre los aluviones. Hay que recordar que la cascada no soportó el paso de caudales superiores a $1,000 \text{ m}^3/\text{s}$ (periodo de retorno de 10 años) y por lo tanto se desconoce el comportamiento de la cascada para crecidas mayores.

La ocurrencia de tales crecidas, produciría indudablemente una rápida aceleración del proceso erosivo sobre la lava, así como de los remolinos que en grandes cantidades circulará dentro de la cueva debajo del arco. Paralelamente se produciría una pérdida de resistencia de la estructura rocosa por efectos dinámicos de la corriente del río sobre el borde de la cascada y por la generación de enormes ondas de choque. Modelos en escala reducida permitirían estimar tales incógnitas.

- c) En lo que respecta a factores de inestabilidad los declives de las

laderas en el tramo analizado, parecen ser estables, por lo cual se puede deducir que un represamiento del río por ocurrencia de deslizamientos tiene poca probabilidad, sin embargo un deslave lateral importante por la Quebrada Huama podría producir un represamiento natural y desviar el río hacia la margen izquierda.

La estabilidad o no de los enormes bloques, mayores a 100 m^3 , que se encuentran descansando en la cabeza de la cascada, pueden jugar un papel importante e invertir la importancia relativa de los 2 cauces.

CONCLUSION

La posición actual de la cascada representa solamente una fase intermedia dentro del proceso del desarrollo morfológico del valle del Río Pastaza, en la cual una mayor actividad de la erosión retrocedente, puede suceder en un tiempo cercano, por lo cual se torna indispensable evitar esa posibilidad para proteger las obras de toma del Proyecto Agoyán, ubicadas aguas arriba así como de aquellas futuras obras a construirse aguas abajo. Por otra parte es necesario mantener la cascada como recurso natural y como símbolo cívico mismo de la Provincia del Tungurahua ya que forma parte de su himno provincial.

Las soluciones técnicas aconsejables para la estabilización de la cascada para mantener a la misma en su sitio actual y evitar el peligro de una regresión progresiva, deben ser tomadas en cuenta por las autoridades respectivas, posterior a un estudio muy detallado de las condiciones geológicas del sector, ya que de lo contrario, medidas de estabilización no suficientemente bien adaptadas, permitirá el avance de la cascada, cual si ninguna medida hubiese sido tomada.

El ejemplo de la Cascada Agoyán, debe llamar enormemente la atención sobre los aprovechamientos hídricos en los que se encuentran inmersas distintas otras cascadas del país, tal como es el caso, de la Cascada San Rafael en el río Coca, al nororiente del país.

BIBLIOGRAFIA

1. INECEL (1978): Informe Geológico del Proyecto Agoyán. 51 páginas.
2. INECEL (1979): Proyecto Hidroeléctrico Agoyán. Memoria descriptiva, 43 páginas.
3. INECEL (1985): Estudio de estabilización de la Cascada de Agoyán. 42 páginas.

Proceedings Sixth International Congress International Association of Engineering Geology

6–10 AUGUST 1990 / AMSTERDAM / NETHERLANDS

Editor

D.G. PRICE

Delft University of Technology, Delft, Netherlands

OFFPRINT



A.A. BALKEMA / ROTTERDAM / BROOKFIELD / 1990

Un exemple d'importants glissements de terrain en Equateur

An example of big landslides in Ecuador

Jorge H. Sevilla

Escuela Politecnica Nacional & Instituto Ecuatoriano de Electrificación, INECEL, Quito, Ecuador

RESUME: Des études géologiques effectuées dans la région du volcan actif Reventador, en Equateur, ont permis de découvrir deux paléo macroglissements de terrain et une terrasse alluviale de dimensions exceptionnelles. Le 5 Mars 1987 deux séismes, dont les épicentres situés aux abords du Reventador ont déclenché des milliers des glissements de terrain qui eurent de lourdes conséquences tant au point de vue économique qu'humain.

L'article décrit les aspects géologiques régionaux des deux glissements et attire l'attention sur les risques naturels qui affectent le pays.

ABSTRACT: A geological study survey carried out in the area of "Reventador", an actif volcano in Ecuador, has allowed the discovery of two very large paleo landslides and an alluvial terrace. On the 5th March 1987, two earthquakes with epicenters located in the neighborhood of the Reventador, have triggered thousands of landslides. The human and economic damages have been very serious.

This paper describes the regional geological aspects of the two landslides and takes an interest in natural hazards affecting the country.

1 INTRODUCTION

Le Reventador, l'un des volcans les plus actifs de l'Equateur, est situé à quelques 90 Km. à l'est de Quito, au coeur de la forêt amazonienne.

Malgré les deux tremblements de terre du 5 mars 1987 qui ont ravagé le nord est du pays et en plus d'une infrastructure pétrolière établie sur la face sud du volcan, l'implantation d'un complexe hydroélectrique important est envisagée dans sa zone d'influence. Ce projet a déterminé la réalisation d'études géologiques multiples entre 1974 et 1988 par l'Institut Equatorien d'Électrification, INECEL.

En 1986, deux géologues équatoriens, E. ALMEIDA et M. CRUZ du département de Géothermie de l'Institut Equatorien d'Électrification (INECEL) ont publié une étude approfondie du Reventador modifiant radicalement les conceptions en vigueur jusqu'alors. Suite à ce travail des études spécifiques concernant les risques volcanologiques ont été entreprises entre 1986 et 1988.

2 CADRE GEOLOGIQUE ET TECTONIQUE REGIONAL

Le complexe volcanique du Reventador date du Quaternaire. Il est situé sur le flanc oriental de la Cordillère des Andes dans une zone géologiquement perturbée et sujette à de grands mouvements tectoniques compressifs.

Au point de vue lithologique, il est constitué par une séquence de produits effusifs et explosifs dont l'épaisseur atteint 1000 m. montrant une certaine variation de composition; ce qui reflète peut-être des changements dans la vitesse de subduction de la plaque tectonique Nazca (Kittleman, 1984)

Le socle est représenté par une série de formations sédimentaires mésozoïques disposées de la façon suivante: Misahualli (la plus ancienne), Hollin, Napo et Tena; recoupées par quelques intrusions granitiques.

Malgré le manque d'études détaillées de la tectonique de cette partie du pays, on peut la définir globalement comme un ensemble complexe de linéaments traduisant les diverses phases tectoniques qui se sont déroulés à partir

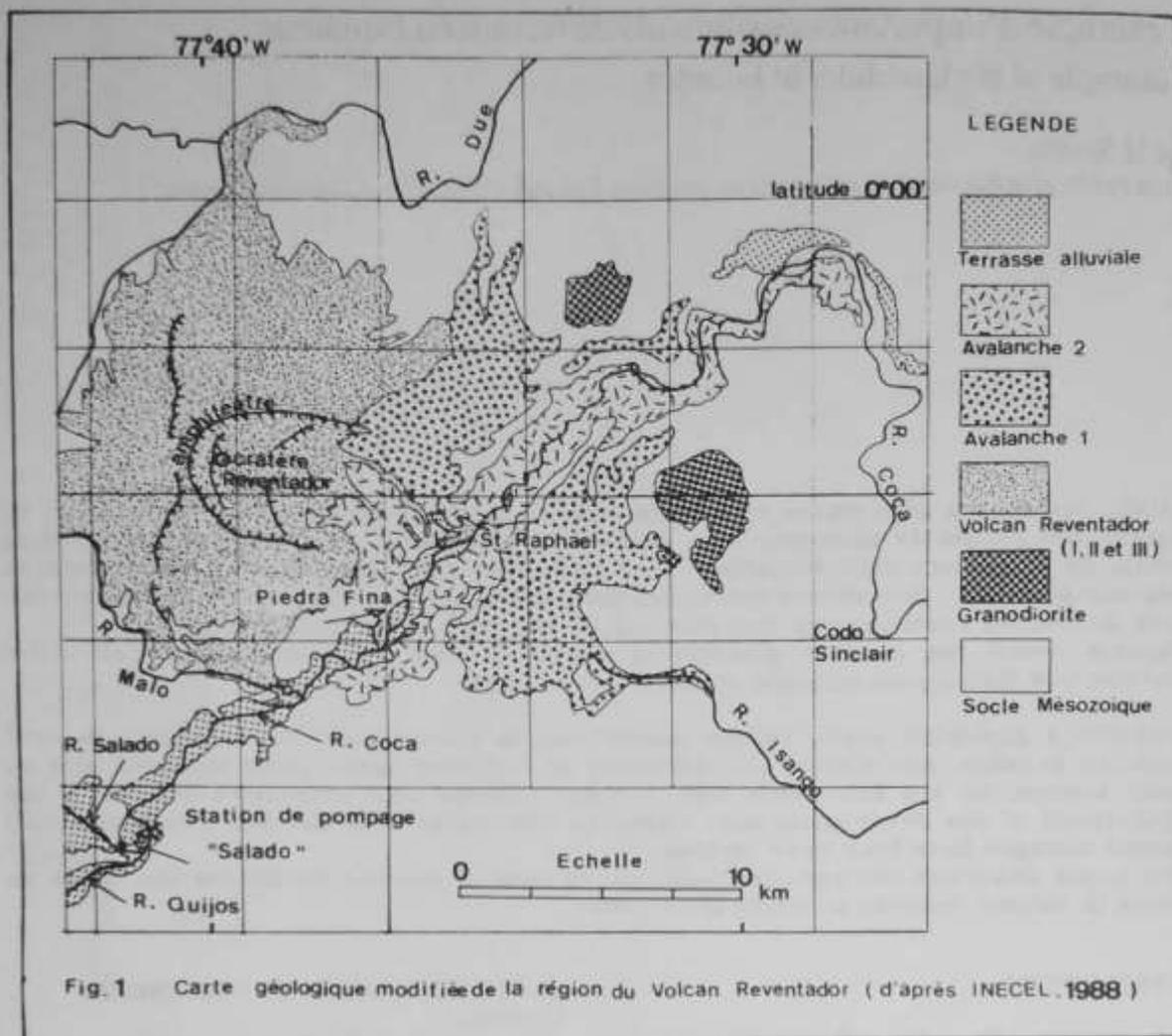


Fig. 1 Carte géologique modifiée de la région du Volcan Reventador (d'après INECEL, 1988)

du tertiaire inférieur jusqu'au Quaternaire. Ces phénomènes furent accompagnés par une activité sismique intense à l'origine du cercle magmatique équatorial (INECEL, 1988).

3 GEOLOGIE LOCALE DU COMPLEXE VOLCANIQUE DU REVENTADOR (fig.1)

On distingue trois unités correspondant chacune à un édifice volcanique qui représente les principales étapes de son évolution: le Reventador I, le Reventador II et le Reventador III (ou actuel)

3.1 Reventador I

Il fut un énorme stratovolcan constitué par des ignimbrites, laves et intercalations de brèches volcaniques. Son volume est estimé à 100 Km³, dont un

cinquième résulte d'une gigantesque avalanche de débris (définie ultérieurement comme Avalanche 1) qui a affecté les secteurs oriental et central du volcan.

3.2 Reventador II

Ce fut aussi un stratovolcan très asymétrique, du au fait que la distribution de ses produits fut conditionnée par la morphologie anormale du substratum et des orientations tectoniques prédominantes. Ce volcan fut caractérisé par une alternance complexe de laves basaltiques à andésitiques intercalées avec des couches pyroclastiques. Son volume est estimé à 15 Km³ dont la moitié fut l'objet d'un grand glissement (avalanche 2) qui affecta le coté est du volcan.

3.3 Reventador III

C'est un cône régulier qui culmine à 3562 m. Il continue à grandir à l'intérieur de l'amphithéâtre escarpé formé par son prédécesseur, le Reventador II, antérieurement interprété comme une caldeira. Le cratère de 100 m. de diamètre approximativement est actif.

Les produits émis par ce jeune volcan (nombreuses coulées de lave en blocs, andésites basaltiques, brèches et lahars entre autres) se sont étendues seulement à l'intérieur de l'amphithéâtre sans atteindre le fond de la vallée formée par la rivière Coca. De plus il a émis des produits pyroclastiques qui se sont distribués sur une surface étendue. Le volume du volcan est estimé à 5 Km³.

4 AVALANCHES DE DEBRIS

Les dépôts résultants des avalanches du Reventador I et II citées ci-dessus présentent en divers points des fragments où la structure volcanique initiale est apparente (intercalations de lave avec des matériaux pyroclastiques formant un complexe fracturé)

Les deux glissements furent séparés par un intervalle important de temps au cours duquel se sont développés des phases tectoniques compressives et des variations structurales, morphologiques et topographiques.

Ces mouvements de terrains complexes se sont amorcés sous forme de glissements avant de se transformer en avalanches de débris.

Les barrages naturels formés dans la vallée de la Coca correspondent aux types II et III proposés par Costa et Schuster (1988)

La description de l'éruption et des phénomènes associés du volcan Ste. Hélène, aux Etats - Unis (Decker et al, 1984) constitue un modèle parfaitement adapté pour la compréhension de l'histoire du Reventador.

4.1 Avalanche 1

La surface couverte par ce glissement est estimée à 140 Km² dont le volume des matériaux déplacés atteint 20 Km³. La distance minimale parcourue par cet énorme glissement à partir du cratère du Reventador I est d'environ 19 Km. Les vestiges de l'avalanche peuvent s'observer jusqu'à 10 Km. au SE de la Rivière Coca actuelle, c'est à dire à la

rivière Isango.

Les datations qui ont été effectuées et dont les résultats semblent très peu fiables indiquent que ce glissement se serait passé il y a 30.000 ans.

Le matériau apparaît comme un agglomérat volcanique assez lithifié qui présente une texture chaotique avec des éléments assez arrondis dont les dimensions varient du centimètre au mètre dans une matrice sablo - limoneuse.

Cette avalanche de débris se serait formée au moment où le lit de l'ancienne rivière Coca, se trouvait à environ 2 Km. à l'ouest de la rivière actuelle. L'évidence de l'existence de cet ancien lit s'observe à plus ou moins 1600 m. d'altitude (INECEL, 1988), ceci permet d'inférer un barrage naturel d'une hauteur de 200 m.

D'après les observations de l'auteur dans le secteur du ruisseau Piedra Fina, il est permis d'estimer que le barrage naturel aurait une hauteur de plus de 400 m. (ECUASUELOS, 1988)

Cette avalanche semble être une avalanche froide d'origine sismotectonique sans relation avec des changements notables de l'activité volcanique du Reventador.

La qualité de la matrice du matériau a fait l'objet d'une analyse sommaire de mécanique des sols jusqu'à une profondeur de 25 m. Du point de vue géotechnique elle constitue un sol sablo - limoneux compact gris rougeâtre dont les paramètres de résistance au cisaillement sont: densité humide, 1.80 T/m³; densité sèche, 1.66 T/m³; cohésion, 0.50 Kg/cm²; et angle de friction interne, 42°.

Ce matériau est assez résistant à l'érosion par l'eau. Il maintient des talus assez raides de l'ordre de 80° sans montrer des signes d'instabilité pour un facteur de sécurité $F > 1.5$

4.2 Avalanche 2

La zone lobulée de la dépression actuellement visible permet de conclure que le Reventador II fut affecté par l'une ou les deux causes suivantes:

1. Un effondrement dû à la vidange d'une chambre magmatique d'un volume compris entre 1 et 4 Km³, résultant d'une violente éruption.

2. Un gigantesque glissement d'origine sismique et une forte pluviosité qui affectèrent les pentes raides du volcan constitué par un pourcentage élevé de matériaux pyroclastiques ainsi que par une érosion accélérée de la Rivière Coca qui suivait sa base.

La surface couverte par ce glissement est estimée à plus de 80 Km² dont le volume de matériaux entraînés est de 8 Km³?

Le front de cette avalanche se déplaça vers l'est en dépassant la vallée - coïncidant avec l'actuelle - obstruant son cours et surmontant partiellement le versant de la rive opposée jusqu'à recouvrir en partie le dépôt de l'avalanche 1. Ultérieurement les matériaux se déplacèrent le long de la vallée dans les deux sens mais principalement vers le nord est, formant un énorme endiguement. La hauteur estimée serait supérieure à 500 m. dans le secteur de Saint Raphael.

La distance parcourue par ce glissement est de l'ordre kilométrique. La masse glissée qui s'est mise en place le long de la rivière dans les deux sens occupe la vallée sur 7 Km. en amont et au moins sur 25 Km. en aval, de la cascade Saint Raphael dans sa situation actuelle.

Les datations par C14 sur les résidus végétaux trouvés dans les dépôts pyroclastiques et dans les sédiments du lac formé après l'avalanche ont permis d'évaluer l'âge de cette avalanche à plus ou moins 19.000 années (INECEL, 1988)

Le matériau semble être un agglomérat volcanique lâche presque sans aucune cohésion et présente des blocs de dimensions variables (allant jusqu'au mégabloc), dans une matrice très hétérogène. Dans ces dépôts on reconnaît divers facies.

La qualité de la matrice a fait également l'objet d'une étude ponctuelle de mécanique des sols jusqu'à une profondeur de 24 m. Du point de vue géotechnique c'est un sol qui présente des caractéristiques mécaniques médiocres. Les valeurs de résistance au cisaillement sont les suivantes: densité humide, 1.70 T/m³; densité sèche, 1.60 T/m³; cohésion, 0 T/m²; angle de friction interne, 38°. Pour des valeurs supérieures à 35° l'instabilité des talus est critique pour un facteur de sécurité F = 1.1. Le risque majeur avec ce matériau résulte de son peu de résistance à l'érosion par l'eau.

5 TERRASSE ALLUVIALE ANCIENNE

Suite aux différentes obstructions de la vallée, un lac d'une longueur supérieure à 50 Km s'est formé, impliquant une importante sédimentation fluvio - lacustre. Le long de la rivière Coca on peut observer des terrasses anciennes formées à différentes époques du Quaternaire. En

se servant des graphiques de Costa (voir référence), l'énergie potentielle estimée de ce lac serait de l'ordre de 10E16 joules.

L'étude de cette partie envisage deux points de référence situés le long de la rivière Coca et séparés par une distance de 16 Km: La station de pompage de pétrole El Salado qui se trouve à 1260 m d'altitude et l'actuelle cascade St. Raphael aux cotes 1160 et 1030 m. se rapportant respectivement à la tête et au pied de cette cascade (voir fig. 1).

Les dépôts alluviaux au site de la Station El Salado forme une terrasse étendue de 600 à 800 m. de large et de 214 m. d'épaisseur (INECEL, 1978). Le matériau est constitué par des intercalations de couches de graviers, de sables et de silts.

La présence de quatre couches importantes de silt indique que la terrasse eut une origine lacustre, c'est à dire à une époque de quiétude. Les niveaux inférieurs de ces couches se trouvent aux cotes 1135, 1210, 1238 et 1307 et ont des épaisseurs respectives de 10, 5, 8 et 15 m. Elles seront définies ci-dessous comme couches A, B, C et D.

La couche A -qui est la plus basse- semble s'être formée à la suite d'une obstruction de la vallée provoquée par une coulée de lave qui constitue également le mur actuel de la cascade Saint Raphael de 60 m. d'épaisseur et de 100 m. de hauteur approximative.

Les couches B et C semblent avoir été formées par des barrages naturels de laves ou issus de glissements de terrain qui se sont établis à proximité de l'embouchure de la rivière Malo dans la rivière Coca.

Enfin la couche D -la plus épaisse et la plus jeune - s'est formée après l'obstruction de la vallée causée par l'avalanche 2 dont la longueur déjà citée aurait été de plus de 30 Km. Ensuite la rivière a creusé son lit et la cascade initiale a reculé depuis le pied de l'avalanche jusqu'à la barrière de lave du secteur de St. Raphael.

En admettant que le petit mur de lave de Saint Raphael puisse disparaître pour des raisons diverses, le recul de la cascade serait immédiat et atteindrait le secteur de la rivière Malo en peu de temps (quelques mois ?)

Cette vitesse de recul est intéressante à prendre en compte si on la compare avec celle de la cascade Agoyan sur la rivière Pastaza au bord du volcan actif Tungurahua, dans le centre du pays. Cette cascade a reculé de plus de 800 m. en 30 ans, dont 400 m. en une seule nuit (Juin 1956) lors de pluies extraordinaires.

La construction du nouveau réseau de l'infrastructure pétrolière du pays a débuté en 1970. Un tronçon de 30 Km. - avec différents ouvrages linaires- s'est implanté dans les matériaux peu consolidés du flanc sud du Reventador sans considérer la vulnérabilité à laquelle il était exposé.

Le 5 mars 1987 la région nord est du pays a été secouée par deux tremblements de terre dont les magnitudes Richter étaient M = 6 et M = 6.8 respectivement et les épicentres se sont localisés aux alentours du volcan Reventador.

Des milliers de glissements de terrain, des coulées de boue et des avalanches de débris, impressionnantes, se sont produits suite à ces séismes. Ils ont profondément modifiés le paysage et sa morphologie, détruisant la route, une station de pompage, le gazoduc et l'oléoduc transéquatorial localisés sur le versant gauche de la rivière Coca sur environ 30 Km. Plus de 130 morts et disparus ont été dénombrés et des dégâts furent estimés à plus d'un milliard de U.S. dollars. (Sevilla, 1987).

Une grande partie des glissements de terrains s'est produite à l'intérieur du paléoglisement (avalanche 2) et actuellement, pour des raisons économiques, on a reconstruit les ouvrages sur le même site malgré les risques connus. Les effets de la diminution du PIB sont encore ressentis aujourd'hui.

Les traits tectoniques prédominants constituent un réseau de failles et de fractures orienté dans l'axe NNE à l'intérieur d'une zone très sismique (Sevilla, 1981)

Compte tenu des conditions géologiques qui contrôlent la distribution des sites sensibles aux glissements de terrain par les effets sismiques, on peut estimer que la distance maximale de la zone d'influence d'un glissement de terrain potentiel et que la surface affectées sont respectivement de 150 Km. et 10.000 Km² (Keefer, 1984).

7 CONCLUSIONS

L'importance et la fréquence des risques géologiques résultant de séismes, de l'activité volcanique et des mouvements de terrain prouvent que l'Equateur est un pays très enclin aux risques naturels n'épargnant aucune région.

Outre les nombreux glissements existants,

la description de quelques macroglissements de cet article, constitue un bel exemple de l'échelle des phénomènes d'instabilité qui caractérisent la chaîne des Andes équatoriennes.

Depuis quelques années la prise de conscience des implications des phénomènes géologiques a dépassé le cadre national puisque la 42^{ème} assemblée générale de l'ONU décrétait en décembre 1987 que les années 1990 seraient celle de la "Décennie internationale pour la réduction des catastrophes naturelles" (Masure, 1989). Cette décision appelle une responsabilisation définitive des institutions scientifiques et politiques tant à l'échelle internationale que nationale pour tenter de résoudre ce grave problème.

REFERENCES

- Almeida, E. & Cruz, M.(1986).
Estudio geologico del volcan Reventador. INECEL, Quito
- Costa, J.E. & Schuster, R.L. (1988).
The formation and failure of natural dams. Geological Society of America Bulletin, v.100, p.1054 - 1068
- Decker, R & Decker, B.(1984).
Les éruptions du Mont Saint Helens. Bibliothèque pour la Science, éd. française de Scientific American, p.9-24, Paris
- Ecuasuelos (1988). Estudio geologico del puente sobre el rio Piedra Fina, CEPE-TEXACO, Quito, 16 p.
- INECEL (1978). Informe de prefactibilidad del proyecto Coca Codo Sinclair, DEIC. Quito,
- INECEL (1988). Estudio volcanologico del volcan Reventador, DEIC. Quito, 120 p.
- Keefer, D.K.(1984). Landslides caused by earthquakes. Geological Society of America Bulletin, v.95, p.406-421
- Kittleman, L.(1984). Les projections volcaniques. Bibliothèque pour la Science, p.37-47
- Masure, Ph.(1989). La vulnérabilité des sociétés modernes face aux catastrophes naturelles. Supplement La Recherche N.212, p.8-13, Paris
- Sevilla, J.(1981). Esquema de la sismicidad en el Ecuador, INECEL, Quito
- Sevilla, J.(1985). Un ejemplo de erosion retrocedente: la cascada Agoyan. First Latin American Symposium on natural disasters. Proc. CEIG-EPN, p.119-124, Quito
- Sevilla, J. & Landazuri, C. (1987). Estudios geotécnicos de la estacion de bombeo El Salado, CEPE-TEXACO, Quito, 78p.

D.G. Price (ed.) 90 6191 130 3
Proceedings: 6th International Congress International Association of Engineering Geology, Amsterdam, 6-10 August 1990
Comptes-rendus 6ème congrès International Association International de géologie de l'ingénieur, Amsterdam, 6-10 août 1990
1990-91, 28 cm, c.5000 pp. 6 vols, Hfl.650/\$350.00/£205
The official proceedings of the sixth congress of the IAEG. The papers are from contributors throughout the world. Topics: Engineering geology mapping & site investigation; Remote sensing & geophysical techniques; Hydro-engineering geology; Surface engineering geology; Underground engineering geology; Engineering geology of land & marine hydraulic structures; Construction materials; Computer use in engineering geology; Environmental protection, pollution & waste disposal; Coastal protection & erosion, including the engineering & environmental consequences of rises in sea level; Engineering geology in the oil industry.

New & recent publications

Proceedings: 5th international congress International Association of Engineering Geology / Comptes-rendus: 5ème congrès international Association International de Géologie de l'Ingénieur, Buenos Aires, 20-25 October 1986 90 6191 660 7
1986-90, 28 cm, 2831 pp., 4 vols., Hfl.650/\$350/£205
Engineering geological investigations of rock masses for civil engineering projects & mining operations; Engineering geological problems related to foundations & excavations in weak rocks; Engineering geological aspects of foundations in soils; Engineering geological problems related to hydraulic & hydro-electric developments; Engineering geology in the development of road, railroad, coastal & offshore projects; Engineering geological aspects in environment planning & urban areas. About 300 papers of which 12 in French.

Proceedings: 4th international congress International Association of Engineering Geology, India, 1982 / Comptes-rendus: 4ème congrès international Association International de Géologie de l'Ingénieur, Inde, 1982 90 6191 266 0
1982-90, 28 cm, 3188 pp., 10 vols., Hfl.650/\$350/£205
Engineering geological studies for environmental evaluation & development; Engineering geological problems of tunnelling & excavation of cavities; Soil & rock as construction material; Engineering geological problems of natural & man-made lakes; & of sea-coast & sea-bed areas; Seismic & seismo-tectonic investigations of projects; History & development.

Marinos, Paul G. (ed.) 90 6191 793 X
Engineering geology as related to the study, preservation and protection of ancient works, monuments and historical sites - Proceedings of an international symposium, Athens, 19-23.09.88
1988-90, 25 cm, 2388 pp., 4 vols., Hfl.385/\$210.00/£122
The protection of historical sites & monuments; Building stones of historical monuments; Archaeological exploration; Hazards in the course of history; Historical sites; Engineering works in the antiquity. Editor: Univ. Thracia, Xanthi, Greece.

Robert J. Watters (ed.) 90 6191 878 2
Engineering geology and geotechnical engineering - Proceedings of the 25th symposium, Reno, 20-22 March 1988
1989, 25 cm, 432 pp., Hfl.165/\$90.00/£52
Geophysical and in-situ investigations; Slope stability; Soil improvement; Dam design considerations; Environmental and geologic hazards; Geostatistics and dynamic loading; Laboratory investigations; Foundation investigations and design.

Beck, Barry E. (ed.) 90 6191 987 8
Engineering and environmental impacts of sinkholes and karst - Proceedings of the third multi-disciplinary conference, St. Petersburg-Beach, Florida, 2-4 October 1989
1989, 28 cm, 392 pp., Hfl.150/\$85.00/£47

In recent years, engineers and geoscientists from around the globe have recognized the practical impact of karst geology. In the past, man's efforts to develop karst terrane have resulted in disaster as roads collapsed into sinkholes, buildings were swallowed, reservoirs lay dry, and major water supplies were contaminated. Now we attempt to understand this unique landscape so that we can properly and safely develop it for man's use while preserving its unique attributes. 44 papers on: The geologic & hydrologic assessment of karst areas; Sinkhole development & occurrence; Ground water quality & pollution in karst terranes; Engineering geology of karst terranes; Geophysical investigations of karst terrane; Case studies of engineering in karst terrane; Planning, governmental & legal implications of karst terrane. Editor: Florida Sinkhole Research Institute, Orlando.

Beck, F. Barry & William L. Wilson (eds.) 90 6191 692 5
Karst hydrogeology: Engineering and environmental applications - Proceedings of the second multidisciplinary conference, Orlando, Florida, 9-11 February 1987
1987, 28 cm, 475 pp., Hfl.150/\$85.00/£47

Regional studies of sinkholes & karst; Case studies of sinkhole occurrence; Geophysical studies of sinkholes & karst; Hydraulics & groundwater pollution in karst terranes; Drainage & flooding in karst terrane; Planning for development of karst terranes; Remedial treatment of sinkhole collapse & other karstic engineering problems. 63 papers.

Balasubramaniam, A.S., S. Chandra, D.T. Bergado & Prinya Nutalaya (eds.) 90 6191 785 9
Environmental geotechnics and problematic soils and rocks - Proceedings of an international symposium, Bangkok, December 1985

1988, 25 cm, 576 pp., Hfl.190/\$105.00/£60
Geotechnical control & environmental protection; Environmental geotechnical aspects of major infra-structure projects; Environmental geotechnical aspects of natural hazards; Wastes & their use; Problematic soils & rocks.

Brabb, E. E. & B. L. Harrod (eds.) 90 6191 876 6
Landslides: Extent and economic significance - Proceedings of the 28th international geologic congress symposium on landslides, Washington D.C., 17 July 1989
1989, 30 cm, 399 pp., Hfl.150/\$85.00/£47

The first systematic documentation of the extent & expense of the landslide problem in more than 100 countries & subsea areas. It provides an overview of factors that contribute to landsliding, such as precipitation, earthquake shaking, volcanism, & weak geologic units. Summaries of dominant landslide mechanisms & descriptions of major destructive landslides are included. 36 papers. Editors: Geological Survey, Menlo Park, Calif. USA.

Bonnard, Ch. (ed.) 90 6191 837 5
Landslides - Proceedings of the 5th international symposium, Lausanne, 10-15 July 1988
1988-89, 30 cm, 1604 pp., 3 vols, Hfl.455/\$250.00/£146
Geology & selection of parameters; Monitoring methods & field measurements; Analysis methods & forecasting of behaviour; Drainage & stabilization; Evaluation & appraisal of risks of instability. Editor: Ecole Polytechnique Fédérale, Lausanne.

*All books available from your bookseller or directly from the publisher:
A.A. Balkema Publishers, P.O. Box 1675, Rotterdam, Netherlands
For USA & Canada: A.A. Balkema Publishers, Old Post Rd, Brookfield, VT, USA*