

## CAPITULO VII

### POTENCIAL DE LICUACION

#### 7.1 INTRODUCCION

Dentro del marco del estudio de vulnerabilidad geotécnica de la conducción El Llano-Tres Ríos se ha considerado necesario evaluar la susceptibilidad a la licuación dinámica de los depósitos fluviolacustres que llenan los valles El Guarco y Coris, al Sur de Paraíso y de Cartago

Este sector corresponde al tramo Est. K12-k21 aproximadamente. De acuerdo con la información suministrada, la tubería de acero va apoyada a unos 3 metros de profundidad por debajo de la superficie del terreno y en este tramo se encuentran los cruces subfluviales bajos los ríos Toyogres (Est. K16?) y Reventado (Est. K17.7).

La presencia de un alto nivel freático, a profundidades que varían entre 1.5 y 4.0 metros por debajo de la superficie del terreno y la composición típica de depósitos fluviolacustres con estratos arenolimosos intercalados con suelos arcillosos, donde los estratos arenolimosos pueden estar en una condición de densidad baja a media, han hecho pensar que bajo la acción de los sismos fuertes esperados en el área se induzcan fenómenos de licuación dinámica en algunos estratos de apoyo de la tubería y ésta sufra movimientos diferenciales que lleguen a dañarla severamente.

En el Anexo C se presenta la memoria de cálculos de un análisis paramétrico del potencial de licuación para aplicarlo a este tramo de la tubería. Se ha visto la conveniencia de desarrollar este análisis paramétrico con el fin de que sus resultados sirvan de referencia para evaluar la limitada información disponible hasta el momento y la que pueda obtenerse en un futuro con un programa de perforaciones, ensayos in-situ y ensayos de laboratorio a lo largo de la tubería en este tramo.

#### 7.2 METODOLOGIA Y RESULTADOS DEL ANALISIS DE REFERENCIA

La metodología, datos básicos y resultados de este análisis paramétrico de evaluación del potencial de licuación son los siguientes:

- Del estudio presentado por Geomatrix Consultants, la magnitud máxima de los sismos fuertes esperados en la zona que causarán altas aceleraciones del terreno (con fuente en las fallas Navarro, Coris o Agua Caliente) es de 6 3/4.
- Del estudio de riesgo sísmico presentado por Geomatrix se obtienen los siguientes niveles de aceleración pico, A máx, de la superficie del terreno encima de depósitos gruesos de suelo "blando", en función del periodo de retorno del evento sísmico que la produce. También se indica la probabilidad de excedencia en los próximos 50 años de vida operativa del sistema Orosi para cada nivel de aceleración indicado:

Periodo Promedio Retorno del evento sísmico Tr, años	Aceleración Máxima del terreno Amáx, g	Probabilidad de excedencia en los próximos 50 años Pe, %
50	0.34	64
100	0.41	40
500	0.58	10

Dada la importancia de la integridad de la tubería de este acueducto se considera que el nivel de riesgo de excedencia que debe adoptarse al escoger la aceleración de diseño debe ser tan sólo de un 10%, lo que significa el adoptar una A máx=0.58 g.

Sin embargo, este análisis paramétrico se ha hecho para Amáx de 0.35 g, 0.45 g y 0.55 g, con el fin de observar la sensibilidad de los resultados con la variación de los niveles de la excitación sísmica

- Profundidad del nivel freático, Dw.:1.5 m - 4.0 m.
- Profundidades estudiadas , Z:0-15 m.
- La metodología empleada es la desarrollada por Seed y otros desde 1970 y mejorada hasta 1990, donde se evalúa el factor de seguridad contra licuación en función de la resistencia del suelo expresada en los resultados del ensayo de penetración standard, SPT, y del nivel de aceleración inducida.

La Figura No. 23 presenta las curvas que relacionan la resistencia del terreno,  $(N_1)_{60}$ , y la relación de esfuerzos cíclicos (CSR) que induce licuación (F.S.=1.0) en función de una variable muy importante: El porcentaje de finos, % que pasa el tamiz No.200 ( $\geq 35, 15, \leq 5\%$ ) Las curvas de la

figura No. 23 son para una magnitud, M, de 7 1/2 del sismo de diseño. Para otras magnitudes se aplican los factores de corrección indicados en la tabla inferior de la misma figura.

- La relación de esfuerzos inducidos se obtiene:

$$\tau'_{i}/\sigma'_{vo}=0.65 A_{\text{máx}}/g \times \sigma_{vo}/\sigma_{voxr_d}$$

donde  $\tau'_{i}$  = esfuerzo cortante cíclico inducido equivalente  
 $\sigma_{vo}$  = esfuerzo vertical total  
 $\sigma'_{vo}$  = esfuerzo vertical efectivo  
 $r_d$  = factor de reducción =  $1-0.015Z$  (Z, metros)

Las tablas 7-1 y 7-2 y las Figuras Nos. 24 y 25 presentan tabular y gráficamente los resultados de este análisis paramétrico, donde se ve la resistencia SPT requerida,  $N_1$  para garantizar un factor de seguridad dado contra licuación, F.S. de 1.0 o 1.3, desde la superficie del terreno hasta 15 m. de profundidad, según la aceleración,  $A_{\text{máx}}$ , y según el porcentaje de finos del suelo, para dos posiciones diferentes del nivel freático.

**$(N_1)_{60}$ , GOLPES POR PIE, REQUERIDO PARA  $(FS)_1=1.3$**

Profund. z metros	Dw=1.5 m								
	A <sub>máx</sub> =0.35 g			A <sub>máx</sub> =0.45 g			A <sub>máx</sub> =0.55 g		
	Finos, %			Finos, %			Finos		
	≥35	15	≤5	≥35	15	≤5	≥35	15	≤5
3	19	23	28	20	24	29	21	25	30
6	20	24	29	21	25	30	21	25	30
9	20	24	29	21	25	30	22	25	31
12	20	24	29	21	25	30	22	25	31
15	20	24	29	21	25	30	22	25	31
	Dw=4.0 m								
4	15	17	23	18	21	26	20	24	29
6	17	20	25	19	24	28	20	24	30
9	18	21	26	20	24	29	21	25	30
12	18	22	27	20	24	29	21	25	30
15	18	22	27	20	24	29	21	25	30

El análisis de estos resultados indica que los factores que más influyen en la resistencia requerida del suelo para contar con márgenes adecuados contra la licuación dinámica son en su orden:

- Porcentaje de finos, F, %
  - Nivel de aceleración máxima inducida,  $A_{m\acute{a}x}$
  - Profundidad del nivel freático,  $D_w$
  - Profundidad del estrato, Z
- Para los niveles de aceleración máxima estudiados: 0.35 g - 0.55 g, para la variación de profundidades del nivel freático: 1.5 - 4.0 m, la resistencia requerida,  $N_1$ , para FS=1.3, en los 15 m. superiores del perfil es:

Finos, %	$N_1$ , golpes/pie
≥35	15-22
15	17-25
≤5	23-31

Esto demuestra la necesidad de evaluar con buena precisión el porcentaje de finos de los suelos para descartar o confirmar sitios susceptibles a la licuación.

Para un mismo porcentaje de finos ( $F=15\%$ ), una misma posición del nivel freático ( $D_w=1.5$  m), no fue muy significativa la variación de  $N_1$  con el nivel de aceleración máxima dentro del intervalo 0.35-0.55g estudiado:

$A_{m\acute{a}x}$ g	$N_1$ golpes/pie
0.35	23-24
0.45	24-25
0.55	25

El descenso del nivel freático influye favorablemente en los requerimientos de resistencia del suelo para alejar el peligro de licuación.

Así, para  $A_{máx}=0.35$  g,  $FS=1.3$ ,  $Finos=15\%$

Dw,m	Z,m	$N_1$ , g/p
1.5	4	23
4.0	4	17
1.5	6	24
4.0	6	20

Sin embargo, para los intervalos estudiados, las diferencias en  $N_1$  variaron tan sólo 5-30% con las variaciones en la posición del nivel freático

Estos resultados presentados sobre la susceptibilidad a la licuación dinámica en función de la resistencia del suelo en ensayos SPT de campo ( $N_1$ ) sólo deben ser aplicados a suelos arenosos y limosos, SW, SP, SM, ML, de plasticidad muy baja a nula y que estén situados por debajo del nivel freático. Los suelos cohesivos (arenas arcillosas, SC, arcillas arenosas, CL y arcillas CH) cuyos valores de plasticidad estén por encima de la línea A de la Carta de Casagrande sólo son vulnerables a pérdidas significativas de resistencia por excitación sísmica si son muy sensitivos, por ejemplo, si su humedad natural es mayor del 90% del límite líquido. De lo contrario, tales suelos cohesivos pueden ser considerados no licuables.

### 7.3 CASOS PARTICULARES

A continuación se comentan y discuten las condiciones particulares conocidas hasta el momento para el sector, K12-K21, sobre su susceptibilidad a la licuación con base en los resultados del análisis paramétrico presentado en el numeral 7.2. La información disponible se limita a los resultados de una perforación de 12 m. de profundidad en el sitio del cruce del río Toyogres (K16?) y a una de 10.5 m. en el río Reventado (K17.7) realizadas en 1980 por la firma CIMCO S.A., y a una serie de 12 perforaciones cortas, 1.2-5.0 metros de profundidad, realizadas por Geomatrix en mayo y junio de 1994 con penetración del cono alemán y distribuidas a lo largo de la línea de la conducción entre las Estacs. K14 y K21 aproximadamente.

Río Toyogres (Est.K16?)

Profundidad del nivel freático, Dw:1.5m

Presenta una alternancia de estratos no cohesivos densos de cantos, gravas, arenas y limos,

GM, (N=40-100 golpes/pie) con estratos cohesivos de gravas y arenas arcillosas, GC y SC, y arcillas y limos arcillosos, CH y MH, muy firmes a duros (N=16-59 golpes/pie), hasta los 12 metros de profundidad. Se considera este perfil como no susceptible a la licuación dinámica.

#### Río Reventado (Est. K17.7)

Presenta una alternativa de arcillas, CH, firmes (N=12-21 g/p), arenas arcillosas, SC, muy firmes a duras (N=26-72 g/p), y arenas limosas, SM, medio densas a muy densas (N=17-78 g/p).

Con base en los resultados del estudio paramétrico del numeral 7.2 sólo la arena limosa localizada entre 5 y 6 metros de profundidad podría tener un factor de seguridad bajo (menor de 1.3) contra licuación. Sin embargo, sus valores reportados de penetración SPT de 17-24 g/pie pudieron haber sido afectados por el fenómeno detectado de artesianismo a partir de los 4 metros de profundidad. Por lo tanto, se puede decir que este perfil de suelos en el cruce del río Reventado es muy poco susceptible a licuación dinámica ante las excitaciones sísmicas esperadas. Conviene, de todas maneras, verificar las condiciones de resistencia del perfil de suelo por medio de una o dos perforaciones de 15 metros de profundidad.

#### Perforaciones DPL No. 1 y No. 2 (Est. K14 aprox.)

No se detectó la presencia del nivel freático dentro de los 3-5 metros de profundidad explorada. En estos dos sitios el único estrato arenolimoso suelto es muy delgado (30 cms) y está localizado entre 1.2 y 1.5 m. de profundidad, muy por encima del nivel freático y de los suelos de apoyo y de confinamiento de la tubería enterrada del acueducto. Con base en esta información disponible no se anticipan fenómenos de licuación que amenacen la integridad de la tubería. Sin embargo no se cuenta con información directa de SPT, ni se conocen las condiciones por debajo de los 5 metros de profundidad.

#### Perforación DPL No. 3 (N:203.40, E:544.65, Est. K 15.6?, Coordenadas Lambert, Costa Rica Norte).

Esta perforación sólo alcanzó 1.2 m. de profundidad donde llegó hasta niveles de bloques de roca. No se detectó el nivel freático ni se encontraron estratos arenosos sueltos. Este sitio no presenta ningún riesgo de licuación.

- Perforación DPL No. A/1 (N:203.60, E 544.10, Est. K 16.2?)

Esta perforación de 4.2 m. de longitud muestra el nivel freático a 2.5 m. de profundidad, y sólo presenta un estrato arenolimoso de baja densidad muy delgado, entre 1.8 y 2.1 m. de profundidad. Los demás estratos son cohesivos. Esta condición no ofrece peligro de licuación del suelo de apoyo y de confinamiento de la tubería.

- Perforación DPL No. 4 (N=203.60, E=543.8, Est. K16.5?)

Perforación de 3.6 m. de longitud y nivel freático a 1.7 metros de profundidad. Entre 2.5 y 3.2 m. de profundidad aparece una arena poco limosa sin plasticidad, suelta y sumergida, que puede sufrir licuación dinámica con la excitación sísmica esperada en el área. El resto del perfil presenta suelos cohesivos o arenas densas. No se cuenta con la información precisa sobre la localización relativa de la tubería con respecto al estrato potencialmente licuable y por lo tanto no se puede concluir sobre las consecuencias que tendría dicha licuación en la conducción.

- Perforación DPL No. A/2 (N:203.55, E=543.5, Est. K16.8?)

Perforación de 3.0 m. de longitud y nivel freático a 0.5 metros de profundidad, Presenta dos intervalos de profundidad: 0.4-1.2 m. y 1.8-2.2 metros, donde arenas medias a finas sueltas y sumergidas pueden sufrir licuación dinámica inducida por los sismos esperados. Sin embargo, como no se conoce la localización relativa de la tubería con relación a estos estratos potencialmente licuables no se puede concluir sobre los efectos o daños a la conducción. Es posible que el suelo de apoyo y de confinamiento de la tubería se encuentre por debajo de los estratos de arena suelta y que la eventual licuación de ésta no afecte la integridad de la conducción.

- Perforación DPL No. A/3 (N:203.65 E:543.10, Est. k17.2?)

Perforación de 4.2 m. de longitud y nivel freático a 1.6 m. de profundidad. Entre 0.4 y 1.2 metros de profundidad se encuentra un estrato de arena media a fina muy suelta. Si el nivel freático asciende hasta cerca de la superficie del terreno y sucede el sismo esperado tal capa arenosa sufrirá licuación dinámica. Sin embargo, sin conocer detalles de localización, se estima que los suelos de apoyo y de confinamiento de la tubería corresponden a las arenas arcillosas firmes que aparecen por debajo de los 2 metros de profundidad y una eventual licuación de arenas superficiales no afectará la conducción enterrada.

- Perforación DPL No. 5 (N:203.70, E=542.55, Est. K17.7?)

Perforación de 3.6 m. de longitud y nivel freático a 1.8 m. de profundidad. Entre 1.9 y 2.4 metros de profundidad se encuentra arena limosa suelta que sufrirá licuación si se presentan las excitaciones sísmicas esperadas. Sin embargo, como no se conoce la localización relativa del cruce subfluvial bajo el río Reventado con relación al perfil explorado de suelo, no se puede concluir que los fenómenos de licuación alcancen los estratos de apoyo y de confinamiento de la tubería y de su recubrimiento de concreto. Además, los resultados de esta perforación difieren de los obtenidos en mayo de 1980 por lo que se recomienda ejecutar en este sitio dos perforaciones de 15 metros de profundidad, con ensayos in situ y muestreo de alta calidad para aclarar las condiciones del terreno y concluir acertadamente sobre la susceptibilidad a la licuación en este lugar y sobre la afectación al cruce subfluvial.

- Perforaciones DPL No. 6 (N:203.95, E=542.15, Est. K18.1?)  
No. 7 (N:204.25, E=541.30, Est. K19.0?)  
No. 8 (N:203.55, E=540.50, Est. K20.1?)  
No. 9 (N:203.05, E=539.15, Est. K21.5?)

Perforaciones de 3 a 4.2 metros de longitud. Presentan estratos predominantemente cohesivos: arcillas, arcillas arenosas y arenas limoarcillosas, de consistencia media a muy firme que no ofrecen peligro de licuación ni de gran pérdida de resistencia con las excitaciones sísmicas esperadas.

#### 7.4 CONCLUSIONES

La información disponible sobre las condiciones del suelo a lo largo de la conducción en el tramo K12-K21, donde se atraviesan depósitos fluviolacustres, es muy limitada tanto en profundidad explorada, como en número de sitios investigados, en resultados de ensayos de penetración estándar y en ensayos de clasificación de los suelos (plasticidad, porcentaje de finos).

De otra parte, no se contó con una información precisa sobre la profundidad de apoyo de la tubería con respecto a la superficie del terreno y a los niveles explorados por las diferentes perforaciones en los distintos sitios.

En la mayoría de los casos particulares discutidos se encontraron capas arenolimosas sueltas muy superficiales a menos de 2 metros de profundidad y en varios sitios por encima del nivel freático. Como se presume que la tubería va apoyada y confinada dentro de suelos a más de 2 metros de profundidad, los niveles no cohesivos sueltos superficiales no amenazan la integridad de la conducción ante un sismo fuerte.

En la casi totalidad de los casos particulares considerados los suelos por debajo de los 2.5 metros de profundidad corresponden a suelos granulares densos o a cohesivos de consistencia media a firme de baja sensibilidad, de los cuales se espera un comportamiento satisfactorio como suelos de fundación y de empotramiento de la tubería ante la ocurrencia de un sismo fuerte.

En el sector Est. K16-K18 se suscitaron las mayores inquietudes sobre la presencia de capas areno-limosas sueltas y sumergidas muy susceptibles a la licuación dinámica hasta profundidades de 3.2 metros. No conociendo en dichos sitios la profundidad y los detalles precisos de cimentación de la tubería no se puede concluir que la licuación que se presente alcance a afectar la instalación y la integridad de la tubería.

Por lo anterior, se recomienda desarrollar un programa de perforaciones en el sector Est. K16-k18 o, si es posible, desde el K14 hasta el k20, con especial énfasis en los cruces sufluviales de los ríos Toyogres y Reventado. Se recomienda tentativamente realizar perforaciones cada 500 metros a lo largo de la conducción. Si se encuentran condiciones del suelo adversas y preocupantes se deberán realizar perforaciones intermedias para delimitar la zona problemática. En el sitio del cruce del río Reventado se recomienda ejecutar dos perforaciones, una a cada lado del río, dada la condición especial de este cruce subfluvial.

En general se recomienda que las perforaciones tengan 10-15 metros de profundidad y que se ejecute el ensayo de penetración standard cada metro de intervalo vertical. Debe asegurarse que la ejecución del ensayo SPT se realice con una eficiencia cercana al 60% en la energía aplicada para contar con información confiable que se pueda emplear en la evaluación del potencial de licuación a la luz de los resultados del análisis paramétrico presentado en el numeral 7.2. Deberá restársele confiabilidad a los resultados de ensayos SPT cuando ellos sean afectados por presencia de gravas o por la existencia de artesianismo.

De otra parte, deberán clasificarse las muestras recuperadas en el toma muestras con ensayos de plasticidad y granulometría simplificada.

Con los resultados de esta exploración adicional recomendada y los resultados del análisis paramétrico de licuación así como con una información precisa de la geometría de la instalación de la tubería en estos valles, se podrán delimitar los sectores vulnerables que requieran medidas correctivas.

Con base en la información disponible hasta el momento no se puede concluir que haya una clara vulnerabilidad de la conducción ante posibles fenómenos de licuación inducida por sismos fuertes en el tramo k12-k21 de los valles El Guarco y Coris.

## CAPITULO VIII

### CONCLUSIONES Y RECOMENDACIONES GENERALES

#### 8.1 ESTABILIDAD DE LADERAS

Los primeros ocho kilómetros de la conducción del Sistema Orosi atraviesan un terreno montañoso con fuertes pendientes transversales, 30° - 40° de inclinación, y con diferencias muy grandes de nivel, 200 - 300 metros, desde la cima hasta el fondo de las quebradas. Se destacan en especial las condiciones topográficas desfavorables de los sectores K1+100-K1+500, flanco izquierdo de la quebrada Jucó, y K3+600-K4+000, flanco izquierdo de la quebrada Los Tanques.

Los cuatro primeros kilómetros de la conducción han presentado diversos fenómenos de inestabilidad cuyas causas y factores van desde aspectos naturales tales como: geología, pluviosidad, sismicidad y erosión natural, hasta aspectos humanos tales como: cambios en drenaje original, concentración de flujos de agua, deforestación, cortes del camino y botaderos en las laderas.

Los análisis de falla planar dentro del grueso perfil de meteorización existente en los cuatro primeros kilómetros de la conducción indican que sus laderas tienen condiciones críticas de estabilidad ante factores tales como la pérdida de succión por percolación del agua lluvia y el ascenso del nivel freático, las fuerzas de infiltración de un flujo establecido paralelo al talud o excitaciones sísmicas fuertes.

Si con manejo adecuado de la escorrentía y con sistemas de drenaje y subdrenaje se puede mantener el grueso perfil de meteorización sin percolación apreciable y sin flujo subterráneo de agua, las laderas con pendientes hasta de 33° (1 1/2H:IV) podrán considerarse suficientemente estables para garantizar la integridad de la conducción, aún ante excitaciones sísmicas fuertes como las allí esperadas.

Si, por el contrario, las condiciones de pluviosidad, percolación, recarga y mal drenaje son tales que se llegue a establecer un flujo de agua paralelo al talud desde muy cerca de la superficie del terreno por un tiempo prolongado, las laderas con pendientes mayores de 25° (2H:IV) serán francamente inestables.

Si, además, se presenta un sismo fuerte cuando el talud esté en condición de saturación casi total, se producirán deslizamientos o flujos de tierra o de lodos de grandes proporciones y graves consecuencias para la conducción en laderas con pendientes mayores de 25°-28° (2H:IV).

De estos resultados se concluye que el drenaje y el subdrenaje deberán ser las medidas preventivas y correctivas prioritarias para garantizar el buen comportamiento de las laderas hasta hoy estables y para restablecer la estabilidad en los sitios de deslizamientos activos.

Los sectores que representan una mayor vulnerabilidad geotécnica para la conducción, por su complejidad de tratamiento y recuperación, son en su orden:

- K3+600 - K4+000 "El Tapón"
- K1+100 - K1+500 "Los Vados"
- K2+790 - K2+900 "El Queque"

Para El Tapón, con una pendiente promedio de 38°-39° y una altura de 130 metros desde el cauce de la quebrada Los Tanques hasta el nivel del camino, se han recomendado una serie de obras de reforzamiento del sistema de drenaje y subdrenaje. El mantener alejado de la cara del talud el flujo subterráneo y el impedir la percolación y la saturación de los 12 metros superiores del perfil del terreno contribuirá positivamente para que la ladera resista satisfactoriamente sismos de grado medio ( $A_{máx} \leq 0.25 g$ ). Sin embargo, para sismos fuertes ( $A_{máx} = 0.45 g$ ) esperados, la ladera del sitio El Tapon es geotécnicamente muy vulnerable y puede causar un daño grave a la conducción AyA. Para estos niveles de aceleración es muy difícil lograr que con obras correctivas convencionales esta ladera ofrezca las garantías de estabilidad requeridas. Por lo tanto se considera necesario plantear y estudiar desde ya alternativas que contemplen cambios mayores en el alineamiento de la conducción en este sector crítico

Para "Los Vados", con una pendiente promedio de 36°-38° y 78 metros de diferencia de nivel entre el camino y el fondo de la quebrada Jucó, se ha recomendado una serie de obras de estabilización que se deben ejecutar lo antes posible con el fin de que este sector no se convierta en poco tiempo en un sitio tan vulnerable y de difícil control como "El Tapón"

Para el sitio "El Queque" se han recomendado obras correctivas para lograr la estabilización de los dos deslizamientos allí presentados. Estas obras deben acometerse a la mayor brevedad posible pues unos deslizamientos retrogresivos amenazan con remontarse muy pronto hasta el nivel del

camino. En este sector la pendiente transversal promedio de la ladera (27°-33°) no es tan fuerte como en Los Vados y El Tapón. Sin embargo, los fenómenos de inestabilidad presentes en El Queque son tan graves e involucran masas tan grandes de suelos que requieren un tratamiento inmediato.

Deberá hacerse un seguimiento permanente y riguroso del comportamiento de las laderas en el tramo K0-K4 y en especial en los sectores críticos destacados en este informe. Se deberán hacer controles frecuentes de la instrumentación y los datos obtenidos deberán ser interpretados oportunamente con el fin de tomar decisiones a tiempo cuando las circunstancias lo requieran.

Deberá hacerse un reconocimiento frecuente de este tramo, evaluando el comportamiento de cada ladera, el estado de las obras de drenaje y de manejo de escorrentía, las entregas de agua, la condición de los cauces de las quebradas y de los taludes de sus cañones, el estado de la vegetación, la aparición de procesos de agrietamiento y de erosión y cualquier anomalía que deba ser reportada para su corrección oportuna.

Existen muchos otros sitios con problemas de estabilidad en el tramo K0-K4, en el sector K23+000-K23+700 y en el sitio K24+750, antes del portal de entrada y después del de salida del túnel de la Carpintera. Sin embargo, su gravedad es menor que los del Tapón, Los Vados y El Queque, su amenaza contra la integridad de la tubería es pequeña o nula y las medidas correctivas recomendadas son sencillas y de bajo costo. Para tales casos "menores", si se ejecutan las medidas correctivas recomendadas, se espera lograr un grado de vulnerabilidad geotécnica muy bajo o nulo para la conducción AyA

## 8.2 POTENCIAL DE LICUACION

La información disponible sobre las condiciones del suelo a lo largo de la conducción en el tramo K12-k21, valles fluviolacustres de El Guarco y Coris, es muy limitada.

En la mayoría de los sitios con información disponible se encontraron capas arenolimosas sueltas muy superficiales cuya eventual licuación inducida por sismos no afectará los suelos de fundación ni de empotramiento de la tubería, localizados a mayor profundidad que los niveles problemáticos.

En la casi totalidad de los sitios con información disponible los suelos existentes por debajo de 2.5 metros de profundidad corresponden a suelos granulares densos o a cohesivos de consistencia

media a firme de baja sensibilidad, de los cuales se espera un comportamiento satisfactorio como fundación y empotramiento de la tubería ante la ocurrencia de un sismo fuerte.

En el sector Est. K16-K18, algunos de los sitios que cuentan con información del suelo muestran la presencia de capas areno-limosas sueltas y sumergidas muy susceptibles a la licuación dinámica hasta profundidades de 3.2 metros. Sin embargo, sin conocer en dichos sitios la profundidad y los detalles precisos de cimentación de la tubería no se puede concluir que la licuación que se presente afecte su integridad.

Por estos motivos, se recomienda desarrollar un programa de perforaciones en el tramo K14-K20 y en especial en el sector K16-K18, de 15 metros de profundidad, con ensayos in situ, muestreo y ensayos de laboratorio que suministren la información necesaria y confiable para evaluar el potencial de licuación de cada sitio a la luz del análisis paramétrico aquí desarrollado

Sólo con dicha información del suelo y con el conocimiento de la geometría de la instalación de la tubería se podrán delimitar a los sectores vulnerables, si los hay, y formular las recomendaciones de obras correctivas

Con base en la información disponible hasta el momento no se puede concluir que haya una clara vulnerabilidad de la tubería ante fenómenos de licuación inducida por sismos fuertes en el tramo Est. K12 - K21, correspondiente a los valles El Guarco y Coris

## REFERENCIAS ADICIONALES

1. Cedergren, H.R., Seepage, Drainage and Flow Nets, John Wiley & Sons, Inc., U.S.A., 1968.
2. Deere, D.U , y Patton, F.D., "Slope Stability in Residual Soils", Fourth Panamerican Conference on Soil Mechanics and Foundation Engineering, 1971.
3. García, M.G., y Durán, J.E., "Metodología para el Estudio de Estabilidad de Taludes", Primeras Jornadas Geotécnicas, SCI., Septiembre, 1976.
4. ECOPETROL, Manual de Protección Geotécnica y Ambiental, Bogotá, Col., 1990.
5. Kachadoorian, Reuben, "Earthquake: Correlation Between Pipeline Damage and Geologic Environment", Journal AWWA, Management and Operations, March, 1976
6. Martin, G.R., "Evaluation of Soil Properties for Seismic Stability", Stability and Performance of Slopes and Embankments-II, ASCE, 1992.
7. Newmark, N., "Effects of Earthquakes on Dams and Embankments", Géotechnique, 15, 1964.
8. Rico, A., y Del Castillo, H., La Ingeniería de Suelos en las Vías Terrestres, vol. 1, Editorial Limusa, S A., México, 1974
9. Seed, H B., e Idriss, I.M , Ground Motions and Soil Liquefaction During Earthquakes, EERI, Berkeley, Ca., 1982.
10. Suárez, J., Manual de Ingeniería para el Control de Erosión, UIS-CDMB, Bucaramanga, Colombia, 1992.

## TABLAS

**ESTUDIO DE VULNERABILIDAD GEOTECNICA**  
**TABLA DE REFERENCIA PARA EVALUAR POTENCIAL DE LICUACION PARA Dw=4m**  
**TABLA No. 7.2**

**(N<sub>1</sub>)<sub>60</sub> NECESARIO PARA GARANTIZAR UN (F.S)<sub>L</sub> DADO, M= 6 3/4, Dw=4m**

Z	amax=0.35g						amax=0.45g						amax=0.55g					
	FINOS >35%		FINOS 15%		FINOS ≤5%		FINOS >35%		FINOS 15%		FINOS ≤5%		FINOS >35%		FINOS 15%		FINOS ≤5%	
	F.S	F.S	F.S	F.S	F.S	F.S	F.S	F.S	F.S	F.S	F.S	F.S	F.S	F.S	F.S	F.S	F.S	F.S
m	1.0	1.3	1.0	1.3	1.0	1.3	1.0	1.3	1.0	1.3	1.0	1.3	1.0	1.3	1.0	1.3	1.0	1.3
1	12	15	14	17	18	23	15	18	17	22	23	27	17	20	21	24	26	29
2	11	15	13	17	17	23	15	18	17	22	23	27	17	20	21	24	26	29
3	11	15	13	17	17	23	15	18	17	21	23	26	17	20	20	24	26	29
4	10	15	13	17	16	23	15	18	17	21	23	26	17	20	20	24	26	29
5	12	16	14	19	19	25	15	19	18	23	24	28	18	20	22	24	27	29
6	13	17	15	20	20	25	16	19	19	24	25	28	19	20	23	24	27	30
7	14	17	16	20	22	26	17	20	20	24	26	29	19	21	23	25	28	30
8	15	17	17	21	22	26	17	20	21	24	26	29	20	21	23	25	28	30
9	15	18	17	21	23	26	17	20	21	24	26	29	20	21	24	25	29	30
10	15	18	17	21	23	26	17	20	21	24	26	29	20	21	24	25	29	30
11	15	18	17	22	23	27	18	20	22	24	27	29	20	21	24	25	29	30
12	15	18	17	22	23	27	18	20	22	24	27	29	20	21	24	25	29	30
13	15	18	17	22	23	27	18	20	22	24	27	29	20	21	24	25	29	30
14	15	18	17	22	23	27	18	20	22	24	27	29	20	21	24	25	29	30
15	15	18	17	22	23	27	18	20	22	24	27	29	20	21	24	25	29	30

**CONVENCIONES:**

Z: Profundidad

FINOS: Porcentaje de material que pasa el tamiz 200

(N<sub>1</sub>)<sub>60</sub>: Número de golpes corregido y normalizado a una eficiencia del 60% para el ensayo de penetración estándar

amax: Aceleración máxima de la superficie del terreno para un sismo dado

F.S: Factor de seguridad contra licuación

M: Magnitud del sismo

Dw: Profundidad del nivel freático