

C. LOTTI & ASSOCIATI

SOCIETA' DI INGEGNERIA S.p.A.

ENEL.HYDRO S.p.A.

**FONDO SALVADOREÑO PARA
ESTUDIOS DE PREINVERSIÓN
FOSEP**

**BANCO INTERAMERICANO DE
DESARROLLO
BID**

**MINISTERIO DE MEDIO AMBIENTE
Y RECURSOS NATURALES**

REDACTADO	COD.	WBE	UNIDAD	PROGR.	REV.	FECHA
	81.a				1	04-10-01
DESCRIPCION						
INVESTIGACION GEOTECNICA INTEGRAL EN LA CORDILLERA EL BALSAMO, AL SUR DE SANTA TECLA, ENTRE LAS COLONIAS LAS DELICIAS Y LAS COLINAS						
Informe Ejecutivo						
REDACTADO	DISEÑADO	VERIFICADO	RECIBIDO	APROBADO		
Versiones anteriores						
Rev.	Fecha	Descripción				
0	04-10-01	Emisión				
1	19-10-01	Revisión para emisión separada				

file: Informe_ejecutivo

INDICE

INDICE	1-1
1 Premisas	1-2
2 LAS ACTIVIDADES efectuadas	2-1
2.1 El área de estudio	2-1
2.2 Estudio fotogeológico	2-2
2.3 Reconocimiento de campo	2-2
2.4 Programa de investigaciones	2-3
2.5 Las investigaciones efectuadas	2-4
2.6 Pruebas de laboratorio	2-5
2.7 Geología	2-7
2.8 Análisis y Diseño	2-9
2.8.1 ESTUDIOS PREVIOS	2-9
2.8.1.1 Sismicidad del área	2-9
2.8.1.2 Estudio hidrológico	2-12
2.8.2 EVALUACION	2-13
2.8.2.1 Modelo geotécnico – deslizamiento - estabilidad	2-13
2.8.2.2 Análisis de las Amenazas y Riesgos	2-14
2.8.3 Alternativas de Solución	2-16
2.8.4 Obras de Emergencia	2-17
3 CONCLUSIONES	3-1

1 PREMISAS

El presente Informe Ejecutivo describe las actividades efectuadas por el Consultor - el Consorcio C. Lotti & Associati-Enel.Hydro - en el marco del Estudio Geotécnico Integral de la Cordillera El Bálsamo, al Sur de Santa Tecla, entre las Colonias Las Delicias y Las Colinas, y presenta una síntesis de las consideraciones conclusivas.

El Contrato entre el Propietario y el Consultor fue suscrito el día 11 de mayo de 2001 y la orden de inicio del estudio fue data el día 17 de mayo. El plazo inicial para la realización del estudio era de setenta y cinco días calendario y por lo tanto la fecha de terminación estaba prevista para el 31 de julio: el plazo muy corto ha sido elemento determinante en la ejecución del estudio.

Cabe mencionar que el Estudio no incluía las actividades de topografía. En efecto se consideraba que ésta hubiera sido ejecutada por el Propietario y entregada al Consultor en tiempo útil.

Las actividades del estudio empezaron con el reconocimiento de campo, las análisis fotogeológicas y el programa de las investigaciones geotécnicas.

El día 17 de junio el Consultor presentó al Propietario el Primer Informe de Avance, que refería sobre las actividades ejecutadas hasta esa fecha las cuales eran esencialmente los trabajos de campo realizados con los sondeos mecánicos y los ensayos en el campo.

En el mismo periodo se ejecutó el levantamiento geológico y se prepararon los primeros planos geológicos que se basaron sobre las secciones estratigráficas deducibles a partir de las zonas expuesta que se encuentran en la zona del estudio.

Según el cronograma, en el sucesivo período de actividad (desde el día 17 de junio hasta el día 17 de julio) el Consultor concluyó las actividades de campo, incluidas las investigaciones geotécnicas, por medio de los sondeos mecánicos y las investigaciones geofísicas.

Estas dos actividades han permitido completar el cuadro geológico y geotécnico general del área de estudio. Desde los primeros días del mes de julio se empezaron también los ensayos de laboratorio.

En este período se ejecutaron las investigaciones sobre la amenaza sísmica, que comprendieron también las medidas del factor de amplificación sísmica, por el método de Nakamura, en diferentes puntos de la Cordillera.

Se completaron también los estudios geológicos y se pudieron preparar los mapas y las secciones representativas de la Cordillera.

El día 17 de julio el Consultor presentó al Propietario el Segundo Informe de Avance, al cual se anexaron los Reportes detallados de las actividades efectuadas hasta esa fecha: investigaciones e informe geológico.

Durante el mes de julio, se ejecutaron los estudios sobre las obras de mitigación, en relación a las consideraciones deducibles de los análisis geológicos, geotécnicos y sísmicos.

Estos últimos fueron efectuados por medio del estudio del deslizamiento, la retro-análisis y las verificaciones de estabilidad.

Durante este período, debido a atrasos generados por la topografía y por el laboratorio geotécnico autorizado, se solicitó y obtuvo una prórroga de cuarenta días.

Debido a esta prórroga, los resultados de los estudios fueron presentados en el Informe Final, entregado al Propietario el día 10 de septiembre.

En el Informe Final fueron anexados los reportes de los ensayos de laboratorio, los estudios geotécnicos sobre la retro-análisis, el deslizamiento de Las Colinas y de otras secciones potencialmente inestables y las verificaciones de estabilidad. Cabe mencionar que en este estudio fue incluido, aunque no previsto en los TdR y en la Oferta Técnica, una detallada interpretación del fenómeno con análisis de los flujos del material de la ladera, estudio que ha permitido la definición de las áreas de riesgo.

En el mismo Informe Final fue anexado también el Informe sobre las alternativas de las obras de mitigación con las consideraciones conclusiva, que se resume en lo que sigue: "los análisis sobre el mecanismo del deslizamiento indican que el fenómeno se verificó por la presencia de niveles de escasas características mecánicas, con disposición de las capas dirigidas hacia la ladera norte: el manifestarse de un sismo de fuerte intensidad ha aún más reducido las fuerzas resistentes, provocando la activación del fenómeno del deslizamiento".

Los estudios geotécnicos identifican también las condiciones de estabilidad de las otras partes de la Cordillera, señalándose que toda el área, en caso de sismos, debe considerarse amenazada.

La extensión y las áreas afectadas han sido evaluadas analizando las modalidades de los deslizamientos potenciales.

Se ha además definido la tipología de las obras de intervención, evidenciándose que ... "solo se pueden proponer obras que reduzcan las fuerzas activas, por medio de modelaciones de las laderas, obtenidas por excavaciones en los depósitos volcánicos más superficiales".

Debido al elevado costo resultante de este tipo de intervención, se ha propuesto una alternativa de tipo no estructural, que prevé el desalojo de las áreas sujetas a riesgo de daños. Con este fin se ha incluido un mapa con la identificación de las áreas susceptibles de ser amenazadas por deslizamientos y flujos de lodo.

A conclusión de este estudio se pone en relieve que el mismo ha sido efectuado a escala 1:5,000, con integraciones por medio de perfiles a lo largo de la cordillera.

Una topografía fiable es una necesidad determinante para proceder con proyectos más detallados: por esta razón, se sugiere que la primera actividad, antes de empezar con las obras de mitigación, sea la de obtener un levantamiento completo de cada área de trabajo. Además, debido a la presencia de bosques, el levantamiento deberá ser ejecutado después de una preliminar limpieza de la vegetación o a través de una adecuada actividad de campo que hasta la fecha no podido ser realizada.

2 LAS ACTIVIDADES EFECTUADAS

En este capítulo se describen, de forma sintética, las actividades que permitieron finalizar el estudio del deslizamiento y el análisis y la evaluación de las obras de intervención: en los Reportes específicos, entregados en las diferentes fases del Proyecto, se encuentran los estudios detallados sobre cada argumento.

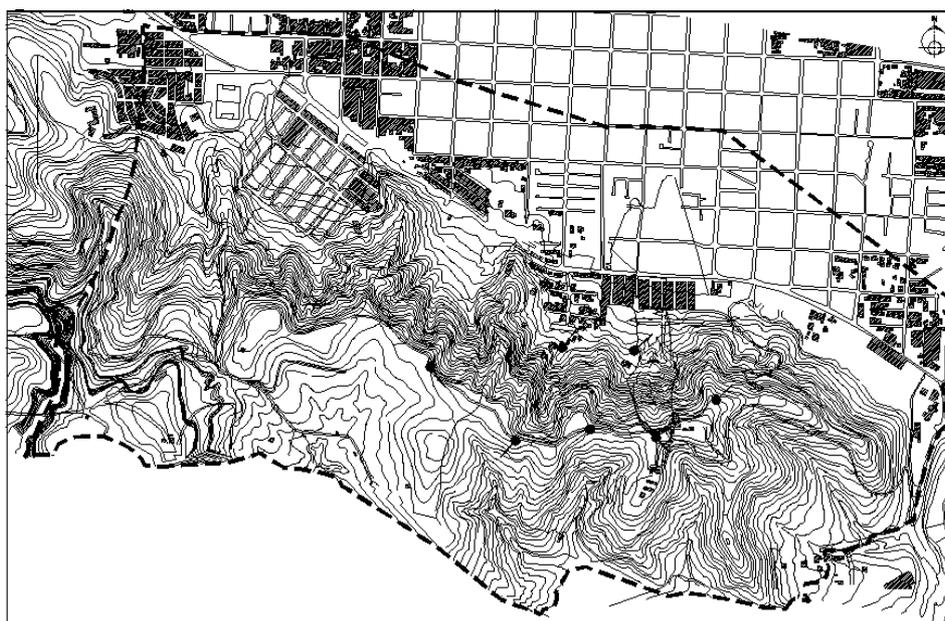
2.1 El área de estudio

El área de estudio se ubica en la zona de la Cordillera el Bálsamo, entre las Colonias de Las Delicias, al Oeste y la carretera al puerto de la Libertad al Este : se trata de un área de aproximadamente 300 ha de superficie que se desarrolla a lo largo de la parte superior de la Cordillera, por una extensión de aproximadamente 4,000 metros.

Los accesos a este área son constituidos, al Este, por una calle en adoquinado que sube de la carretera al puerto de La Libertad, por medio de esta calle se llega en correspondencia del nicho de deslizamiento de Las Colinas, a cota 1070 m snm aproximadamente. De aquí, la calle sigue la cumbre de la cordillera en dirección Este-Oeste, hacia llegar en correspondencia de la colonia de Pinares de Suiza, donde la carretera termina. En la parte Oeste, existe una pista de acceso desde la carretera de Guadalupe hacia Comasagua. La pista permite llegar hasta algunos de los emplazamientos de los sondeos efectuados en el Estudio, en proximidad de la línea de parteagua, en correspondencia de la colonia de Las Delicias.

La morfología del área de estudio se presenta muy ríspida en la vertiente Norte, mientras que las laderas hacia el Sur manifiestan pendientes mucho más reducidas: en esta última parte, el territorio es predominantemente cafetal.

Mapa del área de Estudio de la Cordillera El Bálsamo



2.2 Estudio fotogeológico

El objeto de esta actividad es la interpretación de las fotos aéreas para determinar la geología, los lineamientos tectónicos y el conocimiento de los paleo-deslizamientos que se encuentran en la zona de estudio.

Esta actividad fue desarrollada utilizando las fotos aéreas disponibles: se recolectaron las fotografías aéreas estereoscópicas, en blanco y negro, en escala 1:15,000 efectuadas en diciembre 2000 y en enero 2001, respectivamente antes y después del evento sísmico. Se recolectaron también las fotos aéreas estereoscópicas, siempre en blanco y negro, en escala 1:5,000, efectuadas en enero 2001, después del evento sísmico.

Este análisis ha permitido delinear la situación geológico-estructural, individuando las alineaciones principales, WSW-ENE y NNW-SSE, que se cruzan con una tercera alineación, más joven, orientada NE-SW.

Las fotos aéreas, antes y después del evento sísmico, se compararon y con este análisis poniendo de manifiesto que en la zona del derrumbe, la ladera estaba ligeramente inclinada en dirección NNE, con capas dispuestas con pendiente hacia la ladera misma: en otras partes de la ladera se encuentran paredes sub-verticales, causadas por el nicho de deslizamiento.

La fotointerpretación geomorfológica ha permitido también identificar la presencia de áreas de deslizamiento potencial y manifiesto, áreas en erosión, gradas estructurales y morfológicas y los paleo-deslizamientos.

Con base a toda este análisis, resultaron evidentes las principales áreas de deslizamiento y la geometría de éstas, con respecto a la geomorfología actual y a la geolitoología.

El estudio fotogeológico fue conducido en paralelo a la actividad de reconocimiento de campo.

2.3 Reconocimiento de campo

Esta actividad había sido considerada con el fin de identificar, de forma preliminar, las problemáticas geológicas del área de estudio, de forma tal que se pudiera tomar en cuenta las dificultades geomorfológicas relativas a la ejecución de las investigaciones y por lo tanto calibrar lo mejor posible dicha actividad.

El reconocimiento de campo fue efectuado desde los primeros días del mes de mayo, por medio de minuciosas visitas a lo largo de la parte superior de la Cordillera y en particular a lo largo de los senderos que atraviesan la ladera Norte.

La morfología de la parte más elevada de la Cordillera se caracteriza por la presencia de frentes y paredes sub-verticales en correspondencia de los depósitos piroclásticos.

Estos depósitos, que se encuentran dispuestos en forma sub-horizontal sobre una formación de tobas, tienen espesor variable de diez a cuarenta metros. Al pie o intercalados

a estos depósitos, hay niveles de pómez de limitado espesor, que pueden constituir zonas preferenciales de deslizamiento.

El nivel de las tobas constituye una capa de base con grado de compactación y características mucho mayor de la parte sobrestante.

A conclusión del recorrido preliminar, se señaló la necesidad de una confiable topografía para poder realizar mejores correlaciones entre los resultados de las investigaciones, como para la retro-análisis y la evaluación de las posibles alternativas de proyecto, de manera de producir una estimación lo más real posible de las obras de mitigación.

2.4 Programa de investigaciones

El programa de investigaciones previsto en los Términos de Referencia comprendía la ejecución de por lo menos doce sondeos exploratorios, ensayos SPT, extracción de muestras, recuperación de testigos y, eventualmente, ensayos de campo adicionales.

Las investigaciones tenían que completarse en treinta días calendario.

Este requerimiento, en particular, vinculó la programación de las investigaciones: para una mejor calibración de los trabajos de sondeo, se previó comenzar con un programa de primera fase, ejecutando seis sondeos mecánicos y las pruebas en situ. Se decidió también que sobre la base de los resultados de estas primeras investigaciones, se habría completado el programa de investigación.

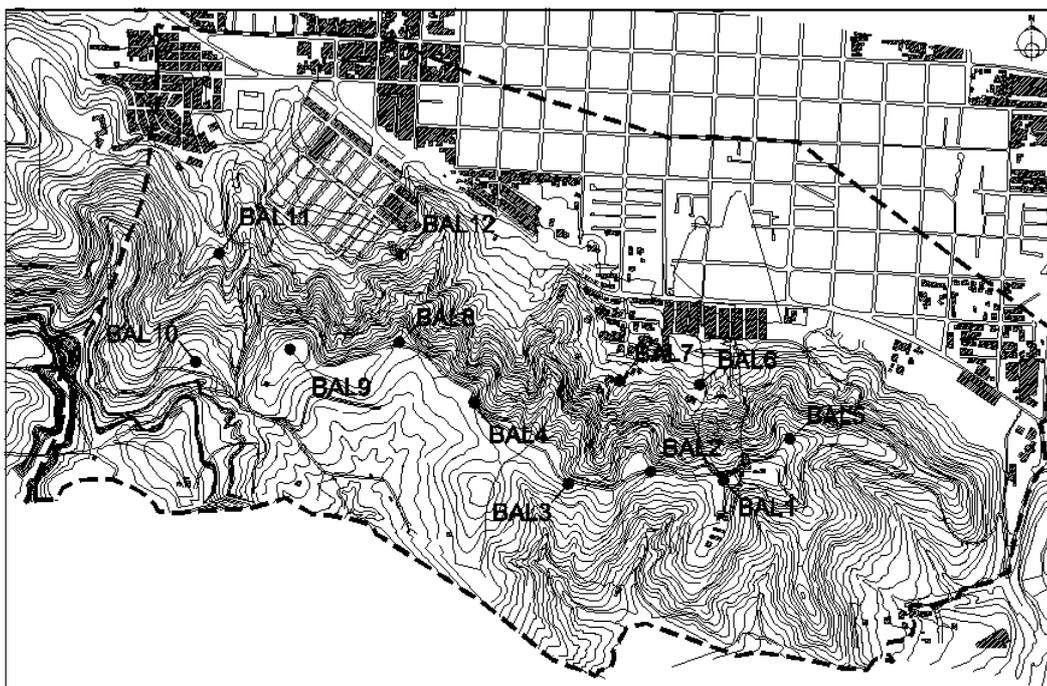
Para respetar el cronograma, se consideró iniciar con tres equipos de perforación, a partir de los sondeos localizados en la parte superior de la Cordillera, en correspondencia de la vertiente de Las Colinas.

Las perforaciones empezaron los últimos días de mayo y después de la prima semana de junio se pudieron completar cuatro sondeos por un total de aproximadamente 250 metros de perforación.

En consideración que las perforaciones se desarrollaban satisfactoriamente, aún con algunas limitadas interrupciones, se decidió continuar con los otros sondeos mecánicos para completar las doce perforaciones previstas y, en relación a la calidad de las muestras extraídas, las cuales no siempre eran satisfactorias por el tipo de material involucrado, se consideró necesario efectuar una detallada investigación geofísica, de forma tal que se pudieran integrar las informaciones deducidas de las perforaciones por medio de sísmica a refracción, con el objeto de caracterizar los más posible los terrenos involucrados.

El programa de las investigaciones geofísicas fue propuesto al Propietario a la mitad del mes de junio y desde el mismo días se activó inmediatamente la ejecución de las investigaciones integrativas antes dichas.

Planimetría de los sondeos mecánicos



2.5 Las investigaciones efectuadas

Las investigaciones fueron ejecutadas según los antes dicho, perforando doce sondeos, por un total de 749.72 metros de perforación. Además, para integrar los datos puntuales de los sondeos con informaciones de tipo lineal, se ejecutaron las investigaciones geofísicas, que se desarrollaron desde la mitad del mes de junio hasta la mitad del mes de julio: todos los resultados de estas investigaciones fueron presentados en el Segundo Informe de Avance.

Al final, las investigaciones ejecutadas comprendieron:

- Sondeos mecánicos por un total de 749.72 metros, de los cuales
 - 587.30 metros de perforación en suelos (depósitos piroclásticos) y
 - 162.42 metros de perforación en roca (tobas y ingnimbritas);
- 193 pruebas SPT;
- 722.07 metros de piezómetros;
- extracción de 4 muestras tipo Shelby;
- Investigaciones geofísicas constituidas por :
 - 4,650 metros de sísmica a refracción por medio de 23 perfiles superficiales;

- pruebas down-hole (sísmica en profundidad) por medio de 712 metros de sísmica a refracción al interior de once sondeos mecánicos;
- análisis y interpretación tomográfica de todas las investigaciones sísmicas.

La recuperación de muestras inalteradas fue condicionada por la textura de los suelos y el grado de consolidación de las varias capas.

Todos los testigos, conservados en 145 cajas de madera, fueron entregados al MARN, a la fin del mes de julio y se encuentran actualmente en el Centro de Investigaciones Geotécnicas.

En el Anexo 1.2 al Segundo Informe se reportan las estratigrafías de los sondeos mecánicos.

El comentario completo sobre las estratigrafías se encuentra en el Informe Geológico, Anexo 2.1 al Segundo Informe.

En síntesis, los sondeos de la parte superior de la cordillera han detectado una cobertura superficial constituida por elementos litóides de poco más de un metro de espesor. Estos materiales se apoyan sobre los depósitos piroclásticos, constituidos, principalmente, por pómez y ceniza volcánica, surge y paleosuelo, por un espesor variable de 20 hasta 80 metros de profundidad.

Todos estos materiales presentan un grado de densidad muy variable, generalmente bajo, caracterizado por número de golpes SPT de alrededor 10 (con pocos casos de hasta 40): en correspondencia de los niveles de paleosuelo, se encuentran los valores menores. Los valores más altos se encuentran en correspondencia de las cenizas color café debajo de los niveles de paleosuelo.

Abajo de las cenizas, se encuentra, en general, la formación de las tobas o de las ignimbritas, en las cuales las pruebas SPT han indicado, generalmente, rechazo.

2.6 Pruebas de laboratorio

Las actividades de laboratorio se concluyeron en la segunda década de agosto debido antes a la obtención de las autorizaciones y después a las ferias de los primeros días de agosto.

Las muestras que se llevaron al laboratorio, fueron seleccionadas de tal manera que los niveles más importantes que aparecen en los sondeos, están identificados.

Las muestras alteradas se escogieron directamente durante la revisión de los testigos contenidos en las cajas de cada sondeo.

Las muestras inalteradas se muestrearon en las capas de materiales de tipo arcilloso.

Los ensayos de laboratorio fueron divididos en dos grupos:

- Ensayos de reconocimiento que se llevaron a cabo sobre los suelos representativos de la geología y que permitieron de clasificar los varios niveles presentes;

- Ensayos físicos-mecánicos que tenían el objeto de informar sobre las características mecánicas de dichos suelos.

Los primeros estuvieron principalmente representados por los análisis granulométricos y de identificación; los segundos se refieren a las pruebas de corte directo y triaxiales. Estas pruebas fueron utilizadas, conjuntamente a los resultados de las pruebas geofísicas, para definir las características útiles a la modelación geotécnica del suelo.

En síntesis, las pruebas que se llevaron a cabo sobre las muestras extraídas, fueron las siguientes:

- 76 ensayos de gravedad específica;
- 76 análisis granulométrico por mallas;
- 76 límites de Atterberg;
- 13 ensayos de corte directo;
- 16 ensayos triaxiales;
- 4 ensayos de compresión uniaxial
- 1 ensayo de compactación tipo Proctor.

En el Anexo 1.2 al Informe Final se presentan los resultados de las pruebas efectuadas.

Se trata de terreno de tipo generalmente limo-arenoso de medio-baja plasticidad, especialmente por lo que se refiere a la ceniza: se pone sin embargo en evidencia que las características de los materiales podrían ser modificadas por las acciones de perforación.

Por lo que se refiere a las características mecánicas, estas son muy variables según los niveles mostrados y, sobre todo, en dependencia de la alteración de las muestras, por causa de la perforación.

Debido a estas consideraciones, se decidió que los resultados de las pruebas hubieran que ser considerados como "intervalos", mas que como "puntos", y que hubiera sido necesario efectuar también la interpretación de los resultados mismos, en correlación con los resultados de las investigaciones en campo (ensayos SPT y down-hole).

Al final, los valores resultantes de los ensayos por los diferentes tipos litológicos se presentan en la tabla que sigue:

Tabla de las características mecánicas de los terrenos involucrados

Terreno	Angulo de fricción	Cohesión	Peso de volumen seco
	°	KPa	kN/m ³
Piroclastitas	30-35	60-80	11
Epiclastitas	30-33	30-40	11
Paleosuelo	20-24	5-10	11
Tobas	35-38	200	18

2.7 Geología

Los estudios geológicos y geomorfológicos fueron ejecutados junto a la fotointerpretación, el reconocimiento de campo y el análisis de los resultados de las investigaciones efectuadas. Los resultados de dicho estudio se presentaron en el Segundo Informe de Avance, entregado a la mitad del mes de julio.

El cuadro general de la geología de la Cordillera ha sido definido y, utilizando la nomenclatura deducida del Mapa Geológico del Salvador, se pudo definir la serie litoestratigráfica de la zona de la cordillera El Bálsamo que se resume a continuación:

Piroclastitas de caída: constituidas por una secuencia de varios niveles entre los cuales se distinguen diferentes niveles guía bien característicos, como los depósitos de ceniza conocidos como Tierra Blanca, los depósitos consolidados de lapilli acrecionales típicos de una erupción hidromagmática, los depósitos de erupciones estrombolianas con lapilli y bombas, las capas de surge y pómez.

Estas piroclastitas, con espesor total de 15 a 25 m, son generalmente casi sueltas o poco consolidadas, a excepción del estrato de lapilli acrecionales; los niveles de caída presentan una gradación granulométrica a veces directa a veces inversa y terminan casi siempre con ceniza que, por oxidación, pedogénesis y meteorización, han adquirido un color café mas o menos claro.

Cenizas: a la base de las piroclastitas se encuentra un nivel con espesor entre 20 y 80 m, bastante heterogéneo desde el punto de vista de la litología, de cenizas que incluyen detritos con granulometría varia y con partículas de pómez (Formación de S. Salvador);

Tobas: debajo de las cenizas se pueden observar las tobas (flujos piroclásticos) y coladas de lava casi siempre afectadas por una intensa fracturación de origen tectónico (Formación Bálsamo o bien Formación Cuscatlán).

Ignimbritas: en algunas secciones se encuentra también una serie ignimbrítica que pertenece a la Formación Bálsamo o Formación Cuscatlán.

La geometría y las características de las diferentes capas superiores, debida a la presencia de las tobas e influenciadas por movimientos verticales de antiguas fallas, se encuentra presentada en los mapas y secciones geológicas, anexadas al Segundo Informe.

En el Anexo 2.2.1 al Informe Final se presentó un cuadro general explicativo de la situación geológica de la cordillera, que en el siguiente se resume.

"...El área de estudio está situada en el límite Sur de la cadena volcánica Centroamericana, sobre el bordo de la depresión estructural llamada "Fosa Central". Esta depresión se formó probablemente después de grandes erupciones explosivas de tipo ultraplíniano que produjeron voluminosos flujos piroclásticos de varia naturaleza y con diferentes grado de litificación. Esta es la "fase ignimbrítica" que caracteriza el vulcanismo del Terciario superior en gran parte de Centro América. Tal vez por la emisión de grandes volúmenes de ignimbritas, tal vez por una fase tectónica en régimen de distensión, se ha dado origen al hundimiento de la "Fosa Central". Las partes altas eran sometidas a fenómenos erosivos y a una rápida meteorización, mientras que en las partes bajas se acumulaban espesos depósitos de lahares y epiclastitas. Después de la

formación de la fosa ha tenido lugar de nuevo la emisión de cubiertas piroclásticas desde centros ubicados en su interior. Los productos de esta fase son indicados en el mapa de El Salvador como formación "Cuscatlán". Los terrenos más recientes al interior de la fosa son indicados en el mapa geológico 1/100,000 como formación San Salvador, y son atribuibles a la actividad de los aparatos activos, y están caracterizados por lavas y piroclastitas. Estudios ejecutados en la zona, identifican en el basamento estructural "horst" y "graben" de gran tamaño orientados aproximadamente Este-Oeste, estas estructuras se encuentran también en el área de estudio y pertenecen a la familia más vieja presente a lo largo de la cordillera. Al "graben" Este-Oeste se asocian fallas Norte-Sur, que generan movimientos de bloques negativos y positivos. Estas estructuras también se individualizan en el área de estudio con fallas orientadas 160° Norte, casi verticales. A veces estas fallas tienen movimiento transcurrente derecho. En las áreas de estudio se encuentran también fallas orientadas Noreste-Suroeste, complementarias a las fallas mayores, más jóvenes y con movimiento izquierdo que se cruzan en la propia área del deslizamiento...."

Desde el punto de vista tectónico, el área de la Cordillera entre las Delicias y La Colina es representada para una monoclinas orientada aproximadamente Este-Oeste e inclinada hacia el Sur-Suroeste.

La zona se observa afectada de numerosas fallas que en la mayoría de los casos se pueden observar solamente a través de la fotointerpretación.

La formación Bálsamo constituye el esqueleto de la Cordillera y aflora en la ladera norte, en forma discontinua, hasta cota 1.030 m s.n.m., también en la ladera sur-este se encuentran afloramientos alrededor de la cota 1.000.

Estratificados entre las tobas se encuentran, en la parte Oeste del área de estudio en correspondencia de las alturas de Pinares de Suiza, flujos de lavas basáltico-andesítica.

Las "cenizas" se encuentran en la ladera norte por toda la longitud de la cordillera, en la parte medio alta, pero por la presencia de una densa cobertura vegetal y de suelo no se encontraron significativos afloramientos. Las cenizas se apoyan en la parte este y central de la cordillera sobre las tobas y en la parte oeste sobre las lavas.

Las "piroclastitas de caída" presentan frecuentes afloramientos, debido a los desprendimientos causados por los sismos. En las cumbres, presentan estratos regulares - casi paralelos- con capas orientadas según la pendiente de la antigua topografía. Esta formación se encuentra también en la parte baja de la ladera Norte de la Cordillera con algunos afloramientos como en Pinares de Suiza.

Ulteriores inspecciones efectuadas en el área del nicho del deslizamiento de Las Colinas para averiguar los preliminares resultados de la retro-ánsis, se pudo definir el detalle de la situación geológica en correspondencia de la sección del deslizamiento y mejorar la comprensión de las condiciones en las cuales se produjo el colapso.

De hecho se identificó la presencia de porciones bien conservadas del plano principal del deslizamiento, con evidentes estrías, descubierto por la lluvias de julio y agosto: este plano tiene una inclinación hacia el Norte con un ángulo muy parecido al de la estratificación que caracteriza varias capas todavía visibles en la base de la ladera superior. La erosión produjo unos surcos profundos, en proximidad del cambio de pendiente, metro

y medio, lo que permitió observar también la secuencia por debajo del plano de movimiento.

A raíz de dichas preliminares evaluaciones numéricas para la modelación geotécnica, se efectuó también un estudio de mayor detalle de los núcleos de sondeo sobre las porciones que habían evidenciado escasas calidades mecánicas y se pudo reconocer un estrato de material fino plástico del espesor de por lo menos metro y medio en el sondeo BAL-1, en correspondencia al mismo intervalo estratigráfico del nivel antes mencionado.

En el mismo sondeo, aproximadamente a dicha profundidad de la superficie, se había efectuado también una prueba SPT, que proporcionó valores muy bajos. Sobre una muestra del mismo material se había efectuado, en laboratorio, un ensayo de corte directo, los resultados de los cuales no parecían confiables debido a la presencia de un punto anómalo. El valor del ángulo de fricción interna, considerando los tres puntos es de 47° (demasiado elevado en consideración de la litología), mientras que los primeros dos puntos dan un valor de 20° , que parece mucho más probable.

Los resultados de las observaciones en el área del nicho han así permitido elaborar una nueva sección de la parte donde se originó el desprendimiento y las geometrías resultantes indican que el paleosuelo probablemente jugó un papel importante en la generación del movimiento en masa: los parámetros mecánicos fueron también seleccionados a través de un análisis de todas las informaciones deducibles de las investigaciones y ensayos efectuados.

Habiéndose así definida una representación geológica y geotécnica suficientemente satisfactoria del evento, se pudo proceder con las actividades de modelación geotécnica.

2.8 Análisis y Diseño

2.8.1 ESTUDIOS PREVIOS

Los estudios previos han sido finalizados a través de los informes sobre la sismicidad del área (Anexo 2.1.1 al Informe Final) y los estudios hidrológicos (Anexo 2.1.2 al Informe Final).

2.8.1.1 Sismicidad del área

Esta actividad fue desarrollada, a partir de los primeros días de junio, a través de una serie de medidas de amplificación sísmica en diferentes puntos de la Cordillera y se concretó con la presentación de un reporte, anexo al Informe Final, que incluye los estudios efectuados para el análisis de las fuerzas originadas por los fenómenos sísmicos.

Para la definición de los movimientos sísmicos que han afectado la ladera de Las Colinas y para evaluar aquellos que se pueden manifestar en el futuro, fueron efectuados una serie de análisis basados sobre la sismicidad histórica y el cálculo de los espectros de respuesta del terreno, sin despreciar el contexto tectónico de la zona en examen.

Además, se efectuó un estudio detallado directamente sobre la ladera del deslizamiento y en las zonas limítrofes, para evaluar la presencia del efecto del fenómeno de amplificación local.

Desde el punto de vista tectónico, la región de El Salvador puede ser sujeta a terremotos de elevada magnitud, que pueden correlacionarse a dos sistemas tectónicos principales: la subducción de la placa Cocos por debajo de la placa del Caribe y la cadena volcánica que se extiende desde Guatemala hasta Costa Rica.

La ciudad de San Salvador se encuentra casi en el borde meridional de la depresión estructural, con prevaleciente régimen tensional que ha generado terremotos significativos muy superficiales.

La frecuencia de los terremotos destructivos que han interesado El Salvador es impresionante: es suficiente recordar que, históricamente, la ciudad ha sido destruida repetidamente y que terremotos bastante significativos se han verificado aún en tiempos recientes.

El análisis de los datos contenidos en el catálogo sísmico ha confirmado el alto nivel de sismicidad, con más de 50 terremotos de magnitud mayor o igual al séptimo grado de la escala Richter, y es importante señalar que terremotos con magnitud sensiblemente menor, pero con profundidad epicéntrica modesta, han provocado destrucciones notables en San Salvador (1986).

El terremoto del 13 de enero de 2001 que ha provocado el luctuoso deslizamiento de Las Colinas, se puede correlacionar al proceso de subducción, pero su profundidad hipocentral ha sido de solamente 39 kilómetros con una magnitud 7.6 Mw, mientras que la distancia epicentral fue de aproximadamente 100 kilómetros.

Dicho terremoto ha provocado la muerte de aproximadamente 800 personas con millares de heridos y decenas de millares de edificios destruidos y también un número increíble de deslizamientos destructivos.

Para el estudio efectuado, ha sido muy importante el registro acelerométrico, disponible gracias a la estación ubicada en Santa Tecla en el hospital San Rafael. En dicho registro, se encuentran picos con más de 0.4 g de aceleración que testimonian la severidad del terremoto a pesar que su epicentro no haya sido local.

El cálculo de los movimientos sísmicos del terreno ha sido conducido según la siguientes líneas principales:

- Estimación de la función de amplificación para la ladera en deslizamiento y para las áreas circundantes;
- Estimación del máximo terremoto, sea histórico que creíble, para terremotos superficiales y profundos;
- Generación de acelerogramas sintéticos para la simulación del deslizamiento y de la estabilidad futura de la ladera.

Las mediciones de amplificación local han sido efectuadas según los principios del método conocido como Nakamura's Method, el cual, en los últimos años, ha sido utilizado para la microzonificación de muchísimas áreas. Dicha metodología consiste en la medición de los micro ruidos sísmicos naturales y artificiales que se propagan en los terrenos y en el

cálculo del factor de amplificación, en función de la frecuencia, mediante la relación espectral entre las componentes horizontal y vertical del movimiento.

En total, han sido efectuadas mediciones en 24 puntos, distribuidos en la zona interesada por el deslizamiento y en las áreas limítrofes y también en Santa Tecla, para definir los eventuales fenómenos de amplificación local que se deben comparar con aquellos del área del deslizamiento.

Del análisis de estas medidas, ha surgido un cuadro bastante significativo de la zona estudiada que se resume brevemente a continuación.

- El área del deslizamiento, comprendida la parte del depósito de materiales, y las zonas más cercanas ya sea en dirección Oeste, como en dirección Este, presentan una función de amplificación local muy similar, la cual resulta centrada alrededor de la frecuencia de 1 Hz con valores del factor de amplificación promedio superior a 4;
- La función de amplificación en la zona de Santa Tecla presenta las mismas características de las áreas antes dichas, pero con valores del factor de amplificación decididamente menores.

Se efectuó también un análisis de "significatividad" de las mediciones, por medio de metodologías estadísticas, obteniéndose un excelente acuerdo con las funciones de amplificación elaboradas. Sobre la base de los datos contenidos en el catálogo sísmico, los espectros de respuesta del terreno han sido calculados, utilizando diferentes leyes de atenuación, respectivamente para terremotos superficiales y terremotos profundos en zonas de subducción.

Las dos relaciones han sido informatizadas de manera tal que puedan recibir en ingreso los datos del catálogo sísmico y calcular en salida las ordenadas espectrales máximas de las componentes horizontales del movimiento: se han calculado los espectros máximos históricos, percentil 50% y los correspondientes al percentil 84.1%, los cuales pueden ser razonablemente considerados como los máximos terremotos creíbles.

La comparación de los espectros ha evidenciado que los espectros calculados para los terremotos superficiales representan significativamente los efectos de los movimientos del terreno y engloban los efectos de terremotos profundos.

Además, la comparación con el espectro de respuesta calculado para el acelerograma del terremoto del 13 de enero de 2001 en Santa Tecla, indicó que su espectro es levemente superior en amplitud al espectro promedio al 50% calculado para los terremotos superficiales, pero muy por debajo del espectro máximo creíble con el percentil de 84.1%.

Con dichos espectros teóricos se han calculado los acelerogramas sintéticos que se pueden utilizar en las pruebas de simulación de los deslizamientos.

Con este propósito la aplicación más plausible ha resultado ser:

- para una simulación del deslizamiento activado por el terremoto, ingreso en el bed rock (fundación firme) del acelerograma real del terremoto registrado en Santa Tecla, tomando en consideración los efectos de sitio evaluado por medio del método Nakamura;

- para simulaciones de estabilidad de la ladera, bajo la hipótesis de terremotos futuros máximos creíbles, uso en el bed rock (fundación firme) del acelerograma sintético obtenido para terremotos superficiales con el 84.1% y para una hipótesis todavía más conservadora tomar en consideración los efectos de sitio calculados.

2.8.1.2 Estudio hidrológico

Paralelamente se preparó el informe hidrológico que tiene la finalidad de coleccionar los datos hidrológicos de la Cordillera y evaluar las lluvias críticas y las crecidas que se pueden originar sobre la ladera Norte de la misma Cordillera, en relación a las obras de intervención.

A partir de la recopilación de los datos meteorológicos, el estudio ha permitido efectuar el análisis de las intensidades de lluvia, la duración de las mismas y la frecuencia de las precipitaciones en el área de estudio.

Además, se recolectaron las informaciones sobre las características geomorfológicas, hidrológicas e hidráulicas de las cuencas de la Cordillera y se efectuaron las elaboraciones sobre las crecidas para la zona del derrumbe de Las Colinas y otras zonas de estudio.

La precipitación anual del área de estudio es de unos 1,800 mm en promedio, esto basado en registros de más de 30 años. Existe una época lluviosa de mayo a septiembre en donde cae el 90% de la precipitación anual y una época seca de octubre a abril que contribuye con el 10% del total.

Las precipitaciones intensas de corta duración, han sido evaluadas por medio de una ley analítica de envolvente de las precipitaciones de la forma clásica:

$$P = a T^n$$

con P en mm y T en horas

que permite expresar la intensidad de lluvia en forma continua, con los valores

Tabla de parámetros de lluvia para la zona de Estudio

Tiempo de retorno	a	n
2 años	62	0.62
5 años	77	0.65
10 años	87	0.68

Las intensidades de lluvia para dicha área, considerando una lluvia de 5 minutos resulta en el cuadro siguiente:

Valores característicos de lluvias en la zona de Estudio

Tiempo de retorno	Lluvias totales (mm)	Intensidades (mm/h)
2 años	13.3	160
5 años	15.3	184

10 años	16.1	193
---------	------	-----

La crecida de diseño, para el área del derrumbe de Las Colinas, se presenta en la tabla siguiente, con diferentes tiempo de retorno:

Valores de Caudales esperados en la zona del Derrumbe de Las Colinas (estado actual)

Cuenca	Caudal (m ³ /s)		
	TR=2 años	TR=5 años	TR=10 años
Area derrumbe	1.3	1.5	1.6

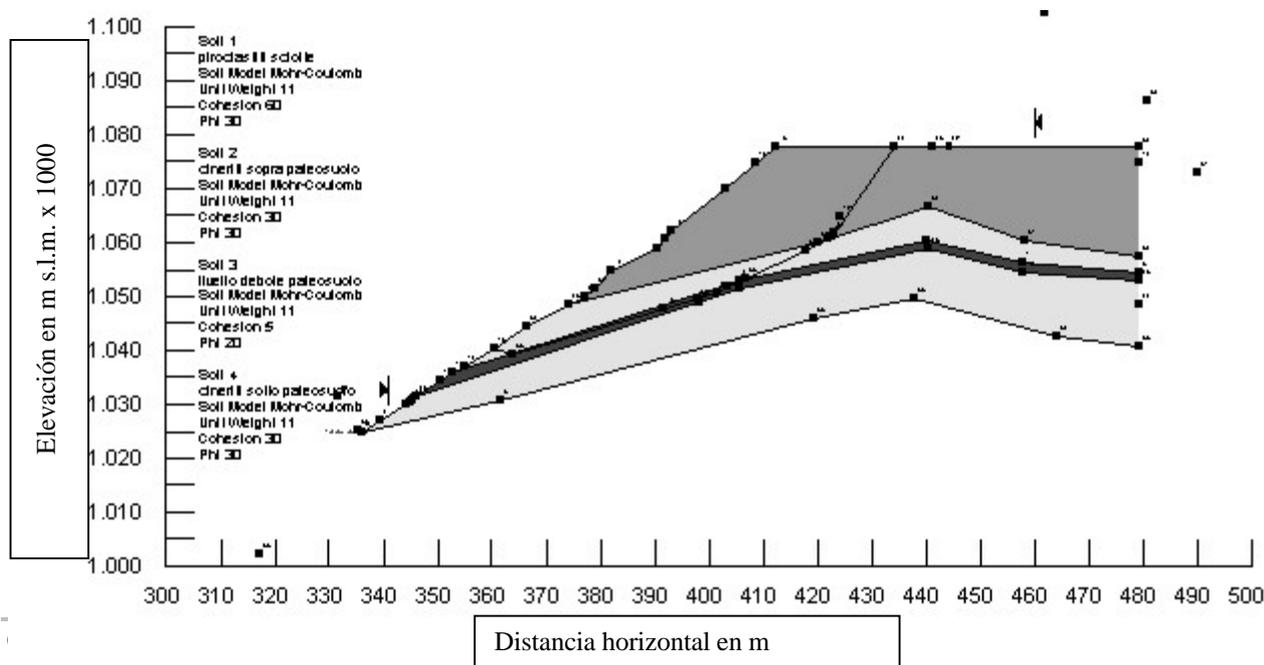
2.8.2 EVALUACION

2.8.2.1 Modelo geotécnico – deslizamiento - estabilidad

El estudio geotécnico, que comprende la modelación, el análisis del deslizamiento y las verificaciones de estabilidad, fue finalizado cuando estuvieron disponibles todos los datos de las investigaciones geológicas y geotécnicas, incluidas las pruebas de laboratorio y los levantamientos topográficos adicionales.

Las conclusiones del estudio geológico, como antes dicho, han permitido definir el mecanismo del deslizamiento, que depende de la presencia de un nivel con bajas características mecánicas con inclinación hacia el Norte, sobrepuesto a la formación de base constituida por las tobas: el esquema geológico-técnico de la ladera, en correspondencia del deslizamiento en Las Colinas, se presenta en la figura siguiente.

Esquema geológico técnico de la ladera del deslizamiento en Las Colinas



Donde :

Soil = Suelo con sentido de estrato

Soil Model Mohr-Coulomb = Modelo de suelo según Mohr-Coulomb

Unit Weight = Peso de volumen

Cohesion = Cohesión

Las verificaciones de estabilidad han sido realizadas en tres secciones: deslizamiento de Las Colinas y por dos laderas en correspondencia de Paraíso y Pinares de Suiza.

Para estas dos zonas las secciones topográficas adoptadas son las levantadas directamente por el Propietario.

Para las secciones del deslizamiento de Las Colinas y también para las otras dos secciones, en correspondencia de Paraíso y Pinares de Suiza, se efectuaron las siguientes análisis y verificaciones:

- Verificaciones de estabilidad con el método del equilibrio límite, determinación de los parámetros mecánicos mínimos para la movilización del material y sucesiva comparación con los resultados obtenidos por medio de análisis por elementos finitos;
- Análisis de estabilidad mediante el método de elementos finitos, con diferentes criterios de ruptura y verificación de los parámetros mecánicos mínimos necesarios para la movilización del material;
- Modelación de la simulación dinámica de la expansión, en relación a las características de las zonas de tránsito y acumulación (ancho y volumen), según diferentes modelos reológicos;
- Calibración del modelo en relación a las observaciones de campo para sucesivas simulaciones y análisis de sensibilidad;
- Modelación 2D de la expansión mediante un programa a los elementos finitos.

En el Informe Técnico (Anexo 2.2.1.1 al Informe Final) se presentaron los detalles de las simulaciones, evaluándose las variables tiempo, distancia y volúmenes de deslizamiento; en el mismo Anexo se presentó el mapa de la ubicación de las expansiones, según los resultados del modelo numérico.

Con base a los resultados del análisis de expansión, se construyó la planimetría de los posibles movimientos de las masas.

2.8.2.2 Análisis de las Amenazas y Riesgos

Para la definición de las áreas amenazadas, se considera imprescindible la evaluación de la tipología, magnitud de las inestabilidades y de sus movilidad relativa, asumiendo un igual recurrencia temporal de los fenómenos detonantes.

Los criterios utilizados para la delimitación de las áreas amenazadas fueron los siguientes:

- Análisis de la morfología de las laderas en el sector medio superior de la cordillera, adonde se originan los procesos de inestabilidad;
- Análisis de la morfología de las áreas puestas a la base de las laderas (abanicos, acumulaciones de paleo movimientos en masa);
- Análisis de los resultados de la modelación numérica de la expansión, a lo largo de las secciones consideradas;
- Determinación del espesor de las piroclastitas sueltas y de las cenizas;
- Determinación de la cota del techo del las Tobas (Formación Bálsamo);
- Determinación del desnivel entre la base y la cumbre del talud;
- Posibilidad de canalización del material movilizado;
- Individuación y estimación de las masas potencialmente movilizables;
- Clasificación de la tipología de los procesos de inestabilidad entre las siguientes clases:
 - deslizamiento de pequeñas masas entre las capas superficiales y pequeños flujos de lodo;
 - deslizamiento de medio-grandes masas y medios flujos de lodo;
 - deslizamiento de grandes masas con formación de flujos o avalanchas de escombros con movilidad elevada;
- Estado de los conocimientos en las áreas limítrofes;
- Eventual presencia de obras de estabilización (activa y/o pasiva).

Las verificaciones de la estabilidad y las modelaciones numéricas de la expansión ejecutadas para las secciones analizadas han permitido evaluar las características dimensionales de dichas expansiones, como los volúmenes potencialmente movilizables, el espesor del material durante el movimiento y al depositarse, la velocidad y durada del movimiento y la distancia máxima de propagación del flujo, en función de las características topográficas de la sección y de las características litológicas de los terrenos involucrados.

Sobre los antes dicho, se ha preparado un mapa de las áreas amenazadas, a la base de la Cordillera (véase Anexo plano 3.9 al Informe Final).

Estas áreas son limitadas según tres fajas así diferenciadas:

- una primera faja que puede ser afectada con un tiempo de recurrencia de pocos años por deslizamientos de pequeñas masas, originadas en las capas superficiales y/o pequeños flujos de lodo. Por eso se tiene que considerar esta área la amenazada con mayor probabilidad e incluye dos áreas de valor elevado (Pinares de Suiza, Paraíso) Las obras para mitigar los riesgos son sencillas pero necesitan de un elevado detalle en su aplicación y por lo tanto un análisis detallado para su diseño;

- una segunda faja que puede ser afectada por deslizamientos de masas medio-grandes y flujos de lodo con volumen medio. Esta faja tiene una superficie de aproximadamente 30 hectáreas y contiene áreas de valor correspondientemente más anchas;
- una tercera faja, más lejana de la base de la cordillera, que podría verse afectada en caso de deslizamientos de grandes masas con formación de flujos o avalanchas de escombros con movilidad elevada. Estos fenómenos no son frecuentes pero posibles. Su extensión alcanza aproximadamente 50 hectáreas y se desarrolla sobre una área densamente urbanizada al norte del Boulevard Sur, en territorio de S. Tecla. Las obras para mitigar este tipo de riesgo, así como el del punto anterior, son las que se ha presentado en el Estudio.

Las indicaciones contenidas en este mapa pueden utilizarse:

- para la planificación de las obras de intervención, en función de los aspectos económicos, sociales y legales;
- para la planificación de las áreas amenazadas, a través de una nueva destinación de uso.

Está claro que cualquier modificación de tipo natural o artificial en las secciones examinadas implica un cambio de los límites propuestos¹

2.8.3 Alternativas de Solución

El estudio de las Alternativas para las Obras de Mitigación se efectuó según las consideraciones que se desarrollaron anteriormente y sobre la base de los resultados de los estudios geotécnicos y en particular del análisis del deslizamiento.

En los precedentes informes se indicaban las principales consideraciones deducidas de las investigaciones preliminares sobre la zona del deslizamiento:

- La presencia de niveles con escasas características mecánicas al interior de las formaciones de origen volcánico constituyen elemento de riesgo para la estabilidad de las laderas, mientras que la formación de las tobas parece constituir un techo para las superficies de deslizamiento;
- La componente morfológica del área de estudio es un elemento fundamental en la determinación de las zonas de riesgo;
- La acción sísmica constituyó una acción determinante en el deslizamiento que se ocurrió a Las Colinas, también en consideración que el factor de amplificación sísmica de los terrenos, en la parte superior de la Cordillera, es muy elevado.

¹ Cabe mencionar que las fajas no incluyen las obras de mitigación de emergencia que, como parte de este Estudio, el Consultor ha desarrollado para la zona de las Colinas y otras mitigaciones que, mientras el Estudio se desarrollaba, eran ejecutadas en otras partes de la zona.

El análisis de detalle de la geología del nicho de deslizamiento, con la identificación de capas con pendiente hacia el Norte ha permitido de añadir un elemento más de inestabilidad, pudiéndose así también encontrar una confirmación en la representación numérica.

En consideración de los argumentos antes especificados, se decidieron las alternativas a proponer par las obras de mitigación y que en lo que sigue se resume.

En relación a los volúmenes y a las masas en juego, no se consideraron factibles alternativas estructurales como anclajes o pantallas/pilotes o bien obras en general de mejoramiento de las características intrínsecas de los terrenos, como inyecciones o otros: se consideraron al contrario factibles y proponibles las obras de modelación de las laderas, obras que permiten de reducir las fuerzas activas en los deslizamientos. La pendiente que se ha adoptado es igual al 50%.

La modelación de las vertientes según los criterios antes dichos comporta una modificación muy sensible de la parte superior de la cordillera, especialmente por lo que se refiere a los aspectos ambientales en el corto periodo, hasta que la vegetación non haya recubierto las superficies excavada

Los volúmenes de las excavaciones dependen de la efectiva topografía: por lo tanto se considera prioritario un levantamiento detallado en escala 1:500 de las áreas a modelizar antes de empezar con cualquier los trabajo de excavación.

El problema del depósito de los materiales extraídos de la excavación (botadero) tiene una enorme importancia, sea por la ubicación de un lugar idóneo para contener las esperadas cantidades de tierra, sea por el costo de este rubro de obra.

Las únicas alternativas a las de la modelación que se pueden considerar realísticamente factibles, son aquellas no estructurales, esto significa que si por un lado se decide admitir el riesgo de un deslizamiento, por el otro no se puede admitir la eventualidad de que este deslizamiento afecte ni obras ni infraestructuras y menos aún amenace la vida. Por lo tanto, admitir el riesgo del deslizamiento implica considerar la reubicación de las Colonias afectadas por el riesgo de deslizamiento considerando una extensión tal que el deslizamiento no involucre áreas fuera de las restringidas. Este tipo de decisión involucra toda la parte sur de Santa Tecla que bordea el área de Estudio y mayormente la Colonia Pinares de Suiza, donde existe una concentración de más de 700 habitaciones así como la Colonia de Paraíso.

2.8.4 Obras de Emergencia

Para activar con la mayor brevedad posible las Obras de Mitigación en la zona del deslave en Las Colinas, se ha intensificado el Estudio en dicha área logrando identificar las Obras de Emergencia.

La extensión de la zona de intervención se extiende, a partir del eje del deslizamiento mismo, hacia los lados Este y Oeste y ocupan una faja de aproximadamente 370 metros de largo por 90 metros de ancho con centro aproximadamente en el eje longitudinal del deslizamiento.

Con relación a la morfología de los lugares y a las dimensiones de las masas involucradas, las obras planeadas consisten esencialmente de excavaciones realizadas con bermas. El perfil de diseño adoptado tiene pendiente del 50%, interrumpida cada diez metros en altura con una berma de tres metros de ancho.

La ladera será luego protegida contra la erosión por viento o lluvia con siembra de semillas y mantas biodegradable.

El área al pie del deslizamiento será objeto de una serie de diferentes intervenciones dirigidas a mejorar el aspecto general de la zona y la capacidad de desalojo y control hidráulico.

En particular, la borda intermedia existente, será rehabilitada oportunamente.

Toda el agua que se recoja al pié del área de deslizamiento será conducida a la Quebrada El Piro mediante un sistema de drenaje de aguas lluvias constituido por pozos de inspección y colectores en concreto en zanja, que se conecta al sistema de drenaje existente a lo largo del Boulevard Sur.

Los materiales provenientes de las excavaciones que no podrán ser utilizados en las intervenciones antes descritas, se depositarán en la parte Sur de la Cordillera. El área designada será oportunamente preparada.

Antes de iniciar las operaciones de descarga, en el área designada para el botadero se realizará una limpieza (descapote) y un sistema de drenaje subterráneo. Con el material proveniente de las excavaciones, se irá, al mismo tiempo, realizando un dique de retención, compactado.

Después de la finalización de las obras, se realizará una red de drenaje superficial constituida por canales y foso de guardia en tierra.

El diseño de las Obras de Emergencia, así como los Documentos para la Licitación desarrollados por el Consultor como parte de las Actividades del Estudio, ha sido entregados en fecha 17 de agosto de 2001 al Ministerio del Medio Ambiente con carta Ref. 0908/LC/M/01 y por instrucciones recibidas al Ministerio de Obras Publicas, Transporte, Vivienda y Desarrollo Urbano con carta Ref. 1008/LC/M/01 de la misma fecha. Estos documentos se encuentran a la fecha en proceso de análisis para su licitación. Debido a la necesaria confidencialidad de estos documentos, de común acuerdo con el Propietario, no se han incluido dentro de los Informes presentados.

3 CONCLUSIONES

Desde el 17 de mayo hasta el 10 de septiembre de 2001, se efectuaron las actividades del estudio geotécnico finalizadas a definir las modalidades del luctuoso deslizamiento que ocurrió el día 13 de enero de 2001 afectando la colonia de Las Colinas, al Sur de Santa Tecla.

Los estudios se basaron sobre investigaciones geológicas y geotécnicas, con sondeos mecánicos, pruebas in situ y investigaciones geofísicas. Sobre las muestras extraídas de los sondeos se efectuaron también pruebas de laboratorio, y los resultados de todas estas investigaciones fueron relacionados determinando las más plausibles características mecánicas de los terrenos investigados.

Un levantamiento geológico fue ejecutado, juntos con el análisis aerofotográfico sobre las fotos del área, antes y después el deslizamiento, permitiendo la preparación de mapas y secciones geológicas en escala 1:5,000.

Una detallada actividad de reconocimiento de campo fue también ejecutada, comparando todos los resultados obtenidos de las pruebas, averiguando la congruencia entre dichos resultados y los análisis de estabilidad de los vertientes de la cordillera.

Además, un profundizado estudio de las características sísmicas de los terrenos fue efectuado, evaluando los coeficientes de amplificación sísmica de los lugares y determinando los acelerogramas de proyecto.

El mecanismo del deslizamiento fue identificado, asignando la causa del deslave a diferentes razones:

- las escasas características mecánicas de algunos niveles de suelo;
- la inclinación de las capas en dirección de la pendiente de la ladera;
- la contribución determinante de un acción sísmica significativamente fuerte (0.4 g) amplificada en la cima por las características del material y topográficas.

Los análisis geotécnicos efectuados por el deslizamiento de Las Colinas se profundizaron también por otras áreas de la Cordillera, en particular en dos secciones, en correspondencia de las Colonias de Pinares de Suiza y el área de la residencia el Paraíso, que se presentan en condiciones críticas.

Se investigaron los métodos de mitigación, identificando en la modelación de la parte superior de la cordillera el sistema técnicamente y económicamente factible para reconducir las condiciones de riesgo de estos lugares a condiciones de menor riesgo. Sin embargo, debido al elevado costo de las obras propuestas, se examinó también la posibilidad de alternativas no estructurales, como la reubicación de los habitantes que podrían ser afectados por deslizamientos y flujos.

Un mapa de las zonas amenazadas ha sido presentada, con la identificación de los límites físicos, en función del tipo de evento: este plano permite confirmar que toda la ladera Norte de la Cordillera debe considerarse a riesgo, por la posibilidad de deslizamientos peligrosos.