



Universidad de El Salvador
Hacia la libertad por la cultura



COAMSS
OPAMSS
Consejo de Alcaldes y Oficina de Planificación
del Área Metropolitana de San Salvador



JUNTA DE ANDALUCIA
PROGRAMA DE COOPERACION INTERNACIONAL

Ingeniería Geológica y Geomorfología del AMSS a escala 1:50,000 y de un sector de al menos 10 km² a escala 1:10,000

Universidad de El Salvador
Facultad de Ingeniería y Arquitectura
Escuela de Civil

Tomáš Hroch

Jan Valenta

José Alexander Chavez H.

Jiří Šebesta

Proyecto financiado con fondos de la AACID y ejecutado por COAMSS/OPAMSS



Universidad de El Salvador
Hacia la libertad por la cultura



COAMSS
OPAMSS
Consejo de Alcaldes y Oficina de Planificación
del Área Metropolitana de San Salvador



JUNTA DE ANDALUCIA
PROGRAMA DE COOPERACIÓN INTERNACIONAL



COAMSS
OPAMSS
Consejo de Alcaldes y Oficina de Planificación
del Área Metropolitana de San Salvador



JUNTA DE ANDALUCIA

PROGRAMA DE COOPERACION INTERNACIONAL

Índice

Introducción	3
Antecedentes	6
Metodología.....	18
Descripción de zona de estudio.....	23
Descripción de Leyenda de Trabajo y Unidades de Ingeniería Geológica. Reporte Fotográfico	25
Mapeo ingeniero-geológico en la escala 1:10 000.....	47
Mapa AMSS escala 1:50,000 de 14 municipios del AMSS y mapa de sector área de al menos 10 km² a escala 1:10,000	57
Mapas de la zona Santa Tecla:	58
Mapas de la zona el Carmen.....	61
Conclusiones.....	64
Bibliografía.....	67
ANEXO A.....	70
Introducción Geomorfología	71
Cartografía del Mapa Geomorfológico.....	73
Formas y unidades geomorfológicas con nivel de problemática de riesgo por procesos geodinámicos	74
Peligrosidad por Dinámica Superficial según Geomorfología	117
ANEXO B.....	128
Aspectos tomar en cuenta para investigación de movimiento de ladera	128



Introducción

El presente documento forma parte del proyecto denominado “Gestión de Riesgos y Disminución de Vulnerabilidad Social en el Área Metropolitana de San Salvador” financiado por la Agencia Andaluza de Cooperación Internacional para el Desarrollo (AACID) y ejecutado por el COAMSS/OPAMSS, dentro del proyecto se desarrollará, mediante un convenio específico entre la Universidad de El Salvador a través de la Facultad de Ingeniería y Arquitectura y la Oficina de Planificación del Área Metropolitana de San Salvador, el estudio e investigación denominado “ACTIVIDADES DE MAPEO Y CAPACITACIÓN DE ESTUDIOS DE INVESTIGACIÓN EN INGENIERÍA GEOLÓGICA Y DINÁMICA SUPERFICIAL DE RIESGOS GEOLÓGICOS EN EL AMSS”.

La Agencia Andaluza de Cooperación Internacional para el Desarrollo (AACID), está comprometida con proyectos que se enmarquen dentro del ámbito de Cambio climático, sostenibilidad ambiental y hábitat, asimismo el ámbito de acción de la AACID es acorde a los objetivos del proyecto que busca promover la ordenación del territorio y apoyar la planificación y desarrollo urbanístico desde una perspectiva de sostenibilidad y de contribuir a la generación de procesos de desarrollo en las áreas geográficas prioritarias.

Asimismo con la ejecución del proyecto se busca contribuir a la implementación de los lineamientos establecidos en la Política Metropolitana de Desarrollo Urbano y Territorial (COAMSS/OPAMSS), cuyo objetivo es buscar una ciudad ambientalmente sustentable, siendo temas prioritarios la gestión del riesgo, específicamente en lo relativo a: Investigación, mitigación, conocimiento y reglamentación, profundizando temas como vulcanismo, microzonificación sísmica, estabilidad de laderas y taludes, lahares y modelos hidráulicos de los drenajes primarios.

Las geo-ciencias también aportan en el cumplimiento de los Objetivos de Desarrollo Sostenible y la Nueva Agenda Urbana que buscan ciudades sostenibles y resilientes.

Los estudios y cartografía geológica, geomorfológica, así como de ingeniería geológica son un instrumento para comprender cómo y dónde los riesgos geológicos pueden afectar a los habitantes de determinada zona, siendo importante saber dónde están las mejores condiciones para el desarrollo de la ciudad. Este tipo de información proporciona datos importantes para la toma de decisiones de instituciones gubernamentales y para la planificación regional permitiendo encontrar un equilibrio entre el uso de los recursos naturales (aguas subterráneas, por ejemplo) para desarrollar las áreas no perturbadas por las amenazas geológicas, que en esta región es particularmente importante para el desarrollo

integral de la capital, y de todo el país. El conocimiento de las condiciones geológicas es también importante para el uso de tecnologías de construcción adecuadas, para evitar pérdidas humanas y económicas cada vez que un evento natural afecta el país.

El AMSS está expuesto a procesos geológicos endógenos y exógenos que tienen un impacto importante en la pérdida de vidas y bienes materiales, así como en pérdidas económicas, ocurriendo problemas de este tipo en esta ciudad de manera recurrente.

Se continúan trabajos de geología e ingeniería geológica con ayuda de la información que fue compilada en entregables anteriores por ejemplo mapas geológicos existentes, reportes, información levantada drone e investigaciones del área de estudio, estudios geotécnicos, así como visitas de campo. En cuanto a trabajos de geología se continuaron las visitas de campo en sectores del AMSS para mejorar calidad del mapa de quinto entregable, de manera que sea más detallado lo cual ayudo a construir mapas de ingeniería geológica. Para ingeniería geológica se ha colectado información y definido metodología, así como leyenda a obtener resultados a escala metropolitana, así como de detalle.

Entre los problemas que se observa frecuentemente en el Área Metropolitana de San Salvador (AMSS) se pueden mencionar fenómenos como movimientos de ladera, inundaciones, terremotos, erosión intensa, intervención antrópica sin control, subsidencia o colapso y presencia de dos volcanes activos. Fenómenos como terremotos o huracanes hacen que el país retroceda en su desarrollo ya que se requieren elevadas sumas de dinero para la reconstrucción y dejan en la pobreza a las personas afectadas, siendo difícil que vuelvan a su nivel económico anterior.

Toda esta problemática podría ser reducida drásticamente si se conociera las características del territorio y se realizaran los estudios correspondientes cuando se proyecta una intervención antrópica; de manera que se pueda conocer de antemano la tecnología adecuada y las áreas en donde hay que tomar consideraciones puntuales.

En la actualidad en El Salvador hay escasez de profesionales preparados en las diferentes disciplinas de las ciencias de la tierra, se usa información de otros países o antigua. Esto produce poco conocimiento de temas como geotecnia, aguas subterráneas, sismicidad, geología, geomorfología, hidrología, riesgos etc. además de que no se trabaja a una escala adecuada. Esta situación se ve reflejada en la problemática que se vive actualmente en el AMSS ya que al no conocer el entorno natural o al tratar de bajar los costos evitando invertir en investigación, se puede llegar a tomar decisiones erradas que con el tiempo afectaran a un proyecto haciendo que la reparación sea más cara que si se hubiera hecho una investigación adecuada.

Actualmente son muchos los organismos que a nivel internacional apuestan a un desarrollo inclusivo y/o sostenible en el cual se priorice al ser humano como principio y fin del accionar. Estos enfoques que están siendo adoptados en El Salvador destacan por considerar la importancia de la interacción entre las diversas dimensiones del desarrollo: ambiental, sociocultural, económica, política e institucional.

Diferentes planteamientos coinciden en esta apuesta, entre ellos destacan el modelo de desarrollo inclusivo que ha venido implementando Japón en Centroamérica, los Objetivos de Desarrollo Sostenible de las Naciones Unidas y la Nueva Agenda Urbana promovida por ONU Hábitat.

Por su parte, el Objetivo de Desarrollo Sostenible 11 hace alusión a la de trabajar por conseguir que las ciudades y los asentamientos humanos sean inclusivos, seguros, resilientes y sostenibles; así como el objetivo 13 que promueve la adopción de medidas urgentes para combatir el cambio climático y sus efectos.

La Nueva Agenda Urbana centra también su interés en la Ecología Urbana y Medio Ambiente por la necesidad de una mayor participación de todos los actores urbanos en la planificación del medio ambiente, acción por el clima, y la reducción del riesgo de desastres.

Sin embargo, aunque estos modelos resulten innovadores y visionarios cabe traer a cuenta la importancia de contar con información pormenorizada y de fácil comprensión que dé cuenta de datos concretos en un primer momento para conocer la situación actual de las ciudades, la elaboración de propuestas, posterior toma de decisiones de parte de las autoridades y ejecución de acciones específicas que puedan realizarse en los territorios.

Como ejemplo, es clave conocer de manera preliminar el tipo de investigaciones que se requiere para abordar temas vinculados a las amenazas geológicas e hidrometeorológicas, pues esto permitiría tener claridad sobre el diseño, obras de mitigación o uso del suelo más recomendado. Un elemento a considerar es que la investigación de ingeniería geológica pueda ser comprensible, ya sea a través de mapas fáciles de interpretar para planificadores urbanos, constructores y agencias gubernamentales. El objetivo de los trabajos de ingeniería geológica es que información geológica, dinámica superficial, peligrosidad geológica y recomendaciones geotécnicas puedan representarse y agruparse en un área determinada, dependiendo de las características intrínsecas de cada zona. El grado de simplificación dependerá del propósito y escala del mapa, la precisión de la información y las técnicas de representación

Un mapa de Ingeniería Geológica (IG) es un tipo de mapa geológico que da una representación de componentes de interés para la planificación del uso de suelo, diseño,

construcción y mantenimiento (Anon, 1976). Hay una necesidad de que mapas sean fáciles de interpretar para constructores y planificadores; agrupando unidades con características o propiedades similares:

- Riesgos geológicos (inundaciones, movimientos de ladera, erosión, tectónica, riesgos volcánicos etc.)
- Geomorfología (Dinámica superficial)
- Hidrogeología (situación del agua subterránea)
- Propiedades geotécnicas de materiales geológicos

Estos mapas ayudan a conocer de manera preliminar tipo de investigación necesaria y uso de suelo más recomendado. Además, apoya en la toma de decisiones ya que hay ahorro de dinero al evitar reparaciones constantes, así como, pérdidas económicas y de vidas humanas por lluvias, así como, terremotos.

La cartografía de Mapa IG usa algunas formas o unidades geomorfológicas, que no tiene el mapa geológico. Especialmente las líneas de las fallas morfológicas, así como las formas y unidades de las laderas de fallas tectónicas y caldericas, donde las rocas están más fracturadas en zona más o menos amplias. La depresión tectónica de San Salvador es limitada por las fallas de colapso estructural y gravitacional de relieve, donde se conocen también las fracturas de una zona bien ancha. Estas zonas tienen las propiedades de IG un poco diferente de la litología que conforma esta zona.

Muy importante están las condiciones por erosión superficial y subterránea, especialmente en la zona de Badlands (erosión intensa) y cerca de los bordes expresivos de laderas erosionales con procesos dinámicos. La erosión subterránea provoca, especialmente en TBJ cavernas y cárcavas, que siempre producen problemas y daños sobre terrenos y casas ubicadas en estas zonas. La erosión superficial afecta por toda el AMSS en mayor o menor medida. Otras formas y unidades geomorfológicas problemáticas son los movimientos de ladera, especialmente los flujos escombros.

Por lo tanto, para conocer los procesos geodinámicos es muy bueno conocer el desarrollo de relieve de AMSS en general.

Antecedentes

La Ingeniería Geológica puede apoyar en la planificación por medio de mapas e identificación de áreas de amenaza natural, pero también puede ayudar solucionando

problemas e investigación en sitio, obtener datos para diseño y aprovechamiento de los materiales para la construcción los materiales.

Mapa de ingeniería geológica es un producto que se elabora en base al mapeo de campo, donde se evalúan durante la campaña de campo parámetros como la estructura geológica, la hidrogeología, zonas de depósito de quebradas, los parámetros geotécnicos de las rocas (estimados), los riesgos erosionales, la pendiente y la morfología del terreno.

Hay que evaluar también amenazas como el volcanismo y la sismicidad si se tiene información.

Pero como primer paso es recopilar toda la información existente de la zona de estudio (mapas de pendiente, topográfico, denudación, geológico, geomorfológico y sus derivados, recarga acuífera, pozos existentes y manantiales, imágenes satelitales, entre otros.

Detalle del mapa depende de:

- Materiales de archivo recopilados
- Recorrido detallado de mapeo
- Calidad del mapa topográfico
- Cantidad de puntos de mapeo
- Número de afloramientos (naturales o artificiales)
- Perforaciones, pozos de prueba
- Educación y experiencia de geólogo o ingeniero geólogo.
- Habilidad para extrapolar e interpolar

Un principio fundamental es representar información en el mapa en el punto exacto.

A continuación, se presentará parte de la investigación hecha para el AMSS por parte de la Oficina de Planificación del Área Metropolitana de San Salvador (OPAMSS) y que está relacionada con la ingeniería geológica. Enfocándose en la aplicación de investigación usando mapeo de ingeniería geológica, caracterización y monitoreo del suelo problemático Tierra Blanca Joven (TBJ).

Del 2005-2006 se elaboró “El Mapa Geomorfológico del AMSS” en escala 1:25,000; debido al interés de la OPAMSS en incorporar el análisis de riesgo ante peligros naturales en los estudios de planificación urbana. Última actualización de este mapa corresponde a las actividades de este proyecto.

En el año 2007 se continuó la elaboración de mapas y estudios especiales que aprovechan los datos básicos del mapa geomorfológico, resultando mapas temáticos sobre movimientos



de ladera y sismicidad. Dichos mapas fueron incluidos dentro del Reglamento de Ley de Ordenamiento Territorial del AMSS en el 2009.

En el 2008 se empezó a trabajar en un sector de la cordillera del Bálsamo (Chamra et al. 2010) realizando mapeo de ingeniería geológica el cual utiliza el método de bandas para representar la estructura geológica debajo de los estratos más superficiales. Se realizó un mapa de aptitud a la construcción donde se agrupo la información geológica, peligrosidad geológica y recomendaciones geotécnicas dependiendo de las características intrínsecas de cada zona (Fig. 1). Además, se analizaron los riesgos desde una perspectiva de ingeniería geológica de zonas tales como el Picacho, el deslizamiento del Km.18 de la Carretera de Oro y se inició la recopilación de datos geotécnicos de estratos geológicos.

También en el periodo de 2008-2010 (Servicio Geológico Checo-OPAMSS) se obtuvieron el mapa geológico del sector del Bálsamo y mapa morfométrico del AMSS.

La elaboración de la cartografía y evaluación para estudiar los procesos erosivos en el AMSS se hizo en el 2010.

En el 2011 con proyecto del Ministerio de Medio Ambiente y Recursos Naturales (MARN) se actualizo mapa geomorfológico para toda la Subregión Metropolitana de San Salvador y se actualizaron los mapas derivados de geomorfología con nueva metodología (Flujos de escombros, deslizamientos, erosión fluvial, erosión subterránea, sismicidad y licuefacción, conveniencia de urbanización). Esta información fue incluida en la Zonificación Ambiental del MARN de Subregión Metropolitana de San Salvador (2013).

Desde el 2012 se ha investigado y caracterizado el comportamiento y propiedades de la Tierra Blanca Joven (TBJ) (producto de la última erupción pliniana de la caldera de Ilopango) la cual es el suelo más problemático dentro del AMSS (Chavez 2016). Se ha monitoreado con visitas a taludes dentro del AMSS mediante tensiómetro y sensores electromagnéticos TMS3, identificándose algunos factores que tienen que ver con los procesos de inestabilidad en los taludes. Además, en laboratorio se hizo uso de centrifuga, papel filtro y olla de presión para representar la succión a medida cambia humedad del suelo, lo cual sirve para diseño geotécnico (Chavez et al. 2016). También se ha caracterizado los flujos de escombros en Quebrada las Lajas de Mejicanos para conocer la capacidad hidráulica de las obras de paso y drenaje en caso de un flujo de escombros (Alfaro, 2014).

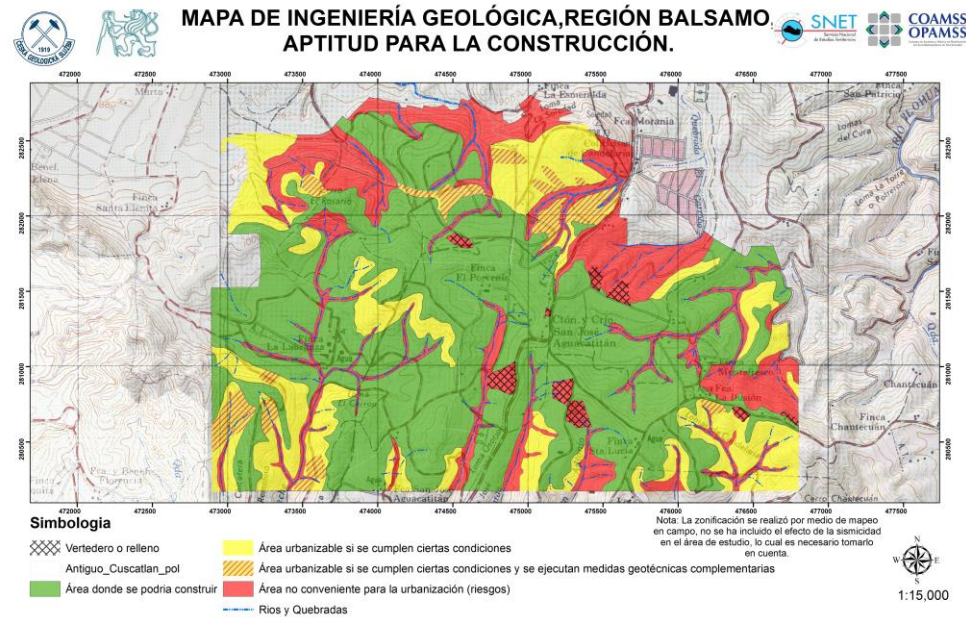
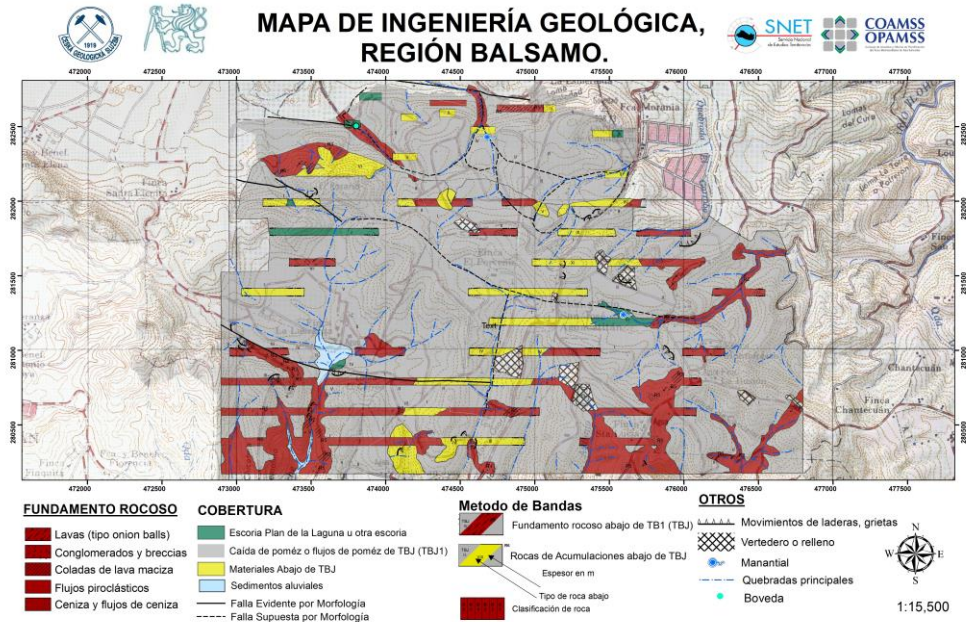


Fig. 1 Mapa de Ingeniería Geológica de sector Bálsamo (2008 y 2015)

Del 2015 al 2017 se ha iniciado el monitoreo en taludes y en algunos drenajes con TBJ para medir y caracterizar los procesos erosivos para construir criterios en cuanto al uso del suelo, zonas de protección y obras de mitigación. Se han obtenido cambios horizontales y verticales de la superficie de estos suelos con el transcurso del tiempo con la idea de ir

conociendo la tasa de erosión de la TBJ relacionando factores externos tales como las actividades antrópicas en estas áreas, clima, vegetación, usos de suelo entre otros.

También en el 2015 se ha retomado el mapeo de ingeniería geológica en zonas de presión urbanística tales como carretera al Boquerón, Finca Mirasol para complementar sector mapeado en 2008 del Bálsamo (Fig. 1 y 2). Dicha metodología ha sido retomada para este trabajo, pero sin hacer uso de bandas sino colocando litología y dinámica superficial observado en campo.

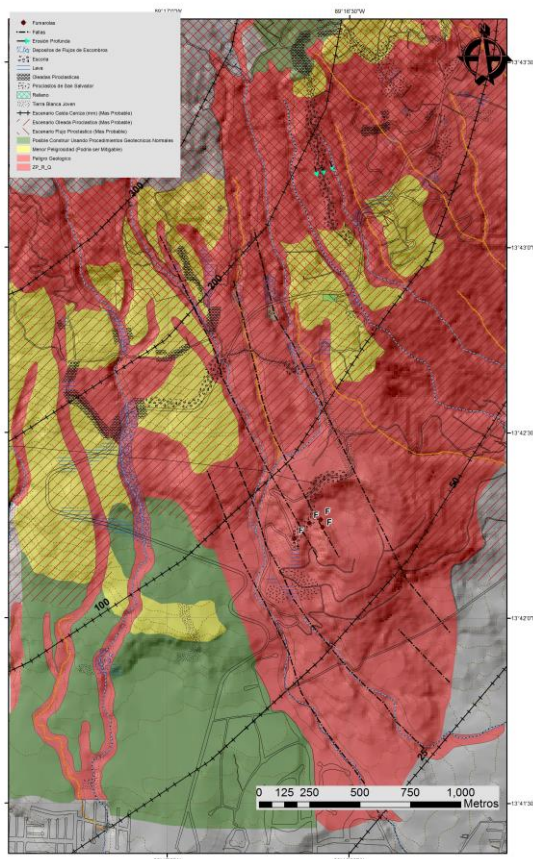


Fig. 2 Mapa de Ingeniería Geológica de sector Boquerón (OPAMSS, 2015)

Todos estos productos ayudan en la toma de decisiones en cuanto al uso de suelo, zonas de protección, obras de mitigación e investigación necesaria para los proyectos dentro del AMSS. Todo con la idea de disminuir los riesgos y tener un Área Metropolitana sostenible.

La idea de los mapas es que quede plasmada situación del terreno (litología, situación de estabilidad de ladera, rellenos artificiales, zonas de movimientos de ladera, tectónica, peligrosidad volcánica etc.) que ayuden a dar recomendaciones para el uso del suelo, zonas de protección, criterios para futuros proyectos urbanísticos y laderas/taludes.

La etapa de campo y oficina de este proyecto, así como interferometría obtenida ha permitido corroborar y actualizar Mapa Geomorfológico del AMSS y sus derivados: Zonificación de Morfoestructuras del AMSS y su Relación con la Actividad Sísmica; así Geomorfología del AMSS y su Relación con los Movimientos de Ladera (Que pasa a ser llamado Mapa de Peligrosidad por Dinámica Superficial según Geomorfología)

Las principales actualizaciones se muestran en figura 3 y 4. Se actualizo leyenda para que sea menos general y se más específica

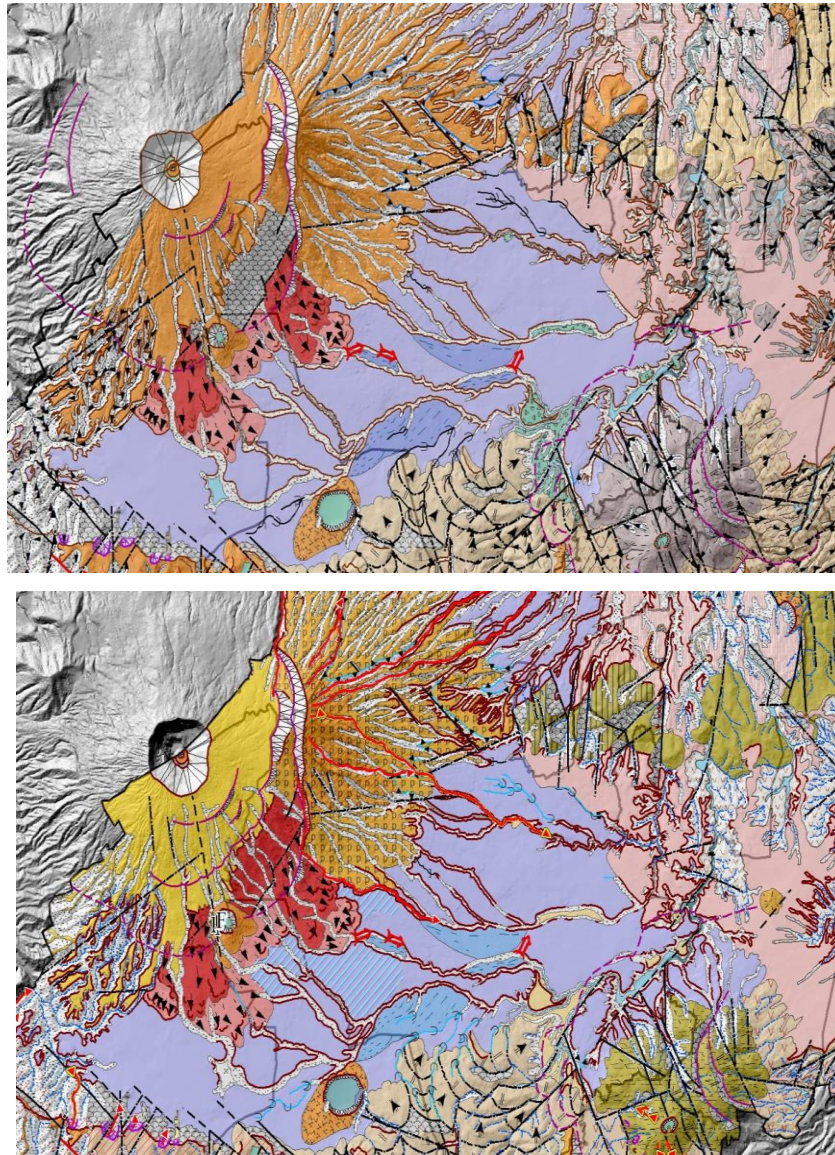


Fig. 3 Mapa Geomorfológico AMSS (arriba 2006 y abajo 2018)

En Fig. 4 se pasaron zonas de vertiente tectónica o plano de falla a lava; se incluyen flujos de escombros, además sectores de planicies volcánica fluviales se demarcan donde hay lavas superficiales.

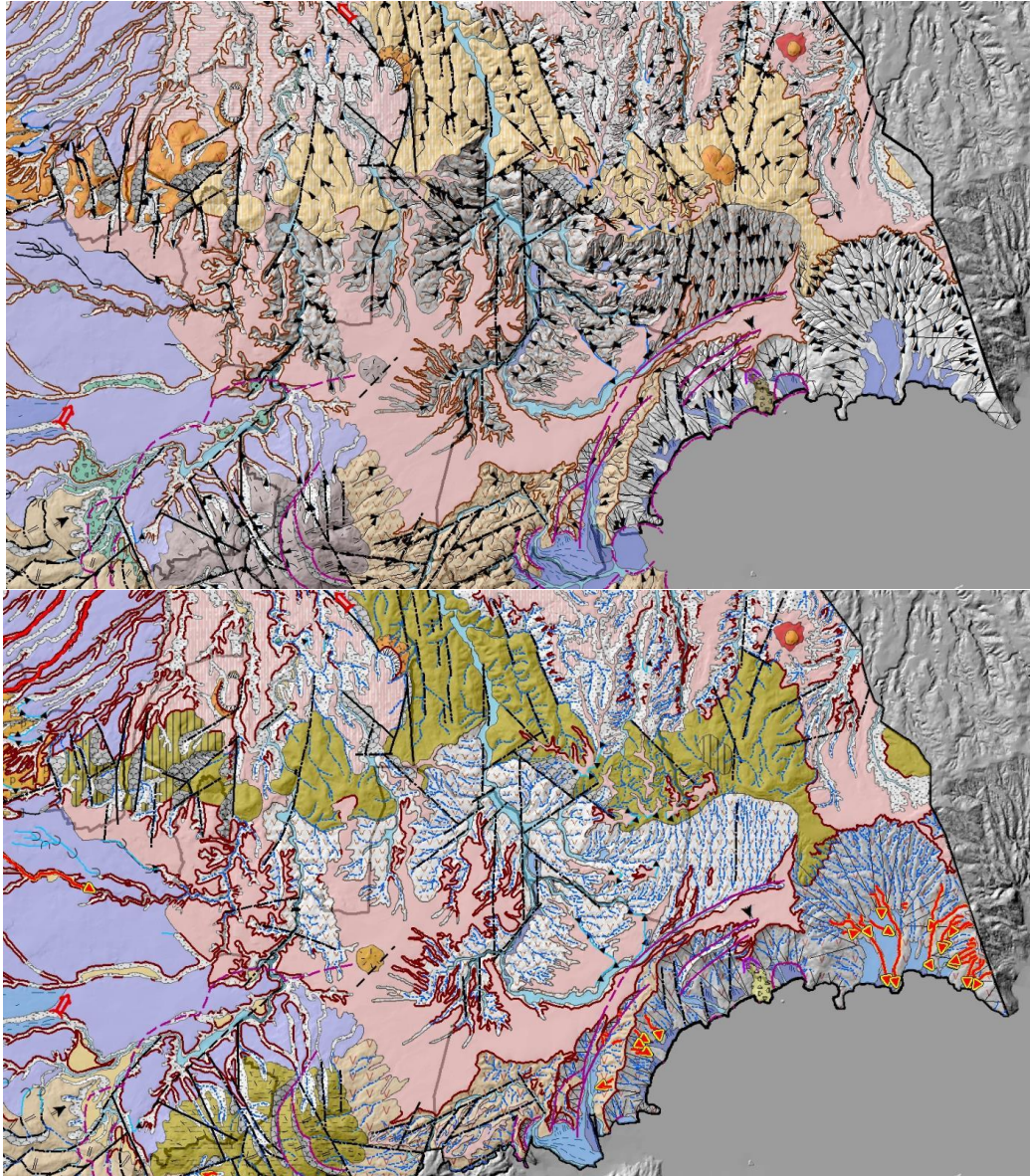


Fig. 4 Mapa Geomorfológico AMSS (arriba 2006 y abajo 2018)

En Fig. 4 se incluyen flujos de escombros recientes, además se observa que se reestructura la leyenda para que sea más explicativa (Fig. 5).

2006



2018

Formas y Unidades Tectónicas y Estructurales

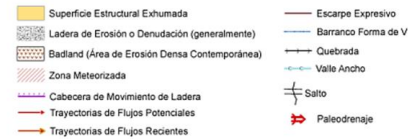


2006



2018

Formas y Unidades de Denudación



Formas y Unidades de Acumulación



Fig. 5 Cambios de leyenda Mapa Geomorfológico

En cuanto a mapa de Zonificación de Morfoestructuras del AMSS y su relación con la actividad Sísmica (Fig. 6) se sustituyeron fallas geológicas de mapa 1:100,000 por las del mapa 1:15,000, se incluyó información que interferometría demarca que tienen movimiento vertical o horizontal.

**ZONIFICACIÓN DE MORFOESTRUCTURAS DEL AMSS
Y SU RELACIÓN CON LA ACTIVIDAD SÍSMICA AMSS**

Proyecto financiado con fondos de la AACID y ejecutado por COAMSS/OPAMSS

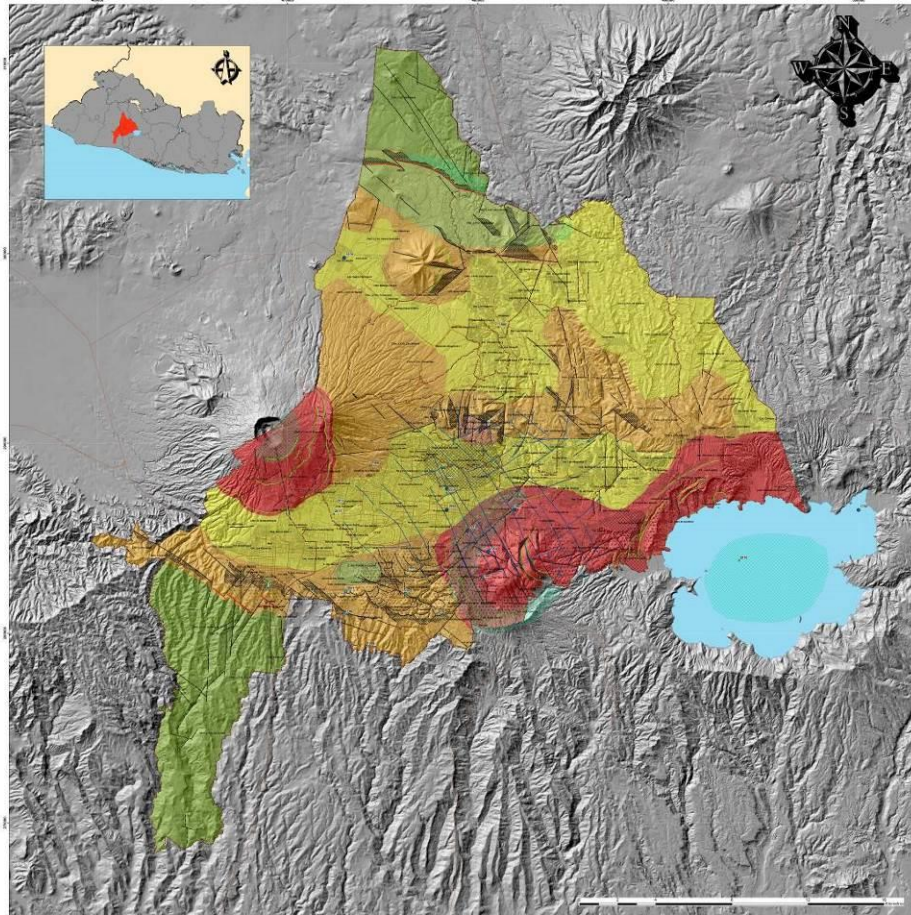


Fig. 6 Zonificación de Morfoestructuras del AMSS y su Relación con la actividad Sísmica (OPAMSS (2018))

Peligrosidad por Dinámica Superficial según Geomorfología

Para actualizar resultados de mapa Geomorfología del AMSS y su Relación con los Movimientos de Ladera se combinó unidades geomorfológicas, dinámica observada, pendientes y litología general (Fig. 7 y 8) obteniéndose Mapa de Peligrosidad por Dinámica Superficial según Geomorfología.

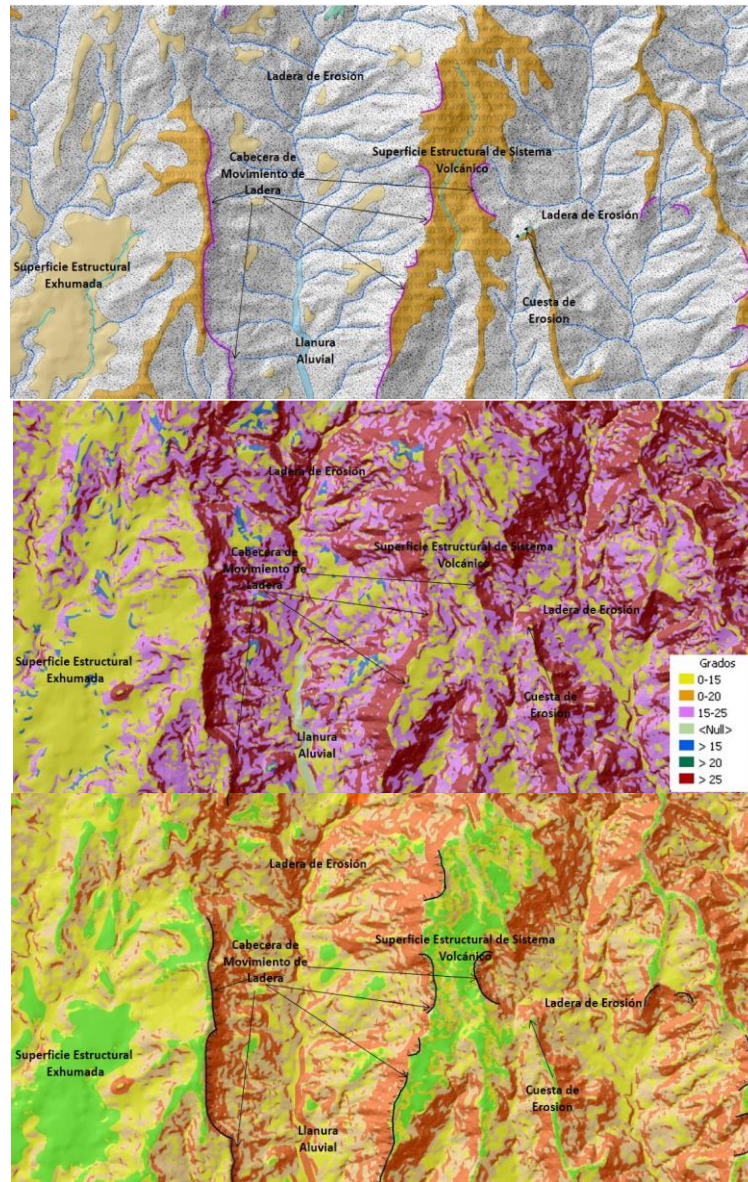
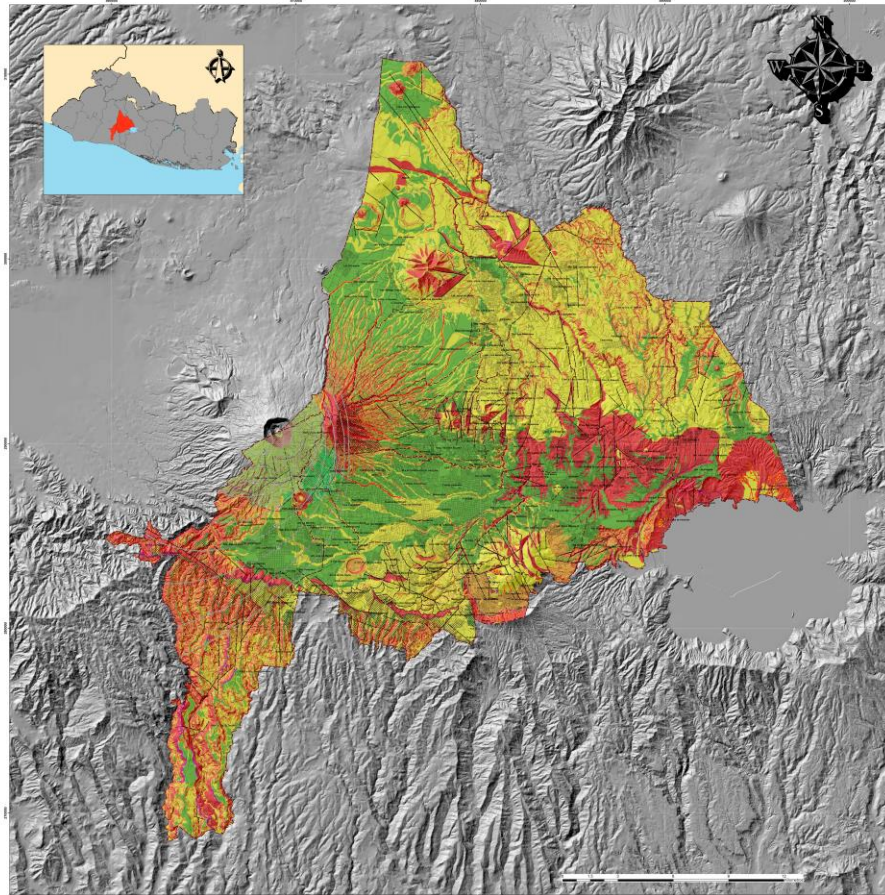


Fig. 7 Metodología para obtener Mapa de Peligrosidad por Dinámica Superficial según Geomorfología (arriba mapa geomorfológico, en medio pendientes y abajo resultado).

MAPA DE PELIGROSIDAD POR DINÁMICA SUPERFICIAL SEGÚN GEOMORFOLOGÍA

Proyecto financiado con fondos de la AACID y ejecutado por COAMSS/OPAMSS



LEYENDA

- | | |
|--|--------------------------------------|
| — Caída de Cenizas Más Probable (mm) | — Trayectorias de Flujos Potenciales |
| — Oleada Piroclástica Más Probable | — Trayectorias de Flujos Recientes |
| ■ Meteorización | |
| — Cabecera de Movimiento de Ladera | |
| — Falta Evidente por Morfología | |
| — Falta Supuesta por Morfología | |
| — Falta de Caldera Evidente | |
| — Falta de Caldera Cubierta | |
| — Colapso Estructural y Gravitacional de Relieve | |
| — Falta Evidente por Morfología (cubierta) | |
| — Falta de Caldera Supuesta | |

- Peligrosidad**
- Baja
 - Mediana
 - Alta
 - Muy Alta

Elaboración:
JH Sobasa
Participación técnica de:
Sofía Ferrer
Jefe de Proyecto y Realización:
José Alexander Chaves Hernández

Fig. 8 Mapa de Peligrosidad por Dinámica Superficial según Geomorfología

Las zonas con problemáticas catalogadas en mapas derivadas de peligro geológico y geomorfológico como bajas, mediana, altas y muy altas según geomorfología, están un

indicador de la dinámica superficial que se puede esperar en algunos sectores, sin embargo, es importante realizar estudios preliminares y visita de campo para valorar situación actual del terreno, esto ayudara a identificar estudios que tienen que realizarse. (**Reporte completo en Anexo A**)

Tambien se ha generado un mapa de ingeniería geológica escala 1:50,000, usando información de mapa geológico, mapa geomorfológico, conocimientos de propiedades geotécnicas además de visitas de campo para corroborar información.

En esta etapa de campo por los niveles de violencia dentro del AMSS y para que técnicos de alcaldías participaran y dieran seguimiento en levantamiento geológico se hizo una campaña conjunta. Especialmente en Santa Tecla, San Martin, Delgado, Soyapango, Nejapa, Cuscatancingo, Tonacatepeque, San Marcos. Algunos lugares no fue posible visitarlos por cuestiones de seguridad. Además, debido a urbanización dentro del AMSS es difícil tener acceso a afloramientos para observar capas geológicas, por lo que se tiene que recurrir a mapas antiguos, pozos excavados/perforados que tengan litología, buscar excavaciones recientes de nuevas construcciones, entrar dentro de las quebradas, cortes de carreteras. Esto limito y dificulto el levantamiento de información.

El tener la información de curvas topográficas a 5 m (adquiridas y digitalizadas en sectores de interés por la UES) ayudo a actualización de mapa a mejor detalle, especialmente lavas dentro de quebradas.

Por la escala de trabajo no es posible trazar la ubicación exacta de cada uno de los cuerpos geológicos (los flujos de lava, horizontes de rocas epiclásticas, estratos de rocas piroclásticas etc.), debido a su pequeño espesor. Por lo que se ha adaptado la leyenda de trabajo del mapa geológico especial, la cual representa complejos de rocas definidas por su litología y petrografía.

Sectores con un espesor total inferior a 2 m, no se muestran en el mapa. Con un espesor de 2 m a 6 m se hace uso del método de bandas para mostrarlo (sustrato a modo de banda se muestra como que si fuera una trinchera excavada para conocer profundidad que se encuentra). Con un espesor mayor a 6 m se indica en el mapa el espesor por medio de texto y también con isópacas.



Metodología

El objetivo fue ampliar los trabajos de ingeniería geológica en el AMSS, dónde se concentran los riesgos geológicos y que pueden provocar problemas para su población. El desarrollo de las disciplinas aplicadas como la ingeniería geológica, geotécnica, mecánica de rocas y suelos se maneja en El Salvador de manera muy básica, aunque su importancia es significativa.

Los edificios se cimentan de manera instintiva o por experiencia. Los riesgos se consideran de manera parcial. La educación de los profesionales de la construcción está incompleta en los temas de geología y amenazas geológicas.

En el AMSS se concentran amenazas tales como: sísmica, volcanismo, precipitación extrema (cerca de áreas de huracanes), suelos problemáticos (piroclastos volcánicas recientes), rápidas deformaciones de ladera (flujos de escombros, avalanchas rocosas) y fenómenos extremos erosionales (erosión retrógrada, erosión subterránea). Los problemas no solo son provocados por las construcciones, sino también por la acumulación de desperdicios en sistema de drenajes.

La situación económica obliga a que se invadan zonas peligrosas y construir en condiciones precarias, las cuales desde nuestro punto de vista son inadecuadas para la construcción. La concentración de las construcciones en estos terrenos es desmedidamente alta.

Los trabajos se hicieron en el Área Metropolitana de San Salvador (AMSS) en los alrededores más cercanos del centro de la metrópoli, sobre todo al sur de la ciudad ascendente a pie de la elevación dominante El Picacho.

Los trabajos iniciaron por la familiarización con los problemas existentes, con la composición geológica y con los riesgos geológicos (consulta bibliográfica y de mapas existentes). Se revisaron bases de datos, bases cartográficas, se estudiaron los materiales impresos, se visitaron afloramientos geológicos y lugares de construcciones importantes (cortes de las construcciones, laderas erosionales, pozos de construcciones etc.).

Para ayudar en construcción a mayor detalle de mapeo de ingeniería geológica a escala metropolitana, así como en zonas a escala 1: 10,000 (El Carmen Escalón y Santa Tecla) se continuo el mapeo geológico, especialmente en zonas donde se necesitaba comprobar con mayor detalle. Además, se hicieron visitas más específicas a sectores más problemáticos por ejemplo las Colinas y sector oriente del AMSS.

Para complementar mapa geológico se visitaron al final 2816 puntos para mapeo geológico (Fig. 9), incluyendo zonas a mayor detalle para ingeniería geológica.

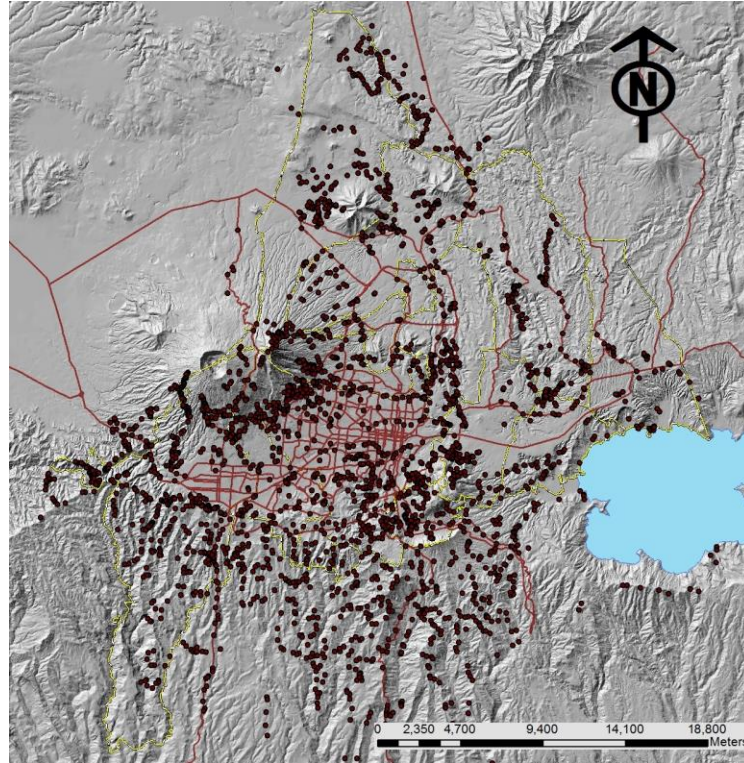


Fig. 9 Mapa con puntos usados para mapeo Geológico

Se colecto información reciente de publicaciones de Suñe-Puchol et al. (2019 a, b) y Pedrazzi et al. (2019) lo cual ayudo a ordenar información e identificar lo observado en campo. Siendo necesario visitar zonas para comprobar e validar información, así como solventar dudas existentes en cuanto a litología presente.

Se puede observar cómo se mejora la calidad de mapa con el complemento de levantamiento de campo e investigación hecha hasta la fecha, incluyendo identificación de zonas meteorizadas en sector del Bálsamo. En Figura 10 se ven mejoras en mapa geológico, esto se continuará para obtener mapa de ingeniería geológica.

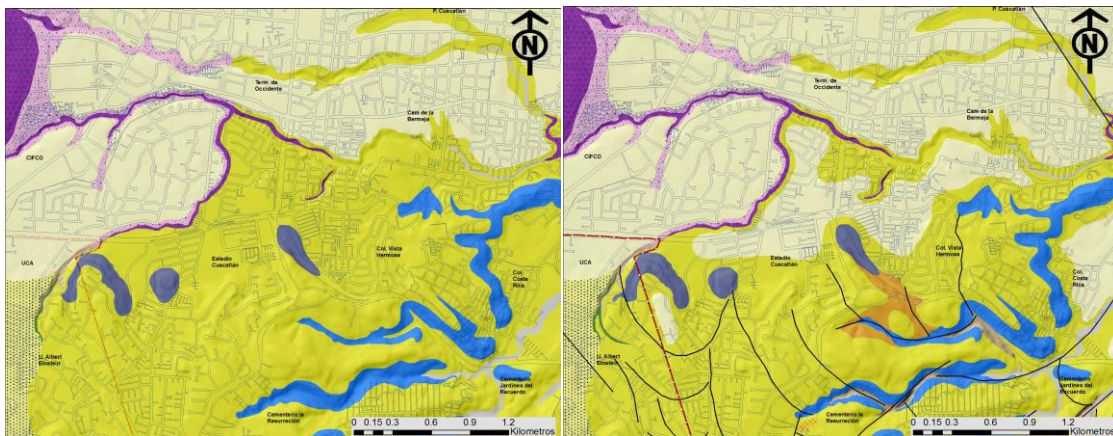
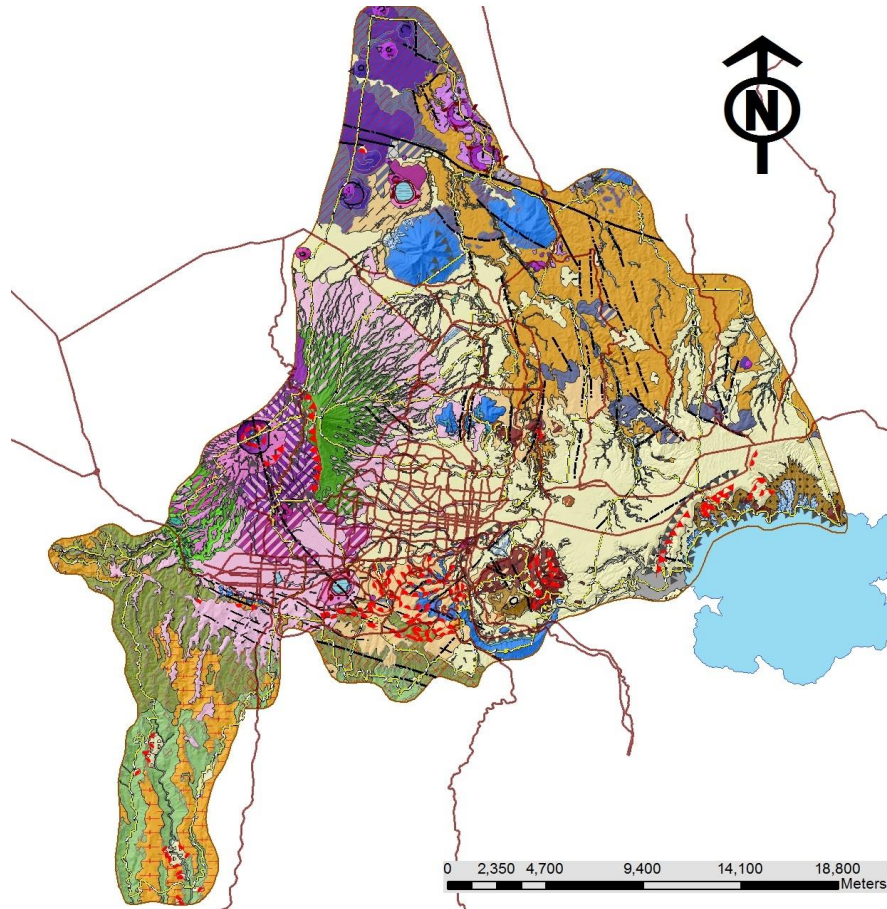


Fig. 10 Comparación de mejoras de mapa geológico con trabajo de complemento y Mapa Geológico del AMSS 1:50,000

Es significativo realizar **estudios preliminares** para un proyecto ya que esta fase es la que marcara las consideraciones a tomar en cuanto al proyecto en el futuro; esto corresponde a la etapa de anteproyecto y esencialmente es la recopilación de información bibliográfica y

cartográfica que exista en el área de estudio, además de visitas de reconocimiento, lo cual ayudara a conocer los lugares más adecuados para la construcción de la obra dependiendo de las condiciones geológicas y geotécnicas. Su resultado tiene que ser un informe en donde se haga la planificación de los estudios de detalle (de ser necesarios).

En cuanto a la recopilación de información es necesario conseguir los estudios hechos en esa área o cerca de esta, debiendo analizar dicha información para conocer algo sobre la geología, topografía, aguas, estratigrafía, litología, problemática, riesgos etc., además de la revisión de fotografías aéreas e imágenes satelitales existentes.

La visita de reconocimiento sirve para comparar la información recolectada contra la realidad, ayudando a conocer la factibilidad de la construcción, así como, información geológica, estructural, geodinámica, geomorfológica, estado de las aguas entre otros, además de ayudar a elegir qué tipo de programa de exploración será necesario.

Esta visita de reconocimiento es muy importante ya que se puede descartar o aceptar un determinado terreno.

Los **estudios de detalle** pueden ser útiles en la etapa de construcción y operación de la obra, siendo el objetivo de esta etapa el conocimiento a profundidad de la geología de la zona, por lo que el informe debe describir las características geotécnicas del terreno para fines de diseño y pueden consistir en lo siguiente, dependiendo del nivel de importancia de infraestructura:

- Elaboración de un mapa geológico-geotécnico de la superficie del terreno a una escala adecuada
- Mapeo geotécnico del subsuelo por medio de técnicas directas e indirectas que permiten conocer la distribución de las unidades litológicas y sus características geológicas e ingenieriles
- Obtención de muestras del subsuelo para estudios de laboratorio, y/o realización de pruebas in situ para conocer las propiedades índice y mecánicas de los suelos (cimentaciones y estabilidad de taludes), así como, de los macizos rocosos.
- La información obtenida de las actividades anteriores debe ser procesada e interpretada adecuadamente para que sea de utilidad en el diseño.
- Consideraciones frente a riesgos geológicos e impactos ambientales.

Los trabajos de ingeniería geológica dentro del AMSS se iniciaron conociendo información sobre la estructura geológica, geotécnica y geomorfológica general de los alrededores de la zona de estudio y la clasificación estratigráfica existente.

Como primer paso se tiene que preparar información en oficina, con la ayuda de



COAMSS
OPAMSS
Consejo de Alcaldes y Oficina de Planificación
del Área Metropolitana de San Salvador



JUNTA DE ANDALUCIA

PROGRAMA DE COOPERACION INTERNACIONAL

información de planimetría, red de accesos (calles), hidrografía, topografía, usos de suelos, modelos de elevación, investigaciones en la zona de interés y los diferentes mapas temáticos que el equipo técnico prepara mediante la ayuda de software SIG, el cruce de información; se obtiene como producto mapas a hacer utilizados durante el recorrido, y así como también las rutas de recorrido a desarrollarse en campo. Lo cual deberá de tener como complemento sistema de coordenadas, indicador de norte e indicador de escala (para ubicarse en campo); Adicionalmente es sumamente importante que el personal de levantamiento en campo tenga conocimientos básicos de vulcanología, geología, litología, riesgos y conocimiento de la problemática de la zona.

Luego sigue el levantamiento de información en campo. Se procede a desarrollar el recorrido, en donde es importante ir identificando y dibujando en el mapa los puntos visitados (puede ser con GPS u OziExplorer entre otros) y el tipo de afloramiento visto; los sitios visitados deberán de ser importantes y representativos de la zona, tales como cortes erosionales, excavaciones de construcciones, taludes, manantiales, ríos y quebradas entre otros. En paralelo, se van identificando información como la estructura geológica, la hidrogeología, zonas de depósito de quebradas (flujos de escombros), los parámetros geotécnicos de las rocas (estimados), los riesgos erosionales, la pendiente y la morfología del terreno. También se procede a conformar el mapa de dinámica superficial según geomorfología. La herramienta más importante durante el mapeo es la correlación/comportamiento de los suelos y rocas en diferentes lugares. El mapeo de ingeniería geológica fue hecho sin información de perforaciones o geofísica. Sin embargo, se tiene una base datos de estudios de suelos en algunos sectores que servirá para revisar información vista en campo y caracterizar mejor mapa.

Se concluye con la digitalización de los mapas de ingeniería geológica, geomorfología y dinámica superficial. La información del levantamiento se procede a digitalizarla en una base GIS. Se puede usar el método de bandas el cual consiste en representar ventanas a través de la capa superficial del suelo y ver la capa de abajo (basamento o capas intermedias). En el mapa un color representa una unidad y las unidades con achurado o patrón describen las características diferentes; por ejemplo, rellenos artificiales, zonas de posible movimiento de lava, zonas de protección, unidades geomorfológicas, acumulación de sedimentos entre otros. El mapa también refleja la aptitud para construcción se obtiene al agrupar zonas con similares características o problemática (estructura geológica, la hidrogeología, zonas de depósito de quebradas, los parámetros geotécnicos de las rocas (estimados), los riesgos erosionales, la pendiente y la morfología del terreno) y superponerle información complementaria como puede ser la litología, manantiales y fallas etc.

Descripción de zona de estudio

Las informaciones sobre la estructura geológica de los alrededores fue obtenido de los trabajos existentes, de los mapas y también de las informaciones de los colaboradores (J.Lexa, J. J. Chavez, J.Šebesta **Anexo A**). Se retomó la estratigrafía actual del AMSS (Fig. 11). La composición geológica esta generalmente conformada por formaciones geológicas jóvenes volcánicas y vulcano-sedimentarias de rocas terciarias y cuaternarias. La composición de los productos varía entre rocas félsicas o acidas, intermediarias hasta básicas efusivo (desde las lavas macizas hasta productos de textura complicada) y productos de volcanismo mixto hasta explosivo. Estas rocas forman la base rocosa. Los afloramientos están a menudo espacialmente limitados o aparecen esporádicamente, desaparecen y aparecen de nuevo según la morfología. Se ubican o afloran en diferentes rumbos. El estado de sus condiciones depende de otros procesos que las influyeron hasta la actualidad, tales como la tectónica reciente, auto-metamorfosis, mórfosis de contacto (hidrotermal), influencia de procesos endógenos - la meteorización etc. Una parte del complejo de rocas del fundamento rocoso está formada por potentes bloques o rocas, pero también por material fino (arenoso hasta polvo). Los clastos más gruesos están formados por material grueso de bloques y rocas (los clastos a menudo forman material volcánico heterógeno y variado). El material cementante está formado por fracciones más finas, generalmente homogéneas. La potencia o profundidad de estos flujos es variable. Desde los primeros metros (tal vez decenas de metros) hasta láminas de unos milímetros.

En el suprayacente del fundamento “rocoso” está generalmente el material de origen explosivo. Estas rocas están estratificadas, estando en la frontera entre suelo y la roca (rocas semirocosas) y afloran de manera estratificada como un sándwich de las rocas del fundamento rocoso. El espesor es otra vez variable, en algunas partes fluctua. La granulometría es también variable. Generalmente cambia con respecto a la distancia del centro de erupción o producción. El material de cada episodio volcánico – “estratos” cambia hacia el suprayacente en horizontes de tierra (paleosuelos). En toda la secuencia aparecen “marcadores” que son útiles para el mapeo, los cuales son posicion de cenizas volcánicas y escorias ampliamente extendidas. Generalmente se tratan de láminas (lentes) de material de otro color o de otra granulación.

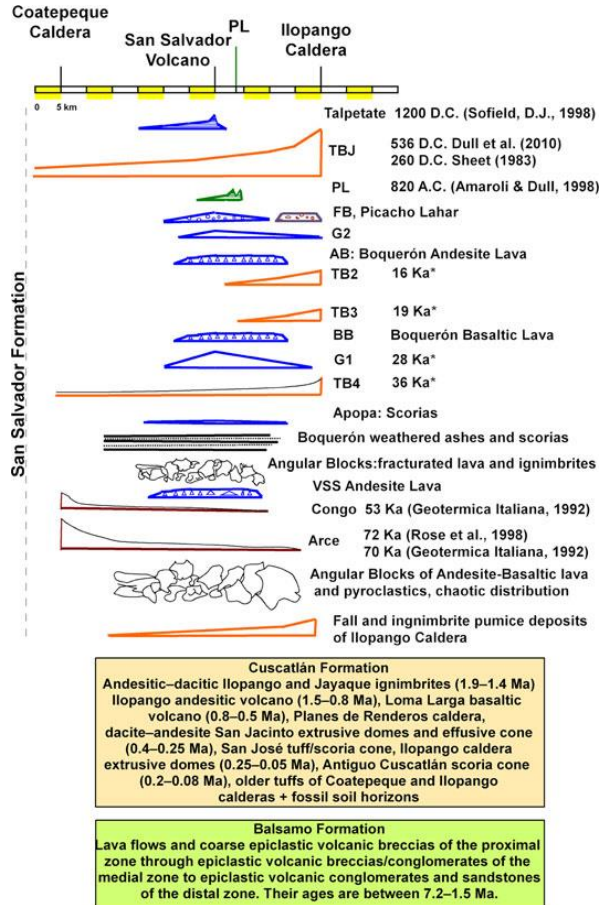


Fig. 11 Estratigrafía del AMSS (Chavez et al 2014)



Descripción de Leyenda de Trabajo y Unidades de Ingeniería Geológica. Reporte Fotográfico

Región de lavas andesíticas y flujos piroclásticos meteorizados

La región consiste en un complejo de lava andesita, brecha volcánica de grano grueso y flujos piroclásticos. Las rocas están mayormente afectadas por meteorización intensa y tienen el carácter de rocas semi-rocosas hasta suelos con alta proporción de minerales arcillosos. Localmente los productos de meteorización corresponden con suelos lateríticos. El grado de meteorización más alto es en la parte sur del territorio en general, al norte el nivel de meteorización se reduce y localmente en los fondos de valles erosionales afloran las rocas mediantemente meteorizada con mayor resistencia. Especialmente los flujos de lava masivas son afectados por grietas. La densidad de las grietas crece en las zonas de fallas tectónicas. Las zonas fracturadas representan áreas con mayor conductividad hidrogeológica. Por el contrario, las partes resistentes funcionan como partes con permeabilidad baja. El alto nivel de meteorización y desprendimiento de las rocas causa, que las condiciones ingeniero-geológicas sean desfavorables, las rocas tienen alta vulnerabilidad por procesos de movimiento de ladera en las zonas inclinadas. La estabilidad de las laderas puede verse reducidas durante la saturación del suelo por agua, por expansión de los minerales de arcilla. En las zonas de afloramientos de las rocas fracturadas se pueden esperar derrumbes del material suelto.

Recomendaciones:

- Los estudios e investigaciones deben prestar atención al nivel de meteorización y espesor de la zona meteorizada
- Es necesario aumentar la atención en las zonas cerca de las fallas, donde las rocas son intensivamente fracturadas. Estas zonas pueden estar saturadas por agua subterránea.
- En las laderas se recomienda evitar hacer excavaciones profundas, verticales y prevenir desestabilización del pie de ladera
- No se recomienda ubicar las construcciones en el margen superior de las laderas inestables, ya que esto puede provocar movimientos de ladera.
- Es recomendable evitar intervenciones que puedan modificar las condiciones hidrológicas que conducen a la saturación de las áreas y reducción de la estabilidad de la ladera. En las laderas sobre las rocas meteorizadas es necesario proponer el sistema de drenaje adecuado para evitar saturación del suelo.



Fig. 4 Las rocas de formación Bálsamo meteorizadas hasta suelo laterítico



Fig. 5 Flujo de lava andesítica meteorizada, formación Bálsamo

Región de lavas y brechas volcánicas rocosas

Esta región representa un ambiente con rocas resistentes, con meteorización baja hasta media. Las rocas están formadas por un complejo de flujo de lava y brechas volcánicas. El espesor de la litología puede ser muy variable desde pocos decímetros hasta algunas decenas de metros.

Los flujos de lava van de las rocas masivas hasta laminadas que generalmente tienen resistencia alta. La estabilidad puede verse reducida por meteorización local, especialmente en áreas marginales de los flujos. Las brechas de lava tienen un grado de resistencia alta o media, son menos resistentes que los flujos de lava. En general, las rocas se ven afectadas por fracturas, como las zonas de fallas tectónicas en la zona del volcán San Jacinto. Estos sectores representan zonas de debilidad de resistencia reducida y zonas de recarga, las cuales pueden estar saturadas por agua subterránea.

En los escarpes importantes las rocas de esta región crean afloramientos donde podrían iniciarse movimientos de ladera. La amenaza de los derrumbes es más alta en las partes fracturadas, afectadas por meteorización y horizontes formados por brechas de lava.

Recomendaciones:

- Durante los estudios geotécnicos se necesita tomar en cuenta los cambios litológicos entre lavas y brechas, que representan material con resistividad un poco diferente.

- Es necesario aumentar la atención en las zonas cerca de las fallas, donde las rocas son intensivamente fracturadas y más débiles. Estas zonas pueden estar saturadas por agua subterránea.
- En casos de afloramientos sobre de infraestructura y viviendas, se recomienda prestar atención a las zonas meteorizadas y fracturadas, donde el material es más suelto. Monitoreo continuo de estas áreas y eliminación de vegetación, cuyas raíces rompen el macizo rocoso pueden prevenir el daño causado por los derrumbes potenciales.
- En los afloramientos inestables en áreas estratégicas importantes son recomendables estudios a más detalle y obras de mitigación.



Fig. 6 Ejemplo de brecha basáltica no meteorizada



Fig. 7 Flujo de lava cubierto por sedimentos coluviales

La región de lavas y brechas volcánicas rocosas cubiertas por tefras no consolidadas hasta débilmente consolidadas contiene dos unidades diferentes. El basamento está formado por rocas de flujos de lavas y brechas volcánicas, cuyas propiedades son idénticas a la *región de lavas y brechas volcánicas*. Estas rocas son cubiertas por un complejo de tefras con intercalaciones subordinadas de escorias con espesor muy variable desde metros hasta decenas de metros y horizontes de paleosuelo. La cobertura de las tefras tiene una estabilidad de mediana hasta baja, con compresibilidad intermedia hasta alta, con carácter de suelo que puede ser inestable, los sectores de paleosuelos pueden ser plásticos. La cobertura de piroclastos tiene una permeabilidad muy variable. Las tefras son semipermeables, pero las capas de escorias horizontales tienen permeabilidad mayor, lo que puede causar un flujo horizontal de agua subterránea.

En el material de escorias y tefras no consolidadas se pueden desarrollar los derrumbes y movimientos de ladera de menor tamaño en las excavaciones verticales. El material es fácilmente erosionable, durante la época de lluvias se puede esperar la erosión intensa a lo largo de sistema de drenaje y en las laderas inclinadas sin cobertura vegetal.

- Los estudios e investigaciones deben prestar atención al nivel de espesor del complejo de cobertura de las tefras, presencia de las intercalaciones de escorias, que son más permeables y horizontes de paleosuelos con plasticidad que podría ser alta.
- En los contactos de suelo con propiedades geotécnicas bastante diferentes se puede esperar condiciones menos adecuadas. En el contacto de cobertura de las tefras con lavas y brechas volcánicas se recomienda observar nivel de meteorización, de fracturación y de basamento. Estas zonas pueden estar saturadas por agua subterránea.
- En las laderas se recomienda evitar hacer excavaciones muy profundas y verticales, la estabilidad en las tefras no consolidadas se mantiene hasta una inclinación de 45 grados (pero es necesario evaluar cada caso siempre).
- Hay que tomar en consideración la erosión intensa y el sistema de drenaje del terreno. Para disminuir la erosión fluvial, mantener y recuperar la vegetación nativa es recomendable, ya que puede ayudar a que se mantenga equilibrio.
- No se recomienda ubicar las construcciones en el margen superior sobre las laderas/taludes inestables. Es recomendable evitar intervenciones que puedan modificar las condiciones hidrológicas que pueden provocar la saturación de las áreas y reducción de la estabilidad de la ladera.
- En las laderas sobre las rocas meteorizadas es necesario proponer el sistema de drenaje adecuado para evitar saturación del suelo.

Región de alternación de las lavas y rocas piroclásticas, está caracterizado por las alternaciones constantes de dos litologías: flujos de lava, que representan rocas sólidas y resistentes con estabilidad alta y piroclásticos rocosas hasta semi-rocosa con estabilidad alta hasta media. La lava generalmente es estable, mientras los productos piroclásticos pueden estar localmente meteorizados e inestables. La permeabilidad de las rocas es baja en general, sin embargo, se ven afectadas por fracturas, que podrían estar relacionadas a zonas de fallas tectónicas donde la fracturación de las rocas es alta. En los escarpes importantes

las rocas crean afloramientos, las cuales pueden ser sujeto de derrumbes. La amenaza de los derrumbes es más alta en las partes fracturadas y afectadas por la meteorización.

Recomendaciones:

- Es necesario incrementar la atención en las zonas cerca de fallas, donde las rocas son intensivamente fracturadas y más débiles. Estas zonas pueden estar saturadas por agua subterránea.
- En los afloramientos sobre infraestructura y viviendas, se recomienda prestar atención a las zonas meteorizadas y fracturadas, donde el material es más suelto.
- Un monitoreo continuo puede prevenir daños, los arboles cuyas raíces rompen el macizo rocoso pueden causar problemas por derrumbes potenciales.
- En los afloramientos inestables en áreas importantes se recomienda estudios a mayor detalle y obras de mitigación.

La región de alternancia de lavas y rocas piroclásticas cubiertas por tefras no consolidadas hasta débilmente consolidadas contienen dos unidades diferentes. El basamento está formado por las alternaciones de dos tipos litológicos: uno son las lavas, que representan rocas sólidas y resistentes con estabilidad alta y el segundo son los estratos piroclásticos rocosos hasta semi-rocosos con estabilidad alta hasta media. La cubierta está conformada por un complejo de tefras con intercalaciones subordinadas de escorias, con un espesor muy variable desde metros hasta decenas de metros y horizontes de paleosuelo. Las coberturas de las tefras tienen resistencia mediana hasta baja y compresibilidad media hasta alta, con carácter de suelo inestable. Los sectores de los paleosuelos pueden ser plásticos. La cobertura tiene una permeabilidad muy variable. Las tefras son semipermeables, pero las capas de escorias horizontales tienen permeabilidad mayor, lo que puede provocar flujo horizontal de agua subterránea. En el material de escorias y tefras no consolidadas pueden iniciarse derrumbes y movimiento de laderas de tamaños menores en las excavaciones verticales. El material es fácilmente erosionable, durante la época de lluvias, donde se puede esperar erosión intensa a lo largo de sistema de drenaje y en las laderas inclinadas sin cobertura vegetal.



Fig. 8 Complejo estratovolcánico con alternación de las lavas y flujos piroclásticos de la zona interior proximal del volcán Antiguo San Salvador



Fig. 9 Brecha cinerítica en bloques de flujos de deyección andesíticos en la zona interior proximal del volcán Antiguo San Salvador

Recomendaciones:

- Los estudios e investigaciones deben prestar atención al espesor de la cobertura por complejo de las tefras y presencia de las intercalaciones de escorias, que son más permeables y horizontes de paleosuelos con plasticidad alta.
- En los contactos de capas con propiedades geotécnicas muy diferentes se pueden esperar las condiciones menos adecuadas. En el contacto de cobertura de las tefras con basamento se recomienda observar el nivel de meteorización, fracturación y de basamento. Estas zonas pueden estar saturadas por agua subterránea.
- En las laderas se recomienda evitar hacer excavaciones muy profundas y verticales, la estabilidad en las tefras no consolidadas se mantiene hasta una inclinación de 45 grados (pero es necesario evaluar cada caso siempre).
- Para disminuir la erosión fluvial, mantener y recuperar la vegetación nativa es recomendable, ya que puede ayudar a que se mantenga equilibrio.
- No se recomienda ubicar las construcciones en el margen superior de las laderas inestables, es recomendable evitar intervenciones que puedan modificar las condiciones hidrológicas que conducen a la saturación de las áreas y reducción de la estabilidad de la ladera/talud. En las laderas/taludes es necesario proponer un sistema de drenaje adecuado para evitar la saturación del suelo.

Región de tefras débilmente consolidadas incluye las tobas de color de café y tefras *riolíticas de horizontes TB-4 hasta TB-2*. Las tobas de color de café están compuestas por un complejo de tefras de grano fino, de espesor hasta decenas de metros. Dentro de la sucesión de las tefras se encuentran capas subordinadas de las escorias con espesor de decímetros hasta 2 metros. Para el horizonte de Tierra Blanca 4 (TB4) son característicos los depósitos de pómez con pómez angular, que representan un tipo transitorio de facie entre los piroclastos de caída y los flujos piroclásticos. Para el horizonte Tierra Blanca 3 (TB3) es característica la variación de sedimentos, flujos de pómez de grano relativamente grueso, de espesor hasta 1 m, variablemente con depósitos de pómez de caída y de grano fino con lapilli acrecionales. En el horizonte Tierra Blanca 2 (TB2) hay una mayor representación de pómez más gruesos, las cuales desde el punto de vista facial representan piroclastos de caída con paso a flujos piroclásticos. En la región son también incluidas los materiales retransportados, que son de color claro hasta marrón claro. La pómez o ceniza participa en su composición, los fragmentos líticos de composición dacítica y andesítica en cantidad de hasta un 40%. Hay estratos finos de material de alrededor de 0.5 – 1.5 cm, esporádicamente de más, con estratos aún más finos. Localmente se puede observar cortes erosivos en algunos estratos, sobre todo de depósitos más finos que sufrieron una deformación plástica.

Generalmente las tefras están débilmente consolidadas y tienen carácter del suelo inestable con grado de resistencia mediana hasta baja, con compresibilidad intermedia hasta alta. Dentro de la sucesión hay horizontes de paleosuelo con mayor proporción de minerales arcillosos y con mayor plasticidad. Por otro lado, las capas de escoria tienen coherencia menor y forman las partes más sueltas. La permeabilidad es muy variable. Las tefras son semipermeables, pero las capas de escorias producen una permeabilidad mayor con movimiento horizontal. En las superficies planas, la región de tefras débilmente consolidadas pueden representar un suelo con condiciones adecuadas para la construcción. El material puede ser fácilmente erosionable. Durante la época de lluvias se puede esperar la erosión sobre las laderas con el material y ocurrencia de flujos. En las excavaciones verticales se pueden formar pequeños derrumbes y movimientos de ladera. El factor negativo que contribuye a la aparición de la erosión, flujos y deslizamientos es la saturación del suelo y ausencia de cubierta vegetal.

Recomendaciones:

- Los estudios e investigaciones deben prestar atención al nivel de espesor de la cobertura de tefras, presencia de intercalaciones de escorias con movimiento horizontal, horizontes de paleosuelos con plasticidad alta, que pueden representar un factor negativo para la estabilidad de las laderas/taludes.

- En las laderas se recomienda evitar hacer excavaciones muy profundas y verticales, la estabilidad en las tefras no consolidadas se mantiene hasta una inclinación de 45 grados (pero es necesario evaluar cada caso siempre).
- Hay que tomar en consideración la erosión intensa y el sistema de drenaje del terreno. Para disminuir la erosión fluvial, mantener y recuperar la vegetación nativa es recomendable, ya que puede ayudar a que se mantenga equilibrio.
- No se recomienda ubicar las construcciones en el margen superior de laderas inestables, es recomendable evitar intervenciones que puedan modificar las condiciones hidrológicas que provoquen la saturación de las áreas y reducción de la estabilidad de laderas/taludes. En caso de intervención y construcción es necesario proponer un sistema de drenaje adecuado para evitar saturación del suelo.



Fig. 10 Afloramiento de tobas de color café de grano fino (en parte superior) con la intercalaciones de escoria horizontalmente estratificada (en parte inferior)



Fig. 11 Detalle de las escorias con estratificación subhorizontal

Región de escorias representa las acumulaciones de escoria semirocosa con alta permeabilidad, con estabilidad media y con compresibilidad intermedia hasta baja. En las zonas planas representan una región de suelo con las condiciones adecuadas para las construcciones (corroborar siempre con estudios). En algunos afloramientos, el material de las escorias es flojo y pueden ser susceptible a derrumbes.

Recomendaciones:

- La ocurrencia de las escorias está asociada con flujos de lavas. Durante los estudios geotécnicos se necesitan tomar en cuenta los cambios litológicos entre escoria y otros tipos litológicos con propiedades geotécnicas diferentes.
- En el caso de taludes o excavaciones profundas y verticales sobre la infraestructura y las viviendas, se recomienda prestar atención por amenazas de derrumbes. En zonas inestables se recomienda monitoreo continuo para prevenir daños.
- Esta región puede representar una zona de infiltración de agua subterránea, durante las investigaciones se necesita conocer las condiciones hidrogeológicas y evitar intervenciones que puedan influir en la calidad del agua subterránea.



Fig. 12 Afloramiento de escoria estratificada

Región de tefras riolíticas no consolidadas contiene una secuencia de tefras, conocidas como Tierra Blanca. La consistencia de las tefras es suficiente para formar taludes verticales en los cañones, asociado a una cohesión aparente (suelos parcialmente

saturados). Las tefras riolíticas son mayormente permeables e inestables, con baja estabilidad. La región, sin las debidas consideraciones, presenta condiciones que pueden ser inadecuadas para las construcciones El material es fácilmente erosionable. En los sectores donde hay mayor espesor se puede formar erosión retrógrada, profundos cañones y la superficie se transforma al relieve tipo *badland*. Debido al impacto de la erosión, los sistemas de drenaje actuales pueden extenderse lateralmente y profundizarse, se pueden formar nuevos barrancos y debido a la erosión lateral pueden ocurrir derrumbes en la orilla. En casos extremos puede transformarse todo el relieve. La erosión vertical de drenaje vertical es acompañada con erosión lateral y deslizamientos, que se forman en casos donde las tefras yacen en lateritas o en tobas meteorizadas más antiguas. Otro proceso muy peligroso es la erosión subterránea (piping) con hundimiento y colapsos gravitacionales de la superficie. Debido a los procesos erosionales, pueden ocurrir numerosos daños sobre todo en la infraestructura.

Recomendaciones:

- Los estudios e investigaciones deben prestar atención al nivel de espesor de la secuencia de las tefras y presencia de intercalaciones horizontales (paleosuelos) con plasticidad más alta, que representan un factor negativo para la estabilidad de las laderas.
- Debido a posibilidad de ocurrencia de erosión subterránea se recomienda antes de construir infraestructura o intervenciones, valorar la realización de investigación geofísica, por ejemplo, georadar (ground penetrating tomography) para identificar posibles cavernas o flujos preferentes de agua subterránea.
- Hay que tomar en consideración la intensa erosión y el sistema de drenaje del terreno. Para disminuir la erosión fluvial mantener y recuperar la vegetación nativa es recomendable, ya que puede ayudar a que se mantenga equilibrio, además de otras estrategias para controlar la erosión.
- No ubicar las construcciones en el margen de las planicies o escarpes, cerca de barrancos erosionales y en los márgenes de badland, ya que, en el futuro, estos sitios también pueden tener problemas por los procesos de la erosión.
- Para las construcción de sistema de tuberías hay que tomar en consideración la intensa erosión y el sistema de drenaje del terreno. Los puentes y alcantarillas deben ser diseñados para un caudal máximo y considerar la erosión vertical, horizontal y retrógrada. Hay que evitar cambiar el perfil del río/quebrada y las descargas a su lecho deben considerar posibles cambios de altura en ríos/quebradas.



Fig. 13 Secuencia de tobas Tierra Blanca en la parte central de la ciudad (SS-370 Rio Acelhuate)



Fig. 14 Secuencia de tobas Tierra Blanca cerca del colonia Santa Lucia con una morfología típica tipo “badland“ (SS-374 al sur de Santa Lucia)

Región de tobas y escorias consolidadas están representadas especialmente por una sucesión de tobas de grano fino y sin estratificación interna, con intercalaciones subordinadas de escorias y flujos piroclásticos con alta proporción de pómez y granulometría relativamente más gruesa, con espesor de decímetros hasta algunos metros. Las tobas medianamente consolidadas tienen carácter de suelo inestable con grado de estabilidad mediana. La sucesión de tobas y escorias es afectada por fracturas tectónicas y se puede encontrar horizontes meteorizados, de paleosuelo o sectores alterados hidrotermalmente con una mayor proporción de minerales arcillosos y con mayor plasticidad. La permeabilidad de las rocas es muy variable. Las tobas finas son prácticamente impermeables, pero las capas de escorias y flujos piroclásticos de grano grueso producen una permeabilidad mayor con infiltración horizontal. En las superficies planas, la región puede representar un suelo con condiciones adecuadas para la construcción. La consistencia de las rocas es suficiente para formar taludes verticales en general. Las zonas de fallas tectónicas donde hay fracturación intensa, representan zonas de debilidad y saturación de suelo. En las zonas de laderas ocurren procesos dinámicos como erosión superficial y deslizamientos que limitan la conveniencia de las construcciones. La estabilidad de las laderas puede disminuirse por la saturación del suelo por el agua, por plasticidad y expansión de los minerales de arcilla, especialmente en las zonas de fallamiento tectónico.

Recomendaciones:

- Es necesario prestar atención en las zonas cercanas a las fallas, donde las rocas están intensamente fracturadas. Estas zonas pueden estar saturadas por el agua subterránea y representan zonas de debilidad con mayor amenaza de deslizamientos. Además, los horizontes de paleosuelos o sectores alterados con plasticidad alta, representan un factor negativo para la estabilidad de las laderas.
- Los estudios e investigaciones deben prestar atención al espesor de la cobertura de las tobas, presencia de las intercalaciones de escorias con infiltración horizontal y permeabilidad alta
- En las laderas se recomienda evitar hacer excavaciones muy profundas y verticales, para no disminuir la estabilidad
- No se recomienda ubicar construcciones en el margen superior de laderas inestables, es recomendable evitar intervenciones que puedan modificar las condiciones hidrológicas que produzcan la saturación de las áreas y reducción la estabilidad de ladera. En caso de intervención y construcción es necesario proponer un sistema de drenaje adecuado para evitar saturación del suelo.
- Se pueden considerar, que las áreas adecuadas para las construcciones son zonas planas de superficie, se recomienda evitar las zonas de laderas erosionales, donde ocurren los procesos de erosión y movimiento de ladera.



Fig. 15 La secuencia de las tobas y flujos piroclásticos consolidados de la formación Cuscatlán



Fig. 16 Deslizamiento poligenético en las tobas de la formación Cuscatlán

Región de lavas basálticas/andesíticas y brechas volcánicas medianamente meteorizadas, representan un ambiente con rocas relativamente resistentes, con meteorización intermedia. Las rocas están formadas por un complejo de flujos de lava y brechas volcánicas. El espesor de las capas litológicas puede ser muy variable desde pocos decímetros hasta algunas decenas de metros. Los flujos de lava de rocas masivas tienen una resistencia mediana. La resistencia puede ser reducida en las partes marginales de los flujos de lava. En general, las rocas se ven afectadas por fracturas, en las zonas de fallas tectónicas. Las lavas y brechas son casi incompresibles, poco inestables y con permeabilidad baja. En las zonas de fallas tectónicas o fracturación las rocas son afectadas por densidad de grietas y alteración. Eso causa, que en estas zonas las rocas son un poco más débiles y sueltas, con una permeabilidad mayor. En los escarpes significativos las rocas de esta región crean afloramientos donde pueden ocurrir derrumbes. La amenaza de los derrumbes es más alta en las partes fracturadas y en las partes formadas por brechas de lava.

Recomendaciones:

- Durante los estudios geotécnicos se necesita tener en cuenta las transiciones litológicas entre lavas, brechas y en las zonas cerca de las fallas, donde las rocas pueden estar intensamente fracturadas y más débiles. Estas zonas pueden estar saturadas por agua subterránea.
- En casos de afloramientos de esta región, sobre infraestructura y viviendas, se recomienda prestar atención a las zonas meteorizadas y fracturadas, donde el material es más suelto. Además, se recomienda el monitoreo continuo de estas áreas y eliminación de vegetación cuyas raíces pueden romper el macizo rocoso para prevenir el daño causado por derrumbes potenciales.
- En los sectores inestables en áreas importantes, son recomendables estudios a más detalle y obras de mitigación.



Fig. 17 Los bloques de lavas basálticas medianamente meteorizadas.

Región de tobas Freatomagmáticas en Superficie

Corresponde con tobas estratificadas, de grano medio hasta fino con el horizonte subyacente de escorias de espesor de algunos metros. Por sus características geotécnicas las acumulaciones freatomagmática representan un ambiente muy heterogéneo. Las partes bien cementadas tienen estabilidad mediana hasta alta y se forman taludes verticales. Las partes sin cementación son frágiles, con estabilidad baja. La estratigrafía está a veces afectada por fracturas. Pequeños derrumbes se pueden observar en los taludes verticales. La permeabilidad de acumulaciones de flujos freatomagmáticos es alta pudiéndose moverse el agua de manera horizontal.



Fig. 18 El cono/anillo de escoria del maar – facie proximal de los piroclastos freatomagmáticos (Plan de Laguna)



Fig. 19 Las tobas freatomagmáticas horizontalmente estratificadas

Recomendaciones:

- En los casos de taludes o excavaciones profundas y verticales sobre infraestructura y viviendas, se recomienda prestar atención por amenaza de derrumbes. En las zonas inestables se recomienda monitoreo continuo para prevenir daños.
- La región representa posible zona de infiltración de agua subterránea, durante las investigaciones se necesita investigar las condiciones hidrogeológicas, posiblemente agua se mueva de manera horizontal.

Región de acumulaciones de flujos antiguos con distribución caótica de bloques, arenas y finos que afloran en las quebradas erosionales al pie de laderas estructurales del volcán Picacho y representan las acumulaciones de flujos de escombros. Las acumulaciones están conformadas de suelos arenoso-arcillosos, bloques angulares y subangulares desde decímetros hasta algunos metros. Los depósitos tienen permeabilidad mediana hasta alta, durante la época de lluvias pueden estar saturadas por agua subterránea. Los depósitos pueden ser inestables. Sin embargo, los grandes bloques de rocas resistentes pueden causar dificultades durante las operaciones de excavación y perforación. Las acumulaciones son débilmente consolidadas y con alguna plasticidad. Estas propiedades pueden propiciar condiciones favorables para el desarrollo de deslizamientos, flujos y erosión superficial. En general esta región no tiene condiciones adecuadas para construcciones.

Recomendaciones

- Los estudios e investigaciones deben prestar atención al nivel de espesor de las acumulaciones, su litología, que puede ser muy variable además de la presencia y nivel de saturación del suelo.
- En las laderas no se recomienda hacer excavaciones muy profundas y verticales, para evitar la pérdida de la estabilidad de la ladera. El material poco consolidado y saturado puede perder su estabilidad.
- No se recomienda ubicar construcciones sobre laderas inestables, Es recomendable evitar intervenciones que puedan modificar las condiciones hidrológicas que produzcan saturación y reducción de la estabilidad de la ladera. En las laderas es necesario proponer un sistema de drenaje adecuado para evitar la saturación del suelo.

- Para disminuir la erosión fluvial, mantener y recuperar la vegetación nativa es recomendable, ya que puede ayudar a que se mantenga equilibrio.

Región de Depositos Fluviales

La región de depositos fluviales está relacionada con los ríos principales. Desde el punto de vista litológico se trata de una región formada sobre todo por gravas, arenas de grano medio y fino, hasta suelos arenosos y arcillosos. Debido al desarrollo dinámico del sistema fluvial del río, las rocas demuestran una alta heterogeneidad y así la estratificación litológica es bastante variable. La región se caracteriza por procesos geodinámicos relacionados con las inundaciones. Los caudales mayores de los ríos están acompañados por la erosión lateral y colapsos de la orilla, cambios de cursos de los cauces y la acumulación de sedimentos en forma de bancos arenosos. La litología en las llanuras es poco homogénea, en tanto mayor presencia de sedimentos más finos, es mayor su inestabilidad, siendo muy compresible. Los sedimentos tienen una consistencia suelta, El nivel del agua subterránea varía dependiendo de las precipitaciones y de los caudales en el río, generalmente está a pocos metros de superficie, pero durante las precipitaciones intensas puede llegar hasta el nivel de la superficie del terreno. Las condiciones en esta región no son adecuadas para las construcciones debido a las propiedades geotécnicas del suelo, impacto de inundaciones y nivel de agua subterránea.

Recomendaciones:

- Durante la construcción de puentes por encima de los cauces hay que tomar en consideración que las construcciones tengan una capacidad suficiente para los caudales máximos.
- Las llanuras son zonas con impacto debido a inundaciones y otros procesos superficiales relacionados.
- Para un aprovechamiento más efectivo del área y minimización de los riesgos, así como pérdidas económicas se necesita un tratamiento sistemático en la planificación territorial. Para las propuestas de medidas de mitigación, que puedan disminuir el impacto de las inundaciones se necesita un conocimiento profundo del sistema fluvial con topografía detallada y reciente, que permita investigaciones necesarias (geológicas, geomorfológicas, hidrológicas) de alta calidad. Hay que tomar en consideración la heterogeneidad del suelo y el nivel freático del agua subterránea.



Fig. 20 Los sedimentos fluviales de arena con fragmentos de pomez resedimentada.



Fig. 21 Cauce aluvial con acumulaciones de arena y erosión lateral de orillas formadas por tefras riolíticas no consolidadas.

Región de acumulaciones no consolidadas de conos aluviales, está formada en su mayoría por acumulaciones de arenas y gravas clásticas no consolidadas, localmente con bloques de rocas. Está caracterizada por diversidad de granulometría. La estabilidad del suelo no es muy buena, los sedimentos tienen una consistencia suelta, con compresibilidad mediana, estabilidad baja y permeabilidad alta, pueden ser saturados por agua subterránea. La conveniencia para la construcción está limitada por el riesgo de los procesos superficiales (acumulación de sedimentos, flujos e inundaciones). Durante la mayor parte del tiempo hay pocos procesos de riesgo naturales. Sin embargo, durante un periodo de lluvias intensas, los conos aluviales son zonas de impacto de flujos con rápida depositación, así como erosión retrógrada, lateral e inundación a lo largo de los cauces.

Recomendaciones:

- Durante la construcción de puentes por encima de los cauces hay que tomar en consideración que las construcciones tengan una capacidad suficiente para los caudales máximos y posible movimiento o traslado de cauce.
- Los conos son zonas de procesos superficiales como acumulación del material, inundación y erosión. Las zonas de los conos aluviales no son adecuadas para la construcción y en el caso de planificación de construcciones lineales (tuberías) es mejor evitar estas zonas.

- Para un aprovechamiento más efectivo del área, minimización de los riesgos y pérdidas económicas se necesita un tratamiento sistemático en la planificación territorial. Para las propuestas de las medidas de mitigación, que podrían disminuir el impacto de las inundaciones se necesita un conocimiento profundo del sistema fluvial con topografía detallada y reciente, que permite investigaciones necesarias (geológicas, geomorfológicas, hidrológicas) de alta calidad. Hay que tomar en consideración la heterogeneidad del suelo y nivel freático del agua subterránea

Región de los sedimentos no consolidados en depresiones tectónicas y volcánicas, contiene sedimentos débilmente hasta mediamente consolidados con heterogeneidad litológica muy amplia desde acumulaciones de fino grano (arcillo-arenoso) hasta acumulaciones de grava. Los sedimentos tienen una consistencia suelta, con compresibilidad mediana, estabilidad baja y permeabilidad alta, que pueden ser saturados por agua subterránea. Los sedimentos son vulnerables por la erosión superficial y subterránea.

Recomendaciones:

- Los estudios e investigaciones deben prestar atención al nivel de espesor de las acumulaciones, su litología, que puede ser muy variable, presencia y nivel de saturación del suelo.
- Debido a posibilidad de ocurrencia de erosión subterránea se recomienda antes de construir infraestructura o intervenciones, valorar realizar una investigación geofísica por ejemplo georadar (ground penetrating tomography) para identificar posibles cavernas o flujos preferentes de agua subterránea.
- Hay que tomar en consideración la intensa erosión y el sistema de drenaje del terreno. Para disminuir la velocidad de escorrentía y desacelerar la erosión se recomienda hacer uso de vegetación nativa.
- No ubicar las construcciones en el margen de las planicies o escarpes, cerca de barrancos erosionales y en los márgenes de badland, en el futuro, estos sitios también pueden ser dañados por los procesos de erosión.

Recomendaciones generales

Durante el mapeo geológico, se han identificado regiones individuales que tienen diferentes aptitudes para el desarrollo y condiciones para construcciones. Sin embargo, se debe realizar un estudio ingeniero-geológico detallado antes de cualquier intervención en el cada sector, incluso cuando las condiciones geológicas y geomorfológicas sean favorables. Estas condiciones pueden ser agravadas por varios factores locales, por ejemplo, niveles de agua subterránea, alteraciones hidrotermales, etc.

Durante los estudios ingeniero-geológicos en áreas con condiciones geológicas y geomorfológicas menos favorables, los estudios deben centrarse en características regionales específicas. En las regiones rocosas, es especialmente la fracturación de las rocas (discontinuidades) lo que puede causar la disminución de las propiedades geotécnicas del suelo a nivel local, además estas estructuras representan zonas de infiltración de agua. En los afloramientos rocosos, las zonas fracturadas y localmente meteorizadas podrían verse afectadas por derrumbes. En estas zonas se recomienda un monitoreo continuo de las áreas sueltas.

Las regiones semi-rocosas y de suelo presentan alta vulnerabilidad por la erosión y a los movimientos de ladera. Se debe tener cuidado aquí para evitar que la escorrentía superficial intensa cause erosión de la superficie (por ejemplo, por la deforestación de laderas o construcciones de pequeños rellenos o diques en las quebradas). Particularmente problemáticas para las construcciones son las laderas erosionales de regiones de rocas volcánicas meteorizadas, las regiones con cubierta de tobas y regiones de acumulaciones de flujos antiguos. Las peores propiedades son reportadas para la región de tefras ríolíticas no consolidadas de la Tierra Blanca Joven. Estas tefras forman extensos sectores tipo badland con alta intensidad de erosión superficial y movimientos de ladera. La erosión subterránea es también común.

En las laderas de erosión es deseable evitar su saturación, ya que conduce a una disminución de la estabilidad, además no se recomienda excavaciones profundas y verticales, especialmente al pie de las laderas. En general, las laderas no tienen que ser muy inclinadas. Las excavaciones y cortes deben ser estabilizadas por la vegetación nativa (o mejor dejar vegetación nativa existente) y con un sistema de drenaje apropiado. Su estabilidad se puede aumentar construyendo terrazas. Tampoco se recomienda depositar rellenos antropicos en los bordes de las laderas y, por lo tanto, incrementar peligrosidad.

En la construcción de carreteras y urbanizaciones, se deben tener en cuenta las condiciones geomorfológicas locales y el sistema de drenaje natural en el área. Los puentes y

alcantarillas no deben ser un obstáculo para el drenaje de la superficie y se deben dimensionar para tomar en cuenta los caudales máximos. También es valorar en cada caso, eliminar regularmente los aluviones o depositos acumulados debajo de los puentes, bovedas y alcantarillas para mantener su capacidad.

Se recomienda valorar con mucho cuidado rellenar los valles y barrancos con depositos antrópicos y luego urbanizar su superficie. Generamente el material artificial no está lo suficientemente compactado o el agua crea afecciones y, por lo tanto, a menudo se colapsa. También puede ocurrir erosión subterránea a lo largo de los cursos de drenajes originales, lo que podría ocasionar subsidencia en la superficie, formación de “carcavas” y daños a los edificios. Además, no es recomendable colocar edificaciones en la parte superior de laderas inestables. Estas laderas pueden verse afectadas o impactadas por la erosión superficial, subsuperficial y movimientos de ladera que también pueden afectar estas construcciones.

Las regiones de depositos aluviales y conos aluviales no son adecuadas para la urbanización, ya que son zonas que se encuentran repetidamente afectadas por inundaciones, erosión lateral y vertical, o acumulación de material. Además, los fondos de las quebradas son completamente inadecuadas para su desarrollo urbanístico u ocupación. Las quebradas o los barrancos se pueden activar durante las inundaciones o lluvias fuertes, en estas estructuras también se movilizan las trayectorias de los flujos de escombros.

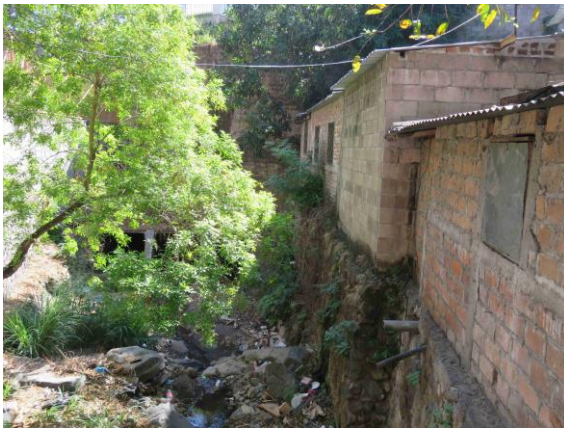


Fig 22:Urbanización en el fondo de quebrada, que puede ser inundada o afectada por flujos de escombros



Fig 23: Tubería con la capacidad reducida por acumulación del material.



Fig 24: Muro de contención diseñado inadecuadamente con grietas debido a inestabilidad del suelo.



Fig 25: Tubería de desagüe que termina sobre ladera inestable.

Recomendaciones para las investigaciones en futuro

Para el desarrollo sostenible del Área Metropolitana y la reducción del impacto negativo de los peligros naturales, es necesario tener los datos adecuados que permitan elaborar estudios de alta calidad y tomar decisiones en las áreas de ordenamiento territorial, recursos hídricos, gestión de riesgos, defensa civil y protección ambiental. Un problema importante en la prevención y el manejo de los peligros naturales es que faltan los datos básicos disponibles que permitan la predicción efectiva de los procesos peligrosos. La mayoría de las actividades o acciones que se realizan actualmente se tratan como una respuesta a un evento en particular donde se abordan principalmente las consecuencias del desastre y la eliminación de daños.

Un factor clave que limita la calidad de la evaluación de vulnerabilidad a los peligros naturales y la gestión de los peligros naturales es también la falta de capacitación de las personas responsables. Esta deficiencia se manifiesta por intervenciones inapropiadas en sectores durante la construcción de edificios, infraestructura y su planeamiento de las medidas correctivas. Estas actividades a menudo se llevan a cabo independientemente de los procesos naturales que afectan el sitio y que, en algunas circunstancias, se manifiestan como peligros naturales con un impacto desastroso para los humanos y sus actividades.

Otro problema muy importante de la gestión de riesgos naturales es la falta de datos topográficos que impide una documentación precisa de los planes de emergencia, los mapas

de riesgos, los modelos hidráulicos para la previsión de inundaciones y deslizamientos, los modelos hidráulicos para los sistemas de alerta y muchas otras aplicaciones necesarias para la gestión eficaz de los peligros naturales. Uno de los supuestos básicos es la calidad de los datos topográficos. Una de las tecnologías más apropiadas para el Área Metropolitana de San Salvador es la adquisición de datos utilizando la tecnología LIDAR que permite obtener los datos topográficos muy detallados con la precisión alta (hasta cm). Los Modelos Digitales de Elevación derivados desde datos de LIDAR son necesarios para los estudios geológicos y geomorfológicos. Los datos permiten identificar precisamente las zonas de deslizamientos, derrumbes activos, fósiles, flujos, zonas de erosión y estructura de fallas geológicas. Además, sirven para el estudio de los sistemas fluviales, zonificación de las áreas inundables y planes de cuencas.

La base para una protección efectiva contra los peligros naturales es el conocimiento perfecto del terreno y los procesos que lo conforman. Una herramienta efectiva para analizar la vulnerabilidad del paisaje por peligros naturales es el análisis geomorfológico del terreno y el mapeo ingeniería geológica. El conocimiento de geomorfología y geología es un pre requisito básico para la planificación del uso del suelo, la planificación de estructuras de líneas (autopistas, ferrocarriles), depósitos de agua, depósitos de residuos superficiales y subsuperficiales. Desempeña un papel importante en la construcción de acciones correctivas para eliminar los problemas actuales.

Los mapas de escala 1:50,000 proporcionan información básica y generalizada. Para las necesidades de desarrollo de la ciudad, es necesario continuar creando bases de mapas detallados en la escala 1: 10,000, que puedan alcanzar una gama más amplia de fenómenos geológicos y geomorfológicos y mejorar significativamente la información sobre la situación en las zonas de interés. El mapeo detallado debe complementarse con la perforación y las pruebas geotécnicas de roca/suelo.

Se requiere monitoreo continuo en zonas problemáticas. Además del reconocimiento de campo, las tecnologías UAV (aviones no tripulados) se pueden usar para monitorear los procesos geodinámicos como movimientos de ladera, la erosión etc. También es apropiado utilizar los datos hidrogeológicos e hidrológicos para monitorear el nivel de agua subterránea y los caudales de los ríos.

Mapeo ingeniero-geológico en la escala 1:10 000

Este informe presenta los resultados del mapeo ingeniero-geológico, los mapas geomorfológicos y los mapas de peligrosidad por dinámica superficial en escala 1:10 000 para Santa Tecla y Carmen (que suman 10 km²). Para estas áreas se realizó un análisis de datos de archivo, interpretación geomorfológica de imágenes aéreas/drone, satelitales y trabajo de campo, incluyendo mapeo y documentación geológica.

Mapeo ingeniero-geológico en la escala 1:10 000 de la zona Santa Tecla

En la zona fueron identificado 7 regiones Ingeniero-geológicas con sus condiciones geológicas, geotécnicas y geomorfológicas propias.

El basamento del área está formado por **Rocas volcánicas fuertemente meteorizadas** de complejo de lava andesítica y brecha volcánica de grano muy grueso, que pertenece a la formación Bálsamo. Las rocas están mayormente afectadas por la meteorización intensa y tienen el carácter de rocas semi-rocosas hasta suelos con alta proporción de minerales arcillosos. Localmente los productos de meteorización corresponden a suelos lateríticos. El grado de meteorización más alto es en la parte norte del territorio en general, al sur el nivel de meteorización se reduce y localmente en la zona del sur donde se afloran las rocas mediamente meteorizadas con mayor resistencia. Los flujos de lava masivas son afectados por el sistema de grietas. La densidad de las grietas crece en las zonas de fallas tectónicas principales. Las zonas fracturadas representan áreas con mayor conductividad hidrogeológica. El alto nivel de meteorización y desprendimiento de las rocas causa, que condiciones ingeniero-geológicas sean desfavorables, las rocas tienen vulnerabilidad alta por procesos de movimiento de ladera en las zonas inclinadas. La estabilidad de las laderas puede verse reducidas durante la saturación del suelo por alta plasticidad y expansión de los minerales de arcilla. En las zonas de afloramientos de las rocas fracturadas se pueden esperar derrumbes del material flojo. Los deslizamientos activos fueron identificados en la zona de nueva urbanización (Vista Del Mar) (Fig. 33 y 34) en sur del área del estudio.

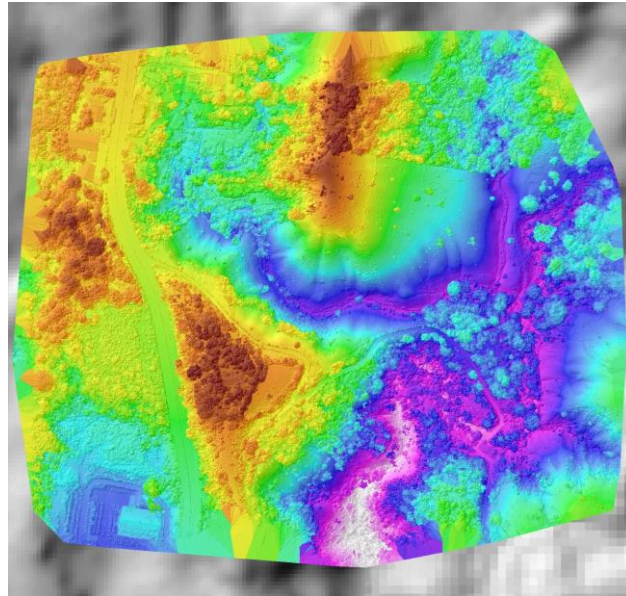


Fig. 33 Sector Norte de deslizamientos levantado con drone

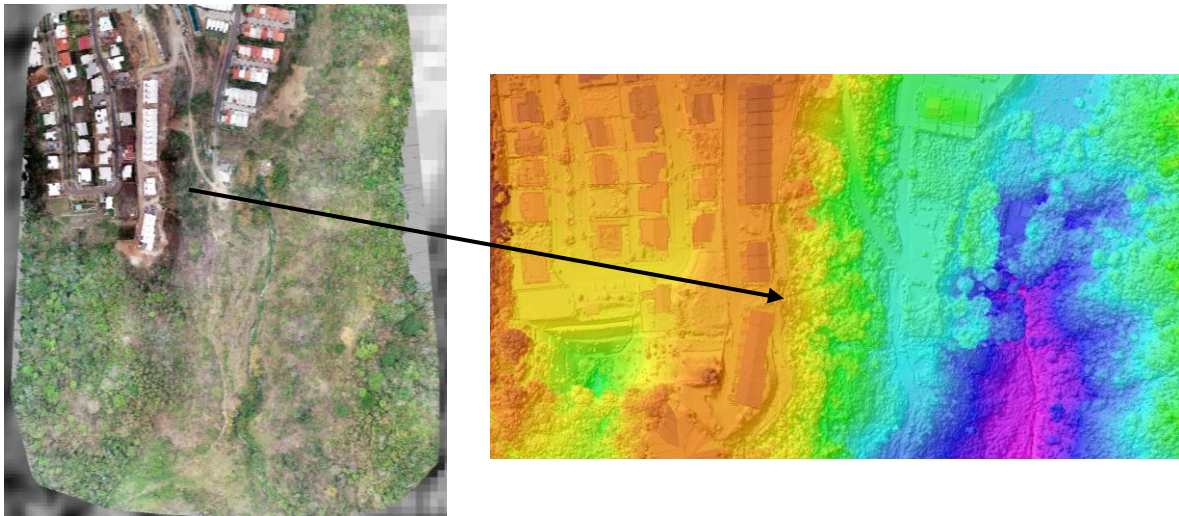


Fig. 34 Sector Sur de deslizamientos levantado con drone



Fig. 35 Sector de rocas meteorizadas

Región de las Tefras Semirocosas cubiertas por flujos freatomagmaticos Plan de la Laguna contiene dos formaciones principales:

Las Tobas color Café y los Flujos Freatomagmáticos *Plan de la Laguna*, que corresponden a tobas estratificadas, de grano medio hasta fino de la facie distal junto con el horizonte subyacente de escorias de espesor de primeros metros que cubre las tobas de grano fino (Tobas de color café). Por sus proporciones geotécnicas las acumulaciones freatomagmáticas representan un ambiente muy heterogéneo. Las partes bien cementadas son con firmeza mediana hasta alta, mediamente rompible y la consistencia permite formar las paredes y afloramientos verticales. Las partes sin cementación son muy inestables, con firmeza baja. La sucesión está afectada por las grietas tectónicas. Los pequeños derrumbes se pueden observar en las laderas verticales. La permeabilidad de acumulaciones de flujos freatomagmáticos es alta.

generalmente con firmeza y resistencia alta. La firmeza puede estar reducida por meteorización local. La permeabilidad de las rocas es mediana.



Fig. 37 Sector de ignimbritas rocosas

Región de Relleno Poligenético de las Depresiones Tectónicas contiene los sedimentos débilmente hasta mediamente consolidados con heterogeneidad litológica muy amplia desde acumulaciones de fino grano (arcillo-arenoso) hasta acumulaciones de grava. Los sedimentos tienen una consistencia suelta, con compresibilidad mediana, firmeza baja y permeabilidad alta, pueden ser saturados por agua subterránea. Los sedimentos son vulnerables por la erosión superficial y subterránea.

Región de las Quebradas con Relleno Grueso (Bloques de Rocas) y **Región de las Quebradas con Relleno Fino (Suelo y Arena)** están extendidos en las llanuras fluviales y forma rellenos de fondos de valles. Tienen carácter de acumulaciones de suelo arenoso, gravas no consolidadas con bloques de rocas con espesor irregular de decímetros hasta metros. Los sedimentos tienen una consistencia suelta, con compresibilidad mediana, firmeza baja y permeabilidad alta, pueden ser saturados por agua subterránea. Estas zonas no son adecuadas para la urbanización, por el riesgo de los procesos superficiales. Durante el período de lluvias intensas, los conos aluviales son zonas de impacto de flujos torrenciales con rápida redepositación de los sedimentos, la erosión retrógrada, lateral e inundación a lo largo de los cauces.



Fig. 38 Sector Quebradas con Relleno

Rellenos antrópicos

Es una práctica muy común en El Salvador es que antes de la construcción se realizan intervenciones en el terreno, incluido rellenar los valles y quebradas. Estos cambios significativos modifican las condiciones naturales, especialmente en geomorfología e hidrología. El drenaje del territorio se cambia completamente. Cuando las intervenciones se realizan sin estudios, se puede esperar una respuesta negativa de la naturaleza ya que se amplifica el impacto negativo de los peligros naturales. Por esta razón siempre se necesita hacer un estudio enfocado a las condiciones naturales como hidrología, hidrogeología, geomorfología, geología, sismicidad, condiciones geotécnicas para diseños más sostenibles para el desarrollo del Área Metropolitana. En general los rellenos son suelos muy heterogéneos, poco consolidados, con firmeza baja. Depende del material, nivel de compactación y consistencia, pueden ser plásticos y vulnerables por erosión y deslizamiento. Durante los estudios ingeniero-geológicos se tiene que poner atención al espesor de relleno, carácter de material, condiciones hidrológicas e hidrogeológicas.

Mapeo ingeniero-geológico en la escala 1:10 000 de la zona El Carmen

Región de las lavas y brechas volcánicas

Esta región representa el ambiente con rocas resistentes, con meteorización baja hasta media. Las rocas están formadas por un complejo de flujo de lava de brechas volcánicas. Los flujos de lava son rocas masivas hasta laminadas, generalmente con firmeza y resistencia alta. La firmeza puede estar reducida por meteorización local, especialmente en áreas marginales de los flujos. Las brechas de lava tienen grado de firmeza alta o media, son poco menos sólidos que los flujos de lava. En general, las rocas se ven afectadas por fracturas. En las zonas de fallas tectónicas pueden funcionar como zonas de la infiltración, las cuales pueden estar saturadas por agua subterránea. En la zona de Carmen estas rocas se afloran en los fondos de valles erosionales. Las condiciones de esta región son adecuadas para las construcciones.



Fig. 39 Sector de lavas y brechas volcánicas

Región de tobas meteorizadas afectadas por la reptación, está formada por las rocas de grano muy fino no-consolidadas hasta débilmente consolidadas, y tienen carácter del suelo poco estable, con compresibilidad mediana y plasticidad alta. Esta región podría no ser adecuada para la construcción. El material es fácilmente erosionable. Durante la época de

lluvias se puede esperar la erosión sobre las laderas del material y movilizarlas como flujos. Las excavaciones verticales pueden provocar movimientos de ladera.



Fig. 40 Tobas meteorizadas afectadas por la reptación

Región de las rocas piroclásticas semirocosas, corresponde con tobas de grano medio hasta grueso de consistencia que permite formar taludes y afloramientos verticales. La permeabilidad de acumulaciones de flujos freatomagmáticos es mediana hasta alta. Las condiciones de esta región son adecuadas para las construcciones.



Fig. 41 Rocas piroclásticas semirocosas

Región de lavas, brechas volcánicas y rocas flujos piroclásticos meteorizados

Esta región representa el ambiente con rocas, con meteorización o alteración hidrotermal alta. Las rocas están formadas por un complejo de flujo de lava de brechas volcánicas. En

general, las rocas se ven afectadas por fracturas. En las zonas de fallas tectónicas pueden funcionar como zonas de la infiltración, las cuales pueden estar saturadas por agua subterránea. En la zona de Carmen estas rocas se afloran en los fondos de valles erosiónales.

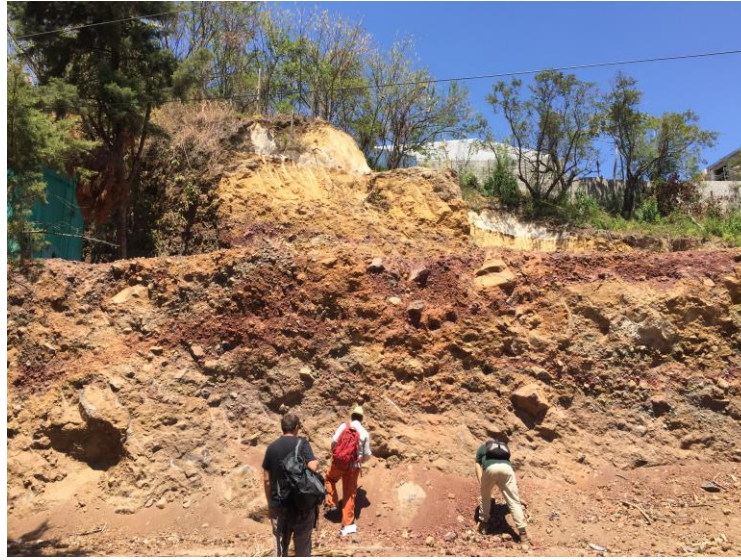


Fig. 42 Lavas, brechas volcánicas y rocas flujos piroclásticos meteorizados

Las acumulaciones de la **Región de acumulaciones de flujos antiguos cubiertos por tefras**, se afloran en las quebradas erosiónales, en las partes bajas de la ladera estructural de volcán Picacho y representan las acumulaciones caóticas de flujos de escombros (“debris flow”). Las acumulaciones son una matriz que soporta los sedimentos de bloques, la cual está formada de suelo arenoso-arcilloso con bloques angulares y subangulares de tamaños desde decímetros hasta algunos metros. Los sedimentos tienen permeabilidad mediana hasta alta, durante la época de lluvias pueden ser saturadas por agua subterránea. Los grandes bloques de rocas resistentes pueden causar dificultades durante las operaciones de excavación y perforación. Las acumulaciones son débilmente consolidadas con firmeza menor y plasticidad mayor. Estas propiedades forman las condiciones favorables para ocurrencia de deslizamientos, flujos y erosión superficial. En general esta región no tiene condiciones adecuadas para construcciones.



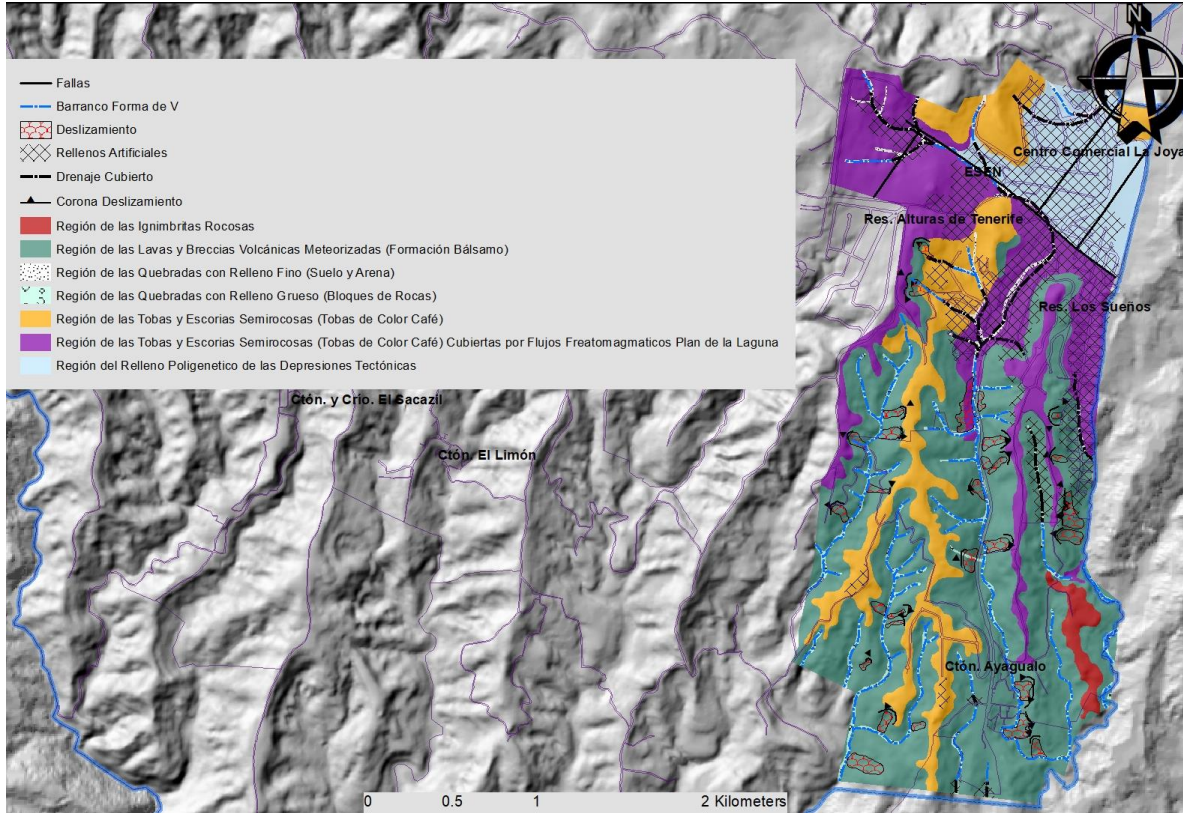
Fig. 43 Tobas y escorias (tobas de color de café)

El **espesor de cubierta por tefras riolíticas de Tierra Blanca Joven** es muy variable, desde decímetros hasta metros. Las tobas riolíticas forman un suelo muy inestable con poca estabilidad y fácilmente erosionable. Su presencia y espesor importante empeora significativamente las condiciones para las construcciones. La erosión y deslizamiento son muy comunes en este suelo. En los casos de espesor mayor, puede ocurrir una erosión subterránea (“piping”) con hundimiento y colapsos gravitacionales de la superficie. Por el impacto de los procesos erosionales se puede producir numerosos daños sobre todo en la infraestructura.

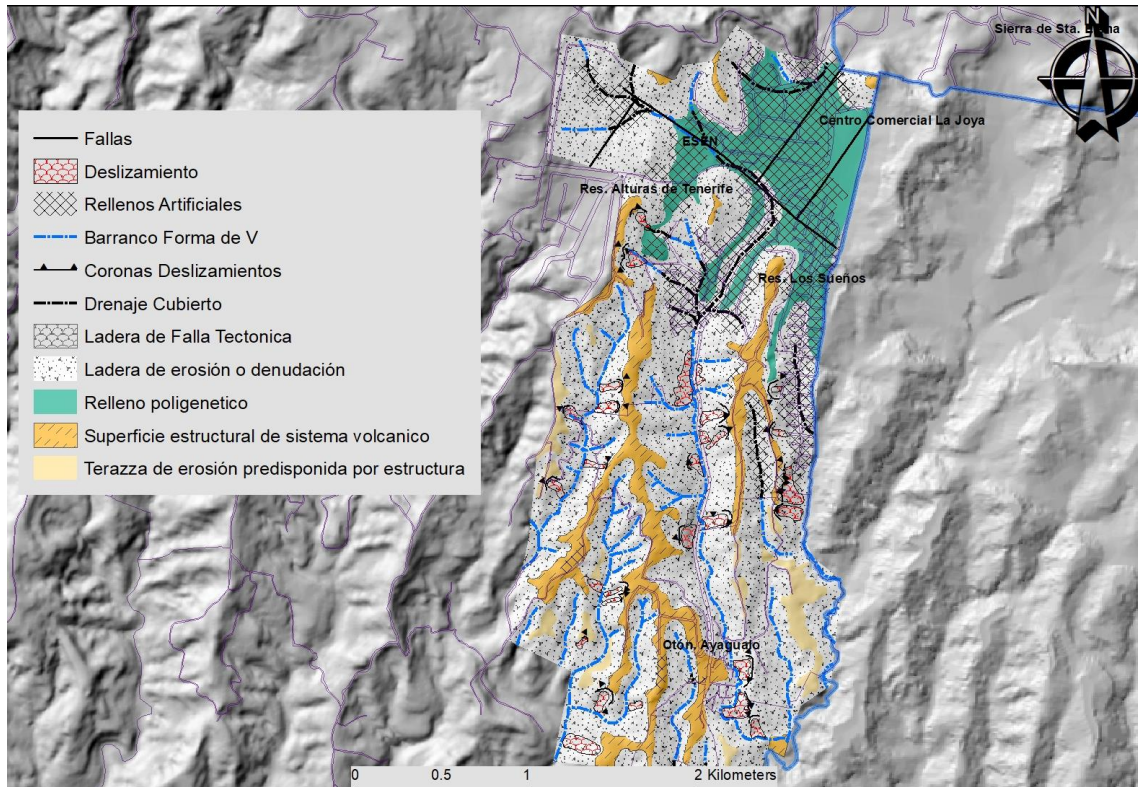
Región de los valles erosionales sin relleno y la región de los valles erosionales con relleno aluvial están a lo largo del sistema de drenaje. Durante la temporada de lluvias las quebradas se activan. Las inundaciones pueden ocurrir rápidamente y son acompañadas con erosión. El peligro mayor se puede esperar en las quebradas con relleno aluvial que esta acumulado en el fondo del valle. Este material puede ser removilizado durante de los caudales altos, creando riesgo de creación de flujos de escombros.

Mapas de la zona Santa Tecla:

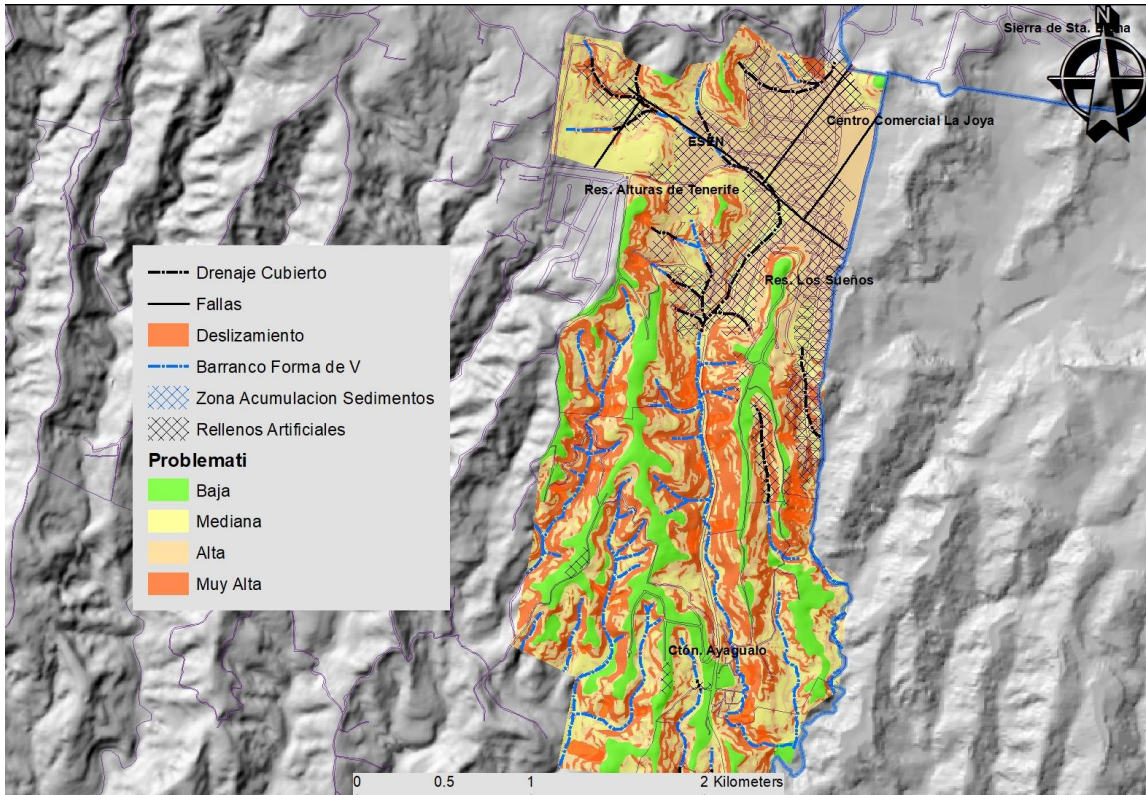
Mapa de Ingeniería Geológica



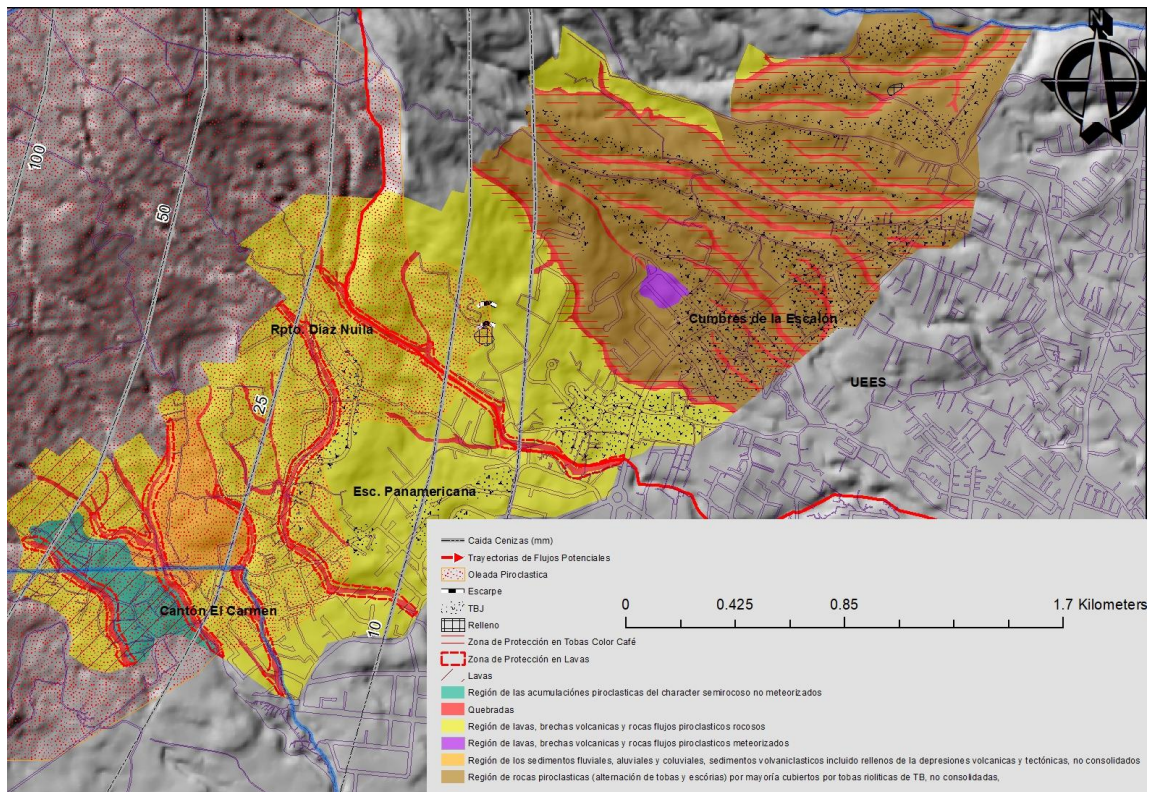
Mapa geomorfológico



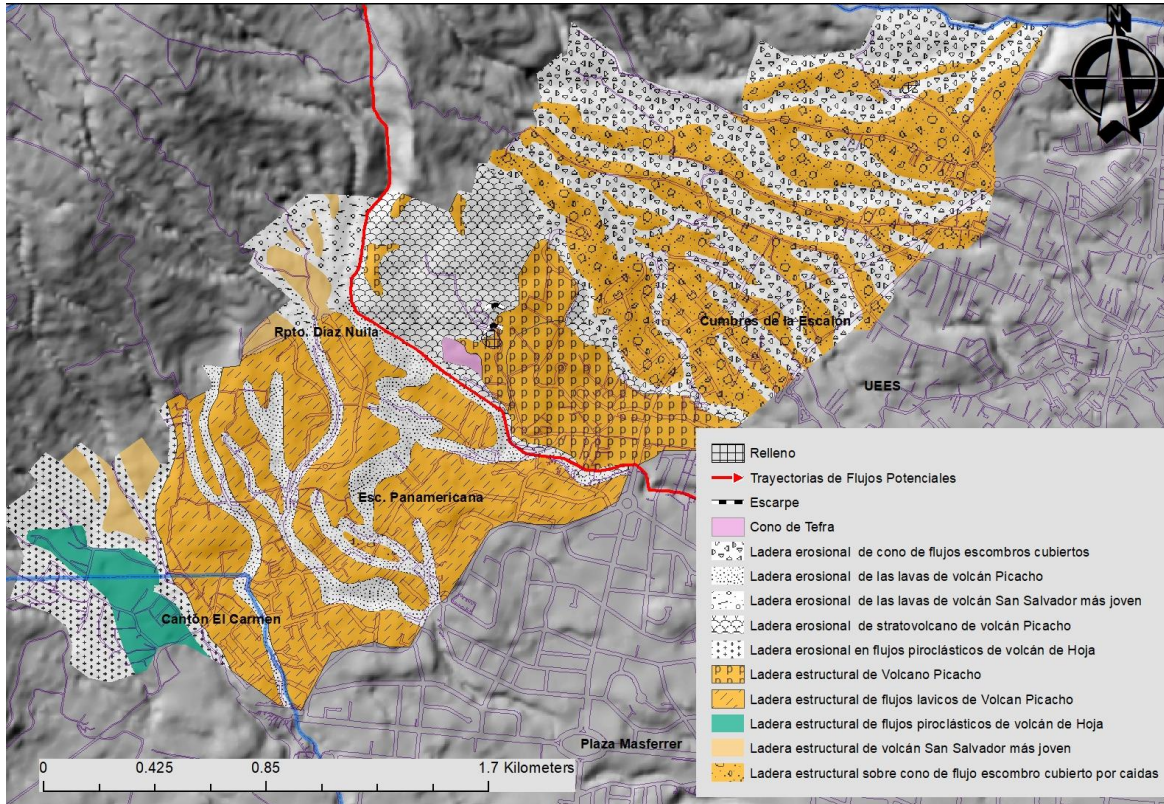
Mapa peligrosidad por dinámica superficial según geomorfología



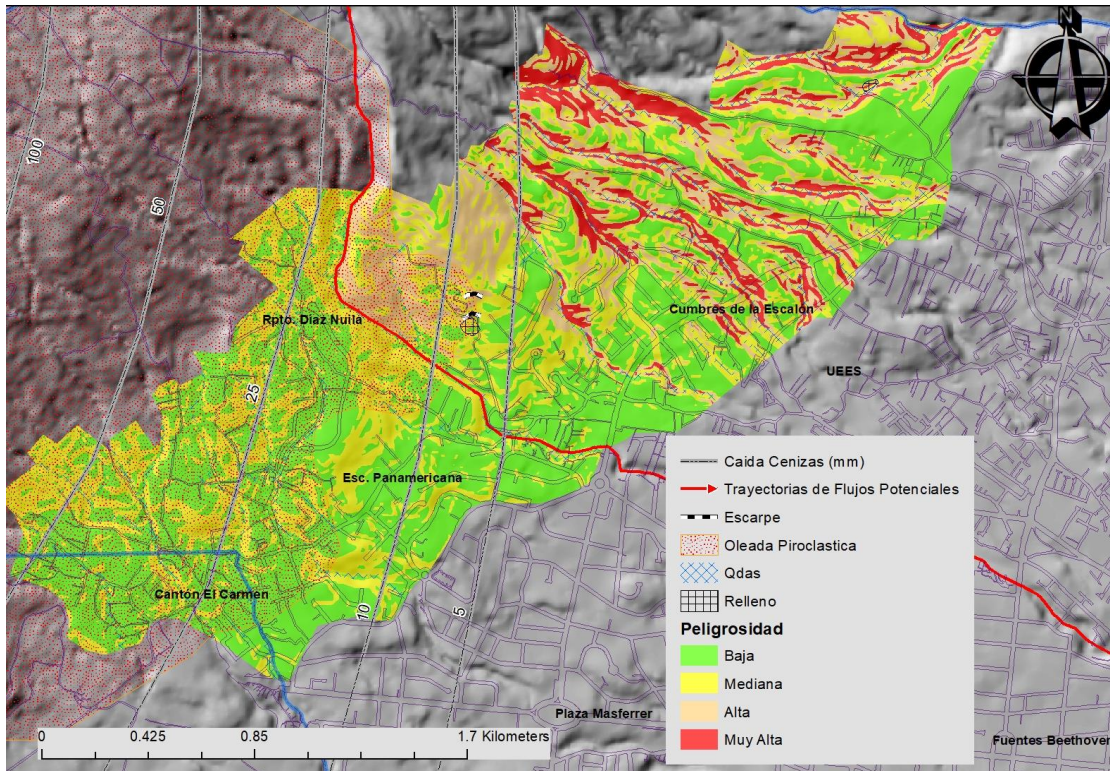
Mapas de la zona el Carmen



Mapa de Ingeniería Geológica



Mapa geomorfológico



Mapa peligrosidad por dinámica superficial según geomorfología

Conclusiones

El Área Metropolitana de San Salvador (AMSS) históricamente ha sufrido problemas asociados al vulcanismo, inundaciones, terremotos, movimientos de ladera, erosión y hundimientos provocando daños ambientales, sociales y económicos graves que evitan que sus habitantes alcancen un desarrollo sostenible. Esta problemática se intensifica más debido a la alta densidad poblacional, crecimiento urbano desordenado, presencia de suelos problemáticos, personas asentadas en zonas peligrosas y desconocimiento de aspectos geológicos básicos cuando se urbaniza. Para buscar el desarrollo sostenible del AMSS se ha empezado a incorporar la ingeniería geológica dentro de la planificación y control del territorio. La ingeniería geológica combina aspectos de diseño de ingeniería civil con las ciencias de la tierra y amenazas geológicas. Entre las acciones emprendidas se puede mencionar mapeo de geología, ingeniería geológica, mapas dinámica superficial y peligrosidad.

La ingeniería geológica puede enfocarse tanto del lado de planificación (mapas y identificación de amenazas geológicas), como del lado constructivo (solucionando problemas mediante la investigación en sitio, obtener datos para diseño y para usar los materiales para procesos constructivos).

Investigaciones haciendo uso de la ingeniería geológica son una herramienta útil que permite contar con información que va en la línea de la propuesta japonesa de desarrollo inclusivo, los objetivos de desarrollo sostenible y la nueva agenda urbana de ayudar en la toma de decisiones sobre aspectos vinculados a la acción climática, gestión de riesgos y resiliencia, pues hay ahorro de dinero al evitar reparaciones constantes, pérdidas económicas y de vidas humanas por lluvias, terremotos u otros.

El conocimiento de lo que ocurre en campo en la realidad contra los conocimientos teóricos del comportamiento provoca el cuestionamiento de los conceptos que se usan en el día al día cuando se diseña y que actualmente muestra deficiencias.

La importancia del mapeo de ingeniería geológica es que existe una necesidad de que información sea fácil de interpretar para constructores y planificadores; agrupando unidades con características o propiedades similares: riesgos geológicos (inundaciones, movimientos de ladera, erosión, tectónica, riesgos volcánicos); geomorfología (dinámica superficial); hidrogeología (situación del agua subterránea) y propiedades geotécnicas de materiales geológicos

El mapeo de ingeniería geológica donde se identifiquen los suelos o zonas problemáticas puede ayudar en la toma de decisiones ya que se puede conocer de manera preliminar el tipo de investigación geotécnica necesaria, cimentaciones necesarias, obras de mitigación o uso de suelo más recomendado. Además, implica una mejora en la toma de decisiones ya que hay ahorro de dinero al evitar reparaciones constantes, así como, pérdidas económicas y de vidas humanas por lluvias, así como, terremotos.

Siendo importante hacer las gestiones necesarias para obtener topografía a mejor escala y más reciente, esto ayudara en la obtención e interpretación de información de geología, dinámica superficial e ingeniería geológica.

Se ha actualizado de mapa de geología, por la escala de trabajo los sectores con un espesor total inferior a 2 m, no será mostrado en el mapa. Con un espesor de 2 m a 6 m se hace uso del método de bandas para mostrarlo (sustrato a modo de banda se muestra como que si fuera una trinchera excavada para conocer profundidad que se encuentra). Con un espesor mayor a 6 m se indica en el mapa el espesor por medio de texto y también con isópacas. Se elaboró el mapa ingeniero geológico para la zona AMSS y los mapas de geomorfología, ingeniero-geológico y peligrosidad en la escala 1:10000 para las zonas Carmen y Santa Tecla.

Se puede decir que la estructura geológica de las áreas mapeadas es variable, en algunas zonas están todos los estratos presentes y en otras no.

Los mapas de ingeniería geológica deberían servir para la planificación territorial y prever que zonas es donde hay que tener más cuidado.

En algunas de las zonas mapeadas hay bastantes rellenos y vertederos, los cuales fueron demarcados en el mapa, ya que se podría construirse sobre ellos y de no tomarse las medidas adecuadas podrían esperarse problemas para las construcciones en un futuro. Para realizar un mapa de ingeniería geológica con mayor detalle se necesita más información de pruebas de campo y de laboratorio para obtener más información que pueda ser útil y representativa.

Cuando se haga una propuesta para alguna construcción hay que tomar en consideración sobre todo las amenazas volcánicas, movimientos de ladera, inundación, pendientes, suelos sensibles a humedad, junto con los efectos sísmicos y vibraciones artificiales, la situación de las aguas subterráneas y superficiales, así como, las propiedades geotécnicas de los estratos. También hay que tomar en cuenta los efectos de la erosión rápida e intensa y sobre todo de la erosión retrógrada

Actualmente para la gestión del desarrollo urbano y para la toma de decisiones y evaluación, los especialistas necesitan una gran cantidad de datos e información siendo los datos geológicos algunos de los datos básicos que permiten esta evaluación calificada y la toma de decisiones para eliminar los riesgos de origen geológico.

La debilidad en la recopilación e investigación de información geológica y geotécnica en El Salvador, son unas de las razones de la problemática que experimenta la región, siendo importante mejorar el manejo del riesgo, así como la mecánica de suelos y de rocas.

Un paso muy importante es elaborar directrices para los proyectantes, de manera que no tengan problemas futuros con la denudación y otros riesgos naturales.

Esto hace necesario tener un estudio del impacto de riesgos naturales para los riesgos geodinámicos endógenos: actividad volcánica y sísmica (zonas seleccionadas) y exógenos: erosión fluvial y subterránea, movimientos de laderas, inundaciones y acumulaciones de aluviones y coluvios.

Cada proyecto tiene que presentar un estudio especial del impacto de riesgos naturales y cuando esté en conflicto con algún riesgo geodinámico proponer una solución técnica para eliminarlo. El estudio tiene que incluir al menos la información que se presentan en la tabla.

Onclinación de ladera (límite es más que 15 grados)	Erosión vertical y lateral de ríos
Condiciones litológicas (volcánica, sedimentaria, intrusiva) y sus características mecánicas (de roca y suelo)	Tipo y nivel de acuífero
Relación con fallas y fracturación de roca (densidad de fracturas, carácter de falla etc.)	Permeabilidad y saturación de roca y primera capa impermeable (cuanto m de profundidad) y su inclinación
Nivel de meteorización (que tipo y análisis de minerales arcillosos; profundidad)	Observación en el campo de todos los bordes y registración de todas las grietas o trincheras y trayectorias antiguas
Nivel de alteración hidrotermal (que tipo y análisis de minerales arcillosos y extensión)	Limitar zona de las inundaciones y acumulación de los aluviones (llanura aluvial, cono aluvial activo, depresión sin drenaje)
Densidad de red de drenaje	Ubicación de proyecto en relación con fallas y centros volcánicos (en zonas seleccionadas)
Carácter de drenaje (tipo de valle)	Ubicación de proyecto sobre bloques diástróficos
Erosión visible y que tipo – planar, por surcos, por cárcavas	



Bibliografía

- ALFARO I., “Debris flow characteristic along the main channel with structures in the Arenal de Mejicanos, San Salvador, El Salvador”, Master thesis, National Graduate Institute for Policy Studies (GRIPS), Tokyo, Japon, 2014.
- BOSSE HR, LORENZ W, MERINO A, MIHM A, RODE K, SCHMIDT-THOMÉ M, WIESEMANN G, WEBER HS (1978) GEOLOGISCHE KARTE DER REPUBLIK EL SALVADOR, MITTELAMERIKA. BUNDESANSTALT FÜR GEOWISSENSCHAFTEN UND ROHSTOFFE, HANNOVER, 6 SHEETS
- BAXTER S (1984) LÉXICO ESTRATIGRÁFICO DE EL SALVADOR. COMISIÓN EJECUTIVA HIDROELÉCTRICA DEL RÍO LEMPA (CEL). 108 P.
- C.E.I.G. (1966) Mapa geológico preliminar de San Salvador y sus alrededores. Centro de Estudios e Investigaciones Geotécnicas, San Salvador.
- CENTRO DE INVESTIGACIONES GEOTÉCNICAS – CIG (1987) Mapa Geológico del área de San Salvador y sus alrededores, Esc. 1 : 15 000. Ministerio de Obras Públicas, El Salvador
- CHAMRA S, CHÁVEZ J, HERNÁNDEZ W, LEXA J, SCHRÖFEL J, ŠEBESTA J, VALENTA J (2010) Estudios geológicos regionales para el reconocimiento y predicción de peligros naturales en la parte central de Centro América – El Salvador. Open file report, Czech Geological Survey Prague – Oficina de Planificación del Área Metropolitana de San Salvador (OPAMSS), pp 1–182
- CHAVEZ J. A, J. SCHRÖFEL, J VALENTA, J. ŠEBESTA, Y W. HERNANDEZ, “Engineering geology mapping in southern part of the Metropolitan Area of San Salvador”. Revista Geológica de América Central, 46, pp. 161-178, 2012.
- CHAVEZ J, ŠEBESTA J, KOPECKY L, LOPEZ R, LANDAVERDE J (2014) Application of geomorphologic knowledge for erosion hazard mapping. Nat Hazards 71:1323–1354. doi 10.1007/s11069-013-0948-8
- CHÁVEZ J.A, ŠEBESTA J, (2015) Urbanization Convenience Zoning Based on Geomorphology. Proceedings of the 15th Pan-American Conference on Soil Mechanics and Geotechnical Engineering, 15–18 November 2015, Buenos Aires, Argentina. From Fundamentals to Applications in Geotechnics D. Manzanal and A.O. Sfriso (Eds.) IOS Press, 2015. doi: 10.3233/978-1-61499-603-3-3135
- CHÁVEZ, J.A, LANDAVERDE J, MENDOZA L, LOPEZ R, TEJNECKÝ V, (2016) Monitoring and behavior of unsaturated volcanic pyroclastic in the Metropolitan Area of San Salvador, El Salvador. SpringerPlus 5(1): 1-24. doi: 10.1186/s40064-016-2149-x
- COMMISSION ON ENGINEERING GEOLOGICAL MAPS, engineering geological maps, UNESCO press. Paris p. 79, 1976.
- CONSORCIO SALVADOR E. ITALTEKNA ITALCONSULT–GEOTÉRMICA ITALIANA (1988) Estudio vulcanológico. San Salvador – Programa di Ricostruzione. Republica Italiana Ministero degli Affari Esteri Direzione Generale per la Cooperazione allo Sviluppo. Open file report, Ministerio de Obras Públicas, San Salvador, pp 1–88



COAMSS
OPAMSS
Consejo de Alcaldes y Oficina de Planificación
del Área Metropolitana de San Salvador



JUNTA DE ANDALUCÍA

PROGRAMA DE COOPERACION INTERNACIONAL

- FERRÉS D, DELGADO H, HERNÁNDEZ W, GUTIÉRREZ E, PULLINGER C (2007) Destruction of San Salvador volcano and birth of El Boquerón volcano (El Salvador): detailed stratigraphic study of G1 and G2 sequences. *Eos Trans. AGU* 88(52), Fall Meet. Suppl. V31B-0490.
- FERRÉS D, DELGADO GRANADOS H, HERNÁNDEZ W, PULLINGER C, CHÁVEZ H, CASTILLO TARACENA CR CAÑAS-DINARTE, C (2011) Three thousand years of flank and central vent eruptions of the San Salvador volcanic complex (El Salvador) and their effects on El Cambio archeological site: a review based on tephrostratigraphy. *Bull. Volcanology*,
- FERRÉS D, DELGADO GRANADOS H, GUTIÉRREZ RE, FARRAZ I A, HERNÁNDEZ EW, PULLINGER CR, ESCOBAR CD (2013) EXPLOSIVE VOLCANIC HISTORY AND HAZARD ZONATION MAPS OF BOQUERÓN VOLCANO (SAN SALVADOR VOLCANIC COMPLEX, EL SALVADOR) *GEOLOGICAL SOCIETY OF AMERICA SPECIAL PAPERS* 498, 201-230.
- FERRÉS D (2014) Estratigrafía, geología y evaluación de peligros volcánicos del complejo volcánico de San Salvador (El Salvador), Tesis, Universidad Nacional Autónoma de México, 1-296
- HERNÁNDEZ EW (2008) Aspectos geológicos que influyen en las aguas subterráneas y en la respuesta sísmica del área metropolitana de San Salvador. Open file report, Servicio Nacional de Estudios Territoriales, San Salvador, pp 1–19
- HRADECKÝ P, BARATOUX L, GUEVARA M, HAVLÍČEK P, HERNÁNDEZ W, KVAČEK Z, MAŠEK D, NOVÁK Z, NOVÁKOVÁ D, OPLETAL M, PULLINGER C, RAPPRICH V, ŠEBESTA J, VOREL T (2004) Geological research on natural hazards in central El Salvador in provinces of La Libertad, San Salvador and Cuscatlán. Unpublished Final Report, Czech Geological Survey, Prague, Servicio Nacional de Estudios Territoriales, San Salvador, pp 1–108 (in Czech and Spanish)
- INTERNATIONAL STRATIGRAPHIC GUIDE – A guide to stratigraphic classification, terminology, and procedure (A. Salvador, ed.) 2nd edition. The International Union of Geological Sciences and The Geological Society of America, Inc, 214 p., 1994.
- JAMES KH (2007) Structural geology: From local elements to regional synthesis. In: BUNDSCHUH J, ALVARADO G (Eds.) *Central America, Geology, resources and hazards*. CRC Press, London, p. ???????
- LEXA J, ŠEBESTA J, CHAVEZ JA, HERNÁNDEZ W, PÉCSKAY Z (2011) Geology and volcanic evolution in the southern part of the San Salvador Metropolitan Area. *Journal of Geosciences*, 56, 105–140
- PEDRAZZI D., SUNYE-PUCHOL I., AGUIRRE-DÍAZ G., COSTA A., SMITH V., PORET M, DÁVILA-HARRIS P., MIGGINS D., HERNÁNDEZ W., GUTIÉRREZ E., The Ilopango Tierra Blanca Joven (TBJ) eruption, El Salvador: Volcano-stratigraphy and physical characterization of the major Holocene event of Central America, *Journal of Volcanology and Geothermal Research*, 2019
- SCHMIDT-THOMÉ M (1969) Investigaciones Geológicas en la Región de la Ciudad Capital San Salvador y sus Alrededores con Indicaciones de Riesgos Sísmicos, de Hidrogeología y de Planeamiento de Urbanización. San Salvador, 57p., 2 anexos.
- SCHMIDT-THOMÉ M (1975) The geology in the San Salvador area (El Salvador Central America) a basis for city development and planning. *Geol Jb, Reihe B: Regionale Geologie Ausland* 13: 207–228.
- ŠEBESTA J 2006: Elaboración de cartografía geomorfológica para incorporar el análisis de riesgo en el plan de desarrollo urbano del AMSS. Oficina de Planificación del Área Metropolitana de San Salvador (OPAMSS), pp 1–51



Universidad de El Salvador
Por la libertad por la cultura



COAMSS
OPAMSS
Consejo de Alcaldes y Oficina de Planificación
del Área Metropolitana de San Salvador



JUNTA DE ANDALUCÍA

PROGRAMA DE COOPERACION INTERNACIONAL

- ŠEBESTA J 2007: Geomorfología del AMSS y su relación con los movimientos de ladera. Open file report, Czech Geological Survey Prague – Oficina de Planificación del Área Metropolitana de San Salvador (OPAMSS), pp 1–40
- ŠEBESTA J., J. A. CHAVEZ Y W. HERNÁNDEZ “Cartografía y evaluación para estudiar los procesos de Erosión en el Área Metropolitana de San Salvador, El Salvador, América Central” OPAMSS-SGC, San Salvador, El Salvador, Reporte Técnico, 2010.
- SUÑE-PUCHOL I, AGUIRRE-DÍAZ G, HARRIS-DAVILA P, PEDRAZZI D, GUTIERREZ E, HERNANDEZ W, MIGGINS D, COSTA A (2017) The voluminous 1.75 Ma Olocuilta ignimbrite: a pre-collapse fissure supereruption of Ilopango strike-slip caldera, El Salvador. IAVCEI 2017 Scientific Assembly, Portland Oregon, Abstract volume, p. 1067.
- SUÑE-PUCHOL, I. AGUIRRE-DÍAZ G., DÁVILA-HARRIS P., MIGGINS D., PEDRAZZI D., COSTA A., ORTEGA-OBREGÓN C., LACAN P, HERNÁNDEZ W., GUTIÉRREZ E., The Ilopango caldera complex, El Salvador: Origin and early ignimbrite-forming eruptions of a graben/pull-apart caldera structure, *Journal of Volcanology and Geothermal Research*, Volume 371, 2019, pages 1-19
- SUÑE-PUCHOL, I. AGUIRRE-DÍAZ G., DÁVILA-HARRIS P., MIGGINS D., PEDRAZZI D., COSTA A., ORTEGA-OBREGÓN C., LACAN P, HERNÁNDEZ W., GUTIÉRREZ E., The Ilopango caldera complex, El Salvador: Stratigraphic revision of the complete eruptive sequence and recurrence of large explosive eruptions, *Journal of Volcanology and Geothermal Research*, Volume 374, 2019, Pages 100-119
- WIESEMANN G (1974) Mision Geologica Alemana en El Salvador 1967 – 1971, Reporte final. Open file report, Archive Bundesanstalt für Bodenforschung, 66 p.
- WIESEMANN G (1975) Remarks on the geologic structure of the Republic of El Salvador Central America. *Mitt Geol Paläont Inst Univ Hamburg* 44: 557–574



ANEXO A

Introducción Geomorfología

El país de El Salvador, con una extensión de casi 21,000 km² está ubicado en una zona muy complicada por la constante amenaza de desastres naturales, los cuales han producido a lo largo de su historia catástrofes naturales y que pueden seguir provocando en el futuro pérdidas económicas, ambientales y sociales.

Casi toda la extensión del país está comprometida, ante todo, por el peligro geodinámico entre los que se puede mencionar a las erupciones volcánicas, terremotos, erosión, inundaciones y movimientos de laderas entre otros. El Área Metropolitana de San Salvador (AMSS), se localiza en la región central del país, es un conglomerado de 14 municipios, pertenecientes a los departamentos de San Salvador y La Libertad. En San Salvador se encuentra gran parte de la población (población de 1,767,102 habitantes, de los cuales el 97% se constituye como población urbana, con una densidad de 2,897 hab/km²); además se concentran las instituciones públicas y privadas, así como la industria. Mucha de esa cantidad de personas vive en zonas de alto riesgo como en los cauces de quebradas, a poca distancia de escarpes, cañones o quebradas o al pie de los taludes y esto hace que el riesgo de los habitantes de la capital debido a los procesos geodinámicos sea muy alto.

La investigación geológica y geomorfológica con sus respectivos mapeos y estudios especiales son un instrumento básico para el entendimiento de cómo y dónde puede impactar a la población los peligros geológicos, pero también para conocer en qué lugares son más convenientes las condiciones para el desarrollo del territorio. La investigación y los estudios especiales también ayudan y proporcionan información importante para que la administración pública tome decisiones en la planificación y desarrollo del territorio, así como para encontrar el equilibrio entre la conservación de los recursos naturales y el uso de suelo, de manera que el desarrollo del territorio no sea perturbado por el peligro geológico, que para el AMSS es muy importante.

En los años 2005 y 2006 se elaboró “El Mapa Geomorfológico del AMSS” (Šebesta, 2006) en escala 1:25,000; ya que la OPAMSS (Oficina de Planificación del Área Metropolitana de San Salvador) está interesada en incorporar el análisis de riesgo ante peligros naturales en los estudios de planificación urbana, dicho mapa se elaboró con la ayuda del Proyecto Europeo FORGAES (Fortalecimiento de la Gestión Ambiental en El Salvador), del proyecto Checo del SGC (Servicio Geológico Checo) y con cooperación del Departamento Geológico del SNET (Servicio Nacional de Estudios Territoriales) con el objetivo de zonificar el AMSS (Área Metropolitana de San

Salvador) tomando en cuenta la importancia de la capital, los desastres ocurridos, densidad de población y peligros naturales que caracterizan al área.

En el año 2007 se continuó la elaboración de mapas y estudios especiales que aprovechan los datos básicos del mapa geomorfológico, resultando mapas temáticos sobre movimientos de ladera y sismicidad. En los años 2008, 2009 y 2010 se elaboraron mapas de ingeniería geológica y de geología de la parte sur (Sector El Bálsamo) del AMSS y Mapa esquemático de erosión.

En octubre de 2017 se ha iniciado proyecto Gestión de riesgos y Disminución de Vulnerabilidad Social en el Área Metropolitana de San Salvador. Con la ejecución del proyecto se busca la implementación de los lineamientos establecidos en la Política Metropolitana de Desarrollo Urbano y Territorial, cuyo objetivo es buscar una ciudad ambientalmente sustentable, siendo temas prioritarios la gestión del riesgo, donde se proponen acciones de: Investigación, mitigación, conocimiento y reglamentación, incluyendo el conocimiento más profundo de temas como vulcanismo, microzonificación sísmica, estabilidad de laderas y taludes, lahares y modelos hidráulicos de los drenajes primarios.

La elaboración del Mapa geomorfológico tiene la misión de evaluar el AMSS por los procesos exodinámicos más intensos en la región, que provocan muchos problemas y pérdidas económicas en las zonas urbanizadas. Por falta de terrenos convenientes para la urbanización en el AMSS se inició la urbanización en zonas no tan convenientes y por tanto los terrenos ahora están muy impactados por los procesos exodinámicos. Los proyectantes de las construcciones todavía no tienen experiencia para estas condiciones y para los proyectos faltan los conocimientos sobre los procesos exodinámicos. Por eso frecuentemente con el tiempo suceden problemas con el inicio de movimientos de ladera, colapso y erosión, que rompen las calles, tuberías, suceden hundimientos de superficie, colapsan o se dañan casas etc. La elaboración del Mapa geomorfológico del AMSS provee las primeras informaciones sobre el tema, pero lo que es importante es desarrollar más y más esta temática. Especialmente investigar las características geotécnicas y geológicas, para tomar las mejores decisiones en el futuro.

Cartografía del Mapa Geomorfológico

Análisis geomorfológico

Lo que se busca con el análisis geomorfológico es delimitar y explicar el origen de cada forma de la superficie terrestre, así como, conocer el comportamiento que se puede esperar.

Los procesos geomorfológicos que actúan en la región se dividen en: endógenos (fuerzas internas de la Tierra) y los exógenos (factores o fuerzas externas que afectan la superficie terrestre, incluyendo la intervención antrópica).

Šebesta (2006) describe que los factores y procesos que tienen que ver con las formas del relieve pueden clasificarse en: tectónicos, estructurales, de denudación y de acumulación.

Las fuerzas que edifican el relieve, empujando, plegando, rompiendo, elevando y hundiendo fragmentos de la corteza terrestre son las fuerzas tectónicas. Las formas estructurales, tienen que ver con el relieve formado debido a procesos volcánicos, tales como laderas volcánicas o cráteres, por ejemplo.

La denudación es el conjunto de procesos que degradan el relieve, pudiendo acentuar los desniveles e incluye los procesos de erosión, así como, de movimientos de ladera. Al terminar de nivelar la superficie, puede reanudar su trabajo de excavación luego de que exista una nueva alteración en el relieve ya sea por procesos endógenos o por procesos exógenos. Gracias a la diferencia de resistencia litológica (dureza o resistencia) en las rocas se obtienen las formas del relieve.

Las unidades y formas geomorfológicas se dividen según su tipo genético por ejemplo las **endógenas** pueden dividirse en: origen tectónico (la Depresión Salvadoreña y Fallas) y por actividad volcánica (volcanes, calderas, maares, domos, etc.); las **exógenas** se pueden dividir en Erosión (erosión retrógrada, erosión en el sistema de drenaje, erosión de suelo, erosión subterránea etc.); Movimientos de ladera (reptación, deslizamiento, flujo, derrumbe); meteorización de las rocas; acumulación de aluvión (conos aluviales, lecho de río); Inundación (Llanura aluvial, lecho de río, agradación de aluviones); actividad humana (todos tipos de urbanización y formas antrópicas).

Formas y unidades geomorfológicas con nivel de problemática de riesgo por procesos geodinámicos

A continuación, se presentan unidades y formas del Mapa Geomorfológico (leyenda geomorfológica), clasificándose en base a nivel de peligrosidad y problemática de riesgo

Formas y unidades estructurales y tectónicas

Falla

Las **fallas** se representan como líneas, dividiéndose en la leyenda del Mapa Geomorfológico como:

Fallas tectónicas (evidente por morfología, supuesta por morfología, evidente por morfología pero cubierta por sedimentos o productos volcánicos)

Fallas de colapso estructural y gravitacional de relieve (limitan Graben de la Fosa Central o Depresión Salvadoreña)

Fallas caldericas (evidente por morfología, supuesta por morfología, evidente por morfología pero cubierta por sedimentos o productos volcánicos)

Las fallas principales son zonas de debilidad y discontinuidad que se forma en las rocas someras de la Tierra (~200 km de profundidad) por fracturamiento cuando concentraciones de fuerzas tectónicas exceden la resistencia de las rocas; cuando la actividad en una falla es repentina y abrupta, se puede producir un fuerte terremoto e incluso una ruptura de la superficie formando una forma topográfica llamada escarpe de falla (Vertiente tectónica o plano de la falla desnuda). Son zonas de recarga y transporte de agua subterránea, pero también pueden actuar como barrera para las aguas subterránea. Estas fallas pueden delimitar la ubicación de los acuíferos principales. Las fallas investigadas por análisis exodinámico representan líneas marcadas en la morfología de relieve y se supone, que se originan por los movimientos tectónicos y las cuales son afectadas por temblores y terremotos. Por algunas fallas ocurren movimientos de estructuras geológicas importantes como el colapso de Fosa Central (Depresión Salvadoreña). El sistema de fallas marginales relacionadas al colapso del Graben, el cual está conectado con el proceso de subducción en las costas del Océano Pacífico son sísmicamente activas (Colina de Santa Tecla 2001).

Las fallas pueden tener movimientos verticales y horizontales. Hay tendencia de extensión en las fallas (Baratoux, 2006). Se supone, que las fallas en la Fosa Central

son activas. El lineamiento Ipala muestra relativamente poca actividad e históricamente es una zona tranquila, pero se supone, que la actividad tectónica puede reactivarse.

Susceptibilidad a riesgo geodinámico: *Las fallas son zonas con peligro muy alto debido a sismos y terremotos. Las fracturas de las fallas generalmente están abiertas y funcionan como zonas de recarga alta del agua subterránea y de entrada directa de contaminantes. Generalmente, si la falla pasa por una ladera, dependiendo de su ubicación se produce erosión vertical de barranco o quebrada (valle predispuesto por falla). En la intersección de la falla con el borde de ladera de erosión o borde de escarpe expresivo hay presencia frecuentemente de cabeceras de flujos de escombros (por fracturamiento y meteorización local) o deslizamientos y derrumbes. La susceptibilidad a erosión fluvial y a movimientos de ladera es alta.*



Foto 1 Zona de fallamiento con fallas abiertas y fracturamiento denso.

Bloque Diastrófico

En sectores del AMSS hay un relieve que tiene muchos escalones caóticamente organizados que subsiden dentro del Graben lentamente.

Los bloques diastróficos corresponden al colapso porque son limitados directamente por las fallas (secundarias). Los bloques diastróficos se originan por el colapso estructural y gravitacional en la Fosa Central (Depresión Salvadoreña), que es un graben tectónico; por colapso de calderas o volcanes o por colapso en los valles erosionales principales. El movimiento de los bloques en el Graben siempre continua y produce temblores o terremotos locales (Antiguo Cuscatlán, 2 de febrero de 1798). En la Fosa Central los bloques diastróficos en su mayoría están cubiertos por el relleno natural poligenético de los productos volcánicos y fluviales (Tierra Blanca Joven TBJ, Tierra Blanca TB, ceniza, escoria, sedimentos retrabajados, lavas, flujos piroclásticos y epiclasticos). Es posible limitar la ubicación de los bloques diastróficos en la Fosa Central solo en la parte sur, donde están cubiertos por una capa no tan profunda de TBJ y TB. Los bloques diastróficos forman también las calderas de colapso, como la Caldera Ilopango, Caldera Planes del Renderos y Caldera Jayaque, donde su estabilidad tectónica es más baja.

***Susceptibilidad a riesgo geodinámico:** Debido a sismos y terremotos los Bloques diastróficos en caldera con Badlands son zonas con peligrosidad **muy alta**, y **alta** para Bloques Diastróficos en Fosa si tienen pendientes $>25^\circ$. Si tienen pendiente $<25^\circ$ la peligrosidad es alta para Bloques Diastróficos en Caldera con Badlands y mediana para Bloques Diastróficos en Fosa. Las construcciones que se encuentran en medio de estos bloques no tendrían problemas ya que al moverse lo hacen con todo el bloque, sin embargo, las que se encuentran en la zona de fallamiento podrían experimentar algún tipo de problema. Es necesario analizar la sismicidad, tectónica y el efecto de sitio en los sectores de bloques diastróficos para evitar problemas.*

*La susceptibilidad a erosión fluvial y a movimientos de laderas es **mediana**.*

*Las fracturas de fallas entre los bloques están abiertas frecuentemente y funcionan como zonas de **recarga alta** de agua subterránea.*

Resto tectónico de la forma volcánica

Los restos tectónicos de la forma volcánica son genéticamente parecidos a los bloques diastróficos, pero están conectados siempre a una estructura volcánica o relicto de antiguo volcán que están fracturados por las fallas. Hay sectores que están meteorizados o alterados hidrotermalmente, pudiendo esperarse que en sus drenajes ocurra erosión, así como, movimientos de ladera (deslizamientos, reptación, flujos (lahares) y derrumbes). Por su alta inclinación la denudación los degrada constantemente y pueden originarse flujos de escombros (incluso una avalancha de escombros, en que parte de volcán colapse), durante fenómenos extremos de lluvias y terremotos. Pero muy importante es también la litología, que permite o limita estas actividades.

Los restos de los bloques tectónicos de volcanes antiguos están cubiertos principalmente por capas producto de la Caldera de Ilopango y del volcán de San Salvador, al quedar descubiertos estos estratos en taludes o laderas, pueden esperarse problemas de erosión y movimientos de ladera.

Estos bloques tectónicos colapsan en Cerro Guaycume, restos de paleovolcanes tipo Ilopango Antiguo, domos dacíticos. Los bloques tectónicos limitan también las fallas.

Susceptibilidad a riesgo geodinámico: Los Restos Tectónicos de la Forma Volcánica, de Ilopango Antiguo, Domo Dacítico, Guaycume son zonas con problemática **media**.

Los bloques de restos tectónicos de la forma volcánica que forman los paleovolcanes son zonas con peligrosidad por sismos, erosión y movimientos de ladera. Las fracturas y/o fallas entre bloques generalmente están abiertas y funcionan como zonas de recarga de agua subterránea.

denudación son laderas más o menos inclinadas, generalmente fracturadas por los procesos tectónicos ya que corresponden con las fallas tectónicas que son en su mayoría activas. Frecuentemente están impactadas por sismos y ocurren derrumbes. Dependiendo de la inclinación de la ladera puede suceder erosión fluvial y movimientos de ladera.

Susceptibilidad a riesgo geodinámico: Las vertientes de fallas son zonas con peligro de sismos y terremotos **muy alta**, pero también con peligro de erosión y movimientos de ladera **muy alta** si la inclinación de vertiente es fuerte.

Se puede esperar problemas de sismicidad, erosión y movimientos de ladera. Por su conformación es una zona con inclinación que puede ser alta, al igual que su fracturación por lo que es natural que exista una fuerte dinámica de los procesos geológicos en su superficie (por ejemplo zona de las Colinas en Santa Tecla, curva de la Leona o Comasagua).



Foto 4 Vertientes tectónicas que limitan Cerro Guaycume y que corresponde con las fallas de colapso estructural de Fosa Central. (San Nicolás, Apopa)

Escarpe expresivo de la forma volcánica

Los escarpes expresivos de formas volcánicas forman los cráteres, maares y calderas siendo sus laderas más o menos inclinadas, generalmente fracturadas por los procesos tectónicos porque corresponden con las actividades volcánicas y fallas tectónicas. Pueden estar impactadas por alteración hidrotermal antigua y reciente. Frecuentemente son impactadas por sismos y se derrumban (por ejemplo, derrumbe en Cráter Boquerón en el 2001). Dependiendo de la inclinación de ladera puede suceder erosión fluvial y movimientos de ladera. La formación del escarpe también puede combinarse con procesos tectónicos o de colapso de caldera.

Susceptibilidad a riesgo geodinámico: Los Escarpes Expresivos de Caldera Ilopango con Badlands son los sectores más críticos. Los escarpes expresivos de las formas volcánicas ($>25^\circ$) son zonas por sismicidad **muy alta**, pero también con un peligro **muy alto** de erosión y movimientos de ladera; si la inclinación de la vertiente es de 0- 15 grados el peligro es alto.



Foto 5 Escarpe expresivo marcado del Maar Bonete. (Cantón Bonete, Nejapa)

Superficie estructural más joven

Esta unidad incluye productos lávicos, así como, del volcán de San Salvador y tobas de la última erupción de la Caldera de Ilopango.

Estratovolcán

Volcán de San Salvador es un estratovolcán activo conformado por capas de material fragmentario (cenizas, escorias, bombas etc.) y corrientes de lava intercaladas, lo que indica que surgieron en épocas de actividad explosiva, seguidas por otras donde fluyeron corrientes de lava. En las zonas proximales se puede esperar que erupciones futuras puedan provocar problemas de caídas de tefras, flujos piroclásticos, oleadas piroclásticas o surges, sismicidad, movimientos de ladera y el surgimiento de volcanes en el pie del volcán que provoquen erupciones efusivas (lávicas) o explosivas (tefras) entre otros. Las superficies estructurales más jóvenes del cono volcánico forman laderas con poca e intermedia inclinación, formadas por lavas jóvenes, lo que significa que no están meteorizadas. La inclinación es menor que 25 grados y por eso las laderas no están impactadas drásticamente por la erosión o por los movimientos de laderas.

***Susceptibilidad a riesgo geodinámico:** Las superficies estructurales más jóvenes del Volcán San Salvador (o Cráter Boquerón) son zonas con peligro de erosión bajo al igual que de movimientos de laderas. Se puede dar recarga alta en las lavas jóvenes, especialmente si están fuertemente fracturadas o con brechamiento.*

*El volcán propio es un centro volcánico activo (última erupción fue en el año 1917) por lo que puede tener una actividad volcánica en el futuro y su problemática puede ser **alta** debido a esto.*

Superficie estructural más joven de Ilopango

Las superficies estructurales más jóvenes de la **Caldera de Ilopango** son laderas poco inclinadas y relativamente planas, siendo las superficies cubiertas por las últimas actividades volcánicas de caldera de Ilopango. Con respecto a las tobas de la Caldera de Ilopango corresponden a estructuras de Tierra Blanca Joven (TBJ) que se conservan.

La Caldera de Ilopango produjo caída y flujos piroclásticos de (TBJ), que cubren una extensión importante alrededor de la Caldera de Ilopango (de Lago de Ilopango). Esta cubierta por TBJ actualmente y en su mayoría esta erosionado por la erosión fluvial, pero todavía se conservan restos de la superficie estructural original, que todavía no están impactados por la erosión.

Superficie estructural más joven de Ilopango (erosionada)

Las superficies estructurales más jóvenes de la **Caldera de Ilopango** (erosionada) son laderas poco inclinadas y relativamente planas, siendo las superficies cubiertas por las actividades volcánicas más antiguas de caldera de Ilopango u otros volcanes de AMSS.

***Susceptibilidad a riesgo geodinámico:** Las superficies estructurales más jóvenes de la Caldera de Ilopango son zonas con peligro de erosión bajo, excepto los bordes de estas superficies que colindan con las laderas de erosión, especialmente con Badlands. Los diferentes tipos de erosión y de movimiento de ladera siempre reducen su extensión cerca de los escarpes expresivos de ladera y pueden provocar problemas en las zonas urbanizadas.*

Las superficies estructurales sobre TBJ tienen un equilibrio frágil y siempre es importante tener cuidado con cada actividad antrópica, porque puede provocar el origen de los diferentes tipos de erosión o hundimientos. Estas superficies son zonas de recarga alta.

La superficie estructural más joven de Ilopango (erosionada) puede presentar problemática intermedia relacionada a procesos de denudación.

La caldera es un centro volcánico activo (última erupción fue los años 1879 hasta 1880), por lo que puede tener actividad volcánica en el futuro. El diámetro del impacto catastrófico se estima de más de 30 km.

Superficie estructural de la forma genética de centro volcánico

Las superficies estructurales de la forma genética de centros volcánicos representa el relieve sobre los restos de los volcanes antiguos. Generalmente son laderas con topografía variante que incluyen sectores planos pero también con bastante inclinación; depende en que parte de Paleovolcán se ubican (pie o laderas). Sobre el pie del cuerpo volcánico tienen poca inclinación, pero sobre las laderas volcánicas

originales son más inclinados (como El Picacho). En su mayoría están predispuestas litológicamente, hay capas de ignimbritas, lava o espiclasticas consolidados. La superficie puede estar cubierta por restos de los productos volcánicos más jóvenes como TB o TBJ (de la Caldera de Ilopango), cenizas y escorias de Volcán San Salvador o centros volcánicos locales más pequeños. Está cubierta siempre está más predispuesta a presentar problemas de denudación dependiendo de la resistencia e inclinación de los estratos.



Foto 8 Paleovolcán Picacho

Las superficies estructurales son también las laderas que forman las formas volcánicas tales como Ignimbritas de Jayaque, Loma Larga, Nejapa, Panchimalco, Picacho y San Salvador Viejo.

Susceptibilidad a riesgo geodinámico: *Superficie Estructural de Sistema Volcanico (Ignimbrita de Jayaque); Superficie Estructural de Sistema Volcanico (Loma Larga); Superficie Estructural de Sistema Volcanico (Nejapa); Superficie Estructural de Sistema Volcanico (SS Viejo) tienen problemática **Alta** (>25°), **Mediana** (15-25°) y **Baja** (0-15°)*

*La Superficie Estructural de Sistema Volcanico (Picacho) tiene problemática **Muy Alta** (>25°), **Alta** (15-25°) y **Baja** (0-15°). Estas superficies son zonas de recarga mediana.*

Domo

Bóveda formada por erupciones de lava que no han podido extenderse a consecuencia de su poca fluidez, se podría esperar movimientos de ladera y sismicidad (en el caso

del domo de San Jacinto, la estructura esta fraccionada por la tectónica joven que ahora cuenta con algunas elevaciones (topes) y separaciones).

Susceptibilidad a riesgo geodinámico: Los domos dacíticos tienen las laderas relativamente inclinadas, pero debido a la viscosidad alta de la lava dacítica son siempre consistentes o rígidas. Hay poca erosión y movimientos de ladera si no se interviene por actividad humana (**Mediana** problemática). Puede haber recarga acuífera por fracturación.



Foto 9 Domos de San Jacinto

Maar

Es un cráter ancho y bajo producido por una erupción freatomagmática o una explosión volcánica causado por agua subterránea en contacto con lava caliente o magma; pueden existir problemas de subsidencia dentro del cráter, erosión y movimientos de ladera en los escarpes expresivos de la forma volcánica. Se puede dar recarga acuífera dentro de la zona de cráter.

Susceptibilidad a riesgo geodinámico: Los Maares siempre tienen en laderas alrededor del cráter de acumulaciones freatomagmáticas, que pueden ser muy permeables y el fondo del cráter también son acumulaciones permeables (agua subterránea). En su mayoría los maares están abiertos por la erosión, solo el maar Plan de Laguna está todavía sin drenaje natural. Los escarpes expresivos del cráter

son inestables y se puede esperar movimientos de ladera como derrumbes (Mediana problemática)

Cono cinerítico

Volcán que se forma debido a la acumulación de partículas y lava mezclada con gases, son de poca altura y usualmente están en la falda de estratovolcanes, calderas, etc., algunos podrían reactivarse nuevamente, pero otros ya solo están como relictos.



Foto 10 Cono cinerítico de Peña Colorada cerca de San Agustín



Foto 11 Cono cinerítico de Cerro Redondo cerca de Cantón Tutultepeque (Nejapa) con cubierta vegetal natural, posiblemente es una zona de recarga importante para los manantiales del sector.

Susceptibilidad a riesgo geodinámico: *El cono cinerítico siempre tiene laderas inclinadas, pero la escoria es material bien permeable y pudiéndose dar erosión superficial. La erosión subterránea también puede ocurrir. Las laderas de los conos cineríticos son un buen ambiente para la recarga del agua subterránea. Puede tener problemática **Muy Alta** (>25°) y **Alta** (0-25°) por denudación.*

Volcán escudo

El volcán escudo se forma debido a erupciones de lava bastante fluidas (basaltos), el cono lávico es el cráter donde sale el flujo lávico. La inclinación de ladera siempre está poco inclinada y la superficie corresponde con flujos lávicos, que se meteorizan rápidamente a laterita. La mayoría de los volcanes escudos son antiguos y en su superficie hay núcleos de bloques de lava como un pavimento que ahora protege el resto del perfil laterítico contra la erosión.



Foto 12 Superficie estructural del volcán escudo de Los Coyotes forma el “pavimento” de los núcleos de lava, que son restos de la roca no meteorizada en el perfil laterítico



Foto 13 Cono lávico antiguo (444 mts) cerca de Cantón Tutultepeque (Nejapa) con el “pavimento” de los bloques lávicos.



Foto 14 Detalle de pavimento de bloques de lava sobre de cono lávico. (Cantón Tutultepeque, Nejapa)

Susceptibilidad a riesgo geodinámico: La superficie del volcán escudo son laderas siempre poco inclinadas y formadas por lava basáltica. La lava basáltica se meteoriza relativamente rápido y el suelo laterítico se erosiona quedando sobre la superficie concentrados los núcleos de bloques de lava como un pavimento. Sobre de la laterita viene reptación de los bloques. (**Mediana** problemática). La recarga es mediana hasta baja dependiendo del nivel de meteorización.

Flujo Lávico Superior e Inferior (superficies con lavas no distinguidas)

Son laderas poco inclinadas, que forman los pies de los volcanes antiguos o los pies de los centros volcánicos locales, frecuentemente de los volcanes escudos. Las lavas son siempre meteorizadas superficialmente en mayor o menor grado y generalmente están cubiertas por el “pavimento” de bloques de lavas (núcleos de bloques de lavas meteorizadas) cuando el suelo laterítico es “lavado” por la erosión y sobre la superficie se acumulan los núcleos de lava más resistentes. Este tipo de superficies se extiende generalmente en el pie del paleovolcán Guaycume y en sector del lineamiento de Ipalá donde son varios paleovolcanes locales. Generalmente las capas de lavas son bastante profundas y están parcialmente cubiertas por los productos volcánicos más jóvenes de la Caldera Ilopango o los volcanes locales más jóvenes (por ejemplo de oleadas piroclásticas o surges del maar Bonete en Nejapa).

Susceptibilidad a riesgo geodinámico: Especialmente la parte norte que tiene una importante superficie relativamente cubierta por lavas de gran espesor de varios orígenes. Las laderas son poco inclinadas, pero siempre meteorizadas. La superficie tiene igual carácter que los volcanes escudos, con el perfil de laterita y una capa superficial de pavimento de bloques lávicos. Siendo sectores de **baja** problemática.

La recarga de agua subterránea es mediana hasta baja dependiendo del nivel de meteorización.

Cuesta de Erosión

Cuesta es un borde con escarpe, como una forma de relieve producida por la erosión y denudación generalmente en aquellas partes donde los terrenos tienen sus capas ligeramente inclinadas (una capa más resistente a la erosión las forma y eso la hace un área estable). En el AMSS, las cuestas limitan siempre las superficies estructurales. La formación de una cuesta supone la existencia de capas alternativamente duras y blandas, todas ellas ligeramente inclinadas.

Susceptibilidad a riesgo geodinámico: El borde y escarpe de cuesta es un lugar expuesto para la erosión intensa, incluyendo la erosión subterránea. Frecuentemente es impactada por movimientos de ladera, especialmente por derrumbes. Se recomienda respetar este borde, así como, escarpe.

Formas y unidades de denudación y meteorización

Zona con meteorización profunda

Las zonas con meteorización profunda se conservan generalmente como restos de perfiles sobre las superficies estructurales ubicadas cerca de la división hidrológica de una cuenca, donde todavía no actúa la erosión retrograda.

Algunos perfiles de laterita y esmectita sobre los restos tectónicos de paleovolcanes y bloques diástróficos están cubiertos por TB y TBJ (como en el caso de deslizamiento de Carretera de Oro km. 18) y significan un peligro oculto para movimientos de ladera.

Las lavas basálticas y andesíticas generalmente se meteorizan a laterita. Los epiclasticos que tienen en su mayoría estos bloques de lavas también, pero las lavas o flujos piroclásticos ácidos producen el mineral arcilloso esmectita que tiene propiedades como la laterita, lo que significa, que tiene buen ambiente para la reptación, deslizamientos y flujos de escombros.



Foto 17 Perfil de lava andesítica meteorizada. Sector del Bálsamo



Foto 18 Perfil profundo de la laterita completa. Sector del Bálsamo



Foto 16 Alteración hidrotermal de restos tectónicos de paleovolcán Ilopango.

Susceptibilidad a riesgo geodinámico: La alteración hidrotermal produce minerales arcillosos, que tienen similar influencia como la laterita y esméctita. La alteración hidrotermal tiene una extensión siempre local, pero profunda. Puede iniciar movimientos de ladera, como es en el caso de El Picacho.

La erosión fluvial es uno de los complejos de procesos exodinámicos más intensos sobre la superficie del AMSS actualmente produciendo muchos problemas, especialmente en las zonas urbanizadas. El conocimiento de los procesos de erosión podría mejorar la mitigación de las áreas impactadas o mejorar los proyectos en el futuro, de manera que no se originen de nuevo.

La erosión fluvial engloba todos los procesos de erosión, provocada por la actividad de agua que corre. El agua pluvial (de lluvia) inicia estos procesos sobre la superficie. Los resultados de la erosión fluvial son después las formas típicas del relieve. La erosión fluvial se puede dividir en procesos que tienen los siguientes impactos:

Erosión planar (sheet run off) – degradación de suelo para agricultura

Erosión por surcos (rill erosion) - degradación de suelo para agricultura, erosión de taludes de las construcciones

Erosión por barrancos o cárcavas (gully erosion, badlands) - degradación de suelo para agricultura, erosión de taludes, origen de cárcavas o barrancos.

Erosión del río – erosión vertical y erosión lateral – derrumbes de bordes de laderas, cambio de ubicación de los lechos de ríos

Erosión subterránea – hundimientos y erosión superficial de badlands

La erosión fluvial ocurre sobre todas las laderas a lo largo del AMSS, pero con diferente intensidad. Las razones principales para las diferentes intensidades son condiciones como la inclinación de la ladera, la composición litológica de la roca y suelo (las condiciones geotécnicas son muy importantes), distancia de la base local de erosión (posición en la cuenca – alta, mediana o baja), la madurez del relieve (meteorización de roca), el equilibrio del perfil longitudinal del río, permeabilidad de suelo o roca, saturación, compactación etc.

Superficie estructural exhumada

La superficie estructural exhumada es un estrato más resistente que aparece o es descubierto por la denudación (erosión y movimientos de ladera), lo que significa, que son laderas predisuestas por las capas de rocas resistentes (litológicamente), donde se detuvo la denudación general (complejo de los procesos de denudación, como erosión o movimientos de ladera) de las superficies estructurales originales. Generalmente son laderas planas con poca inclinación hasta bien inclinadas. Depende donde (en que parte del Paleovolcán) se preservan. Sobre el pie del cuerpo volcánico tienen poca inclinación, pero sobre las laderas volcánicas originales son más inclinadas. La superficie puede estar cubierta por restos de los productos volcánicos más jóvenes como el TB o TBJ (de la Caldera de Ilopango), cenizas y escorias de Volcán San Salvador o centros volcánicos locales más pequeños. Está cubierta siempre está erosionada según la resistencia e inclinación de los estratos.

Hay planicies de diferentes niveles de altura que corresponden a capas de flujos piroclásticos y lavas consolidadas que están ubicados entre los barrancos, quebradas o cañones bien profundos y donde es importante dejar una distancia de protección en los escarpes expresivos de ladera de los drenajes.

Susceptibilidad a riesgo geodinámico: *Las superficies exhumadas poco inclinadas (menores que 15 grados) son las zonas con peligro de denudación **baja**, a excepción de los bordes de estas superficies que colindan con las laderas de erosión. Las superficies mayores que 15 grados tiene problemática **mediana**. Estas superficies son zonas de recarga mediana.*

Ladera de erosión, así como, denudación y su borde (orilla)

Las laderas de erosión forman las vertientes de los valles de erosión (quebradas, barrancos, cañones etc.). Generalmente tienen una inclinación alta, que permite la erosión de “suelo” alta hasta intensa. Según de las condiciones litológicas la erosión es intensa o con menor intensidad. Las laderas de erosión de las zonas con una capa de meteorización (lateritas y las rocas con esméctita), cubiertas (o con capas) de Tierra Blanca o cenizas de volcán San Salvador (materiales muy suaves y no consolidados) son las zonas más impactadas por la erosión de suelo y erosión fluvial. La erosión sucede junto con los procesos de movimiento de ladera como son los flujos superficiales y flujos de escombros. En algunos sectores son zonas de descarga de las aguas subterráneas (manantiales).

Las laderas de erosión se dividieron en badlands y otras laderas de erosión. Badlands es una ladera de erosión, que depende bastante de condiciones litológicas específicas (TBJ).



Foto 20 Valle erosional (barranco) con laderas de erosión representa la parte mediana de los valles típicos de la Cordillera de Bálsamo. Las laderas de erosión están inclinadas debido algunos escalones de las capas más rígidas.



Foto 21 Valle de sector del Bálsamo con laderas de erosión muy inclinadas, que son ahora usadas para la agricultura artesanal, que provoca la erosión de suelo intensa (erosión planar, de surcos hasta de barrancos o cárcavas).



Foto 24. Erosión de suelo por barrancos o cárcavas y degradación de suelo hasta la roca de fondo rocoso en las laderas de erosión con inclinación media en el Bálamo



Foto 25. Erosión planar y de surcos degrada el suelo hasta roca madre.

Susceptibilidad a riesgo geodinámico: *La ladera de erosión tienen diferentes inclinaciones, que son importantes para la erosión fluvial. También es importante la litología y meteorización de roca, pero siempre las laderas de erosión son expuestas a erosión, siendo las laderas con inclinación mayor que 25 grados con problemática **muy alta**; las laderas con inclinación entre 15 hasta 25 grados tienen problemática **alta** y menores que 15 grados tienen problemática **mediana**.*

Escarpe Expresivo (borde u orilla) de ladera de erosión o denudación (generalmente):

Son cambios de inclinación de ladera hasta casi ser verticales; interrumpen la continuidad de la morfología, se recomienda dejar una distancia de protección debido a problemas de erosión y de movimientos de ladera que se dan normalmente, pero que se pueden ver acelerados debido a la urbanización. De haber dos escarpes expresivos paralelos profundos, se dice que conforman un cañón.

Normalmente y con el tiempo estos escarpes se degradan generalmente por derrumbes, erosión lateral y subterránea.

Susceptibilidad a riesgo geodinámico: *Bordes de planicies o líneas donde hay un cambio de la inclinación de ladera son zonas con peligro de erosión superficial y subterránea, así como, movimientos de ladera son sectores con problemática **muy alta**. Siempre se recomienda dejar una zona de protección, donde pueden influir estos procesos exodinámicos.*

Badlands

Badlands pertenecen a las laderas de erosión, que dependen de las condiciones litológicas especiales de Tierra Blanca Joven (TBJ).

Las superficies estructurales de Tierra Blanca Joven (TBJ) o Tierra Blanca más antigua (TB) que son suaves y poco resistentes son generalmente erosionadas a badlands. Son terrenos con una densidad de red de drenaje muy alta hasta extrema (quebradas muy cercanas entre sí) y con los procesos de erosión muy intensos. Los badlands se originan antes que todo en la caída y flujos piroclásticos más débiles de TBJ – ceniza y flujos piroclásticos de pómez de la erupción pliniana más reciente de la Caldera de Ilopango. TBJ con su consistencia de compactación baja se erosiona

fácilmente y tiene una permeabilidad relativamente alta y por eso también se inicia la erosión subterránea intensa. La erosión subterránea se origina por el agua subterránea que sale afuera por medio de manantiales o nacimientos y trae afuera del suelo las partículas finas y minerales solubles. Cerca de los nacimientos el suelo está saturado debido al agua y en la ladera inclinada hay inestabilidad. Por eso la erosión subterránea produce un complejo de procesos que degradan el escarpe como son el colapso (hundimiento) de superficie (rápido y despacio) y movimientos de ladera (reptación de suelo o movimientos de ladera pequeños). El agua que sale afuera puede producir la erosión de suelo de tipo planar o de surcos hasta barrancos o cárcavas.



Foto 26 Inicio de barranco o cárcava provocado por intervención antrópica del terreno en TBJ. (Cantón Veracruz, Tonacatepeque)

Podría originarse también licuefacción durante temblores o terremotos en sectores saturados. TBJ absorbe hasta 40% del agua de lluvia, lo cual podría permitir la licuefacción. Las laderas de las quebradas en la zona de badlands son muy inestables por la erosión de suelo y muy inestables por los movimientos de ladera, especialmente debido a flujos. Todos estos procesos no son convenientes para la urbanización y técnicamente es muy difícil parar o eliminar estos procesos. Para disminuir hasta cierto punto los procesos de erosión en la TBJ una posibilidad es la compactación de suelo, lo cual disminuye la infiltración del agua pluvial y para la erosión subterránea. Pero esta provisión es siempre temporal dependiendo de la estructura geológica (fallas, zonas de infiltración de agua pluvial, capas impermeables en el fondo etc.). Es necesario hacer una investigación detallada de las propiedades y comportamiento de

este material geológico, de manera que se pueda tomar las decisiones más acordes con los procedimientos que normalmente son usados en el resto del mundo, siendo uno de ellos evitar que este material geológico entre en contacto con el agua.

Algunos terrenos de badlands fueron urbanizados o rellenados para diferentes construcciones. Generalmente el badland fue nivelado técnicamente a planicie o a alguna superficie poco inclinada, lo cual significa que las crestas fueron cortadas y ese material sirvió como relleno de quebradas. Cambiando el drenaje superficial y el sistema de drenaje subterráneo.



Foto 27. Erosión de suelo en badlands es muy intensa, especialmente cuando estos terrenos se usan para la agricultura artesanal.

Susceptibilidad a riesgo geodinámico y recarga: Los Badlands es una unidad geomorfológica con problemática **muy alta** para la erosión superficial y subterránea, así como, para los movimientos de ladera, especialmente debido a flujos. La peligrosidad de licuefacción es mediana.

Por la alta densidad de drenaje, saturación de agua de TBJ y alta permeabilidad los badlands son zonas de recarga alta.



Foto 28 La erosión de suelo sucede rápidamente cuando los Badlands se usan para la agricultura artesanal. Zona de escarpes expresivos de la Caldera Ilopango.

Tipo de valle erosional

La mayoría de valles son valles erosionales, lo que significa, que en sus lechos ocurre erosión fluvial vertical y se profundizan permanentemente. La erosión fluvial vertical respeta las condiciones litológicas y tectónicas, especialmente la resistencia de las rocas contra la erosión. La curva de erosión generalmente no está equilibrada y por eso se originan escalones hasta saltos, pero también algunas partes son rellenadas por aluviones (Llanura aluvial). Las diferentes condiciones litológicas y tectónicas provocan las curvas de los ríos, que da como resultado la erosión lateral de ríos.

Barranco o valle de forma de V

Los Barrancos tienen el cauce excavado por la escorrentía superficial concentrada. En la cuenca alta donde la inclinación es alta, generalmente tienen forma de V. Predomina la erosión vertical.

Quebrada

La Quebrada es una corriente natural de agua que normalmente fluye con continuidad, pero que, a diferencia de un río, tiene escaso caudal, que puede desaparecer durante el verano. En el AMSS, generalmente predomina la erosión vertical y las quebradas son el resultado de estos procesos.

Cañón

El Cañón es un accidente geográfico provocado por un río que excava en terrenos blandos una profunda separación de paredes casi verticales.

Valle ancho

Este tipo de valle se da en relieve plano o equilibrado donde no hay erosión vertical, solamente lateral. Puede darse recarga acuífera (especialmente en zonas fracturadas, o con fallas) ya que agua corre despacio.



Foto 29 Cañón de Río Apanasítio

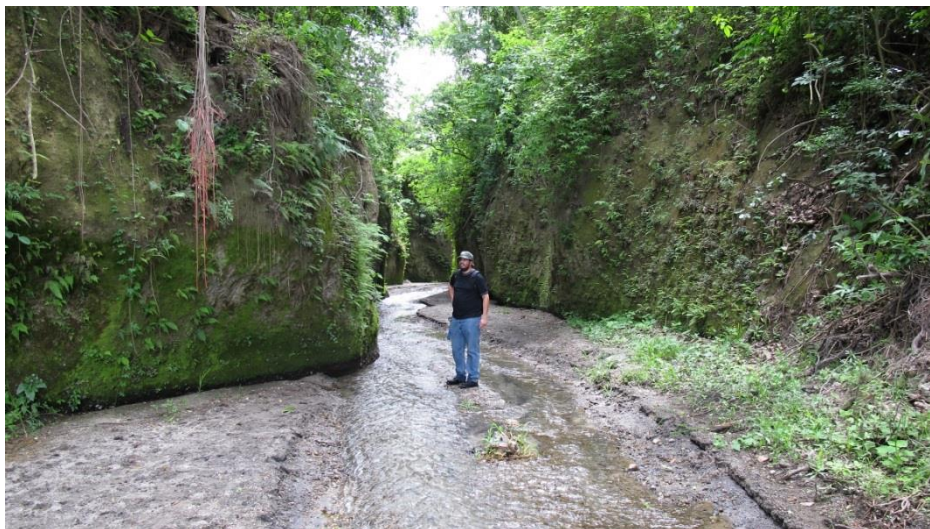


Foto 30 Cañón de Río Acelhuate cerca de Aguilares, se originó en flujo de ignimbritas resistentes.



Foto 31 Cañón de Río Las Cañas con Llanura aluvial; durante estos últimos 30 años ha tenido una dinámica fuerte. Se supone, que la urbanización intensa de su cuenca provoco una erosión vertical y lateral enorme (hasta 8 mts bajo el lecho de río y las paredes se han apartado decenas metros. Es de suponer, que el pavimento artificial facilita un desagüe alto y rápido de zonas urbanas disminuyendo la infiltración, que provoca inundaciones con erosión intensa.

Susceptibilidad a riesgo geodinámico: *Los lechos de valles erosionales tienen problemática **muy alta** a erosión vertical y lateral de ríos. La erosión lateral siempre produce derrumbes o deslizamientos poligenéticos.*

*En el valle ancho falta la erosión vertical, pero siempre la erosión lateral es más activa, entonces es **alta**.*

Las regiones más impactadas por la erosión fluvial son las siguientes:

- Laderas de erosión, que incluyen los badlands y sus bordes con laderas de superficies estructurales etc.; vertientes de fallas y escarpes expresivos de la Caldera Ilopango, que están compuestas por TBJ (ceniza y flujos piroclásticos mal compactados y flujos de pómez) en los municipios de Ilopango, Soyapango, San Martín, Tonacatepeque etc.
- Laderas estructurales y laderas de erosión del volcán San Salvador y bloques diestróficos ubicados en la caldera Jayaque (cubiertos por productos volcánicos sueltos), que se componen sobre todo de escoria, ceniza y coluvio suelto (se intercalan con TB y pómez de Coatepeque en San Tecla). Las laderas cubiertas por flujos lávicos son erosionadas muy poco (bajo).

- Laderas estructurales muy inclinadas y laderas de erosión de barrancos de restos del estratovolcán antiguo de El Picacho
- Laderas y escarpes expresivos de calderas, cráteres de maeres y algunas vertientes de fallas (Caldera Ilopango, Caldera Planes del Renderos, cráter Boquerón, maar Plan de Laguna; vertiente de falla de margen sur de Fosa Central etc.)

Formas de movimientos de laderas

Generalmente los movimientos de ladera gravitacionales son procesos en donde la gravedad participa como la fuerza que provoca el movimiento.

Influye como fuerza estabilizadora de la tensión en la superficie de deslizamiento, la consolidación o consistencia de la roca o del manto de los productos de meteorización y hay que tomar en cuenta que estas propiedades también cambian con el tiempo.

La tensión provoca deformaciones y siempre que el nivel de tensión en la superficie de deslizamiento no sobrepasa los límites de solidez o de consolidación, las roturas en los planos de deslizamiento no inician, pero la estructura de la roca o los productos de meteorización si cambian, ya que por ejemplo en la roca o suelo comienza el proceso de reptación (creep en inglés). Si la tensión en la superficie de deslizamiento sobrepasa la solidez de la roca se originan los planos de deslizamiento y el movimiento o adelantamiento; en las laderas muy inclinadas o casi verticales ocurre un derrumbe.

Los movimientos de laderas en el AMSS, el cual está compuesta exclusivamente por el relieve volcánico o tectónico, tienen una influencia muy importante, especialmente debido a la vulnerabilidad de la capital.

El origen de los movimientos de ladera depende de algunos factores que generalmente se combinan.

En la historia moderna del AMSS han sucedido catástrofes enormes que están relacionadas con flujos escombros que se originaron en la ladera de El Picacho, avalanchas rocosas que se originaron por derrumbes en los escarpes de las vertientes de fallas o en los escarpes expresivos de los cráteres o calderas; por ejemplo los flujos de escombros que bajaron de la cumbre de El Picacho los años de 1934 y 1982 después de lluvias intensas y el derrumbe de una avalancha rocosa en las Colinas de Santa Tecla el año 2001 por terremoto.

En el AMSS hay presencia de todos los tipos de movimientos de ladera, que se dividen en:

- Reptación – sobre productos de meteorización
- Deslizamiento – en los productos de meteorización

- Flujos – sobre el coluvio, productos de meteorización y por mayoría en ambiente de TBJ
- Derrumbes – sobre bordes de cambio de inclinación por mayoría de ignimbritas, lavas o epiclasticos consolidados

Según la leyenda del Mapa geomorfológico los movimientos de laderas impactan o están conectados principalmente con las formas y unidades geomorfológicas siguientes:

Formas y unidades tectónicas y estructurales

- Vertiente tectónico de falla o plano de falla desnuda
- Escarpe expresivo de forma volcánica
- Superficie estructural exhumada
- Superficie estructural de la forma genética de centro volcánico
- Resto tectónico de la forma volcánica
- Cuesta

Formas y unidades por denudación

- Ladera de erosión y denudación y su borde (orilla)
- Badlands
- Cabecera de movimiento de ladera
- Trayectoria de flujo

Formas y unidades de acumulación

- Acumulación de deslizamiento
- Acumulación de derrumbe.

Cabecera de movimiento de ladera

Lugar histórico (cicatrices) donde se puede esperar problemas con algún movimiento de ladera por su reactivación en el mismo lugar o cerca. La cabecera de movimiento de ladera son generalmente los bordes con cambio de la inclinación, acompañados por las grietas o trincheras. Las cabeceras expresivas tienen especialmente deslizamientos,

flujos y derrumbes. Derrumbes se producen en su mayoría en los escarpes recientes. La reptación generalmente no tiene cabecera.



Foto 32 Cabecera de deslizamiento poligenético con las grietas hasta trincheras como un inicio de deslizamiento de la ladera en la laterita sector del Bálsamo



Foto 33 Cabecera del flujo de escombros en la ladera estructural muy inclinada (hasta 40 grados) de El Picacho; año 2009. Bloques inestables de lava descansan en a la tefra alterada hidrotermalmente.



Foto 34 Cabecera de flujos escombros con grietas recientes que provoco uso de la agricultura artesanal. Este actividad va hacer este proceso más activo en los proximos años.



Foto 35 Cabecera original de deslizamiento poligenético de Carretera km 18 con las grietas y trincheras

Susceptibilidad a riesgo geodinámico: *Cabeceras de movimientos de laderas son siempre zonas peligrosas y con problemática **muy alta** para movimientos de laderas y **muy alta** para erosión superficial y subterránea.*

Trayectoria de flujo

Trayectorias de flujos son sectores donde podrían pasar los flujos escombros. Generalmente están erosionados hasta la roca de fundamento, pero hay casos cuando los restos de flujos o acumulaciones de flujos pequeños se van acumulando en la trayectoria (quebrada o drenaje) esperando otro flujo más grande.

Susceptibilidad a riesgo geodinámico: *las trayectorias de flujos son siempre zonas estrechas, pero bien peligrosas y con problemática **muy alta** para movimientos de laderas y **muy alta** para erosión superficial y subterránea.*

Paleodrenaje

El paleodrenaje indica sistemas de drenaje que tienen algunos lechos abandonados, debido a que río cambio su curso (naturalmente o artificialmente). Actualmente estos sistemas en San Salvador han sido cubiertos o dañados por la urbanización.

Salto

El Salto se origina sobre el cambio de material geológico, de estratos o fallamiento que produce caídas de agua o cataratas en drenajes. El salto es también el frente de la erosión retrograda y tiene siempre una tendencia a retroceder, lo que significa, que el derrumbe se erosiona.



Foto 38 El salto cerca de Caldera de Ilopango



Foto 39 El salto en el pared de Cañón de Río Las Cañas corta la capa de TBJ, que es muy suave y no resistente. El salto retrocede rápido y deja atrás una cárcava profunda.

Susceptibilidad a riesgo geodinámico: *el salto tiene problemática **muy alta** a movimientos de ladera y erosión fluvial.*

Formas y Unidades de Acumulación

Planicie volcánica fluvial policíclica y poligenética

Las planicies volcánicas fluviales se forman en las faldas de los volcanes y sobre las depresiones adyacentes. El perfil geológico es un complejo de rocas, tobas y sedimentos generalmente poco consolidados. El relleno de la depresión salvadoreña es policíclico (porque se dan procesos de depósito y denudación) y también poligenético (porque son productos de erupciones volcánicas y de los materiales que al ser denudados se depositan en la planicie). Generalmente predomina la erosión vertical, las quebradas y ríos cortan estos depósitos. Las planicies de este tipo se produjeron bajo el pie del Volcán San Salvador y de las depresiones de la Fosa Central.

Hay sectores de planicie volcánica fluvial policíclica y poligenética donde la lava está más superficial.

***Susceptibilidad a riesgo geodinámico:** Planicies volcánicas fluviales tienen laderas poco inclinadas y su problemática a la erosión y movimientos de laderas es **baja**. En esta zona se podría dar recarga acuífera.*

Relleno poligenético natural de depresión o de valle con drenaje

El relleno poligenético en valle y en depresiones menores tiene un carácter transitorio, porque está expuesto a la erosión fluvial. Entre el material que se ha acumulado en depresiones y valles dentro de este, se puede mencionar el producto de erupciones de los diferentes volcanes y la acumulación producto de la denudación entre otros. En esta zona se puede dar recarga acuífera.

***Susceptibilidad a riesgo geodinámico:** Esta unidad geomorfológica tiene una problemática **mediana** de erosión fluvial y movimientos de ladera. En esta zona se puede dar mediana recarga acuífera.*

Relleno poligenético natural de depresión sin drenaje

El relleno poligenético natural de la depresión sin drenaje se origina en las depresiones volcánicas como son maeres y cráteres (Plan de Laguna, Cráter Boquerón etc.)

***Susceptibilidad a riesgo geodinámico:** El relleno *poligenético natural de la depresión sin drenaje* representa áreas poco extensas y su problemática a erosión y movimientos de laderas es **baja**, pero a inundaciones, acumulaciones de aluviones y coluvios es **alta**. En esta zona se puede dar recarga acuífera.*

Llanura aluvial

Se le llama llanura aluvial o llanura de inundación, ya que el río cuando viene crecido la ocupa toda (periodos de retorno de inundaciones pueden variar). El lecho del río se desplaza con bastante facilidad, inundando zonas alejadas del lecho principal actual. Las personas ocupan estas áreas al desconocer los periodos de retorno de las inundaciones provocando el estrechamiento del cauce y por lo tanto propiciando problemas grandes de erosión e inundación en zonas urbanas. Son zonas de recarga importante, así como de descarga de las aguas subterráneas y donde la contaminación que se vierte de las zonas urbanas puede entrar a los acuíferos (entrada de contaminantes puede ser directa si hay fracturamiento en roca).

Cauce o lecho de río en llanura aluvial siempre cambia su posición durante la inundación.

El impacto humano (tales como puentes, bóvedas, tuberías, muros de canalización etc.), puede provocar erosión natural en otros sectores, afectando infraestructura que normalmente no hubiera sido perturbada.



Foto 40 Llanura aluvial de Q. El Champezole, cerca de Caldera de Ilopango



Foto 41 Llanura aluvial del Río Apansitío, al norte del AMSS

La diferencia entre el cono activo y fósil reside en que el primero está actualmente en funcionamiento y el segundo ha quedado abandonado siendo actualmente un relicto. Son zonas de recarga importante.



Foto 43 Cono aluvial activo de Arenal de Cujuapa, sector de Caldera de Ilopango

Susceptibilidad a riesgo geodinámico: Cono aluvial tiene problemática **muy alta** a inundaciones, acumulaciones de aluviones y licuefacción. La susceptibilidad a movimientos de ladera es baja.

En esta zona se puede dar recarga acuífera.

Cono aluvial fósil

Cono aluvial fósil es una forma de modelado fluvial donde anteriormente se depositaron sedimentos de ríos y quebradas de manera constante, tienen una silueta cónica o en abanico y una suave pendiente. Actualmente ha quedado abandonado siendo un relicto.

Susceptibilidad a riesgo geodinámico: Cono aluvial fósil tiene una problemática **mediana** a erosión y **baja** a movimientos de ladera. A licuefacción es mediana. Son zonas de recarga importante.

Terraza fluvial

Terraza fluvial es una estructura o forma que se origina debido a la acumulación de grava en la llanura aluvial antigua y que está cortada por la erosión vertical de río, quedando como resto de llanura aluvial antigua.

Susceptibilidad a riesgo geodinámico: Terraza fluvial tiene una problemática mediana a erosión y baja a movimientos de ladera. A licuefacción es mediana. Son zonas de recarga acuífera.

Acumulación de Deslizamiento Poligenético

El deslizamiento poligenético y deslizamiento planar son movimientos de ladera importantes (algunos antiguos), que se pueden observar por la escala de trabajo, y que de ser alterados por la urbanización pueden reactivarse.

Los coluvios, que son los productos de movimientos de ladera; pueden ser acuíferos locales de explotación limitada o temporal. Las áreas susceptibles de deslizamientos son las zonas profundamente meteorizadas con minerales arcillosos de laterita, esmectita y coluvios antiguos.

Los coluvios son muy suaves y no consolidados, lo que significa, que no están estabilizados y son afectados por la erosión fluvial u otros movimientos de ladera. Por su fracturación no tienen consistencia.



Foto 44 Deslizamiento poligenético de la Carretera de Oro km 18, provocado por el corte artificial de la autopista, se originó sobre la capa de laterita (0.5 m del grosor aproximadamente) abajo de los flujos piroclásticos y caída de TB y TBJ. La laterita se originó como perfil meteorizado sobre unos restos tectónicos de cono cinerítico antiguo.



Foto 46 Derrumbes de las paredes del Cañón de Río Las Cañas, provocados por erosión lateral de río.

Los coluvios son muy suaves y no consolidados, lo que significa, que no están estabilizados y son afectados por la erosión fluvial u otros movimientos de ladera.



Foto 47 Derrumbe de talud de la carretera provocado por corte artificial.

Por su fracturación no tienen coherencia. Tienen alta permeabilidad, lo que significa, que son muy buenas zonas de recarga de agua subterránea y pueden ser acuíferos locales de explotación limitada o temporal.

Susceptibilidad a riesgo geodinámico: *Acumulaciones de deslizamientos (coluvio) tienen una problemática **muy alta** a erosión fluvial y movimientos de laderas. La licuefacción es mediana. Son zonas de recarga acuífera.*

Deposito Artificial

Son depósitos antrópicos por obras de corte y terracería.

Susceptibilidad a riesgo geodinámico: *Depósito artificial tiene una problemática **baja** a erosión y **baja** a movimientos de ladera. A licuefacción es mediana.*

Relleno sanitario

Sector no está compactado y su relieve se cambia con el tiempo. Vienen procesos biológicos y emana el gas de los procesos sépticos.

Peligrosidad por Dinámica Superficial según Geomorfología

Nivel de peligrosidad de unidades y formas geomorfológicas para la urbanización

La geomorfología dinámica permite evaluar la superficie del territorio tanto por los procesos geomorfológicos exodinámicos, así como, los endodinámicos; los cuales han ocurrido a lo largo del tiempo y los que están sucediendo actualmente, siendo el relieve existente un resultado de la combinación de estos procesos. El análisis geomorfológico, como un método deductivo estudia estos procesos, mapeando y verificando en el campo los procesos mencionados anteriormente. En combinación con la evaluación litológica aporta una base de datos nueva, que después permite evaluar diferentes sectores según su conveniencia para los diferentes tipos de uso de suelo, además de dar alguna información para la geología ingeniera, Protección Civil, Ordenamiento Territorial etc.

Algunos procesos que no corresponden con las actividades humanas o antrópicas pueden crear peligro y complicar estas actividades antrópicas. La evaluación de cada unidad y forma geomorfológica desde este punto de vista permite asignar un nivel de peligrosidad para un determinado uso de suelo.

Mapa de Peligrosidad por Dinámica Superficial según Geomorfología

Las zonas con problemáticas catalogadas como bajas, mediana, altas y muy altas según geomorfología, son un indicador de la dinámica superficial que se puede esperar en algunos sectores, sin embargo, es importante realizar estudios preliminares y visita de campo para valorar situación actual del terreno, esto ayudara a identificar estudios que tienen que realizarse.

Cuando una zona este en mediana o baja problemática hay que valorar que si esta al pie o en corona de zona que este en alta o muy alta problemática. El mapa indica en cada polígono su peligrosidad, pero hay que valorar el entorno también.

Es significativo realizar **estudios preliminares** para un proyecto ya que esta fase es la que marcara las consideraciones a tomar en cuanto al proyecto en el futuro; esto corresponde a la etapa de anteproyecto y esencialmente es la recopilación de información bibliográfica y cartográfica que exista en el área de estudio, además de visitas de reconocimiento, lo cual ayudara a conocer los lugares más adecuados para la construcción de la obra dependiendo de las condiciones geológicas y geotécnicas. Su resultado tiene que ser un informe en donde se haga la planificación de los estudios de detalle (de ser necesarios).

En cuanto a la recopilación de información es necesario conseguir los estudios hechos en esa área o cerca de esta, debiendo analizar dicha información para conocer algo sobre la geología, topografía, aguas, estratigrafía, litología, problemática, riesgos etc., además de la revisión de fotografías aéreas e imágenes satelitales existentes.

La visita de reconocimiento sirve para comparar la información recolectada contra la realidad, ayudando a conocer la factibilidad de la construcción, así como, información geológica, estructural, geodinámica, geomorfológica, estado de las aguas entre otros, además de ayudar a elegir qué tipo de programa de exploración será necesario.

Esta visita de reconocimiento es muy importante ya que se puede descartar o aceptar un determinado terreno.

Los **estudios de detalle** pueden ser útiles en la etapa de construcción y operación de la obra, siendo el objetivo de esta etapa el conocimiento a profundidad de la geología de la zona, por lo que el informe debe describir las características geotécnicas del terreno para fines de diseño y pueden consistir en lo siguiente, dependiendo del nivel de importancia de infraestructura:

- Elaboración de un mapa geológico-geotécnico de la superficie del terreno a una escala adecuada
- Mapeo geotécnico del subsuelo por medio de técnicas directas e indirectas que permiten conocer la distribución de las unidades litológicas y sus características geológicas e ingenieriles
- Obtención de muestras del subsuelo para estudios de laboratorio, y/o realización de pruebas in situ para conocer las propiedades índice y mecánicas de los suelos (cementaciones y estabilidad de taludes), así como, de los macizos rocosos.
- La información obtenida de las actividades anteriores debe ser procesada e interpretada adecuadamente para que sea de utilidad en el diseño.
- Consideraciones frente a riesgos geológicos e impactos ambientales.

Es importante la selección y la programación de las técnicas que pueden usadas en el estudio, y que pueden mantener los costos bajos y obtener la información adecuada lo cual ayudara a que no existan problemas en un futuro.

Fallas Geológicas

Para investigar la presencia de fallamiento geológico se puede tomar en cuenta algunos aspectos tales como, este trabajo debe ser realizado por un profesional de geología o ingeniería geológica:

En los sensores remotos que se pueden visualizar cambios de tonalidad en el suelo, vegetación, cambios topográficos, componentes lineales de canales de drenaje o las combinaciones de éstos (Fig. 48).

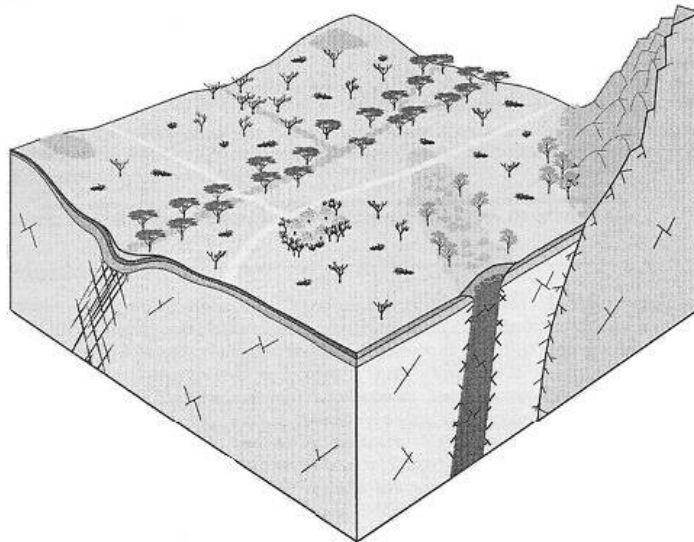


Figura 48 Características superficiales que pueden ser indicadores de fracturamiento/fallamiento: vegetación, cambios topográficos, patrón de drenaje, tonos de suelo y fracturas. [Nils, 2002:p.9]

Las estructuras geológicas pueden tener manifestaciones topográficas que pueden ser atribuidas a meteorización, erosión, compensaciones de la superficie y compactación de los estratos inferiores. Hay depresiones y escarpes (hundimientos y zonas de elevación) en la superficie que están alineadas o cambios abruptos en la topografía asociados con fallas mayores.

Los componentes lineales del drenaje pueden indicar un alineamiento con zonas de fallamiento subyacentes. Un canal también puede actuar como conducto de recarga en caso intercepte una zona de fallamiento. La combinación de alineamientos vegetales y sistemas de drenaje podrían mostrar agua subterránea controlada por fallamiento.

El drenaje sirve de ayuda para localizar fallamiento, éstos se pueden identificar, por ejemplo, en los cambios abruptos en la dirección que lleva el drenaje, teniéndose una relación entre los alineamientos y el sistema de drenaje. Generalmente, el drenaje controlado estructuralmente puede mostrar el patrón que se muestra en la figura 49.

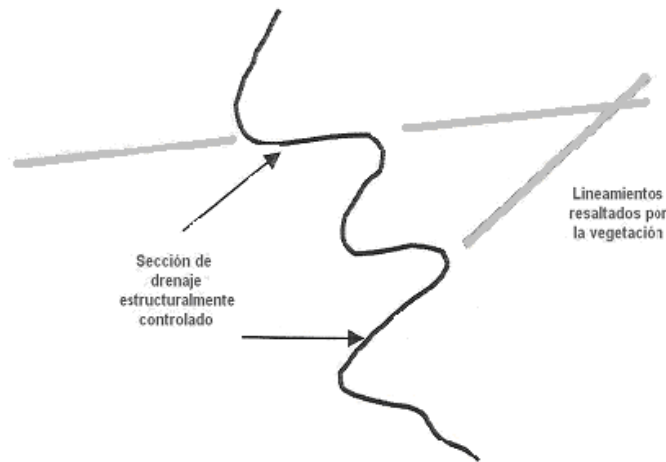


Figura 49 Drenaje estructuralmente controlado, que sirve para inferir que existe un alineamiento.
[Nils,2002:p.16]

La vegetación anómala puede servir como una guía directa para las investigaciones de fallamiento. El agua que fluye entre las fracturas puede mantener constantemente vegetación no importando si es estación seca. Se puede observar en patrones lineales comúnmente asociados con el drenaje, canales o agrupaciones individuales de árboles donde el agua subterránea es poco profunda.

En imágenes satelitales la vegetación ayuda a identificar componentes lineales, éstos se pueden identificar como vegetación agrupada, también como cambios de tono debido a diferente tipo de vegetación, si existe una combinación entre drenaje controlado y vegetación, se podría tener más seguridad de la existencia de fallamiento como se muestra en la figura 50.

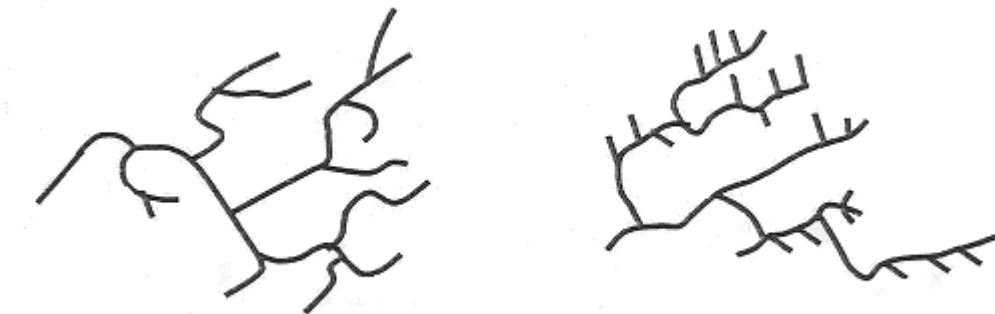


Figura 50 Patrones de drenaje controlados estructuralmente y combinaciones con vegetación. Adaptado de Nils [2002:p.15]

Todo esto debe combinarse con revisión de sismicidad en el sector (correlación de fallas, epicentros y movimiento), movimientos de GPS fijos, inspecciones de campo, perfiles litológicos, perforaciones, trincheras y geofísica para verificar si pasa sobre terreno falla geológica y si es activa.

El principal objetivo del estudio geológico (Astorga-Gätgens, 2013) es determinar si la falla geológica es activa y si tiene potencial de ruptura en superficie. Como producto del estudio, el geólogo y siempre que se tenga el criterio técnico puede asignar una zona de seguridad de 50 a 15 m e incluso 10 m cuando compruebe que no hay ramificaciones a partir de la traza de la falla. Siendo importante aclarar que, en el caso de zonas de fallas anchas, el ancho de la zona de seguridad puede ser de hasta 100 m, además del ancho de la zona de falla misma (Fig. 51).



Figura 51 Esquema ilustrativo de una falla geológico y su traza, y las zonas de seguridad establecidas según criterios del estudio geológico (Astorga-Gätgens, 2013)

Una falla potencialmente activa es aquella que muestra evidencias de desplazamiento superficial durante el Cuaternario (últimos 1.6 millones de años), también llamada falla neotectónica. Una falla activa es aquella que ha tenido desplazamientos superficiales durante el Holoceno (últimos 11,000 años) y que tiene potencial de desplazamientos futuros a lo largo de uno o más segmentos, constituyendo una amenaza potencial a estructuras localizadas sobre su traza. Los desplazamientos pueden ser observados directamente o inferidos a lo largo de la traza de falla o en parte de ella (Astorga-Gätgens, 2013).

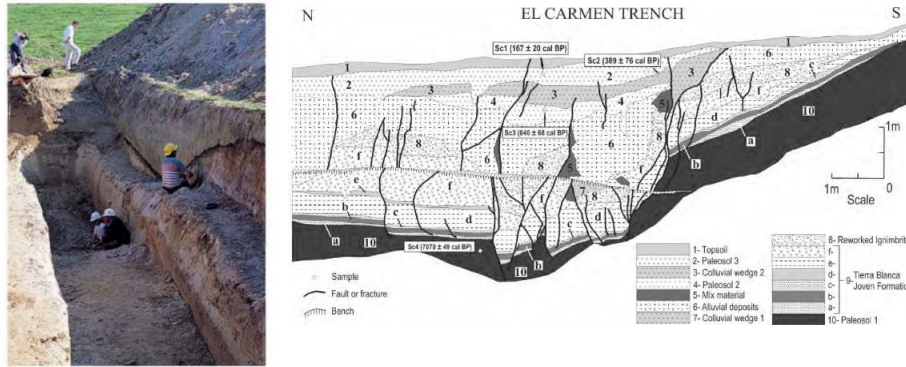


Figura 52 Estudio paleosísmico de fallas mediante zanjas (Gonzalez Vallejo, 2002 y Canora et al. 2012)



Figura 53 Fallamiento en el AMSS (SNET y OPAMSS)

En **Anexo B** se presentan consideraciones a tomar para investigar movimientos de ladera.

Conclusiones

Lo que se busca con el análisis geomorfológico es *delimitar y explicar* el origen de cada forma de la superficie terrestre, así como, conocer el comportamiento que se puede esperar.

Los procesos geomorfológicos que actúan en la región se dividen en: *endógenos* (fuerzas internas de la Tierra) y los *exógenos* (factores o fuerzas externas que afectan la superficie terrestre, incluyendo la intervención antrópica).

Las formas y unidades del relieve pueden clasificarse en: tectónicos y estructurales, de denudación y de acumulación.

Las fuerzas que edifican el relieve, empujando, plegando, rompiendo, elevando y hundiendo fragmentos de la corteza terrestre son las fuerzas tectónicas. Las formas estructurales, tienen que ver con el relieve formado debido a procesos volcánicos, tales como laderas volcánicas de los conos o cráteres por ejemplo.

La denudación es el conjunto de procesos que degradan el relieve, pudiendo acentuar los desniveles e incluye los procesos de erosión, así como, de movimientos de ladera. Al terminar de nivelar la superficie, puede reanudar su trabajo de excavación luego de que exista una nueva alteración en el relieve ya sea por procesos endógenos o por procesos exógenos. Gracias a la diferencia de resistencia litológica (dureza o resistencia) en las rocas se obtienen las formas del relieve.

Las unidades y formas geomorfológicas se dividen según su tipo genético (por los procesos, que participan a su origen) por ejemplo las *endógenas* pueden dividirse en: origen tectónico (la depresión salvadoreña y Fallas) y por actividad volcánica (volcanes, calderas, maares, domos, etc.); las *exógenas* se pueden dividir en Erosión (erosión retrógrada, erosión en el sistema de drenaje, erosión de suelo, erosión subterránea etc.); Movimientos de ladera (reptación, deslizamiento, flujo, derrumbe); meteorización de las rocas (laterita, esmectita); acumulación de aluvión (conos aluviales, lecho de río); Inundación (Llanura aluvial, lecho de río, agradación de aluviones); actividad humana (todos tipos de urbanización y formas antrópicas).

El relieve es un relieve muy joven con respecto a la edad geomorfológica y por eso los procesos endógenos como exógenos siempre funcionan y forman este relieve permanentemente. En su mayoría estos procesos se catalogan como peligrosos hasta

catastróficos para las actividades humanas y por eso es importante eliminar al mínimo sus impactos. Los procesos geodinámicos peligrosos, que afectan o puedan afectar el territorio del AMSS son los siguientes:

Endógenos – actividad volcánica y sísmica

Exógenos - erosión fluvial y subterránea, movimientos de laderas, inundaciones y acumulaciones de aluviones y coluvios

Bibliografía

Aleotti, Chowdbury (1999): Landslide hazard assesment: summary review and new perspectives. Bull Eng Geol Environ 58:21-44

Alvarez, S., (1,987): Informe técnico-sismológico del terremoto de San Salvador del 10 de Octubre de 1,986: (Internal Report) MOP, Centro de Investigaciones Geotécnicas, Departamento de Sismologia, San Salvador, Abril 1,987, 83 p.

Astorga-Gätgens, A (2013): La Definición de Usos de Suelo en las Cercanías de Fallas Geológicas: Explicación de Protocolo Tecnico del Decreto Ejecutivo: 32967-MINAE, Anexo 3, Revista Geológica de América Central, 49; 149-153.

Atakan, K., M.C. Real and R. Torres (2,004): Local site effects on microtremors, weak and strong ground motion in San Salvador, El Salvador. in Rose W.I.Geol. Soc. of Amer., in Spec. Paper 375, Boulder.

Ayala-Carcedo, F.J. y J.O. Cantos el al. (2002): Riesgos naturales. Ariel Ciencia, p. 1512, Barcelona

Bommer J. and S. Ledbetter (1986): The San Salvador earthquake of 10th Octubre, 1986. Disasters, v.11, 83 - 95 p.

Bommer J., W. Salazar and R. Samayoa (1997): Riesgo sísmico en la Región Metropolitana de San Salvador. Report prepared for USAID, PRISMA, 128 p. San Salvador.

Canora et al. (2012) Paleoseismic analysis of the San Vicente segment of the El Salvador Fault Zone, El Salvador, Central America, geologica acta, Vol. 10, No.2, 103-123



Frullani A. et al. (1,988): Informe Vulcanológico, Consorcio Salvador E.. 88 pp., San Salvador

Hradecký P. et.al. (2,004): Estudio geológico para reconocimiento de riesgos naturales en El Salvador central en Departamentos de La Libertad, San Salvador y Cuscatlán. – MS Archivo SNET, San Salvador.

Gokceoglu (1993). Landslide susceptibility mapping of the slope in the residual soils of the Mengen Region (Turkey) by deterministi stability analyse and Image processing technique. Engineering Geology, 44: 147-161.

Greenway, D.R. (1987): Vegetation and slope stability. Slope Stability, Geotechnical Egeineering and Geomorphology, In: M.G. Anderson and K.S. Richards (Editors), John Wileyand Sons Ltd., Chichester, pp. 187-230.

Gupta et al., 2003. Gupta, R. P. (2003): Remote Sensing Geology. Berlin, Springer-Verlag, Second edition

Lardé y Larín J. (2,000): El Salvador - Inundaciones e incendios, erupciones y terremotos. Biblioteca de Historia Salvadorenna, Concultura, p. 397.

Lexa, J., et al (2009): La estructura geológica y su desarrollo de la parte sur de Área Metropolitana de San Salvador. Mapa 1:50 000 y especificación del mapa geológico. Archivo de OPAMSS, San Salvador

Lexa, J. , Sebesta, J. , Chavez, J.A., Hernandez, W., E., Peczkay, Z. (2011): Geology and volcanic evolution in the southern part of the San Salvador Metropolitan Area. pp. 105-140, Journal of Geosciences, 56, Prague.

Lohnitz C., Schulz R. (1,966) : The San Salvador earthquake of may 3, 1965. Bull. Seismolog. Soc. Amer. 56: 561-575, Berkeley

Nešvara,P.,Sekyra, Zd. (1999): Obecné zásady postupů směřujících ke stabilizaci sesuvu. -

Methodological study, MŽP ČR - SG Geotchnika, a.s.Praha

Němčok A., Pašek J., Rybář J. (1974): Dělení svahových pohybů in Sb. geologických věd

hydrogeologie a inženýrská geologie str 77 – 91. Praha

Nils K, (2002) Applicability of Remote Sensing Techniques to Groundwater Exploration in Semi-Arid Hard Rock Terrain- A Systematic Approach, Department of Geology, Chalmers University of Technology, Göteborg, Suecia.



Ramírez P., J.O. et al. (1,986): Geografía de El Salvador. 256 pp., San Salvador.

Romano E.L. (1,997): Catálogo de desastres, accidentes y ecología (1915 - 1990).

CEPRODE, 61 pp, San Salvador.

Rose W.I., Bommer J.J., López D.L., Carr M.J., Major J.J. et al. (2,004): Natural Hazards in El Salvador. The Geological Society of America, Special Paper 378, 502 pp., Boulder

Saha, A.K., Gupta, R.P., Akora, M.K. (2002): GIS-based landslide zonation in the Bhagirathi (Ganga) Valley, Himalayas. Journal of Remote Sensing, 23, 357-369.

Schmidt-Tomé M. (1977): The Geology in the San Salvador (El Salvador, Central America) a basis for city development and planing). MOP, Centro de investigaciones geotécnicas, San Salvador

Sebesta J. (2,006): Mapa Geomorfológico de AMSS. Archivo de OPAMSS, San Salvador

Varnes, D.J. (1984): Landslide hazard zonation: a review of principles and practice.

Commission on landslides on the IAEG, UNESCO, Natural hazards, No.3

Vallejo, L (2002) Ingeniería Geológica, Pearson Prentice Hall, Madrid

Weyl R. (1,980): Geology of Central America. – Gebrüder Borntraeger, Berlin, Stuttgart

Weber, R., G. Wiesemann, H. Lorenz, and M. Schmidt-Thomé (1978): Mapa Geológico de la República de El Salvador/ América Central, Hannover, Germany, BGR (Bundesanstalt Geowissenschaften und Rohstoffe).

White, R., D. Harlow and S. Alvarez, (1,987): The San Salvador earthquake of October 10, 1987 - Seismological aspects and other recent local seismicity: Earthquake Spectra, v.3., p. 419-434.

White, R. and D. Harlow (1993): Destructive upper-crustal earthquakes of Central America since 1900, Bull. Seism. Soc. Am. 86, 1115-1142

Wiesemann G. Et al., (1978): Mapa geológico de la República de El Salvador, escala 1:100 000. Bundesanstalt für Geowissenschaften und Rohstoffe, Hannover.

Záruba Q., Mencl V., (1982): Landslides and their Control. Academia ,pp. 324, Prague



ANEXO B

Aspectos tomar en cuenta para investigación de movimiento de ladera

Un primer paso para caracterizar una zona es conocer su problemática (el hecho de la presencia de laderas tectónicas indican un alto grado de fragmentación y de inestabilidad que existe en algunas laderas); en el AMSS hay una gran cantidad de laderas estructurales, tectónicas y conectadas con la denudación; además hay canteras abandonadas o en funcionamiento, zonas urbanas que invadieron los Badlands donde hay cortes, así como, rellenos; las laderas y pie de las ladera calderica o de cuerpos volcánicos. La zona sur (Bálsamo) tiene problemas debido a que está conformada por la laderas con bastante inclinación pertenecientes a los estratovolcanes antiguos existiendo una capa de lateritas (arcilla) cubierta por tefras (material expulsado a través de la columna eruptiva tras una erupción volcánica) los cuales son inestables especialmente por la intervención antrópica.

En el AMSS hay movimientos de ladera pequeños (derrumbes y flujos de suelo) y también de regular tamaño; en cuanto a los pequeños (taludes menores de 5 metros por ejemplo) estos pueden ser tratados con los conocimientos normales de ingeniería, pero cuando hay flujos de escombros, deslizamientos, reptación y derrumbes en laderas de altura importante, entonces consideraciones más específicas tienen que ser tomadas, por eso a continuación se darán algunas a consideraciones a tomar en cuenta para estos movimientos de ladera que pueden afectar una mayor cantidad de población o infraestructura.

Es trascendente subrayar que a veces la idea de que el agua lubrica las capas de suelo activando los movimientos de ladera no es del toda cierta; por ejemplo si tomamos como ejemplo la arena al estar totalmente seca o saturada no tiene ninguna consistencia y su ángulo de reposo es de aproximadamente 35° , pero si a la misma arena se le satura con un porcentaje de agua entonces es posible hacer castillos de arena, tener taludes verticales y tiene cierta resistencia; si se le satura totalmente entonces la arena fallara, pero no solo la saturación es la que debilita o rompe con la cohesión aparente (fuerzas capilares y cementantes) sino que las fuerzas que el flujo de agua subterránea impone a la estructura de la arena tiene que ver mucho con falla, además del mismo peso del agua y fluctuaciones en las fuerzas de soporte debido a cambios en los esfuerzos. (Bull, 2009)

Una zona que es muy propensa a que sucedan flujos de escombros son las laderas caldericas y estructurales que generalmente se combinan, el hecho que su superficie haya sido formada por la tectónica que ha fracturado la roca y ha creado laderas bastantes inclinadas que reciben más lluvias es un factor decisivo para su inestabilidad, haciendo que los flujos de escombros y derrumbes sean comunes, por lo que los pies de la ladera son los lugares de depósito del material denudado. No solo las lluvias son las causantes de los movimientos de ladera, los geólogos saben que los terremotos, laderas inclinadas, el cambio en el nivel de las aguas subterráneas, factores antrópicos, materiales arcillosos y estratos geológicos con la misma inclinación que la ladera incrementan la amenaza. El

coluvio o suelos superficiales tienen fuerzas capilares fuertes que prevalecen hasta que la humedad aumenta por la infiltración de las lluvias o aumento de nivel del agua subterránea.

Un movimiento de ladera puede reactivarse debido a la remoción de un dedo del deslizamiento (que retiene masa), colocar peso en la masa del deslizamiento y el incremento del contenido de agua de la masa de suelo por cambios naturales o artificiales, falla por pérdida de resistencia bajo terraplenes, erosión subterránea debido a gradientes hidráulicos altos y/o pobre compactación, así como, erosión superficial entre otros. Por eso es importante la identificación de zonas problemáticas ya que el diseño de un proyecto futuro puede evitar reactivar el movimiento de ladera o los trabajos de mitigación pueden realizarse para estabilizar el sitio. Es de tomar en cuenta que algunas épocas geológicas han sido más húmedas y en ese entonces los movimientos de ladera fueron activos, actualmente que el clima es menos húmedo se han detenido pero pueden estar cerca de su ángulo de inestabilidad por lo que pueden reiniciar su movimiento debido a cambios adversos en las condiciones climatológicas.

Con la información existente: Mapa Geológicos de diferente escala, Mapa Geomorfológico (1:25,000), curvas de nivel (1:25,000) se puede hacer una caracterización general, sin embargo son necesarios estudios a mejor detalle (especialmente en las zonas con alta amenaza geológica (Imagen 1); por ejemplo la obtención de curvas de nivel a mejor detalle (a cada 5 metros por lo menos) ayudara mucho; al igual que un estudio de la tectónica de la región que es urgente debido a la alta actividad histórica; ya que posiblemente la extensión del Graben Central y el colapso de las morfoestructuras sean las causas de los sismos destructivos que activan gran cantidad de movimientos de ladera.

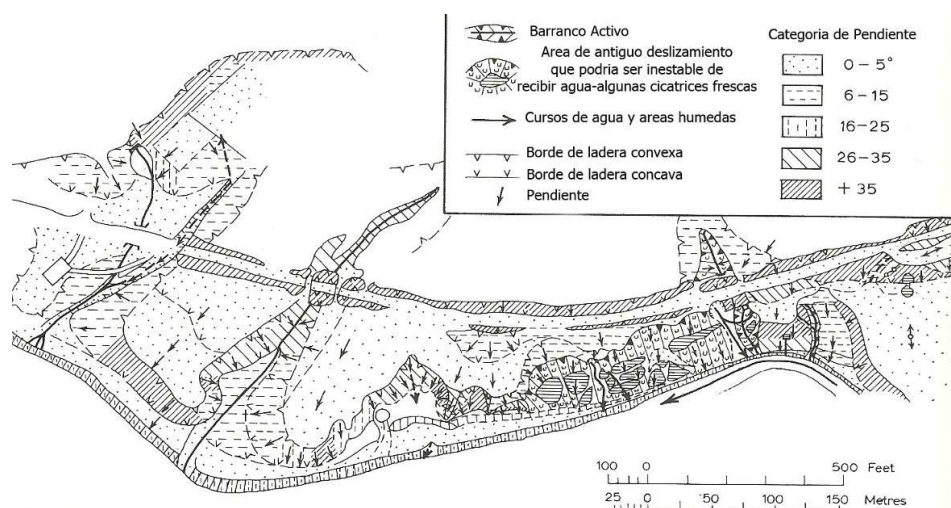


Imagen No. 1. Ejemplo de mapa geomorfológico a detalle de una zona ribereña. **Fuente:** Brusden et al., (1974)

La geología, así como, la geomorfología que incluye la inclinación y la dinámica de la zona (zona de erosión, nivel de meteorización, ladera tectónica, sismicidad etc.) ayudan a señalar los estratos y morfoestructuras con amenaza alta (Imagen 2), por ejemplo los depósitos de Tierra Blanca Joven presentan especialmente problemas por erosión, colapso y movimientos de ladera en la zona urbana, además entre la tobas de San Salvador e Ilopango hay algunos paleosuelos con algún porcentaje de arcilla y que pueden servir como planos de deslizamiento. Sobre la formación el Bálsamo esta una capa de laterita (arcilla) que también puede servir como plano de deslizamiento o propiciar la reptación. Sin embargo algo que es básico y que no se toma en cuenta en El Salvador es el conocimiento del estado de las aguas subterráneas o sub-superficiales en el territorio, ya que esta varía a lo largo del tiempo y se transporta a través de los estratos geológicos (Imagen 3), cuya permeabilidad puede ser heterogénea debido a la presencia de capas impermeables, al fracturamiento o fallamiento; cuando llueve el agua empieza a infiltrarse y dependiendo del estado de flujo subterráneo o sub-superficial puede iniciar un movimiento de ladera que puede ir creciendo a medida se mueve sobre la ladera. El agua siempre cambia el comportamiento de los materiales geológicos por lo que conocer su estado (subterráneo y superficial) en un lugar determinado ayuda a conocer que se puede esperar y cuando; no solo el conocimiento de la cantidad de lluvia es el indicador del inicio de un movimiento de ladera si no que el estado y características en que se encuentra cada lugar, por tanto estudios a mayor detalle que incluyan pruebas de campo y de laboratorio se necesitan en las áreas con mayor amenaza.

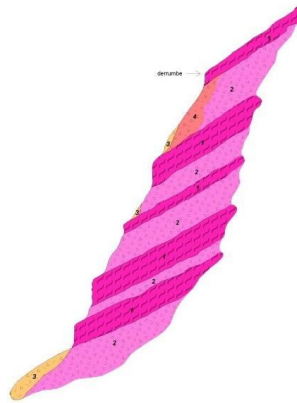


Imagen No. 2. Situación que puede contribuir al inicio de un flujo de escombros donde inclinación o buzamiento de estratos es la misma que la de ladera, hay meteorización en zonas, hay erosión retrograda, la presencia de un estrato más débil y fracturamiento de roca; la imagen pertenece a la estructura de El Picacho pero una situación parecida se tiene en cuerpos volcánicos de AMSS(excepto en ladera tectónica de Caldera de Planes de Renderos, donde incide la inclinación y el fracturamiento principalmente)

Fuente: Estudios especiales de reconocimiento de las condiciones geológicas para la reducción de los riesgos naturales en el Área Metropolitana de San Salvador, El Salvador (Chamra et al., 2010), OPAMSS

Un material permeable sobre uno impermeable puede resultar en la saturación de un estrato (acuíferos colgados) que puede disparar la inestabilidad superficial.

Por lo general el movimiento de ladera más usual son los flujos de suelo superficial (Flujos deslizantes) pero también se dan flujos de escombros (Imagen 4), los cuales se inician por circunstancias que no siempre son las mismas (reptación, deslizamiento o derrumbe), por ejemplo una roca puede descansar sobre una sección que con el tiempo se va haciendo inestable (erosión, saturación, meteorización) y durante un evento particular (una lluvia, intervención antrópicas o terremoto) inicia su movimiento que puede tardar o no algún tiempo en que suceda nuevamente. El cambio de uso de suelo, (cambio de vegetación o urbanización), la urbanización de áreas en escarpes donde no hay servicio de alcantarillado, descargas de aguas lluvias de calles pueden ser un factor que probablemente tengan algo que ver con que se inicien algunos movimientos de ladera.

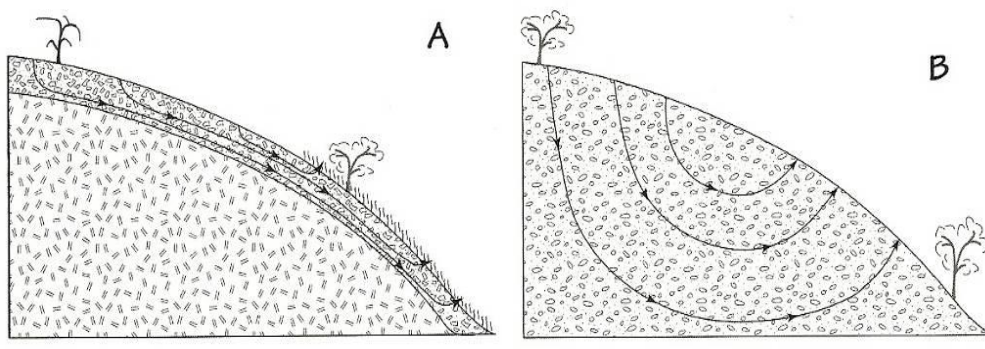


Imagen No. 3. Control litológico de trayectoria de flujos de agua en dos laderas durante época de lluvia. Agua subterránea emerge como manantiales y contribuyen a escorrentía superficial. En figura **A** se presenta situación de capa de coluvio que yace sobre granito masivo impermeable lo cual restringe su movimiento a profundidades superficiales; en la figura **B** grava arenosa promueve un flujo de agua subterránea profundo y difuso. **Fuente:** Bull (2009)

La búsqueda de información histórica, lugares problemáticos, cartografía existente y consultas a los habitantes pueden ayudar a entender la periodicidad o relaciones con otros eventos sucedidos anteriormente (lluvias, terremotos, intervenciones antrópicas). Es importante entender que algunos eventos suceden periódicamente en un lugar, pero cuanto tiempo pase para que vuelvan a ocurrir dependerá de ciertos factores intrínsecos de cada lugar, por ejemplo los flujos de escombros se dan en diferentes quebradas pero no todos se dan al mismo tiempo sino que pasan décadas, años o meses para que sucedan nuevamente. Por eso el conocimiento de los movimientos de ladera históricos y las condiciones propias que los iniciaron es básico conocerlos ya que cada punto es posible que tenga sus propias consideraciones a tomar en cuenta, además el conocer la ubicación de movimientos antiguos o coronas de deslizamiento ayudara a no perturbarlos o reiniciar su actividad al

intervenir la zona con construcciones u otras actividades. De los sectores donde sucedieron flujos de escombros recientemente se pueden revisar los materiales geológicos involucrados para revisar el nivel de meteorización en que se encuentran o características especiales y esta información puede ayudar a comparar con los materiales geológicos de otros sitios en el que en algunos años o décadas se podrían esperar que suceda un evento.

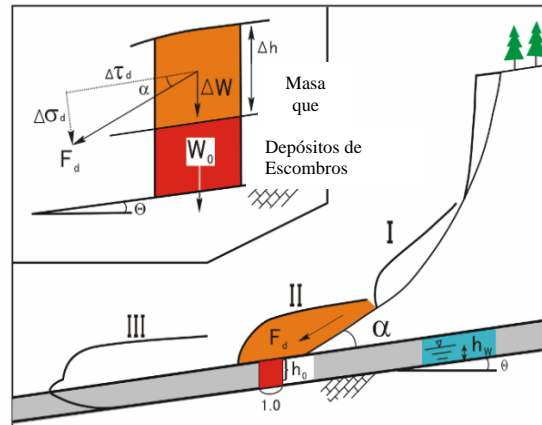


Imagen No. 4. Pequeños movimientos de ladera en el drenaje generalmente se transforman a flujos de escombros y arrastran material de la superficie para crecer en volumen, por eso es importante conocer espesores de sedimentos dentro de los drenajes y su estado durante las lluvias.

Fuente: Fukuoka (2010)

La revisión del territorio con la ayuda de fotografías aéreas antiguas, imágenes satelitales históricas, Google Earth y sensores remotos en general; es una gran ayuda para el reconocimiento de las áreas que han presentado movimientos de ladera o pueden ser propensas; sin embargo, es vital que se reconozca en campo la información obtenida en oficina. Esta metodología depende de la experiencia del que lo haga. (Imagen 5)



Imagen No. 5. Flujos en ladera calderica de Planes de Renderos en San Marcos, a la izquierda fotografía aérea de 1984 de zona de Col. 10 de octubre y a la derecha imagen de Google Earth.

Fuente: Fotografía aérea de 1984 (CNR) y Google Earth.

Entre los objetivos que se recomienda que tenga una investigación es: 1) Determinar la secuencia, espesor y extensión lateral de los estratos de suelo y donde sea apropiado, del nivel de roca; 2) Obtener muestras representativas de suelos o rocas para identificación y clasificación, si es necesario, para pruebas de laboratorio para determinar parámetros relevantes del suelo; 3) Identificación de las condiciones de las aguas subterráneas, como se menciono anteriormente; 4) hacer pruebas in situ para conocer propiedades de suelos, si es necesario; 5) Evaluar la estabilidad de talud/ladera. Entre mayor grado de variabilidad de condiciones tengan los suelos o rocas entonces mayor tendrá que ser el esfuerzo para obtener el conocimiento de características del área; se puede iniciar con una investigación preliminar en una escala con menor detalle para obtener las características generales, pero después (de ser necesario) tiene que seguir una investigación más extensiva y cuidadosa. A los estratos más problemáticos es necesario realizarles pruebas geotécnicas para obtener sus propiedades. En cuanto a las rocas hay que detallar su estado de fracturamiento, orientación y buzamiento de fracturas o juntas, relleno de fallas, fracturas y/o juntas, dirección de estas, resistencia de roca, nivel de las aguas subterráneas, zonas alteradas por meteorización (roca se descompone por procesos químicos hasta transformarse eventualmente a arcilla) y tectónica entre otros. (Imagen 6)

En caso de no haber afloramientos o para evaluar áreas de más interés con más detalle el uso de geofísica (Imagen 7) y perforaciones pueden ayudar. Al identificar zonas más propensas donde se inician los movimientos de ladera se puede iniciar un programa de monitoreo visual, en el que pueden participar tanto personal de las alcaldías, gobierno como pobladores de la zona.

Un monitoreo visual puede llevarse a cabo ya que en la superficie de los movimientos de ladera se pueden ver cambios recientes, que marcan los movimientos de ladera, por ejemplo: la deformación de la superficie, grietas (que pueden ir retrocediendo) y rupturas en la superficie, deformación de los árboles hasta su caída, así como, grietas en edificaciones. (Imagen 8)

ETAPA	ESTUDIO	DESARROLLO		
I	Reconocimiento preliminar	Topografía	Recopilación de la información disponible Fotogrametría	
		Geotecnia	Recopilación bibliográfica y cartográfica	Fotogeología Otros
	Estudios de sensores remotos			
	Recorridos de campo			
II	Exploración e investigación detallada	Topografía	Fotogrametría Levantamientos topográficos	
		Geotecnia	Levantamientos geotécnicos	Litología, estratigrafía y estructuras Reconocimiento de discontinuidades <ul style="list-style-type: none"> — Fallas — Fracturas y juntas — Estratificación — Discordancias
		Geofísica		Fenómenos de geodinámica <ul style="list-style-type: none"> — Externa <ul style="list-style-type: none"> — Estabilidad de taludes — Zonas de alteración y erosión — Interna <ul style="list-style-type: none"> — Fallas activas — Vulcanismo y sismicidad — Tectónica
		Localización de roca sana Localización del nivel freático Estratigrafía Calidad de los materiales		
		Perforaciones	Muestras de suelos alteradas e inalteradas Recuperación de núcleos de roca y muestreo integral Inspección de las paredes de los pozos (televisión y fotografía)	
		Excavaciones	Muestras cúbicas de suelos y rocas Estratigrafía Características estructurales de los macizos Observación de fallas y fracturas	
		Pruebas de campo	Resistencia y deformabilidad Permeabilidad Estados de esfuerzo tectónicos	
		Pruebas y estudios de laboratorio	Propiedades índice Propiedades mecánicas Mineralogía y petrografía	
III	Cons-trucción	Geotecnia	Localización y cubicación de bancos y ensayos de materiales	Obtención de materiales de construcción Definición de métodos constructivos
IV	Opera-ción		Instrumentación y control	Piezometría Instrumentación de fallas y taludes Pruebas de inyección Influencia de la obra en los procesos geológicos

Imagen No. 6. Desarrollo de las etapas de exploración

Fuente: Manual de diseño de obras civiles B. 14, México, Comisión Federal de Electricidad (1979)

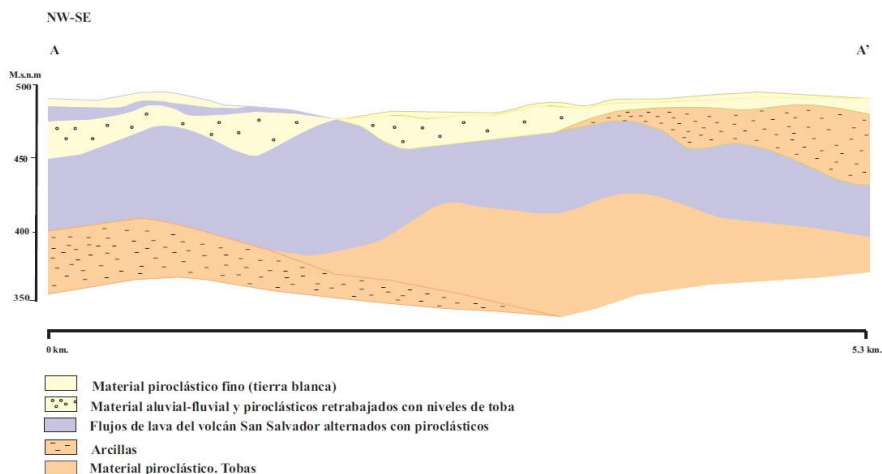


Imagen No. 7. Ejemplo de perfil obtenido mediante geofísica que corresponde a sector de Nejapa

Fuente: Caracterización de los riesgos geológicos y dimensionamiento de los recursos hidrogeológicos Ponce et al. (2003)

El reconocimiento y monitoreo en campo de las laderas donde hay rocas sueltas que podrían rodar, o iniciar otros tipos de movimientos de ladera es algo que se puede hacer con la ayuda de brigadas de reconocimiento, es de tomar en cuenta que los procesos de denudación (erosión y movimientos de ladera) pueden hacer que la superficie sobre la cual reposan las rocas puedan dejar de sostenerla haciendo que durante las lluvias, terremotos o por reptación sean más propensas a rodar sobre la ladera produciendo flujos de escombros que afectaría el pie de las laderas. La identificación de los drenajes o quebradas donde los flujos de escombros son más recurrentes ayudará a escoger cuales tienen que ser monitoreadas con mayor regularidad, y tratar de conocer las causas que disparan los flujos, los cuales podrían ser la alta inclinación, estratos débiles, elevación del nivel de las aguas subterráneas durante el invierno, lluvias fuertes, descargas de aguas lluvias o saturación de sector por fosas sépticas etc., asimismo es ineludible hacer un recorrido en las quebradas lo cual ayudara a identificar si hay depósitos acumulados que en el futuro puedan moverse y retransportarse laderas abajo.

Es importante mencionar que cada caso de movimiento de ladera tiene sus particularidades, necesitando estudios y pruebas diferentes o especiales dependiendo de cada situación y no existe una metodología universal que pueda generalizarse para todos los casos. Sembrar cierta vegetación puede ser efectivo solamente para movimientos de ladera superficiales.

El monitoreo de zonas de movimientos de ladera puede iniciar como una contemplación visual, luego, de ser necesario se puede hacer una medición superficial y mas profunda de los cambios con instrumentación especial, pero el uso de equipo de monitoreo requiere generalmente que antes se conozca: *las propiedades y características del lugar; predecir el mecanismo que controla el comportamiento, definir las preguntas geotécnicas que tiene*

que ser respondidas; definir el propósito de la instrumentación; seleccionar los parámetros a monitorear; predecir la magnitud de cambio que se puede dar (mm, cm, m); tener alguna idea de la mitigación necesaria; asignar las tareas para diseño, construcción y fases operacionales; selección de instrumentos a usar; lugar donde se colocaran; planificar la recolección de factores que produzcan los cambios para después relacionarlos; establecer procedimientos para asegurarse que instrumento trabaje correctamente; especificar el objetivo específico de cada instrumento; preparar un presupuesto para el funcionamiento durante todo proyecto; escribir especificaciones para obtener instrumentos; hacer el plan de instalación; planificar la calibración y mantenimiento con regularidad; planificar la recolección de datos, procesamiento, presentación, interpretación, reportes e implementación; decidir umbrales de peligro y acciones a tomar; hacer arreglos contractuales para servicios de instrumentación de campo y actualización del presupuesto.

Los requerimientos expuestos anteriormente para un monitoreo con instrumento reflejan la complejidad y planificación que se tiene que tomar en cuenta, por lo que antes de decidirse a hacer uso de este tipo de monitoreo se recomienda que se este seguro de que de verdad ayudara a responder las inquietudes que se tengan y reconocer en qué zonas son necesarios, para que el monitoreo sea exitoso y la información pueda servir para la toma de decisiones. La Tierra Blanca Joven (TBJ) presenta un comportamiento de colapso y de flujos superficiales por lluvias, así como, terremotos que se dan rápidamente por lo que es de plantearse que tipo de monitoreo es el adecuado, se puede comenzar con un monitoreo visual y observar cambios de humedad en talud, pero es mejor evitar que cualquier infraestructura este cerca de un talud vertical alto o hacer las obras de mitigación adecuadas.

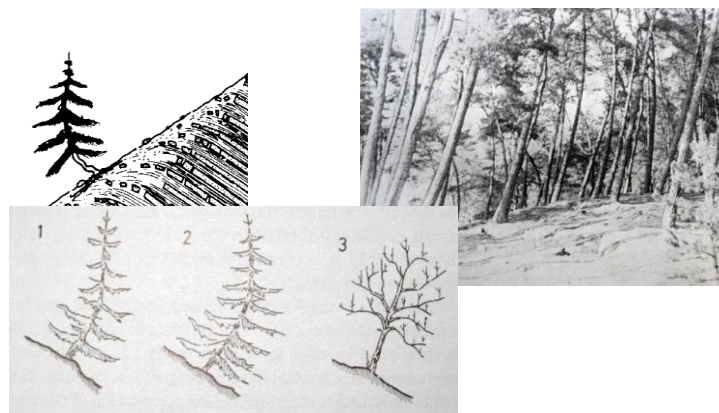


Imagen No. 8. Deformación de árboles debido a un movimiento de ladera que comienza lento pero en un momento puede acelerarse y hacer que todo material se transporta ladera abajo. **Fuente:** Geomorfología del AMSS y su relación con los movimientos de ladera (Šebesta, 2007)

El uso de marcos de madera, (Fotos 1 y 2) colocar cerámica o vidrio (solo indica el movimiento y no es posible medir la cantidad de movimiento) y la medición con cintas métricas precisas, usar teodolito, estaciones totales o GPS de precisión son algunas acciones que son posibles de realizar antes de decidir si es necesario hacer uso de instrumentos de monitoreo más complicados y de mayor precisión. El monitoreo visual puede ayudar al inicio a delimitar y alertar en las áreas donde hay algún tipo de movimiento.

Otra técnica visual rápida para el reconocimiento de movimientos de ladera, pero cuyo costo es bastante alto (<\$100,000) es el uso de escáner láser montados en avión LIDAR (Imagen 9) que puede penetrar las hojas de los árboles y obtener la topografía del suelo. Estas imágenes ayudan a entender la distribución de movimientos de ladera antiguos y estimar los lugares donde ocurrirán en el futuro. (Fukuoka, 2010)

Debido al alto tectonismo (bloques diastroficos), laderas tectónicas y meteorización del sector sería importante monitorear anualmente los cuerpos de los volcanes (porciones o bloques grandes que podrían moverse) que sean inestables para conocer su movimiento y dirección, esto ayudaría descartar un colapso o movimiento a gran escala de parte de un cuerpo volcánico lo cual provocaría una avalancha de escombros; se recomienda una evaluación haciendo uso de mediciones anuales con GPS de alta precisión y monitoreo de distancia con láser (estación total) de las laderas y cumbres. (Imagen 10)



Fotografías 1 y 2. A la izquierda grieta cerca de borde de talud en zona de relleno o vertedero en San Marcos (89.228496°, 13.648960°), a la derecha medición de movimiento de grieta con marco de madera **Fuente:** SIT-OPAMSS y Fukuoka (2010)

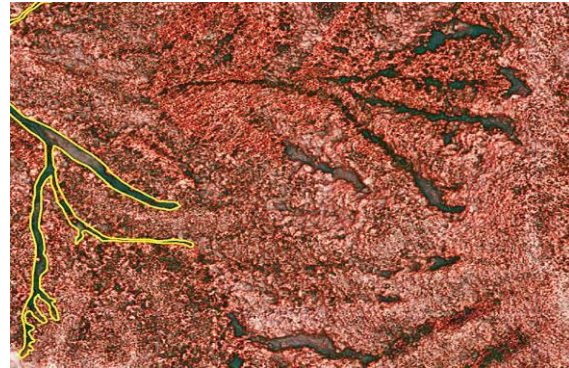


Imagen No. 9. Escáner láser aéreo que penetra bosques para detectar cicatrices de viejos movimientos de ladera. **Fuente:** Fukuoka (2010)

Pruebas de penetración simples (SPT) son baratas y efectivas para conocer las posibilidades de que sucedan movimientos de ladera superficiales ya que pueden ayudar a conocer la profundidad de suelo blando que cubren las laderas o taludes. La meteorización de las rocas volcánicas produce rápidamente suelos superficiales; por lo que los movimientos de ladera superficiales se pueden repetir pocas décadas después. (Fukuoka, 2010)

Si es necesario monitorear con mayor detalle, en general entre mayor simpleza del instrumento de monitoreo mejor será su confiabilidad decreciendo su simplicidad y confiabilidad desde los ópticos, mecánicos, hidráulicos, neumáticos hasta los eléctricos.

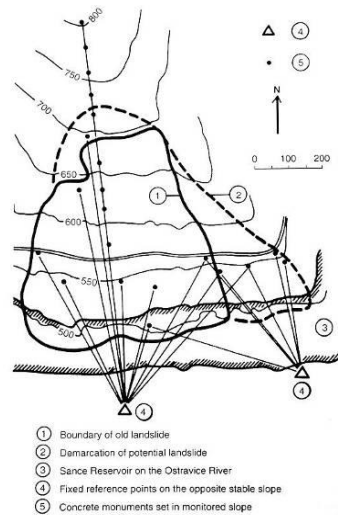


Imagen No. 10. Estación total (Resolución 1mm, Precisión: 2mm) viendo a prismas colocados en puntos estratégicos para monitorear movimientos en rocas en Machu Pichu, Perú (Fukuoka, 2010); a la derecha ejemplo de monitoreo óptico de deslizamiento provocado por la construcción de la presa Sance, República Checa. **Fuente:** Fukuoka (2010) y Geomorfología del AMSS y su relación con los movimientos de ladera (Šebesta, 2007)

Para monitorear el movimiento vertical (asentamientos e hinchamientos) es necesario un banco de marca estable (en estrato estable y con protección), en caso se quiera conocer asentamientos en edificaciones entonces estaciones de nivelación tienen que ser colocados en lugares adecuados como bases de cimentaciones o cerca de fondo de columnas o paredes. Para el movimiento horizontal los dispositivos ópticos como teodolitos, extensómetros, marcos de madera o inclinómetros pueden ayudar; para la presión de poros de agua los piezómetros pueden ayudar a conocer los cambios que ocurren. (Imágenes 11 y 12)

El conocer la cantidad de lluvia que puede iniciar los movimientos de ladera puede ayudar en la evacuación oportuna de las áreas con mayor peligro (tomando en cuenta también las consideraciones mencionadas anteriormente). Según (Fukuoka, 2010) entre las metodologías de alerta temprana que se pueden hacer uso se puede mencionar el índice de lluvia-agua que ha desarrollado el gobierno de Japón, pero necesita una cierta cantidad de datos para calibrar los coeficientes por lo que la operación práctica podría aplicarse en 10 años, siendo este método en su mayoría empírica. Para el índice de lluvia-agua se obtuvo información de áreas de 5 km por 5 km de la cantidad de lluvia que iniciaron movimientos de ladera, tomando en cuenta las aguas de escorrentía y la que se infiltra; dicha información ha sido comparada hasta obtener valores de índice que coinciden con la realidad lo cual ha llevado 10 años para lograrlo.

Otros métodos hacen uso de umbrales de lluvias acumulados para catalogar la peligrosidad; relacionándola con los movimientos de ladera sucedidos, aparte que hay metodologías que podrían ser revisadas o retomadas, por ejemplo Cepeda et al. (2010) obtuvieron una ecuación para estimar los umbrales para movimientos de ladera inducidos por lluvia para la zona del Picacho (Imagen 13)

Entre los factores del clima que hay que tomar en cuenta son a) Ciclos climáticos en un periodo de años (precipitación anual alta contra precipitación anual baja); b) Acumulación de lluvia en determinado año en relación a la acumulación normal; c) La intensidad de las tormentas. Usualmente la mayoría de los problemas ocurren al final de la época de lluvias, cuando la precipitación acumulada es mayor que la media anual (Hunt, 2005)

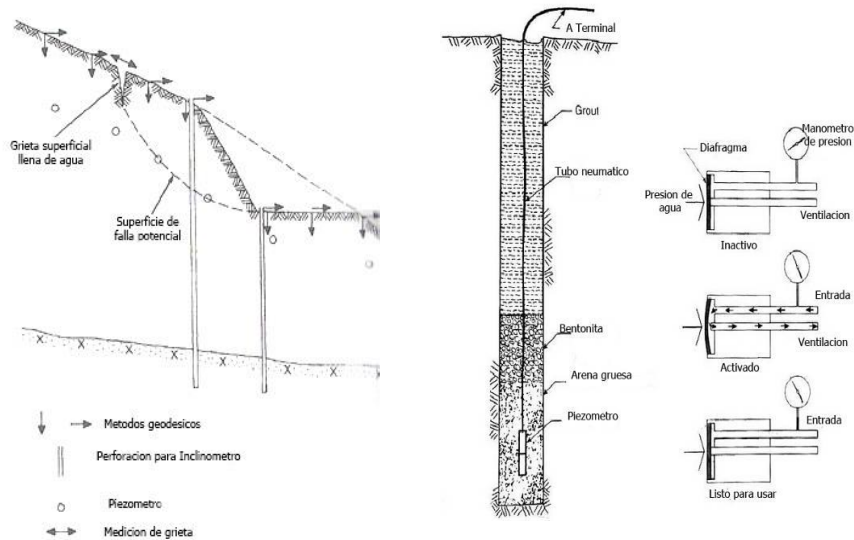


Imagen No. 11. A la izquierda posible arreglo de instrumentos de monitoreo para talud con deslizamiento (el uso de métodos geodésicos necesita bancos de marca y una estación de control horizontal fuera del talud; a la derecha esquema de piezómetro. **Fuente:** Dunnycliff (1993)

Guidicini y Iwasa (1977) hicieron un estudio de 9 zonas de una región montañosa de Brasil (clima tropical) acerca de la ocurrencia de movimientos de ladera con relación a la precipitación acumulada hasta el día que ocurrió movimiento de ladera como un porcentaje de la precipitación media anual y entre los resultados que se obtuvieron se puede mencionar que las lluvias intensas, con un 12% mayor que la lluvia media anual (300 mm en 24-72 h) o más, pueden causar fallas en las laderas en el área sin importar la historia de lluvia previa. (Imagen 14). Estos tipos de análisis se podría hacer para las condiciones particulares de cada municipio del AMSS y se obtendría información que con el tiempo se vaya actualizando ha medida se vaya calibrando modelo con los sucesos que ocurran.

La elaboración de mapas de Ingeniería Geológica cuyas unidades son definidas por las propiedades ingenieriles, la geología, geomorfología, tectónica, amenaza volcánica, aguas subterráneas y superficiales tiene que ser uno de los objetivos finales después de hacer los estudios de detalle y consideraciones mencionadas anteriormente, ya que podrá ayudar en la toma de decisiones en cuanto al ordenamiento territorial y construcción futura del AMSS. En las imágenes 15 y 16 se muestran algunos ejemplos de diferentes metodologías de mapeos de ingeniería geológica para representar los estratos superficiales y los que están bajo estos. Cada unidad se describe según sus características y problemática.

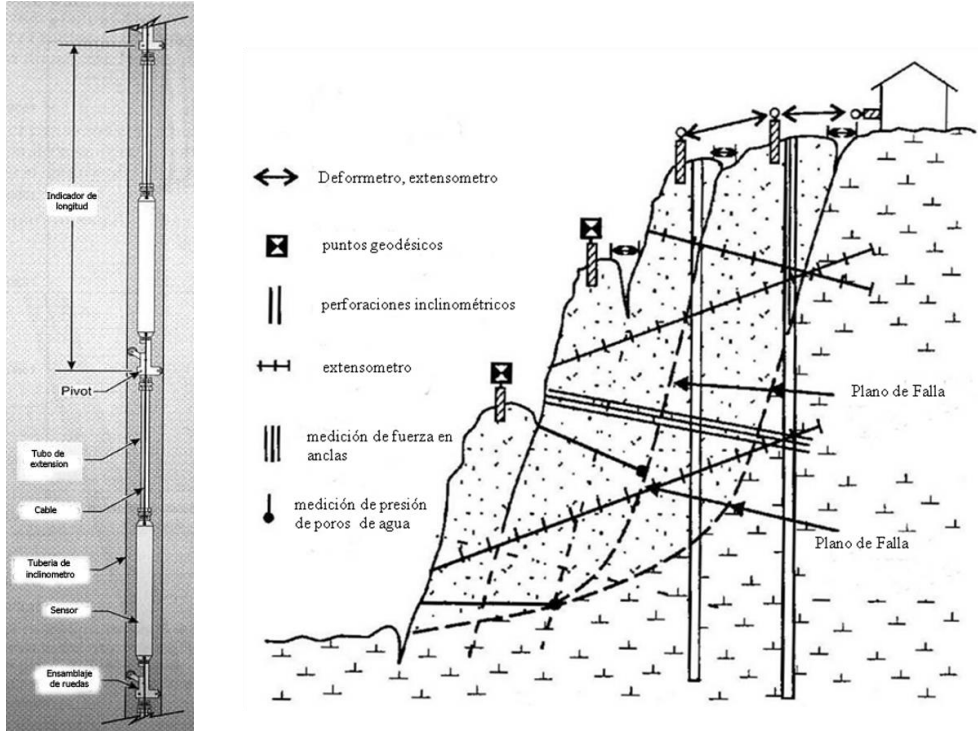


Imagen No. 12. A la izquierda partes de un inclinómetro, a la derecha posible arreglo de instrumentos de monitoreo para talud con movimiento de ladera.

Fuente: Geomorfología del AMSS y su relación con los movimientos de ladera (Šebesta, 2007)

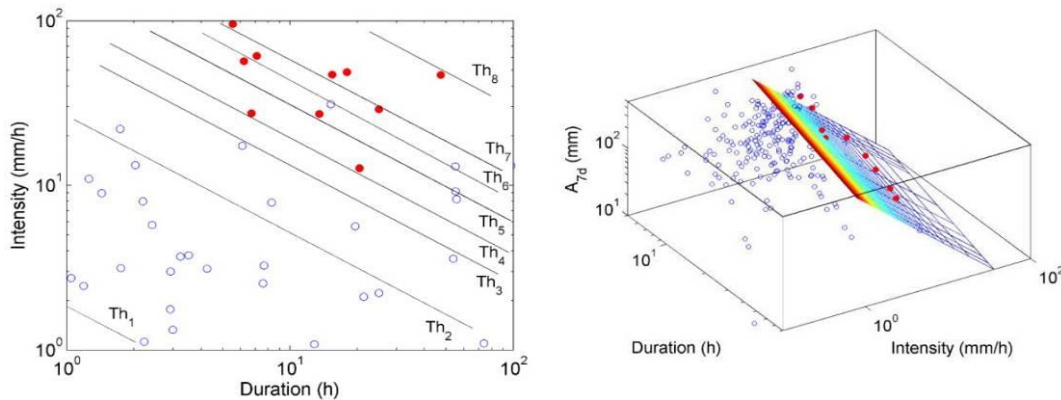


Imagen No. 13. A la izquierda Ilustración de análisis con observaciones de lluvias, grafica de Intensidad-duración de tormentas que no inician movimientos de ladera (círculos huecos) y tormentas que inician movimientos de ladera (círculos rellenos), además hay 8 líneas de umbrales (líneas Th); a la derecha umbral para que se inician flujos de escombros mayores de 3000 m³ (línea de mallas), círculos huecos representan observaciones de lluvia que no dispararon movimientos de ladera y los círculos rellenos los que sí lo hicieron

Fuente: An Empirical threshold model for rainfall-induced landslides: application to the Metropolitan Area of San Salvador (Cepeda et al., 2010)

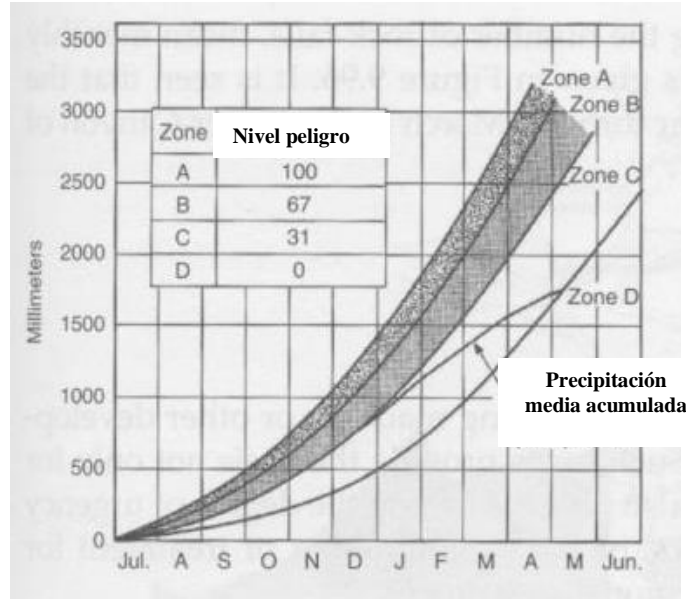


Imagen No.14. Grafica de nivel de amenaza cuya intención es servir a las comunidades como un guía para evaluar el peligro en términos de precipitación media acumulada para un año dado.

Fuente: Guidicini y Iwasa (1977)

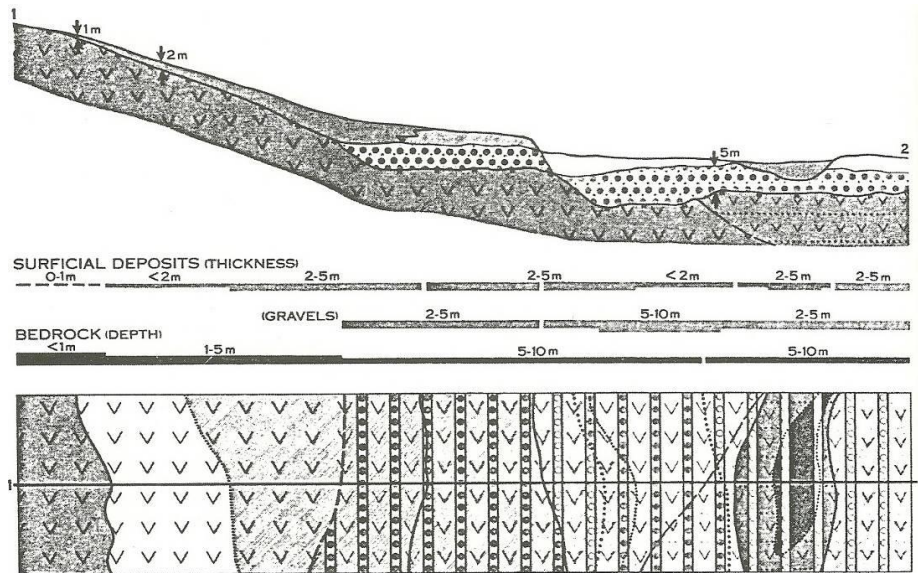


Imagen No. 15. Método de bandas para cartografía de ingeniería geológica en 3 dimensiones. Esta imagen muestra la planta y sección de unidades de suelo cuaternarias de diferente carácter y espesor que yacen sobre un estrato rocoso **Fuente:** Matula (1971)

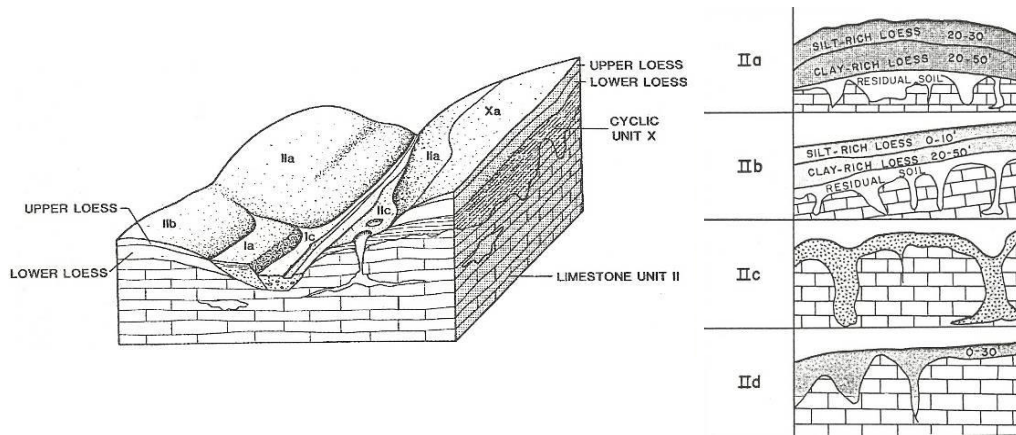


Imagen No. 16. El mapa de unidades del condado de St. Louis, Missouri. Sección transversal esquemática y diagrama de bloque que muestran las relaciones típicas entre áreas de colapso de karst y otras unidades de ingeniería geológica **Fuente:** Basado en Lutzen & Rockaway (1971)

Es elemental evitar perturbar zonas propensas a movimientos de ladera, la deforestación y la urbanización pueden elevar peligro, hacer uso del drenaje superficial, así como, subterráneo, la eliminación de materiales inestables de las pendientes, además la construcción de muros u otras estructuras de soporte o la combinación de estas técnicas puede ayudar; pero **la decisión de que obra de mitigación o uso de suelo es necesario dependerá de la problemática y de la complejidad que la zona tenga.** Tener un sistema de alerta para movimientos de ladera también es deseable, tomando en cuenta que tiene que calcularse que haya tiempo suficiente para evacuar o tomar las medidas apropiadas. (Keller y Blodgett, 2006)

Si hay incendios en las laderas (Foto 3) se puede esperar que se tenga problemas de movimientos de ladera, debido a la impermeabilización que se da y a que superficie queda sin protección, pudiéndose esperar flujos.



Fotografía 3. Imagen de sector de Cerro de San Jacinto en San Marcos que fue afectado por incendio en marzo del presente año, la flecha señala trayectoria de flujo reciente.

Fuente: SIT-OPAMSS

En la Imagen 17 se presenta un esquema general de las consideraciones o pasos a realizar que se han mencionado a lo largo de este apartado, en este caso incluyendo la elección de obras de mitigación y planificación del uso de suelos que dependerá de cada caso, ya que hay bastantes consideraciones que hay que tomar en cuenta.

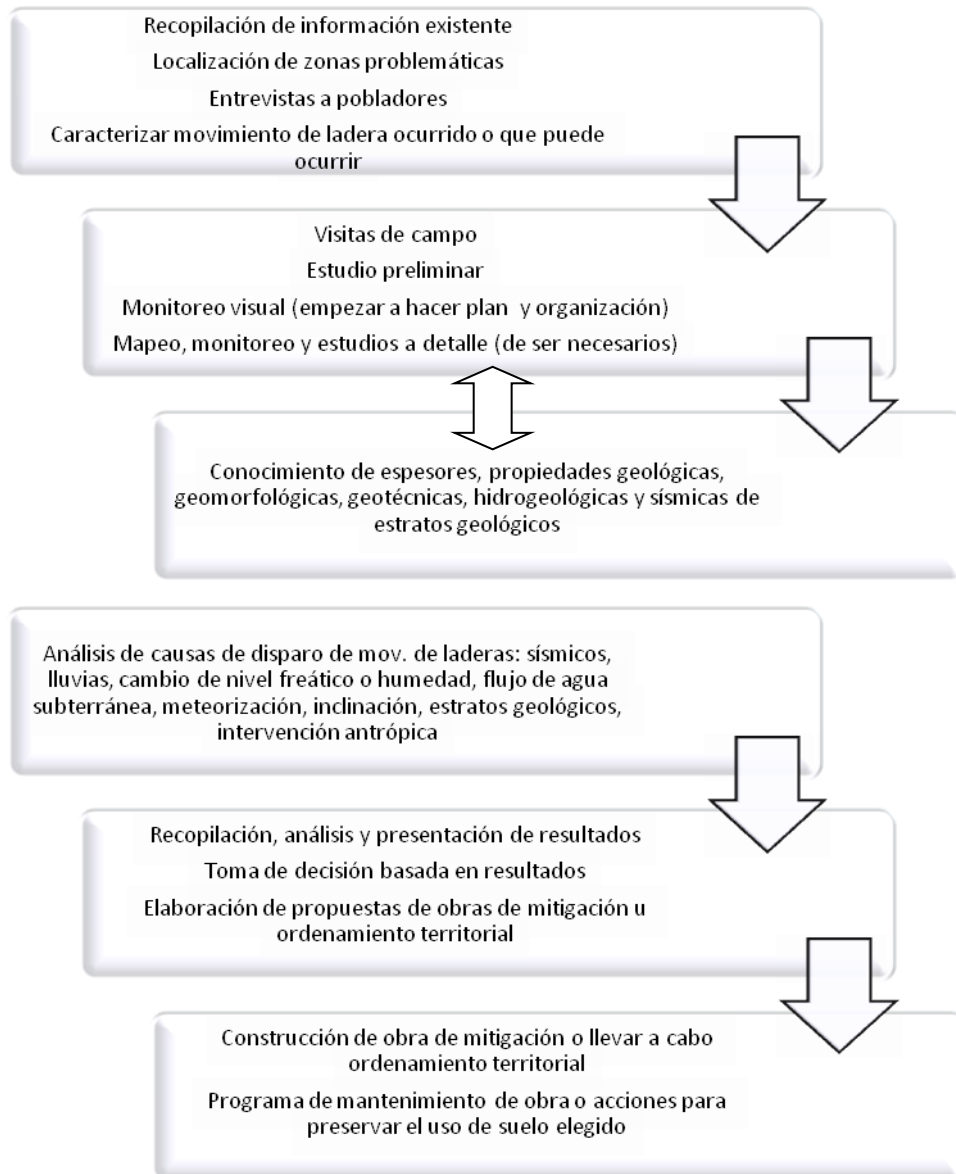


Imagen No. 17. Esquema general de pasos a seguir para disminuir amenaza por movimiento de ladera