

UNIVERSIDAD DE COSTA RICA
FACULTAD DE CIENCIAS BÁSICAS
ESCUELA CENTROAMERICANA DE GEOLOGÍA

**SUSCEPTIBILIDAD DE DESLIZAMIENTO DEL CANTÓN DE ESCAZÚ Y ANÁLISIS A
DETALLE DE CINCO CASOS ESPECÍFICOS: PALO CAMPANA, SALITRILLO, CURIO,
Y LA CUENCA DE LOS RIOS AGRES Y GUAYABOS**

SEMINARIO DE GRADUACIÓN

Geól. Daniel Soto Acosta
Geól. Ignacio Chaves Salas
Geól. Melissa Durán Monge
Geól. Daniela Herra Herrera

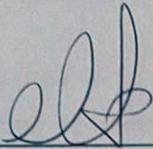
San José, Costa Rica

Diciembre, 2012

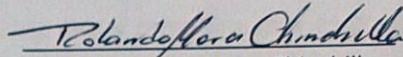
Hoja de Aprobación

Memoria sometida y aceptada por el Comité Evaluador de la Universidad de Costa Rica, como requisito parcial para optar por el grado académico de Licenciados en Geología.

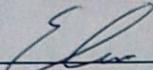
Comité Evaluador



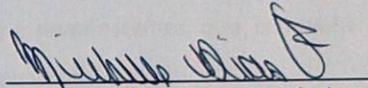
M.Sc. Giovanni Peraldo Huertas
Escuela Centroamericana de Geología
Director



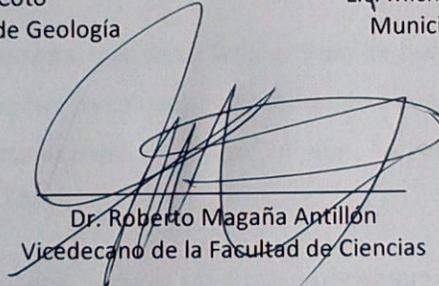
M.Sc. Rolando Mora Chinchilla
Escuela Centroamericana de Geología
Co-Director



M.Sc. Elena Badilla Coto
Escuela Centroamericana de Geología
Co-Directora

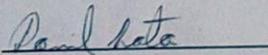


Lic. Michelle Arias Fernández
Municipalidad de Escazú
Lectora

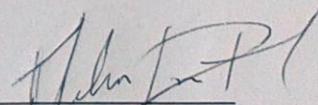


Dr. Roberto Magaña Antillón
Vicedecano de la Facultad de Ciencias

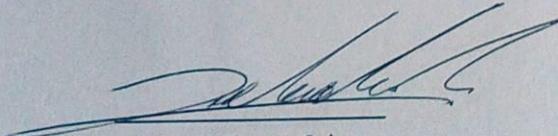
Sustentantes



Daniel Soto Acosta
Sustentante



Melissa Durán Monge
Sustentante



Ignacio Chaves Salas
Sustentante



Daniela Herra Herrera
Sustentante

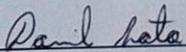
Derechos de propiedad intelectual

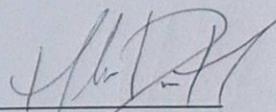
Nosotros, Daniel Soto Acosta, Ignacio Chaves Salas, Melissa Duran Monge y Daniela Herrera Herra, portadores de las Cédulas de Identidad No. 1-11060385, 1-835396, 1-12730708 y 2-579168, respectivamente, concedores de las sanciones legales con que la Ley Penal de la República de Costa Rica castiga el falso testimonio.

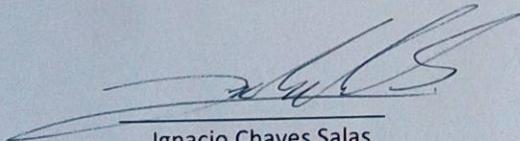
DECLARAMOS bajo la fe de juramento lo siguiente: Que somos estudiantes de la Escuela Centroamericana de Geología de la Universidad de Costa Rica y como requisito de graduación debemos defender nuestra Tesis para optar por el grado académico de Licenciatura en Geología, la cual versa sobre el tema: SUSCEPTIBILIDAD DE DESLIZAMIENTO DEL CANTÓN DE ESCAZÚ Y ANÁLISIS A DETALLE DE CINCO CASOS ESPECÍFICOS: PALO CAMPANA, SALITRILLO, CURIO, Y LA CUENCA DE LOS RIOS AGRES Y GUAYABOS. Por lo que manifestamos que la misma ha sido elaborada siguiendo las disposiciones exigidas por la Universidad.

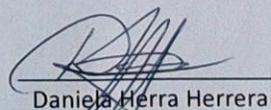
Además declaramos solemnemente que dicha Tesis es fruto de nuestro esfuerzo e investigación en su totalidad, que en ella no han participado personas ajenas a nuestro Director, Co- directores y Lector, instituciones ni organizaciones extrañas y que los documentos utilizados están respectivamente citados. ES TODO.

Firmo en la ciudad de San José a las 18 horas del día 06 de diciembre del 2012.


Daniel Soto Acosta
Sustentante


Melissa Durán Monge
Sustentante


Ignacio Chaves Salas
Sustentante


Daniela Herrera Herrera
Sustentante

Dedicatoria

La Balsa de Piedra

Ahora llegaban en multitud los sabios de la tierra y de las tierras, los averiguadores de movimientos y accidentes, estratos y bloques erráticos, martillo en mano, batiendo cuanto fuese piedra o piedra pareciese.

José Saramago

A nuestras familias...

Reconocimientos

Se agradece a nuestro director M.Sc. Giovanni Peraldo, por su ayuda en el trabajo de campo, apoyo con ideas y la excelente atención que nos prestó durante todo el proceso de tesis. A nuestra codirectora M.Sc. Elena Badilla por su ayuda y correcciones durante el proceso de esta investigación. Al M.Sc. Rolando Mora por sugerirnos y apoyarnos en el desarrollo de este trabajo.

Gracias al personal de la Municipalidad de Escazú, en especial a la geóloga Michelle Arias por sus consejos y su desinteresada colaboración en la visitas de campo; también al M.Sc. Lidier Esquivel, por su contribución con el transporte para las visitas de campo, así como los funcionarios que nos acompañaron.

En general, al personal de la Escuela de Geología y al Laboratorio de Geotecnia, por la gran ayuda brindada durante todo este periodo de investigación.

Y a nuestros familiares y amigos por todos los buenos deseos y palabras de ánimo que nos brindaron durante todo este tiempo.

Índice General

1. INTRODUCCIÓN	1
1.1 Justificación	1
1.2 Ubicación	3
1.3 Objetivos	4
1.3.1 Objetivo general	4
1.3.2 Objetivos específicos	4
1.4 Metodología	4
1.4.1 Fuentes de información	5
1.4.2 Técnicas de investigación	5
1.4.3 Distribución de trabajo	7
1.5 Limitantes del estudio	8
1.6 Antecedentes	9
2. GEOLOGIA	13
2.1 Descripción de las unidades geológicas aflorantes en el área de estudio	13
2.1.1 Formación Pacacua	13
2.1.2 Formación Peña Negra	18
2.1.3 Intrusivo y Cornubianitas de Escazú	20
2.1.4 Formación Grifo Alto	21
2.1.5 Formación Lavas Intracañón	23
2.1.6 Formación Avalancha Ardiente	24
2.1.7 Lahares y cenizas	26
2.1.8 Depósitos aluviales y coluviales	27
2.2 Geología Estructural	29
3 GEOMORFOLOGIA	32
3.1 Geomorfología Local	32
3.1.1 Formas de origen denudacional	32
3.1.2 Formas de origen estructural	39
3.1.3 Formas de origen fluvial	40

4	GEOTECNIA	48
4.1	Caracterización geotécnica	48
4.1.1	Propiedades físicas de los suelos	52
4.1.2	Clasificación de suelos	56
5	SUSCEPTIBILIDAD A DESLIZAMIENTOS	59
5.1	Zonificación de la susceptibilidad a deslizamientos en el cantón de Escazú	59
5.1.1	Descripción de los parámetros	60
5.2	Análisis de resultados	74
5.3	Caracterización de Deslizamientos	78
6	CONSIDERACIONES SOBRE ELEMENTOS EN RIESGO	94
6.1	Elementos en Riesgo	94
6.1.1	Sistemas de abastecimiento de agua potable	94
6.1.2	Red Vial	97
6.1.3	Viviendas	100
7	EVOLUCIÓN ESPACIO TEMPORAL DEL CANTÓN DE ESCAZÚ	107
7.1	Distribución demográfica del cantón de Escazú	107
7.1.1	Proyecciones demográficas hasta el 2015 y su comportamiento en los últimos años	109
7.2	Desarrollo Urbano	112
8	DISCUSIÓN DE RESULTADOS	116
9	CONCLUSIONES	120
10	RECOMENDACIONES	124
11	REFERENCIAS	126
12	APÉNDICE	130

Índice de Figuras

Figura 1: Mapa de ubicación de la zona de estudio	3
Figura 2: Mapa Geológico	14
Figura 3: Mapa de Afloramientos	15
Figura 4: Areniscas finas a medias, color morado grisáceo. Muestra tomada en las coordenadas 518776/211428	16
Figura 5: Conglomerados brechosos polimícticos. Muestra tomada en las coordenadas 518673/209500	16
Figura 6: Arenisca fina silicificada localizada en las coordenadas 518214/214382	16
Figura 7 (A y B): Afloramiento Calle Raicero ubicado en las coordenadas 518778/211428	17
Figura 8 (A y B): Tajo ubicado en las coordenadas 518685/ 209534	18
Figura 9: Afloramiento en el cauce del río Agres. Coordenadas 522118/208082	18
Figura 10: Muestra 18-10-11-02 tomada en las coordenadas 519220/208109	19
Figura 11: Afloramiento Alto Tapezco. Coordenadas 519174/208395. Se muestran las lutitas muy fracturadas	19
Figura 12: Meteorización esferoidal en Alto Tapezco. Coordenadas 519174/208395	20
Figura 13 (A y B): Afloramiento de intrusivos. Ubicado en las coordenadas 205255/520500	21
Figura 14: Muestra 18-10-11-02 tomada en las coordenadas 519220/208109	22
Figura 15: Afloramiento donde se observan tobas, coordenadas 520606/205101	22
Figura 16 (A y B): (A) Afloramiento de andesitas en Quebrada Yeguas, (B) Plano de falla coordenadas 519304/211491	23
Figura 17: Afloramiento de Lavas Intracañón. Ubicado en las coordenadas 515500/216800	23
Figura 18: Muestra 17-8-12-01 Andesita de la Fm. Lavas Intracañón. Coordenadas 515500/216800	24
Figura 19: Ignimbritas columnares. Coordenadas 515500/216800	24
Figura 20: Bloque de ignimbrita. Observado en las coordenadas 518214/214382	25
Figura 21: Talud de Construplaza, coordenadas 518214/214382	25
Figura 22: Contacto de las ignimbritas con la arenisca silicificada de la Fm. Pacacua, esto en el sector de Construplaza	26
Figura 23: Depósito ignimbrítico en el sector de Construplaza	26

Figura 24: Afloramiento detrás de EPA Escazú. Se observa un espesor considerable de lahar. Coordenadas 521963/213275	27
Figura 25 (A y B): Se muestra un cono de talus. Coordenadas 521650/207800	28
Figura 26: Mapa de pendientes	35
Figura 27: Modelo de sombras	36
Figura 28: Mapa geomorfológico	37
Figura 29: Bloque basculado y escarpe en el sector de Bebedero	38
Figura 30: Garganta Río Tiribí	40
Figura 31: Vista del valle del río Agres a la altura de los Cerros de Escazú. Coordenadas 521670/ 206356	41
Figura 32 (A y B): Laderas de los Cerros de Escazú que comprende el valle del río Agres. Coordenadas 521641/ 206643	41
Figura 33: Ampliación del valle del río por depósitos de flujo	42
Figura 34: Cauce del río Agres en las coordenadas 520075/214065	42
Figura 35: Garganta del río Agres, tomada en las cercanías de Multiplaza Escazú, coordenadas 520075/214065	42
Figura 36: Valle del Río Cruz, en el lugar conocido como Filtros coordenadas 520847/209724	43
Figura 37: Valle de la Quebrada Lajas, coordenadas 520317/206975	44
Figura 38: Quebrada Lajas, coordenadas 520400/206545	44
Figura 39: Profundización del cauce, coordenadas 520317/206975	44
Figura 40 (A y B): Ampliación de la Quebrada Lajas, luego del flujo de detrítos del 3-11-10	45
Figura 41 (A y B): Vista del actual curso de la quebrada Lajas luego del flujo de detrítos del 3-11-10, coordenadas 520650/208340	46
Figura 42: Trabajo de campo realizado en el muestreo de suelos	48
Figura 43: Puntos muestreo de suelos	50
Figura 44: Mapa de clasificación suelos	51
Figura 45: Peso unitario húmedo, seco y saturado para cada muestra, y relación existente entre ellas	53
Figura 46: Relación de vacíos y gravedad específica para cada muestra, y relación existente entre ellas	54
Figura 47: Contenido de humedad y grado de saturación para cada muestra, y relación	55

existente entre ellas	
Figura 48: Tipos de suelos que conforman el cantón y su predominancia	58
Figura 49 (A y B): Desprendimiento de material tras el sismo del 5 de setiembre 2012. Coordenadas 515500/216800	67
Figura 50: Agrietamiento en el camino tras sismo del 5 de setiembre 2012. Coordenadas 515500/216800	67
Figura 51: Parámetros método MV	68
Figura 52: Mapa de susceptibilidad al deslizamiento cantón de Escazú (método MV)	69
Figura 53: Parámetros método MVM	70
Figura 54: Mapa de susceptibilidad al deslizamiento cantón de Escazú (método MVM)	71
Figura 55: Parámetros método MVM con la modificación geomorfológica	72
Figura 56: Mapa de susceptibilidad al deslizamiento cantón de Escazú (método MVM modificación geomorfológica)	73
Figura 57: Porcentajes de área por unidad de susceptibilidad	75
Figura 58: Resumen de los resultados aplicando las tres metodologías	77
Figura 59: Vista del deslizamiento de Torrotillo, a partir de una imagen de la fotografía aérea del año 1974	78
Figura 60 (A y B): Diferentes vistas los deslizamientos, Alto Raicero y Alto Granadilla	80
Figura 61: Vista del deslizamiento Alto El Tajo, mediante Imagen Google Earth 2012, Inav/ Geosistemas SRL	81
Figura 62 (A y B): Diagrama de bloque basculado observado en Alto el Tajo	82
Figura 63: Árbol caído producto del movimiento del suelo, en el sector de Alto Palo Campana. Coordenadas 523207/209307	82
Figura 64: Parte de la corona del deslizamiento de Palo Campana. Coordenadas 523600/209200	82
Figura 65 (A y B): Parte de la corona del deslizamiento de Salitrillos. Coordenadas 522527/208995	83
Figura 66 (A y B): Deslizamiento Curio, topografía del sitio y evidencias de grietas. Coordenadas 521975/208800	84
Figura 67: Deslizamiento en gradas, en donde las flechas marcan la dirección del movimiento. Coordenadas 522991/209511	84
Figura 68: Deslizamiento en gradas al lado del camino, en las coordenadas 522351/210507	85

Figura 69: Corona del deslizamiento 10 y depósitos en lóbulo. Coordenadas 522423/211347	85
Figura 70: Corona del deslizamiento 11. Coordenadas 518958/209795	86
Figura 71: Vista de corona de deslizamiento. Coordenadas 519192/209865	86
Figura 72: Flujo de material localizado en las coordenadas 520525/209472	87
Figura 73: Corona del deslizamiento 14, localizado en las coordenadas 520525/209631	87
Figura 74: Flujo superficial del terreno localizado en las coordenadas 520687/209860	87
Figura 75: Deslizamiento 16 localizado en las coordenadas 520779/209787	88
Figura 76: Agrietamiento en el terreno. Coordenadas 520847/209724	88
Figura 77: Corona del deslizamiento 18 y depósitos de material. Coordenadas 521473/206222	88
Figura 78: Corona del deslizamiento y material altamente meteorizado. Coordenadas 520533/205185	89
Figura 79: Corona y movimiento del material con coloraciones rojizas. Coordenadas 522118/208082	89
Figura 80: Corona del deslizamiento 21. Coordenadas 522106/207949	89
Figura 81: Mapa inventario de deslizamientos	91
Figura 82: Subsistencia del terreno de 1,3 m. Coordenadas 520042/208928	92
Figura 83: Cauce de la quebrada Lajas después del evento del 2010, por donde bajó un flujo que destruyó un tanque de abastecimiento de agua. Coordenadas 520611/207807	95
Figura 84 (A y B): (A) Tanque cerca del talud del río. (B) Se observa el tanque y abajo el puente y unas viviendas	96
Figura 85 (A, B, C y D): (A, B) Tanques de abastecimiento de agua dentro del cauce del río Agres, (C, D) otras estructuras asociadas a los tanques y bloques métricos. Coordenadas 522050/ 207624	97
Figura 86 (A y B): (A) deslizamiento en marzo 2011, (B) deslizamiento agosto 2012. Coordenadas 520847/209724	98
Figura 87: Material del deslizamiento que llegó hasta la calle, afectando la vía y el alcantarillado	98
Figura 88 (A y B): (A) Desplazamientos verticales de hasta 2 metros, (B) Agrietamiento en la vía. Coordenadas 521975/208800	99
Figura 89: Vista de los bloques sobre el Río Cruz, aguas arriba del puente, en las	100

coordenadas 520847/209760	
Figura 90 (A y B): (A) Grietas observadas en la parte alta del deslizamiento de Palo Campano. (B) Viviendas ubicadas al pie de la ladera	101
Figura 91: Grietas en la parte alta de la corona. Coordenadas 522700/209150	102
Figura 92: Área de influencia del deslizamiento Curio. Coordenadas 521975/208800	103
Figura 93 (A y B): (A) Erosión lateral del terreno (521300/212100) (Chaves,2008), (B) Erosión de la margen izquierda durante la época lluviosa (521342/212820) (Mendez,2008)	103
Figura 94 (A y B): (A) zona de desprendimiento cercana a muros de gaviones, coordenadas 520851/210167 (Barahona, 2007), (B) muro de concreto, coordenadas 520739/209910 (Chaves, 2011)	104
Figura 95: Ubicación de elementos en riesgo (red vial, sistemas de abastecimiento de agua potable) y eventual flujo por el cauce del río Agres	105
Figura 96: Recorrido de eventuales flujos por los cauces de las quebradas y ríos en una parte del sector suroeste del cantón de Escazú	106
Figura 97: Distribución demográfica del cantón de Escazú. Fuente INEC (2011)	108
Figura 98: Distribución poblacional por área de distrito. Fuentes INEC (2011) y PNUD (2008)	108
Figura 99: Comportamiento y proyección al 2015 de la población en el distrito de Escazú. Fuente INEC (2011)	109
Figura 100: Comportamiento y proyección al 2015 de la población en el distrito de San Rafael. Fuente INEC (2011)	110
Figura 101: Comportamiento y proyección al 2015 de la población en el distrito de San Antonio. Fuente INEC (2011)	110
Figura 102: Comportamiento y proyección al 2015 de la población del cantón de Escazú. Fuente INEC (2011)	111
Figura 103 (A y B): Desarrollo urbano en el cantón de Escazú, comparando el área de mayor crecimiento urbano, que es el distrito de San Rafael. (A) Se muestra San Rafael en el año 1945 (B) Cambio para el año 1974, principalmente en la red vial	114
Figura 104 (A y B): Desarrollo urbano en el cantón de Escazú, comparando el área de mayor crecimiento urbano, que es el distrito de San Rafael. (A) Foto aérea de 1977 (B) Cambio para el año 2012	115

Índice de Cuadros

Cuadro 1: Fallas cartografiadas en el cantón de Escazú	29
Cuadro 2: Datos de fallas locales observadas en la zona de estudio	30
Cuadro 3: Propiedades físicas de los suelos del cantón de Escazú	52
Cuadro 4: Resultados de los ensayos de granulometría y de límites de Atterberg	56
Cuadro 5: Valoración del parámetro humedad del terreno (S_h) (Mora <i>et al.</i> , 1992).	61
Cuadro 6: Valoración del parámetro susceptibilidad litológica (S_l) (Mora <i>et al.</i> , 1992)	61
Cuadro 7: Valoración del parámetro del relieve relativo (S_r) (Mora <i>et al.</i> , 1992).	62
Cuadro 8: Valoración del parámetro de pendiente (S_p) (Mora <i>et al.</i> , 2002)	63
Cuadro 9: Valoración del parámetro susceptibilidad geomorfológica (S_g)	64
Cuadro 10: Valoración del parámetro de disparo por lluvia (Mora <i>et al.</i> , 1992).	65
Cuadro 11: Valoración del parámetro de disparo por sismo (Mora <i>et al.</i> , 1992).	66
Cuadro 12: Población total por distrito cantón de Escazú. Fuente INEC (2011).	107

Índice de Acrónimos

AyA	Instituto Costarricense de Acueductos y Alcantarillados
CNE	Comisión Nacional de Prevención de Riesgos y Atención de Emergencias
IMN	Instituto Meteorológico Nacional
INEC	Instituto Nacional de Estadística y Censos de Costa Rica
MIDEPLAN	Ministerio de Planificación Nacional y Política Económica
RSN	Red Sismológica Nacional
SUCS	Sistema Unificado de Clasificación de Suelos
PNUD	Programa de las Naciones Unidas para el Desarrollo
ASTM	American Society for Testing and Materials
ITC	Institute for Geo-Information Science and Earth Observations

Resumen

El cantón de Escazú ha presentado, a través del tiempo, problemas de inestabilidad de laderas y flujos asociados, que han causado pérdidas de vidas y destrucción. Actualmente el desarrollo urbano y comercial del cantón está en expansión, lo que definitivamente crea la necesidad de estudiar los procesos de inestabilidad de laderas y dar recomendaciones al respecto. El fin de la presente investigación es justamente estudiar dicho proceso y aportar un documento útil a los tomadores de decisiones respecto al desarrollo futuro del cantón.

La inestabilidad de las laderas y flujos asociados se relaciona con las características geológicas, geomorfológicas y geotécnicas del área, esto sumado a las fuertes precipitaciones que se han registrado y que ayudan a su intensificación, así como también el desarrollo urbanístico en zonas de inestabilidad. Se hace un análisis general de estabilidad de laderas, detallando los sectores de Palo Campana, Salitrillos, Curio y las microcuencas de los ríos Agres y Guayabos.

A partir de la recopilación de algunos estudios de la geología de la zona y la comprobación de campo, se identificaron las formaciones Pacacua, Peña Negra, Intrusivo y Cornubianitas Escazú, Grifo Alto, Lavas Intracañón, Avalancha Ardiente, Lahares y cenizas, así como depósitos aluviales y coluviales.

Mediante análisis de fotografías aéreas y trabajo de campo, se identificaron 12 unidades geomorfológicas, las cuales fueron nombradas según la clasificación del sistema propuesto por el Institute for Geo-Information Science and Earth Observations (ITC). Fueron caracterizados 29 deslizamientos en todo el cantón, de los cuales 17 corresponden a los observados en el campo y 11 fueron observados en foto aérea.

Por otra parte, se realizó una campaña de muestreo de suelos para las diferentes litologías identificadas en el cantón. Con el análisis de las muestras y los ensayos realizados, se generó un mapa de clasificación de suelos, determinando la presencia de 6 tipos de suelos en el cantón, donde los CL arcillas delgadas y MH limos elásticos, son los que predominan.

Integrando los resultados anteriormente descritos, además de la utilización de los métodos de análisis de susceptibilidad de deslizamientos, Mora Varson y Mora Varson Mora, se identifican las

áreas de mayor inestabilidad en el cantón, localizadas principalmente en el distrito de San Antonio.

Una vez identificadas las principales áreas de inestabilidad, se determinaron los elementos en riesgo que han sido y podrían ser afectados; siendo que la mayor cantidad de estos elementos se localizan en el distrito de San Antonio, el cual es el más poblado, a pesar de que actualmente el distrito con mayor desarrollo comercial e industrial es el de San Rafael.

Sumado a todo lo anterior, en el distrito de San Antonio se deberá ser más estricto en el otorgamiento de permisos de construcción, solicitando estudios detallados de suelos y estabilidad de taludes.

Es de suma importancia estar consciente de los riesgos existentes en las comunidades de todo el cantón, por lo que se recomienda que las autoridades locales realicen una campaña de información a la población de las zonas vulnerables y así los habitantes tomen las medidas preventivas correspondientes.

1. INTRODUCCIÓN

El cantón de Escazú es el número 2 de la provincia de San José, se ubica al oeste de la capital y limita al oeste con Santa Ana y al este con San José y Alajuelita. Forma parte de la Gran Área Metropolitana. En los últimos 20 años, el cantón ha tenido un incremento en el desarrollo urbano e industrial, representando así un sector de riqueza económica importante para el desarrollo del país. Este cantón posee una geodinámica externa muy activa, facilitada por la presencia de laderas de alta pendiente, la variación litológica, fallamiento local, y eventos hidrometeorológicos históricos que han afectado al cantón en reiteradas ocasiones. Por lo tanto, se reúnen en este cantón las condiciones idóneas para ser analizadas e integradas en un estudio a detalle de la susceptibilidad de deslizamiento del cantón de Escazú.

1.1 Justificación

En los últimos años, el cantón de Escazú ha presentado importantes eventos producto de la inestabilidad de sus laderas, tal como ocurrió en 2010 en la comunidad de Lajas, afectada por un flujo que transitó a lo largo de la quebrada homónima y que produjo 24 víctimas mortales.

Los flujos de lodo y escombros no han sido ajenos a la historia del cantón; se conocen registros de 1861, cuando un evento similar afectó al cantón, generado por una serie de deslizamientos en la cuenca alta del río Agres (San Rafael), en donde también ocurrieron muertes y destrucción de infraestructura (González, 1910).

La inestabilidad de las laderas y flujos asociados se relaciona con las características geológicas y geomorfológicas del área, esto sumado a las fuertes precipitaciones que se han registrado y que han ayudado a su intensificación, así como también al desarrollo urbanístico en zonas de inestabilidad.

Debido a la amenaza que la inestabilidad de las laderas representa para Escazú, el gobierno local solicitó un estudio geológico integral de todo el cantón, en el cual se incorpora como puntos específicos, los sectores de Palo Campana, Salitrillo, Curio y las cuencas Guayabos y Agres, los cuales se han visto afectados por deslizamientos y flujos de lodo. Conforme se avanzó en este estudio, a lo largo de Escazú, se incorporaron sectores igualmente conflictivos en cuanto a su

geodinámica externa, tal es el caso de áreas de posible inestabilidad de laderas, como Bebedero y quebrada Lajas.

En la sección de antecedentes se describen una serie de trabajos que se han realizado en el área de Escazú, referentes principalmente a eventos de deslizamientos, por medio de recopilaciones históricas e informes técnicos. Sin embargo no se han integrado los aspectos geológicos, geotécnicos y geomorfológicos, de sectores como Palo Campana, Salitrillo, Curio, Bebedero y las cuencas Guayabos, Agres y Lajas, en el cantón de Escazú. Es por esto que en el presente estudio se ofrece una zonificación de los sitios más susceptibles a deslizamientos, al integrar la geología, geomorfología y geotecnia de la zona.

Este estudio es una herramienta que coadyuvará estudios más detallados sobre ordenamiento territorial y de gestión del riesgo, que pretendan disminuir de alguna manera el riesgo históricamente construido en el cantón de Escazú.

Esta investigación se financió parcialmente mediante el proyecto 830-BO-055 “Inventariado de deslizamientos en el área central del país” del Centro de Investigaciones en Ciencias Geológicas (CICG) de la Universidad de Costa Rica, la Municipalidad de Escazú y con recursos propios.

Esta Memoria fue defendida y aprobada el 6 de diciembre del 2012.

1.2 Ubicación

El presente estudio comprende todo el cantón de Escazú, detallando en los sectores de Palo Campana, Salitrillos, Curio, Bebedero y las microcuencas de los ríos Agres y Guayabos (figura 1).

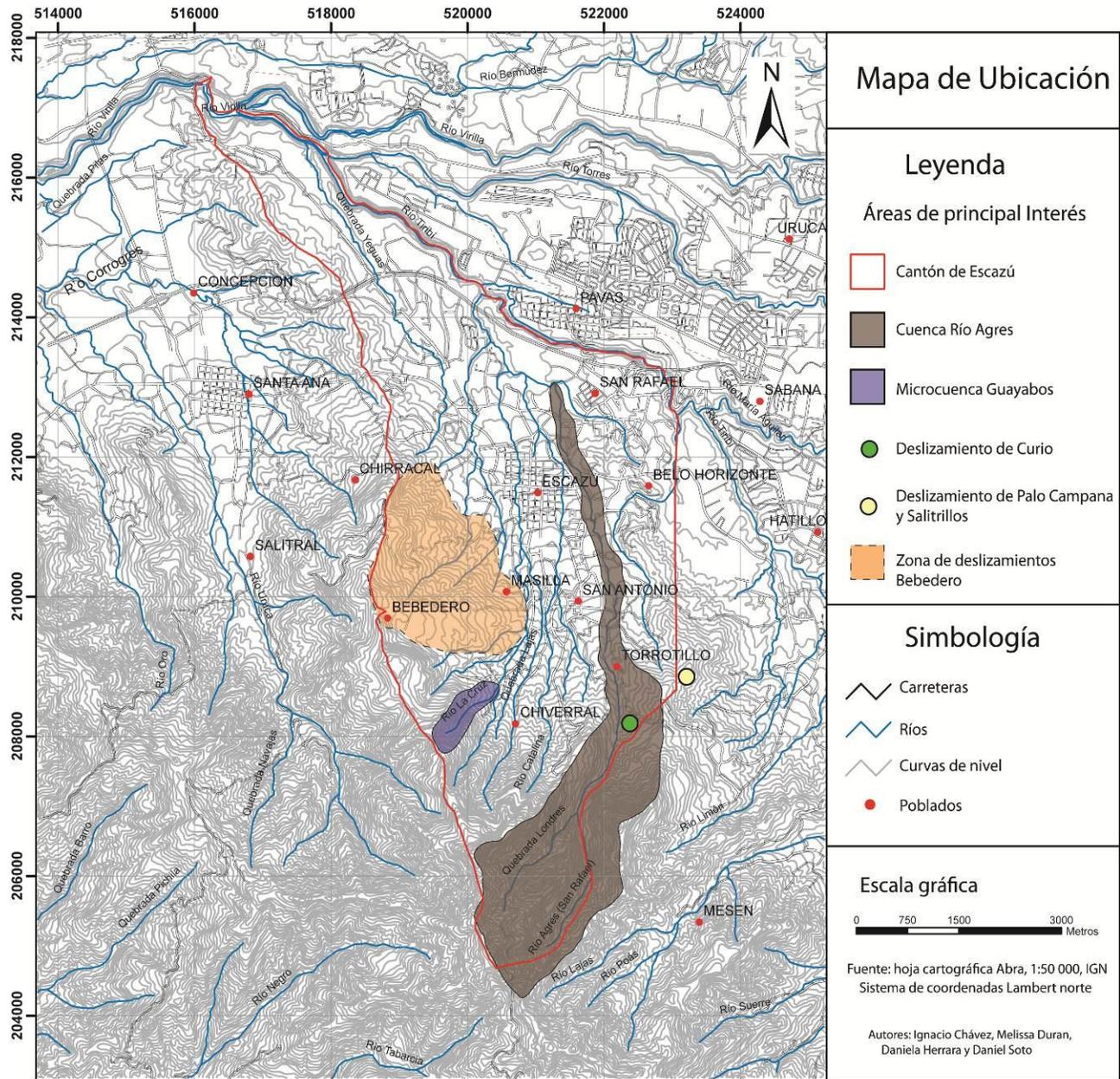


Figura 1: Mapa de ubicación de la zona de estudio.

1.3 Objetivos

1.3.1 Objetivo general

Evaluar la susceptibilidad a la inestabilidad de las laderas en el cantón de Escazú y analizar a detalle los sectores de Palo Campana, Salitrillos, Curio y las microcuencas de los ríos Agres y Guayabos, con base en la caracterización geológica, geomorfológica y geotécnica de la zona.

1.3.2 Objetivos específicos

- a) Corroborar la geología de todo el cantón de Escazú.
- b) Describir geomorfológicamente a detalle el cantón de Escazú, por medio de fotografías aéreas de diferentes años, especialmente para los sectores con deslizamientos importantes.
- c) Caracterizar geotécnicamente los sitios de mayor susceptibilidad a deslizamientos del cantón de Escazú.
- d) Zonificar la susceptibilidad al deslizamiento del cantón de Escazú.
- e) Identificar los principales elementos en riesgo en el cantón de Escazú.
- f) Identificar la evolución espacio- temporal del desarrollo urbano, comercial e industrial en el cantón, y analizarlo con respecto a las áreas de susceptibilidad a deslizamientos determinadas por este estudio.

1.4 Metodología

La presente investigación consistió en realizar, para todo el cantón de Escazú, las siguientes actividades:

1. Recopilación y corroboración de la geología existente.
2. Análisis geomorfológico a detalle.
3. Toma de datos y muestras de los afloramientos identificados a lo largo de todo el cantón de Escazú, detallando en los sectores de Palo Campana, Salitrillo, Curio, Bebedero y las cuencas Guayabos, Agres y Lajas, esto para la corroboración geológica del cantón.
4. Muestreo de suelos por formación geológica para análisis físicos, entre los que están clasificación de suelo, peso unitario y límite granulométrico.
5. Zonificación de la susceptibilidad a deslizamiento en el cantón de Escazú.

6. Identificación de los principales elementos en riesgo en el cantón.
7. Análisis de uso actual de la tierra del cantón, así como la tendencia del crecimiento urbano, comercial e industrial, con respecto a las áreas de susceptibilidad a deslizamientos determinadas por este estudio.

1.4.1 Fuentes de información

a. Fuentes Primarias

Las fuentes primarias consistieron, para el estudio en cuestión, directamente en la observación y trabajo de campo, recolección de muestras, análisis de fotos aéreas, y entrevistas a vecinos de los sitios de interés, que se han visto afectados por eventos de deslizamientos, o que han sido testigos de actividades antrópicas que ayudaron y propiciaron deslizamientos y otros eventos erosivos, y además a funcionarios de la municipalidad de Escazú.

b. Fuentes Secundarias

Estas fuentes se refieren a aquellos portadores de datos e información que han sido previamente retransmitidos o grabados en cualquier documento (Eyssautier, 2002). Para efectos de esta memoria, se consultaron los estudios previos realizados en la zona de estudio, detallados en la sección de antecedentes.

1.4.2 Técnicas de Investigación

Las técnicas de investigación, según Muñoz (1998), pueden ser: documental, de campo o mixta. Para este estudio, en particular, se trabajó por medio de la investigación mixta, ya que se recopilaron los datos existentes, correspondientes a estudios previos en el área de estudio, y los datos obtenidos en el campo.

Por otra parte, la investigación de campo contempla, en primer lugar, el mapeo geológico, geomorfológico y geotécnico del cantón de Escazú, así como un inventario de deslizamientos y la evolución espacio-temporal del desarrollo urbano, comercial e industrial en el cantón, con el fin de corroborar datos de informes anteriores, generar nueva información de importancia para la municipalidad e identificar sitios susceptibles a deslizamientos y la vulnerabilidad de los centros actuales de población.

Para el cumplimiento de los objetivos de este proyecto, se utilizó una escala de trabajo 1: 25 000; sin embargo, con el fin de mostrar un mayor detalle, en algunos sectores de gran interés se trabajó con 1:10 000. Además, se utilizaron fotografías aéreas del Proyecto Terra 1998 (escala 1:40 000), para afinar la geomorfología del cantón de Escazú.

Se llevó a cabo el análisis a detalle de cuatro casos, separados por las condiciones propias de cada sitio. A continuación se describen las actividades realizadas para cada uno:

a. Deslizamientos de Palo de Campana, Salitrillos Curio y Bebedero:

- Levantamiento de campo detallado para determinar la geología, geomorfología y delimitar la zona del deslizamiento.
- Observación y análisis de las fotos aéreas del Proyecto Terra 1998, para afinar la geomorfología e identificar las zonas susceptibles a deslizamientos.
- Análisis de fotografías aéreas tomadas desde 1945 hasta 2005, con el fin de determinar variaciones de los deslizamientos a lo largo del tiempo.
- Mapeo de elementos en riesgo, por medio de fotografías aéreas y giras de campo, para realizar un análisis preliminar de la vulnerabilidad de los poblados e infraestructura de los sectores en cuestión.

b. Cuencas del río Agres, Guayabos y Lajas:

- Levantamiento de campo detallado para determinar la geología y geomorfología.
- Observación y análisis de las fotografías aéreas del Proyecto Terra 1998, para detallar la geomorfología e identificar las zonas susceptibles a deslizamientos.
- Mapeo de elementos en riesgo, por medio de fotografías aéreas y giras de campo, para realizar un análisis preliminar de la vulnerabilidad de los poblados e infraestructura de los sectores en cuestión.

c. Zonificación de áreas de mayor vulnerabilidad a deslizamientos:

- Inventario de deslizamientos tanto en el campo como por la observación y análisis de fotos aéreas de 1945 hasta 1998.

- Implementación, para el análisis de susceptibilidad al deslizamiento en todo el cantón de Escazú, de la metodología Mora Vahrson (1992) y las modificaciones propuestas a este método por Mora *et al.* (2002) (conocido como el método Mora - Vahrson – Mora) y por Camacho *et al.* 2004. Se trabajaron variantes de las metodologías, comparándolas entre sí, con el fin de observar cual ofrece mejores resultados en función de las observaciones de campo.

Dichas metodologías se aplican mediante la combinación de elementos pasivos y factores de disparo (Mora, R. et al., 1992):

$$H = EP * D$$

donde:

H: grado de susceptibilidad al deslizamiento,

EP: valor producto de la combinación de los elementos pasivos, y

D: valor del factor de disparo.

d. Evolución espacio-temporal del desarrollo urbano, comercial e industrial

- Identificación de cambios en infraestructura y desarrollo urbano, comercial e industrial, observados en las fotografías aéreas tomadas desde 1945 hasta la fecha, analizando el crecimiento urbano y el impacto que este ha generado en las zonas de susceptibilidad a deslizamientos definidas para el cantón de Escazú.

1.4.3 Distribución de trabajo

La distribución del trabajo se realizó según los objetivos específicos mencionados en el apartado 1.3.2. Sin embargo, todas las personas participaron de manera activa en todas las tareas y actividades que implicaron dicho estudio, de manera que cada participante logró alcanzar todos los objetivos planteados.

1.5 Limitantes del estudio

Al llevar a cabo este estudio integrado, se encontraron varias limitantes, las cuales se detallan a continuación.

Algunas de las fotografías aéreas no presentan una buena resolución, lo que dificulta su interpretación; solo las fotografías del año 1974 cubren todo el cantón de Escazú, por lo que la delimitación de formas solo pudo realizarse completa para este año.

Para el análisis de susceptibilidad al deslizamiento en el cantón de Escazú, se aplicó la metodología Mora Vahrson (MV) y las modificaciones propuestas a este método por Mora *et al.* 2002 (conocido como el método Mora - Vahrson – Mora) y por Camacho *et al.* 2004. Sin embargo, el cantón de Escazú no cuenta con una red meteorológica cercana que ofrezca una variabilidad óptima de datos para determinar los parámetros de humedad del terreno y de disparo por lluvia. La estación más cercana se localiza en Salitral de Santa Ana, conocida como la estación Matinilla- Santa Ana, del IMN.

El desarrollo urbanístico en todo el cantón también constituyó una limitante importante para este estudio; la cabecera del cantón de Escazú se encuentra casi en su totalidad urbanizada y esto impide muchas veces el acceso a algunos sectores residenciales donde se observó que había afloramientos, además de dificultar la delimitación de grandes áreas de inestabilidad.

En el capítulo 6, sobre los elementos en riesgo identificados a lo largo de todo el cantón de Escazú, se analizan algunos sistemas de abastecimiento de agua potable ubicados en sitios no aptos, por lo que son considerados como elementos en riesgo, en donde sus estructuras podrían verse afectadas al igual que el servicio que brindan; se consultó, en el AyA, institución que maneja la información de qué sectores son abastecidos y que eventualmente se verían directamente afectados por daños en los tanques y paralización del servicio, sin embargo ésta no nos brindó la información solicitada.

1.6 Antecedentes

En el cantón de Escazú se han efectuado diversos estudios sobre geología y temas relacionados, que fueron consultados y analizados para llevar a cabo esta memoria. A continuación se hace un breve resumen del contenido de dichos estudios.

González (1910) publicó una compilación de datos de temblores, terremotos, inundaciones y erupciones volcánicas en Costa Rica, ocurridos entre 1608-1910; en este trabajo, el autor describió una inundación ocurrida en 1861, en el cantón de Escazú, tras un flujo de lodo que bajó por el río Agres, provocado por deslizamientos en la parte alta y el incremento del caudal de dicho río. Destaca una serie de daños humanos y de infraestructura en el cantón.

Dóndoli (1950) elaboró un informe para la Municipalidad de Escazú sobre las fuentes de agua potable para el abastecimiento de la cañería. En este informe describe la geología de los Cerros de Escazú para fines hidrogeológicos; además, este autor en 1970 estableció una serie de recomendaciones para el adecuado uso del recurso hídrico en el área.

Rivier (1979) realizó un estudio geológico en el área norte de los Cerros de Escazú, con el propósito de aclarar relaciones estratigráficas de las formaciones Térraba y Pacacua, y así producir un mapa geológico escala 1:25 000.

Madrigal & Rojas (1980) clasificaron geomorfológicamente el área en tres unidades, a saber, Lomas de pendiente suave en rocas de la Formación Pacacua, Lomas de Altos de las Palomas y Macizo de Escazú.

Denyer & Arias (1991) redefinieron la estratigrafía del Valle Central y propusieron un modelo tectónico con base en estudios estructurales y de relaciones estratigráficas. Centrarón su investigación en las hojas topográficas Abra, Carraigres, Candelaria y Río Grande.

Hernández & Vargas (1992) elaboraron la Campaña Geológica en el cantón de Escazú, en donde efectuaron estudios de geología, recursos naturales y consideraciones económicas, aspectos geotécnicos, ambientales y de peligrosidad geológica. Además, definieron una geomorfología del área de Escazú, clasificando las unidades geomorfológicas por tipo de pendiente, las cuales corresponden a: Unidad de Cerros de pendiente fuerte, Unidad de Cerros de pendiente fuerte a

moderada, Unidad de Cerros de pendiente moderada y Unidad de Cerros de pendiente moderada a baja.

Mora (1993) elaboró un estudio integral del cantón de Escazú, como parte del Proyecto de Geología Urbana de la Gran Área Metropolitana, en donde incluye geología, recursos naturales, aspectos geotécnicos, ambientales y peligrosidad geológica. Determinó que el cantón de Escazú presenta problemas de inestabilidad de laderas por movimientos traslacionales de bloques, reptación, caída de rocas y flujos de detritos causados principalmente por ubicarse en laderas de altas pendientes, por un clima que produce fuertes precipitaciones, deficiencias en drenajes superficiales naturales o artificiales, entre otros.

Peraldo & Montero (1999) hacen mención del terremoto ocurrido el 10 de junio de 1835, el cual afectó el área occidental del Valle Central; específicamente, se hace mención al daño que tuvo el templo de Escazú.

Peraldo & Rojas (2000) elaboraron un catálogo de deslizamientos históricos para Costa Rica, periodo 1772-1960, en donde mencionan los deslizamientos de los Cerros de Escazú, conocidos en la época, La Campana y Piedra del Minero, en 1861. Basados en la descripción de González (1910), establecen que los principales daños se dieron en viviendas, comercios y agricultura; además, se estiman efectos secundarios como la caída de rocas y avalanchas, en donde el mecanismo activador fueron las lluvias. Otro evento producto de las lluvias en la zona, que se menciona en el catálogo, ocurrió en 1955 en San Antonio de Escazú; corresponde a un deslizamiento que cayó sobre los tanques de captación de agua potable ubicados en San Antonio, dejando sin abastecimiento de agua al cantón y a Santa Bárbara de Pavas.

Montero (2001) identifica y describe el fallamiento neotectónico de la región central del país, definiendo como fallas neotectónicas todas aquellas a las cuales se les ha determinado un desplazamiento cuaternario. Además, realizó una separación de las fallas y los sistemas de estas, según su marco tectónico, ya fuese antearco central, arco interno o tras arco. De esta manera, demostró que el Cinturón Deformado del Centro de Costa Rica se continúa con el del norte y este de Panamá, configurando los diversos límites de la microplaca de Panamá, con respecto a las placas del Coco, Caribe y Nazca.

Fernández & Montero (2002) realizaron un estudio del fallamiento y sismicidad del área entre Cartago y San José. Las fallas fueron evaluadas con criterios neotectónicos, con el propósito de encontrar la mejor correlación entre fallas y temblores. La sismicidad seleccionada muestra tres principales sistemas; el primero se ubica en el área de San Miguel-Higuito-Patarrá y se asocia con la Falla Agua Caliente, el segundo se ubica cerca de Escazú y se correlaciona con la Falla Bello Horizonte y el último se localiza al este de Coris, cerca de Tobosi, Cartago y se asocia con la falla Cangreja.

Alvarado *et al.* (2002) realizaron un estudio sobre la caída de bloques, de gran tamaño, y la generación de debris flows en las cuencas y partes altas cercanas a las poblaciones de Escazú y Santa Ana, y el peligro que éstos representan para ambos sectores residenciales.

Bonilla (2003) realizó, para la CNE, el informe DPM-INF-059-2003 acerca de los deslizamientos de Palo Campana, Salitrillos y Bebedero (microcuenca Quebrada Guayabo), en donde señala cómo los desprendimientos de material han afectado directamente las viviendas en la parte baja de las laderas, y cómo la inestabilidad de las laderas en la cuenca de Bebedero provoca caída de material, lo que implica represamientos que podrían generar avalanchas que afecten la parte baja de la cuenca, así como recomendaciones para disminuir la vulnerabilidad.

Madrigal (2004), en el informe de la CNE DPM-INF-349-2004, hace un análisis de la amenaza y vulnerabilidad de la cuenca del Río Agres y dicta una serie de medidas de prevención y mitigación dirigidas a las distintas instituciones, principalmente a la municipalidad de Escazú.

Montero *et al.* (2005) realizaron un estudio de los sistemas de fallas Agua Caliente y Río Azul, en donde se investigaron dos zonas sísmicas en la región central de Costa Rica, de las cuales, la que ha mostrado mayor actividad sísmica en tiempos históricos y recientes es la que se localiza del lado oeste y sur de San José, y que fue relacionada con el sistema de falla Agua Caliente, mientras que la segunda zona es limitada al sur por la falla Río Azul. Los autores realizaron una descripción espacial y temporal de la sismicidad del este de San José, describiendo así las fallas de mayor interés, la geología y su actividad. Además, describen las fallas localizadas en el sector central y oeste de San José y la relación entre fallamiento activo, la sismotectónica y la sismicidad reciente.

Chaves (2007) realizó, para la CNE, el informe DPM-INF-1655-2007 para la municipalidad de Escazú, en donde se da una descripción del deslizamiento en el Curio, el cual afectó directamente

la calle pública; además, se hace un análisis del posible riesgo que representaría para la población cercana, una posible reactivación de éste.

Denyer *et al.* (2009) mencionan que en el borde norte de los cerros de Escazú, el principal sistema de fallas es el denominado Escazú-Bello Horizonte-Aserrí-Jericó-Frailes; el cual describen con un patrón escalonado de fallas con rumbo NO y con una componente de desplazamiento de rumbo predominantemente dextral.

Arias *et al.* (2011) microzonificaron la microcuenca Lajas en el cantón de Escazú, esto tras el flujo de detritos ocurrido el 3 de noviembre del 2010 que afectó la comunidad de Lajas en el barrio El Carmen de San Antonio de Escazú, el cual cobró la vida de 24 personas y destruyó aproximadamente 9 viviendas y daños parciales a 19 casas, así como a la infraestructura pública.

2. GEOLOGÍA

2.1 Descripción de las unidades geológicas aflorantes en el área de estudio

A continuación se presenta una descripción de las formaciones geológicas que comprende el área de estudio. Su distribución en el área se muestra en el mapa geológico (figura 2). Los afloramientos estudiados se detallan en el mapa de afloramientos (figura 3).

2.1.1 Formación Pacacua

Esta formación ha sido estudiada por diferentes autores, siendo los más importantes los que se citan a continuación.

Castillo (1969) define a esta formación como una secuencia constituida por interestratificaciones de conglomerado brechoso y areniscas conglomeráticas, areniscas, limonitas y lutitas, todas tobáceas. Le asigna una edad Oligoceno (?) - Eoceno superior.

Rivier (1979) divide a la Formación Pacacua en dos unidades, una unidad inferior volcano-sedimentaria, con volcanoruditas líticas, volcarenitas, wackas y lutitas; y una unidad superior marina con areniscas finas a medias y lutitas negras en alternancia. Por medio de microfósiles (*Praeorbulina glomerosa*, *Orbulina cf. Universa*, *Bulimina sp.*, *Radiolaria*, *Globorotalia siakensis*, *Globorotalia sp.* y/O fósiles de ambiente marino somero), le asigna una edad Mioceno Medio.

Según Denyer & Arias (1991), esta formación está compuesta por estratificaciones de areniscas vulcanoclásticas, tobas, tobitas y brechas de diversas granulometrías y colores. Se presentan diques y sills de diabasa, así como troncos fósiles. Sobreyace a la formación Caraigres en contacto gradual, el contacto superior se presenta en transición con la Formación Brechas Verdes Coyolar y en contacto neto concordante con la Formación Peña Negra. Se considera una edad del Mioceno Inferior.

Figura 2: Mapa Geológico

Figura 3: Mapa de Afloramientos

Hernández & Vargas (1992) describen las rocas de la Formación Pacacua como areniscas, brechas y conglomerados fosilíferos, con un contacto superior gradual hacia la Formación Peña Negra y sobreyacida por la Formación Grifo Alto, formando una discordancia angular entre ellas. Basados en Rivier (1979), le asignan una edad Mioceno Medio.

Según nuestras observaciones, localmente la Fm. Pacacua aflora en el sector este del cantón de Escazú, cercano al distrito de San Antonio y al oeste, en las partes altas de Bebedero y Carrizal.

Litológicamente, corresponde con areniscas finas a medias de coloración morado grisáceo (figura 4) y conglomerados brechosos polimícticos (figura 5), con fragmentos de lava de tamaños milimétricos a centimétricos, los cuales flotan dentro de una matriz soldada de tonalidades verdosas; también afloran tobas y en algunos sectores, areniscas finas con un alto grado de silicificación, caracterizadas por su tonalidad rojiza y alta dureza, esto observado sobre la ruta 27 a un costado de Construplaza (figura 6).



Figura 4: Areniscas finas a medias, color morado grisáceo. Muestra tomada en las coordenadas 518776/211428



Figura 5: Conglomerados brechosos polimícticos. Muestra tomada en las coordenadas 518673/209500



Figura 6: Arenisca fina silicificada localizada en las coordenadas 518214/214382

Por la exposición de estas litologías, se consideran los siguientes puntos como los más representativos:

a. Afloramiento Calle Raicero (No.1)



Figura 7 (A y B): Afloramiento Calle Raicero ubicado en las coordenadas 518778/211428

Descripción de afloramiento:

Este afloramiento se expone a lo largo de la Calle Raicero, al oeste del cantón, en las coordenadas 518778/211428 (figuras 2 y 3).

Aflora una secuencia de areniscas finas a medias de coloración morado grisáceo con laminación paralela y se pueden apreciar estructuras de carga tal y como se muestra en la figura 7 B.

También afloran conglomerados brechosos con bloques de areniscas finas de tamaños centimétricos, dentro de una matriz arenosa.

b. Tajo ubicado en las coordenadas 518685/ 209534 (No.2; figuras 2 y 3).

Descripción de afloramiento: Secuencia estratificada de conglomerados buzando 18° al Ef; se observan muchas fracturas perpendiculares a la estratificación, asociadas al fallamiento observado (figura 8 A y B).

La roca es un conglomerado polimíctico, con presencia de líticos milimétricos; los clastos presentan tanto contacto puntual como flotante y se encuentran dentro de una matriz arenosarcillosa gris verdosa.



Figura 8 (A y B): Tajo ubicado en las coordenadas 518685/ 209534

2.1.2 Formación Peña Negra

Denyer & Arias (1991) definen para esta formación tres unidades, en donde la unidad inferior consta de una secuencia de areniscas medias y finas, la sección media consiste de lutitas y areniscas finas negras (con pirita), y la secuencia superior se presenta con intercalaciones de guijarros con estratos de caliza y vulcarenitas mal estratificadas. Sobreyace concordantemente y en contacto gradual a las Brechas Verdes Coyolar, es lateral con la Formación San Miguel, y es sobreyacida y lateralmente equivalente con la Formación Coris y Formación Turrúcares. Se le asigna una edad del Mioceno Medio.

Según Hernández & Vargas (1992), esta formación está compuesta por una secuencia de lutitas negras silíceas y areniscas café claro. Mediante microfauna (*Globigerina concinna*, *Globigerina woodi woodi* y *globigerina regularis*), le asignan una edad Mioceno Medio Tardío- Mioceno Medio Superior.

Localmente, aflora en la parte media de la cuenca del río Agres. Corresponden con areniscas silíceas finas color crema



Figura 9: Afloramiento en el cauce del río Agres. Coordenadas 522118/208082

con coloraciones anaranjadas; no se observaron laminaciones (figura 9).

En Alto Tapezco se observan lutitas color crema estratificadas y muy fracturadas (muestra 18-10-11-01, figura 10), que presentan meteorización esférica avanzada, y en las que además se observan pátinas de manganeso.



Figura 10: Muestra 18-10-11-01 tomada en las coordenadas 519220/208109.

A continuación se describe el afloramiento con las mejores exposiciones de esta formación:

a. Afloramiento Alto Tapezco, coordenadas 519174/208395 (No.3).

Descripción de afloramiento: Secuencia de lutitas estratificadas y altamente fracturadas, tal y como se muestra en la figura 11.

En la figura 12 se puede apreciar la meteorización esférica que presenta el afloramiento.



Figura 11: Afloramiento Alto Tapezco. Coordenadas 519174/208395. Se muestran las lutitas muy fracturadas

Además, a lo largo del camino se observan variaciones en la coloración de la roca en distintas tonalidades rojizas.

En el mapa de afloramientos (figura 3) se muestra su ubicación.

Figura 12: Meteorización esferoidal en Alto Tapezco. Coordenadas 519174/208395.



2.1.3 Intrusivo y Cornubianitas de Escazú

Castillo (1969) denomina al intrusivo de Escazú como el cuerpo ígneo formado por rocas dioríticas, granodioríticas, monzoníticas, gabroideas y basáltico-andesíticas expuestas en los cerros de Escazú. La acción magmática produjo un fuerte metamorfismo de contacto en las rocas sedimentarias del Terciario, originando cornubianitas.

Rivier (1979) describe que los cerros de Escazú están compuestos por: monzonitas, monzodioritas-adamelitas, granodioritas, monzogabros, gabros y diabasas. La zona de transición entre el intrusivo y las cornubianitas, es caracterizada por unas rocas afaníticas silíceas muy duras y sin estratificación.

Le asigna una edad del Mioceno Superior, basado en unas dataciones isotópicas hechas por Berrangé (1977).

Denyer & Arias (1991) describen conjuntamente el Intrusivo y las Cornubianitas de Escazú, debido a su directa relación genética. Según Obando (1983), el intrusivo corresponde con monzonitas, granodioritas, monzogabros, monzodioritas, gabros y sienitas. Las cornubianitas son producto del metamorfismo, principalmente, de la Formación Peña Negra. Estas rocas intruyen, principalmente, a las formaciones Peña Negra y Coris, y levemente a la Formación La Cruz. En el cerro Cedral es

sobreyacida por la Formación Grifo Alto. Se le ha asignado una edad del Mioceno Superior – Plioceno? (Denyer & Arias 1991).

Los intrusivos afloran al sur del cantón, en la zona de los Cerros de Escazú. Fueron observados en las coordenadas 520500/205255 (figuras 2 y 3), en donde se encuentran muy alterados, lo que ha generado un debilitamiento de la masa rocosa al punto de que se desintegra con la mano (figura 15 A), esto posiblemente favorecido por un fallamiento observado en la zona y evidenciado por medio de las estrías en los planos de ruptura (figura 13 B).

Las cornubianitas fueron observadas aflorando dentro del cauce del río Agres, en las coordenadas 521766/207298.



Figura 13 (A y B): Afloramiento de intrusivos. Ubicado en las coordenadas 520500/205255 (No.4)

2.1.4 Formación Grifo Alto

Está compuesta por lavas andesíticas con tonalidades grises y rojizas. Se pueden encontrar basaltos y dacitas; además, esta formación posee una secuencia de flujos piroclásticos con bloques lávicos y escoriáceos, así como depósitos ignimbríticos. Esta formación sobryace discordantemente a las formaciones La Cruz y Coris, y a su vez es sobryacida por la Lavas Intracañón y los Depósitos de Avalancha Ardiente. Se considera una edad del Plioceno - Pleistoceno (?) (Denyer & Arias, 1991).

Hernández & Vargas (1992) clasifican las rocas de esta formación como lavas andesíticas e ignimbritas. Infieren un límite discordante con la Formación Avalancha Ardiente.

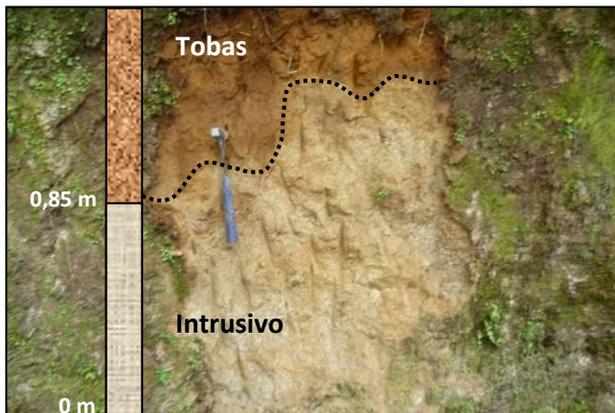
Localmente, la Formación Grifo Alto se localiza al noroeste y al sur del cantón. Litológicamente, corresponde a una toba lítica compuesta por clastos silíceos milimétricos, con una coloración café anaranjado. También, se observaron andesitas color gris claro, esto al noroeste del cantón en la quebrada Yeguas (figura 14).



Figura 14: Muestra 18-10-11-02 tomada en las coordenadas 519220/208109.

A continuación se describen los sitios anteriormente mencionados, en donde aflora esta formación:

a. Afloramiento de tobas (No.5)



Descripción de afloramiento: En el sitio localizado en el cerro Cedral, en las coordenadas 520606/205101 (figuras 2 y 3), se encuentran las tobas sobreyaciendo a un intrusivo muy meteorizado; se observa que el material volcánico relleno la paleotopografía generada por la meteorización y erosión del material

Figura 15: Afloramiento donde se observan tobas, intrusivo (figura 15).
coordenadas 520606/205101

b. Quebrada Yeguas

Descripción de afloramiento: En la quebrada Yeguas afloran unas andesitas color gris claro (figura 16 A), las cuales se encuentran muy meteorizadas y fracturadas.

En la figura 16 B se evidencia un plano de falla con estrías y medias lunas. En el apartado 2.2 de la Geología Estructural, se detallan los datos de esta falla, tomados en el sitio.

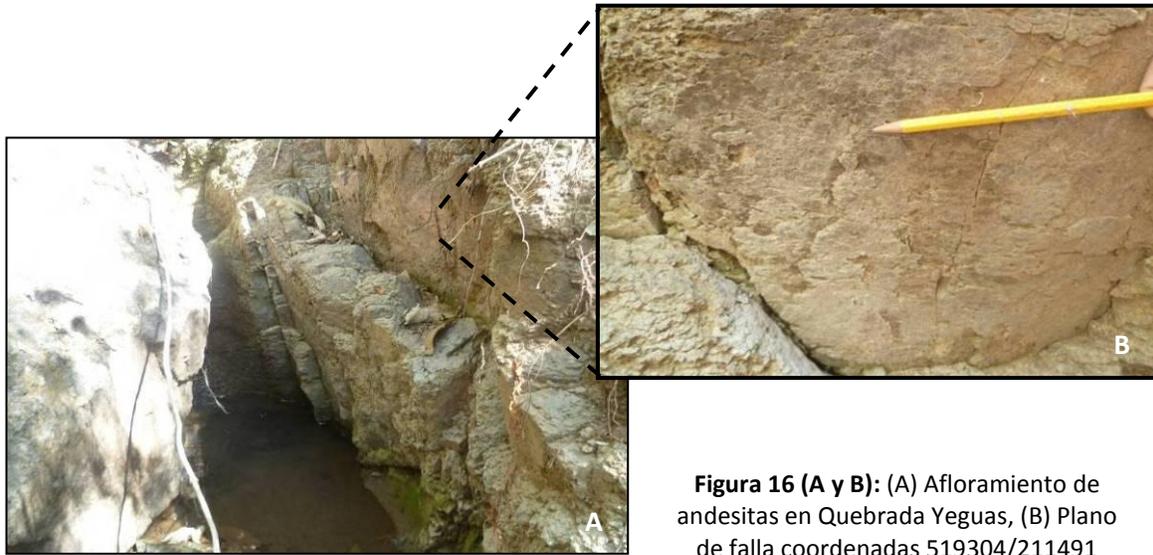


Figura 16 (A y B): (A) Afloramiento de andesitas en Quebrada Yeguas, (B) Plano de falla coordenadas 519304/211491

2.1.5 Formación Lavas Intracañón

Echandi (1981) denomina Formación Colima a unos depósitos volcánicos que afloran solamente en los profundos valles de los ríos Virilla y Tiribí. Además, incluye los miembros Belén, Ignimbrita Puente de Mulas y Linda Vista. Identifica 7 coladas de lavas andesíticas de 10 a 30 m de espesor.

Esta unidad geológica está conformada por lavas andesíticas piroxénicas, intercaladas con tobas, brechas, ignimbritas y mantos de ceniza. Las mejores exposiciones de esta formación se observan en los cañones de los ríos Virilla y Tibás, principalmente en el Tajo Colima; se les ha asignado una edad del Pleistoceno basal (Denyer & Arias, 1991).

La figura 17 muestra una sección estratigráfica, donde se observa muy bien la

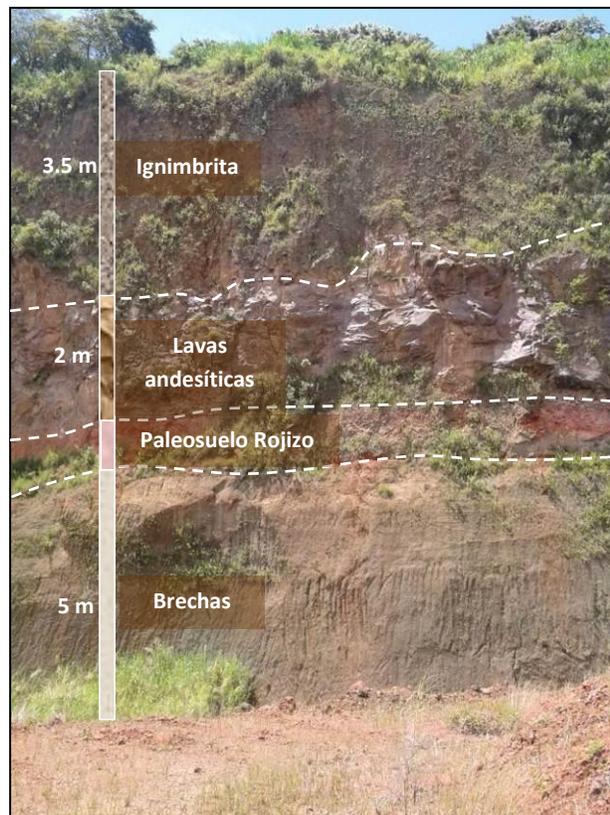


Figura 17: Afloramiento de Lavas Intracañón. Ubicado en las coordenadas 515500/216800

secuencia de las ignimbritas y tobas de las Lavas Intracañón; esta corresponde a una foto tomada en el Tajo Santa Ana de la empresa Constructora MECO S.A, que si bien es cierto esta fuera del cantón de Escazú (menos de un kilómetro), por su buena exposición y cercanía al área de estudio se decidió incluir en este documento.



Figura 18: Muestra 17-8-12-01 Andesita de la Fm. Lavas Intracañón. Coordenadas 515500/216800

Las Lavas intracañón corresponden localmente a andesitas color gris, muy sanas, con muchos piroxenos, tal y como se muestra en la figura 18. Las ignimbritas que le sobreyacen poseen un color gris claro y se caracterizan por presentarse, en algunos sectores, con formas columnares (figura 19).



Figura 19: Ignimbritas columnares. Coordenadas 515500/216800

2.1.6 Formación Avalancha Ardiente

Rivier (1979) describe unos depósitos similares a tobas soldadas conglomerádicas, a los cuales correlaciona como “depósitos de avalancha”, caracterizadas por tener en la base un conglomerado volcánico de fragmentos gruesos de rocas volcánicas y de grandes fiames de vidrio negro.

Constituida, principalmente, por depósitos de pómez de caída en la base, seguida por flujos de ceniza, lapilli y bloques, e ignimbritas grises con “fiames” de obsidiana y pómez. Yace en discordancia y/o discontinuidad litológica sobre las formaciones Lavas Intracañón, Pacagua, Peña Negra, Grifo Alto y La Cruz. Es sobreyacida por aluviones, lahares, cenizas y la Formación Barva. Se le ha asignado una edad correspondiente al Pleistoceno (Denyer & Arias, 1991).

Se han encontrado aflorando al norte del cantón, en las cercanías del Cerro Alto Las Palomas; corresponden con un depósito piroclástico (ignimbritas), constituido principalmente por pómez y clastos que podrían corresponder con andesitas, los cuales tienden a presentarse en forma de fiames. Presentan un contacto discordante con la Formación Pacacua.



Figura 20: Bloque de ignimbrita. Observado en las coordenadas 518214/214382

Localmente, corresponden a bloques de ignimbritas con fiames de obsidiana de tamaños centimétricos (figura 20) y con gran cantidad de pómez. Estos fueron observados en bloques sobre la ruta 27, en el sector de Construplaza (figuras 2 y 3).

a. Talud Construplaza (No.6)

Descripción de afloramiento: El afloramiento corresponde a un macizo rocoso compuesto de material vulcaniclástico muy fracturado, con alto grado de meteorización y con un sector afectado por alteración hidrotermal. Hay evidencias de desprendimientos de bloques y por el efecto erosivo del agua se han formado cárcavas que favorecen el deslizamiento del suelo localizado en la parte superior del talud (figura 21).



Figura 21: Talud de Construplaza, coordenadas 518214/214382

En el sitio afloran areniscas finas de color morado con un alto grado de silicificación, correlacionadas con la Formación Pacacua. Esta litología se encuentra en contacto neto (figura 22) con un depósito ignimbrítico compuesto por pómez, escorias y fiames de obsidiana, principalmente, el cual se correlaciona con la Formación Avalancha Ardiente (figura 23).



Figura 22: Contacto de las ignimbritas con la arenisca silicificada de la Fm. Pacacua, esto en el sector de Construplaza

El afloramiento muestra como el depósito ignimbrítico llega a cubrir (sobreyace) parte del material que aflora de la Formación Pacacua.

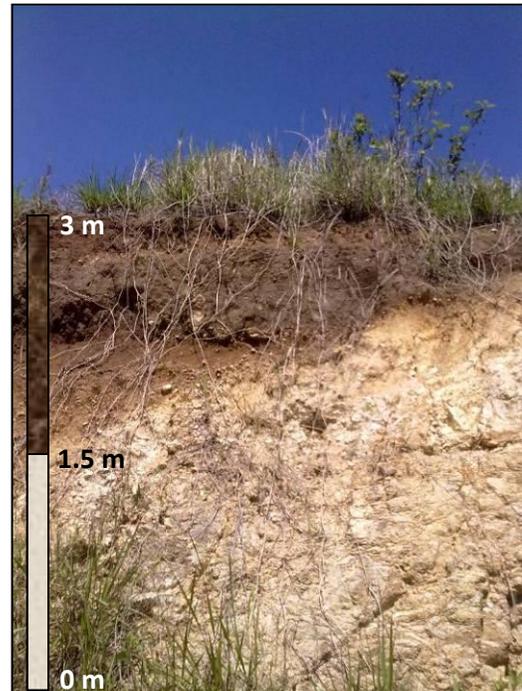


Figura 23: Depósito ignimbrítico en el sector de Construplaza

2.1.7 Lahares y cenizas

Según Denyer & Arias (1991), la elevación de los edificios volcánicos de la Cordillera Volcánica Central ocasionó la formación de depresiones, donde se acumularon los materiales procedentes de los volcanes como avalanchas de lodo y cenizas, durante el Pleistoceno y Holoceno. Los lahares son heterogéneos con fragmentos volcánicos subangulares, andesíticos principalmente; el tamaño de los fragmentos alcanza más de 1 m, englobados en una matriz arcillosa arenosa y mal cementada. Sobre estos depósitos existe una capa de ceniza producto de fenómenos similares a las erupciones del Irazú en 1963. Se le ha asignado a esta unidad una edad de finales del Pleistoceno- Holoceno.

Esta unidad se constituye por material lahático, el cual está compuesto por bloques de lava andesítica de formas tanto angulosas como redondeadas, los cuales presentan diferentes grados de alteración, con tamaños que van desde unos cuantos decímetros hasta mayores de un metro,

los cuales flotan con un arreglo caótico en una matriz arcillosa de color amarillo o crema medianamente consolidada. Sobre este material lahárico sobreyace un depósito de cenizas grisáceas; las mejores exposiciones de esta unidad se pueden observar en cortes de carretera sobre la ruta 27, cerca de la ferretería EPA (No.7) (figura 24).

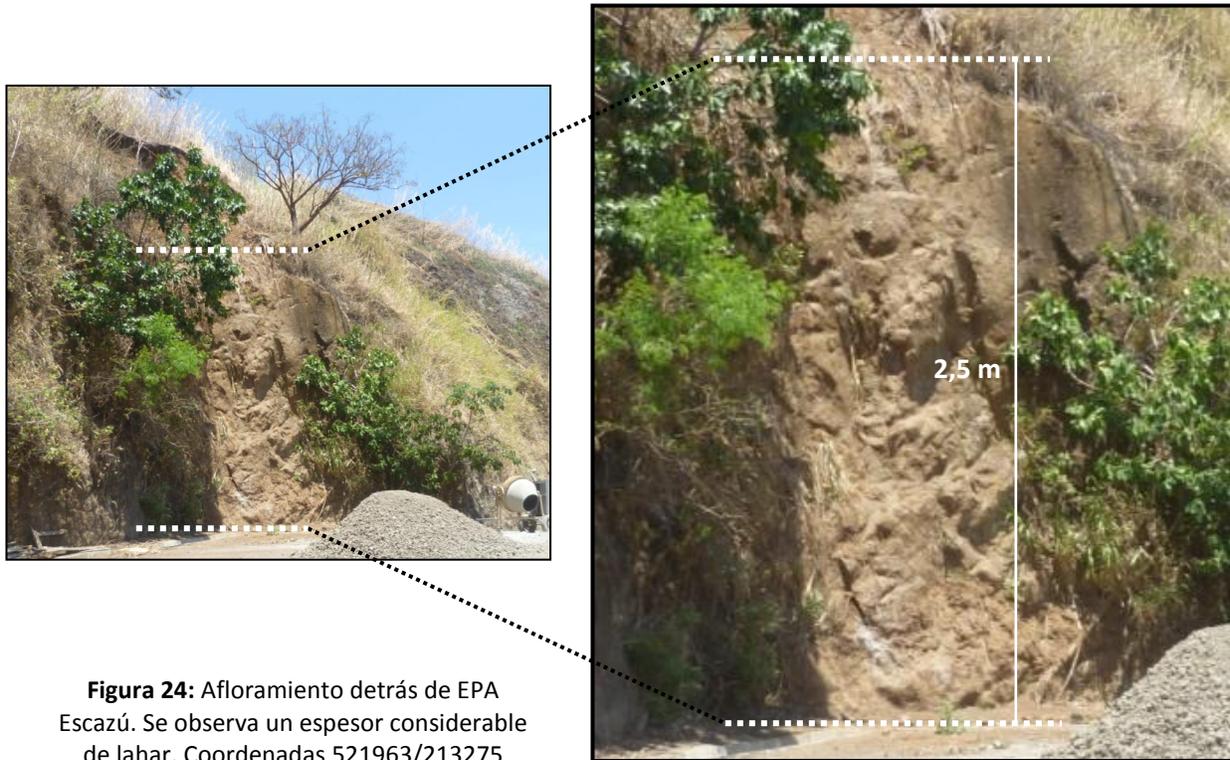


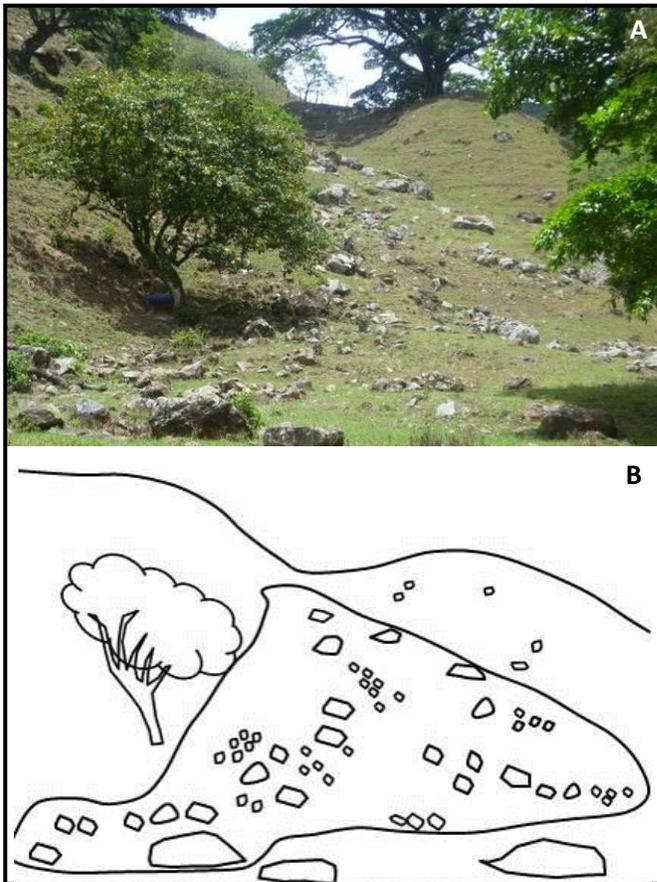
Figura 24: Afloramiento detrás de EPA Escazú. Se observa un espesor considerable de lahar. Coordenadas 521963/213275

2.1.8 Depósitos aluviales y coluviales

Según Denyer & Arias (1991), alrededor de los Cerros de Escazú sobresalen los abanicos coluvio-aluviales, los cuales, según Echandi (1981), están constituidos por bloques de lavas andesíticas, intrusivos y cornubianitas, sueltos, cementados o semiconsolidados, bien redondeados y poco meteorizados; y por coluvios compuestos por materiales sedimentarios, ígneos y metamorfizados. Son comunes los bloques duros de rocas intrusivas y cornubianitas, incluidos en una matriz arcillosa y algunas veces arenosa. Por tratarse de depósitos recientes, se le asigna una edad Cuaternaria (Denyer & Arias 1991).

Los depósitos coluviales se observan principalmente en las laderas de los valles de las principales cuencas (al sur del cantón); estos depósitos están compuestos principalmente por bloques de intrusivos y cornubianitas, así como algunos bloques lávicos los cuales se encuentran dentro de una matriz areno-arcillosa. En el cauce del río Agres se han observado depósitos de flujos de detritos constituidos, en su mayoría, por bloques de cornubianitas con tamaños decimétricos hasta métricos. Aunque la exposición de afloramientos en el centro de Escazú y alrededores sea escasa, se determinó que esta zona está constituida por depósitos aluviales, producto de la erosión de la zona montañosa.

a. Depósito coluvial



Descripción de afloramiento: Se localizan principalmente en las laderas a lo largo de todo el cantón.

Corresponden a bloques decimétricos que han sido erosionados de las laderas, los cuales se depositaron en forma de cono de talus, tal y como se muestra en la figura 25.

Figura 25 (A y B): Se muestra un cono de talus.
Coordenadas 521650/207800

2.2 Geología Estructural

En el cantón de Escazú han sido identificadas varias fallas por diferentes autores, en la mapa geológico (figura 2) se observa su distribución en el área. En el cuadro 1 se muestran detalles de algunas fallas descritas en trabajos anteriores y en el cuadro 2 se describen fallas locales identificadas en algunos afloramientos durante este estudio.

Cuadro 1: Fallas cartografiadas en el cantón de Escazú				
Falla	Rumbo	Longitud	Movimiento	Autor
Falla 1 Higuito	NW	5 km	Transcurrente Dextral	Arias & Denyer (1991)
Falla 2 Escazú I	NW	1,150 km	Inversa	Montero <i>et al.</i> (2005)
Falla 3 Escazú II	NW	2,8 km	Inversa	Montero <i>et al.</i> (2005)
Falla 4 Salitral	NE			Montero <i>et al.</i> (2005)
Falla 5 Pacacua	NE	10 km	Transcurrente Sinestral	Arias & Denyer (1991)
Falla 6 Bello Horizonte	NW		Inversa	Montero <i>et al.</i> (2005)
Falla 7 τ	NW	5 km	Transcurrente dextral	Arias & Denyer (1991)
Falla 8 Aserri	NW-EW		Inversa	Montero <i>et al.</i> (2005)
Falla 9 Borde de los cerros	NW-SE		Bloque SE descendió	Hernández & Vargas (1992)
Falla 10 Tapezco	NW	1,5 km	Bloque NE descendió	Hernández & Vargas (1992)
Fallas 11 Bandera I	NE-SW	5 km	Vertical no especificado	Rivier (1979)
Fallas 12 Bandera II	NE-SW	5 km	Vertical no especificado	Rivier (1979)
Falla 13 Higuerones	NE-SW	2 km	Transcurrente Sinestral	Hernández & Vargas (1992)
Falla 14 Catalina	NE	0,5 km		Hernández & Vargas (1992)
Falla 15 Lajas	NW-SE	1,5 km		Hernández & Vargas (1992)
Falla 16 Rio Agres	NW-SE	2 km	Bloque SW ascendido	Hernández & Vargas (1992)
Falla 17 Londres	NE	1,5 km	Bloque NE descendió	Hernández & Vargas (1992)

Cuadro 2: Datos de fallas locales observadas en la zona de estudio

Tajo ubicado en las coordenadas 518685 / 209534. Este tajo corresponde a una secuencia estratificada de conglomerados que buzanan 18° al Ef, con fracturas perpendiculares a la estratificación, esto como producto de un fallamiento local. A continuación los datos medidos de las fallas observadas:

Nombre	Dirección de buzamiento	Angulo de Buzamiento	Angulo de rake	Clasificación
Falla Tapezco 1	S15W	85°	ángulo de rake 18° E	Falla transcurrente sinistral
Falla Tapezco 2	S50W	75°		
Falla Tapezco 3	N80E	85°		
Falla Tapezco 4	N80E	80°		

Quebrada Yeguas. Coordenadas 519304 / 211491. Afloran unas andesitas las cuales están cortadas por una falla de desplazamiento de rumbo sinistral. A continuación los datos tomados de la dirección de la falla:

Nombre	Dirección de buzamiento	Angulo de Buzamiento	Clasificación
Falla yeguas	N20W	75°	Falla desplazamiento de rumbo sinistral

Afloramiento de intrusivos muy alterados, cortados por una falla lo que provocó el desprendimiento de algunos bloques. Coordenadas 520533/205185. A continuación los datos medidos de la falla observada:

Nombre	Dirección de buzamiento	Angulo de Buzamiento	Clasificación
Falla Londres 1	N45W	75°	Falla desplazamiento de rumbo sinistral

Afloramiento de areniscas silíceas de grano fino. Coordenadas 522118 / 208082. A continuación los datos medidos de la falla observada:

Nombre	Dirección de buzamiento	Angulo de Buzamiento	Clasificación
Falla Agres 1	N80W	10°	Falla normal

Plano de falla observada en la superficie de corte de un deslizamiento. Coordenadas 521698/ 207204. A continuación los datos medidos de la falla observada:

Nombre	Dirección de buzamiento	Angulo de Buzamiento	Clasificación
Falla Agres 2	N40W	40°	---

Falla que corta un material intrusivo moderadamente alterado, que presenta una arenitización blancuzca; con una zona de falla de unos 3 m de espesor. Coordenadas 521691/ 206500. A continuación los datos medidos de la falla observada:

Nombre	Dirección de buzamiento	Angulo de Buzamiento	Clasificación
Falla Agres 3	N45W	75°	Falla desplazamiento de rumbo sinistral

Falla que corta un material intrusivo moderadamente alterado, que presenta una arenitización blancuzca. Coordenadas 521670 / 206356. A continuación los datos medidos de la falla observada

Nombre	Dirección de buzamiento	Angulo de Buzamiento	Clasificación
Falla Agres 4	N60W	85°	Falla desplazamiento de rumbo dextral

Analizando los rumbos de las fallas se puede hacer la observación de que a excepción de las fallas Tapezco, Aserrí y Río Agres que tienden a una dirección E-W; en el cantón de Escazú se pueden identificar dos rumbos de fallas preferenciales, NW-SE y NE-SW; lo que concuerda con el modelo de compresión de cizalla pura, N-S, propuesto por Arias & Denyer (1991).

En las fallas medidas en los afloramientos de la zona de estudio predomina la dirección NE-SW lo que coincide con la dirección preferencial de las fallas Salitral, Bandera, Higueroles y Catalina.

También se observa que desde su nacimiento, el río Agres posee una forma rectilínea, presentando en su trayectoria a través de los cerros dos puntos de inflexión, uno en las coordenadas 521810/206020, donde cambia su rumbo al noroeste, y el segundo 521775/206965, donde el rumbo vuelve a ser al noreste; este cambio de rumbo puede deberse a un control estructural influenciado por las Fallas Londres y Agres.

3. GEOMORFOLOGÍA

3.1 Geomorfología Local

Mediante el trabajo de campo, la observación de fotos aéreas de los años 1945, 1974, 1977 y 1998, el análisis del mapa de pendientes realizado (figura 26), junto con el modelo de sombras (figura 27), se definieron 12 unidades geomorfológicas, las cuales se nombraron de acuerdo a la clasificación del sistema ITC para levantamientos geomorfológicos, lo que corresponde con una base para la evaluación de recursos y riesgos naturales (Verstappen *et al.* 1991). A continuación, se describen estas unidades (figura 28, mapa geomorfológico):

3.1.1 Formas de origen denudacional

a. D1. Laderas denudacionales de alta a muy alta pendiente

Se ubican principalmente en la parte sur del cantón, caracterizadas por una disectación de moderada a alta con pendientes mayores a los 35° las colinas presentan formas alargadas y divisorias agudas, los valles poseen formas en V en las partes más altas y adquieren mayor sinuosidad conforme la altura disminuye; las cabeceras de los ríos presentan en su mayoría problemas de remoción en masa y el patrón de drenaje es de tipo sub-dendrítico, debido al control topográfico que ejerce la pendiente de las laderas.

Estas laderas están conformadas principalmente por los Intrusivos y Cornubianitas de Escazú, los cuales por su dureza, generan una morfología muy empinada.

b. D2. Laderas denudacionales de pendiente moderada

Se localizan en la parte central del cantón de Escazú y se extienden hacia el noroeste; están moderadamente disectadas. El patrón de drenaje es sub-dendrítico mostrando cierto paralelismo, y los valles poco profundos.

La topografía presenta pendientes desde 15° a 30° como máximo, con divisorias de agua anchas. Se encuentran conformadas, predominantemente por rocas de la Formación Pacacua y en menor grado, de la Formación Peña Negra.

c. D3. Laderas denudacionales de pendiente media a baja

Se localizan en Escazú centro y se caracterizan por presentar pendientes que van de 1° a 15° como máximo, las cuales disminuyen hacia el norte. Los ríos corren de manera casi paralela, con cauces poco profundos, y las divisorias de agua son anchas. La topografía es ligeramente ondulada con inclinación de aproximadamente 8° hacia el norte y se encuentran conformadas por las formaciones Depósitos Aluviales y Avalancha Ardiente. Esta unidad es el área más urbanizada del cantón.

d. D4. Laderas denudacionales de pendiente baja

Se localizan al norte del cantón y limitan con la margen izquierda del río Tiribí. Se caracterizan por presentar pendientes menores a 8° .

En esta unidad la red drenaje se encuentra conformada por el río Agres, la Quebrada Yeguas, y sus afluentes. El patrón de drenaje en esta unidad es sub-detritico y se caracteriza por presentar pocos afluentes a los principales ríos, los que llegan a unirse al río Agres por el sector de Ayala, en donde este río profundiza su cauce, mientras que en el sector oeste, la Quebrada Yeguas presenta su curso hacia el noroeste pasando por Guachipelín, Cerro Coyote y cerro Alto de las Palomas. Ambos afluentes desembocan en el río Tiribí.

La topografía es casi plana, lo cual se debe a que los depósitos de la Fm. Avalancha Ardiente cubrieron la topografía original de la zona.

e. D5. Escarpe denudacional

Esta unidad se localiza al suroeste del cantón de Escazú, específicamente en el poblado de Bebedero; tiene una longitud de 600 m y 200 m de altura aproximadamente. Se encuentra conformado por la Formación Pacacua.

Con base en valoraciones de campo, así como en análisis de fotografías aéreas se ha determinado que este escarpe tiene un origen denudacional, ya que se observa evidencia que ha sido afectado por deslizamientos que han generado las altas pendientes ($>35^{\circ}$).

f. D6. Áreas con movimiento en masa

Corresponden a aquellas zonas afectadas por inestabilidad del terreno, definidas según su movimiento, geología y dimensión (figura 28).

En algunos casos, corresponden a deslizamientos pequeños observados en el campo que para la escala utilizada en los mapas son representados de manera puntual, y los cuales afectan la infraestructura existente en el área de inestabilidad.

Las áreas de inestabilidad de laderas de grandes dimensiones, fueron identificadas mediante fotos aéreas, ya que no se aprecian a simple vista en el campo. Estas se ubican, una en el sector sureste en lo que se conoce como Torrotillo y las otras se ubican en el sector oeste del cantón, Alto Granadilla, Alto Raicero y el último en el sector de Alto El Tajo, descritos en el apartado 5.3.

En total, se han contabilizado 29 deslizamientos, de los cuales 21 se detallan en el apartado 5.3.

De estas grandes áreas de inestabilidad se identificaron dos zonas de depósitos de material, de las cuales una se ubica al pie del deslizamiento Granadilla, presenta una forma muy definida de lóbulo donde desde el ápice hasta el frente del lóbulo presenta un largo de 1250 m por 300 m de ancho. El segundo depósito de material observado se ubica en la parte central y pie del deslizamiento de Torrotillo con dimensiones de 860 m largo por 400 m ancho.

Figura 26: Mapa de pendientes

Figura 27: Modelo de sombras

Figura 28: Mapa geomorfológico

g. D7. Bloque basculado

Se ubica en el sector de Bebedero, y corresponde a una topografía plano-ondulada muy evidente, con pendientes moderadas y poco drenaje; presenta dimensiones de 1900 m de largo por 700 m ancho aproximadamente.

La topografía mostrada en el sitio presenta un ligero basculamiento en dirección sur, de lo que a su vez se observa un escarpe en su parte posterior en esta misma dirección. Se interpretó que esta morfología existente en el sector de Bebedero es un bloque que descendió y basculó la parte frontal de la ladera, no como un solo evento sino como un proceso continuo (figura 29).

Este bloque forma parte de una gran área de inestabilidad que se ubica en la zona montañosa oeste de Escazú, en donde se destacan los deslizamientos Alto Granadilla y Alto Raicero. No obstante aunque actualmente el bloque no presenta características morfológicas similares a estos deslizamientos, el límite que existe entre el bloque basculado y el deslizamiento Alto Granadilla se muestra en constante erosión.

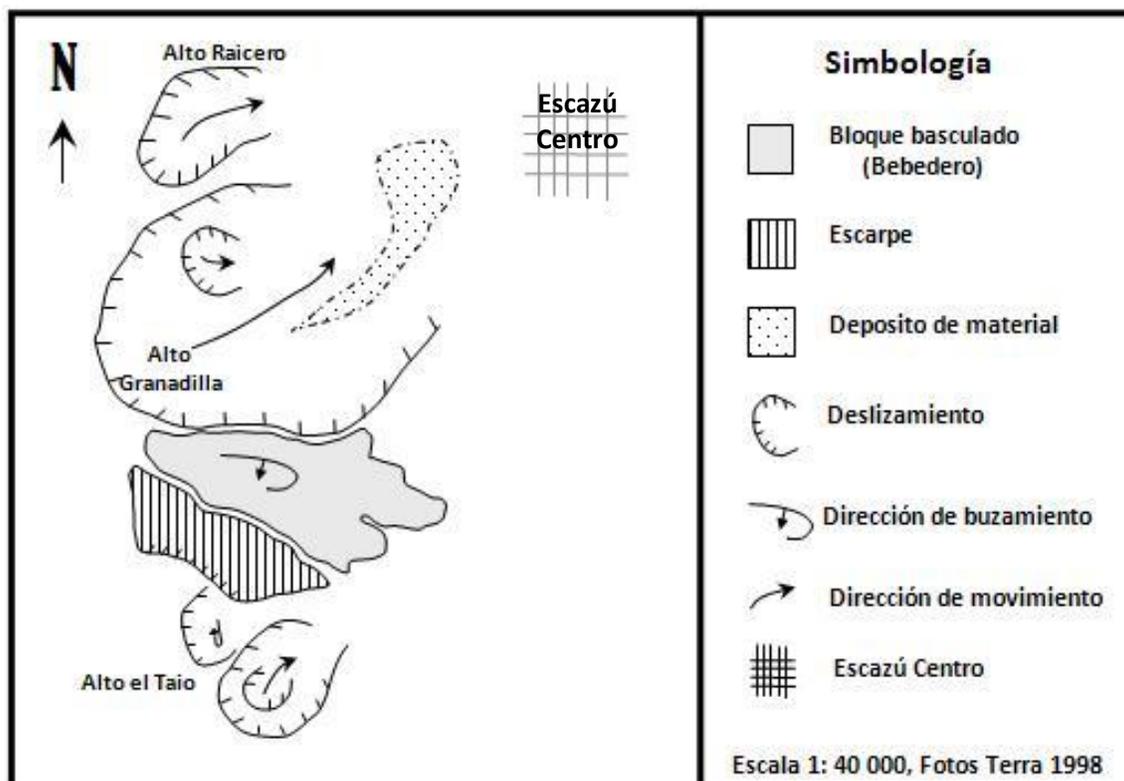


Figura 29: Presentación esquemática del bloque basculado y escarpe en el sector de Bebedero.

3.1.2 Formas de origen estructural

a. S1. Fila

Esta morfología se localiza al este del cantón de Escazú, en el sector conocido como Bello Horizonte. Corresponde con una evidencia geomorfológica de la Falla Bello Horizonte, la cual es de componente inverso y explica el levantamiento de esta fila con respecto a las zonas de valles adyacentes (Montero *et. al*, 2005).

La fila se extiende aproximadamente 1 km en una dirección sureste, y se presenta desplazada, pudiendo dividirse así en dos secciones. La sección A presenta hacia el sur un escarpe facetado y una ladera de suave pendiente hacia el norte, donde se han observado deslizamientos. La sección B posee dos facetas triangulares, hacia el norte y hacia el este, con pendientes muy pronunciadas.

b. S2. Cerros aislados

Esta unidad corresponde a una serie de cerros de origen tectónico, ubicados en el sector oeste del cantón de Escazú, siendo el más grande de estos el conocido como Alto de las Palomas, el cual se observa camino a Santa Ana por calle vieja; este posee un ancho de 800 m y una altura de 120 m. El otro cerro se determinó mediante foto aérea ya que es de difícil observación en el campo debido al urbanismo de la zona. Se localiza al oeste del Country Club; sus dimensiones son 20 m de altura y 150 m de ancho, esto con base en fotos aéreas.

El origen de estos cerros se han asociado a la falla Escazú, ya que la traza de la falla con rumbo noroeste presentada por Montero *et al* (2005), atraviesa estos cerros.

c. S3. Facetamiento

Esta unidad corresponde con morfologías de facetamientos, observadas a lo largo de las fallas principales que atraviesan el cantón de Escazú. En un segmento del trazo de la falla Bello Horizonte se observaron dos facetamientos triangulares de los cuales uno presenta su cara expuesta hacia el norte y otro hacia el noreste; además sobre la fila estructural asociada a este fallamiento, se ubica un facetamiento rectangular mirando hacia el sur. Para el trazo de la falla Escazú, se determinaron dos facetamientos triangulares, ambos presentan su cara expuesta hacia el noreste.

Estos facetamientos fueron observados en las fotos aéreas de los años 1945 y 1977, sin embargo actualmente estos no pueden ser observados en el campo debido a que el desarrollo urbano ha llegado a cubrir estas zonas.

3.1.3 Formas de origen fluvial

a. F1. Garganta de río

El principal exponente de esta morfología se localiza en la parte Norte del cantón y corresponde al río Tiribí (figura 30). Tiene un ancho de 70 m y una profundidad mayor de los de 50 m; los taludes del cañón presentan pendientes abruptas mayores a los 60°.



Figura 30: Garganta Río Tiribí

b. F2. Valles de ríos

Corresponde a los valles de los principales ríos del cantón de Escazú, los cuales han tenido en el pasado eventos de flujos de detritos en ellos. Para el río Agres se conoce el evento de 1861, durante el cual bajó un flujo de lodo provocado por un deslizamiento en la parte alta, y el más reciente caso se dio por el flujo de detritos que descendió por la Quebrada Lajas el pasado 3 de noviembre del 2010, dejando como saldo 24 personas fallecidas.

Valle del río Agres

El cauce del río Agres corresponde al colector principal del cantón de Escazú, el cual llega a desembocar al río Tiribí y presenta una longitud aproximada de 9 km.

Desde su nacimiento, el río Agres posee una forma rectilínea, presentando en su trayectoria a través de los cerros, dos puntos de inflexión, uno en las coordenadas 521810/206020 donde cambia su rumbo al noreste, y el segundo 521775/206965 donde el rumbo vuelve a ser al noreste; este cambio de rumbo se puede deber a un control estructural.



Figura 31: Vista del valle del río Agres a la altura de los Cerros de Escazú. Coordenadas 521670/ 206356

Inicialmente, este valle se encuentra contenido por laderas de altas pendientes; sin embargo en esta zona el valle no se encuentra encañonado, sino lo que predomina es una morfología de valle ampliado, tal y como se muestra en la figura 31. Esto se debe al retroceso de los frentes de montaña producto de la erosión que provoca el río en los pies de las laderas (ver figura 32 A y B).



Figura 32 (A y B): Laderas de los Cerros de Escazú que comprende el valle del río Agres. Coordenadas 521641/ 206643

En las coordenadas 522118/208082, al llegar al sector de San Antonio de Escazú, se observa una ampliación del valle del río Agres, el cual se evidencia con un depósito de flujo en el lugar; además lo anterior se reafirma con la presencia de bloques con tamaños decimétricos distribuidos en el sitio, evidenciadas en la figura 33.

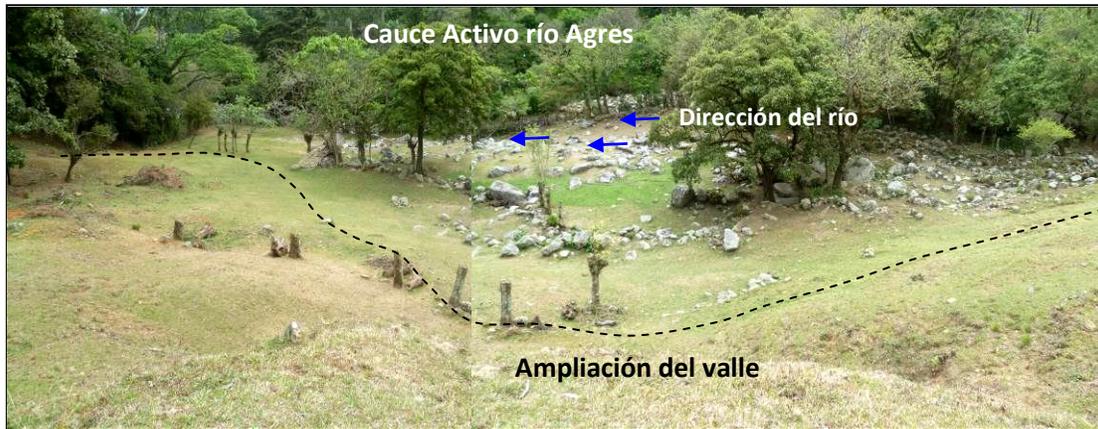


Figura 33: Ampliación del valle del río por depósitos de flujo.

A lo largo de la ciudad de Escazú, propiamente en el sector que es atravesado por el río Agres, el cauce de dicho río se ha confinado, esto producto del desarrollo urbano descontrolado que se ha dado en la zona (figura 34).



Figura 34: Cauce del río Agres en las coordenadas 520075/214065

Llegando a la localidad conocida como Ayala y hasta su unión con el río Tiribí, el río Agres se profundiza hasta formar una garganta con una profundidad aproximada de 50 m y con laderas prácticamente verticales, tal y como se muestra en la figura 35. Este cambio en la profundidad del cauce se asocia a la traza de la falla Higuito inferida por Denyer *et al.* (1991).



Figura 35: Garganta del río Agres, tomada en las cercanías de Multiplaza Escazú, coordenadas 520075/214065

Valle de la Quebrada Guayabo

El valle de la quebrada Guayabo forma parte de la cuenca del río Cruz. Este valle presenta una forma rectilínea rodeado desde su nacimiento por las altas laderas de los cerros de Escazú y conforme pasa a las laderas de menor pendiente se le unen varios cauces, como son la quebrada Lajas y la quebrada Higuerones.

Éste presenta características similares a la quebrada Lajas y al río Agres, como lo es el arrastre por su cauce de bloques decimétricos y métricos (figura 36). Además, tanto en el campo como en fotos aéreas, se observa una morfología de deslizamiento en la parte alta de la naciente del río.



Figura 36: Valle del Río Cruz, en el lugar conocido como Filtros, coordenadas 520847/209724

Valle de la Quebrada Lajas

La quebrada Lajas nace en la cima de los cerros de Escazú en el punto conocido como Pico Blanco; presenta una longitud aproximada de 4 km y la forma de su cauce es rectilínea hasta su unión con el río Cruz.

El recorrido por la quebrada Lajas se realizó un año después de que se produjo el descenso de un flujo de detritos por el cauce de la quebrada, que afectó de manera directa la comunidad de Calle Lajas el 3 de Noviembre del 2010 y provocó la muerte de 24 personas (Arias *et al.* 2011).

Desde su nacimiento, este cauce se encuentra contenido por las altas laderas del cerro Pico Blanco, donde se caracteriza por presentar un valle en forma de “V” y de poca anchura (figura 37).

A lo largo del cauce, se pudo apreciar depósitos de material, los cuales corresponden a pequeños desprendimientos que se dan en las laderas de alta pendientes donde se encuentra contenido el cauce (figura 38).



Figura 37: Valle de la Quebrada Lajas, coordenadas 520317/206975



Figura 38: Quebrada Lajas, coordenadas 520400/206545

Mediante una entrevista a uno de los afectados de Calle Lajas, nos comunicó que en el sitio con coordenadas 520317/206975, el cauce presentaba anteriormente poca profundidad ya que se encontraba relleno por un antiguo depósito de material.

Sin embargo, luego del flujo de detrito que descendió por el cauce incorporando antiguos depósitos que se encontraban dentro de él, se dio una profundización del cauce, dejando expuesto un tipo de garganta, tal y como se muestra en la figura 39.

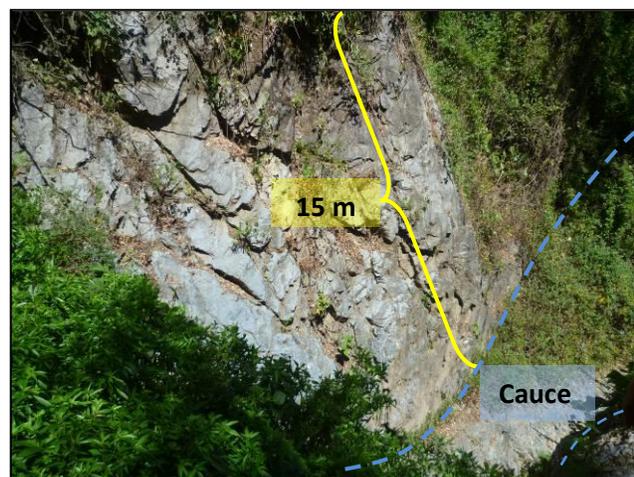


Figura 39: Profundización del cauce, coordenadas 520317/206975

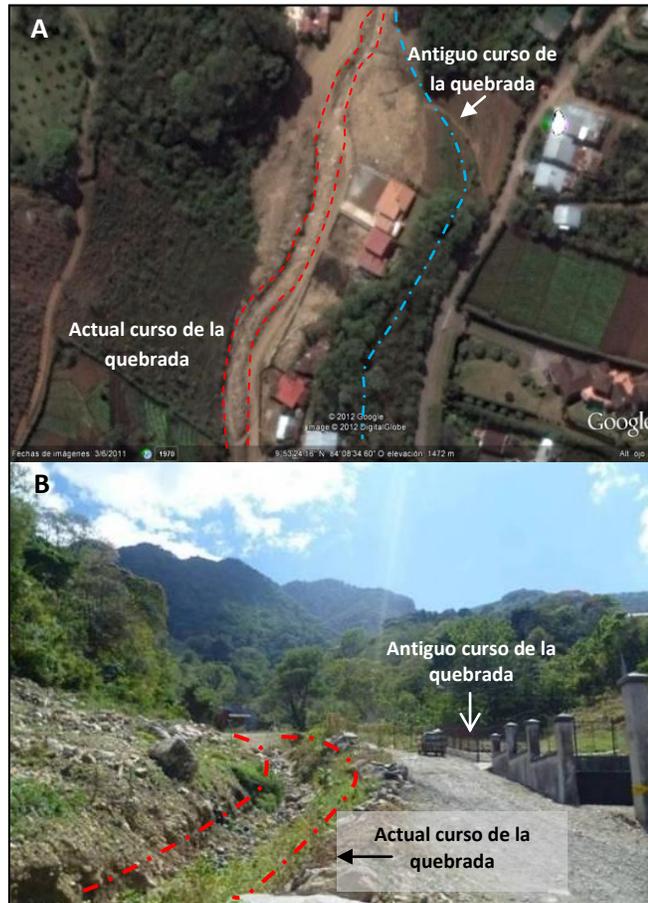
A partir del sitio denominado La Catarata (coordenadas 520650/207926) aguas abajo, el cauce ya no se encuentra contenido por altas laderas, ya que en este punto se da un cambio topográfico, pasando de una zona de alta pendiente a una de moderada a baja pendiente, ampliando el cauce, lo que favorece en este punto la depositación de material.

Al darse un cambio de mayor a menor pendiente, la depositación de material se dio con mayor facilidad, por lo cual la quebrada amplió su cauce (figura 40) y cambio su rumbo (figura 41); según los vecinos del área, inicialmente la quebrada presentaba un cauce muy angosto e inclusive se encontraba en partes entubado.



Figura 40 (A y B): Ampliación de la Quebrada Lajas, luego del flujo de detrítos del 3-11-10. **(A)** Coordenadas 520663/208265, muestra en antiguo cauce y se señala el depósito de material que origina el cauce actual. **(B)** Se muestra la variación del ancho del cauce del 2009 al 2011

Figura 41 (A y B): Vista del actual curso de la quebrada Lajas luego del flujo de detritos del 3-11-10, coordenadas 520650/208340. **(A)** vista en planta del antiguo cauce de la quebrada respecto al actual., **(B)** muestra el nuevo cauce por donde discurre la quebrada Lajas.



Para el cantón de Escazú, el 93,56 % del área total ha sido clasificada dentro de las unidades geomorfológicas de origen denudacional. La unidad clasificada como laderas denudacionales de baja pendiente, corresponde a un 28,08 % del área total, siendo la mayor unidad presente, seguida por la unidad de Laderas denudaciones de alta pendiente con 23,5 % del área.

La unidad morfológica clasificada como áreas de movimientos en masa corresponde a un 9,46 % y se ubican dentro de la unidad de muy alta pendiente, por lo que parte de la inestabilidad de estas grandes áreas pueden estar condicionadas al factor de pendiente.

El sector de Bebedero, definido como un bloque basculado, es la morfología más distintiva en el cantón, ya que se caracteriza por una topografía plana en medio de laderas de muy alta pendiente.

Las unidades de origen estructural abarcan un 4,76 % del área; son morfologías definidas a partir del trazo de dos fallamientos principales en la zona, como lo son la falla Bello Horizonte y la falla Escazú, ambas de componente inverso.

Las unidades de origen fluvial están definidas por los valles fluviales, dígase los principales ríos que discurren por el cantón. Asimismo, se le dio énfasis a aquellos que han presentado antecedentes de flujo de detritos e inestabilidad en sus laderas, como lo son el río Agres, río Cruz y la quebrada Lajas. Estos valles se caracterizan por estar contenidos en las altas laderas de los cerros de Escazú, los cauces suelen ser poco profundos y se encuentran sedimentos con material de variable tamaño. Actualmente la quebrada Lajas difiere en este aspecto, debido a que luego del evento del flujo de lodo que descendió por el cauce el 3 de noviembre del 2010, éste quedó profundizado por la remoción de material en el sector de la catarata.

4. GEOTECNIA

4.1 Caracterización geotécnica

Para caracterizar geotécnicamente los sitios de mayor susceptibilidad a deslizamientos del cantón de Escazú, es necesario conocer las propiedades físicas de los suelos, con este fin se analizaron muestras tomadas en distintos puntos distribuidos en el área de estudio. En la figura 42, se observa el trabajo de campo realizado para la toma de todas las muestras analizadas y detalladas en los cuadros 3 y 4.



Figura 42: Trabajo de campo realizado en el muestreo de suelos

Con la información que se obtuvo del análisis de las muestras tomadas y de los ensayos realizados, se elaboró un mapa de clasificación suelos, basados en la geología del cantón, esto con el fin de comparar el tipo de suelo resultante de la meteorización de las diferentes litologías y así su relación con las áreas susceptibles a deslizamientos.

Las unidades geotécnicas y su distribución espacial generalmente se establecen a partir del origen y características geológicas de las unidades litológicas presentes, de observaciones y medidas de campo y de la fotointerpretación y, en los casos que es posible o necesario, a partir de sondeos y ensayos *in situ* y en laboratorio y del análisis de muestras (Vallejo *et.al.* 2004).

Por lo tanto, para determinar los puntos de donde se tomaron las muestras de suelos, se propuso utilizar una combinación de criterios, identificando las áreas con mayores problemas de inestabilidad dentro de cada formación geológica. Los puntos de muestreo se detallan en la figura 43.

Una vez que se identificaron las litologías que afloran en el cantón, se decidió realizar el muestreo de suelos por unidad geológica. Basados en los resultados del muestreo de suelos se generó un mapa de clasificación de suelos (figura 44) mediante la clasificación SUCS, reclasificando, de esta forma, el mapa geológico en función de las unidades de clasificación de suelos.

Figura 43: Mapa Geológico con la ubicación de las muestras tomadas y analizadas

Figura 44: Mapa de clasificación suelos

4.1.1 Propiedades físicas de los suelos

Las propiedades físicas de las muestras tomadas se resumen en el cuadro 3. Debido a que las muestras fueron obtenidas en el campo todas en un solo día, a excepción de las tomadas de otros trabajos, se considera que las condiciones climáticas fueron similares y que por lo tanto la variación en el grado de saturación de agua no es significativa. El contenido de humedad sí varía de manera considerable y va a estar muy relacionada con el tipo de suelo, siendo la muestra A-6 la de mayor contenido de humedad con un porcentaje de 107,35%, la cual corresponde a un limo elástico de plasticidad extremadamente alta y es asociada a la Fm. Pacacua. Seguidamente la muestra 1-A, de la Fm Peña Negra, con un 61,1% de humedad corresponde a un limo con arena (MH) de alta plasticidad. Posteriormente se tienen también las muestras A-5 y 1-C, las cuales poseen porcentajes de 50,5% y 47,5 % respectivamente, y corresponden con arcillas delgadas con arena de plasticidad intermedia y con una arena arcillosa de alta plasticidad.

En el cuadro 3, además de mostrar las propiedades físicas de los suelos, se especifican las formaciones geológicas de donde se tomaron las muestras, y por lo tanto a las cuales están correlacionados los tipos de suelos.

Cuadro 3: Propiedades físicas de los suelos del cantón de Escazú									
Formación	Nº de Muestra	Peso Unitario Húmedo (KN/m ³)	Peso Unitario Seco (KN/m ³)	Peso Unitario Saturado (KN/m ³)	Grav. Espec.	Relación de Vacíos	Porosidad (%)	Cont. De Humedad (%)	Grado de Saturación (%)
Pacacua	A-6	12,87	6,21	13,64	2,61	3,12	75,8	107,35	89,7
	A-10	18,92	15,36	11,08	2,67	0,70	41,3	23,16	87,7
	A-11	17,64	13,36	12,22	2,72	1,00	49,9	32,01	87,4
Peña Negra	A-8	16,44	12,03	17,29	2,65	1,16	53,7	36,72	83,8
	1-A*	15,4	9,5	16	2,82	1,9	65,5	61,1	90,9
	1-B*	15,3	11,6	17,2	2,75	1,33	57,1	32,5	67,1
	1-C*	16,1	10,9	16,8	2,79	1,51	60,1	47,5	87,9
	C-3**	16,87	12,66	17,81	2,72	1,11	52,5	33,28	81,8
	C-4**	17,59	13,86	18,48	2,67	0,89	47,1	26,9	80,8
Intrusivo y Cornubianitas de Escazú	2-A*	16,2	13,6	18,3	2,69	0,94	48,5	19,5	55,8
	2-B*	16	11,1	16,8	2,67	1,37	57,7	43,7	85,7
	C-5**	25,5	24,1	25,6	--	--	--	--	--
Grifo Alto	A-2	20,95	18,77	21,44	2,63	0,37	27,2	11,61	81,6

Avalancha Ardiente	A-3	14,23	10,45	16,32	2,65	1,49	59,8	36,18	64,5
	A-12	16,31	13,55	14,90	2,63	0,90	47,5	20,37	59,3
Lahares y Cenizas	A-1	15,91	12,10	17,41	2,69	1,18	54,1	31,45	71,7
Depósitos aluviales y coluviales	A-4	17,57	13,72	18,39	2,67	0,91	47,6	28,03	82,4
	A-5	16,73	11,15	16,78	2,67	1,35	57,4	50,05	99,1
	A-7	17,62	12,97	17,88	2,65	1,00	50,1	35,88	94,7
	A-9	15,89	11,40	14,04	2,62	1,25	55,6	39,36	82,3

*: Campaña geológica (1992)

** : Trabajo río Cruz (2012)

--: Sin dato

Las propiedades físicas de las muestras obtenidas para el peso unitario húmedo, seco y saturado mostradas en la figura 45 no presentaron grandes variaciones; solo las muestras A-2 y C-5, que presentan los valores más altos, por encima de los 20 KN/m³ para el peso unitario húmedo y saturado; correspondiendo con las formaciones Grifo Alto e Intrusivos y Cornubianitas de Escazú. Por otra parte, la muestra con los valores mínimos, corresponde a la A-6 de la Fm. Pacacua.

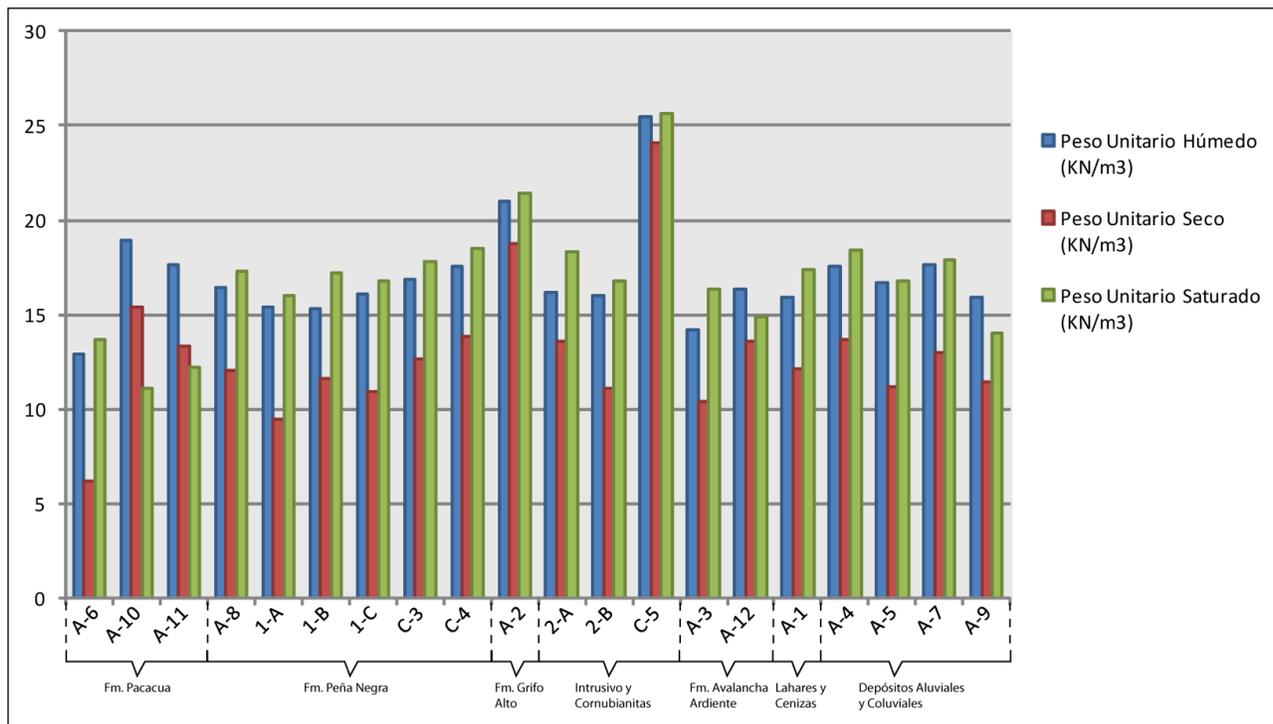


Figura 45: Peso unitario húmedo, seco y saturado para cada muestra, y relación existente entre ellas

En la figura 46 se grafica la relación de vacíos y gravedad específica, mostrando así que los valores de la gravedad específica son muy similares y altos para todas las muestras, ya que van entre 2,6 a 2,8. Este rango de valores es característico de suelos que van desde limos arenosos hasta arcillas; lo cual se comprobó en los resultados de granulometría presentados más adelante. Para la relación de vacíos, se pudo observar que la muestra A-6, de la Fm. Pacacua, es la única que presenta altos valores en comparación con el resto de las muestras, siendo un valor de 3,12. El hecho de que la relación de vacíos y la gravedad específica sea tan alta para todas las muestras, puede favorecer a que los suelos sean más propensos a deslizarse; sin embargo, se requieren también de otros disparadores para que esto suceda.

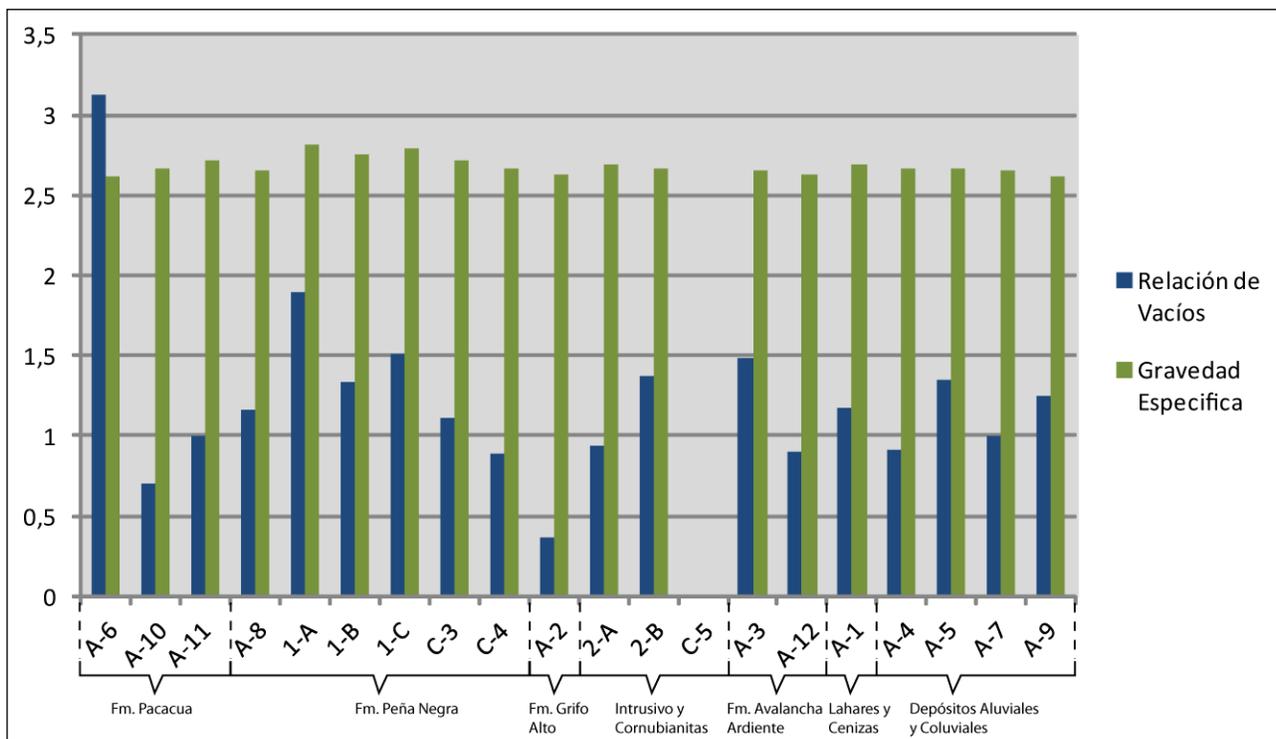


Figura 46: Relación de vacíos y gravedad específica para cada muestra, y relación existente entre ellas

En la figura 47 se muestra la relación del contenido de humedad y grado de saturación, podemos ver como la muestra A-6 presentar un valor de contenido de humedad de 107.35 %, siendo este el valor mas anómalo encontrado en todos los muestreos realizados.

El área donde se tomó la muestra A-6, presenta evidencias de basculamiento del terreno donde se da la formación de pequeñas lagunas; por lo que al encontrarse esta zona con constante humedad, va a generar este tipo de valores.

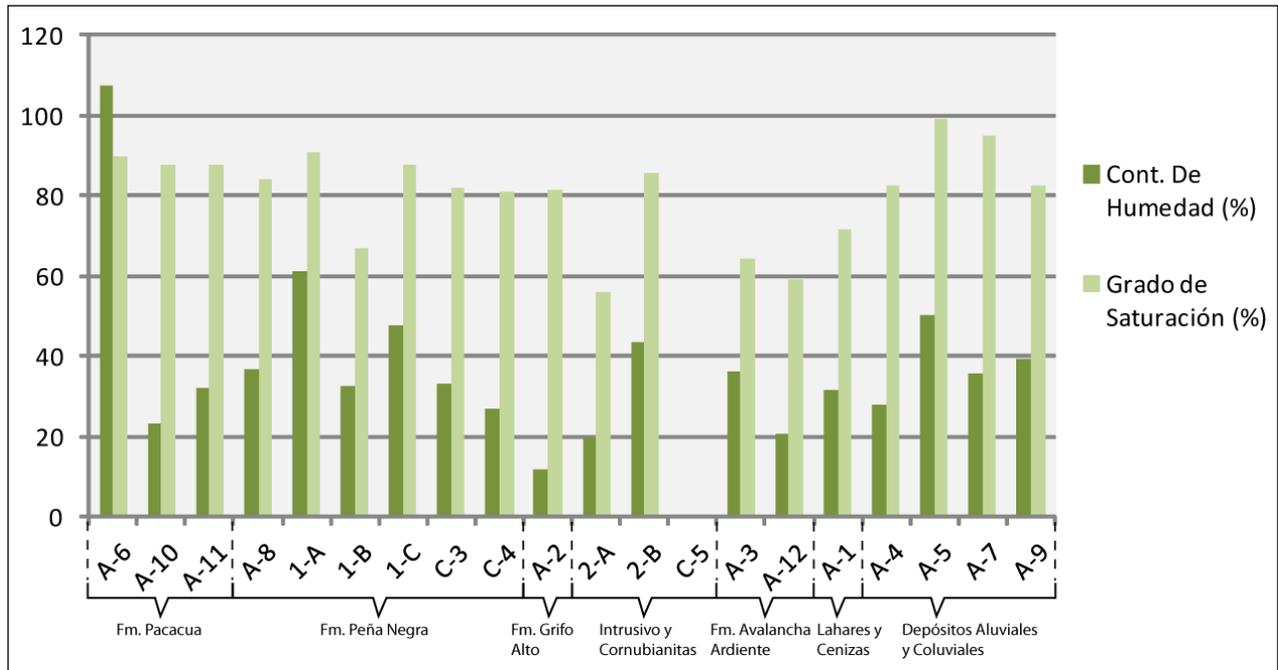


Figura 47: Contenido de humedad y grado de saturación para cada muestra, y relación existente entre ellas

Tanto la muestra A-6 como la muestra 1-A, son las que poseen los valores más altos en relación a las propiedades físicas del suelo analizadas. La muestra A-6 se localiza en la unidad geológica Fm. Pacacua, mientras que la muestra 1-A en Fm. Peña Negra; ambas localizadas en el sector oeste del cantón, sobre laderas denudacionales de alta a muy alta pendiente.

4.1.2 Clasificación de suelos

Una vez obtenidos los resultados de los ensayos de laboratorio, realizados a las muestras tomadas, se aplicó el SUCS propuesto por la ASTM.

En el cuadro 4 se resumen los resultados de los ensayos de granulometría y de límites de Atterberg de las muestras de suelo tomadas, así como la clasificación de suelos y la formación geológica a la que se asocian.

Cuadro 4: Resultados de los ensayos de granulometría y de límites de Atterberg									
Formación	Nº de Muestra	Coordenadas	LL (%)	LP (%)	IP (%)	Grava (%)	Arena (%)	Finos (%)	USCS
Pacacua	A-6	518905/208980	94	63	31	0,0	10,9	89,1	MH, limo elástico (ME) de plasticidad extremadamente alta
	A-10	522860/209287	58	35	23	0,0	13,1	86,9	MH, limo elástico (MH) de plasticidad alta
	A-11	522626/210479	48	26	22	7,9	38,0	54,1	CL, arcilla delgada arenosa (CI) de plasticidad intermedia
Peña Negra	A-8	522193/208115	59	30	29	42,3	15,1	42,6	GC, grava arcillosa con arena (GC) de plasticidad alta
	1-A*	519200/208250	65,9	38,6	27,4	0,0	47,42	52,58	Limo con arena (MH) de alta plasticidad
	1-B*	519200/208250	38,9	20,6	18,4	0,0	59,57	40,43	Arena arcillosa (SC) de plasticidad baja
	1-C*	519200/208250	39,8	21,7	18,1	0,0	65,59	34,51	Arena arcillosa (SC) de alta plasticidad
	C-3**		46	27	19				
	C-4**		32	19	13				
Intrusivo y Cornuvianitas de Escazú	2-A*	521150/206400	--	--	--	0,0	53,11	46,89	Mezcla de arena y limo (SW) no presenta plasticidad
	2-B*	521150/206400	51	26.4	24.6	0.0	58.53	41,47	Arena arcillosa (SC) de plasticidad baja
	C-5**		--	--	--				
Grifo Alto	A-2	518250/214267	39	15	24	2,3	21,2	76,5	CL, arcilla delgada con arena (CI) de plasticidad intermedia
Avalancha Ardiente	A-3	519213/212939	55	36	19	6,4	5,3	88,3	MH, limo elástico (MH) de alta plasticidad
	A-12	522920/211723	70	34	36	14,4	11,4	74,2	CH, arcilla gruesa con grava (CV) de plasticidad muy alta

Lahares y Cenizas	A-1	521705/213419	44	24	19	0,0	3,4	96,6	CL, arcilla delgada (CI) de plasticidad intermedia
Depósitos aluviales y coluviales	A-4	519590/211495	40	21	19	26,3	23,4	50,3	CL, arcilla delgada gravosa con arena (CI) de plasticidad intermedia
	A-5	519344/209791	45	26	19	0,0	17,1	82,9	CL, arcilla delgada con arena (CI) de plasticidad intermedia
	A-7	521352/210790	68	33	35	0,0	1,9	98,1	CH, arcilla gruesa (CH) de plasticidad alta
	A-9	521931/208783	64	36	28	1,8	34,2	64,0	MH, limo elástico arenoso (MH) de alta plasticidad

LL: Límite líquido
--: Sin dato

LP: Límite plástico
*: Campaña geológica (1992)

IP: índice de plasticidad
** : Trabajo río Cruz (2012)

Basados en el cuadro 4, se graficaron los tipos de suelos determinados a lo largo de todo el cantón de Escazú (figura 48), los cuales son 6 tipos con variaciones en su plasticidad, donde los CL arcillas delgadas y MH limo elástico, son las que predominan.

Los suelos, CL arcillas de intermedia a alta plasticidad, se correlacionaron con las unidades geológicas Fm. Grifo Alto, Lahares y cenizas, Lavas Intracañón, Depósitos aluviales y coluviales, y la Fm. Pacacua. Los MH limos elásticos de plasticidad alta a extremadamente alta, se correlacionan con las formaciones Pacacua y Peña Negra.

Los suelos CH arcillas gruesas de plasticidad alta, se asociaron, principalmente, con Fm. Avalancha Ardiente y Depósitos aluviales y coluviales.

Los suelos clasificados como GC grava arcillosa se asocian a la Fm. Peña Negra y los SC arena arcillosa, se correlacionaron con los Intrusivos de Escazú.

Cabe resaltar, que las cornubianitas, por la ausencia del suelo asociado no pudieron ser muestreadas.

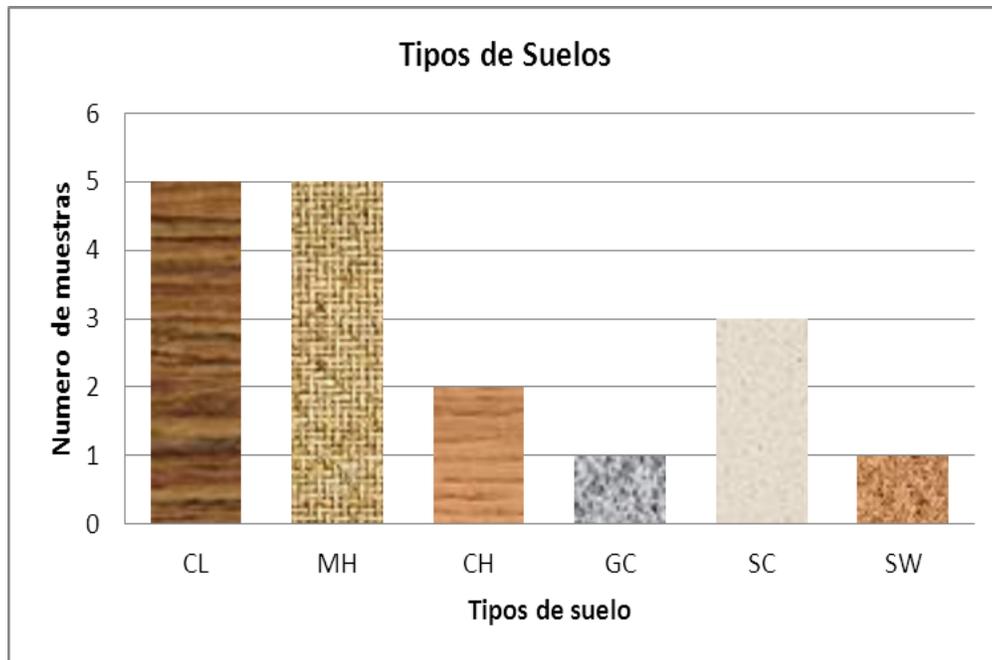


Figura 48: Tipos de suelos que conforman el cantón y su predominancia

Habiendo relación los resultados obtenidos en la clasificación de suelos y la geología definida, en este estudio, para el cantón de Escazú, se obtuvieron los siguientes resultados:

- Los suelos que predominan en el área corresponden a los CL, arcillas delgadas de plasticidad intermedia, y conforman los Depósitos aluviales y coluviales, Lahares y cenizas, la Fm. Grifo Alto y Avalancha Ardiente.
- Las formaciones Peña Negra y Pacacua, están compuestas por suelos elásticos de plasticidad alta (MH).
- La Fm. Peña Negra está conformada por una grava arcillosa de alta plasticidad (GC), los Intrusivos de Escazú poseen una mezcla de arena y limo (SW); siendo estas las únicas formaciones que presentan suelos con fracciones de grano más grueso respecto a la cantidad de limos en ellas.

5. SUSCEPTIBILIDAD A DESLIZAMIENTOS

La evaluación de la susceptibilidad a deslizamientos se realizó mediante la aplicación del método Mora Vahrson (1992) y las modificaciones propuestas a este método por Mora *et al.* (2002) (conocido como el método Mora - Vahrson – Mora) y por Camacho *et al.* (2004). La utilización de varias modificaciones al método nos ayuda a comparar cuales parámetros tienen mayor peso y cuál metodología produce una zonificación de susceptibilidad que se asemeja más a la realidad tangible, comparándola con el inventario de deslizamientos.

5.1 Zonificación de la susceptibilidad a deslizamientos en el cantón de Escazú

Se realizó una zonificación de áreas con mayor susceptibilidad a deslizamientos; a continuación se detallan las metodologías empleadas y los resultados obtenidos para cada una.

Se utilizó el método Mora-Vahrson (1992), el cual permite obtener una zonificación de la susceptibilidad del terreno a deslizarse, mediante la combinación de la valoración y peso relativo de “elementos pasivos”, como lo son el relieve relativo, la litología, el grado humedad del suelo; y de “elementos activos” (la sismicidad y las lluvias intensas), que actúan como factores de disparo.

Es así como se considera que el grado de susceptibilidad al deslizamiento es el producto de los elementos pasivos y de la acción de los factores de disparo (Mora *et al.*, 1992):

$$H = (S_l * S_h * S_r) * (D_s + D_{II})$$

Donde:

H: grado de amenaza al deslizamiento

S_l: valor del parámetro de susceptibilidad litológica

S_h: valor del parámetro de humedad del terreno

S_r: valor del parámetro del relieve relativo

D_s: valor del parámetro de disparo por sismicidad, y

D_{II}: valor del parámetro de disparo por lluvia

Para los resultados de la combinación de todos los factores, Mora *et al.* (1992) sugieren dividir en rangos los valores obtenidos en cinco clases de susceptibilidad y así asignarles calificativos.

Mora *et al.* (2002) proponen una modificación al método Mora Vahrson, en el cual sustituyen el relieve relativo por el ángulo de la pendiente del terreno (S_p); además, consideran los parámetros de resistencia al corte de suelos y la clasificación de macizos rocosos, en el parámetro de susceptibilidad litológica. También consideran una clasificación más simplificada del grado de amenaza, la cual proponen que se denomine susceptibilidad al deslizamiento. Estas modificaciones proponen una nueva metodología que denominan el método Mora – Vahrson – Mora.

Camacho *et al.* (2004) implementan la sustitución del parámetro de susceptibilidad litológica por el de susceptibilidad geomorfológica (S_g) en la metodología Mora – Vahrson – Mora. Esto a raíz de la homogeneidad que la litología presente en su área de estudio, por lo que consideran que la alternancia de unidades y procesos geomorfológicos, brindan un criterio de mayor relevancia para la zonificación de susceptibilidad al deslizamiento.

5.1.1 Descripción de los parámetros

a. Parámetro de humedad del terreno

El parámetro de humedad del terreno se determinó a partir de los promedios mensuales de precipitación de la estación Matinilla-Santa Ana, del IMN, ubicada en Salitral. Con estos promedios se efectuó un balance hídrico simplificado, en donde se asume una evapotranspiración potencial de 125mm/mes; por lo tanto precipitaciones mensuales inferiores a 125 mm no conducen a un aumento de la humedad del terreno, mientras que una precipitación entre 125 y 250 mm sí la incrementa, asignándole un valor de 1, y precipitaciones mensuales mayores a 250 mm conducen a una humedad muy alta, asignándole un valor de 2 (Mora *et al.*, 1992).

Se efectúa la suma de estos valores para los doce meses del año, con lo que se obtiene un valor que puede oscilar entre 0 y 24 unidades. El resultado refleja los aspectos relacionados con la saturación y la distribución temporal de humedad en el terreno (Mora *et al.*, 1992). El valor del parámetro S_h se otorga utilizando la clasificación del cuadro 5.

Suma de valores asignados a cada mes	Descripción	Valoración del parámetro S_h
0-4	Muy bajo	1
5-9	Bajo	2
10-14	Medio	3
15-19	Alto	4
20-24	Muy alto	5

Los datos analizados de la estación Matinilla-Santa Ana corresponden con 22 años de registro. Para el área de estudio, la suma de los valores asignados fue de 13, por lo que el valor asignado del parámetro de humedad del terreno (S_h) es de **3**.

b. Parámetro de susceptibilidad litológica

Los tipos de suelos y rocas juegan un papel preponderante en el comportamiento dinámico de las laderas (Mora *et al.*, 1992). La composición mineralógica, la capacidad de retención de humedad, los espesores y grado de meteorización, el estado de fracturamiento, el ángulo de buzamiento, la posición y variación de los niveles freáticos, etc., influyen claramente en la estabilidad o inestabilidad de las laderas (Mora *et al.*, 1992). En el cuadro 6 se muestra el valor asignado a cada litología presente en el área de estudio.

Formación	Litología	Valor de S_l
Fm. Pacacua	Areniscas finas a medias, conglomerados brechosos	4
Fm. Peña Negra	Areniscas finas y lutitas	3
Fm Grifo Alto	Tobas y lavas andesíticas	3
Cornubianitas de Escazú	Cornubianitas	2
Intrusivo de Escazú	monzonitas, granodioritas, gabros, monzogabros	2
Fm. Lavas Intracañón	lavas andesíticas, tobas, ignimbritas	2
Fm. Avalancha Ardiente	Ignimbritas	2
Lahares y cenizas	Depósitos laháricos y capas de ceniza	3
Depósitos aluviales y coluviales	Depósitos aluviales y coluviales	4

c. *Parámetro del relieve relativo*

Mora *et al.* (1992) definen este parámetro como la traducción de la rugosidad natural del terreno que involucra el concepto de pendiente de las laderas. Para medir esa rugosidad se establece la mayor diferencia de elevación para el centro de cada unidad de área (Mora *et al.*, 1992). Para la elaboración de este parámetro se utilizó la información de las curvas de nivel escala 1:25000.

Por lo tanto, el índice de relieve relativo se define como: $R_R = dh_{\max} / A$

Donde:

R_R : Índice de relieve relativo (m/km²)

dh_{\max} : máxima diferencia de elevación por unidad de área (m)

A: área (km²)

En el cuadro 7 se muestran los valores característicos y sus respectivas clases.

Índice del Relieve relativo (m/km²)	Calificativo	Valor del Parámetro S_r
0 – 75	Muy bajo	0
76 – 175	Bajo	1
176 – 300	Moderado	2
301 – 500	Medio	3
501 – 800	Alto	4
> 800	Muy alto	5

d. *Parámetro de la pendiente*

Este parámetro utiliza las clases de pendientes propuestas por Van Zuidam (1986), con las cuales se describen los procesos característicos y esperados, y las condiciones del terreno, así como una leyenda de colores sugerida por el mismo autor (Mora *et al.*, 2002).

El mapa de pendientes se generó con base en el modelo de elevación digital creado a partir de las curvas de nivel a escala 1: 25 000. El mapa de pendientes y el valor del parámetro de la pendiente se clasificaron de acuerdo al cuadro 8.

Cuadro 8: Valoración del parámetro de pendiente (S_p) (Mora *et al.*, 2002)

Clase de pendiente		Condiciones del terreno	Valor del parámetro S_p
Grados	Porcentaje		
0 – 2	0 – 2	Planicie, sin denudación apreciable	0
2 – 4	2 – 7	Pendiente muy baja, peligro de erosión	1
4 – 8	7 – 15	Pendiente baja, peligro severo de erosión	2
8 – 16	15 – 30	Pendiente moderada, deslizamientos ocasionales, peligro severo de erosión	3
16 – 35	30 – 70	Pendiente fuerte, procesos denudaciones intensos, peligro extremo de erosión de suelos	4
35 – 55	70 – 140	Pendiente muy fuerte, afloramientos rocosos, procesos denudacionales intensos	5
> 55	> 140	Extremadamente fuerte, afloramientos rocosos, procesos denudacionales severos	6

e. Parámetro de susceptibilidad geomorfológica

Para este parámetro se ha utilizado la modificación propuesta por Camacho *et al.* (2004), quienes incorporan la condición de susceptibilidad geomorfológica; estos autores utilizan esta variable en lugar del índice litológico, ya que su área de estudio cuenta con una litología muy homogénea. Para el caso de Escazú, aunque sí presenta variabilidad litológica, se consideró modelar esta variación del método con el fin de corroborar la influencia que ejerce la geomorfología, en especial la unidad de *áreas con movimiento en masas*, y así comparar los resultados con lo observado en el campo.

En el cuadro 9 se muestran los valores para el parámetro de susceptibilidad geomorfológica; a la unidad de áreas en donde se evidenció movimiento de masa se le asigna un mayor valor, ya que son áreas con deslizamientos activos o en su defecto, los depósitos se encuentran en movimiento.

Cuadro 9: Valoración del parámetro susceptibilidad geomorfológica (S_g), según criterio experto de los autores

Unidad geomorfológica	Valor del parámetro S_g
Laderas denudacionales de baja pendiente	1
Laderas denudacionales de media a baja pendiente	2
Laderas denudacionales de pendiente moderada	3
Laderas denudacionales de alta a muy alta pendiente	5
Áreas con movimiento en masa	5
Escarpes	5
Valle fluvial	1
Fila	5
Cerros aislados	2
Facetamiento	4
Garganta de río	4

f. Parámetro de disparo por lluvias

Según el estudio realizado en el 2010 por el MIDEPLAN, los eventos hidrometeorológicos corresponden al tipo de evento que han provocado más daños importantes a lo largo del período 1988-2009, (82,9%), entre los cuales la mayoría son debido a exceso de precipitación. Durante el año 2010, se presentaron dos eventos que fueron importantes por sus efectos en Costa Rica. El primero de ellos fue la tormenta tropical Nicole, cuyas afectaciones al territorio nacional se dieron entre el 28 y el 30 de septiembre; y del 2 al 7 de noviembre ocurrió la influencia del fenómeno meteorológico Thomas durante el cual el aumento del caudal y saturación de suelos aumentó la erosión lateral y la generación de flujos de lodo, y detrito como el que causó la muerte de 24 personas (Arias *et.al.* 2011) en Calle Lajas en San Antonio de Escazú.

En este parámetro se consideran las intensidades de lluvias potencialmente generadoras de deslizamientos. Se utiliza la lluvia máxima en 24 horas, con un período de retorno de 100 años, aplicando la distribución de valores extremos Gumbel tipo I o LogPearson tipo III, a series temporales con más de 10 años de registro (Mora *et al.*, 1992).

Para nuestro caso, se utilizó la distribución Gumbel tipo I, utilizando el registro de 22 años de la estación meteorológica Matinilla-Santa Ana (n=22). La precipitación máxima calculada para un periodo de retorno de 100 años es de 174,38 mm, obteniéndose así un valor de **2** para el parámetro de disparo por lluvia, según cuadro 10.

Cuadro 10: Valoración del parámetro de disparo por lluvia (Mora *et al.*, 1992).

Lluvia máxima en 24 horas, período de retorno 100 años [mm]	Descripción	Valor del parámetro D_{II} .
< 100	Muy bajo	1
100-200	Bajo	2
200-300	Medio	3
300-400	Alto	4
> 400	Muy alto	5

g. Parámetro de disparo por sismo (S_s)

Los sismos con potencial destructor, ocurridos durante el período 1988-2009, son cinco y representan el 12,2% de los eventos que provocaron daños (Flores *et al.*, 2010).

El Cantón de Escazú se localiza dentro del área denominada Valle Central de Costa Rica, en el cual se han producido eventos sísmicos generados en fallas geológicas locales, así como también, eventos sísmicos generados por subducción (choque de placas Cocos - Caribe), los cuales pueden ser percibidos de manera importante, sin causar daños materiales considerables. Las fallas locales ubicadas en la periferia (o inclusive dentro) de Escazú, representan las fuentes sísmicas más importantes para el cantón (Montero *et al.*, 2005).

Se ha observado que el potencial de generación de deslizamientos por actividad sísmica puede correlacionarse con la escala de intensidades Mercalli-Modificada (Mora *et al.*, 2002). La calificación de este parámetro se realizó con base en la calificación propuesta por Mora *et al.* (1992), que se muestra en el cuadro 11.

Cuadro 11: Valoración del parámetro de disparo por sismo (Mora <i>et al.</i> , 1992).		
Intensidad Mercalli modificada	Clase	Valor del parámetro D_s
III	Leve	1
IV	Muy bajo	2
V	Bajo	3
VI	Moderado	4
VII	Medio	5
VIII	Elevado	6
IX	Fuerte	7
X	Bastante fuerte	8
XI	Muy fuerte	9
XII	Extremadamente fuerte	10

Para el valle central se han estimado que los sismos que han generado las mayores intensidades son el del 4 de marzo de 1924 y el del 4 de mayo de 1910, los cuales alcanzaron intensidades de VIII grados (Denyer *et al.*, 2009). Por lo tanto, para el cantón de Escazú el parámetro de disparo por sismo tiene un calificativo elevado, con un valor de **6**.

El 5 de setiembre del presente año, a las 8:42 am se registró un sismo que fue sentido en todo el país. Según RSN (2012) este se localizó 8 km al noreste de Sámara, Nicoya, con una profundidad de 15,9 km y una magnitud de 7,6 Mw y cuyo origen se asoció a la subducción de la placa del Coco; posteriormente, los días 31 de octubre y 1 de noviembre, se dio un enjambre sísmico el cual, según funcionarios de la RSN, está asociado a la falla Escazú y probablemente inducido por el sismo de Nicoya. Tras estos sismos, en el cantón de Escazú no se reportaron daños mayores, y según M. Arias (com. pers., 2012) los principales deslizamientos no presentaron variación significativa. Sin embargo muy cerca, a menos de un kilómetro del límite con el área de estudio, en el Tajo de la empresa MECO S.A, coordenadas 515500/216800, se produjo un desprendimiento de bloques, correspondientes a las ignimbritas columnares de la formación Lavas Intracañón, descritas anteriormente en el apartado 2.1.5. En la figura 49 se muestra este desprendimiento producto del sismo del 5 de setiembre. Además, a lo largo del camino también se observaron algunos agrietamientos (figura 50).

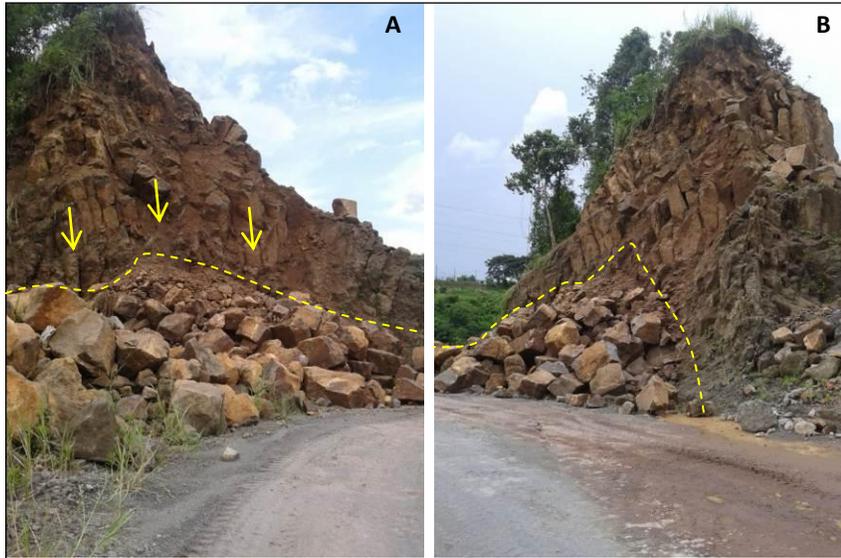


Figura 49 (A y B): Desprendimiento de material tras el sismo del 5 de setiembre 2012. Coordenadas 515500/216800



Figura 50: Agrietamiento en el camino tras sismo del 5 de setiembre 2012. Coordenadas 515500/216800

En la figura 51 se detallan los parámetros que se utilizaron para aplicar el método Mora – Varhson, la figura 52 muestra el resultado del mapa de susceptibilidad al deslizamiento del cantón, que se generó aplicando esta misma metodología. Mientras que en la figura 53 se observan los parámetros empleados para aplicar la metodología Mora – Varhson – Mora, generando así el mapa de susceptibilidad al deslizamiento del cantón de Escazú (figura 54). Aplicando la modificación sugerida por Camacho et al. (2004) al método Mora – Varhson – Mora (2002) (ver lo parámetros empleados en la figura 55) se obtuvo otro mapa de susceptibilidad al deslizamiento del cantón (figura 56).

Figura 51: Parámetros método MV

Figura 52: Mapa de susceptibilidad al deslizamiento cantón de Escazú (método MV)

Figura 53: Parámetros método MVM

Figura 54: Mapa de susceptibilidad al deslizamiento cantón de Escazú (método MVM)

Figura 55: Parámetros método MVM
con la modificación geomorfológica

Figura 56: Mapa de susceptibilidad al deslizamiento cantón de Escazú (método MVM modificación geomorfológica)

5.2 Análisis de resultados

Cabe destacar que la falta de variación en los parámetros de disparo por lluvia, disparo por sismo y el de humedad, hacen constantes sus valores para el área de estudio, esto implica que en los cálculos de las metodologías aplicadas son los parámetros de susceptibilidad litológica, geomorfológica, relieve relativo y pendientes, los que harán la diferencia entre cada método.

Con la aplicación del método Mora – Varhson, el mapa de zonificación de la susceptibilidad de deslizamiento muestra áreas desde baja hasta muy alta susceptibilidad; las zonas con mayor susceptibilidad se localizan hacia la parte oeste-suroeste de la ciudad de Escazú, en los sectores de Alto Granadilla, Alto Raicero y Alto Tapezco; también, en las cabeceras de quebradas como Lajas, Londres, entre otras. De igual forma, el sector de Bello Horizonte presenta una susceptibilidad alta al deslizamiento. Mientras que para la parte central y hacia el norte del cantón de Escazú, la susceptibilidad es baja a muy baja, lo que corresponde a un 61,31% del cantón, según se indica en la figura 52.

Lo que muestra esta distribución de la susceptibilidad, es que el parámetro de relieve relativo ejerce la mayor influencia en los cálculos del método, seguidamente del parámetro litológico (figura 51). Las zonas con una alta a muy alta susceptibilidad se presentan donde el relieve relativo es mayor, lo que representa un 27,13% del área, esto inclusive en áreas donde el parámetro litológico es bajo.

Utilizando el método Mora- Varhson- Mora, las zonas de mayor susceptibilidad se presentan hacia la parte oeste-suroeste de la ciudad de Escazú en los sectores de Jaboncillos, Alto Granadilla, Alto Raicero y Alto Tapezco, así como en algunos sectores al sur-sureste de Chiverral. También, en las zonas de Torrotillo, Bello Horizonte y Cerros Alto Las Palomas se muestran con muy altos valores de susceptibilidad. Los sectores donde la susceptibilidad es baja, corresponden a los sectores de San Rafael, Guachipelín y Ayala, los cuales se localizan en la parte norte del cantón. En general, según se muestra en la figura 54, las áreas con alta a muy alta susceptibilidad corresponden al 39,52% del cantón, mientras que las áreas de baja a muy baja susceptibilidad representan el 33,89% de Escazú.

Tanto el parámetro litológico como el de pendientes ejercen control en esta metodología, presentando las zonas con pendiente fuerte variación en el grado de susceptibilidad, influenciadas por las diferentes litologías (figura 53).

Por último, para la versión del método Mora- Varhson- Mora, en la que se realizó una sustitución del parámetro litológico por el geomorfológico (figura 55), dio como resultado un aumento de la influencia del factor de la pendiente, ya que se observa que las áreas con mayor susceptibilidad coinciden con las unidades geomorfológicas clasificadas como laderas de alta a muy alta pendiente; además, las áreas con movimiento en masa presentaron valores de susceptibilidad de muy alta, alta y moderada. Correspondiendo así, las áreas de alta a muy alta susceptibilidad al 34,74% de todo el cantón, esto tal y como se muestra en la figura 56, siendo que las áreas de baja a muy baja susceptibilidad representan el 48,91% del cantón.

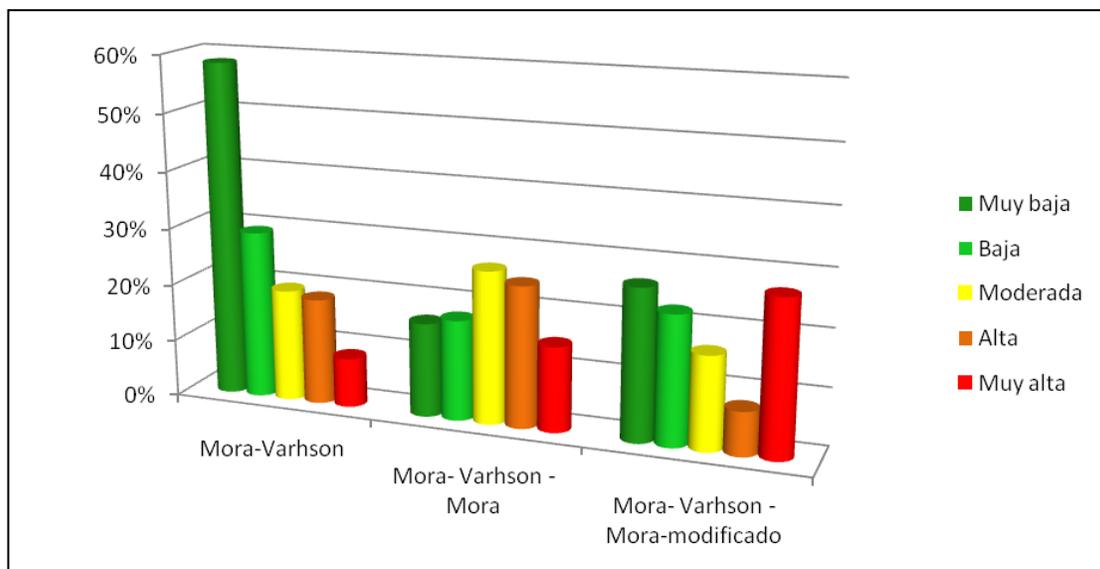


Figura 57: Porcentajes de área por unidad de susceptibilidad

Realizando una comparación de porcentajes de área por unidad de susceptibilidad (figura 57) entre los métodos, lo más evidente que se puede observar es como la metodología Mora-Varhson muestra una diferencia significativa en cuanto a las áreas de muy baja susceptibilidad, llegando a ocupar un 58,31 % del área total, mientras que en los otros dos métodos no se supera el 26,38 %. Esta diferencia se debe a que el método Mora-Varhson es el único en el que se usa el parámetro

de relieve relativo, teniendo este un 63,7 % de zonas de bajo valor, mientras que los otros utilizan el parámetro de la pendiente.

La versión de la metodología Mora-Varhson-Mora utilizando el parámetro S_g muestra el mayor porcentaje de muy alta susceptibilidad en relación con las otras metodologías, esto en respuesta a que la pendiente tiene un peso importante en la geomorfología, que coincide con los mayores valores del parámetro de pendiente (S_p).

Relacionando lo observado en el campo con los resultados de los métodos de susceptibilidad utilizados, se muestra que para el cantón de Escazú, el parámetro de la pendiente refleja mejor el comportamiento de los procesos erosivos que el de relieve relativo. Es notable que la modelización con el parámetro S_g en algunos sectores es sesgada, principalmente en las zonas clasificadas por el valor de la pendiente (figura 58).

Sobreponiendo el mapa de inventario de deslizamiento con los mapas de susceptibilidad al deslizamiento, podemos observar que tanto el método Mora-Varhson-Mora y el Mora-Varhson-Mora modificado presentan una buena “precisión” con respecto a los deslizamientos observados en el campo; sin embargo creemos que el mapa de susceptibilidad que utiliza el parámetro geomorfológico, presenta muchas áreas de alta susceptibilidad que no reflejan la realidad del sitio, en donde se sobreestima el valor de la pendiente y donde no se han encontrado indicios de movimiento del terreno.

Figura 58: Resumen de los resultados aplicando las tres metodologías

5.3 Caracterización de deslizamientos

La caracterización de deslizamiento corresponde a la descripción de los deslizamientos, tanto los observados en el campo como aquellos vistos en foto aérea y que son de importancia debido a sus grandes dimensiones como lo son el deslizamiento Alto Granadilla, Alto Raicero, Alto El Tajo y Torrotillo.

Estos deslizamientos se muestran en el mapa de inventario de deslizamientos (figura 81), asimismo se incluyeron en el mapa los recolectados en información bibliografía correspondientes al trabajo de Hernández & Vargas (1992).

Deslizamiento 1. Se localiza al este del cantón de Escazú, en lo que se conoce como Torrotillo-Palo Campana, por lo que se le ha denominado Torrotillo.

Presenta un ancho de 800 m por un largo de 1 km aproximadamente (figura 59); posee un patrón de drenaje moderadamente desarrollado y predomina la cobertura boscosa. En la parte central e inferior, se observó un depósito el cual por sus grandes dimensiones internamente presenta algunos escarpes y deslizamientos de menor tamaño. Actualmente la zona no muestra cambios drásticos respecto a su cobertura, ya que aún no se ha desarrollado urbanísticamente.

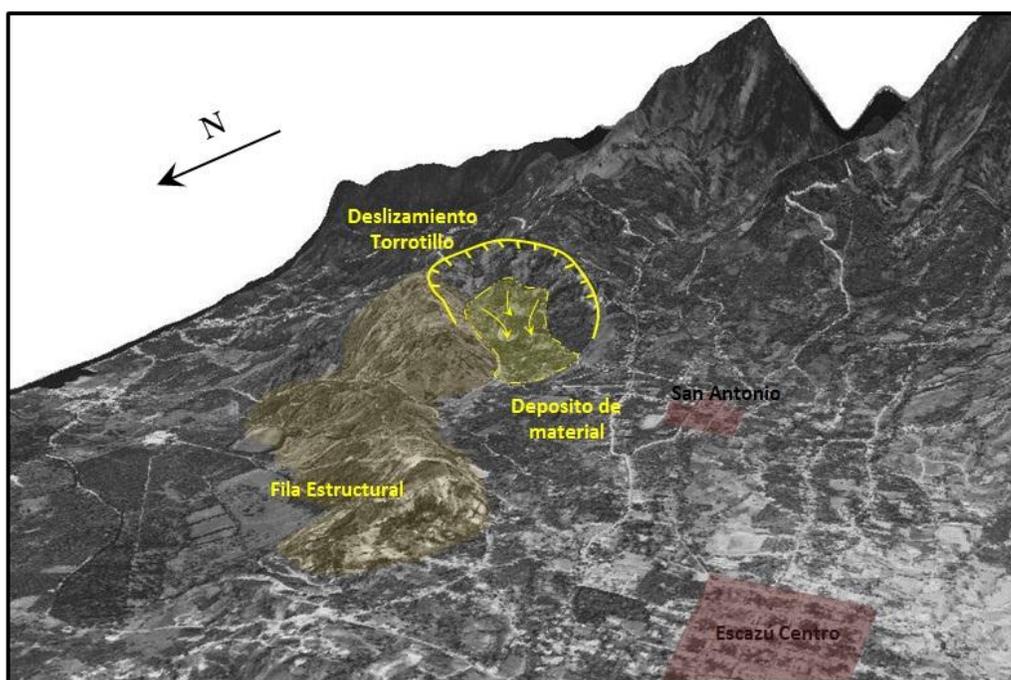


Figura 59: Vista del deslizamiento de Torrotillo, a partir de una imagen de la fotografía aérea del año 1974.

Deslizamiento 2. Se localiza al Oeste del cantón de Escazú, y se ubica en lo que se conoce como Alto Granadilla hacia el norte del poblado de Bebedero, con unas dimensiones de 870 m de ancho y una longitud de 1500 m. Por medio de fotografías aéreas se identificó en su parte superior una corona muy bien definida en forma de herradura (Figura 60 A).

Internamente, el deslizamiento se encuentra muy disectado y con una desarrollada red de drenaje de tipo subdentrítico que nace en la base de la corona principal. Dentro de los cauces, algunos presentan evidencias de erosión y desprendimiento en sus cabeceras, mientras que en otros se observa únicamente erosión en las márgenes.

Además, al pie del deslizamiento de Alto de Granadilla se observó una morfología de lóbulo, el cual evidencia la ocurrencia de al menos un evento de erosión y depositación previo a 1945, año de la fotografía aérea más antigua que se tiene de esa área.

Deslizamiento 3. Este deslizamiento se ubica en lo que se conoce como Alto Raicero (figura 60 B), colinda hacia el sur con el deslizamiento Alto Granadilla y en su base se encuentra el lugar conocido como Jaboncillo; presenta unas dimensiones de 650 m de ancho y una longitud de 700 m.

Muestra una corona principal con una forma muy definida de herradura, sus coronas laterales tienden a unirse hacia la parte inferior. Además muestra poco desarrollo de cauces. Para este deslizamiento se pudo distinguir un evento importante de inestabilidad, ya que en las fotos de 1974 y 1977 se observa un cambio en el uso de suelo, en el cual anteriormente se observaba vegetación de bosque en su mayoría y algunas áreas de pasto, sin embargo para la foto 1977 la vegetación de bosque no se encuentra y en su lugar se evidencia un patrón de remoción de suelo y una acumulación de material en la parte media del deslizamiento.

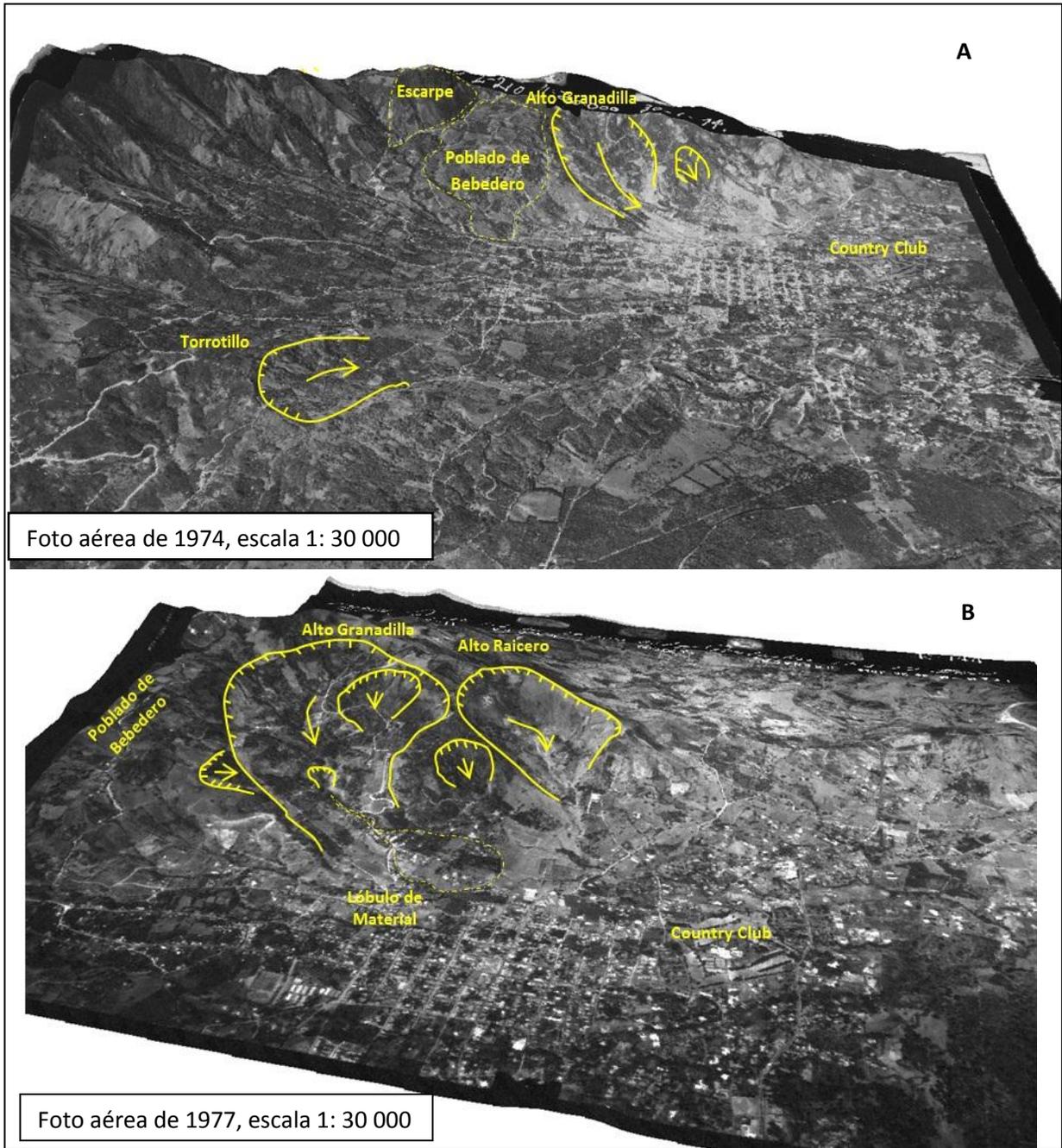


Figura 60 (A y B): Diferentes vistas los deslizamientos, Alto Raicero y Alto Granadilla

Deslizamiento 4. Este deslizamiento se localiza en las coordenadas 519185/208850, y se le ha nombrado Alto El Tajo, por un pequeño tajo que se localiza en esa área. Esto debido que no se asoció al nombre geográfico del lugar, porque ya existía un deslizamiento, Alto Tapezco.

Este deslizamiento presenta unas dimensiones de 840 m de ancho por 400 m de largo. Esta zona se encuentra deforestada, predominando casi en su totalidad el pasto; únicamente el área que recorre una quebrada sin nombre, que nace en el lugar, presenta cobertura boscosa (Figura 61).

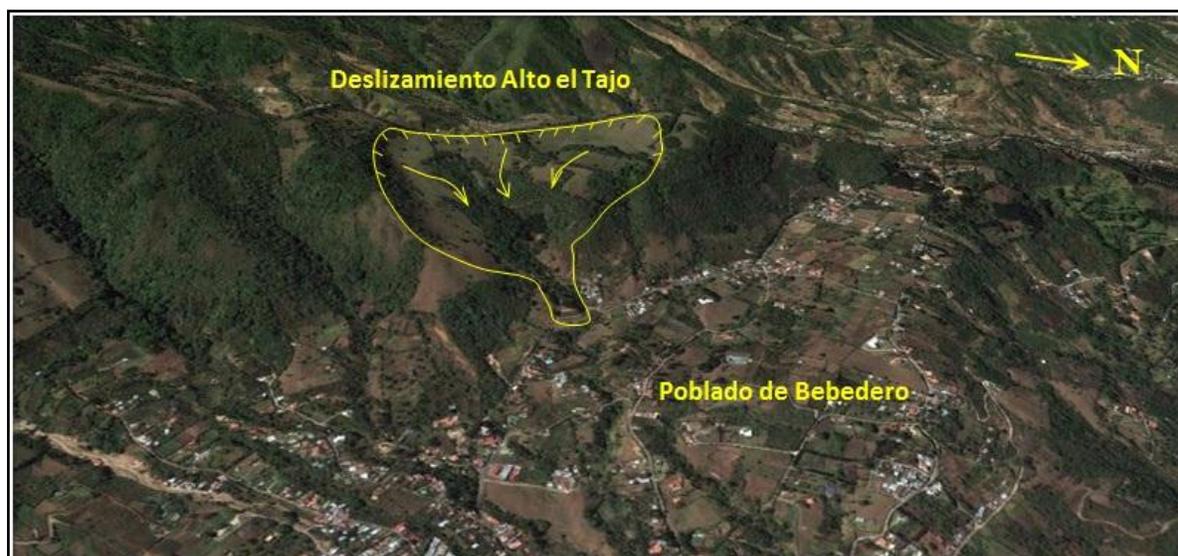


Figura 61: Vista del deslizamiento Alto El Tajo, mediante Imagen Google Earth 2012, Inav/ Geosistemas SRL

En esta área se presentan evidencias de leve reptación del terreno o pequeños desprendimientos, además en sus alrededores se aprecian morfologías como de pequeñas cuencas que se han asociado a posibles basculamientos del terreno; por su escala no se pueden observar en fotos aéreas sino en el campo. En este sector, durante las épocas de invierno se suele formar una pequeña laguna, la cual asociamos a estos basculamientos del terreno (M. Arias, com. pers., 2012). En la figura 62, se observa el basculamiento, el cual es muy local, ya que no se encontró evidencia de tener alguna continuidad hacia otros sectores.

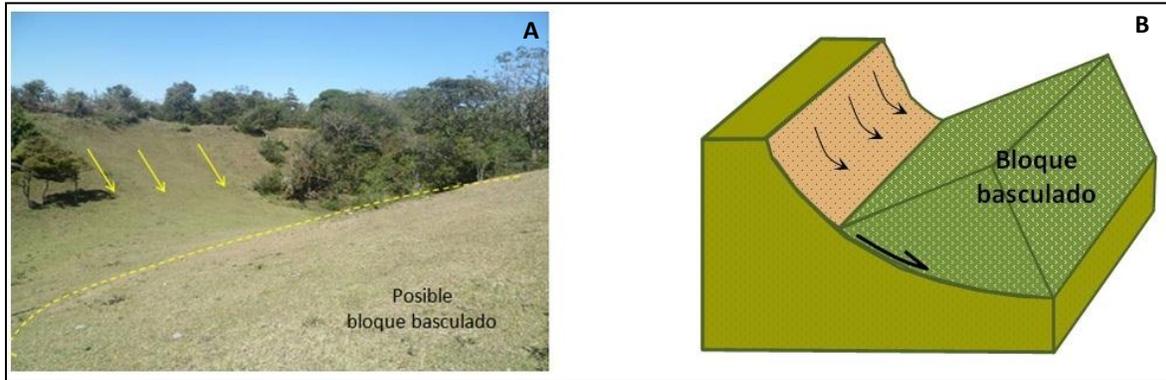


Figura 62 (A y B): Diagrama de bloque basculado observado en Alto el Tajo

Deslizamiento 5. Este deslizamiento se conoce como Palo Campana y se localiza dentro del área de inestabilidad del deslizamiento Torrotillo. Se observa mucha reptación, múltiples desprendimientos de material y árboles inclinados, evidenciado en la figura 63.



Figura 63: Árbol caído producto del movimiento del suelo, en el sector de Alto Palo Campana. Coordenadas 523207/209307

En la figura 64, se observa, en el sector de Alto Palo Campana, una corona de aproximadamente 75 m de ancho, con longitud de 100 m y una profundidad de 1,3 m, y corresponde superficialmente a un suelo residual de aproximadamente 50 cm de espesor. Bajo este suelo se observaron bloques asociados a la Fm. Pacacua, los cuales están siendo incorporados dentro del movimiento.

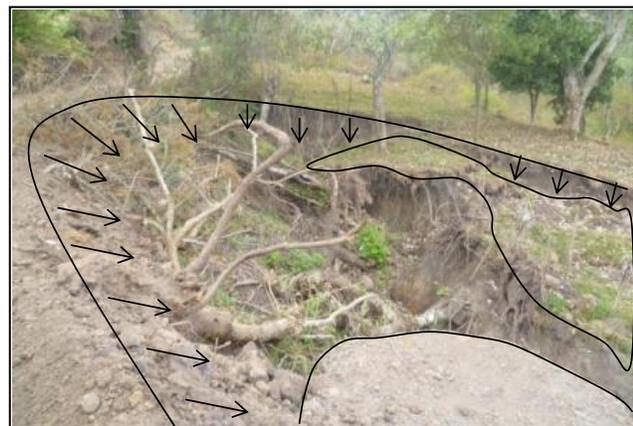
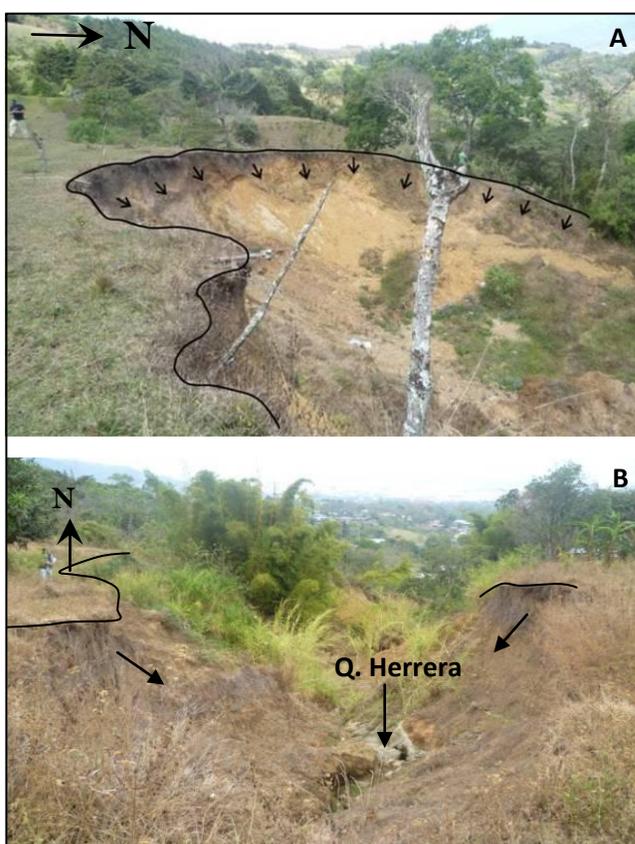


Figura 64: Parte de la corona del deslizamiento de Palo Campana. Coordenadas 523600/209200

Deslizamiento 6. El deslizamiento de Salitrillos se ubica dentro del deslizamiento Torrotillo, presenta una corona actual de aproximadamente 30 m de largo (figura 65 A y B), la cual indica solamente, el último movimiento del deslizamiento, ya que durante el transcurso de los años esta ha ido en retroceso aumentando la extensión total del área inestable, esto evidenciado en visitas al sitio por personeros de la CNE.

Sobre la corona los movimientos son menos evidentes, presentando grietas, reptación, hundimientos y rompimiento del nivel freático, lo cual mantiene saturado el terreno, facilitando los desplazamientos del material.



Debido al corte expuesto por este deslizamiento, se pudo observar que la geología del sitio esta conformada por un conglomerado de la Fm. Pacacua, sobreyacido por aproximadamente un metro de suelo residual.

Este deslizamiento afecta el cauce de la quebrada Herrera, donde el material removido es depositado en el cauce obstruyendo el flujo libre del agua, pudiendo provocar represamientos que al romperse generarían avalanchas.

Figura 65 (A y B): Parte de la corona del deslizamiento de Salitrillos. Coordenadas 522527/208995

Deslizamiento 7. Conocido como El Curio, es un pequeño deslizamiento activo, con una corona de aproximadamente 60 m de largo, con varios agrietamientos de hasta 20 cm de ancho, paralelos a la corona principal se observan desplazamientos verticales de hasta 2 metros.

Durante los últimos 3 años el movimiento aparentemente ha sido constante; sin embargo, con un sismo o una fuerte precipitación, se podría dar un movimiento súbito de material.

Corresponde a un deslizamiento traslacional en suelo. En sus cercanías se observan depósitos coluviales.

En la figura figura 66 A y B se muestran evidencias de este deslizamiento en la superficie, como lo son árboles inclinados y caídos, grietas y gradas en el nivel del terreno.

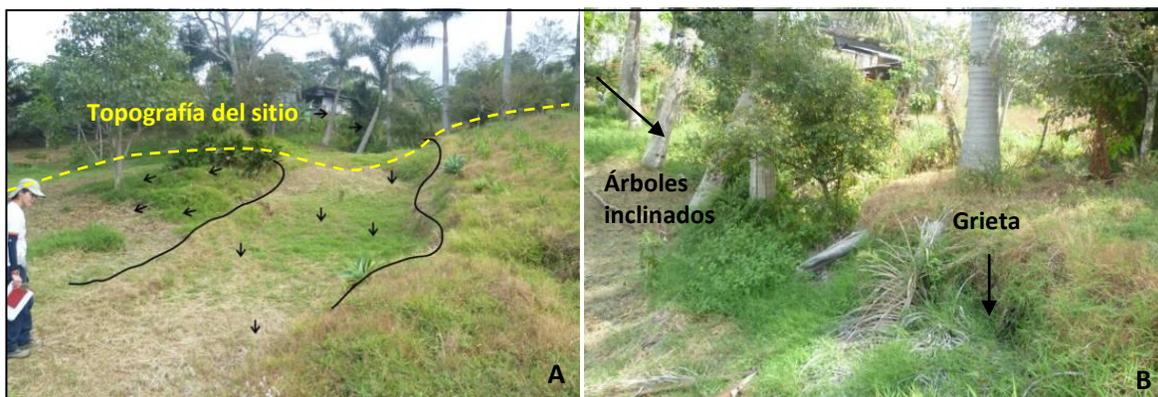


Figura 66 (A y B): Deslizamiento El Curio, topografía del sitio y evidencias de grietas. Coordenadas 521975/208800

Deslizamiento 8. Corresponde a un área inestable, localizada en las coordenadas 522991/209511, con una topografía escalonada y agrietada, evidenciada en la figura 67 donde las líneas punteadas demarcan cambios en el nivel del suelo (gradas). El tipo de movimiento es rotacional en gradas.

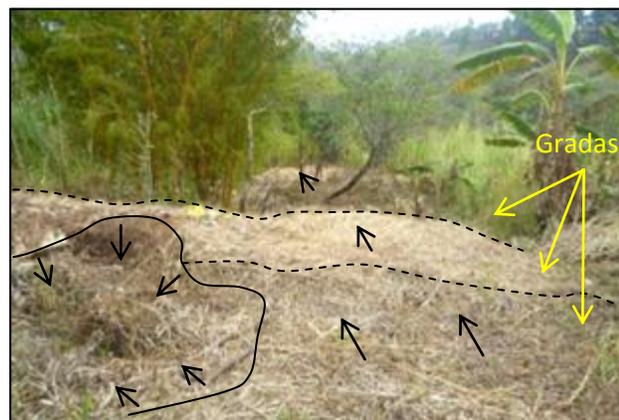


Figura 67: Deslizamiento en gradas, en donde las flechas marcan la dirección del movimiento. Coordenadas 522991/209511

Este deslizamiento posee un largo de aproximadamente 50 m, según las observaciones del campo, los agrietamientos presentan una profundidad de al menos 30 cm y un ancho que va de 10 cm hasta 30 cm; el tipo de movimiento es rotacional con un componente de separación lateral.

La geología que aflora en el sector corresponde a la Fm. Pacacua.

Deslizamiento 9. Este deslizamiento se localiza a un lado del camino de Altos de Bello Horizonte, en las coordenadas 522351/210507 (figura 68).

La corona del deslizamiento tiene aproximadamente 9 m de ancho, un largo de 3,4 m.

Corresponde a un desprendimiento de la capa superficial del suelo, el cual ha generado problemas en la carpeta asfáltica. Su movimiento es de tipo traslacional, afectando principalmente la capa de suelo. Se le asocia a la Fm. Pacacua.



Figura 68: Deslizamiento en gradas al lado del camino, en las coordenadas 522351/210507

Deslizamiento 10. Este deslizamiento se localiza al lado de la margen izquierda de la quebrada Herrera, en las coordenadas 522423/211347. Presenta unas dimensiones de 25 m de ancho, 15 m de largo, con un escarpe de 1,70 m y corresponde a un deslizamiento traslacional en suelo.

Se localiza dentro de la unidad geológica de la Fm. Pacacua.

En la figura 69 se aprecia una quema de pasto en el sitio, donde el movimiento ha formado unos depósitos lobulados, correspondientes al material removido.



Figura 69: Corona del deslizamiento 10 y depósitos en lóbulo. Coordenadas 522423/211347

Deslizamiento 11. Se localiza dentro de Bebedero, en las coordenadas 518958/209795, tiene aproximadamente 18 m de ancho, 20 m de largo y un escarpe de 1,7 m de profundidad (figura 70).

La mala canalización de las aguas pluviales ha favorecido el movimiento de la capa superficial del suelo, lo que provoca este desprendimiento. En los alrededores del deslizamiento se observaron depósitos coluviales.



Figura 70: Corona del deslizamiento 11. Coordenadas 518958/209795

Deslizamiento 12. Se localiza dentro de Bebedero, en las coordenadas 519192/209865

Muestra unas dimensiones de 30 m ancho por 20 m largo y una profundidad observable del escarpe de 8 m, de lo cual se distingue 1 m de suelo, y el resto de material corresponde un conglomerado alterado de la Fm. Pacacua.

Este deslizamiento corresponde a un desprendimiento del terreno que genera flujos de detritos que se han acumulado en la base de la corona principal (figura 71), y que descargan hacia una quebrada sin nombre. No se observaron agrietamientos en la parte posterior de la corona; sin embargo, lo que presenta movimiento son los depósitos inconsolidados que se ubican en la base.



Figura 71: Vista de corona de deslizamiento. Coordenadas 519192/209865

Deslizamiento 13. Corresponde a un flujo de tierra donde el desprendimiento se dio sobre la capa superficial del suelo, tal y como se observa en la figura 72. Se localiza en las coordenadas 520525/209472.

Posee aproximadamente 2 m de ancho y 60 m de alto la ladera por donde descendió el material, depositando el flujo de tierra en una quebrada sin nombre que pasa por el sitio.



Figura 72: Flujo de material localizado en las coordenadas 520525/209472

Deslizamiento 14. Se localiza en las coordenadas 520525/209631, sus dimensiones corresponden a una corona posee 25 m de ancho, longitud de 50 m y un escarpe de 0,5 m (figura 73).

La dirección del movimiento es hacia el NE y corresponde a un deslizamiento de tipo flujo de suelo, en el cual la capa superficial del suelo es la que se desplaza. Este deslizamiento afecta directamente una bodega que se ubica a 3 metros de distancia de la corona.



Figura 73: Corona del deslizamiento 14, localizado en las coordenadas 520525/209631

Deslizamiento 15. Localmente se le denominó como deslizamiento Chumico, el cual se activó con las lluvias de noviembre 2010. Corresponde a un flujo superficial del terreno (figura 74), localizado en las coordenadas 520687/209860, dentro de la Fm. Pacacua. Tiene aproximadamente 50 m de largo y 19 m de ancho.



Figura 74: Flujo superficial del terreno localizado en las coordenadas 520687/209860

Deslizamiento 16. Este corresponde a un movimiento traslacional, genera inestabilidad en los taludes que están a lo largo de una quebrada que es afluente del río La Cruz.

Se localiza en las coordenadas 520779/209787, y su geología se asocia a la Fm. Pacacua.

Posee un largo de aproximadamente 80 m (figura 75).



Figura 75: Deslizamiento 16 localizado en las coordenadas 520779/209787

Deslizamiento 17. Corresponde a un deslizamiento traslacional, localizado en las coordenadas 520847/209724. En el sitio se observaron depósitos coluviales.

Tal y como se aprecia en la figura 76, en el terreno se da un agrietamiento hacia el río La Cruz.

La corona de este deslizamiento tiene un largo de aproximadamente 60 m.



Figura 76: Agrietamiento en el terreno. Coordenadas 520847/209724

Deslizamiento 18. Corresponde a un flujo de detritos que llega al río Agres. La corona tiene aproximadamente 50 m de ancho y 150 m de largo (figura 77). Se localiza en las coordenadas 521473/206222 y el material corresponde a los intrusivos de Escazú.



Figura 77: Corona del deslizamiento 18 y depósitos de material. Coordenadas 521473/206222

Deslizamiento 19. Deslizamiento controlado por una falla local, con un rumbo N50W. Corresponde a un flujo de detritos, constituido por intrusivos fallados y meteorizados (figura 78).

Se localiza en las coordenadas 520533/205185 y posee una corona de aproximadamente 15 m de ancho.



Figura 78: Corona del deslizamiento y material altamente meteorizado. Coordenadas 520533/205185

Deslizamiento 20. Se localiza en las coordenadas 522118/208082, corresponde a un flujo de detritos.

El desprendimiento fue de 5 m ancho por 5 m largo, de lo cual el material se desplazó unos 10 m, aproximadamente.

El material está constituido por suelos asociados a Peña Negra (figura 79), con bloques decimétricos de arenisca silícea (coloración rojiza).



Figura 79: Se Corona y movimiento del material con coloraciones rojizas. Coordenadas 522118/208082

Deslizamiento 21. Inestabilidad del terreno favorecido por la alta pendiente y por el suelo poco consolidado (figura 80). Corresponde a un flujo de detrito.

Se localiza en las coordenadas 522106/207949, está constituido por bloques cornubianitizados de la Formación Peña Negra.

Tiene aproximadamente 5 m de largo, 15 m de ancho y 1 m de profundidad.



Figura 80: Corona del deslizamiento 21. Coordenadas 522106/207949

Los deslizamientos que van numerados de 22 al 29, en el mapa de inventario de deslizamientos (figura 81) corresponde a deslizamientos vistos mediante foto aéreas 1945, 1974 y 1977; sin embargo, no se pudieron identificar en el campo debido al desarrollo urbano del cantón.

Estos deslizamientos presentan coronas muy bien definidas con las típicas formas de herradura, en algunos casos pudimos observar que al trasponer la capa de deslizamientos con la red fluvial de drenaje, muchas de las coronas están formadas en las cabeceras de afluentes.

Estos deslizamientos presentan una topografía suave con una pendiente no mayor a 20°, de forma general presenta tamaños que oscilan entre los 50 m a 80 m de ancho aproximadamente.

Figura 81: Mapa inventario de deslizamientos

Por otra parte, también en el área de estudio se observó un asentamiento del terreno, localizado en las coordenadas 520042/208928. Se activó en el 2009 y con las lluvias de noviembre de 2010, el terreno tuvo un asentamiento de 50 cm; no se observaron movimientos horizontales en el terreno al momento de la visita de campo, por lo que se le ha clasificado como una subsidencia.

Tal y como se muestra en la figura 82, posee un escarpe de aproximadamente 50 m de largo y se presenta un descenso del terreno de 1,30 m. Su litología corresponde a depósitos coluviales.



Figura 82: Subsidencia del terreno de 1,30 m.
Coordenadas 520042/208928

Para el área del cantón de Escazú hemos determinado 4 grandes áreas de movimientos de masas, las cuales se encuentran ubicadas sobre laderas de muy altas pendientes. Estas áreas no se formaron en un solo evento, sino que son procesos paulatinos que se han venido dando hasta la actualidad.

Hubo años en que los movimientos de material de estas grandes áreas se incrementaron, como se pudo observar para el deslizamiento Alto Raicero, el cual según la foto aérea de 1977, se observa una remoción de la cobertura de suelo y patrones de flujo en la parte central del deslizamiento.

Es importante indicar que de las fotos aéreas observadas, solo el deslizamiento Alto Raicero, presenta un cambio notable en su cobertura; para los demás grandes deslizamientos no se observaron este tipo de características.

Para el deslizamiento Alto Granadilla, los cambios que se observaron fueron que algunos de los cauces que discurren por el deslizamiento, presentaban procesos erosivos, evidenciados por los desprendimientos de material en sus márgenes, lo cual podría indicar que para esos años se dieron algunos eventos de flujos de lodo por los cauces; esto nos prevé de eventos similares que se puedan dar actualmente, esto dependiendo de las condiciones en que los cauces se encuentren.

El deslizamiento Alto El Tajo, al encontrarse la mayor parte de su área con pasto, muestra zonas con indicios de reptaciones del terreno en laderas de muy alta pendiente, con poca cobertura boscosa y acumulación de agua en algunas partes; esta zona se encuentra vulnerable a presentar problemas de erosión e inestabilidad con facilidad, los cuales pueden iniciar como pequeños desprendimientos o agrietamientos. Por lo tanto, es importante que esta zona se mantenga en vigilancia y se someta a un proceso de recuperación de su cobertura boscosa, la cual minimizaría los problemas erosivos.

El deslizamiento Torrotillo presenta la particularidad de mostrar acumulaciones de material y además dentro de esta área inestable se ubican dos de los deslizamientos vistos en el campo; elementos que indican que este depósito se encuentra activo y dentro de él se están dando procesos de remoción de masas.

Asimismo de los deslizamientos levantados en el campo, la mayor parte de ellos se relacionan con flujos de detritos o de suelo que inician como cárcavas o como desprendimientos superficiales de las capas de suelo. Los observados de mayor tamaño con dimensiones de 30 m ancho, ocurren sobre laderas de pendientes moderadas y tienden a formarse en zonas de posibles puntos de nacientes.

Los deslizamientos vistos sobre laderas de pendientes moderadas a altas, suelen iniciar como desprendimientos de la capa superficial del suelo, donde con el tiempo la remoción de material tiende a ser mayor; muchos de estos desprendimientos caen a quebradas sin nombres que descargan hacia otros ríos principales, convirtiéndose en fuentes de aporte de material hacia los cauces.

La identificación de estos deslizamientos, ayuda a identificar aquellos cauces que puedan estar recibiendo una mayor cantidad de material, y con ello mantener una vigilancia de los mismos, en especial en la época de lluviosa.

No solo en altas pendientes se identificaron deslizamientos; también se observaron deslizamientos en pendientes bajas, los cuales se identificaron como de tipo traslacional o como en uno de los casos solo subsidencia del terreno; estos deslizamientos pueden estar condicionados por el tipo de suelos inconsolidados provenientes de depósitos coluviales.

6. CONSIDERACIONES SOBRE ELEMENTOS EN RIESGO

El cantón de Escazú cuenta con características geológico-geomorfológicas que propician el desarrollo de procesos de remoción en masa. Se conocen áreas que ya han sido afectadas por estos procesos, principalmente en el distrito de San Antonio, en las partes de pendiente muy alta, alta y moderada.

Los deslizamientos dependen, en gran medida, de la pendiente y la litología, sin embargo también se ven influenciados por la gravedad y disparados por sismos, eventos hidrometeorológicos y la actividad humana.

6.1 Elementos en riesgo

Los elementos en riesgo, corresponden con todos aquellos que muestren alguna vulnerabilidad a una amenaza determinada y que esta pueda generar alguna pérdida. Según la manera en que se defina el elemento en riesgo, la afectación puede medirse en pérdidas económicas y/o en vidas humanas.

Para el cantón de Escazú, los elementos en riesgo que se definieron, son aquellos que tienen antecedentes, así como algunos identificados en la realización de este trabajo; todos ellos a partir de la afectación por deslizamiento.

A continuación se presentan los elementos identificados en el campo, algunos de ellos ya han presentado problemas por la inestabilidad del terreno y/o por flujos asociados. La identificación de estos elementos se ha llevado a cabo mediante la recopilación de antecedentes, tanto de la base de datos de la CNE, así como los comentarios que nos han brindado algunos ciudadanos y funcionarios de la municipalidad y de las observaciones de campo realizadas en este trabajo.

6.1.1 Sistemas de abastecimiento de agua potable

La ubicación de infraestructura asociada al sistema de abastecimiento de agua potable sobre los cauces de los ríos por donde han descendido flujos o en zonas que presentan inestabilidad del terreno las convierte en elementos complejos en riesgo, porque además de que pueden ser dañadas por flujos, también su destrucción afectaría el abastecimiento de agua potable para la

población lo que generaría pérdidas económicas a comercios y pequeña industria del área. Pero a su vez la destrucción de los tanques de almacenamiento los convierte en un factor de riesgo, porque el agua contenida en ellos puede alimentar eficientemente un eventual flujo y podrían aumentar las consecuencias indeseables en las áreas pobladas cercanas al cauce.

a. *Tanque en la Quebrada Lajas.*

Para el cantón de Escazú la afectación de los sistemas de abastecimiento de agua potable por efectos de la inestabilidad del terreno y /o flujos asociados no es nueva, el evento del 2010 que afectó a la comunidad de Lajas producto de un flujo que descendió por la Quebrada Lajas destruyó un tanque para agua que se ubicaba en las coordenadas 520611/207807 (figura 83).



Figura 83: Cauce de la quebrada Lajas después del evento del 2010, por donde bajó un flujo que destruyó un tanque de abastecimiento de agua. Coordenadas 520611/207807

b. *Tanque en el sector de Filtros Rápidos.*

También en el sector conocido como Filtros Rápidos se encuentra un tanque de agua abandonado ubicado en las coordenadas 520847/209724 al margen izquierda del río Cruz, las dimensiones de este tanque, según lo observado en superficie, son 2 m de altura y aproximadamente 25 m² de área.

A diferencia del tanque destruido en Quebrada Lajas, este no se encuentra dentro del cauce, pero si en una zona afectada por inestabilidad del terreno. El tanque se dejó de utilizar cuando el AyA asumió el acueducto y se dejaron de usar todas las fuentes superficiales; en su momento este tanque representó un elemento en riesgo, pero como ya no cumple su función y se encuentra en abandono ha pasado a ser un factor de riesgo debido a que la estructura en un eventual deslizamiento o erosión de la margen del río podría colapsar y ayudar a causar un represamiento en el río que genere un flujo, afectando las estructuras como el puente y las viviendas que se localizan aguas abajo (figura 84 A y B).

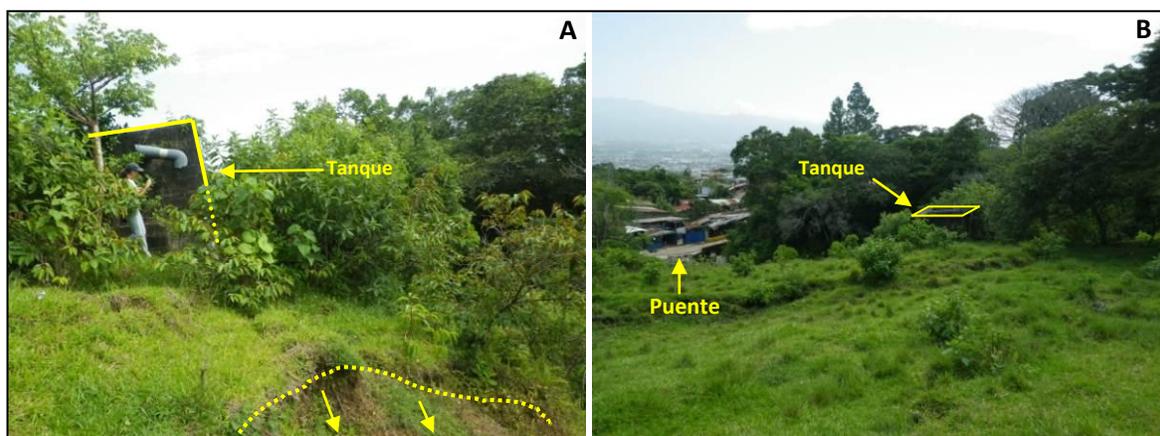


Figura 84 (A y B): (A) Tanque cerca del talud del río. (B) Se observa el tanque y abajo el puente y unas viviendas

c. Estructuras de almacenamiento de agua en el río Agres

Dentro del cauce del río Agres en las coordenadas 522050/207624 se localizan unos tanques del sistema de abastecimiento de agua potable, se trata de una estructura de concreto que ocupa aproximadamente 50 m² de área, además de los tanques hay otras estructuras que forman parte del sistema de abastecimiento. Durante visitas de campo se observó el tanque en su máxima capacidad de agua (figura 85).

Debido a los antecedentes de problemas por inestabilidad de laderas en la cabecera del río Agres así como la generación de flujos asociados, como es el caso del flujo de lodo que descendió en 1861 por este cauce y generó daños humanos y en infraestructura, también los deslizamientos que sucedieron en el 2004 en las zonas altas de la micro-cuenca del río Agres. La ubicación de estos tanques aumenta la vulnerabilidad a ser dañados o destruidos completamente por un eventual flujo que descienda por el cauce del río.

En el trabajo de campo realizado a lo largo del cauce del río Agres, se observaron grandes bloques de roca que podían superar los 2 m de ancho y largo (figura 85 D) también se observaron localidades donde el valle del río se ensancha y se ha depositado material de tamaño métrico; estos nos sugiere que de producirse un flujo, este podría incorporar todo este material de gran tamaño aumentando así sus dimensiones. Por los eventos que se han presentado en la cuenca de este río, la ubicación y características de estos tanques, se han considerado como un elemento complejo en riesgo, ya que aparte de ser dañados por eventuales flujos el sistema de abastecimiento de agua se vería interrumpido parcial o completamente afectando directamente a un sector de San Antonio, además dependiendo de las dimensiones del flujo, los tanques se convertirían en factores de riesgo, ya que añadirían al flujo de detritos el agua contenida en ellos, aumentando con esto la capacidad de movilización de este.



Figura 85 (A, B, C y D): (A, B) Tanques de abastecimiento de agua dentro del cauce del río Agres, (C, D) otras estructuras asociadas a los tanques y bloques métricos. Coordenadas

6.1.2 Red vial

La afectación de la red vial se ha dado principalmente en el distrito de San Antonio, debido en su mayoría a deslizamientos que se reactivan en períodos de altas precipitaciones. Hasta la fecha la principal afectación que ha tenido la red vial es el cierre parcial en diferentes tramos a causa de la

obstrucción de material deslizado, como lo ocurrido el pasado 8 de agosto del 2012 cuando se reactivó en el sector de Filtros Rápidos una zona de inestabilidad reconocida en este trabajo, donde se dieron desplazamientos verticales mayores a 50 cm con el desprendimiento de la capa superficial del suelo, tal como se muestra en la figura 86 B.



Figura 86 (A y B): (A) deslizamiento en marzo 2011, **(B)** deslizamiento agosto 2012. Coordenadas 520847/209724

En este evento se produjo la obstrucción del camino y el alcantarillado sanitario, por un depósito de material, el cual por las intensas lluvias formó un flujo de lodo que anegó 6 viviendas localizadas a lo largo de la vía principal. En la figura 87, se muestra la dirección de movimiento del material removido que afectó la vía.



Figura 87: Material del deslizamiento que llegó hasta la calle, afectando la vía y el alcantarillado

Otro evento se dio en octubre del 2007, donde se presentó un deslizamiento en el sector del barrio El Curio (figura 88 A y B), coordenadas 521975/208800, en esa ocasión se observaron desplazamientos verticales de más de 2 m y se dieron agrietamientos importantes en la vía que pasa al norte del deslizamiento.



Figura 88 (A y B): (A) Desplazamientos verticales de hasta 2 metros, **(B)** Agrietamiento en la vía. Coordenadas 521975/208800

Fuera de la rehabilitación de la vía, en estos sitios no se ha realizado ninguna medida correctiva con respecto al movimiento del terreno. A pesar de que no se evidencia que haya mostrado nuevos movimientos, no se puede descartar que durante un evento meteorológico extraordinario se reactiven, provocando nuevamente daños en la calle.

Es importante resaltar que en estos dos sectores descritos como elementos en riesgo solo se han dado daños parciales en la vía, sin embargo un evento de mayor magnitud puede dañarla de manera completa, tal como lo ocurrido en el poblado de Lajas, donde un flujo de detritos destruyó por completo casas y calles.

Además otro elemento en riesgo que se debe mencionar ya que va ligado a la afectación de la red vial es el alcantarillado público (ejemplo en Filtros Rápidos), con lo cual se genera otro impacto, ya que aparte de la obstrucción de la vía, las aguas residuales y pluviales no serían evacuadas correctamente pudiendo agravar los daños materiales.

a. Puentes

Los puentes como parte de la red vial son estructuras que pueden verse dañadas o inclusive destruidas por las condiciones de inestabilidad del terreno que presentan algunos lugares del cantón de Escazú. Es por esto que se han identificado cauces por donde podrían transitar flujos de detritos, con lo que las estructuras (en este caso puentes) son elementos en riesgo por el daño que estos puedan provocarles.

Como se mencionó anteriormente los antecedentes de inestabilidad en la microcuenca del río Agres, convierten al cauce en una zona propensa por donde descieran flujos de detritos, por esto el puente ubicado en las coordenadas 522130/207940 es la primera estructura vial que se vería afectada por este tipo de evento. Por las dimensiones métricas que pueden tener los bloques movilizados en un eventual flujo, los daños a la estructura podrían llegar a inhabilitar el acceso por este, cortando el tránsito entre Calle Filtros y Calle Curio.

Igualmente el puente sobre el río Cruz en las coordenadas 520847/209760 en el sector de Filtros Rápidos representa un elemento en riesgo ya que aparte de la afectación indirecta del deslizamiento en esta área, también podría verse afectado por un flujo producto del material desprendido; al igual que el cauce del río Agres se han observado bloques métricos arriba del puente, lo que evidencia que ya ha bajado material de gran tamaño capaz de inhabilitar el tránsito por este puente (figura 89).



Figura 89: Vista de los bloques sobre el Río Cruz, aguas arriba del puente, en las coordenadas 520847/209760

6.1.3 Viviendas

La problemática de inestabilidad en el cantón de Escazú, es complicada ya que en algunos lugares no corresponde con un sitio en concreto si no con toda un área inestable que puede activarse por sectores a través del tiempo y como se ha visto en los antecedentes los eventos hidrometeorológicos han contralado la reactivación de la mayoría de estos sitios.

Principalmente para los distritos de Escazú y San Antonio, las medidas preventivas y paliativas utilizadas no han generado una solución satisfactoria para los pobladores, quienes han visto sus viviendas dañadas parcial o totalmente por causa de un deslizamiento o un flujo asociado a este; anudado a esto el desarrollo urbano desorganizado ha incrementado la vulnerabilidad al deslizamiento.

Como ejemplo de zonas que se encuentran dentro de grandes áreas de inestabilidad el sector de Palo Campana (522050/208040) donde se han reportado problemas de estabilidad desde 1998 durante el Huracán Mitch (com. oral Geól Geovani Peraldo), luego en 2003 se activaron de pequeños deslizamientos en el área, que afectaron a más de 20 viviendas ubicadas en el pie de la ladera (Bonilla, 2003) (figura 90).

Basados en el trabajo de campo y en la interpretación geomorfológica el sector de Palo Campana se ubica dentro de un gran área de inestabilidad, (deslizamiento Torrotillo), por lo que estos movimientos del terreno corresponden a la activación de áreas dentro de un depósito de deslizamiento, actualmente el área sigue inestable, como evidencia de esto hay presencia de grietas en la parte alta de ladera (figura 90 A), y las casas que se encuentran al pie de la ladera siguen teniendo problemas de agrietamientos (com. oral Geól Michelle Arias).

Las casas en este sector de Palo Campana las hemos identificado como elementos en riesgo ya que se han visto afectadas en el pasado por flujos de lodo, y además geográficamente se ubican al pie de una ladera que presenta evidencias de inestabilidad del terreno.



Figura 90 (A y B): (A) Grietas observadas en la parte alta del deslizamiento de Palo Campana.
(B) Viviendas ubicadas al pie de la ladera.

Otro sector dentro de esta gran área es el deslizamiento Salitrillos localizado en las coordenadas 522700/ 209150, se ha encontrado activo desde hace 5 años, su corona se encuentra en un constante retroceso (figura 91) y el material desprendido se ha depositado en la base del deslizamiento. Esos depósitos de material, durante las épocas lluviosas, son arrastrados por un afluente que discurre hacia la quebrada Herrera. En los años en que el deslizamiento ha estado activo, los flujos de lodo han descendido y afectado estas viviendas y la vía de acceso que se encuentran al pie de este deslizamiento (com. oral Geól Michelle Arias).



Figura 91: Grietas en la parte alta de la corona.
Coordenadas 522700/209150.

Es de suma importancia resaltar que el deslizamiento Salitrillos, empezó como una cárcava la cual se fue ampliando a lo largo de los años, hasta convertirse en el deslizamiento que encontramos actualmente.

El deslizamiento que afectó el barrio el Curio en octubre del 2007, además de generar problemas la red vial, un flujo de lodo encausado por la calle afectó a 12 viviendas ubicadas al noreste (figura 92). Actualmente el deslizamiento sigue en movimiento, provocando grietas en la calle; por estos indicios las viviendas de este sector que ya fueron afectadas representan un elemento en riesgo ante un nuevo flujo que las vuelva a dañar.



Figura 92: Área de influencia del deslizamiento El Curio. Coordenadas 521975/208800

Ciertos factores de carácter antrópico que hemos tomado en cuenta para determinar elementos en riesgo, han sido la construcción de viviendas en las zonas de protección de los ríos y el entubamiento de ríos y quebradas. Estas condiciones han provocado que la capacidad erosiva de los ríos aumente en periodos de altas precipitaciones.

Algunos ejemplos de esto se han dado en el cauce del río Agres, en setiembre del 2008 se originó un desprendimiento en una ladera del cauce que afectó el condominio Lomas de San Rafael (figura 93 A). También en el sector de San Rafael en noviembre de ese mismo año, en la margen izquierda del río Agres la erosión socavó parte del terreno poniendo en riesgo la vivienda (figura 93 B).

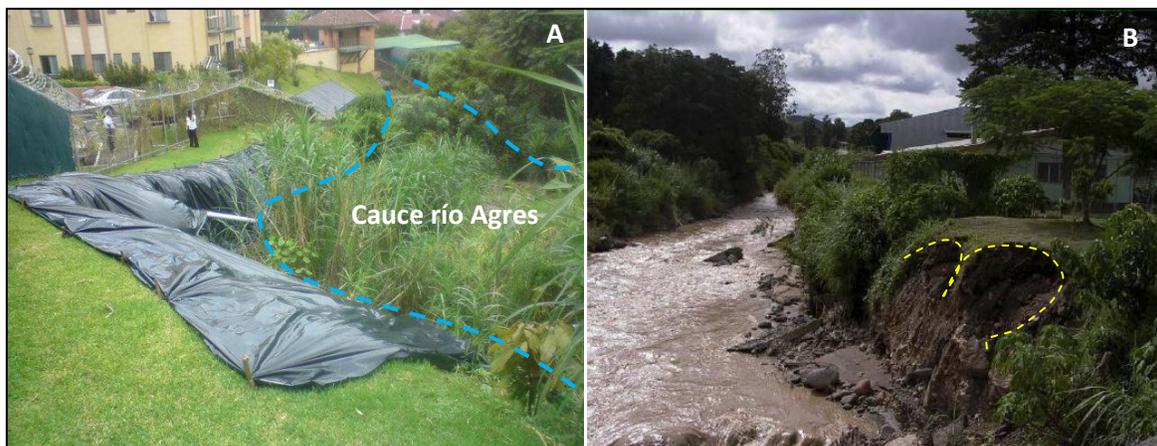


Figura 93 (A y B): (A) Erosión lateral del terreno (521300/212100) (Chaves,2008), (B) Erosión de la margen izquierda durante la época lluviosa (521342/212820) (Mendez,2008).

En julio del 2009 el terreno de una vivienda, ubicada en la margen izquierda del río Cruz 520851/210167, fue afectada por erosión fluvial como se muestra en la figura 94 A. Por el sector de San Antonio, en las coordenadas 520739/209910, el río Cruz ha erosionado un talud, afectando la parte trasera de una vivienda. El propietario construyó un muro en la margen izquierda del río para disminuir los efectos de la erosión, no obstante esta obra también se ha afectado (figura 94 B).



Figura 94 (A y B): (A) zona de desprendimiento cercana a muros de gaviones, coordenadas 520851/210167 (Barahona, 2007), **(B)** muro de concreto, coordenadas 520739/209910 (Chaves, 2011)

En las figuras 95 y 96 se muestran un esquema de los eventuales flujos que podrían descender por algunos cauces del cantón de Escazú, el ancho que muestran estos flujos se determinó con datos de campo, geomorfología y por información de algunos pobladores. Además en estas figuras se muestra la ubicación de ciertos elementos en riesgo descritos anteriormente.

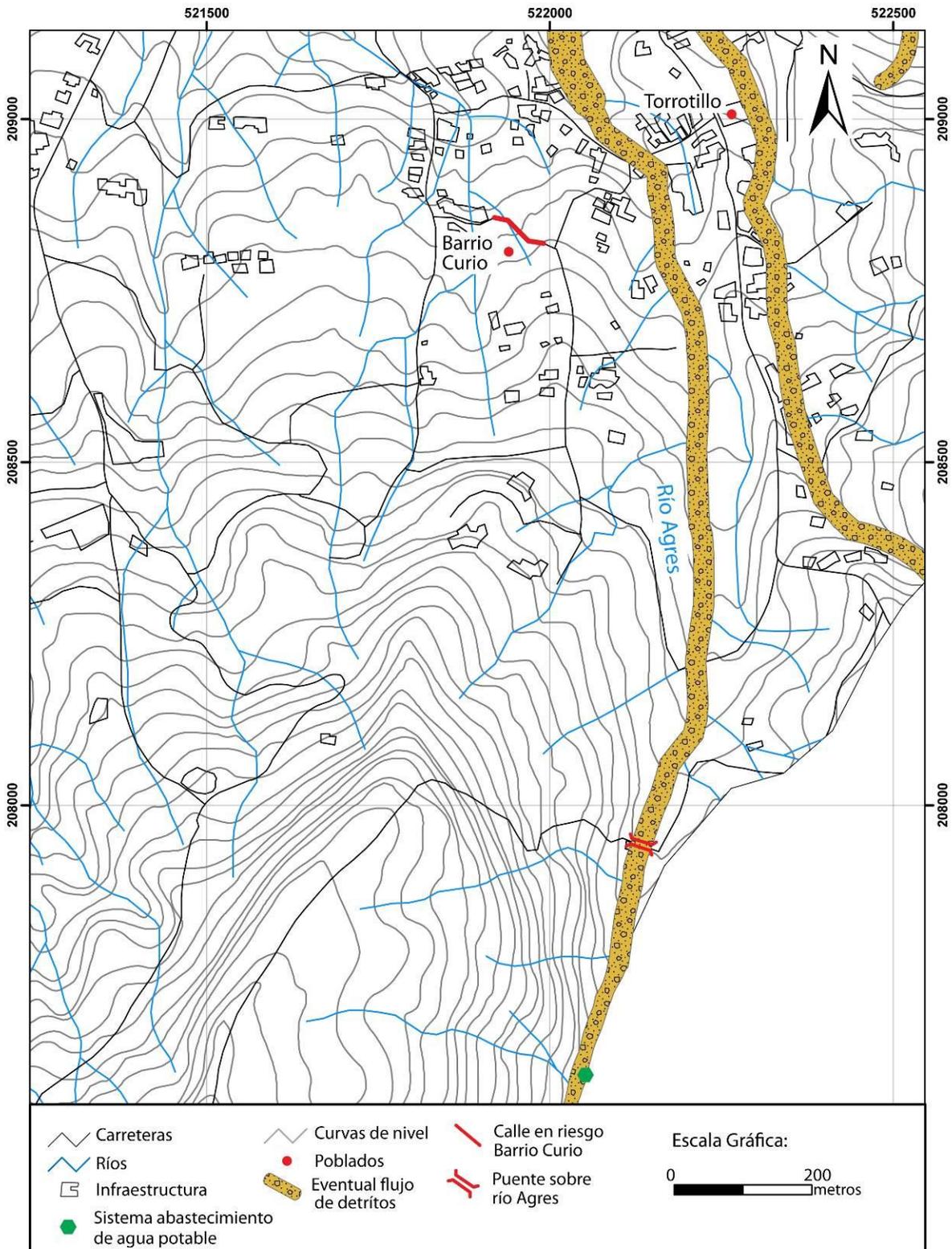


Figura 95: Ubicación de elementos en riesgo (red vial, sistemas de abastecimiento de agua potable) y eventual flujo por el cauce del río Agres.

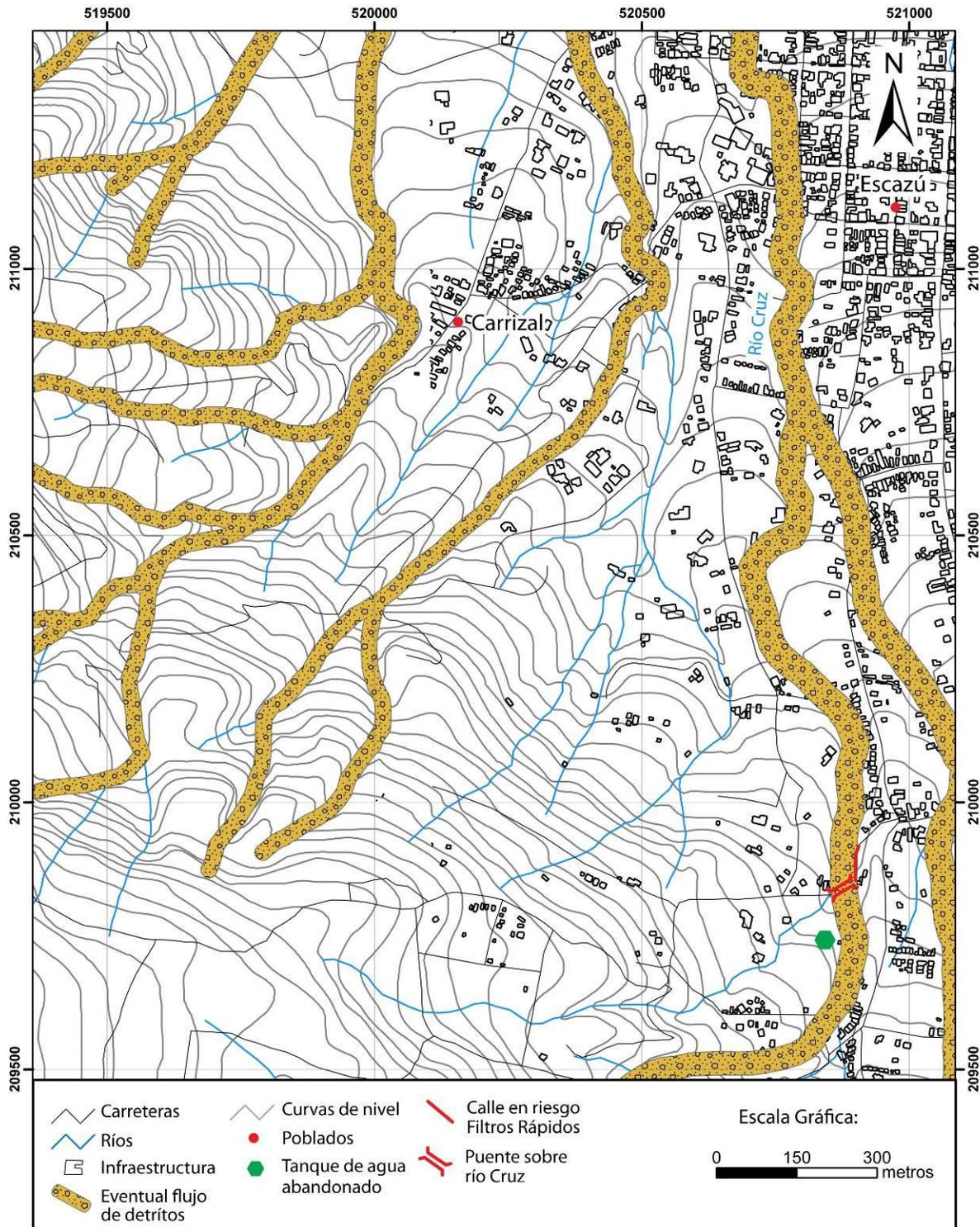


Figura 96: Recorrido de eventuales flujos por los cauces de las quebradas y ríos en una parte del sector suroeste del cantón de Escazú

7. EVOLUCIÓN ESPACIO TEMPORAL DEL CANTÓN DE ESCAZÚ

Para el desarrollo de éste capítulo se debe aclarar el concepto de desarrollo urbano, el cual hemos comprendido como la expansión y demanda de vivienda, industria y economía.

7.1 Distribución demográfica del cantón de Escazú

En los últimos 15 años el cantón de Escazú ha tenido un incremento abrupto del desarrollo urbano, principalmente en el distrito de San Rafael, a pesar de que en el distrito de San Antonio se concentra la mayor parte de la población, es en San Rafael donde las proyecciones indican un aumento de población para los próximos años, convirtiéndose así en una de las zonas de mayor plusvalía del país, esto como respuesta a que es una zona altamente comercial, lo que brinda grandes comodidades a la población y atrae a un proceso de construcción y venta de casas residenciales, torres de apartamentos y ofiencentros, principalmente.

En el cuadro 12, se detalla la distribución de la población en el cantón de Escazú, esto según los resultados del censo nacional realizado en el 2011 por el INEC, en donde se dividió el cantón en sus 3 distritos y se hace una diferenciación entre población urbana y rural. Siendo así, que el único distrito con población rural es San Antonio, el cual también, como se mencionó anteriormente, es el más poblado y el que posee la mayor área, 16,99 km², según PNUD (2008).

Por otra parte, el distrito de Escazú posee la menor población, lo que posiblemente obedece a su ubicación, geográficamente el centro del cantón, y como en él se encuentran muchos comercios pequeños, y el desarrollo urbano se ha ido dando hacia las periferias, además de que corresponde al distrito con menor área, 4,38 km² (PNUD, 2008).

Cuadro 12: Población total por distrito cantón de Escazú. Fuente INEC (2011).

Distrito	Total Población (personas)	Urbano	Rural
Escazú	11 984	11 984	-
San Antonio	22 554	22 143	411
San Rafael	21 971	21 971	-
Cantón Escazú	56 509	56 098	411

En la figura 97 se muestra la relación poblacional que existe entre los distritos del cantón de Escazú, basándose en la población total para cada distrito, tal y como se detalló en el cuadro 11.

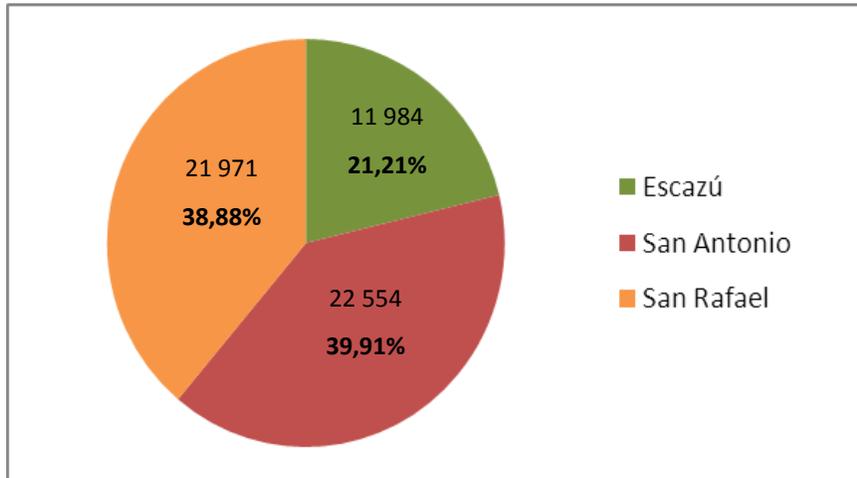


Figura 97: Distribución demográfica del cantón de Escazú, los datos señalados corresponden al número de habitantes y al porcentaje que estos representan para el cantón, distribuidos por distritos (INEC, 2011).

El cantón de Escazú posee un área de 34,39 km², siendo el distrito de Escazú el de menor área y en de San Antonio en de mayor, tal y como se mencionó anteriormente, las áreas por distrito corresponden a las siguientes: Escazú 4,30 km², San Rafael 13,02 km² y San Antonio 16,99 Km² (PNUD, 2008). En la figura 98 se hace una comparación de la distribución poblacional por el área de cada distrito, demostrándose que actualmente el número de población es proporcional al área que posee el distrito.

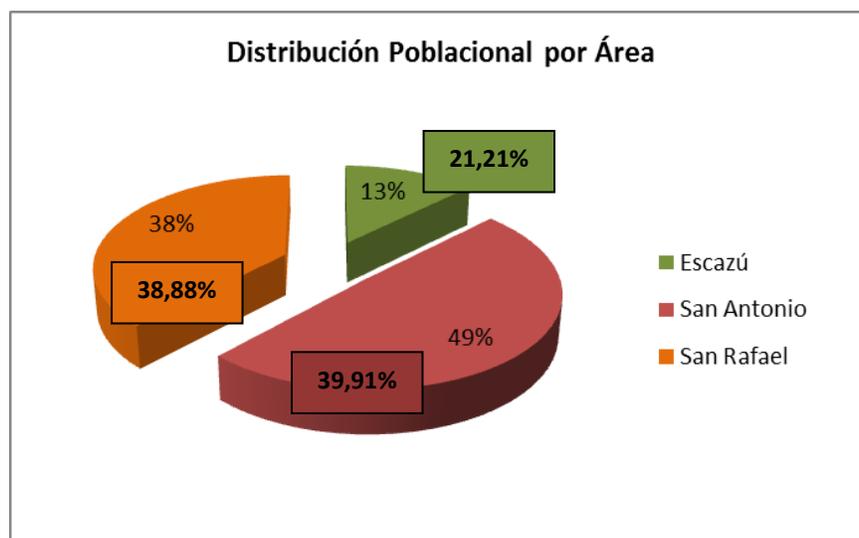


Figura 98: Distribución poblacional por área de distrito (los porcentajes en el recuadro corresponden al porcentaje de población). Fuentes INEC (2011) y PNUD (2008).

7.1.1 Proyecciones demográficas hasta el 2015 y su comportamiento en los últimos años

Según la información obtenida mediante los censos nacionales 2000 y 2011, el INEC realizó una proyección hasta el año 2015, del incremento o disminución, según sea el caso, de la población, esto realizado para cada distrito del país.

En el caso del cantón de Escazú se realizaron proyecciones de la población para los distritos de Escazú, San Rafael y San Antonio, así como también se ha visto el comportamiento demográfico desde el año 2000 hasta la fecha. Teniendo así, los resultados que se detallan a continuación:

a. *Distrito de Escazú*

Para el distrito de Escazú, cabecera del cantón, se observa un pequeño incremento de población en el año 2001 (figura 99), sin embargo hasta la fecha la población ha disminuido y se espera que este comportamiento continúe hasta el 2015, donde la población será menor a 12 000 personas.

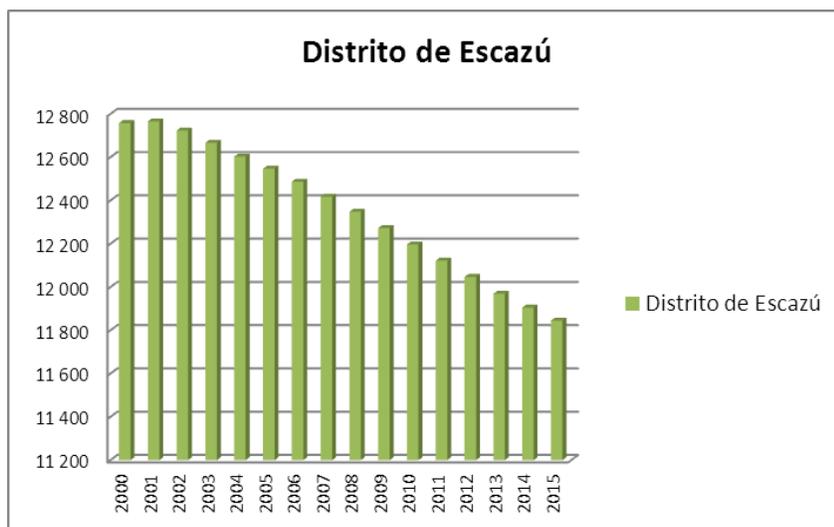


Figura 99: Comportamiento y proyección al 2015 de la población en el distrito de Escazú. Fuente INEC (2011).

b. *Distrito de San Rafael*

El distrito de San Rafael, representa el mayor crecimiento urbano del cantón. Para el año 2000 tenía una población inferior a los 20 000 habitantes (figura 100), a la fecha posee casi 25 000 habitantes y se espera que esta cifra sea superada para el año 2015. Sin embargo, se debe tener

claro que es una proyección y que según el censo 2011 su población corresponde a 21 971 personas, 583 personas por debajo del distrito de San Antonio.

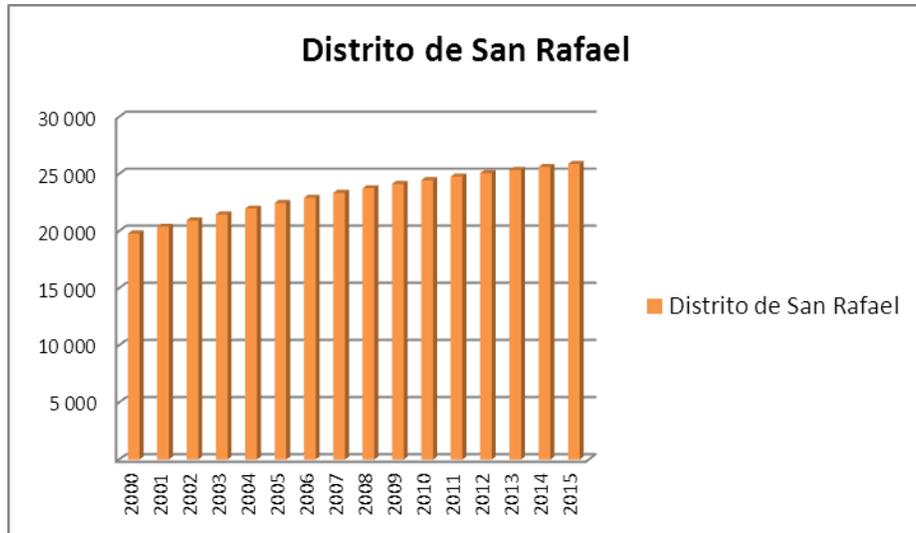


Figura 100: Comportamiento y proyección al 2015 de la población en el distrito de San Rafael. Fuente INEC (2011).

c. Distrito de San Antonio

El distrito de San Antonio, corresponde al distrito más grande en área del cantón, del año 2000 al 2011 tuvo un incremento en población (figura 101), llegando a superar los 24 000 habitantes. Se espera que para el 2015 este distrito posea una población cercana a los 25 000 habitantes, convirtiéndose en el segundo distrito, en cuanto a población se refiere, del cantón.

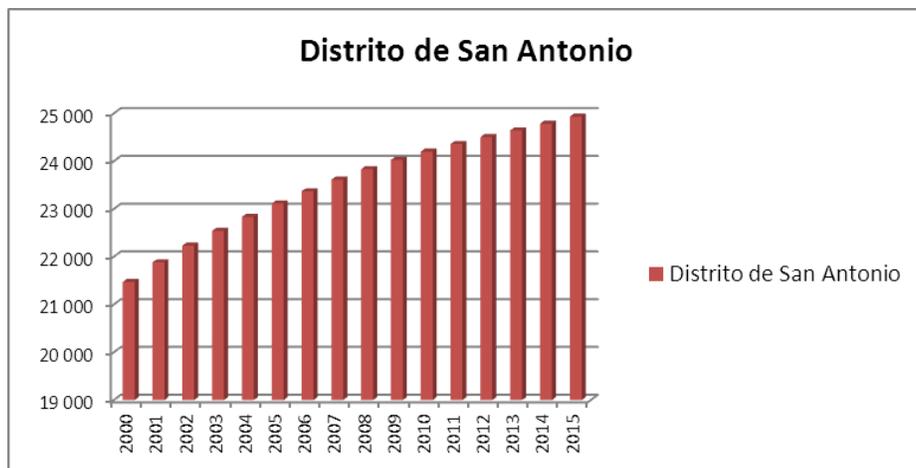


Figura 101: Comportamiento y proyección al 2015 de la población en el distrito de San Antonio. Fuentes INEC (2011).

Con base a todo lo anterior, se presume que la tendencia continuará. En cuanto a que el centro de Escazú tendrá una disminución de su población, esto debido al limitado espacio de construcción que queda tras el amplio desarrollo de pequeños comercios localizados en la parte central y alrededores de la iglesia de Escazú, además se observa un fenómeno de migración hacia las periferias del cantón donde si existe un acelerado desarrollo urbano e industrial, que a diferencia del centro, constituyen complejos industriales, grandes centros comerciales, desarrollo hospitalario, centros de entretenimiento, entre otros. Por lo que este fenómeno obedece a la comodidad y la poca restricción de área, siendo así como el distrito de San Rafael, en donde aún hay sitios por desarrollar, constituye la zona de mayor atracción y desarrollo poblacional.

El distrito de San Antonio, al ser el único con población rural, nos evidencia la zona de mayor arraigo cultural del cantón, por lo que es de esperar que su crecimiento urbano y desarrollo sea más limitado, aunque posea el área más extensa, es también la que posee el relieve más abrupto con las laderas de pendientes altas a muy altas, lo que también limita su crecimiento habitacional y comercial.

En la figura 102 se muestra, en resumen, los resultados de la proyección de la población para el cantón de Escazú.

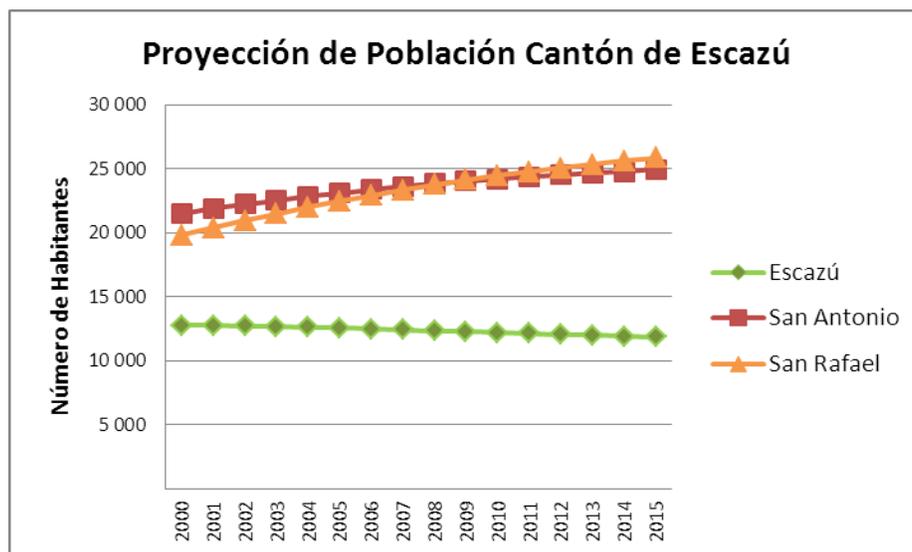


Figura 102: Comportamiento y proyección al 2015 de la población del cantón de Escazú. Fuente INEC (2011).

7.2 Desarrollo Urbano

Mediante la observación de las fotos aéreas de los años 1945, 1974, 1977 y 1998, se determinó la evolución urbana que el cantón ha tenido a lo largo de estos años. Dicha evolución se detalla a continuación:

Para el año 1945 la mayor concentración urbana se localizaba en el centro del cantón de Escazú, lo cual se consideró como el punto de partida de la expansión urbana, se observa como en el distrito de San Rafael predominaba la cobertura boscosa. Hacia el sur, distrito de San Antonio, se observa un bajo desarrollo urbano, sin embargo, ya estas laderas de alta pendiente se ven claramente parceladas.

Para este año, la densidad de construcciones en las cercanías de ríos es muy baja, sin embargo esta se ha ido incrementando con el paso del tiempo.

En 1977, se dio un desarrollo vial (caminos y puentes) en el centro del cantón, San Rafael, San Antonio y Bello Horizonte, además aparecen más estructuras de mayor tamaño y ya expandiéndose hacia estos otros distritos. Para estos años ya se reconoce la estructura del Costa Rica Country Club, ubicado en San Rafael de Escazú, y la cuál ha sido punto de referencia en las fotos aéreas analizadas (figura 103). En esta figura se muestra una comparación, principalmente en el desarrollo de la red vial, del año 1945 al año 1974.

El mayor desarrollo urbano se concentró al este del cantón, disminuyó la cobertura boscosa y predominan los potreros.

Lo que conocemos como la gran zona de desarrollo comercial de Escazú, que es Guachipelín y hacia el norte de Ayala, aún no se encontraba desarrollado para este año.

Ya para el año 1998 y hasta la fecha el cantón de Escazú ha vivido su mayor expansión y desarrollo urbano.

Actualmente la cobertura boscosa solo es observable en los Cerros de Escazú.

Analizando todas las fotos, se observa claramente como el principal desarrollo urbano del cantón de Escazú se ha dado hacia el este. Esto como una respuesta al desarrollo y la conexión que existe

con el centro de la capital. Además con el transcurso de los años la población ha migrado a aquellos territorios que aún no habían sido utilizados para la construcción.

En la figura 104, se muestra una comparación del desarrollo urbano y de la red vial, en el sector de mayor crecimiento del cantón, esta comparación se da entre los años 1977 a la fecha, donde el cambio es muy evidente.

Por último, y como ya se ha mencionado en el Capítulo VI, Consideraciones sobre Elementos en Riesgo, se tiene claro que la mayor cantidad de elementos en riesgo localizados fueron en el distrito de San Antonio, distrito que actualmente posee la mayor población, viéndose así afectados muchos ciudadanos por cualquier evento ya mencionado en el respectivo capítulo.

Además, mediante la aplicación del MV y MVM, se identificaron las áreas de mayor inestabilidad de laderas en el cantón, localizándose principalmente en el distrito de San Antonio. Por lo que se deberá tener un cuidado especial en el otorgamiento de permisos de construcción en este distrito, para el desarrollo y bienestar de la población.

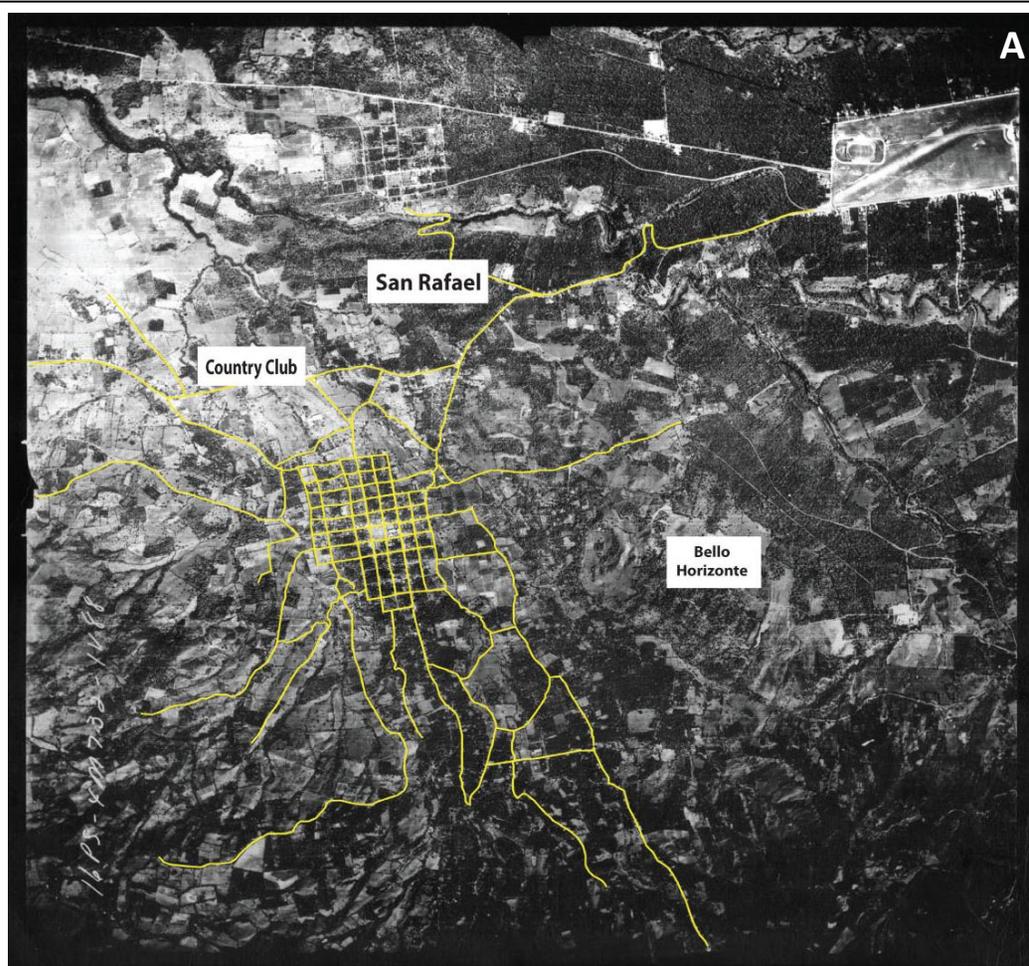


Foto Aérea, año 1945

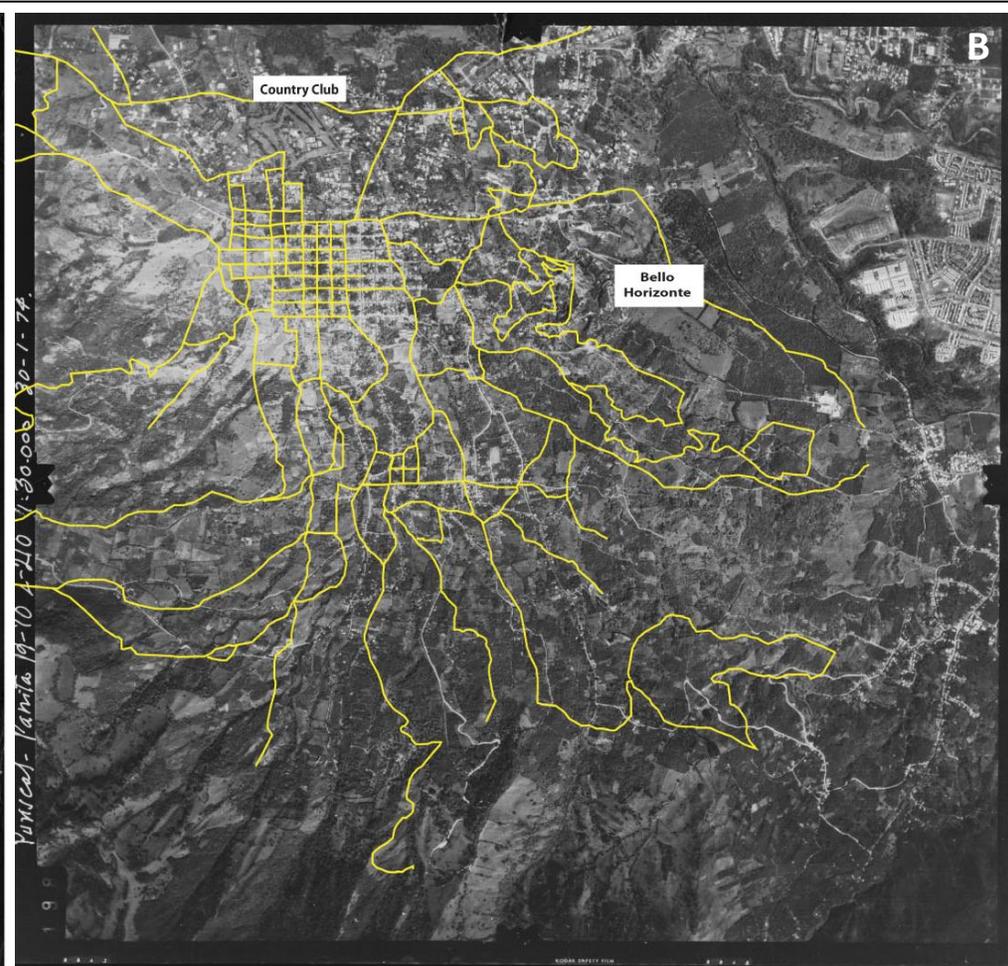


Foto Aérea, año 1974

Figura 103 (A y B): Desarrollo urbano en el cantón de Escazú, comparando el área de mayor crecimiento urbano, que es el distrito de San Rafael. **(A)** Se muestra San Rafael en el año 1945 **(B)** Cambio para el año 1974, principalmente en la red vial.



Foto Aérea, año 1977

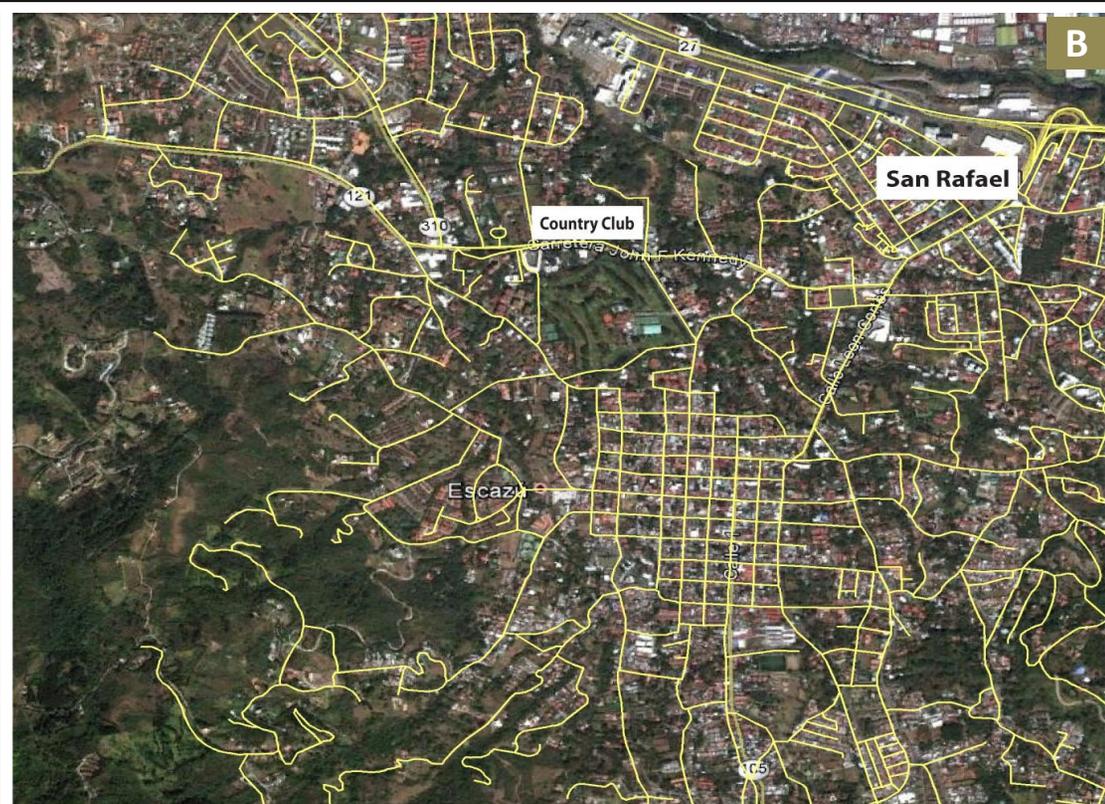


Imagen de Google Earth, versión beta 6.2, año 2012

Figura 104 (A y B): Desarrollo urbano en el cantón de Escazú, comparando el área de mayor crecimiento urbano, que es el distrito de San Rafael. (A) Foto aérea de 1977 (B) Cambio para el año 2012.

8. DISCUSIÓN DE RESULTADOS

El objetivo de este trabajo de investigación fue evaluar la susceptibilidad a la inestabilidad de las laderas en el cantón de Escazú y analizar a detalle los sectores de Palo Campana, Salitrillos, Curio y las microcuencas de los ríos Agres y Guayabos, con base en la caracterización geológica, geomorfológica y geotécnica de la zona, por lo tanto, a continuación discutimos los resultados obtenidos en cada área en la que se centró este estudio.

La corroboración de la geología permitió mejorar algunos límites entre formaciones, además de unificar la información bibliográfica que existe sobre la geología del cantón. Un punto importante a destacar es el límite difuso que hay entre la Formación Pacacua y los Depósitos aluviales y coluviales ya que estos últimos presentan en algunos sectores pequeños espesores (< 1 metro), en materia de deslizamientos es importante esta delimitación para establecer cuál es la unidad que se desliza, por lo tanto en función de la escala de trabajo se generalizó en ciertas partes la interpretación; situación que deberá mejorarse en estudios de mayor detalle.

Basados en la geología propuesta se realizó el muestreo de suelos por litología, donde se obtuvieron resultados altos en los valores de gravedad específica para todas las muestras, lo que sugiere que los suelos son susceptibles a que se den asentamientos, por lo que este dato es importante a tomar en cuenta como una variable más en los sitios de alta susceptibilidad de deslizamiento. Por otra parte la muestra A-6 sobresale con un valor muy alto en el contenido de humedad, con un 107,35%, probablemente esta irregularidad se da debido a que el área donde se tomó de la muestra, corresponde a un sector con basculamiento del terreno donde se da la formación de pequeñas lagunas; por lo que los suelos están sometidos a la constante saturación del terreno.

Al definir la geomorfología de la zona, se determinaron grandes áreas de inestabilidad ubicadas en laderas de altas pendientes. Dentro de ellas se observan zonas de depósitos y deslizamientos de menor tamaño. Con el análisis de las fotografías aéreas de diferentes años se interpretó que estas grandes áreas de deslizamiento no se dieron en un solo evento, sino que se formaron por pequeños eventos a lo largo del tiempo, por lo tanto estos terrenos son propensos a la activación de deslizamientos.

Cabe resaltar que el material desplazado en los deslizamientos corresponde a la capa de suelo residual, producto de la meteorización de la roca, lo que se relaciona con los resultados de las propiedades físicas de las muestras tomadas en el campo, anteriormente discutido, y así ser más propensos a deslizarse.

En un principio se había considerado el área de Bebedero como parte de un deslizamiento, tras analizarlo detalladamente, tanto en fotos aéreas como en el campo, se definió como un bloque basculado, ya que morfológicamente se comporta de forma muy distinta a los deslizamientos de Alto Granadilla y Alto Raicero, los cuales se localizan muy cerca. Por lo tanto planteamos como una hipótesis de investigación que el sector de Bebedero corresponde a un gran bloque que descendió por la ladera. Dentro del bloque donde la topografía es plano-ondulada no se ubicaron deslizamientos menores, sin embargo como límite del bloque se encuentra la corona del deslizamiento Alto Granadilla, lo que sugiere que los bordes se mantienen en constante erosión y propensos a presentar inestabilidad.

Por otra parte, con la utilización de la metodología Mora – Vahrson (1992) y dos adaptaciones de este método hechas por Mora *et al.* 2002 y Camacho *et al.* 2004 para evaluar la susceptibilidad al deslizamiento del cantón de Escazú, se determinó que la mayor influencia la ejerce el factor de la pendiente, mostrando sectores de muy alta susceptibilidad principalmente donde la pendiente es mayor, sin embargo lo observado en el campo muestra que no todas las zonas de muy alta pendiente presentan problemas de inestabilidad, hay zonas de pendiente moderada que poseen grandes problemas por deslizamientos, lo que se debe tener en cuenta a la hora de efectuar planes reguladores en el cantón, así como para otorgar los permisos de construcción, ya que los mapas generados no exoneran la importancia de la valoración en el campo, simplemente nos da una idea general del comportamiento de las laderas y suelos del cantón.

Además los cálculos de estas metodologías se vieron condicionadas por la falta de variación en los parámetros de disparo por lluvia, disparo por sismo y el de humedad, que hacen constantes sus valores para el área de estudio; por lo que la variación en las metodologías fue regida por los parámetros de susceptibilidad litológica, geomorfológica, el parámetro del relieve relativo y el de la pendiente. La variación de la metodología Mora - Vahrson – Mora utilizando el parámetro de susceptibilidad geomorfológica en sustitución del parámetro litológico, redundó el factor de la “pendiente”, debido a que gran parte de las unidades geomorfológicas son clasificadas de acuerdo

al valor de esta. Esto genera un sesgo en los valores de susceptibilidad muy alta, ya que la mayoría se concentra en las zonas de alta a muy alta pendiente.

Otro punto importante de discusión, son las formas de origen fluvial, ya que los principales valles fluviales se caracterizan por nacer de manera encañonada con laderas de altas pendientes en sus márgenes, las cuales son propensas a desprendimientos de material lo que podría generar flujos de lodos y/o detritos que transiten por estos cauces; se debe tener presente que este tipo de eventos ya han causado daños materiales y humanos en el cantón. Debido a que estos ríos atraviesan poblados importantes en donde el aumento poblacional y el desarrollo urbano desordenado han inducido las construcciones en las márgenes de los ríos, sin respetar si quiera la Ley Forestal, en donde se establece un retiro mínimo de 10 m, los posibles daños ocasionados por un flujo se incrementen poniendo en peligro la infraestructura y la integridad física de las personas.

En cuanto a la quebrada Lajas y al evento ocurrido en el 2010, durante la visita de campo, se confirmó que el flujo incorporó gran cantidad de material depositado por eventos anteriores dentro del cauce. Los depósitos de material que se encuentren a lo largo de un cauce producen, que en un eventual flujo todo este material sea incorporado, aumentando así el poder destructivo de este; los cauces de los ríos Cruz y Agres presentan material rocoso de gran tamaño (bloques métricos) así como depósitos de material producto de deslizamientos en las laderas de los valles, condiciones que aumentarían la capacidad destructiva durante el tránsito del flujo.

Por lo tanto, al tener el antecedente de lo ocurrido en quebrada Lajas, y ver como los ríos y quebradas que nacen de los cerros de Escazú presenten características morfológicas similares, se considera que este tipo de eventos puede ocurrir en ellos; las observación y visitas constantes a estos cauces son de vital importancia, con el fin de identificar si hay obstrucciones en los cauces o desprendimientos de laderas, que aporten una cantidad de material considerable. Es por esta razón también que se han identificado elementos en riesgo que se podrían ver afectados por la posible generación de flujos, como lo es la red vial, viviendas y sistemas de abastecimiento de agua potable.

Por último, la mayor cantidad de elementos en riesgo fueron identificados en el distrito de San Antonio, distrito que actualmente posee la mayor cantidad población, sumado a esto las áreas de

mayor inestabilidad de laderas en el cantón, se localizan también en San Antonio, por lo que se deberá tener un cuidado especial en el otorgamiento de permisos de construcción en este distrito, para el desarrollo y bienestar de la población.

Sin embargo, el mayor desarrollo urbano, industrial y comercial se está dando en el distrito de San Rafael, lo cual se confirma con las predicciones del INEC hacia el 2015, en donde la mayor concentración de población será en este distrito, esto como respuesta a que es una zona altamente comercial, lo que brinda grandes comodidades a la población y atrae a un proceso de construcción y venta de casas residenciales, torres de apartamentos y oficentros, principalmente.

Por todo lo anteriormente discutido, es de suma importancia que este trabajo sea tomado en cuando en la toma de decisiones del ordenamiento territorial del cantón así como un insumo para el Plan Regulador, con el fin de minimizar el riesgo a eventos que puedan afectar la infraestructura y la integridad humana, y no incidir en el aumento de elementos en riesgo.

9. CONCLUSIONES

La geología del cantón de Escazú está representada por litologías que abarcan una edad desde el Mioceno inferior hasta depósitos recientes. Las Formaciones presentes son Pacacua, Peña Negra, Intrusivo y Cornubianitas de Escazú, Grifo Alto, Lavas Intracañón, Avalancha Ardiente, Lahares y Cenizas y Depósitos aluviales y coluviales.

Para el área de estudio, se definieron 12 unidades geomorfológicas. Las unidades de mayor cobertura corresponden a las unidades de origen denudacional, con un 93,56 % del área total, un 4,76% para unidades de origen estructural y 2,12 % para las unidades de origen fluvial.

Las laderas de alta a muy alta pendiente se ubican al sur del cantón y están conformadas principalmente por los Intrusivos y Cornubianitas de Escazú, los cuales por su dureza ayudan a que la topografía sea muy empinada. La parte central del cantón está dominada por laderas de pendiente moderada, las cuales son conformadas, en mayor parte, por la Fm. Pacacua. El centro de Escazú presenta laderas de pendiente media a baja, lo que favorece su desarrollo urbano. Las laderas de menor pendiente se localizan al norte del cantón, limitando con el río Tiribí, la topografía, de estas laderas, casi plana se debe a que los depósitos de Avalancha Ardiente modificaron la topografía original de la zona.

Debido a la morfología sobresaliente del sector de Bebedero, se consideró este sector como un bloque basculado, que ha descendido por la ladera dejando un escarpe en su parte posterior, presentado un basculamiento hacia el sur.

Dentro de las formas de origen estructural, que rigen el cantón, se identificaron filas, cerros aislados y facetamiento. La fila se localiza en la parte este del cantón, en Bello Horizonte, como parte de la traza de la falla homónima por lo que corresponde a una evidencia geomorfológica de esta falla de componente inverso, lo que podría explicar el levantamiento de la fila. Los cerros aislados se ubican al oeste del cantón y el más grande es el conocido como Alto Las Palomas, estos cerros pueden estar asociados a la falla de Escazú. Los facetamientos se observaron, en las fotos aéreas de los años 1945 y 1977, en las trazas de las fallas de Bello Horizonte y Escazú.

Los ríos que nacen en las partes altas del cantón de Escazú presentan como característica común en sus valles desprendimientos de laderas, así como caída de bloques de tamaños decimétricos a métricos; favoreciendo la generación de flujos durante eventos hidrometeorológicos.

Se determinaron 6 clases de suelo en el cantón del Escazú, tanto por los muestreos realizados en campo como por los datos obtenidos de otros trabajos. Estos corresponden a Arcillas de plasticidad intermedia (CL), Limos elásticos de plasticidad Alta (MH), siendo estos los dos tipos de suelos predominantes en el cantón. Seguidamente se encontraron arcillas gruesas de plasticidad muy alta (CH), arenas arcillosas de baja plasticidad (SC), grava arcillosa de plasticidad alta (GC) y mezcla de arena y limo (SW).

Todas las muestras presentaron datos similares en las propiedades físicas del suelo, excepto la muestra A-6 considerada como el dato más irregular del trabajo, debido a que presenta un mayor contenido de humedad correspondiente a 107.35%, alto valor en porosidad 75.8 %, mayor relación de vacíos 3.12, límite líquido alto 94% y un límite elástico de 63%. Esta irregularidad se asocia a las condiciones morfológicas del lugar correspondiente a una zona donde se presenta basculamientos del terreno que permiten formar pequeñas lagunas y mantener con cierto grado de humedad constante los suelos.

Al descubrir todas las muestras con altos valores de gravedad específica y relación de vacíos, y que estos datos sean característicos de suelos limo-arcillosos como los encontradas en la zona, puede favorecer a que los suelos sean más propensos a deslizarse, sin embargo requieren también de otros disparadores para que esto suceda.

Respecto a las metodologías utilizadas para modelizar la susceptibilidad al deslizamiento, la que mejor se asemeja a la realidad del cantón, ha sido la metodología Mora - Vahrson – Mora, ya que ha mostrado un alto valor de susceptibilidad en las zonas donde existe problemas de inestabilidad ó indicios de movimiento del terreno, además no todas las zonas de pendiente alta fueron clasificadas como de muy alta susceptibilidad, situación que se observó en el campo, donde en zonas de muy alta pendiente no se ha mostrado evidencias morfológicas de inestabilidad de laderas.

Las metodologías de evaluación de la susceptibilidad al deslizamiento utilizadas, coinciden en que las áreas de mayor susceptibilidad se encuentran en las zonas de los cerros de Escazú, Torrotillo,

Alto Raicero, Alto Granadilla, Alto el Tajo. En la mayoría de estos sectores se han definido grandes áreas de inestabilidad, lo que coincide con los resultados de la susceptibilidad. También estas metodologías muestran áreas de alta susceptibilidad en lugares donde no se han presentado ni hay indicios de inestabilidad del terreno.

Se describieron 29 deslizamientos, de los cuales 17 corresponden a los observados a lo largo de toda el área de estudio, 7 de ellos fueron observados en foto aérea, pero que en el campo no pudieron ser determinados; y 4 grandes deslizamientos correspondientes con los sitios conocidos como Alto Granadilla, Alto Raicero, Alto El Tajo y Torrotillo.

Según la identificación de deslizamientos a lo largo de todo el cantón, la unidad geológica Depósitos aluviales y coluviales y la Fm. Pacacua son las que presentan mayores problemas de inestabilidad. Por otra parte, las formaciones Grifo Alto, Lavas Intracañón y Lahares y cenizas, corresponden a las unidades geológicas que muestran menos problemas de inestabilidad.

Se determinó que en la mayoría de los deslizamientos identificados lo que se mueve son las capas superficiales de suelo y los mismos se generan en pendientes moderadas y altas. Los deslizamientos que están en pendientes bajas corresponden a deslizamiento del tipo rotacional.

Los sistemas de abastecimiento de agua potable, ubicados sobre el cauce del río Agres y en el sector de Filtros Rápidos, representan un elemento complejo en riesgo, debido a que un eventual flujo que los dañe parcial o totalmente, puede generar que estas estructuras o el agua contenida en ellas se incorporen al flujo y se conviertan así en factores de riesgo.

La red vial, principalmente en el distrito de San Antonio, ha sido afectada por problemas de inestabilidad que provocan el cierre parcial o total de la vía. Los elementos específicos donde se determinó la condición de riesgo, se encuentran en el barrio Curio, Filtros Rápidos y Torrotillo.

En los últimos 15 años el cantón de Escazú ha estado en un constante incremento poblacional y estructural. Los distritos de San Rafael y San Antonio, proyectan un aumento de población para los próximos años.

Actualmente, la mayor población urbana se concentra en el distrito de San Antonio, siendo el único que presenta ambos tipos de población rural y urbana; con 411 habitantes de zona rural y

22 143 habitante zona urbana. Los dos restantes distritos presentan población urbana, siendo para el distrito de San Rafael con 21 971 habitantes y Escazú con 119 894 habitantes.

A partir de los años 70 se empezó a dar el mayor desarrollo urbano en el cantón de Escazú, este comenzó a darse en la parte central cantón hacia las periferias, pasando de rural a urbano. A partir de 1977, el mayor desarrollo urbano se da hacia el este y norte del cantón, lo que se conoce como la gran zona de desarrollo comercial de Escazú, que es Guachipelin y Ayala.

10. RECOMENDACIONES

Los resultados obtenidos con los mapas de susceptibilidad al deslizamiento mediante el método Mora-Varhson-Mora (2002) y la modificación de Camacho *et al.* (2004) son una herramienta complementaria para definir los sitios donde será necesario realizar estudios puntuales de estabilidad para el otorgamiento de futuros permisos de construcción a lo largo de todo el cantón.

La información brindada en este trabajo no exonera la necesidad de ir al campo a la hora de la evaluación de proyectos de desarrollo y construcciones.

Se deberán tomar medidas de prevención con respecto a los elementos en riesgo identificados, para disminuir su vulnerabilidad. Así como también se recomienda un estudio complementario de vulnerabilidad y riesgo, evaluando la peligrosidad de todos los elementos en riesgo del cantón.

Con respecto a los tanques de abastecimiento de agua que se encuentran en desuso y dentro o cerca de los cauces es conveniente removerlos para evitar cualquier incremento en el flujo y daños que se puedan generar en ellos y aguas abajo, poniendo en peligro a las comunidades ubicadas dentro de dichos cauces.

En cuanto al tanque que se localiza dentro del cauce del río Agres, se deberá valorar la posibilidad de trasladarlo, ya que se encuentra en una zona de alto riesgo, donde se conocen antecedentes de flujos importantes, cualquier daño a esta estructura podría afectar el suministro de agua potable a un sector de la población de San Antonio.

Es importante realizar una vigilancia constante a los deslizamientos que han mostrado actividad reciente, detectar movimiento, aparición de nuevas grietas, daños en infraestructura; esto con el fin de poder realizar las medidas correctivas a tiempo y prohibir la construcción irresponsable en lugares donde el peligro sea inminente.

Se deberán generar campañas de información y de educación a los habitantes de las áreas de inestabilidad identificadas, como en Palo Campana y Salitrillo, con relación a la problemática que dichos procesos de inestabilidad generan en sus comunidades, para que se organicen y trabajen de manera efectiva en la gestión integral del riesgo, junto con la municipalidad y la CNE.

Debido a que el problema de erosión lateral es recurrente a lo largo de la mayoría de los ríos del cantón, se deben controlar y hasta prohibir, según sea el caso, ampliaciones y nuevas construcciones dentro de las zonas de protección, a excepción de obras civiles que sirvan para prevenir o mitigar los daños ya existentes.

Es conveniente realizar trabajos de limpieza oportunamente en los cauces de los ríos y quebradas que drenan el sector central de Escazú, esto para mitigar los efectos de inundación y de erosión que se pueden dar en la época lluviosa.

Según lo analizado con respecto a la tendencia de crecimiento de la población en el cantón y sumado a los resultados de zonas de vulnerabilidad de deslizamientos, se sugiere que el desarrollo urbano ocurra principalmente en el distrito de San Rafael.

En el distrito de San Antonio es donde se identificó la mayor parte de zonas de inestabilidad, por lo que se deberá ser más estricto en cuanto al desarrollo de infraestructura, solicitando estudios detallados de suelos y estabilidad de taludes, para el otorgamiento de permisos de construcción.

Es trascendental estar consciente de los riesgos existentes en las comunidades, por lo que se recomienda que las autoridades locales realicen una campaña de información a la población de las zonas vulnerables y así los habitantes tomen las medidas preventivas correspondientes.

11. REFERENCIAS

- ALVARADO, G., ARCE, R. & SÁNCHEZ, J.M., 2002: La Caída de grandes bloques y la generación de debris flows y su peligro implícito en los sectores residenciales de Escazú y Santa Ana. VIII Seminario Nacional de Geotecnia. III Encuentro Centroamericano de Geotecnistas, Costa Rica.
- ARIAS, O. & DENYER, P., 1991: Estructura geológica de la región comprendida en las hojas topográficas Abra, Carraigres, Candelaria y Río Grande. – Rev. Geól. Amér. Central (12): 57-136.
- ARIAS, M., FUENTES, O. & FALLAS, J., 2011: Criterios utilizados para la microzonificación de la microcuenca Lajas, Cantón de Escazú, Costa Rica.- Rev. En Torno a la Prevención CNE (7):1-7.
- BARAHONA, D. 2009: Evaluación por erosión fluvial y desprendimientos asociados en propiedad ubicada en la margen izquierda del río Cruz. DPM-INF-1202-2009. -5 págs. CNE, San José.
- BERRANGÉ, J. P., 1977: Reconnaissance geology of the Tapanti quadrangle Talamanca Cordillera.- 72 págs. Inst. of Geological sciences, Overseas Division, report. No. 37, London.
- BONILLA, E., 2003: Inspección a varios deslizamientos en el distrito de San Antonio, Escazú. DPM-INF-059-2003. -6 págs. CNE, San José.
- CASTILLO M., 1969: Aspectos de geología económica de las hojas Abra y Río Grande.- Inf. Tec. Notas Geol. MEIC 6 (8), 14 p.
- CHAVES, I. 2007: Valoración de estado de Amenaza por deslizamiento activo en el Barrio Curio. DPM-INF-1655-2007. -5 págs. CNE, San José.
- CHAVES, I. 2008: Valoración de riesgo por erosión lateral y derrumbes en condominios Loma de San Rafael. DPM-INF-1519-2008. -4 págs. CNE, San José.
- CHAVES, I. 2011: Valoración de riesgo de vivienda en San Antonio por erosión lateral del río Cruz. DPM-INF-0588-2011. -4 págs. CNE, San José.
- CHAPMAN, L. & THORNES, J., 2003: The use of geographical information system in climatology and meteorology.- 24 págs. Univ. of Birmingham, Reino Unido.
- DENYER, P. & ARIAS, O., 1991: Estratigrafía de la región central de Costa Rica. – Rev. Geól. Amér. Central (12): 1-59.
- DENYER, P., MONTERO W. & ALVARADO G., (2009): Atlas Tectónico de Costa Rica. 58 págs. 2 ed. Edit. UCR. San José.

- DONDOLI, C., 1970: Nota informativa para la Municipalidad de Escazú sobre las fuentes de alimentación de la cañería del lugar.- Inf. Téc. Notas Geól. MEIC (40): 15-16.
- ECHANDI, E., 1981: Unidades volcánicas de la vertiente norte de la cuenca del río Virilla.- 123 págs. Univ. de Costa Rica, San José [Tesis Lic.].
- EIRD, 2008: La Gestión del Riesgo de Desastres de Hoy. El Ordenamiento Territorial: Una Herramienta para la Gestión del Riesgo. Capítulo 11. EIRD Estrategia internacional para la Reducción de Desastres.- http://bvpad.indeci.gob.pe/doc/cds/CD_eird2008/index.html
- EYSSAUTIER, M., 2002: Metodología de la investigación. Desarrollo de la Inteligencia. Ed. Thomson. México.
- FERNÁNDEZ, M., 1969: Las unidades hidrogeológicas y los manantiales de la vertiente N de la cuenca del río Virilla.- Investigación de aguas subterráneas en CR Inf. Téc. 27, 56 p., CR.
- FERNÁNDEZ, M., & MONTERO, W., 2002: Fallamiento y sismicidad entre Cartago y San José. –Rev. Geól. Amér. Centr., 26: 25-37.
- FLORES, R., SALAS, J., ASTORGA.,M., & RIVERA, J., 2010: El Impacto Económico de los Eventos Naturales y Antrópicos Extremos en Costa Rica. 1988-2009, MIDEPLAN.
- GONZÁLEZ, C., 1910: Temblores, terremotos, inundaciones y erupciones volcánicas en Costa Rica, 1608-1910.-200 págs. Univ. de Costa Rica, San José.
- GONZÁLEZ DE VALLEJO, L., FERRER, M., ORTUÑO, L. & OTEO, C., 2002: Ingeniería Geológica. - 744 págs PEARSON EDUCACIÓN, Madrid, España.
- GOOGLE EARTH, versión 6.0.2 (beta) (20 de Abril 2012), fecha de última consulta: 29 de agosto, 2012, URL: <http://earth.google.com/>.
- HERNÁNDEZ, J. & VARGAS, A., 1992: Geología urbana del cantón de Escazú provincia San José Costa Rica.- 173 págs. Univ. de Costa Rica, San José [Inf. Campaña Geol.].
- HOJA CARTOGRÁFICA ABRA, escala 1:50.000, Instituto Geográfico Nacional (IGN).
- INEC. (n.d.). Censo 2011 y Proyecciones. Obtenida 28 de setiembre 2012.- <http://www.inec.go.cr/Web/Home/GeneradorPagina.aspx>
- MADRIGAL, J., 2004: Problemática por deslizamiento en la parte alta de la microcuenca superior del río Agres-San Rafael. DPM-INF-349-2004.-21 págs. CNE, San José.
- MADRIGAL, R. & ROJAS, E., 1980: Manual Descriptivo del Mapa Geomorfológico de Costa Rica (escala 1 : 200 000) .- 79 págs. Imprenta Nacional, San José.
- MENDEZ, J. 2008: Evaluación de riesgo por desbordamiento del río Agres. DPM-INF-1464-2008. -6 págs. CNE, San José.

- MOLINA, F., 1990: Deslizamiento del Alto de Tapezco Santa Ana, provincia San José, Costa Rica.- 100 págs. Univ. de Costa Rica, San José [Inf. Campaña Geol.].
- MONTERO, W., 2001: Neotectónica de la región central de Costa Rica: Frontera oeste de la microplaca de Panamá. -Rev. Geól. Amer. Centr., 24: 29-56.
- MONTERO, W., BARAHONA, M., ROJAS, W., & TAYLOR, M., 2005: Los sistemas de falla Agua Caliente y Río Azul y rellenos compresivos asociados, Valle Central de Costa Rica. -Rev. Amér. Centr., 33: 7-27.
- MORA, R., 1993: Proyecto de Geología Urbana del Gran Área Metropolitana Cantón Escazú.- 73 págs. Univ. de Costa Rica, San José [Inf. Interno].
- MORA, R., VAHRSON, W. & MORA, S., 1992: Mapa de Amenaza de Deslizamientos, Valle Central, Costa Rica. Centro de Coordinación para la Prevención de Desastres Naturales en América Central (CEPREDENAC).
- Mora, R., Chaves, J. & Vázquez, M., 2002: Zonificación de la susceptibilidad al deslizamiento: Resultados obtenidos para la Península de Papagayo mediante la modificación del método Mora-Vahrson (Mora, R., Vahrson & Mora, S., 1992).- 12 págs. Univ. de Costa Rica, San José [Inf. Interno].
- MORA, R., 2004: Evaluación de la susceptibilidad al deslizamiento del cantón de San José, provincia de San José, Costa Rica.- 17 págs. Univ. de Costa Rica, San José [Inf. Interno].
- MUÑOZ, C., 1998: Como elaborar y asesorar una investigación de tesis. Ed. Prentice – Hall. Mexico.
- OBANDO, L.G., 1983: Estratigrafía y petrografía de las rocas aflorantes al sur del Valle Central (Tarbaca).- 136 págs. Univ. de Costa Rica, San José [Tesis Lic.].
- PERALDO, G. & ASTORGA, A., 2000: Reducción del proceso de desastre.- En: Denyer, P. & Kussmaul, S. (eds.): Geología de Costa Rica.-Ed. Tecnológica de Costa Rica, 241-249.
- PERALDO, G., & MONTERO, W., 1999: Sismología histórica de América Central.- 347 págs. Instituto Panamericano de Geografía e Historia, Publ. No. 513, México D.F.
- PERALDO, G., & MONTERO, W., 2007: Temblores documentados para el periodo colonial de Costa Rica.-Rev. Amér. Centr., 36: 25-47 pp.
- PERALDO, G., & ROJAS, E., 2000: Catálogo de deslizamientos históricos para Costa Rica, periodo 1772-1960. -Inf. Sem. IGN, 2000 (1 y 2): 123-171 pp.
- Programa de las Naciones Unidas para el Desarrollo., 2008: Diagnósticos sobre seguridad ciudadana en diez cantones de Costa Rica: Escazú / Programa de las Naciones Unidas para

el Desarrollo -- 1a ed. -- San José, Costa Rica: Programa de las Naciones Unidas para el Desarrollo, PNUD.

RIVIER, F., 1979: Geología del área norte de los Cerros de Escazú, Cordillera de Talamanca, Costa Rica.- Inf. Sem. IGN, 1972(1): 99-132.

RSN., 2012: Informe de Sismo Sentido, 5 de setiembre del 2012, 8:42 am.- <http://www.rsn.ucr.ac.cr/index.php/en/ultimos-sismos/103-sismo-sentido-5-de-setiembre-del-2012-842-am> [Consulta 13 de noviembre 2012]

SENARA & BGS, 1985: Mapa hidrogeológico del Valle Central de CR.-SENARA-BGS (1:50000), Gran Bretaña.

VAN ZUIDAM, R. A., 1986: Aerial photo-interpretation in terrain analysis and geomorphologic mapping. Smits Publishers, The Hague. 442 p.

APÉNDICE