

Universidad de Costa Rica
Facultad de Ciencias
Escuela Centroamericana de Geología

Proyecto de Graduación para optar por el grado de Licenciatura en Geología

**CARACTERIZACIÓN DE LOS COMPONENTES GEOLÓGICOS PARA
EL RE-ORDENAMIENTO TERRITORIAL EN LA RUTA NACIONAL NO.
35 EN EL TRAMO ENTRE LOS POBLADOS DE SIFÓN Y LA
ABUNDANCIA.**

Realizado por:

C. Amalia Gutiérrez Secretan

San José, Costa Rica

2019

Universidad de Costa Rica
Facultad de Ciencias
Escuela Centroamericana de Geología

**CARACTERIZACIÓN DE LOS COMPONENTES GEOLÓGICOS PARA EL RE-
ORDENAMIENTO TERRITORIAL EN LA RUTA NACIONAL NO. 35 EN EL TRAMO
ENTRE LOS POBLADOS DE SIFÓN Y LA ABUNDANCIA.**

Por: Carlota Amalia Gutiérrez Secretan

Hoja de Aprobación

TRIBUNAL EXAMINADOR


Dr. Paulo Ruiz Cubillo
Director


M.Sc. Elena Badilla Coto
Lectora


Ing. Ronald Naranjo Ureña
Lector


Lic. Andrés Ulloa Carmiol
Miembro del Tribunal


Dr. Javier Trejos Zelaya
Decano de la Facultad de Ciencias
Presidente del Tribunal


Carlota Amalia Gutiérrez Secretan
Candidata

Dedicatoria

A toda mi familia y en especial a Flora María Gutiérrez Rojas.

Índice de Contenido

Resumen	1
1. INTRODUCCIÓN	3
1.1. Problema.....	4
1.2. Justificación	4
1.3. Alcances y limitaciones	5
1.4. Importancia de este trabajo.....	5
1.5. Objetivos.....	6
1.5.1. Objetivo General	6
1.5.2. Objetivos específicos.....	6
1.6. Ubicación del área de estudio.....	6
1.7. Definición de la zona de estudio y sitios de interés.....	7
1.8. Condiciones climáticas del área de estudio	9
1.9. Metodología General	11
2. ANTECEDENTES	13
2.1. Planes de Ordenamiento Territorial en el área de estudio	13
2.2. Estudio de impacto ambiental del proyecto y documentos complementarios.....	14
2.3. Estudios geológicos en la zona.....	15
2.4. Estudios geotécnicos previos en la zona.....	16
3. MARCO TEÓRICO.....	18
3.1. Ordenamiento Territorial	18
3.1.1. Definiciones	18
3.1.2. Evolución del Ordenamiento Territorial	18
3.1.3. Marco legal y metodologías oficiales en Costa Rica	20
3.2. Gestión del riesgo y amenazas naturales	21
3.2.1. Definiciones	21
3.2.2. Riesgo, amenaza y vulnerabilidad.....	22
3.2.3. Gestión del riesgo en Costa Rica.....	24
3.3. Caracterización geotécnica de los materiales	25
3.3.1. Definiciones	25
3.3.2. Clasificación de suelos	26
4. GEOMORFOLOGIA.....	30
4.1. Recopilación bibliográfica.....	30

I.	Formas de origen volcánico.....	30
II.	Formas de origen aluvial	33
4.2.	Geomorfología regional.....	34
4.2.1.	Metodología	34
4.2.2.	Descripción de las unidades geomorfológicas regionales.....	38
4.3.	Geomorfología local.....	53
4.3.1.	Metodología	53
4.3.2.	Descripción de las unidades geomorfológicas locales	55
5.	GEOLOGIA.....	69
5.1.	Unidades geológicas regionales.....	69
5.1.1.	Metodología	69
5.1.2.	Marco vulcanológico regional.....	69
5.1.3.	Unidades regionales	71
5.2.	Geología Local	80
5.2.1.	Metodología	80
5.2.2.	Unidades locales.....	81
5.3.	Fallamiento regional.....	101
6.	AMENAZAS NATURALES.....	104
6.1.	Amenaza volcánica.....	105
6.1.1.	Determinación de los peligros volcánicos.....	105
6.1.2.	Mapa de peligros volcánicos en el área de estudio	112
6.2.	Amenaza sísmica	115
6.2.1.	Potencial sísmico de las fallas principales	116
6.2.2.	Catálogo sísmico regional	121
6.2.3.	Estudios de amenaza sísmica regional	125
6.3.	Amenaza hidrometeorológica.....	128
6.3.1.	Inundaciones fluviales: inventario histórico	129
6.3.2.	Susceptibilidad a la inundación con base en datos geoespaciales.....	130
6.4.	Amenaza por inestabilidad de laderas	143
6.4.1.	Determinación de la susceptibilidad a deslizamientos por el método de Ángulo Crítico y HSQI.....	145
6.4.2.	Compleitud y análisis del inventario histórico de deslizamientos	149
7.	GEOTECNIA.....	160

7.1. Metodología.....	161
7.2. Análisis de datos geotécnicos	162
7.3. Correlación con litología y presencia de deslizamientos.....	165
8. DISCUSIÓN DE RESULTADOS	172
8.1. Contexto regional	172
8.2. Contexto local.....	176
9. CONCLUSIONES	180
10. RECOMENDACIONES	190
11. AGRADECIMIENTOS	192
REFERENCIAS	193
Leyes y Decretos	206
ANEXOS.....	206

Índice de Figuras

Figura 1: Mapa de ubicación del área de estudio regional y local (en amarillo).....	8
Figura 2: Mapa de las zonas de vida según Holdridge (1967) en el área de interés.....	10
Figura 3: Resumen de la metodología empleada y los resultados obtenidos.	12
Figura 4: Clasificación de las amenazas según su origen. (Modificado de: CNE, 2014a).....	23
Figura 5: Mapa geomorfológico bibliográfico del área de estudio (según Madrigal & Rojas, 1980b).....	31
Figura 6: Escala de colores para la expresión de pendientes (en grados).....	34
Figura 7: Mapas de curvatura de perfil (derecha) y tangencial (izquierda).....	35
Figura 8: Mapa de pendientes regional (en grados).	36
Figura 9: Mapa geomorfológico regional.....	37
Figura 10: Mapa de cuencas hidrográficas y los ríos principales presentes en el área de estudio.	50
Figura 11: Modelo de sombras, mosaico de imágenes y mapa de pendientes derivados de los datos lidar (de derecha a izquierda, respectivamente).....	54
Figura 12: Mapa geomorfológico local.....	57
Figura 13: Mapa geológico regional.	70
Figura 14: Columna estratigráfica local.	81
Figura 15: Mapa geológico local.....	83
Figura 16: Perfiles geológicos del área de estudio: Perfil 1(km 9+800 a 12+100).	84
Figura 17: Perfiles geológicos del área de estudio: Perfil 2 (km 15+850 a 17+200).	85
Figura 18: Perfiles geológicos del área de estudio: Perfil 3 (km 18+350 a 20+500).	86
Figura 19: Perfiles geológicos del área de estudio: Perfil 4 (km 20+700 a 23+300).	87
Figura 20: Perfiles geológicos del área de estudio: Perfil 5 (km 29+300 a 32+300).	88
Figura 21: Depósitos aluviales en el cauce del río Seco.	89
Figura 22: Interpretación del talud en el kilómetro 10+220.....	90
Figura 23: Interpretación del talud antes del río Laguna.....	91
Figura 24: Interpretación de otro talud antes del río Laguna.	92
Figura 25: Columna estratigráfica esquemática de la unidad informal de Depósitos de caída indiferenciados [tQi].	93
Figura 26: Interpretación del talud en el km 24+620 (intersección hacia Santa Elena).....	95
Figura 27: Clastos volcánicos centimétricos de la brecha volcánica indiferenciada.....	96
Figura 28: Tobas clásticas de la Quebrada Laguna.	97
Figura 29: Afloramientos alrededor del km 16.	98
Figura 30: Lavas andesíticas en bloques (km 24).	98

Figura 31: Interpretación del talud en el km 31.	99
Figura 32: Tobas pumíticas de flujo pertenecientes a la Formación Alto Palomo.....	100
Figura 33: Depósitos de la avalancha de detritos.....	101
Figura 34: Mapa tectónico regional.	103
Figura 35: Mapas de peligro por caída de ceniza (izquierda) y de acidificación por gases volcánicos (derecha) para el Volcán Poás (Modificado de: Barrantes & Malavassi, 2015).	109
Figura 36: Mapa de peligros volcánicos en el área de estudio.....	114
Figura 37: Mapa de potencial sísmico regional para fallas oficiales, según la RSN (2019d-o).....	117
Figura 38: Mapa epicentral del catálogo sísmico total de la RSN (1975-2017) para el área de estudio..	122
Figura 39: Resultados de los mecanismos focales para los sismos del 4 de Agosto del 2014 (A) y 12 de Noviembre del 2016 (B) con los datos del evento, la localización y la solución escogida.	123
Figura 40: Mapa epicentral del catálogo de sismos de la RSN (1991-2019) con sismos someros y dos mecanismos focales.....	124
Figura 41: Mapa de Amenaza sísmica para Costa Rica en términos de PGA para un periodo de retorno de 500 años.....	126
Figura 42: Mapas de los componentes que controlan la susceptibilidad a la inundación.	132
Figura 43: Gráficos de datos de precipitación mensual (mm) para las estaciones presentes en el área de estudio.	136
Figura 44: Mapa de precipitación promedio en el área de estudio a partir de datos del IMN.....	137
Figura 45 Mapa de susceptibilidad a inundación del área de estudio con base en datos geoespaciales...	142
Figura 46: Inventario de deslizamientos históricos.....	151
Figura 47: Mapa de inventario de deslizamientos, clasificados según su edad sobrepuesto al mapa de las unidades geológicas locales.....	154
Figura 48: Mapas de cálculo del área deslizada por 0,25 km ² (izquierda) y conteo de deslizamientos por 0,25 km ² (derecha).	156
Figura 49: Análisis de los datos obtenidos del inventario de deslizamientos.	158
Figura 50: Deslizamiento del kilómetro 21.....	159
Figura 51: Análisis de datos geotécnicos.	164
Figura 52: Análisis de los deslizamientos seleccionados.	167
Figura 53: Análisis de los deslizamientos seleccionados (parte 2).	168
Figura 54: Mapa de tipos de suelo según la clasificación asociada a cada unidad litológica (ver tabla 12).	171
Figura 55: Mapa de integración regional.	173
Figura 56: Mapa de integración local.....	177

Índice de Tablas

Tabla 1: Clasificación de los índices de fragilidad ambiental.....	21
Tabla 2: Lista de los tamices principales usados para las normas ASTM con las aberturas correspondientes.	27
Tabla 3: Resumen del Sistema Unificado de Clasificación de Suelos modificado de González de Vallejo (2002) y basado en la norma ASTM D2487-11.	29
Tabla 4: Resumen de los datos obtenidos para las estaciones meteorológicas en el área de estudio.....	134
Tabla 5: Clasificación de valores de los insumos para la sumatoria de susceptibilidad a la inundación .	141
Tabla 6: Clasificación de los tipos de movimiento de masa según Hungr et al. (2014) [traducido al español].	144
Tabla 7: Rangos de susceptibilidad a deslizamientos según el ángulo crítico, la desviación estándar y los ángulos de pendiente para el método de Ángulo Crítico (Fuente: Vargas & Garro, 2012).....	146
Tabla 8: Rangos de susceptibilidad a deslizamientos según el método de Ángulo Crítico para cada una de las unidades litológicas presentes en el área de estudio (Fuente: Vargas & Garro, 2012).	147
Tabla 9: Comparación de los niveles de susceptibilidad al deslizamiento de los taludes obtenidos por Ocampo (2016) para el método HSQI, con los resultados del método de Ángulo Crítico (Vargas & Garro, 2012) a lo largo de la ruta.....	149
Tabla 10: Descripción de los parámetros determinados para cada uno de los polígonos del Inventario de Deslizamientos	150
Tabla 11: Agrupación de las unidades litológicas según su dureza usando la misma nomenclatura que para el apartado 6.3.2 (Susceptibilidad a la inundación).....	157
Tabla 12: Resumen de los resultados obtenidos para los ensayos geotécnicos de suelos. Los datos específicos para cada uno de los ensayos realizados se encuentran en el Anexo 5.....	162
Tabla 13: Tipo de suelo predominante para cada unidad litológica propuesta.	163
Tabla 14: Tabla de los deslizamientos seleccionados para el análisis geotécnico y los parámetros correspondientes.....	166

Resumen

En Costa Rica, la condición de elevada amenaza por eventos naturales implica la necesidad de ordenar las actividades en el territorio para disminuir la vulnerabilidad. La Ruta Nacional No. 35, específicamente en el tramo entre Sifón y La Abundancia, cruza tres cantones (San Ramón, Zarcero y San Carlos) para los cuales no se encontraron planes de ordenamiento territorial actualizados, ni previsiones tomadas con respecto a habilitación de la carretera. En este trabajo se caracterizan los componentes geológicos (geomorfología, geología, amenazas naturales y geotecnia), mediante trabajo de campo y análisis de mapas y modelos, para el área de estudio a nivel regional y local, para propiciar un desarrollo ordenado y planificado del área. Este es el primer estudio geológico con miras al ordenamiento territorial, realizado previo a la habilitación de una nueva ruta nacional.

Los componentes geológicos se caracterizaron a escala regional y local. Las unidades geomorfológicas se establecieron utilizando información topográfica e imágenes satelitales de acceso abierto a nivel regional, y datos lidar y ortofotografías a nivel local. La caracterización de la geología a nivel regional se basó en la extrapolación de la información existente, mientras que a nivel local se determinaron unidades litológicas informales mediante trabajo de campo y análisis petrográfico. Se propone un modelo hipotético de peligros volcánicos a nivel regional. La recopilación de información de la amenaza sísmica y el potencial sísmico de las fallas principales se complementó con un análisis de los sismos locales, y un modelo de fallamiento regional basado en análisis geomorfológico. La susceptibilidad a la inundación se determinó utilizando la metodología de Das (2019) basado en datos geospaciales, cuyos resultados fueron validados con datos históricos. Se realizó un inventario de deslizamientos para caracterizar la inestabilidad de laderas a nivel local. La información geotécnica existente se complementó mediante un muestreo y análisis de suelos, para su clasificación según el Sistema Unificado de Clasificación de Suelos.

Los resultados obtenidos son mapas geomorfológicos y geológicos tanto a escala regional como local, un mapa de peligros volcánicos hipotéticos, un mapa sísmico y tectónico regional, un mapa de susceptibilidad a la inundación regional, un catálogo y un mapa del inventario de deslizamientos históricos a nivel local y un mapa de unidades geotécnicas locales. Al integrar la información recopilada con los resultados obtenidos, se obtiene un panorama tanto regional como local de las condiciones generales presentes para el ordenamiento territorial.

A nivel regional el área se compone principalmente por morfologías de origen volcánico asociados a la construcción y destrucción de los conos y calderas de Palmira, Chocosuela y el complejo Platanar-Porvenir. Las laderas denudacionales presentan materiales volcánicos suaves, con intensa meteorización y fallamiento local, por lo tanto propensas a inestabilidades, mientras que las áreas planas son susceptibles a la inundación. El peligro volcánico hipotético por reactivación de los volcanes Platanar y Porvenir es importante pero tiene poco impacto sobre la

carretera, mientras que el área de estudio es tectónicamente activa con fallas corticales con potencial de generación de sismos destructivos.

A nivel local la integración de la información permite una zonificación del área de estudio y el trazado de la carretera, donde resaltan dos secciones con condiciones litológicas, tectónicas, y de estabilidad de laderas adversas. Para la Ruta Nacional No. 35 se recomienda integrar la información existente y utilizar la zonificación propuesta para la priorización de las obras; además de realizar estudios detallados en las secciones con condiciones adversas, para proponer soluciones geotécnicas adecuadas y finalizar la construcción de la carretera.

Palabras Clave: ordenamiento territorial, Ruta Nacional No. 35, lídár, geología, geomorfología, amenazas naturales, geotecnia.

1. INTRODUCCIÓN

En todo el mundo, la apertura de nuevas carreteras de importancia nacional contribuye no solamente al desarrollo de las diferentes regiones, sino que también impulsa el comercio a lo largo de esta y la expansión de centros urbanos interconectados preexistentes. Un informe para Costa Rica de la Organización para la Cooperación y el Desarrollo Económicos (OCDE, 2016) indica que: “con el objetivo de facilitar más el comercio y de mejorar la competitividad de la economía, el país tiene que actualizar la infraestructura de transporte, portuaria y de los cruces fronterizos en donde la calificación en varios rankings internacionales es consistentemente pobre.” En el caso de Costa Rica, ya se han dado ejemplos de desarrollo a partir de la construcción de una carretera.

Un ejemplo es el poblado de La Guácima, donde el desarrollo de urbanizaciones y complejos habitacionales se aceleró a partir del 2012, luego de la apertura de la Ruta Nacional N° 27. Sin embargo, es poco claro si de manera general el desarrollo en este sitio responde a las condiciones naturales (geológicas) del terreno o simplemente a ventajas de ubicación con respecto a las vías de comunicación principales. Por otra parte, existe la posibilidad de que el desarrollo no cuente con planificación previa (planes de Ordenamiento Territorial) por parte de las municipalidades ni por parte de los entes competentes a nivel de gobierno central, lo cual se puede ver reflejado en problemas sobre uso del suelo y alta vulnerabilidad de las construcciones a mediano o largo plazo.

La planificación el desarrollo de las actividades humanas en el territorio es necesaria ya que provee una serie de ventajas, las cuales influyen positivamente en la calidad de vida de los habitantes a largo plazo. Estas ventajas son: verificar la compatibilidad entre las actividades llevadas a cabo y la aptitud del suelo, permite una mejor organización de movilidad urbana y rural, propicia mantener un equilibrio urbano-rural en cuanto a desarrollo y migración de poblaciones, asegura una funcionalidad espacial de las diversas actividades, además contribuye con la seguridad física y ambiental, la salubridad, y la eficiencia energética e hídrica de las poblaciones y las actividades productivas. (SEGEPLAN, 2011; MINAM, 2013)

En general el ordenamiento territorial se basa en varios componentes, que son: los sistemas administrativo, biofísico, social, económico y funcional (Otero et al.; 1998). En Centroamérica es importante recalcar la condición compartida de alta vulnerabilidad ambiental (Ferrufino & Grande, 2013) frente a amenazas geológicas y climáticas, junto con una gran vulnerabilidad social de parte de la población. La intersección de estas condiciones se traduce, por lo general, en una gran cantidad de daños en el caso de la materialización de una amenaza. Costa Rica no es una excepción (Alfaro, 2011), por lo que se considera que el análisis de las condiciones geológicas y una correcta gestión del riesgo son claves en cualquier plan o política de desarrollo implementado en el país.

En el caso de la Ruta Nacional No. 35, específicamente en el tramo en construcción entre los poblados de Sifón y La Abundancia (que comunicaría las ciudades de San Ramón y Ciudad Quesada), esta cruza tres cantones: San Ramón, Zarcero y San Carlos. Para Enero del 2019, ninguno de estos cantones contaba con plan regulador aprobado que cumpliera con la normativa

actual, aprobado tanto por la SETENA (fuente: www.setena.go.cr) como por el INVU (<https://www.invu.go.cr>). Además, en los planes reguladores encontrados (no vigentes o desactualizados), no se refleja ninguna previsión con respecto al desarrollo que podría ser causado por la puesta en marcha de la Ruta Nacional No. 35. Por lo tanto, se constata la necesidad de conocer de manera general las condiciones geológicas del entorno, previo al inicio del funcionamiento de la carretera, y que la información generada, junto con otros estudios, sea un insumo para planificar de manera adecuada el desarrollo que surgirá a partir de la conclusión de las obras.

Nótese que cuando este trabajo fue planteado, la carretera se encontraba aún en construcción, sin embargo, para el año 2019 las obras se encuentran detenidas por un tiempo indefinido. No obstante se considera que los insumos aportados aquí sirven no solamente para el desarrollo futuro a partir de la conclusión de las obras, sino que también deben usarse con el fin de terminar la construcción de la Ruta Nacional No. 35.

1.1. Problema

En los alrededores de la Ruta Nacional No. 35, y específicamente en el tramo entre los poblados de Sifón y La Abundancia, no se cuenta con estudios geológicos, geotécnicos y de amenazas naturales con el detalle suficiente ni con la extensión requerida, para poder planificar y proyectar de manera adecuada el desarrollo de las actividades humanas una vez habilitada la carretera.

1.2. Justificación

La condición de elevada amenaza por eventos naturales para el caso de Costa Rica, implica una necesidad de ordenar las actividades en el territorio, con el fin de disminuir su condición de vulnerabilidad. A nivel local, el ordenamiento del territorio compete a las municipalidades; sin embargo, con la publicación del Decreto N° 32967-MINAE y su implementación “más rigurosa” por parte del Setena a partir del 2013 (Astorga, 2016), han aparecido una gran cantidad de trabas y atrasos en el proceso de aprobación. Esto implica una ausencia de planes y políticas vigentes de ordenamiento territorial; o en caso de que estas existan, se encuentran desactualizadas en cuanto a la situación actual del área correspondiente. Específicamente para el área de estudio, se encontró un vacío de información con respecto a las condiciones geológicas y de amenazas naturales generales, al igual que sobre la planificación del desarrollo en las cercanías de la carretera en construcción (Ruta Nacional No. 35; tramo Sifón-La Abundancia). Por lo tanto, este trabajo pretende colmar parte de ese vacío, propiciando la información geológica, geomorfológica, geotécnica y de amenaza naturales de esta zona, la cual es considerada según casos previos en el país, la más propensa a desarrollarse una vez terminada la carretera. Este trabajo aportará información generada a partir del diagnóstico y análisis del problema (falta de información técnica) para su resolución. Se considera que conociendo las condiciones geológicas y geotécnicas del suelo y subsuelo, además de las amenazas presentes, se pueden planificar las actividades para que estas no se localicen en zonas de vulnerabilidad, evitando así daños y pérdidas potenciales. Asimismo,

la mayoría de los terrenos aledaños al proyecto se usan actualmente para cultivos o ganadería, por lo tanto se considera que el factor social y antropogénico es menos determinante en este caso.

1.3. Alcances y limitaciones

El área de estudio de este trabajo, para la determinación de las condiciones geológicas y geomorfológicas locales, se limitó a franjas de quinientos metros a ambos lados del trazado de la nueva carretera (Ruta Nacional No. 35, tramo Sifón-La Abundancia). No se tomaron en cuenta áreas de quinientos metros alrededor de algunas de las radiales que comunican con los poblados de mayor importancia (Ciudad Quesada, Naranjo, Zarcerro) como inicialmente previsto, ya que existe una discrepancia entre la resolución de los datos topográficos a lo largo de la carretera (curvas 1 m) y alrededor de las radiales (curvas cada 10 m). Se estimó que el área escogida sería la de mayor relevancia para nuevos desarrollos a lo largo de la carretera, además del hecho que ya se contaban con imágenes lédar con resolución de 15 cm, y curvas de nivel cada 1 m en esta zona. Para la determinación de las condiciones geológicas regionales, se trabajó a una escala no menor a 1:50 000 y no mayor a 1:25 000 para poder cubrir la totalidad del área de estudio planteada con un grado de detalle aceptable.

Por otra parte, este trabajo se limitó al estudio general de la geología, las condiciones geotécnicas y las amenazas naturales del área, sin adentrarse en las condiciones hidrogeológicas de la misma. Se espera que en otros trabajos, ya sea de tesis o internos de Lanamme-UCR, se desarrolle este tipo de evaluación, usando como base los resultados generados.

1.4. Importancia de este trabajo

Se estima que al haberse realizarse este estudio de manera previa a la puesta en marcha de la carretera, su incidencia sobre el desarrollo posterior en la zona será mayor. Además, su propósito es servir como base para trabajos posteriores para planificar de manera adecuada dicho desarrollo (Planes de Ordenamiento Territorial). Por otra parte, los productos de este trabajo podrán ser utilizados para determinar la vulnerabilidad de nuevas construcciones frente a eventos naturales. Finalmente, se buscó utilizar una metodología sencilla que sirviera para determinar de manera simple y efectiva las limitantes geológicas del área de estudio.

Según el informe LM-PI-UE-001-2017 (LanammeUCR, 2017), entre los beneficios que se considera tendrá la carretera están: un incremento en el nivel de vida y la actividad turística de la región, la disminución de una hora en el tiempo de recorrido San José – Ciudad Quesada, la generación de fuentes de empleo durante la construcción de la carretera y, posteriormente, durante la operación de la misma.

1.5. Objetivos

1.5.1. Objetivo General

Caracterizar el marco geológico, geotécnico y de amenazas naturales a lo largo de la Ruta Nacional No. 5, en el tramo Sifón-La Abundancia, mediante trabajo de campo y análisis de mapas y modelos, con el fin de que esta información sea un insumo para propiciar un desarrollo ordenado y planificado de esta zona, una vez habilitada la carretera.

1.5.2. Objetivos específicos

- a. Establecer las unidades geomorfológicas presentes en el área de estudio, para conocer las características geodinámicas del terreno.
- b. Establecer las unidades geológicas presentes en el área de estudio, para conocer las condiciones geológicas del área.
- c. Identificar los sitios expuestos a las amenazas naturales (sísmica, volcánica, hidrometeorológicas, y de deslizamiento) presentes en el área de estudio, para conocer la vulnerabilidad de nuevas construcciones ante estas amenazas.
- d. Determinar las propiedades geomecánicas básicas de cada una de las unidades geológicas identificadas, en los cortes y taludes del área de estudio, para su caracterización; y que estos sirvan como parte de los insumos para poder emitir recomendaciones generales sobre el uso de la tierra en esta área.

1.6. Ubicación del área de estudio

Para este estudio se establecieron dos escalas de trabajo: la primera regional descrita a continuación y la segunda local descrita en el siguiente apartado, correspondiente a un área de influencia o búfer alrededor del trazado de la Ruta Nacional No. 35.

El área de estudio regional se encuentra dentro del cuadrante (ver figura 1) situado entre las coordenadas 444000E-464000E y 1113000N-1145000N según la proyección CRTM-05 de las hojas topográficas Naranjo, Quesada y Aguas Zarcas del Instituto Geográfico Nacional (IGN), escala 1:50 000. Se ubica en la provincia de Alajuela y comprende parte de los cantones de Naranjo, Palmares, San Carlos, San Ramón, Valverde Vega, y Zarcero. Los poblados principales en el área son Naranjo, San Ramón, Sarchí, San Gerónimo, Zarcero, Palmira, Laguna, San José de la Montaña, Quesada, La Vieja y Santa Clara. La carretera en construcción se ubica entre las localidades de Sifón (ubicado al Noreste de San Ramón) y La Abundancia (al oeste de Ciudad Quesada). Al oeste del área, el Parque Nacional Juan Castro Blanco cubre parte de los macizos de los volcanes Platanar y Porvenir. La topografía de la zona se encuentra entre 400 y 2300 m s.n.m. Cabe resaltar que en el área pasa la divisoria continental que divide las cuencas que drenan hacia la vertiente Caribe y las que drenan al océano Pacífico (o al Golfo de Nicoya). Las cuencas de la

vertiente Caribe se encuentran al norte de la divisoria entre el río Barranca y el río Espino; mientras que las del sur corresponden a la vertiente Pacífica.

1.7. Definición de la zona de estudio y sitios de interés

El área de estudio local corresponde a un búfer de quinientos metros a ambos lados de la carretera en construcción (ver figura 1), la cual posee una longitud oficial de 29,73 km. Esta área corresponde a la extensión de los datos líder obtenidos por la empresa AeroDiva S.A. para el LanammeUCR en octubre el año 2014 y responden a una necesidad de contar con datos de alta resolución para cumplir con las labores de fiscalización e auditorías técnicas de proyectos en ejecución, funciones de esta institución por efectos del Artículo 6 de la Ley 8114 (Ley de Simplificación y Eficiencia Tributarias, 2001). Debido a la ausencia de datos líder fuera de esta área, no se trabajó con la franja de quinientos metros a ambos lados de las radiales (entiéndase por radiales caminos secundarios perpendiculares a la carretera que conectan dicha carretera con los poblados de mayor importancia), tal y como se había propuesto inicialmente. Sin embargo estas vías secundarias se consideran importantes ya que conectan la carretera en construcción con la Ruta Nacional No. 141 (entre Naranjo con Ciudad Quesada), por lo tanto proveen acceso a los poblados de Naranjo, Zarcero y Laguna. Esto corresponde a un área de estudio local de aproximadamente 33.8 km².

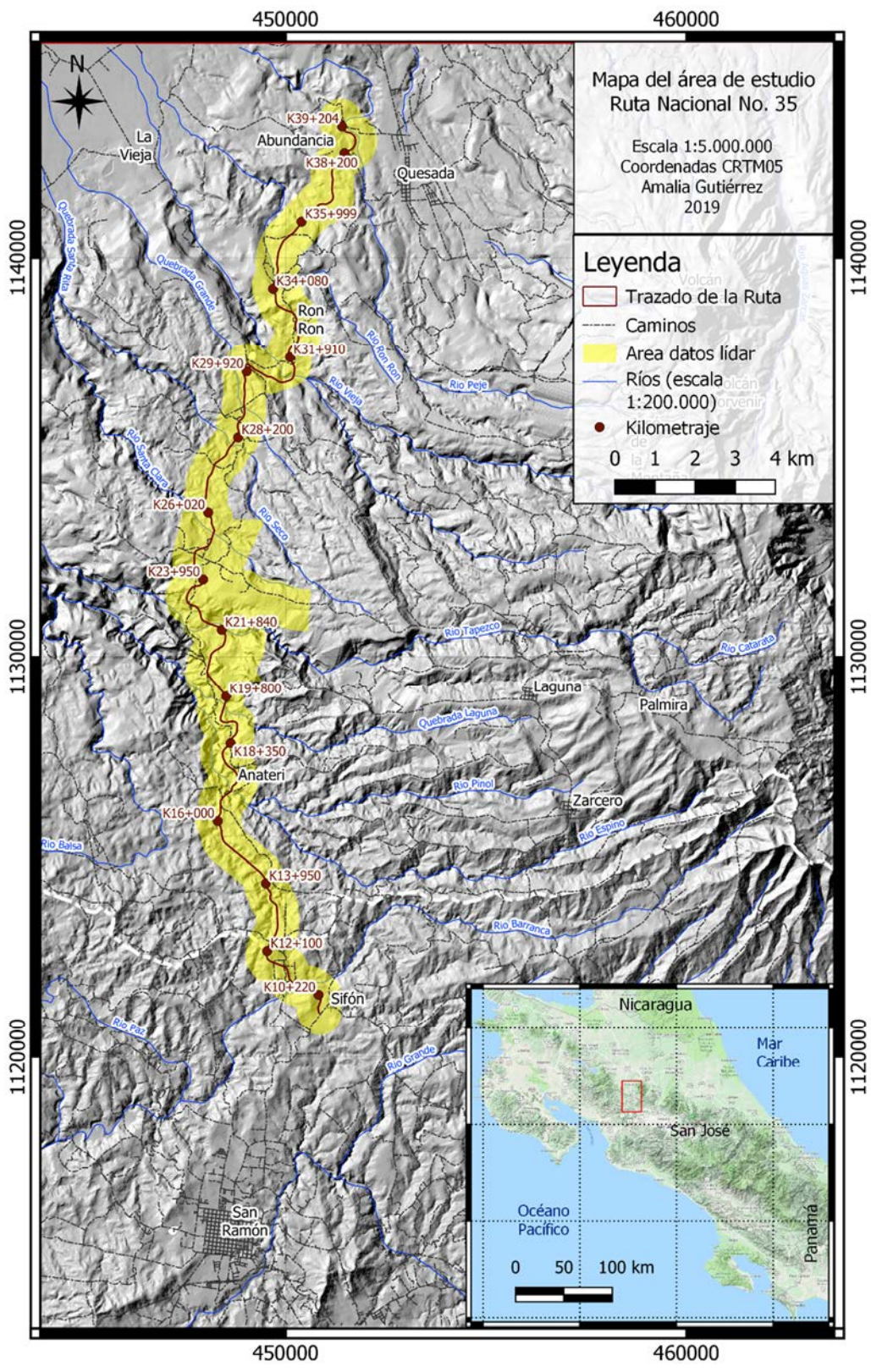


Figura 1: Mapa de ubicación del área de estudio regional y local (en amarillo).

1.8. Condiciones climáticas del área de estudio

Respecto a las condiciones biológicas, climáticas e hidrometeorológicas del área de estudio, existe una gran variedad de microclimas, en su mayoría con altas precipitaciones y gran cantidad de humedad. Estas pueden ser descritas usando las zonas de vida definidas por Holdridge (1967) para Costa Rica. En el área se encuentran un total de 12 zonas y sub-zonas de vida, cada una con características particulares, las cuales son descritas a continuación (ver figura 2):

- Bosque húmedo Montano Bajo (bh-MB): El rango de precipitación oscila entre 1400 y 2000 mm como promedio anual. Presenta un periodo efectivamente seco moderado entre 2 a 4 meses secos (Bolaños et al., 2005).
- Bosque húmedo Premontano (bh-P): la precipitación anual varía entre 1200 y 2200 mm, y el periodo efectivo seco va de 3,5 a 5 meses.
- Bosque húmedo Tropical (bh-T): presenta un ámbito de precipitación entre 1800 y más de 4000 mm de precipitación media anual. En esta zona de vida la estación seca varia de un lugar a otro, siendo entre 0 a 5 meses de duración (Bolaños et al, 2005).
- Bosque húmedo Tropical transición a Premontano (bh-T): transición entre Bosque húmedo Tropical y Bosque húmedo Premontano.
- Bosque muy húmedo Montano Bajo (bmh-MB): El rango de precipitación oscila entre 1850 y 4000 mm como promedio anual, es muy característico de esta zona de vida la presencia de neblina durante largos periodos durante el día y en transcurso del año.
- Bosque muy húmedo Premontano (bmh-P): Esta zona de vida posee un rango de precipitación entre 2000 y 4000 mm como promedio anual.
- Bosque muy húmedo Premontano transición a Pluvial (bmh-P): una transición entre el Bosque muy húmedo Premontano y el Bosque pluvial Premontano.
- Bosque muy húmedo Premontano transición a Basal (bmh-P): una transición entre el Bosque muy húmedo Premontano y el Bosque muy húmedo Basal.
- Bosque muy húmedo Tropical (bmh-T): presenta un ámbito de precipitación que fluctúa entre 4000 y más de 6000 mm de precipitación media anual (Bolaños et al, 2005). No presenta una estación seca bien definida, sino periodos con menor cantidad de lluvias (veranillos).
- Bosque muy húmedo Tropical transición a Premontano (bmh-T): transición del bosque muy húmedo tropical con el bosque muy húmedo premontano.
- Bosque pluvial Montano Bajo (bp-MB): La precipitación promedio anual en algunas localidades supera los 8000 mm, se presenta una excesiva humedad relativa provocada por la neblina. Se considera un periodo moderadamente seco no mayor a 3 meses (Bolaños et al., 2005).
- Bosque pluvial Premontano (bp-P): Se caracteriza por presentar una precipitación superior a los 4000 mm anuales; sin embargo, en algunas partes del país sobrepasan los 7000 mm en promedio anual.

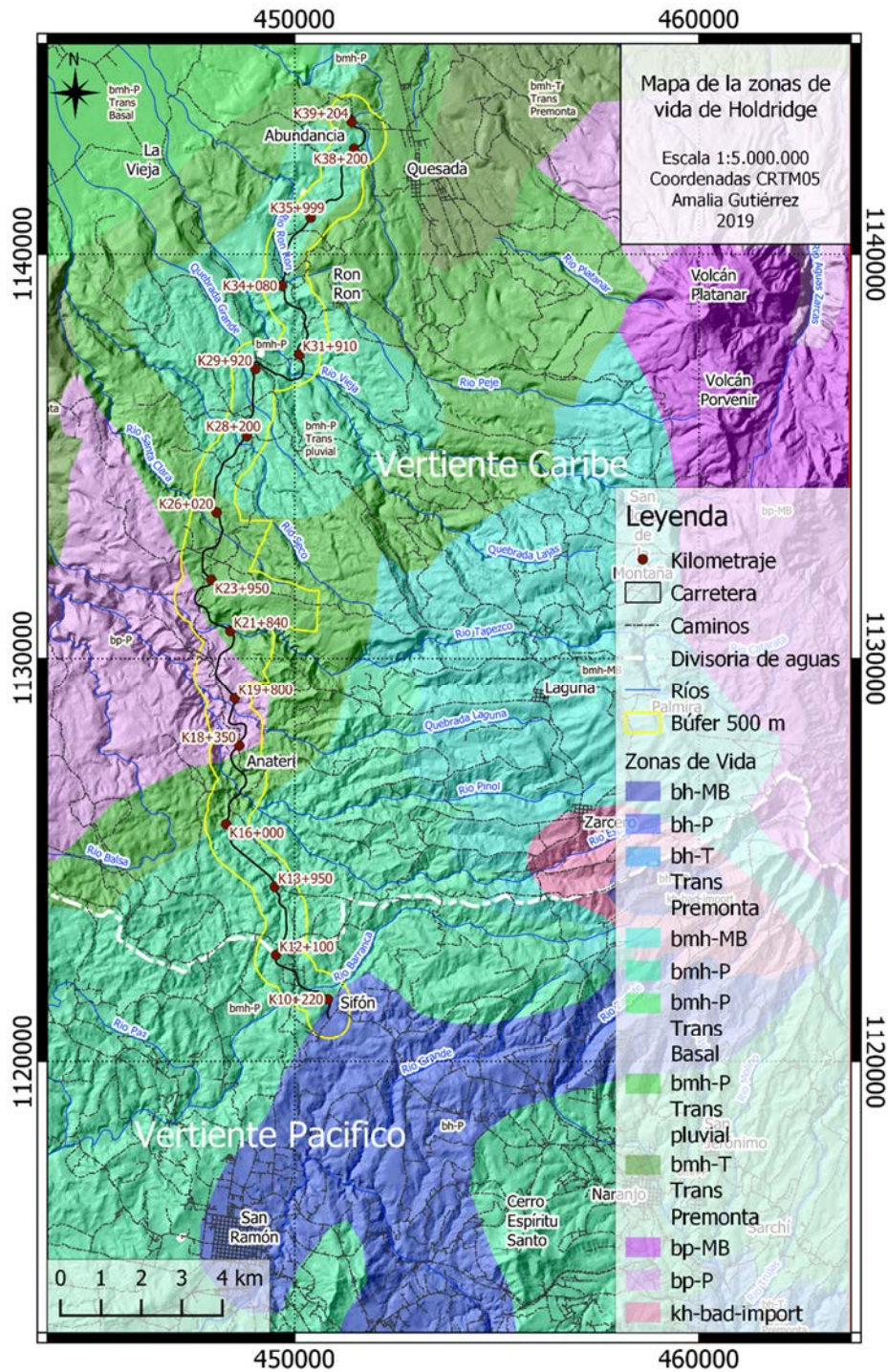


Figura 2: Mapa de las zonas de vida según Holdridge (1967) en el área de interés.

Se observa que la mayoría del área corresponde a tonos de verde (Bosque muy húmedo). Las zonas de vida presentes son: (bh-MB) Bosque húmedo Montano Bajo, (bh-P) Bosque húmedo Premontano, (bh-T Trans Premonta) Bosque húmedo Tropical transición a Premontano, (bmh-MB) Bosque muy húmedo Montano Bajo, (bmh-P) Bosque muy húmedo Premontano, (bmh-P Trans Basal) Bosque muy húmedo Premontano transición a Basal, (bmh-P Trans pluvial) Bosque muy húmedo Premontano transición a Pluvial, (bmh-T Trans Premonta) Bosque muy húmedo Tropical transición a Premontano, (bp-MB) Bosque pluvial Montano Bajo y (bp-P) Bosque pluvial Premontano.

Conocer la distribución media de la precipitación a lo largo del año en una zona susceptible a deslizamientos es un aspecto importante. Las lluvias constituyen uno de los principales agentes erosivos y propician eventos de remoción de masa. La erosión puede disminuir en sitios protegidos por una cubierta vegetal, mientras que tiende a aumentar en lugares donde se ha removido la vegetación por deforestación, para hacer cortes en taludes o para desarrollar actividades antrópicas como ganadería o agricultura. La precipitación anual media también se puede relacionar con la saturación de las laderas y mientras más saturadas estén serán sujetas a una mayor ocurrencia de deslizamientos.

1.9. Metodología General

Para cada uno de los cuatro ejes se detalla la metodología en el apartado correspondiente, sin embargo a continuación se menciona el procedimiento usado para de manera general (ver figura 3) con el fin de tener una imagen clara de los datos de entrada y los productos generados a lo largo de este trabajo.

Se procedió en primero al establecimiento de las unidades geomorfológicas, de manera general basadas en recopilación bibliográfica. A nivel regional se utilizó información topográfica e imágenes satelitales de acceso abierto, mientras que a nivel local utilizando datos Lidar, con resolución de 15 cm y sin vegetación, y ortofotografías. Una vez delimitadas las unidades a escala regional y local se complementaron los mapas con la descripción de las unidades.

Para establecer las unidades geológicas presentes en el área de estudio, a nivel regional se recopiló la información existente de fuentes bibliográficas y se extrapoló con el fin de obtener un mapa regional. Por otra parte a nivel local se realizaron giras de campo, muestreo y análisis petrográfico (macro y micro) con lo cual se delimitaron unidades informales locales.

Para identificar los sitios expuestos a las amenazas naturales, se trabajaron cuatro ejes de manera independiente. En primera instancia se recopiló información sobre la amenaza volcánica para los volcanes Arenal, Poás y Turrialba, con lo cual se propone un modelo hipotético de peligros volcánicos a nivel regional, incluyendo la reactivación hipotética del complejo Platanar-Porvenir. Para la amenaza sísmica se procedió en primero a la recopilación de información espacial sobre las fallas regionales (oficiales) y su potencial sísmico, así como de la amenaza sísmica regional determinado mediante estudios formales. Esto se complementó con un análisis de los sismos locales usando el catálogo de la RSN, y un modelo de fallamiento regional (incluyendo fallas hipotéticas y alineamientos) basado en análisis geomorfológico. La susceptibilidad a la inundación se determinó utilizando la metodología de Das (2019) basado en datos geospaciales, cuyos resultados fueron validados con datos históricos del inventario de DesInventar y mapas de la CNE. Finalmente la amenaza por inestabilidad de laderas se trabajó a nivel local, con la recopilación de resultados de dos métodos (Ángulo crítico y HSQI) aplicados a la carretera, así como la realización inventario de deslizamientos para caracterizar la inestabilidad de laderas a nivel local.

Para determinar las propiedades geomecánicas básicas de cada una de las unidades geológicas identificadas, en los cortes y taludes del área de estudio, se recopiló la información geotécnica existente a lo largo de la Ruta Nacional No. 35, la cual se complementó mediante un muestreo y análisis de suelos, para su clasificación según el Sistema Unificado de Clasificación de Suelos.

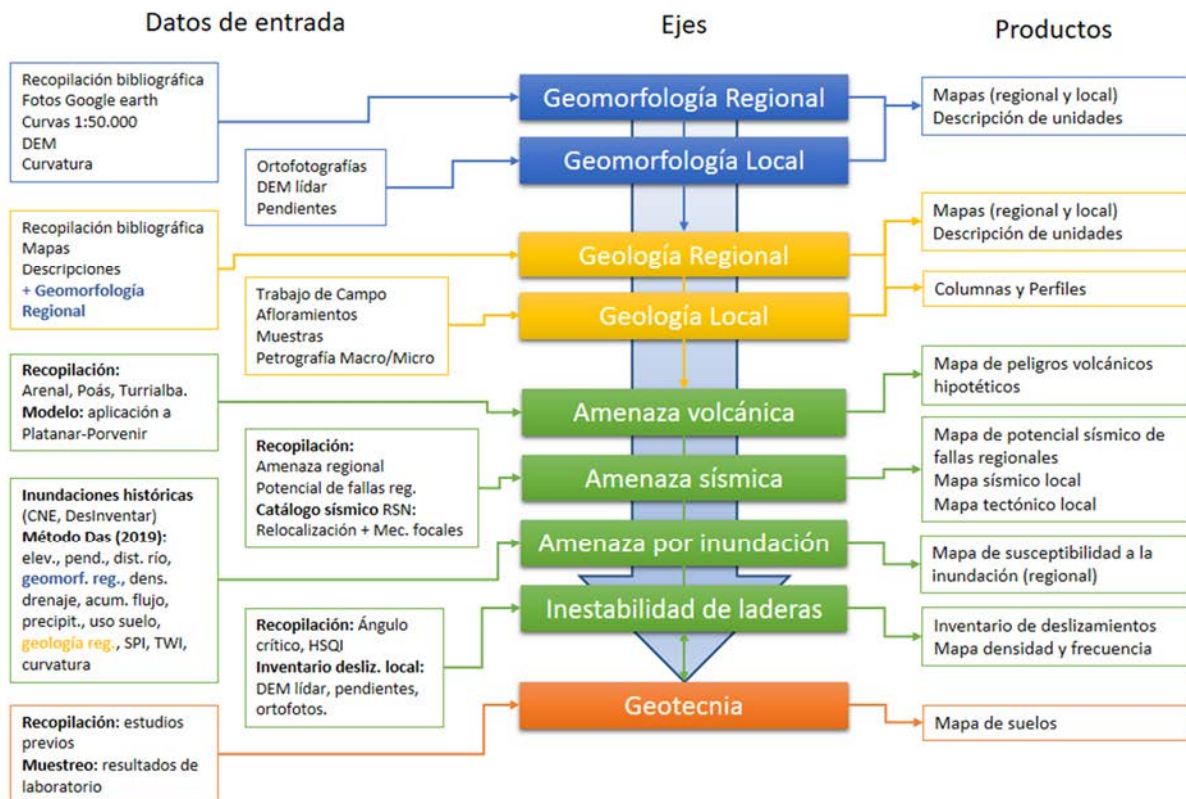


Figura 3: Resumen de la metodología empleada y los resultados obtenidos.

2. ANTECEDENTES

Los estudios geológicos realizados previos a la elaboración de este trabajo, en el área de interés, son de tres tipos: a) estudios geológicos para el ordenamiento del territorio, b) estudios de impacto ambiental del proyecto (que incluyen la variables geológica geotécnica y de amenazas naturales), y c) estudios meramente investigativos (mapas, campañas, tesis) que cubren alguna parte del área de estudio.

2.1. Planes de Ordenamiento Territorial en el área de estudio

A pesar de la aprobación de la Ley Nacional de Planificación Urbana por parte del INVU en 1968, no fue hasta los años 1990 que se empezó a tomar en cuenta la variable geológica en el ordenamiento y la planificación del territorio (Arrieta, 2010). Sin embargo a partir de la publicación del instrumento jurídico que norma la aprobación de los planes reguladores por parte del SETENA, conocido como el Reglamento de los Índices de Fragilidad Ambiental (IFA) (Decreto No 32967-MINAE del 2006), la variable geológica comprendida en el IFA–Geoaptitud pasó a ser un componente necesario en los estudios técnicos para el ordenamiento del territorio.

La situación del ordenamiento territorial y de los estudios geológicos para este fin se detallará a continuación, para cada una de las tres municipalidades correspondientes al área de estudio.

En el cantón de San Ramón existe un plan regulador vigente, el cual fue publicado en febrero del 2004, y realizado por el Programa de Investigación en Desarrollo Urbano Sostenible de la Escuela de Ingeniería Civil de la Universidad de Costa Rica (ProDUS-UCR). Sin embargo, este no presenta evidencias de estudios geológicos para su elaboración, ni contempla restricciones del uso de la tierra por amenazas geológicas. Lo que contiene el documento son recomendaciones para evitar inundaciones y deslizamientos del terreno; sin embargo, estas medidas son muy generales. No obstante, existe una propuesta de plan regulador elaborado por ProDUS recientemente, la cual se encuentra actualmente archivada por parte de la SETENA (<https://www.setena.go.cr/planes-reguladores-cantoniales/>). Por otra parte, según la página web del INVU (<https://www.invu.go.cr/planes-reguladores>), este cantón no cuenta con plan regulador aprobado y el plan se encuentra en proceso de elaboración. Por lo tanto, este cantón está a la espera de una modificación en el plan regulador para su aprobación por parte de las autoridades competentes.

Para el cantón de Zarcero no se pudieron encontrar planes reguladores antiguos ni recientes; sin embargo, se encontró una propuesta para la elaboración del mismo en el plan de gobierno del nuevo alcalde (Ronald Araya Solís, 2016-2020) (Araya et al., 2015), por lo que se cree que aún no se ha empezado. Por otra parte, la Dirección de Geología y Minas en su página web (<http://www.geologia.go.cr/>) en el año 2017 indicaba que: “La Dirección de Geología y Minas de manera conjunta con la Universidad de Costa Rica, la Comisión Nacional de Emergencia y la Municipalidad de ese cantón, está generando información que permita una debida incorporación del tema de gestión del riesgo en el Plan regulador del cantón de Zarcero.” Según la página de la

SETENA, al igual que según el INVU, este cantón no cuenta con ningún trámite registrado para aprobación del plan regulador por parte de estas instituciones.

El cantón de San Carlos cuenta con un plan regulador del año 1981, el cual abarca únicamente el casco urbano de Ciudad Quesada. Según diversas fuentes (Radio Santa Clara, 2007; Corella, 2016, Herrera, 2017), para el 2017 el nuevo plan regulador para todo el cantón de San Carlos se encontraba en proceso de elaboración por parte de ProDUS. La elaboración del plan empezó en el 2012 con una primera etapa, y en el 2013 con una segunda etapa. En el 2017 este posiblemente se encontraba paralizado debido a las exigencias del SENARA y SETENA a partir del 2012 y fue reactivado con la aprobación del Decreto Ejecutivo N° 39150-MINAE-MAG-MIVAH-PLAN-TUR (Reglamento de la transición para la revisión y aprobación de Planes Reguladores). Para abril del 2019 el plan regular aparece como vigente y en proceso de actualización ante el INVU, sin embargo aún aparece sin trámite registrado ante la SETENA.

2.2. Estudio de impacto ambiental del proyecto y documentos complementarios.

El proyecto de construcción de la carretera Naranjo-Florencia (nombre original de la Ruta Nacional No 35) en su diseño actual, cuenta con un único estudio de impacto ambiental (EsIA), realizado en el 2004 por la empresa consultora Siel-Siel S.A. (Expediente 40-2002 SETENA), el cual detalla de manera general las unidades geológicas presentes en el área de proyecto (AP), así como las unidades geomorfológicas a gran escala, las fallas más importantes y las principales amenazas naturales presentes. También se realizaron estudios geológicos y geotécnicos complementarios, de áreas específicas del proyecto, debido a los vacíos de información existentes en el documento y a los problemas que surgieron durante la construcción del mismo.

Las unidades geológicas regionales, descritas en el EsIA (Siel-Siel, 2004) y provenientes principalmente de Tournon & Alvarado (1997) comprenden: Volcanismo del Neógeno (Montes del Aguacate), Volcanismo del Cuaternario Inferior (Cordillera de Tilarán y Montes del Aguacate), Ignimbritas y Tobas ácidas Cuaternarias, Volcanismo del Cuaternario: Estratovolcanes, Aluviones del Cuaternario sin diferenciar y Lacustres.

Por otra parte las unidades geológicas locales (para los tramos: km 9+700 al km 14+700 y km 35+400 al km 39+400), identificadas en el campo por los autores del capítulo de geología del EsIA comprenden: Unidad de Tobas de Flujo, Unidad de cenizas volcánicas recientes, Unidad Bajos del Toro-Viejo y Unidad Alto Palomo.

En el marco geológico estructural, los autores del EsIA asocian el fallamiento presente con el Graben (ó Depresión) de Nicaragua y distinguen dos sistemas: un sistema de fallamiento normal de rumbo NW-SE alineado con la depresión, y un sistema de fallas de tipo compresivo a escala local, que consiste de fallas inversas y pliegues asociados con orientación E-W.

Además, las unidades geomorfológicas regionales descritas con base en lo propuesto por Madrigal (1980) son las siguientes: Lomeríos de fuerte pendiente en la Cordillera de Tilarán, Cerros y Valles del Aguacate, Falda baja del noreste de la Cordillera de Tilarán, Unidad Volcán Poás, Llanura aluvial de San Carlos y el Atlántico, Abanico aluvial de Santa Clara, y Abanico Aluvial de Aguas Zarcas.

Finalmente, las amenazas naturales descritas incluyen amenaza volcánica, por erosión, por deslizamientos, por inundación, amenaza de flujo de detritos y fallas geológicas. Para la amenaza sísmica, los autores del EsIA hablan de una cantidad de 83 eventos sísmicos con magnitud coda (Mc) mayor a 4,5 entre 02/05/1984 y 30/12/2002. Se mencionan varias fallas que cruzan el área de proyecto (AP), sin embargo los autores no mencionan cuales están activas ni determinan el potencial sísmico de dichas fallas.

Los documentos complementarios al EsIA (que también se encuentran en el Expediente 40-2002 SETENA) incluyen: un estudio geotécnico de taludes realizado por Ingeotec S.A. en diciembre del 2006; una evaluación geológica y geotécnica del riesgo de deslizamiento en las estaciones 31+450 a 32+050 elaborado por Herrera & Laporte en el 2009, y estudios geotécnicos específicos en las estaciones 18+300, 21+900, 25+700, 29+100, 34+800 por Ingeotec S.A. en el 2011.

Por otra parte la tesis de Mariela Ocampo (2016) retoma las unidades geológicas descritas por la empresa Macías y Vargas Soluciones Geotécnicas S.A. (M&V, 2000) durante el periodo en el que la obra estaba a cargo de la empresa Taiwanese, Moh and Associates, Inc (Expediente 40-2002 SETENA); las unidades geológicas “oficiales” reconocidas en este trabajo son las unidades: Aguacate, Monteverde, Alto Palomo, Unidad de Depósitos Lacustres e unidad de tobas y lahares. Sin embargo, en la descripción detallada con reconocimiento de campo M&V (2000) proponen las unidades geológicas-geotécnicas siguientes: depósitos Cuaternarios a Recientes, depósitos Cuaternarios a Pleistoceno inferior, depósitos del Terciario al Plioceno, depósitos del Terciario Mioceno medio a Plioceno, Unidades Volcánicas 1, 2 y 3, Flujos Volcánicos 1 y 2, Depósitos Lacustres Sedimentarios, Ceniza Volcánica y Depósitos Aluviales a Coluviales (ver Ocampo, 2016).

2.3. Estudios geológicos en la zona

A continuación, se mencionan los estudios geológicos, geomorfológicos, estructurales y de amenazas naturales regionales realizados en el área de interés de manera independiente a la construcción de la carretera.

En cuanto a geología, la mayoría de los estudios publicados son bastante restringidos con respecto al área de estudio total de este trabajo. Entre los mapas y estudios tomados en cuenta debido a que cubren una mayor parte del área, son más recientes y su exactitud es mayor, son: el Mapa Geológico de la Hoja Naranja a escala 1:50.00 de Huapaya & Rojas (2012), y el mapa

producto de la Campaña Geológica de la Escuela Centroamericana de Geología del año 2014 (Acuña et al, 2014). Para la parte del trazado de la carretera propiamente se tomó en cuenta el trabajo de Ocampo (2016) así como el estudio de M&V (2000) a pesar de existir información geológica recopilada por Gamboa (2005) usado por Vargas & Garro (2012), parte del informe LM-PI-AT-102-12(LanammeUCR, 2012). Otros estudios que abarcan parte del área de interés son: un estudio de los volcanes y las unidades lávicas del Cenozoico superior (Alvarado, 1984), un estudio de los centros volcánicos de Platanar-Aguas Zarcas (Alvarado & Carr, 1993), un estudio a detalle de la formación Alto Palomo (Villegas, 2004), un estudio sobre las Calderas concéntricas del volcán Platanar (Bergoeing & Brenes, 2007), además del trabajo de Alvarado & Gans (2012) que incluye datos y descripciones del volcán Platanar en su “Síntesis geocronológica del magmatismo, metamorfismo, y metalogenia de Costa Rica, América Central”.

Las unidades geomorfológicas regionales fueron descritas por Madrigal (1980) y son retomadas en algunos estudios, también existen mapas geomorfológicos escala 1:200 000 de la hoja San José (Madrigal & Rojas, 1980); del Grán Área Metropolitana (Madrigal & Salazar, 1993), un mapa escala 1:350 000 de Bergoeing et al. (1997), y la geomorfología de la hoja Naranjo escala 1:50 000 de Bergoeing & Malavassi (1981). Además existe un estudio específico del área de Palmares realizado por Bergoeing & Masís (2013).

Con respecto a los estudios neotectónicos más significativos, Alvarado et al. (1988b) identifican varias fallas entre Zarcero y Ciudad Quesada, siendo la más importante la falla de Zarcero; estas son luego retomadas en Alfaro et al. (2013). El mapa elaborado por el USGS (Montero et al, 1998), identifica las fallas Zarcero, Congo, Porvenir y el Viejo-Aguas Zarcas como fallas normales Cuaternarias con excepción de la falla Porvenir, considerada del Holoceno. Montero (2001) además identifica las fallas Florencia-La Palmera (también conocida como Florencia-Palmira) y Gata y detalla su interconexión con las fallas antes mencionadas. Rojas-Araya (2011) estudia en detalle la traza de la falla Zarcero y las fallas asociadas y finalmente, Astorga (2014) realiza un estudio de dicha falla en las proximidades de la ciudad.

El estudio de las amenazas naturales en el área de interés se basa principalmente en los mapas de la Comisión Nacional de Emergencias (CNE) para los cantones de San Ramón, Zarcero y San Carlos.

2.4. Estudios geotécnicos previos en la zona

A pesar de existir una cantidad considerable de estudios geotécnicos realizados en sitios específicos del proyecto, solo se ha podido tener acceso a una parte de ellos. Adicionalmente, estos poseen información sobre distintos parámetros y medidas necesarias para el diseño de las obras, por lo que se buscó principalmente los que tuvieran información sobre la litología y los suelos.

El Estudio de Impacto Ambiental presentado por Siel-Siel S.A. (2004) (el cual forma parte del Expediente 40-2002 SETENA) incluye datos de dos estudios geotécnicos realizados por empresas

consultoras; el primero a cargo de Moh & Associates, Inc. (2001), el cual corresponde con un análisis de estabilidad de taludes, y el segundo a cargo del Consorcio MAS & IMBSEN S.A. (2002) correspondiente a los sitios de construcción de los puentes. Sin embargo, no se tuvo acceso a los datos de estos dos informes.

El estudio de Ingeotec (2006) (Expediente 40-2002 SETENA) corresponde principalmente a un análisis de estabilidad de taludes, sin embargo indica que: “los suelos detectados a la profundidad máxima de 6,0 m y a lo largo de todo el proyecto es muy variada y varías de limos arcillosos de alta plasticidad a muy alta plasticidad, pudiendo ser caracterizados como MH en su mayor parte o ML en menor proporción, según el SUCS.” (Sistema unificado de Clasificación de Suelos).

La evaluación geológica y geotécnica del riesgo de deslizamiento realizado por Herrera & Laporte, (2009) (Expediente 40-2002 SETENA) resalta la inestabilidad de las laderas en este sitio, debido a las pendientes y la heterogeneidad en los materiales volcánicos presentes. Sin embargo, no menciona nada en cuanto a la calidad de los suelos. Se cuenta con la información de los estudios específicos realizados por Vieto & Asociados S.A: (Vieto, 2009, 2010, 2011) en las estaciones 17+200, 18+100, 18+700, 20+700 así como un estudio entre el km 18+100 y el km 18+450. Estos datos fueron usados para el análisis de datos geotécnicos en el capítulo 7. El informe del LanammeUCR LM-PI-AT-102-12 (2012) enumera una gran cantidad de estudios geotécnicos en sitios específicos de la carretera, entre ellos estudios en las estaciones 18+300, 21+900, 25+700, 29+100, 34+800 realizados por Ingeotec S.A. en el 2011 (en Expediente 40-2002, SETENA); sin embargo, no se ha podido tener acceso a esta información.

Por otra parte el estudio realizado por Vargas & Garro (2012) provee información sobre el ángulo crítico para cada una de las unidades geológicas locales determinadas en este proyecto. Esta información fue tomada en cuenta para la elaboración del capítulo de geotecnia, mientras que los resultados de la aplicación del método de Ángulo Crítico a lo largo de la ruta fueron tomados como parte de la información recopilada en el apartado 6.4 para la amenaza de inestabilidad de laderas en el área de estudio local.

Adicionalmente, se cuenta con un diagnóstico geotécnico realizado por la empresa Geomeka (2013, 2014), específicamente en el sitio del puente sobre el río La Laguna (quebrada Laguna), este comprende sondeos geofísicos e incluye la descripción de las unidades geotécnicas presentes. Por último, se tiene conocimiento de estudios geotécnicos teóricamente llevados a cabo a partir de julio del 2017 en 14 puntos específicos de la ruta por empresas consultoras a solicitud del CONAVI, sin embargo con la interrupción de las obras no se sabe si estos fueron completados.

3. MARCO TEÓRICO

En este capítulo se definen términos y metodologías relacionados con el ordenamiento territorial, la gestión del riesgo, así como la clasificación geotécnica de los materiales. Esto debido a que el propósito de este trabajo es proveer información sobre las condiciones naturales para un adecuado ordenamiento del territorio.

3.1. Ordenamiento Territorial

3.1.1. Definiciones

Índice de Fragilidad Ambiental: Según el Decreto N° 32967-MINAE, el Índice de Fragilidad Ambiental (IFA) se define como “el balance total de carga ambiental de un espacio geográfico dado, que resume la condición de aptitud natural del mismo (biótica, gea [sic.] y de uso potencial del suelo), la condición de carga ambiental inducida, y la capacidad de absorción de la carga ambiental adicional, vinculada a la demanda de recursos.”

Ordenamiento territorial: De manera general se tiene que: “El Ordenamiento Territorial es el proceso mediante el cual se orienta la ocupación y utilización del territorio y se dispone cómo mejorar la ubicación en el espacio geográfico de los asentamientos (población y vivienda), la infraestructura física (las vías, servicios públicos, las construcciones) y las actividades socioeconómicas.” (Otero et al, 1998)

Se entiende al Ordenamiento Territorial como la “expresión espacial de la política económica, social, cultural y ambiental de la nación, comunidad o municipio, mediante un enfoque articulado e interdisciplinario del desarrollo. Permite integrar el abordaje de los temas relacionados con la productividad y competitividad económica, la sostenibilidad ambiental y la cohesión social” (Plan Nacional de Desarrollo, 2011-2014: MIDEPLAN, 2010).

Plan regulador: La Ley de Planificación Urbana (N° 4240, 1968) define el Plan Regulador como “el instrumento de planificación local que define en un conjunto de planos, mapas, reglamentos y cualquier otro documento, gráfico o suplemento, la política de desarrollo y los planes para distribución de la población, usos de la tierra, vías de circulación, servicios públicos, facilidades comunales, y construcción, conservación y rehabilitación de áreas urbanas.”

Uso de la tierra: Según la Ley de Planificación Urbana (N° 4240, 1968), el uso de la tierra, es “la utilización de un terreno, de la estructura física asentada o incorporada a él, o de ambos casos, en cuanto a clase, forma o intensidad de su aprovechamiento.”

3.1.2. Evolución del Ordenamiento Territorial

El Ordenamiento Territorial (OT) también puede considerarse como un “proceso y estrategia de planificación, con carácter técnico-político, a través del cual se pretende configurar, en el corto,

mediano y largo plazo, una organización del uso y ocupación del territorio, acorde con las potencialidades y limitaciones del mismo, las expectativas y aspiraciones de la población y los objetivos sectoriales de desarrollo (económicos, sociales, culturales y ambientales). Se concreta por medio de planes que expresan el modelo territorial que la sociedad percibe como deseable y las estrategias que se aplicarán para evolucionar hacia dicho modelo” (Palacio-Prieto et al., 2004).

Mundialmente, la aparición del concepto de planificación del territorio está ligado al surgimiento del concepto de zonación, a finales del siglo XIX. Las diferentes tipologías en la evolución de ordenamiento del territorio en el caso de Estados Unidos y Gran Bretaña, definidas por Walters (2007) son las siguientes:

- Planificación tradicional o exhaustiva (después de la Segunda Guerra Mundial): se concentra en definir la forma y contenido del nuevo desarrollo.
- Planificación de sistemas (1950s-1970s): con una visión más analítica visualiza el área de planificación como una serie de procesos complejos.
- Planificación Democrática (1960s): permitió a la sociedad participar en los procesos de planificación de las comunidades.
- Planificación de la defensa y equidad (1960s y 1970s): parte de la planificación democrática que se concentra en abordar las cuestiones sociales de inequidad e injusticia.
- Planificación estratégica (1960s al presente): reconoce objetivos de pequeña escala y las restricciones del mundo real.
- Planificación ambiental (1960s al presente): surge como consecuencia de una más amplia comprensión de los efectos ecológicos y sociales del desarrollo global.

Por otra parte, en América Latina el desarrollo fue más tardío; según Cabeza (2002) la planificación regional se da a partir de los mil novecientos cuarentas, la planificación urbana a partir de los cincuentas, la planificación económica a partir de los sesentas, la planificación ambiental a partir de los setentas y el ordenamiento del territorio a partir de mil novecientos ochenta.

En Costa Rica, la ordenación del territorio inicia legalmente con la Ley de Planificación Urbana (Ley No. 4240) promulgada en 1968 y la cual establece los lineamientos principales para el desarrollo urbano y la generación de planes reguladores. En 1982 se publica el Reglamento para el Control Nacional de Fraccionamiento y Urbanizaciones (No 3332 del INVU), y en 1987 una reforma al Reglamento de Construcciones del INVU (No 3822) la cual modificaba la Ley de Construcciones de 1949 (Ley 833). Además existen, una serie de leyes y reglamentos que influyen directamente el marco jurídico del Ordenamiento Territorial Ambiental de Costa Rica, en los ámbitos urbano y ambiental (Ver tabla 1). Varios textos han sido sometidos a la Asamblea Legislativa, con el fin de unificar el marco legal, sin embargo no se ha logrado aprobar ninguno por lo que aún no existe una Ley de Ordenamiento Territorial integral. Más recientemente se publicaron una Política Nacional de Ordenamiento Territorial [2012 a 2040] (MIVAH, 2012) y un

Plan Nacional de Ordenamiento Territorial [2014 a 2020] (MIVAH, 2013), con lo cual se inicia la formalización del Ordenamiento Territorial como política de Estado

Con respecto a la gestión del riesgo, cabe resaltar que la PNOT establece que se “debe de brindar especial atención a la determinación y ubicación de zonas de riesgo no aptas para la localización de asentamientos humanos, ya sea por vulnerabilidad y amenaza ambiental, o por salubridad.” Por lo tanto el Ordenamiento Territorial constituye un instrumento de vital importancia para hacer valer las condiciones mínimas de seguridad y habitabilidad de los asentamientos humanos, y con un enfoque de prevención, permite minimizar el impacto de la ocurrencia de desastres (CNE, 2014a).

3.1.3. Marco legal y metodologías oficiales en Costa Rica

A continuación se mencionan algunas de las normas que influyen directamente el marco jurídico del Ordenamiento Territorial Ambiental de Costa Rica. Para un panorama más completo se recomienda consultar el *Decimoséptimo Informe Estado De La Nación: Ordenamiento Territorial En Costa Rica, 2010* (Astorga, 2011).

Con respecto al desarrollo urbano, la Ley de Planificación Urbana (No. 4240, 1968) define la creación de la Dirección de Urbanismo adscrita al INVU, la cual está encargada de Elaborar el Plan Nacional de Desarrollo Urbano y aprobar los Planes Reguladores. Establece que las Municipalidades son las encargadas de planificar y controlar el desarrollo urbano, a través de los reglamentos de desarrollo urbano, las zonificaciones y otros instrumentos. Dispone de un transitorio, el cual establece que el INVU estará encargado de dictar las normas para elaborar los Reglamentos de Desarrollo Urbano, y elaborar los planes reguladores, en tanto las municipalidades no hayan promulgado sus propias disposiciones al respecto. Sin embargo, parte de esto nunca se cumplió y existían muchos cantones sin planes reguladores antes de la publicación del Decreto N° 32967-Minae.

Por otra parte el Decreto N° 32967-Minae establece el Manual de Instrumentos Técnicos para el proceso de Evaluación de Impacto Ambiental (Manual de EIA- Estudio de Impacto Ambiental) el cual busca la introducción de la variable ambiental en los Planes Reguladores u otra Planificación de uso de la tierra. Este manual propone el uso de los índices de Fragilidad Ambiental como instrumentos para evaluar la aptitud del terreno en sus diferentes aspectos y para sus distintos usos potenciales. Se basa en cuatro ejes de información ambiental: geoaptitud, bioaptitud, edafoaptitud, y antroaptitud. Cada factor de IFA aptitud o IFA aptitud integrada se divide en las siguientes categorías (Tabla 1), con una denominación y código de color preestablecido.

Tabla 1: Clasificación de los índices de fragilidad ambiental.

IFA aptitud muy alta (Zona I)
IFA aptitud alta (Zona II)
IFA aptitud moderada (Zona III)
IFA aptitud baja (Zona IV)
IFA aptitud muy baja (Zona V)

El manual recalca que: “Es importante aclarar que el hecho de que el IFA geoaptitud tenga una calificación muy alta, significa que tiene la mayor cantidad de limitantes técnicas por geoaptitud y la menor cantidad de potencialidades técnicas. La situación es inversa, cuando se trata de la IFA Geoaptitud muy bajo.” (Decreto N° 32967).

Para la elaboración de los IFAs, cada uno de los ejes toma en cuenta distintos parámetros (por ejemplo dureza del material, consistencia, lineación, meteorización, entre otros para el factor Litopetrofísico) y se apoya en una tabla para la clasificación cualitativa de los parámetros basado en el criterio de experto (Astorga, comentario oral, 2016). Por lo tanto, la metodología tiene mayor efectividad para el estudio de las condiciones geológicas del terreno a escala local (1:1 000 a 1:10 000) y se torna más complicado e inexacto a una escala mayor (1:25 000 a 1:50 000). En consecuencia, no se usó la metodología de los IFAs para la caracterización geológica del terreno en este trabajo.

3.2. Gestión del riesgo y amenazas naturales

3.2.1. Definiciones

Amenaza: Según la ley 8488 (Ley Nacional de Emergencias y Prevención del Riesgo, 2005) se define como amenaza el “peligro latente representado por la posible ocurrencia de un fenómeno peligroso, de origen natural, tecnológico o provocado por el hombre, capaz de producir efectos adversos en las personas, los bienes, los servicios públicos y el ambiente”.

Desastre: de acuerdo con la legislación (Ley 8488, 2005) un desastre es una “situación o proceso que se desencadena como resultado de un fenómeno de origen natural, tecnológico o provocado por el hombre que, al encontrar, en una población condiciones propicias de vulnerabilidad, causa alteraciones intensas en las condiciones normales de funcionamiento de la comunidad, tales como pérdida de vidas y de salud de la población, destrucción o pérdida de bienes de la colectividad y daños severos al ambiente”.

Gestión del riesgo: se define la gestión del riesgo como el “proceso mediante el cual se revierten las condiciones de vulnerabilidad de la población, los asentamientos humanos, la infraestructura, así como de las líneas vitales, las actividades productivas de bienes y servicios y el ambiente. Es un modelo sostenible y preventivo, al que incorporan criterios efectivos de prevención y mitigación

de desastres dentro de la planificación territorial, sectorial y socioeconómica, así como a la preparación, atención y recuperación ante las emergencias” (Ley 8488, 2005).

Riesgo: es la “probabilidad de que se presenten pérdidas, daños o consecuencias económicas, sociales o ambientales en un sitio particular y durante un periodo definido. Se obtiene al relacionar la amenaza con la vulnerabilidad de los elementos expuestos” (Ley 8488, 2005).

Vulnerabilidad: es definido como la “condición intrínseca de ser impactado por un suceso a causa de un conjunto de condiciones y procesos físicos, sociales, económicos y ambientales. Se determina por el grado de exposición y fragilidad de los elementos susceptibles de ser afectados – la población, sus haberes, las actividades de bienes y servicios, el ambiente – y la limitación de su capacidad para recuperarse” (Ley 8488, 2005).

3.2.2. Riesgo, amenaza y vulnerabilidad

En su sentido más amplio, Mora (2001) define la amenaza como “un acontecimiento, suceso o circunstancia física, proceso natural o actividad humana que, en el caso de haber alcanzado o superado una intensidad específica, puede implicar la pérdida de vida humana, heridas o daños a los bienes sociales, económicos, o ambientales”. Agrega que las condiciones latentes que pueden representar un peligro futuro pueden ser tanto de origen natural o antrópicos. Además, especifica que las amenazas pueden ser individuales, compuestas, secuenciales o combinadas en sus orígenes y efectos y que cada amenaza es caracterizada por su lugar, intensidad, frecuencia, probabilidad y recurrencia (Mora, 2001). De manera cuantitativa, la probabilidad de que una amenaza produzca pérdidas está relacionada con la intensidad (“a”) y la frecuencia con que se presenta (probabilidad de aparición) (CNE, 2014a). Sin embargo, existen diversas metodologías para cuantificar las amenazas, según su tipo. Para efectos de este trabajo, son de interés las amenazas naturales las cuales se pueden clasificar en (figura 4): hidrometeorológicas, relacionadas a la geodinámica interna (sismicidad, vulcanismo), relacionadas a la geodinámica externa (erosión, deslizamientos), y biológicas (CNE, 2014a).

En segunda instancia, la vulnerabilidad, de acuerdo con la Estrategia Internacional para la Reducción de Riesgos a Desastres (EIRD) de la Organización de las Naciones Unidas (ONU), corresponde a las características y las circunstancias de una comunidad, sistema o bien, que los hacen a estos susceptibles a los efectos dañinos de una amenaza (CNE, 2014a). Esta se caracteriza por ser: multi-dimensional y diferencial (varía a lo largo del espacio geográfico y dentro de los grupos sociales), dependiente de la escala de medición (tiempo, espacio y la unidad de análisis sea esta individual, comunitaria, municipal o regional) y dinámica (debido a sus características y a las fuerzas genéricas de su variación a lo largo del tiempo), lo cual dificulta su cálculo o estimación. Los factores que aumentan la vulnerabilidad de los elementos expuestos (bienes, servicios y funciones sociales, económicas, ambientales y naturales) son de origen ambiental, físico, económico y social (CNE, 2014a), mientras que los elementos que se pueden usar para medir y

caracterizar la vulnerabilidad, según Cardona (2003), son la exposición, fragilidad social y resiliencia débil o nula.



Figura 4: Clasificación de las amenazas según su origen. (Modificado de: CNE, 2014a)

Tal y como se definió anteriormente, el riesgo es una función de dos variables: la amenaza y la vulnerabilidad. Keipi et al. (2005) agregan que ambas variables son condiciones necesarias para expresar al riesgo, el cual se define como la probabilidad de pérdidas, en un punto geográfico definido y dentro de un tiempo específico. Recalcan que mientras que los sucesos naturales no son siempre controlables, la vulnerabilidad sí lo es. La gestión del riesgo según estos autores, tiene como sentido la reducción anticipada de las pérdidas que podrían generar los desastres en el futuro, y se define como el proceso de identificar, analizar y cuantificar las probabilidades de pérdidas que pueden originar los desastres, para con ello emprender las acciones preventivas, correctivas y reductivas correspondientes. Por otra parte, los enfoques modernos consideran el riesgo como una construcción social, ya que está vinculado con la realidad de cada sociedad y su entorno, incluyendo sus actividades y estilos de vida (CNE, 2014b).

De manera alterna, la gestión del riesgo se define como un “proceso continuo de análisis, planificación de la toma de decisiones y ejecución de acciones para identificar, prevenir y reducir las posibilidades de que un evento potencialmente destructivo (amenaza) cause daño o perturbación grave en la vida de las personas, el tejido socioeconómico, los medios de subsistencia y los ecosistemas de los territorios, así como establecer las herramientas para responder de forma adecuada, en caso de que de todas formas se materialice un impacto, con el objetivo de permitir una recuperación eficiente, sin reconstruir la vulnerabilidad, después de un desastre” (CIF-OIT, 2013). Según Keipi et al. (2005), un enfoque integral de la gestión del riesgo pone énfasis en las medidas ex-ante y ex-post y depende esencialmente de: (a) la identificación y análisis del riesgo;

(b) la concepción y aplicación de medidas de prevención y mitigación; (c) la protección financiera mediante la transferencia o retención del riesgo; y (d) los preparativos y acciones para las fases posteriores de atención, rehabilitación y reconstrucción. Sin embargo, esto no necesariamente se da en la realidad.

3.2.3. Gestión del riesgo en Costa Rica

La Gestión del Riesgo presenta ámbitos distintos de intervención, entre ellos: nacional, regional, sectorial, local, comunitario y familiar. Además, requiere la existencia y el funcionamiento de sistemas, estructuras organizaciones e instituciones (Mora y Barrios, 2001). En el caso de Costa Rica, dicha organización se da mediante el Sistema Nacional de Gestión del Riesgo (SNGR). Este fue creado por la Ley 8488, bajo el siguiente concepto “entendido como la articulación integral, organizada, coordinada y armónica de los órganos, las estructuras, las relaciones funcionales, los métodos, los procedimientos y los recursos de todas las instituciones del Estado, procurando la participación de todo el sector privado y la sociedad civil organizada”. Su propósito es incorporar el concepto de la gestión del riesgo como eje transversal de la planificación en el aprovisionamiento presupuestal y prácticas del desarrollo (CNE, 2014b). En este sentido, corresponde a la Comisión Nacional de Prevención de Riesgos y Atención de Emergencias, creada mediante la ley 8488, la elaboración de planes y políticas para la gestión del riesgo en el país, como lo son la Política Nacional de Gestión del Riesgo 2016-2030 (CNE, 2015a - corresponde al artículo 5) y el Plan Nacional de Gestión del Riesgo 2016-2030 (CNE, 2015b - Artículo 7) disponibles en línea (<http://politica.cne.go.cr/>).

Los procesos que comprenden la Gestión del Riesgo en el ámbito municipal, según una guía del CNE (2014a), son el conocimiento del riesgo, la reducción del riesgo, la prevención del riesgo, la protección financiera, la preparación para la respuesta y recuperación y el manejo del desastre y reconstrucción. Estos autores proponen que la gestión correctiva, prospectiva y reactiva del riesgo son enfoques complementarios en la inserción de la gestión como insumo al desarrollo local sostenible y en los procesos de ordenamiento territorial, y como complemento indiscutible de los Planes Reguladores Cantonales.

Las instancias de coordinación del SNGR están conformados por: actores de la administración central, administración pública descentralizada, gobiernos locales, sector privado y sociedad civil organizada. Entre ellos se pueden mencionar: Comités Institucionales para la Gestión del Riesgo, Centro de Operaciones de Emergencia (COE), Comités Asesores Técnicos (CAT), Comités Regionales de Emergencia (CRE), Comités Municipales de Emergencia (CME) y Comités Comunales de Emergencias (CCE) (CNE, 2014b). Para más información sobre la estructura organizacional del SNGR consultar la guía de Gestión Municipal de Riesgos y Desastres (CNE, 2014b).

3.3. Caracterización geotécnica de los materiales

Los suelos provienen de la descomposición de las rocas debido a la acción erosiva (física, química y biológica), alteración y meteorización de los diferentes factores ambientales, que la convierten en partículas finas. Estas partículas, junto con materia orgánica, bacterias, agua y aire, forman el suelo. El perfil de erosión del suelo se divide en varios horizontes, que van desde la roca madre en profundidad hasta la superficie de suelo cargado de materia orgánica. Además, el suelo se puede estudiar desde la perspectiva geológica, edafológica, biológica y geotécnica.

Desde el punto de vista geotécnico, el suelo cuenta con una serie de características, como: estar formado por partículas de diverso origen y granulometría, tener una estructura y fábrica específica, presentar vacíos rellenos por aire o agua, entre otros, que determinan el comportamiento del suelo frente a alteraciones de origen antrópico. El estudio de estas características para prever el comportamiento de los suelos frente a un determinado tipo de construcciones y soportes, es la motivación de la parte geotécnica de este estudio.

3.3.1. Definiciones

Para las partículas retenidas en el tamiz de 75 mm (3") según los estándares Estadunidenses, se sugieren las siguientes definiciones (Derivados de la norma ASTM D2487 – 11):

- **Fragmentos:** Partículas de roca que no pasan una malla con abertura cuadrada de 300 mm (12").
- **Guijarros:** Partículas de roca que pasan una malla con abertura cuadrada de 300 mm (12") y quedan retenidas en un tamiz de 75 mm (3").
- **Grava:** Partículas de roca que pasan un tamiz de 75 mm (3") y quedan retenidas sobre un tamiz de 4.75 mm (No.4) con las siguientes subdivisiones:
 - Gruesa: Pasa tamiz de 75 mm (3") y queda retenida sobre tamiz de 19 mm (3/4")
 - Fina: Pasa tamiz de 19 mm (3/4") y queda retenida sobre tamiz de 4.75 mm (No.4).
- **Arena:** Partículas de roca que pasan un tamiz de 4.75 mm (No.4) y quedan retenidas sobre un tamiz de 75 μ m (No.200) con las subdivisiones siguientes:
 - Gruesa: Pasa tamiz de 4.75 mm (No.4) y queda retenida sobre tamiz de 2.00 mm (No.10).
 - Media: Pasa tamiz 2.00 mm (No.10) y queda retenida sobre tamiz de 425 μ m (No.40).
 - Fina: Pasa tamiz de 425 μ m (No.40) y queda retenido sobre tamiz de 75 μ m (No.200).
- **Arcilla:** Suelo que pasa tamiz de 75 μ m (No.200); el cual puede mostrar la plasticidad (consistencia como de masilla) dentro de un cierto intervalo de humedad, pero que muestra considerable resistencia cuando se seca al aire. Para su clasificación, una arcilla es un suelo de grano fino, o la porción fina de un suelo con un índice de plasticidad igual o mayor que

4, para la cual la ubicación correspondiente al valor de índice plástico contra el valor de límite líquido, en la carta de plasticidad, cae sobre o por encima de la línea "A".

- Limo: Suelo que pasa tamiz de 75 μm (No.200), ligeramente plástico o no plástico y que exhibe poca o ninguna resistencia cuando se seca al aire. Para clasificación, un limo es un suelo de grano fino, o la porción fina de un suelo con índice plástico menor que 4, para el cual la ubicación correspondiente al valor del índice plástico contra el valor de límite líquido cae por debajo de la línea "A", en la carta de plasticidad.
- Arcilla orgánica: Una arcilla con suficiente contenido orgánico como para influir en las propiedades del suelo. Por clasificación, una arcilla orgánica es un suelo que sería clasificado como arcilla, excepto que el valor de su límite líquido después de secada en el horno es menor que el 75 % de dicho valor antes del secado.
- Limo orgánico: Un limo con suficiente contenido orgánico como para influir en las propiedades del suelo. Por clasificación, un limo orgánico es un suelo que sería clasificado como limo, excepto que su valor de límite líquido después de secarse en el horno es menor que el 75 % de dicho valor antes del secado.
- Turba: Un suelo primordialmente compuesto por tejidos vegetales en estados variables de descomposición, usualmente con olor orgánico, color entre café oscuro y negro, una consistencia esponjosa, y una textura que varía desde fibrosa hasta amorfa.

Contenido de humedad: es la relación entre el peso del agua que contiene la muestra y el peso de las partículas sólidas (González de Vallejo, 2002). Se determina mediante la relación entre el peso húmedo (W_w) y el peso seco (W_s) después de secar la muestra al horno, y se expresa como porcentaje:

$$\omega = \frac{W_w}{W_s}$$

Gravedad específica: corresponde con la media de la gravedad específica de cada una de las partículas que componen la muestra de suelo. Es determinado en laboratorio, al medir el volumen que ocupa una muestra de suelo (seca y disgregada, de peso conocido) por desplazamiento de volumen de agua en un recipiente previamente tasado (picnómetro) (González de Vallejo, 2002). Se determina con la siguiente relación, con respecto al peso específico seco (γ_s) y peso específico saturado (γ_w) ó el contenido de humedad del suelo (W_s) y el volumen de vacíos (V_s):

$$G_s = \frac{\gamma_s}{\gamma_w} = \frac{W_s}{(V_s * \gamma_w)}$$

3.3.2. Clasificación de suelos

La clasificación de suelos divide éstos en suelos de grano grueso, suelos de grano fino y suelos orgánicos. Los suelos de grano grueso y fino se distinguen mediante el paso del material por la malla # 200. El Sistema Unificado de Clasificación de Suelos (Casagrande, 1947) propone una clasificación estandarizada de los suelos basada en la granulometría, y los límites de consistencia

(plasticidad), tal y como se observa en la Tabla 3. Estos datos serán complementados con información sobre la gravedad específica, peso unitario, contenido de humedad, y porosidad, de la muestra.

Para una correcta clasificación de los suelos, se lleva a cabo análisis de la granulometría de las partículas que lo componen; para esto se realiza un análisis granulométrico primero por vía seca y luego por vía húmeda (González de Vallejo, 2002). El análisis por vía seca sirve principalmente para separar las partículas de mayor tamaño, y se realiza después de seca la muestra al horno. La muestra seca pasa sucesivamente por los tamices principales de la lista propuesta a continuación (tabla 2): 12", 3", ¾", No. 4, No. 10, No. 40 y No. 200, y se mide el peso del material retenido con el cual se calcula el porcentaje de material que pasó por el tamiz.

Tabla 2: Lista de los tamices principales usados para las normas ASTM con las aberturas correspondientes.

Tamiz #	Abertura	Tamiz #	Abertura
12"	300 mm	No. 8	2,36 mm
3"	75 mm	No. 10	2 mm
2 1/2"	62,5 mm	No. 16	1,18 mm
2"	50 mm	No. 20	850 µm
1 1/2"	37,5 mm	No. 30	600 µm
1"	25 mm	No. 40	425 µm
¾"	19 mm	No. 50	300 µm
1/2"	12,5	No. 60	250 µm
3/8"	9,5 mm	No. 100	150 µm
No. 4	4,75 mm	No. 200	75 µm

El material que pasa la malla No. 200, correspondiente a los limos y arcillas, es separado luego por vía húmeda ó sedimentación con hidrómetro. Para esto se mezcla el material fino con agua en una probeta, de manera que las partículas sólidas se encuentren en suspensión, y luego se deja en reposo para que se dé la sedimentación, durante la cual se mide las densidades de la muestra con un hidrómetro. Para determinar el tamaño de las partículas durante su caída en el agua se usa la ley de Stokes, la cual determina la velocidad de caída con respecto al tamaño (diámetro) de las partículas.

Con los resultados del análisis granulométrico, se construye la curva granulométrica, con la cual se procede a clasificar los suelos según el tamaño de partículas predominantes. Algunos porcentajes son importantes para clasificar el comportamiento de la curva y los tamaños de granos: D₁₀ (10% de la curva), D₁₅ (15%), D₃₀ (30%: determina la uniformidad), D₅₀ (tamaño promedio) y D₆₀ (60%). Además, se determina la fracción de grava (retenida por la malla No. 4), la fracción de arena (que pasa la malla No. 4 pero es retenida por la malla No. 200) y el contenido de finos (que pasa la malla No. 200).

Para los suelos con predominancia de partículas gruesas, se usan los coeficientes de uniformidad (C_u) y el coeficiente de curvatura (C_c), con el fin de determinar la gradación del

material. El coeficiente de uniformidad describe la uniformidad del material: entre mayor sea el valor, menos uniforme es, y se calcula como $C_u = \frac{D_{60}}{D_{10}}$. El coeficiente de curvatura muestra la uniformidad o no-uniformidad en la distribución de los materiales y se calcula con la siguiente ecuación:

$$C_c = \frac{(D_{30})^2}{D_{10}D_{60}}$$

Para los suelos con predominancia de partículas finas, estos se caracterizan según su consistencia usando los siguientes límites de Attenberg, determinados con la fracción de suelo que pasa el tamiz No. 40:

- Límite líquido (L_L): separa el estado plástico del semi-líquido.
- Límite plástico (L_P): separa el estado semisólido del plástico.
- Índice de plasticidad: representa el intervalo de humedades para pasar del estado semisólido al semilíquido y se determina usando la carta de plasticidad como $I_P = L_L - L_P$.

Finalmente, la nomenclatura general para el Sistema Unificado de Clasificación de Suelos usa los siguientes códigos: para suelos de grano grueso estos se dividen en gravas (G) y arenas (S) y la gradación (correspondiente a la segunda letra) se divide en bien gradado (W) y mal gradado (P). Para los suelos de grano fino, estos se dividen en limos inorgánicos (M), arcillas inorgánicas (C), limos y arcillas orgánicos (O) y turbas o lodos altamente orgánicos (Pt) a los cuales se le agrega el índice de plasticidad: baja plasticidad (L) o alta plasticidad (H). Con esto se puede realizar la clasificación de los suelos según la tabla 3.

Tabla 3: Resumen del Sistema Unificado de Clasificación de Suelos modificado de González de Vallejo (2002) y basado en la norma ASTM D2487-11.

Identificación en el campo (excluyendo las partículas mayores a 7,6 cm y basando las fracciones en pesos estimados)				Simbolo del grupo	Nombres típicos					
Suelos de grano grueso-Más la mitad del material es retenido por el tamiz No. 200	Gravas-más de la mitad de la fracción gruesa es retenida por el tamiz N°. 4	Para la clasificación visual puede suponerse que la abertura del tamiz N°. 4 es equivalente a medio centímetro	Gravas limpias (con pocos finos o sin ellos)	Amplia gama de tamaños y cantidades apreciables de todos los tamaños intermedios	GW	Gravas bien graduadas, mezclas de gravas y arena con pocos finos o sin ellos				
			Gravas con finos (cantidad apreciable de finos)	Predominio de un tamaño o un tipo de tamaños, con ausencia de algunos tamaños intermedios	GP	Gravas mal graduadas, mezclas de gravas y arena con pocos finos o sin ellos				
			Arenas limpias (con pocos finos o sin ellos)	Fracción fina no plástica (para la identificación ver el grupo ML más abajo)	GM	Gravas limosas, mezclas mal graduadas de grava, arena y arcilla				
			Arenas con finos (cantidad apreciable de finos)	Finos plásticos (para identificación ver el grupo CL más abajo)	GC	Gravas arcillosas, mezclas mal graduadas de grava, arena y arcilla				
	Arenas-más de la mitad de la fracción gruesa pasa por el tamiz N°. 4	Para la clasificación visual puede suponerse que la abertura del tamiz N°. 4 es equivalente a medio centímetro	Gravas limpias (con pocos finos o sin ellos)	Amplia gama de tamaños y cantidades apreciables de todos los tamaños intermedios	SW	Arenas bien graduadas, arenas con grava con pocos finos o sin ellos				
			Arenas con finos (cantidad apreciable de finos)	Predominio de un tamaño o un tipo de tamaños, con ausencia de algunos tamaños intermedios	SP	Arenas mal graduadas, arenas con grava, con pocos finos o sin ellos				
			Arenas limpias (con pocos finos o sin ellos)	Finos no plásticos (para identificación ver el grupo ML más abajo)	SM	Arenas limosas, mezclas de arena limo mal graduadas				
			Arenas con finos (cantidad apreciable de finos)	Finos plásticos (para identificación ver el grupo CL más abajo)	SC	Arenas arcillosas, mezclas mal graduadas y arenas y arcillas				
	Métodos de identificación para la fracción que pasa por el tamiz N°. 40									
	Suelos de grano fino-Más de la mitad del material pasa por el tamiz N°. 200	Limos y arcillas con limite liquido menor de 50	Resistencia en estado seco (a la disgregación)	Distancia (reacción a la agitación)	Tenacidad (consistencia)		Limos inorgánicos y arenas muy finas, polvo de roca, arenas finas limosas o arcillosas con ligera plasticidad			
Nula a ligera							Rápida a lenta	Nula	ML	
Media a alta							Nula a muy lenta	Media	CL	
Limos y arcillas con limite liquido mayor de 50		Resistencia en estado seco (a la disgregación)	Distancia (reacción a la agitación)	Tenacidad (consistencia)			Arenas inorgánicas de plasticidad baja a media, arcillas con grava, arcillas arenosas, arcillas limosas			
							Ligera a media	Lenta	Ligera	OL
							Ligera a media	Lenta a nula	Ligera a media	MH
Limos y arcillas con limite liquido mayor de 50	Resistencia en estado seco (a la disgregación)	Distancia (reacción a la agitación)	Tenacidad (consistencia)			Limos orgánicos y arcillas limosas orgánicas de baja plasticidad				
						Alta a muy alta	Nula	Alta	CH	
Limos y arcillas con limite liquido mayor de 50	Resistencia en estado seco (a la disgregación)	Distancia (reacción a la agitación)	Tenacidad (consistencia)			Arcillas inorgánicas de plasticidad elevada, arcillas grasas				
						Media a alta	Nula a muy lenta	Ligera a media	OH	
Suelos altamente orgánicos			Fácilmente identificables por su color, olor, sensación esponjosa y frecuentemente por su textura fibrosa		Pt	Turba y otros suelos altamente orgánicos				
Los suelos que poseen características de dos grupos se designan con la combinación de los dos símbolos. P. ej., GW-GC, mezcla bien graduada de arena y grava. Todos los tamaños de tamices se refieren al U.S. Standard										

4. GEOMORFOLOGIA

4.1. Recopilación bibliográfica

Las descripciones de las unidades geomorfológicas regionales (figura 5) fueron tomadas del Manual Descriptivo del Mapa Geomorfológico de Costa Rica 1:200 000 de Madrigal & Rojas (1980), y el Mapa Geomorfológico en sí (Madrigal, 1980) así como el Mapa Geomorfológico de la hoja San José (Madrigal & Rojas, 1980b), debido a que cubren toda el área de interés. Se tomaron en cuenta también otros trabajos como el mapa geomorfológico de la hoja Naranjo de Bergoeing & Malavassi (1982), así como el folleto explicativo “Geomorfología del Valle Central de Costa Rica” de Bergoeing & Malavassi (1982b). Se consultó la hoja San José del Atlas Geomorfológico de Costa Rica escala 1: 350 000 de Bergoeing et al. (1997) y el trabajo de Bergoeing & Masís (2013) en San Ramón y Palmares, el cual describe la geomorfología local. Además, se usó la distribución espacial de las unidades tal y como vienen en la capa de Geomorfología del Atlas Digital de Costa Rica 2008, obtenido a través de la página de Infraestructura de Datos Espaciales (IDE) para la región Huetar Norte del Instituto Tecnológico de Costa Rica (TEC), la cual está basada en los mapas de Madrigal & Rojas (1980b).

I. Formas de origen volcánico

a) Volcán Poás

Esta unidad corresponde al edificio volcánico del volcán Poás en su sentido más amplio, el cual se ubica al oeste de la Cordillera Volcánica Central, y cubre una gran parte del área de interés de este trabajo. Madrigal & Rojas (1980) le asocian los centros volcánicos eruptivos de los Cerros Platanar, Porvenir, El Viejo y los maares de Laguna Hule y Congo. Según Madrigal & Rojas (1980), las rocas provienen de la actividad eruptiva del Poás y corresponden principalmente a andesitas, además de brechas, ignimbritas y piroclastos. La edad de las diferentes unidades va del Pleistoceno medio al Holoceno (Ruiz et al, 2010 y Ruiz et al., 2019).

La mayoría de las morfologías descritas por Bergoeing & Malavassi (1982) están comprendidas en esta unidad general, la cual presenta todo tipo de pendientes y morfologías asociadas a formas denudacionales de origen volcánico. Según Bergoeing & Malavassi (1982) incluye lo siguiente: frentes de coladas de lava, lahares o avenidas torrenciales de origen volcánico, conos disectados de piedemonte volcánico y conos coluvio-aluviales; así como rasgos erosionales como deslizamientos en masa por soliflucción, desprendimientos por gravedad o reptación, divisorias de aguas, relieves residuales y taludes de erosión. Esta unidad se puede asociar a los *Piedemontes Volcánicos Cuaternarios* descritos en Bergoeing & Malavassi (1982b); aquí corresponde específicamente al piedemonte del complejo Platanar-Porvenir-Viejo formado por estratovolcanes y compuesto por depósitos alternos de lavas, cenizas, lahares y depósitos torrenciales, que dan origen a un relieve ondulado y muy disectado, con espesores variables de suelos residuales poco cohesivos.

La clasificación de Madrigal & Rojas (1980) incluye también los poblados de Palmares y San Ramón, los cuales según Bergoeing & Malavassi (1982b) están insertos en Piedemonte volcánico oeste y pertenecen a la *Depresión de acumulación volcano-lacustre*. La cuenca de Palmares corresponde a un antiguo centro de emisión volcánico Neógeno (Plioceno) colapsado y rellenado posteriormente por sedimentos lacustres y volcánicos que se extendieron hasta San Ramón. El mapa geomorfológico de la hoja Naranjo (Bergoeing & Malavassi, 1982) incluye las calderas de Palmares y San Ramón -definidos como paleo-lagos con control tectónico por Rojas (2013)-, así como los cauces de los ríos, taludes de erosión, áreas de depositación fluvio-lacustres, conos coluvio-aluviales, terrazas fluviales y rasgos erosionales mencionados anteriormente.

b) Cerros y valles del Aguacate

Según Madrigal & Rojas (1980), esta unidad morfológica se extiende entre el río Barranca y el Valle Central, y cubre una pequeña porción del SW del área de interés. Está caracterizada por laderas con muy fuertes pendientes hasta escarpadas, divisorias angostas, espacios inter-fluviales anchos y una gran cantidad de colinas con forma cónica correspondientes a viejos centros volcánicos. Las rocas pertenecen a la Formación Aguacate y corresponden a andesitas, basaltos andesíticos además de otras lavas, piroclastos, aglomerados y corrientes de lodo, brechas e ignimbritas. En estas rocas es frecuente la alteración hidrotermal y las mineralizaciones asociadas a intrusiones produciendo vetas auríferas. La unidad es de origen volcánico y su edad tentativa es Mioceno superior a Plioceno medio.

Bergoeing & Malavassi (1982b) asocian esta zona con el *Piedemonte Volcánico Oeste* compuesto por depósitos volcánicos (andesitas, tobas, lahares y depósitos de piedemonte) del Grupo Aguacate, cuyos centros de emisión ya no se distinguen debido a la erosión. Las serranías presentan relieve ondulado, completamente deforestado debido a la acción antrópica, causando una erosión severa que ha favorecido los procesos de remoción en masa, solifluxión y desprendimientos por gravedad. En el mapa geomorfológico de la hoja Naranjo (Bergoeing & Malavassi, 1982) se observan parte de los cauces de los ríos, taludes de erosión, áreas de depositación fluvio-lacustres, conos coluvio-aluviales, terrazas fluviales y rasgos erosionales de la zona de San Ramón.

c) Lomeríos de fuerte pendiente en Cordillera de Tilarán

Con dirección al sureste, se extienden desde la ciudad de Tilarán y hasta el Río Barranca (límite tentativo) y cubren una pequeña porción del oeste del área de interés. Presentan fuerte relieve, con pendientes cercanas a 30°, fondos de valles angosto, y cimas de lomas y cerros angostas pero redondeadas. Están compuestos por lavas basálticas y andesíticas, aglomerados, tobas e ignimbritas de las formaciones Aguacate y Monteverde en su mayoría. La unidad es de origen volcánico y su edad tentativa es Mioceno superior a Plioceno (Madrigal & Rojas, 1980).

Bergoeing et al. (1997), asocian esta zona con depósitos volcánicos del Terciario, cortados por gran cantidad de fallas normales con direcciones predominantes hacia el noreste-suroeste y noroeste-sureste, así como valles fluviales en “V”.

d) Falda baja del NE de Cordillera de Tilarán

Esta unidad se localiza al oeste del poblado de Santa Clara, cubre una pequeña parte del noroeste del área de interés. Corresponde al piedemonte de las faldas noreste de la Cordillera de Tilarán. Se caracteriza por pendientes cercanas a los 10° y espacios inter-fluviales amplios. Las rocas son productos del volcán los Perdidos y se trata de lavas andesítico-basálticas con abundantes intercalaciones de lahares. La unidad es de origen volcánico y su edad tentativa es Plioceno-Pleistoceno (Madrigal & Rojas, 1980).

II. Formas de origen aluvial

a) Abanico aluvial de Santa Clara

Esta unidad está ubicada al Oeste de Ciudad Quesada y cubre la esquina noroeste del área de interés. Ha sido formada por los ríos: La Esperanza, San Lorenzo, Pavos, La Balsa, Santa Rita, La Vieja, Ronrón, Peje y Quebrada Grande, que desembocan en el río Javillos. Se encuentra delimitada por lomeríos correspondientes a otras unidades morfológicas y se caracteriza por estar cortada por muchos cauces, de poca profundidad, con espacios inter-fluviales planos. Está compuesta de productos de la erosión de la Cordillera de Tilarán, principalmente clastos andesíticos y basálticos. Su edad va del Pleistoceno al Holoceno (Madrigal & Rojas, 1980).

Bergoeing et al. (1997) asocian esta zona con depósitos laháricos del Pleistoceno y su límite sur está definido por la falla Florencia-Palmira.

b) Abanico aluvial de Aguas Zarcas

Esta unidad se extiende al norte del pie del volcán Platanar y cubre una pequeña porción de la esquina noreste del área de interés. Forma un triángulo invertido confinado por lomas volcánicas al sur y cuyo vértice cae sobre el río Aguas Zarcas, el cual corresponde al principal agente de acarreo de los materiales. A partir del poblado de Los Chiles, este abanico se confunde con la llanura aluvial de San Carlos y el Atlántico. La profundidad del valle del río Aguas Zarcas decrece de 100 m al sur (al pie de las unidades volcánicas) a 10 m en el norte, para una pendiente de aproximadamente 4,5%, con laderas en los ríos muy escarpadas. Los depósitos de esta unidad incluyen gran cantidad de material acarreado por lahares y corrientes del lodo provenientes de los Volcanes Platanar y Porvenir. Las rocas presentes son fragmentos de lavas andesíticas dentro de una matriz principalmente piroclástica muy meteorizada, asociada a la Formación Buena Vista, con edad Plioceno al Cuaternario (Malavassi y Madrigal, 1970).

c) Llanura aluvial de San Carlos y el Atlántico

Esta unidad incluye las llanuras del Norte de Limón, Sarapiquí, Río Cuarto, Aguas Zarcas y La Fortuna y cubre una pequeña porción de la esquina noroeste del área de interés. Está compuesta por abanicos aluviales, llanuras aluviales y sus partes distales de influencia marina. Esta unidad está influenciada por la acción de los ríos Chirripó, Sucio, Reventazón, Zent, Destierro, Novillos, Parismina y Guacimito, los cuales ayudaron a formar un pie de monte. Se caracteriza por un relieve plano (de 0 a 6°); en la zona alta de los abanicos, los cortes de los ríos son profundos, con paredes verticales y espacios inter-fluviales angostos. En la llanura el relieve es plano, los cauces tienen valles anchos, patrones meándricos y hay gran cantidad de terrenos pantanosos. Los materiales en los abanicos corresponden a lahares y corrientes de lodo intercalados con material volcánico, mientras que en las secciones distales predominan materiales finos con aporte volcánico. Tanto los abanicos como la llanura, han sido originados por el aporte de los ríos que llegan a esa zona. El relleno inicial debe haber comenzado durante el final del Plioceno para continuar hasta nuestros días (Madrigal & Rojas, 1980).

4.2. Geomorfología regional

El área de interés tratada para la determinación de las unidades geomorfológicas regionales cubre una superficie de 639 km², en un perímetro de 134 km.

4.2.1. Metodología

Para la determinación de dichas unidades y la elaboración del mapa correspondiente (figura 9), se tomaron en cuenta estudios previos a escala regional como el mapa de Madrigal (1980) junto con su folleto explicativo (Madrigal & Rojas, 1980) y el mapa y folleto de Bergoeing & Malavassi (1982), así como el mapa geológico de Huapaya & Rojas (2012). A mayor escala se tomaron en cuenta los trabajos de Bergoeing & Masís (2013) y Bergoeing & Murillo (2012) en Palmares y San Ramón respectivamente.

Se creó un modelo de elevación digital (MED) a partir de curvas de nivel cada 10 m (ver figura 1) obtenidas del SNIT, sin embargo en el área de estudio hay vacíos de información, los cuales fueron rellenados con curvas de nivel cada 20 m extraídas del Atlas Digital de Costa Rica (2008). Este MED fue usado para la creación de un modelo de sombras y un mapa de pendientes en grados, usando la escala de colores siguiente:

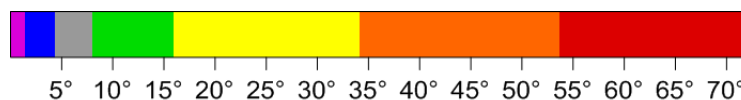


Figura 6: Escala de colores para la expresión de pendientes (en grados).

Se descargó una grilla de 1 Arcosegundo (1 pixel/30m) de la aplicación web GeoMapApp y se convirtió a UTM, con el fin de calcular las curvaturas de buzamiento y de rumbo que se utilizaron para identificar cambios de convexidad, ya que facilita la identificación de alineamientos, acantilados, cerros, deslizamientos y calderas. En la convención usada (ver figura 7) el color rojo indica una curvatura positiva (convexa) asociada a lomas y divisoras, el azul indica una curvatura negativa (cóncava) asociada a valles y drenajes y el verde indica una curvatura neutra. Adicionalmente, se consultaron las imágenes satelitales de Google Earth y el mosaico de fotos aéreas a escala 1:5 000 del SNIT. Se extrajeron los drenajes de las hojas 1:50 000 del Atlas Digital de Costa Rica (2008), para determinar las sub-cuencas hidrográficas principales. Todos estos insumos fueron tomados en cuenta para la interpretación inicial de las unidades geomorfológicas, para la cual se usó el sistema del ITC (Van Zuidam, 1985; Verstappen y Van Zuidam, 1991) con algunas modificaciones. En total, se determinaron 112 polígonos de unidades geomorfológicas regionales divididas en 28 subclases pertenecientes a las siguientes clases: formas de origen denudacional, estructural denudacional, volcánico, fluvial y lacustre.

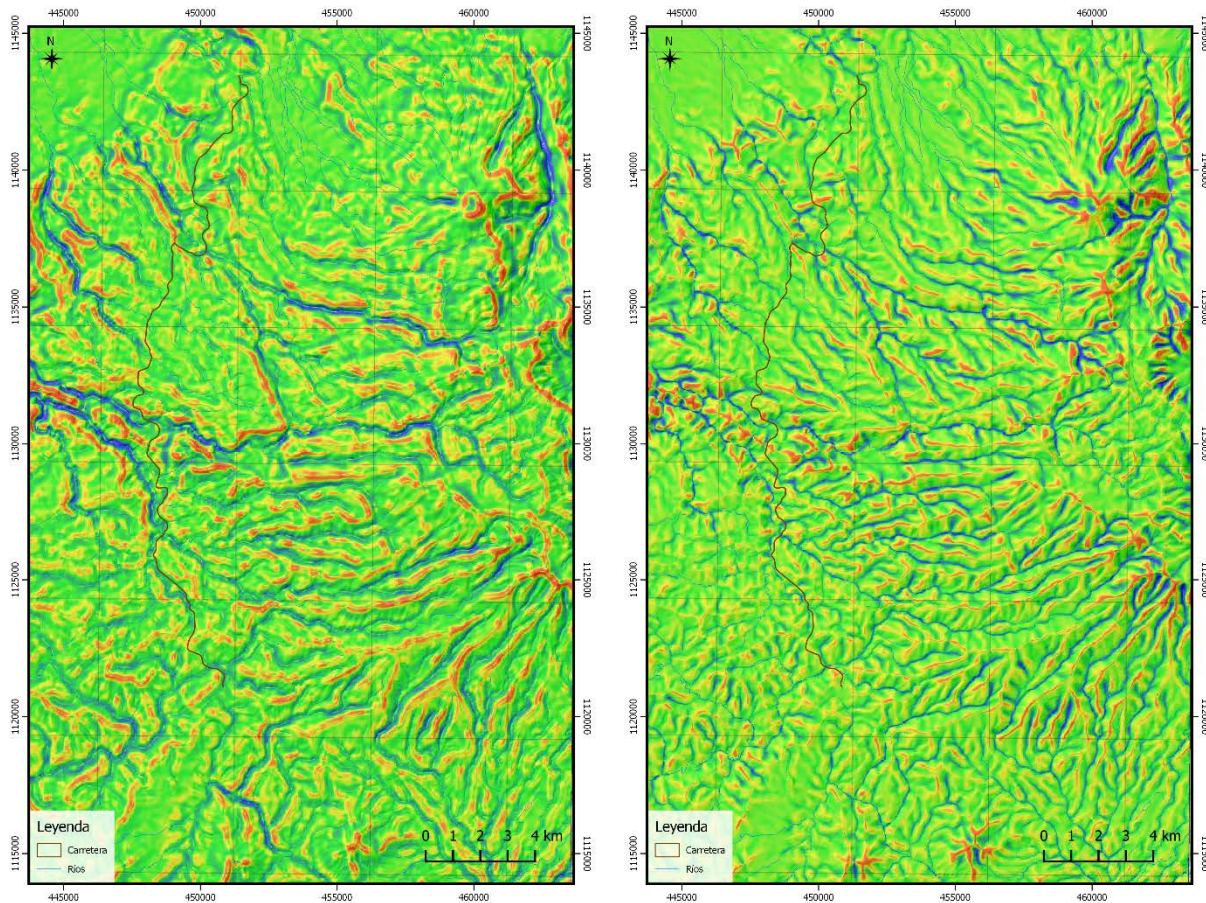


Figura 7: Mapas de curvatura de perfil (derecha) y tangencial (izquierda). Los colores rojos indican una curvatura positiva (relieve convexo), los azules una curvatura negativa (relieve cóncavo) y el verde indica una curvatura neutra (relieve plano).

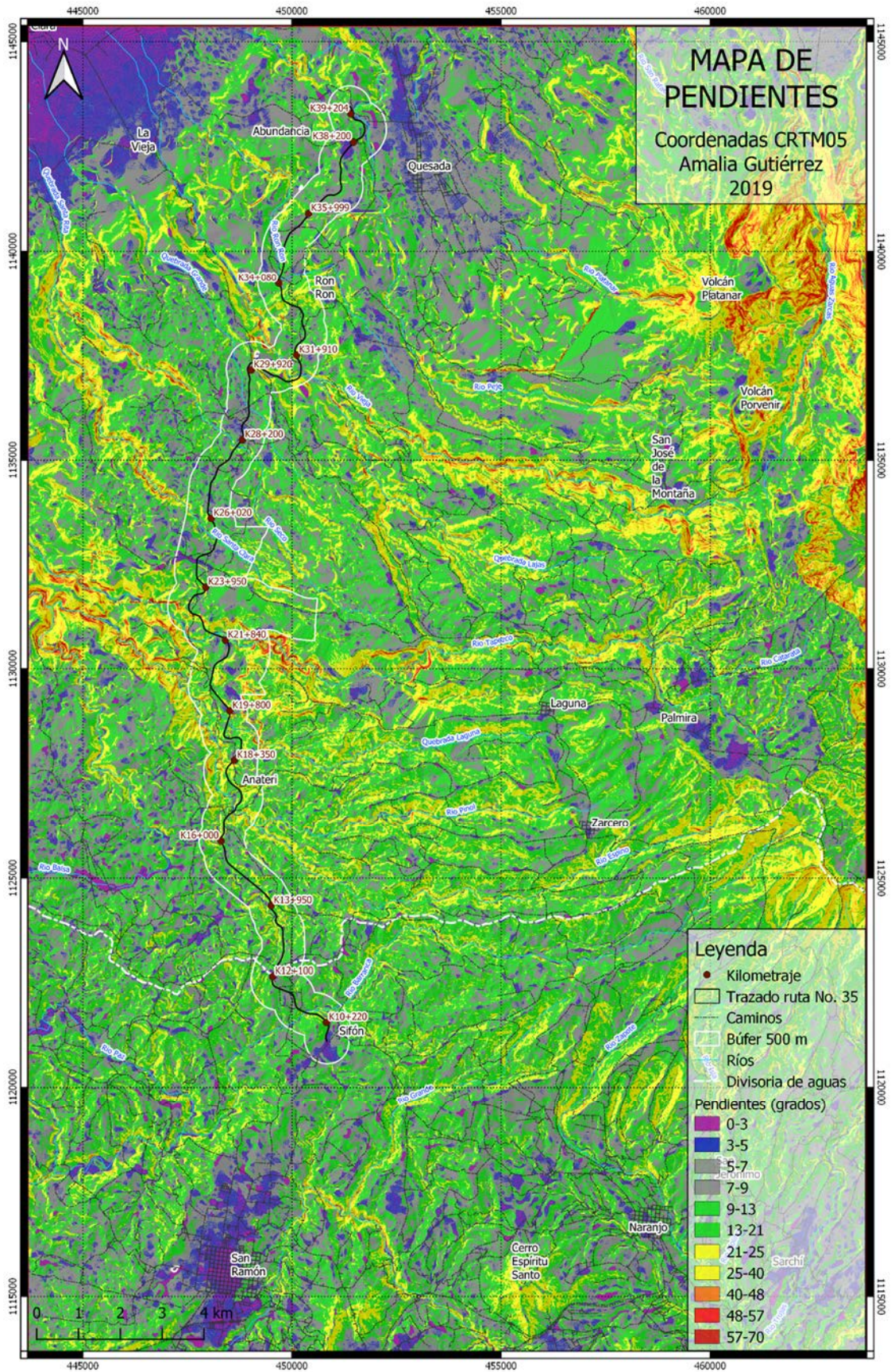
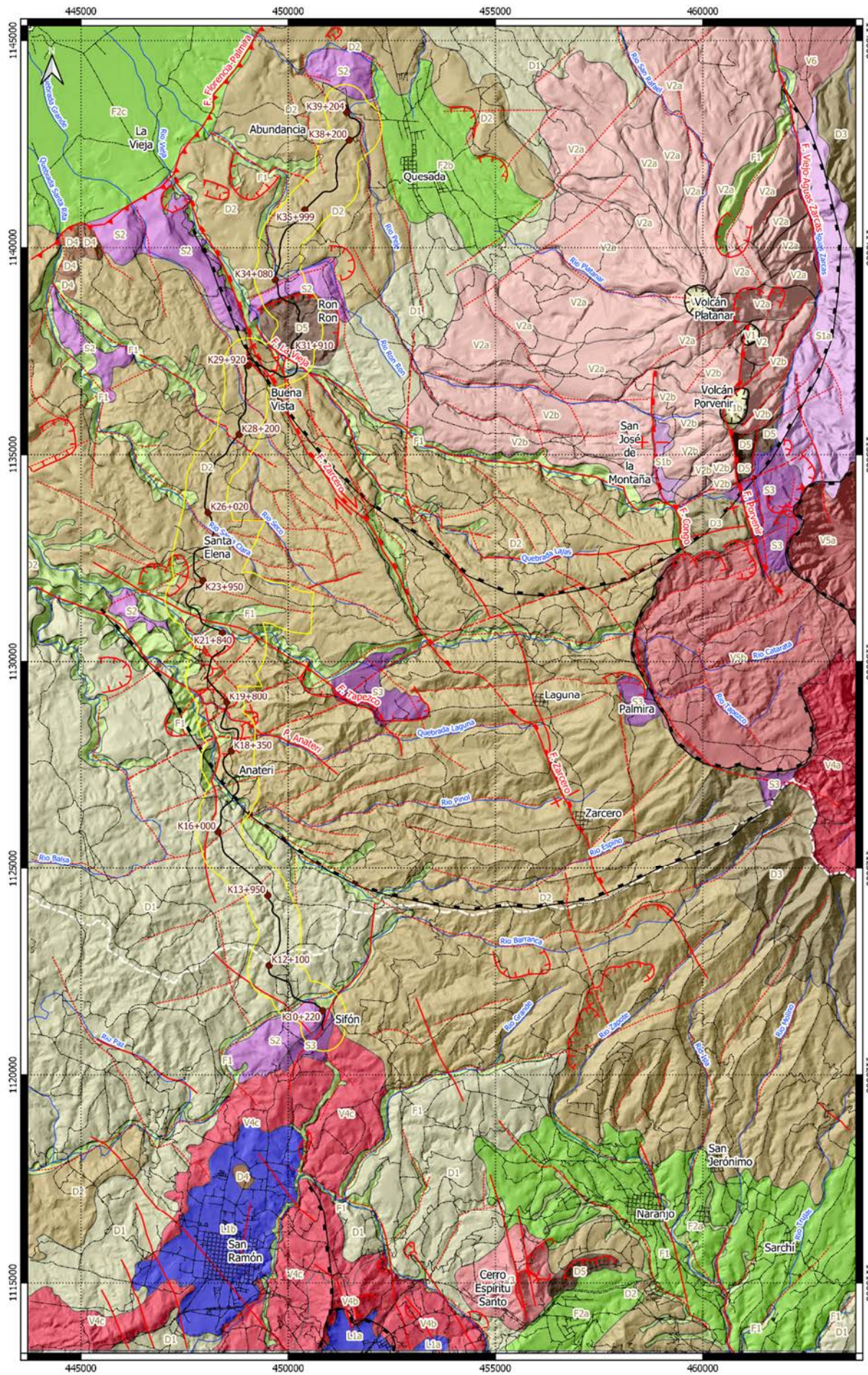


Figura 8: Mapa de pendientes regional (en grados).



**MAPA
GEOMORFOLÓGICO
REGIONAL**

Coordenadas CRTM05
Amalia Gutiérrez
2019

Leyenda

- Kilometraje
- Carretera
- ▭ Búfer 500 m
- Caminos
- Ríos (Escala 1:200.000)
- Divisoria continental

Fallamiento Regional

- Falla
- Falla Inferida
- Alineamiento

Tipo de falla

- ▲ Inversa
- ▲ Normal

Estructuras

- Caldera volcánica
- Cráter volcánico
- Deslizamiento

Unidades Geomorfológicas Regionales

- D1 Laderas inferiores
- D2 Laderas medias
- D3 Laderas superiores
- D4 Cerro residual
- D5 Deslizamiento
- F1 Valles y cañones fluviales
- F2a Depósitos aluviales de Naranjo
- F2b Depósitos aluviales de Quesada
- F2c Depósitos aluviales de Santa Clara
- L1a Lacustre de Palmares
- L1b Lacustre de San Ramón
- S1a Escarpe de la F. Viejo-Aguas Zarcas
- S1b Escarpe de la Falla Congo
- S2 Cerros aislados
- S3 Depresiones estructurales
- V1 Cráter volcánico
- V1a Cráter de volcán Platanar
- V1b Cráter de volcán Porvenir
- V2 Coladas de lava
- V2a Colada del volcán Platanar
- V2b Colada del volcán Porvenir
- V3 Conos volcánicos erosionados
- V4a Laderas internas de Alto Palomo
- V4b Remanente de la cald. de Palmares
- V4c Remanente de la cald. de San Ramón
- V5a Caldera del volcán Viejo
- V5b Caldera de Palmira
- V6 Abanico lahárico de Aguas Zarcas

0 1 2 3 4 km

Figura 9: Mapa geomorfológico regional.

Una vez completado el mapa geomorfológico regional preliminar, se comprobaron las unidades en una visita de campo. Con esto se elaboró el mapa geomorfológico regional (figura 9), el cual se complementa con la descripción de las unidades geomorfológicas regionales a continuación.

4.2.2. Descripción de las unidades geomorfológicas regionales

I. Relieve tectónico

En este apartado se incluyen las unidades que tienen influencia tectónica reciente (del Holoceno) y visible. Las principales fallas que se mencionaron anteriormente corresponden a las fallas Florencia-Palmira, Viejo-Aguas Zarcas, Zarcero, Congo y Gata (ver figura 34). Las formas aquí descritas poseen influencia de la traza principal de la falla, así como de sus ramales y de las fallas de menor tamaño asociadas.

(S) Formas de origen estructural denudacional

Las formas de origen estructural denudacional corresponden con un relieve endógeno modelado. Es decir, se considera que el modelado surge en primera instancia del desplazamiento cinemático de las fallas descritas anteriormente y, en menor proporción, de la acción erosiva de los drenajes y de procesos de remoción en masa.

S1: Escarpe de falla

En este apartado se describen las laderas del Volcán Viejo (S1a) controladas por la falla Viejo-Aguas Zarcas, descrita como una falla en tijera con rumbo NNW (Alvarado et al, 1988), así como el escarpe de la falla Congo (S1b) y la laguna de represamiento provocada por el movimiento de esta falla (ver figura 9).

- a. *Ubicación:* La falla Viejo-Aguas Zarcas (S1a) se encuentra al este del edificio volcánico Platanar Porvenir, al oeste del macizo del volcán Viejo y se extiende desde el poblado de Aguas Zarcas hasta aproximadamente 11 km al sur del mismo. La falla Congo (S1b) se encuentra aproximadamente 1,5 km al oeste del cráter del volcán Porvenir, al sur del volcán Platanar. La traza de la falla pasa cerca del poblado de San José de la Montaña (de Alajuela).
- b. *Morfogénesis:* Esta forma surge de la acción de la falla Viejo-Aguas Zarcas (S1a), en apariencia una falla normal, la cual posee una rotación perpendicular al plano de falla en el bloque este (correspondiente a las laderas descritas aquí). La falla Congo (S1b) es de rumbo norte-sur, desplazamiento normal y el plano de falla buza hacia el este. Esto se evidencia en un escarpe juvenil con facetamiento rectangular de 40 m de altura, el cual junto con el contra-escarpe ha generado una laguna efímera (laguna Congo) por represamiento del drenaje (Alvarado et al., 1988; Montero et al., 1998; Montero, 2001).
- c. *Litología:* Las rocas que componen estas laderas (S1a) forman parte de macizo del volcán Viejo, por lo tanto corresponden con la unidad Bajos del Toro-Viejo descrita por Alvarado & Carr (1993) como compuesta por lavas basálticas a andesíticas intercaladas con flujos

piroclásticos y otras rocas piroclásticas. La falla Congo (S1b) corta depósitos lávicos del volcán Porvenir (andesitas); sin embargo las coladas más recientes llegan hasta esta laguna. La depresión correspondiente a la laguna efímera está rellena de sedimentos y posiblemente ceniza.

- d. *Morfometría:* El escarpe de la falla Viejo-Aguas Zarcas (S1a) se encuentra facetado, la ladera posee 7 km de largo, el plano de la falla está inclinado entre 30 y 50 grados hacia el oeste y el desnivel entre la cima de divisoria y el valle del río es de hasta 400 m. El valle del río es abierto en forma de “v” con un patrón de drenaje dendrítico a sub-paralelo en la parte alta de la cuenca. La traza de la falla Congo (S1b) es rectilínea de orientación norte-sur y de 3-4 km de largo. El escarpe tiene un desnivel de 80 m, una orientación hacia el este y una pendiente de aproximadamente 50 grados. La depresión asociada a la laguna efímera es de 2 km de largo, hasta 500 m de ancho y 10-20 m de profundidad; sus pendientes internas son bajas, inferiores a los 10 grados.
- e. *Morfocronología:* La falla Viejo-Aguas Zarcas (S1a) es considerada neotectónica por Montero et al. (1998) y Denyer et al., (2009). Las laderas poseen una edad igual o superior a 0.4 Ma según Alvarado & Carr (1993). Denyer et al. (2009) consideran la falla Congo (S1b) como neotectónica.

S10: Cerros aislados

Aquí se describen cerros aislados, delimitados por fallas o alineamientos, los cuales han sido modelados por la acción de los ríos sobre la traza de estas estructuras; por lo tanto, se consideran como relieve endógeno-modelado.

- a. *Ubicación:* La mayoría de estos cerros se encuentran al sur de la llanura de Santa Clara. El primer cerro (de oeste a este) está delimitado por los ríos Santa Clara y Seco, se encuentra 8 km al WSW de Ciudad Quesada; más al sur, se encuentra un cerro 10 km al W del poblado de Laguna, delimitado por los ríos Tapezco y Espino. Luego existe un grupo de dos cerros, limitados por la falla Florencia-Palmira al norte y la continuación de la falla Zarcero hacia el este. Hacia el este se encuentra un cerro, localizado al noreste del deslizamiento de Ronrón y definido por fallas locales al norte y al este. También se encuentra un cerro 2,8 km al noroeste de Ciudad Quesada, y otro 5,5 km al norte de San Ramón (ver figura 9)
- b. *Morfogénesis:* Los cerros han sido modelados por la acción cinemática de estas fallas o alineamientos que permitieron la profundización de los valles de los ríos correspondientes.
- c. *Litología:* Estos cerros están compuestos por material volcánico correspondiente con las Unidad Bajos del Toro, la Formación Aguacate y el basamento volcánico del macizo Platanar-Porvenir.
- d. *Morfometría:* El primer cerro (entre los ríos Santa Clara y Seco) posee 2,5 km de largo y 1km de ancho en su parte más ancha, una elevación de 100 a 180 m sobre el cauce de los ríos y pendientes de aproximadamente 30 grados. El segundo cerro (entre los ríos Tapezco y Espino) es de 1,9 km de largo y 700 m de ancho, y se eleva entre 50 y 80 por encima de

los valles de los ríos que lo rodean. Los cerros del primer grupo poseen 1,2 km de ancho, pendientes de entre 10 y 30 grados y se elevan 80 m sobre la llanura; el primero es casi-circular y el segundo constituye una fila de 4 km de largo. El quinto cerro es de 2 km por 1,3 km en su parte norte y este respectivamente y hacia el sur su borde es convexo, posee laderas de entre 10 y 30 grados y una elevación de hasta 120 m con respecto al relieve circundante. El cerro más al norte, cerca de Ciudad Quesada, posee una forma ovalada, es de 1,6 km de largo y 900 m de ancho, se eleva 100 m sobre el cauce de los ríos y sus laderas están inclinadas entre 30 y 60 grados. Finalmente, el cerro más al sur, cerca de San Ramón, es de 2,6 km de largo y 1 km de ancho, se eleva más de 100 m sobre el cauce de los ríos y sus laderas están inclinadas entre 30 y 45 grados.

- e. *Morfocronología:* Con base a las unidades geológicas aflorantes, la edad probable de esta unidad es Plioceno-Pleistoceno.

S3: Depresiones estructurales

En este apartado se describen las depresiones de origen estructural en forma de graben o semi-graben presentes en el área de estudio, la mayoría de las cuales se encuentran suavizadas por la erosión.

- a. *Ubicación:* Las depresiones se encuentran 5,5 km al NNE de San Ramón; al sur, al oeste y al norte de la Caldera de Palmira (entre la Caldera y el volcán Porvenir), y 3 km al oeste del poblado de Laguna (ver figura 9).
- b. *Morfogénesis:* Estas depresiones son producto de fenómenos de erosión-acumulación en sitios con movimientos tectónicos y estructuras de graben y semi-graben. La generación de estas morfologías es atribuida a la acción de las fallas presentes, algunas de las cuales poseen una componente normal. La acción de la falla normal causa un desplazamiento diferencial de dos o tres bloques distintos para formar un graben o semi-graben en el centro. Una de estas depresiones está asociada al movimiento de la falla Tapezco y otras a la Falla Porvenir.
- c. *Litología:* Las fallas que originan las depresiones cortan los depósitos del Grupo Aguacate, la Unidad Bajos del Toro, y los depósitos de caída recientes, que corresponden con lavas, tobas, ignimbritas y otros productos volcánicos.
- d. *Morfometría:* La depresión de mayor tamaño, asociada a la falla Tapezco, es de 2 km de largo por 1,2 km de ancho, posee una forma en herradura alargada, su fondo es ligeramente inclinado hacia el suroeste y se encuentra 100 m por debajo del relieve circundante. La depresión donde se encuentra el poblado de Palmira es de 1,3 km por 800 m, posee una forma alargada, e internamente su fondo está inclinado hacia el oeste, con pendientes de hasta 20 grados. Las depresiones al sur del volcán Porvenir están asociadas a la acción de la falla de mismo nombre, forman una serie de gradas de sur a norte, con desniveles de hasta 200 m y se encuentran cortadas por la parte alta de la cuenca del río Aguas Zarcas. La depresión al sur de la Caldera de Palmira es la más

pequeña, de forma triangular, de 800 m de ancho y su fondo está inclinado 10 grados hacia el oeste. Finalmente, la depresión al norte de San Ramón, es alargada con dimensiones de 1,7 km por 700m, un fondo plano a ligeramente cóncavo y un desnivel de menos de 100 m con respecto al relieve circundante.

- e. *Morfocronología*: La mayoría de las fallas asociadas a estas depresiones son consideradas como neotectónicas; además, por las litologías asociadas, se estima que estas morfologías pueden ser del Plioceno tardío o del Holoceno.

II. Relieve exógeno

La mayoría de las formas presentes en el área de estudio han sido modeladas por la acción erosiva del agua, viento y remoción en masa. Para las formas denudacionales, la expresión del relieve depende de su origen (en este caso la mayoría del relieve es de origen volcánico) así como del tiempo e intensidad con los cuales los agentes erosivos han actuado sobre el relieve. Las altas tasas de precipitación en esta zona juegan un papel importante para la meteorización y erosión de las litologías. Para las formas de acumulación depende principalmente de los agentes de transporte, de la fuente de material y del tiempo transcurrido. En este caso, la acumulación de material se da principalmente en ambientes lacustres y el material es de origen volcánico denudacional.

(D) Formas de origen denudacional

En este apartado se incluyen todas las formas de relieve denudacional (exógeno) incluidas laderas volcánicas denudacionales, cuando estas ya no presentan relación directa con focos de emisión. Las laderas se distinguen principalmente por su pendiente y grado de disectación. También, se incluyen grandes depresiones asociadas con movimientos de masa severos.

D1: Laderas denudacionales de baja pendiente

- a. *Ubicación*: Corresponden con las partes bajas de las laderas del volcán Platanar, al oeste y noreste de Ciudad Quesada y laderas bajas del macizo Bajos del Toro–Volcán Viejo, al oeste del área de estudio entre Naranjo y San Ramón al sur y el valle del río Espino al norte (figura 9).
- b. *Morfogénesis*: Estas laderas son producto de la acción erosiva de los agentes sobre materiales volcánicos altamente meteorizados en un ambiente húmedo, que resulta en un relieve suave, ondulado y relativamente maduro.
- c. *Litología*: Corresponde principalmente con materiales volcánicos de las unidades Monteverde, Bajos del Toro y Platanar-Porvenir que se encuentran en el área de estudio, las cuales están compuestas por lavas, tobas, ignimbritas y otros productos volcánicos.
- d. *Morfometría*: Corresponden con laderas bajas, con pendientes de entre 5 y 10 grados, con valles fluviales muy abiertos, cauces poco profundos, patrones de drenajes paralelos a

subparalelos en la parte norte y rectangular a contorsionado en la parte oeste. Las divisorias son redondeadas y la topografía es suave.

- e. *Morfocronología*: Estas laderas corresponden con la erosión de los productos volcánicos del Mioceno (base del Platanar-Porvenir, Montes del Aguacate) y del Plioceno (Monteverde, Lacustre de Palmares) por lo que datan del Plioceno-Pleistoceno.

D2: Laderas denudacionales de moderada pendiente

- a. *Ubicación*: Corresponden con la mayoría de las laderas del macizo Bajos del Toro–Volcán Viejo, entre Naranjo y San Ramón al sur y Ciudad Quesada al norte. Están delimitadas por el borde de la caldera de Palmira al este y la falla Florencia-Palmira al noroeste (ver figura 9).
- b. *Morfogénesis*: Estas laderas son producto de la acción erosiva en suelos menos meteorizados que las laderas fuertes o con pendientes mayores a las laderas bajas, que resultan en un relieve ondulado a montañoso.
- c. *Litología*: Corresponde principalmente con materiales volcánicos de la Unidad Bajos del Toro así como de la Formación Alto Palomo, depósitos piroclásticos indiferenciados y depósitos de avalancha de detritos: lavas, tobas, ignimbritas y otros productos volcánicos.
- d. *Morfometría*: Corresponden con laderas medias, con pendientes de entre 10 y 30 grados, con patrones de drenaje subparalelo a rectangular en las partes superiores de las laderas, con valles fluviales abiertos en forma de “v” simétricos. Sin embargo, los ríos principales (Espino, Tapezco, La Vieja y Santa Clara y Seco más al oeste) presentan valles asimétricos profundos y angostos, con control estructural y patrones de drenaje paralelos a dendríticos. La sinuosidad varía entre rectilínea y medianamente sinuoso. La topografía es ondulada en la partes altas a accidentada cerca de los valles de los ríos principales. Las divisorias son anchas y redondeadas en las laderas superiores mientras que en las medias e inferiores son más angostas y angulares, sobre todo en áreas con influencia tectónica.
- e. *Morfocronología*: Estas laderas corresponden con la erosión de los productos volcánicos del Pleistoceno (Unidad Bajos del Toro, Formación Alto Palomo, y unidades informales) por lo que datan del Pleistoceno superior al Holoceno.

D3: Laderas denudacionales de fuerte pendiente

- a. *Ubicación*: Corresponden con las laderas superiores del macizo Bajos del Toro–Volcán Viejo, entre Sarchí al sur y la Caldera de Palmira al norte. Se encuentran delimitadas por la parte alta de la cuenca de Bajos del Toro al este, y una transición hacia las laderas denudacionales de moderada pendiente hacia el oeste (ver figura 9).
- b. *Morfogénesis*: Estas laderas son producto de la acción erosiva en laderas con pendientes mayores, que resulta en un relieve accidentado.
- c. *Litología*: Corresponde principalmente con materiales volcánicos de la Unidad Bajos del Toro, así como de la Formación Alto Palomo: lavas, tobas, ignimbritas y otros productos volcánicos.

- d. *Morfometría:* Corresponden con laderas superiores, con pendientes de entre 20 y 50 grados, con un patrón de drenaje paralelo, con valles fluviales angostos en forma de “v” simétricos. Comprende la parte alta de la cuenca de los ríos Barranca y Molino, entre otros. Los cauces de los ríos son rectilíneos a ligeramente sinuosos. La topografía es accidentada, altamente disectada por valles fluviales profundos, de hasta 200 m, y las divisorias son angulares en forma de “V” invertida.
- e. *Morfocronología:* Estas laderas corresponden con la erosión de los productos volcánicos del Pleistoceno (Unidad Bajos del Toro, Formación Alto Palomo), por lo que datan del Pleistoceno superior al Holoceno.

D4: Cerros residuales

- a. *Ubicación:* La mayoría de los cerros residuales (D4) se encuentran al noroeste del área de estudio, entre los poblados de Ronrón y La Vieja y están delimitados por los ríos Ronrón al este y Santa Clara al oeste. También se encuentra un cerro residual 1,5 km al norte de la Ciudad de San Ramón (ver figura 9).
- b. *Morfogénesis:* Los cerros residuales corresponden con litologías más resistentes rodeadas por rocas más suaves.
- c. *Litología:* Los cerros al noroeste del área de estudio corresponden con el extremo occidental de los depósitos volcánicos de la base de los macizos Platanar-Porvenir y Bajos del Toro-Viejo, por lo tanto se estima que están formados por lavas y depósitos piroclásticos de la Unidad Bajos del Toro. El cerro al norte de San Ramón está compuesto por ignimbritas de la Formación Tiribí.
- d. *Morfometría:* El cerro residual de San Ramón tiene un diámetro de 500m, se eleva 100 m sobre el relieve circundante y posee pendientes de alrededor de 40 grados. Los cerros residuales del noroeste del área de estudio tienen formas redondeadas a alargadas, se elevan hasta 100 m sobre el relieve circundante, poseen pendientes de entre 20 y 35 grados con dimensiones entre 500 m de diámetro y hasta 800 m de largo, poseen drenaje desarrollado con valles en “U” abiertos, asimétricos y cortos, y divisorias anchas y redondeadas.
- e. *Morfocronología:* Estas laderas corresponden a la erosión de los productos volcánicos del Plioceno a Pleistoceno (Grupo Aguacate, Formación Tiribí y Unidad Bajos del Toro) por lo que datan del Pleistoceno superior al Holoceno.

D5: Áreas con movimientos de masa severos

En este apartado se describen todos los deslizamientos o áreas con movimientos de masa severos (D5), incluyendo un deslizamiento antiguo de gran tamaño denominado aquí como deslizamiento de Ronrón, sobre el cual se encuentra ubicado el proyecto hidroeléctrico Chocosuela I (ver figura 9).

- a. *Ubicación:* Los deslizamientos se encuentran principalmente al sur del cráter del volcán Porvenir. Mientras que el deslizamiento de Ronrón se ubica 4 km al SW de Ciudad Quesada.
- b. *Morfogénesis:* Los deslizamientos son asociados a fenómenos de movimiento de masa, productos de la erosión, de la precipitación y de la inestabilidad de las laderas. En el caso del volcán Porvenir, pueden estar asociados al colapso del macizo por cese de vulcanismo. Por otro lado el deslizamiento de Ronrón es rotacional, es producto de la erosión y meteorización de los materiales y está probablemente influenciado por el movimiento de la falla de Zarcero, en su parte sur.
- c. *Litología:* Los deslizamientos del volcán Porvenir cortan las andesitas y otros depósitos productos de la actividad de este volcán. El deslizamiento de Ronrón corta lavas y productos volcánicos de la Unidad Bajos del Toro así como de los depósitos de avalancha de detritos (debris avalanche) asociados al colapso de la caldera de Chocosuela.
- d. *Morfometría:* Los deslizamientos son relativamente pequeños, con formas semi-circulares de hasta 700 m de radio, su fondo es irregular por los depósitos y poseen pendientes de hasta 40 grados. El deslizamiento de Ronrón es de forma ovalada, de 2 km de diámetro, con movimiento hacia el SW y pendientes de hasta 20 grados. Ninguno presenta evidencias de movimiento reciente (< 5 años).
- e. *Morfocronología:* A los deslizamientos del volcán Porvenir, por su expresión morfológica y por cortar depósitos del Pleistoceno superior a Holoceno, se le atribuye una edad del Holoceno. Al deslizamiento de Ronrón se le puede atribuir una edad mayor, probablemente Pleistoceno, debido al grado de erosión y disectación que posee.

(V) Formas de origen volcánico denudacional

En este apartado se describen las morfologías de origen volcánico que han tenido influencia de los procesos erosivos y el paso del tiempo; constituyen la mayoría de las formas que se encuentran en el área de interés. Las formas estudiadas están asociadas a la Caldera de Chocosuela y su colapso, el macizo Bajos del Toro-volcán Viejo con sus distintas fases eruptivas y los materiales asociados (Unidad Bajos del Toro, Formación Alto Palomo), donde se puede incluir tentativamente la Caldera de Palmira. Más recientemente aparecen los volcanes Platanar y Porvenir, con los materiales y las morfologías asociadas a estos dos focos eruptivos.

V1: Cráter volcánico

En este apartado se incluyen los cráteres de los volcanes Platanar (V1a), Porvenir (V1b) y un cráter sin nombre (V1c), mencionado como parte del volcán Porvenir (Alvarado, 1984).

- f. *Ubicación:* Se ubican 7 a 9 km al sureste de Ciudad Quesada (ver figura 9). Corresponden con los cráteres eruptivos de los volcanes Platanar, Porvenir y un cono adicional, probablemente adventicio al volcán Porvenir (Alvarado, 1984).

- g. *Morfogénesis*: Las estructuras son de origen volcánico, formadas por la actividad eruptiva del volcán y modeladas por el cese de la actividad (bloqueo del conducto volcánico), así como por la acumulación de material de caída. Es muy probable que posteriormente se hayan formado lagunas volcánicas, las cuales persistieron durante periodos de tiempo desconocidos.
- h. *Litología*: Estos cráteres están constituidos por materiales volcánicos: tobas de ceniza, lapilli, bloques y bombas que recubren materiales volcánicos más antiguos, incluidas lavas. Los materiales del volcán Platanar son lavas basálticas de bajo magnesio a andesíticas moderadamente potásicas; los del volcán Porvenir son lavas andesíticas con contenidos de potasio de bajo a alto (Alvarado & Carr, 1993).
- i. *Morfometría*: El cráter del volcán Platanar (V1a) posee una forma ovalada, abierta hacia el NW con dimensiones de 700 por 600 m aproximadamente, su altura máxima es de 2183 m s.n.m, los bordes son escarpados con desniveles de hasta 100 m y el interior es relativamente plano, con mayor erosión cerca del borde. El cráter del volcán Porvenir (V1b) es alargado en sentido norte-sur, con dimensiones de 1 km por 600 m , se encuentra cortado por la falla Platanar-Porvenir con un escarpe de 100 m de desnivel y al interior del cráter mayor (incompleto) se encuentra un pequeño cono y cráter interior (aproximadamente 225 m de diámetro). El tercer cráter (V1c), de menor tamaño y menos definido, posee una forma ovalada y dimensiones de 400 por 350 m, se eleva hasta 150 m por encima del relieve circundante y una cárcava de 40 m de profundidad asociada a la falla Platanar-Porvenir discurre hacia el suroeste.
- j. *Morfocronología*: Alvarado & Gans (2012) estiman que los volcanes Platanar y Porvenir surgieron por encima de un complejo volcánico del Mioceno hace aprox. 0,2 Ma, durante el Pleistoceno tardío.

V2: Coladas de lava

En este apartado se describen las coladas de lava provenientes de los volcanes Platanar (V2a), Porvenir (V2b) y de un cono adventicio (V2). Han sido modeladas por los agentes erosivos, sin embargo algunas son más recientes, por lo que aún conservan gran parte de los rasgos formativos.

- a. *Ubicación*: El volcán Platanar, con sus respectivas coladas de lava (V2a), se encuentra 7,5 km al sureste-este del centro de Ciudad Quesada y 3 km al sur de éste se encuentra el Volcán Porvenir, con sus coladas de lava (V2b). El cono adventicio (V2) se encuentra entre los cráteres de estos dos volcanes (ver figura 9).
- b. *Morfogénesis*: Estas coladas de lava surgen como producto de la actividad efusiva del último o penúltimo periodo de actividad de los volcanes mencionados y su erosión subsecuente.
- c. *Litología*: Como se mencionó anteriormente, las lavas del volcán Platanar son lavas basálticas de bajo magnesio a andesíticas moderadamente potásicas y las del volcán Porvenir son lavas andesíticas con contenidos de potasio de bajo a alto (Alvarado & Carr,

1993). Dos coladas del Platanar estudiadas por Alvarado & Carr (1993) corresponden a la colada de La Florida, de composición variable pero mayoritariamente andesítica piroxénica y la colada de Sucre, de composición andesítica.

- d. *Morfometría*: Las coladas del volcán Platanar (V2a) se extienden principalmente hacia el oeste y el este, hasta alejarse 7 km del cráter. Sus pendientes oscilan entre 10 y 30 grados, se encuentran muy poco disectadas y sus límites son fácilmente distinguibles. Las coladas del flanco este, son más disectadas, con pendientes abruptas de hasta 60 grados, posiblemente debido a la acción de la falla Viejo-Aguas Zarcas. El drenaje es desarrollado y posee un patrón radial, cortado en el sur y el este por fallas. La Quebrada Paloma posee un valle profundo (hasta 300m) con laderas inclinadas hasta 55 grados. Las coladas del volcán Porvenir (V2b) se extienden 1,5 km a partir del cráter y 5,7 km más hacia el oeste, a partir del trazo de la falla Congo; sus pendientes oscilan entre 5 y 35 grados y los valles fluviales son abiertos y redondeados. Las coladas del cono adventicio son cortas (hasta 700m), con pendientes entre 30 y 40 grados, desniveles de hasta 100 m y se encuentran medianamente disectadas con drenaje poco desarrollado.
- e. *Morfocronología*: Las coladas de lava más recientes de estos edificios volcánicos surgieron durante el Pleistoceno tardío, por lo que estas morfologías existen por lo menos desde el Pleistoceno.

V3: Conos volcánicos erosionados

- a. *Ubicación*: El Cerro Espíritu Santo se encuentra 3,5 km al suroeste de Naranjo y 7 km al este de San Ramón (ver figura 9).
- b. *Morfogénesis*: Corresponde con un cono volcánico activo durante el Pleistoceno Inferior (Bergoeing & Masís, 2013) y luego modelado por la erosión. Se encuentra cortado por un sistema de fallas del mismo nombre en su parte oeste y suroeste, según Rojas (2013).
- c. *Litología*: El cono volcánico que constituye el Cerro Espíritu Santo está compuesto por basaltos y andesitas según Bergoeing & Masís (2013), asociadas al Complejo Aguacate, según Huapaya & Rojas (2012).
- f. *Morfometría*: El cerro Espíritu Santo se eleva 300 m sobre el relieve circundante, su forma es cuasi-circular con un diámetro de aproximadamente 2 km y pendientes de entre 15 y 35 grados. Está cortado por dos fallas en la parte central y tiene drenaje desarrollado con un patrón radial, valles fluviales anchos, abiertos y poco profundos.
- d. *Morfocronología*: La edad de esta forma es del Pleistoceno medio a superior ya que según Bergoeing & Masís, (2013) el cono data de Pleistoceno inferior.

V4: Laderas volcánicas remanentes

En este apartado se incluyen remanentes de volcanes erosionados y calderas volcánicas, por lo tanto tenemos laderas internas de Alto Palomo/Bajos del Toro (V4a), remanentes de las “calderas” de Palmares (V4b) y San Ramón (V4c), siguiendo la denominación usada por Alvarado (2000).

Cabe resaltar los aportes de Rojas (2013) para futuras discusiones con respecto al origen volcánico-denudacional de estas depresiones, así como de su correcta denominación.

- a. *Ubicación:* Las laderas internas de Alto Palomo (V4a) se encuentran al este del área de estudio entre los poblados de Zarcero y Bajos del Toro (fuera del mapa). Los remanentes de la caldera de Palmares (V4b) y San Ramón (V4c) se encuentran alrededor de estas dos ciudades respectivamente (ver figura 9).
- b. *Morfogénesis:* Estas formas son producto de las morfologías volcánicas originales; ya sean conos, cráteres o calderas volcánicas antiguas, los cuales han sido fuertemente afectadas por los procesos de erosión. Para las calderas lo que se observa son parte de sus bordes erosionados, mientras que para las laderas de Alto Palomo, lo que persiste es una parte de la pared interna del cráter o caldera original.
- c. *Litología:* Los depósitos de Alto Palomo (V4a) corresponden con una serie de flujos pumíticos dacíticos a riolíticos, flujos de ceniza, tobas de ceniza y aluvión. Los restos de las calderas de Palmares (V4b) y San Ramón (V4c) están compuestos por basaltos, andesitas y brechas volcánicas asociadas al Grupo Aguacate (Bergoening & Masís, 2013).
- d. *Morfometría:* Las laderas de Alto Palomo (V4a) forman un arco de círculo de 5 km de largo, con pendientes entre 20 y 35 grados, fuertemente disectadas con gran cantidad de drenajes. Los patrones de drenaje no son definidos ya que corresponde con la parte superior de la cuenca del río Toro, sin embargo se encuentra cortado.
Los remanentes de las calderas de Palmares (V4b) y San Ramón (V4c) forman estructuras casi circulares de entre 1 y 2,5 km de diámetro, con divisorias anchas y redondeadas, laderas de entre 5 y 25 grados, medianamente disectadas. Estas formas poseen pocos drenajes, ya que fueron ocupados por un paleo-lago que cubría el fondo de las calderas colapsadas, durante el Pleistoceno medio, según el análisis realizado por Rojas (2013).
- e. *Morfocronología:* Alvarado & Carr (1993) datan la unidad Alto Palomo en 1.4 Ma mientras que Bergoening & Masís (2013) le dan las calderas una edad de Plioceno superior, por lo que estas morfologías son, a lo sumo, del Plioceno superior.

V5: Caldera volcánica

En este apartado se describen las características de las calderas del volcán Viejo (V5a), nombre dado aquí al interior de la caldera de Río Segundo tal y como la describe Alvarado (2009), y la caldera de Palmira (V5b), según la nomenclatura usada por Villegas (2004).

- a. *Ubicación:* La caldera del volcán Viejo (V5a) se ubica 8 km al este-noreste del poblado de la Laguna, mientras que la caldera de Palmira se ubica 3 km al este del poblado de Laguna y 4 km al noreste del poblado de Zarcero (ver figura 9). Ambas calderas forman parte del complejo Chocosuela-Palmira según Alvarado & Gans (2012).
- b. *Morfogénesis:* Corresponde con una caldera de colapso, debido a una actividad efusiva/eruptiva intensa que vacía el interior del edificio volcánico y provoca su desplome.

- c. *Litología:* Según Alvarado (2009), la caldera del Viejo (V5a) (Río Segundo) está compuesta por coladas de lava, brechas lávicas, tobas, brechas volcánicas y depósitos de azufre asociados principalmente a la Unidad Bajos del Toro. Según Rojas-Araya (2011), se asocia la sección La Palmira (V5b) con megabrechas, sobreyacidas por tobas que a su vez son sobreyacidas por depósitos de nube ardiente.
- d. *Morfometría:* La caldera del volcán Viejo (V5a) posee una forma casi circular, abierta hacia el sureste, de 3 km de diámetro, un desnivel de aproximadamente 600 m y laderas empinadas, con pendientes de hasta 50 grados. Los drenajes cortos y profundos en la parte alta de las laderas. El fondo de la caldera posee una topografía más suave y menos disectada. La caldera de Palmira (V5b) presenta una forma sub-redondeada, alargada en sentido nortesur con dimensiones de 5,5 por 5 km. El borde presenta de 300 a 500 m de espesor y hasta 100 m de desnivel y las pendientes son de entre 10 y 25 grados. Los drenajes al interior de la caldera se encuentran bien desarrollados y poseen un patrón de drenaje rectangular, todos confluyen en el río Tapezco, el cual corta el borde de la Caldera 2 km al norte del poblado de Palmira.
- e. *Morfocronología:* Según la datación de Alvarado & Carr (1993) de la unidad Bajos del Toro-Viejo y sus sub-unidades (Sección la Palmira) estos depósitos datan del Pleistoceno.

V6: Abanico lahárico

- a. *Ubicación:* Se encuentra en la esquina noreste del área de interés y se extiende de 2 a 4 km al sur del poblado de Aguas Zarcas (ver figura 9).
- b. *Morfogénesis:* Esta forma es producto de flujos laháricos que provienen del volcán Platanar, los cuales viajaron por el valle de la quebrada Palomo o el río Aguas Zarcas y se depositaron al pie del edificio volcánico.
- c. *Litología:* Corresponde con un flujo lahárico en el cual bloques, principalmente de andesitas, y otros materiales, se movilizaron en una matriz de agua y ceniza.
- d. *Morfometría:* Esta forma presente un relieve suave, ligeramente ondulado con pendientes de hasta 10 grados y poco drenaje con cauces poco profundos.
- e. *Morfocronología:* Es contemporáneo o posterior a la última fase de actividad eruptiva por lo que probablemente data del Holoceno

(F) Formas de origen fluvial

En este apartado se describen las formas de origen fluvial, tanto de erosión (valles y cañones) como de sedimentación (aluvial). Los procesos que dan origen a estas formas corresponden con la erosión, transporte y sedimentación.

En el sureste del área de interés (ver figura 10), los ríos Sarchí, Colorado y sus afluentes forman un patrón de drenaje paralelo a subparalelo, controlado por las laderas volcánicas. Más al oeste, el río Grande de Tárcoles y sus afluentes forman un patrón subparalelo a rectangular, controlados principalmente por las fallas y alineamientos presentes. Hacia el norte, el río Barranca presenta un

cauce más sinuoso y junto con sus afluentes presenta un patrón paralelo en las laderas altas (cerca del borde de la Caldera de Palmira) y más dendrítico a rectangular hacia el oeste con control estructural, al igual que los ríos Espino y Tapezco junto con sus respectivos afluentes. Al interior de la caldera de Palmira el río Catarata, que luego desemboca en el río Tapezco, y sus afluentes forman un patrón paralelo a rectangular influenciado por los procesos tectónicos y erosivos. Hacia el norte los ríos Santa Clara, Quebrada Lajas, la Vieja y Ronrón que desembocan en la llanura de Santa Clara, presentan patrones de drenaje paralelos a subparalelos, influenciado por la tectónica local. Al noreste del área de interés, los ríos Peje, Platanar, San Rafael y Aguas Zarcas forman un patrón radial alrededor del cono del volcán Platanar para luego tornarse paralelos hacia Ciudad Quesada, con excepción del río Aguas Zarcas, que presenta un patrón dendrítico a rectangular, debido al control tectónico que posee.

La figura 10 muestra el mapa de las cuencas hidrográficas de los ríos principales en la región; específicamente las cuencas de los ríos Colorado, Grande (de Tárcoles), Barranca, Espino, Toro, Tapezco, Santa Clara, La Vieja, Platanar, Santa Clara, Aguas Zarcas y Negritos.

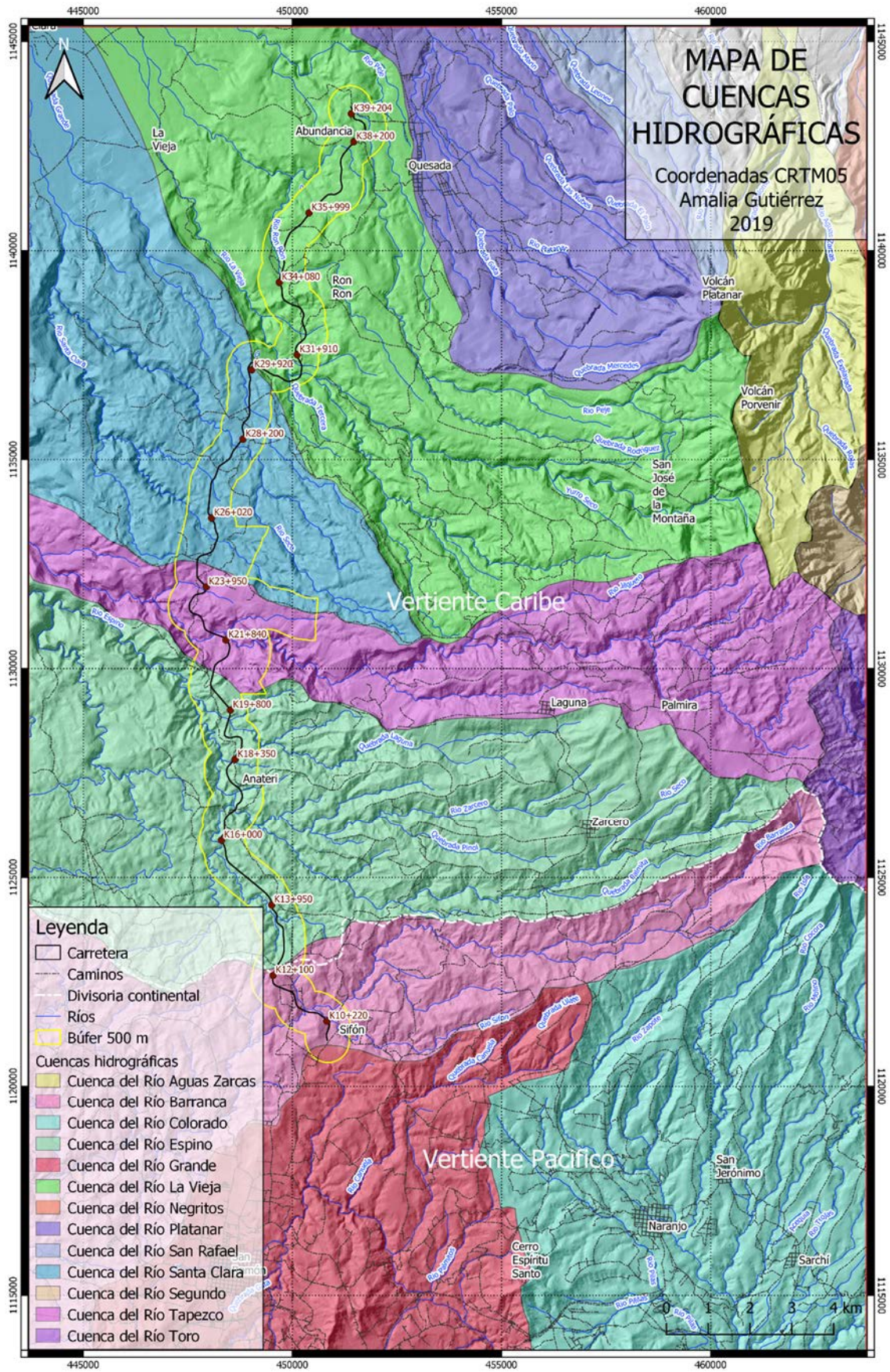


Figura 10: Mapa de cuencas hidrográficas y los ríos principales presentes en el área de estudio.

F1: Cañones y valles fluviales

En este apartado se incluyen todos los valles y cañones de ríos de gran tamaño (cauces primarios) presentes en el área de interés.

- a. *Ubicación:* Se encuentran ubicados en toda el área de interés; una parte desaguan en el océano Pacífico (hasta el río Barranca, de sur a norte) y la otra en el mar Caribe (a partir del río Espino, hacia el norte). Corresponden, de este a oeste y de norte a sur con: el río Sarchí (cerca del pueblo del mismo nombre), el río Trojas, Colorado y el río Pilas, así como sus afluentes (alrededor de Naranjo), el río Grande de Tárcoles y sus afluentes (al este de San Ramón) y el río Barranca (al oeste de San Ramón) para la parte sur del área. En la parte oeste corresponden con el río Espino y sus afluentes y el río Tapezco y sus afluentes. Más al norte desembocan en la llanura de Santa Clara los ríos Santa Clara, la Vieja y Ronrón con sus respectivos afluentes. Al noreste se encuentra la Quebrada Palomo y parte del cauce del río Aguas Zarcas, sobre las laderas del volcán Porvenir (ver figuras 9 y 10).
- b. *Morfogénesis:* Estas unidades surgen como producto de la erosión de los depósitos volcánicos por los ríos a lo largo del tiempo.
- c. *Litología:* Debido a la variedad en la ubicación de los valles y cañones, las litologías son variadas; sin embargo, corresponden principalmente con productos volcánicos: lavas, tobas, ignimbritas y brechas volcánicas.
- d. *Morfometría:* En el área de interés, el valle del río Sarchí es abierto (en v), con laderas de hasta 50 grados, con un ancho de aproximadamente 200 m y una profundidad de 75 m. El valle del río Trojas es abierto, con laderas de 45 grados, 150 m de ancho y 80 m de profundidad. Los valles del río Colorado y sus afluentes (ríos Pilas y sus afluentes, Cocora, Molino y Cascajal) son cerrados y profundos en su parte norte (laderas altas) y en las laderas bajas el río Colorado se ensancha y se torna menos profundo. El río Grande de Tárcoles y sus afluentes (quebrada Potrerillos, río Canuela y quebrada Prensa) poseen valles anchos y medianamente profundos en la parte este; al oeste, cerca de San Ramón, el cauce de este río pasa a ser más encañonado. El río Barranca, al oeste de San Ramón, posee un perfil que varía desde muy abierto, con fondo plano y laderas suaves cerca de San Antonio de Barranca, a más cerrado con perfil en “V” hasta asimétrico (sobre todo en las curvas) cerca de San Miguel. El río Espino y sus afluentes (Quebrada Ojo de Agua y Arena) y el río Balsa, predominantemente cerca de su intersección, poseen cauces sinuosos, fuertemente encañonados y con algunas terrazas visibles, así como deslizamientos en la margen izquierda del río Espino. El río Tapezco y su afluente (Quebrada Túnel) poseen características similares al río Espino; son sinuosos, encañonados, y con algunos deslizamientos en su margen izquierda. Los ríos Santa Clara y Seco, también son encañonados y sinuosos, pero en menor medida. Por otro lado el río La Vieja y sus afluentes (Quebrada Lajas y Zapote) poseen cursos rectilíneos, con valles en “U” menos profundos y con laderas más suaves. El río Ronrón posee valles abiertos y poco profundos con laderas

de bajas pendientes. Finalmente, la Quebrada Palomo y parte del río Aguas Zarcas, poseen valles en “U” abiertos y profundos (hasta 200 m), con pendientes fuertes aguas arriba que se van suavizando.

- e. *Morfocronología*: La mayoría de estas unidades son del Cuaternario; sin embargo, es posible que el proceso de formación de estas morfologías haya iniciado anteriormente.

F2: Planicie aluvial

En este apartado se incluyen los depósitos aluviales alrededor de Naranjo (F2a), Ciudad Quesada (F2b) y la llanura aluvial de Santa Clara (F2c).

- a. *Ubicación*: Los depósitos aluviales de Naranjo (F2a) se ubican alrededor de los pueblos de Naranjo, San Jerónimo y Sarchí hasta llegar a Bajo Corrales, así como en San Miguel, al sureste del Cerro Espíritu Santo. El plano aluvial de Ciudad Quesada (F2b) se ubica alrededor de dicha ciudad. La llanura aluvial de Santa Clara (F2c) se ubica alrededor de la ciudad de Florencia y cubre la esquina noroeste del área de interés (ver figura 9).
- b. *Morfogénesis*: Los depósitos aluviales de Naranjo (F2a) son producto de la acumulación de sedimento acarreado por ríos Pilas y Colorado y sus afluentes, a la base de las laderas volcánicas y del Cerro Espíritu Santo. De igual manera, el plano aluvial de Ciudad Quesada (F2b) es producto de acumulación de sedimento fluvial transportado por los ríos Peje y Platanar, proveniente de las laderas del volcán Platanar; la llanura aluvial de Santa Clara (F2c) es producto de la erosión y acumulación de sedimento fluvial por los ríos Ronrón, La Vieja, General y Santa Clara.
- c. *Litología*: Estas morfologías están compuestas principalmente por sedimentos de grano fino a grueso (limos, arcillas, arenas, gravas y bloques) que provienen de los macizos volcánicos, por lo tanto producto de la alteración de tobas (ceniza) y lavas, principalmente.
- d. *Morfometría*: Los depósitos aluviales de Naranjo (F2a) cubren un área aproximada de 8 por 7 km cerca de Naranjo, con pendientes entre 1 y 15 grados, drenaje asimétrico y subparalelo del lado de las laderas volcánicas. El plano aluvial de Ciudad Quesada (F2b) posee una forma alargada de 4 por 3 km, un relieve plano con pendientes entre 0 y 8 grados y un drenaje paralelo y poco profundo. La llanura aluvial de Santa Clara (F2c) posee una forma de $\frac{1}{4}$ de círculo, con 4,5 km de radio en el área de interés, está definida por la traza de la falla Florencia-Palmira al sureste, el relieve es plano con pendientes de entre 0 y 10 grados y posee un patrón de drenaje paralelo.
- e. *Morfocronología*: Debido al origen de los materiales, este relleno debe haberse depositado durante el Pleistoceno u Holoceno (Cuaternario).

(L) Formas de origen lacustre

En este apartado se describen las formas de origen lacustre, principalmente todos los fenómenos asociados a la actividad lagunar que afectan todas las áreas con drenaje deficiente. En este caso se

asocian principalmente al Lacustre de Palmares y San Ramón, estudiado al detalle por Rojas (2013), quien atribuye tres posibles orígenes a esta cuenca.

L1: Depósitos lacustres

En este apartado se incluyen los depósitos lacustres de Palmares (F3a) y San Ramón (F3b).

- a. *Ubicación:* Los depósitos lacustres de Palmares (F3a) y San Ramón (F3b) se ubican alrededor de los poblados de mismo nombre (ver figura 9).
- b. *Morfogénesis:* Luego del colapso de las calderas de Palmares y San Ramón, la presencia de material fino en las depresiones correspondientes permitió la existencia de lagunas pantanosas que luego se secaron. Rojas (2013) propone tres orígenes distintos: caldera de colapso, caldera de avalancha y cuencas por control tectónico, y asume el último como más probable.
- c. *Litología:* Los depósitos lacustres de Palmares y San Ramón corresponden con material de grano fino con pómez y diatomitas y presencia de fósiles; estos se encuentran sobreyacidos por una ignimbrita asociada a la formación Tiribí (Huapaya & Rojas, 2012).
- d. *Morfometría:* Los depósitos lacustres de Palmares (F3a) cubren un área que sobrepasa el límite del área de estudio; sin embargo, presenta pendientes suaves de hasta 8 grados y drenajes poco profundos. Los depósitos en el área de San Ramón (F3b) presentan una forma alargada en dirección NE-SW con dimensiones de 2 por 5 km, relieve plano (pendientes hasta 8 grados) y algunos drenajes poco profundos. En el centro de esta morfología se encuentra un cerro aislado.
- e. *Morfocronología:* Según Huapaya & Rojas (2012), estos depósitos datan del Pleistoceno medio a superior.

4.3. Geomorfología local

El área de interés tratada para la determinación de las unidades geomorfológicas locales cubre 34,19 km². Esta se limitó a un búfer de 500 m a ambos lados de la carretera, dejando de lado las rutas secundarias debido a la diferencia en la calidad de los modelos de elevación digital.

4.3.1. Metodología

Para la creación de los modelos de elevación digital (MED) se usó información lidar con resolución de un punto por metro cuadrado (obtenida por la empresa AeroDiva S.A para el Lanamme-UCR en octubre del 2014), del cual se extrajo curvas de nivel cada 1 m para poder manejar los datos más fácilmente. Con estas curvas se creó un modelo de sombras (hillshade), que se limita a un búfer de 500 m a ambos lados de la carretera (figura 11). Debido a la diferencia entre la resolución disponible para el búfer de 500 m a ambos lados de la carretera y el área de estudio escogida inicialmente (búfer de 1 km a ambos lados de la carretera y radiales principales), se escogió trabajar únicamente con el área que cuenta con información lidar (búfer de 500 m) y así unificar los criterios para la delimitación de unidades geomorfológicas.

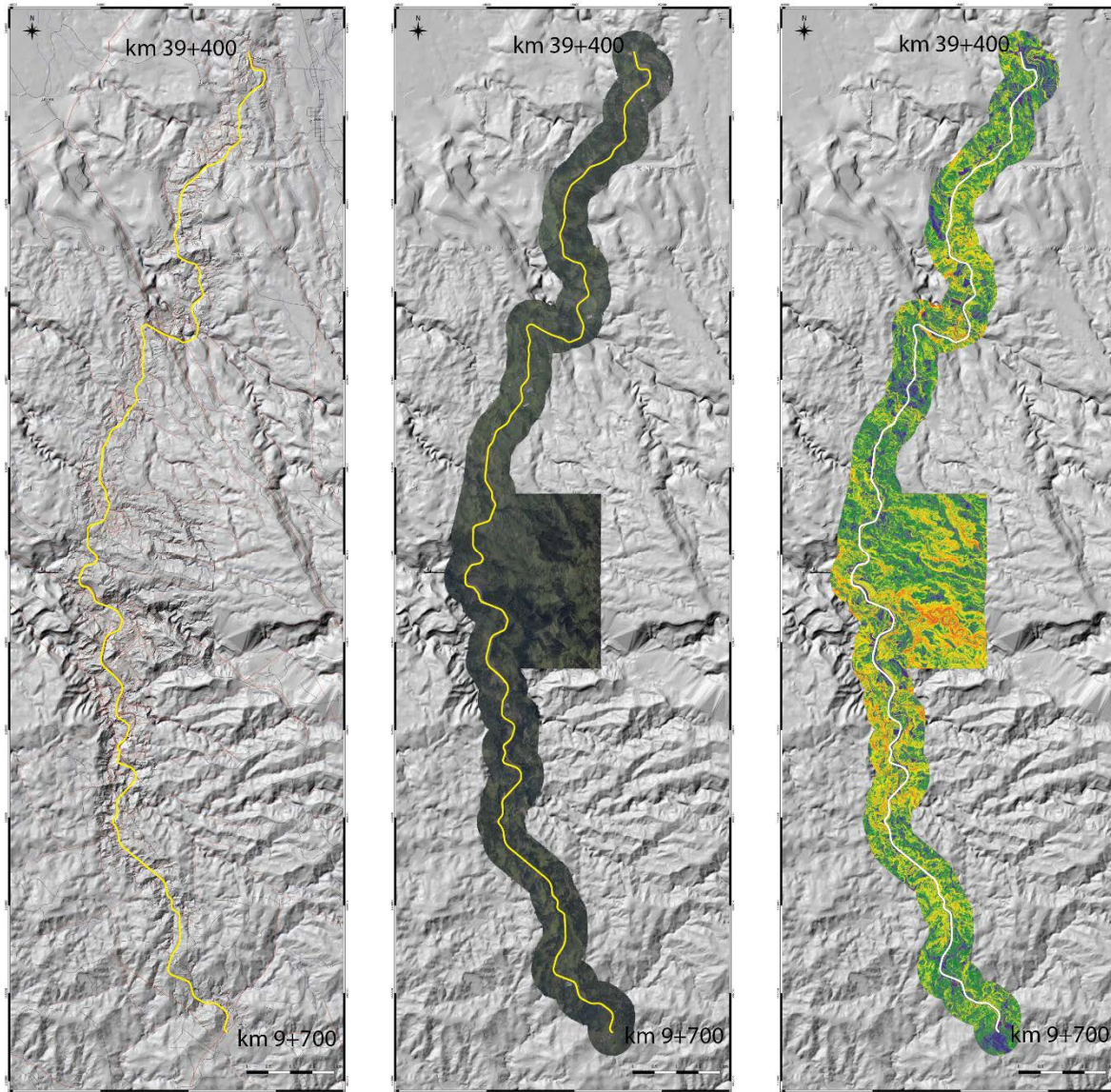


Figura 11: Modelo de sombras, mosaico de imágenes y mapa de pendientes derivados de los datos lidar (de derecha a izquierda, respectivamente).

La delimitación de unidades geomorfológicas se realizó usando el modelo de sombras creado a partir de los datos lidar; también se obtuvo un mapa de pendientes (figura 11), con la escala de colores usada anteriormente para la geomorfología regional. Debido a que la información usada posee un alto grado de detalle, no es de utilidad el cálculo de curvatura de rumbo ni de buzamiento, ya que estos no mostrarían rasgos relevantes en este caso. Se trabajó con la red de drenajes escala 1:50 000 del Atlas Digital de Costa Rica (2008) e información de los drenajes generados a partir del modelo lidar. Los insumos para la fotointerpretación corresponden con un mosaico de imágenes aéreas con resolución de 15 cm (AeroDiva S.A, 2014) del área dónde se realizó el mapeo lidar en la carretera, estas imágenes fueron obtenidas por la empresa AeroDiva para el LanammeUCR en Octubre el año 2014.

Toda la información mencionada anteriormente fue usada para la interpretación de las unidades geomorfológicas locales, para las cuales se trabajó en una escala entre 1:1 000 y 1:10 000. Con esto se delimitaron un total de 779 polígonos. Para la clasificación de las unidades se usó el sistema del ITC (Van Zuidam, 1985 y Verstappen y Van Zuidam, 1991), en el cual la división principal de las unidades es respecto a su génesis; estas se dividen en unidades exógenas y unidades de origen antropogénico. Se determinaron un total de 198 polígonos de origen antropogénico, los cuales se dividieron en 7 subclases. Los 581 polígonos de origen exógeno pertenecen a las siguientes clases: formas de origen denudacional, estructural denudacional y fluvial, y estas a su vez se dividen en 17 sub-clases.

La delimitación de las unidades geomorfológicas locales (figura 12) se completó con observaciones realizadas en el campo durante las giras de trabajo realizadas a lo largo de la carretera. Cabe recalcar que el mapeo geomorfológico aquí realizado corresponde con el estado del proyecto en un momento determinado (Octubre del 2014) y que estas pueden haber sufrido modificaciones desde entonces.

4.3.2. Descripción de las unidades geomorfológicas locales

I. Relieve de modelado antropogénico

Corresponde con unidades geomorfológicas que surgen como consecuencia de la modificación del relieve por el hombre para acomodar actividades humanas. Debido al tiempo que ha transcurrido desde el inicio del proyecto (2005) y la presencia de asentamientos humanos en el área de estudio, una parte importante de las unidades geomorfológicas descritas corresponden con formas de origen antropogénico (A).

Aquí se describen las formas de relieve asociadas a la construcción de la carretera tales como los taludes, escombreras y trazado de la carretera. Sin embargo, también se incluyen elementos independientes, formados simultáneamente o con anterioridad, para acomodar las actividades humanas como son la agricultura, ganadería o simplemente uso habitacional. Entre estos últimos podemos citar: rellenos, lagunas artificiales, terrazas artificiales y colinas de corte.

MAPA GEOMORFOLÓGICO LOCAL

Coordenadas CRTM05
Amalia Gutiérrez
2019

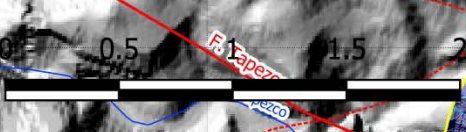
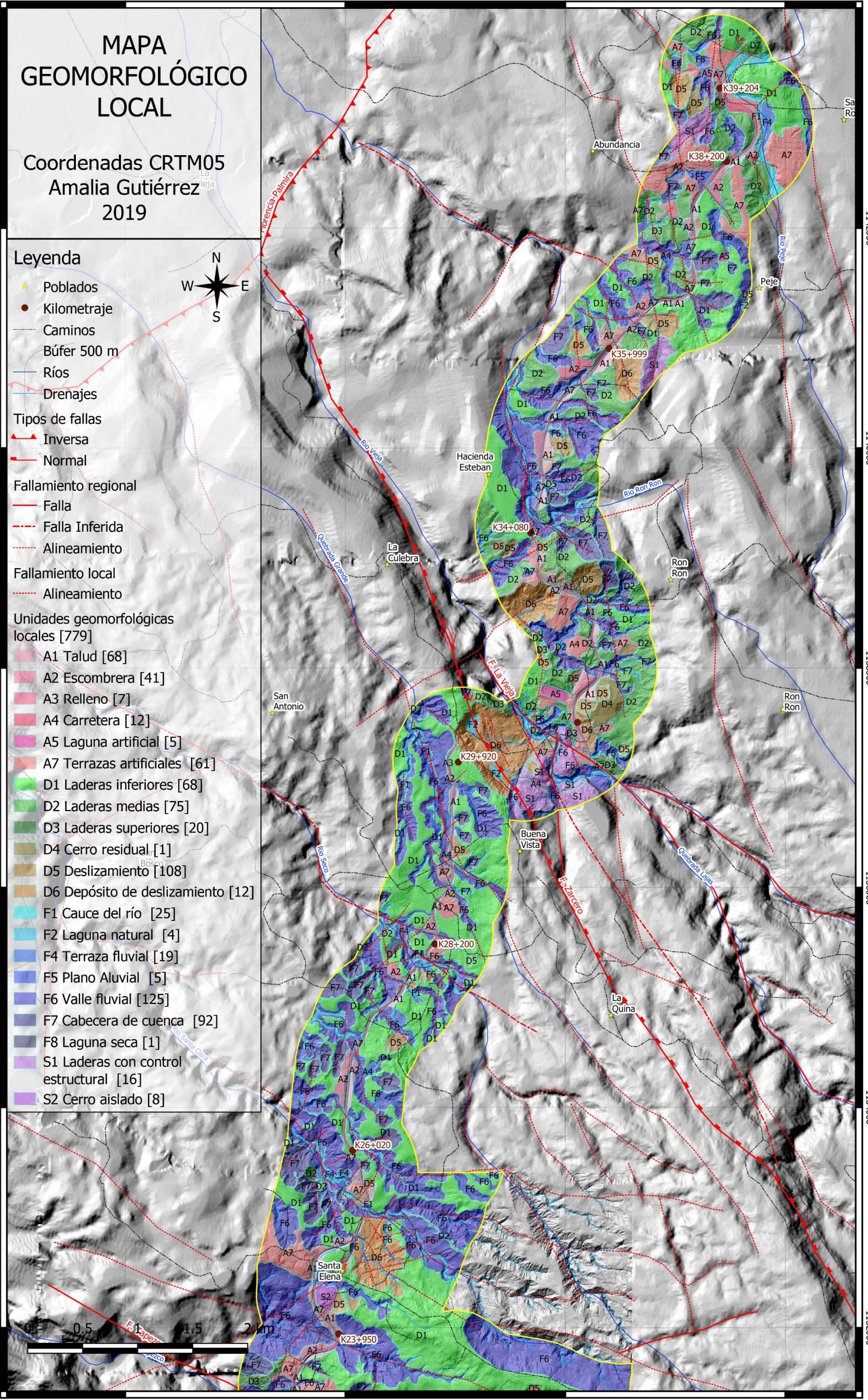
Leyenda

- ★ Poblados
- Kilometraje
- Caminos
- Búfer 500 m
- Ríos
- Drenajes
- Tipos de fallas
 - ▲ Inversa
 - Normal
- Fallamiento regional
 - Falla
 - Falla Inferida
 - Alineamiento
- Fallamiento local
 - Alineamiento
- Unidades geomorfológicas locales [779]
 - A1 Talud [68]
 - A2 Escombrera [41]
 - A3 Relleno [7]
 - A4 Carretera [12]
 - A5 Laguna artificial [5]
 - A7 Terrazas artificiales [61]
 - D1 Laderas inferiores [68]
 - D2 Laderas medias [75]
 - D3 Laderas superiores [20]
 - D4 Cerro residual [1]
 - D5 Deslizamiento [108]
 - D6 Depósito de deslizamiento [12]
 - F1 Cauce del río [25]
 - F2 Laguna natural [4]
 - F4 Terraza fluvial [19]
 - F5 Plano Aluvial [5]
 - F6 Valle fluvial [125]
 - F7 Cabecera de cuenca [92]
 - F8 Laguna seca [1]
 - S1 Laderas con control estructural [16]
 - S2 Cerro aislado [8]



1142000
1140000
1138000
1136000
1134000
1132000

1142000
1140000
1138000
1136000
1134000
1132000



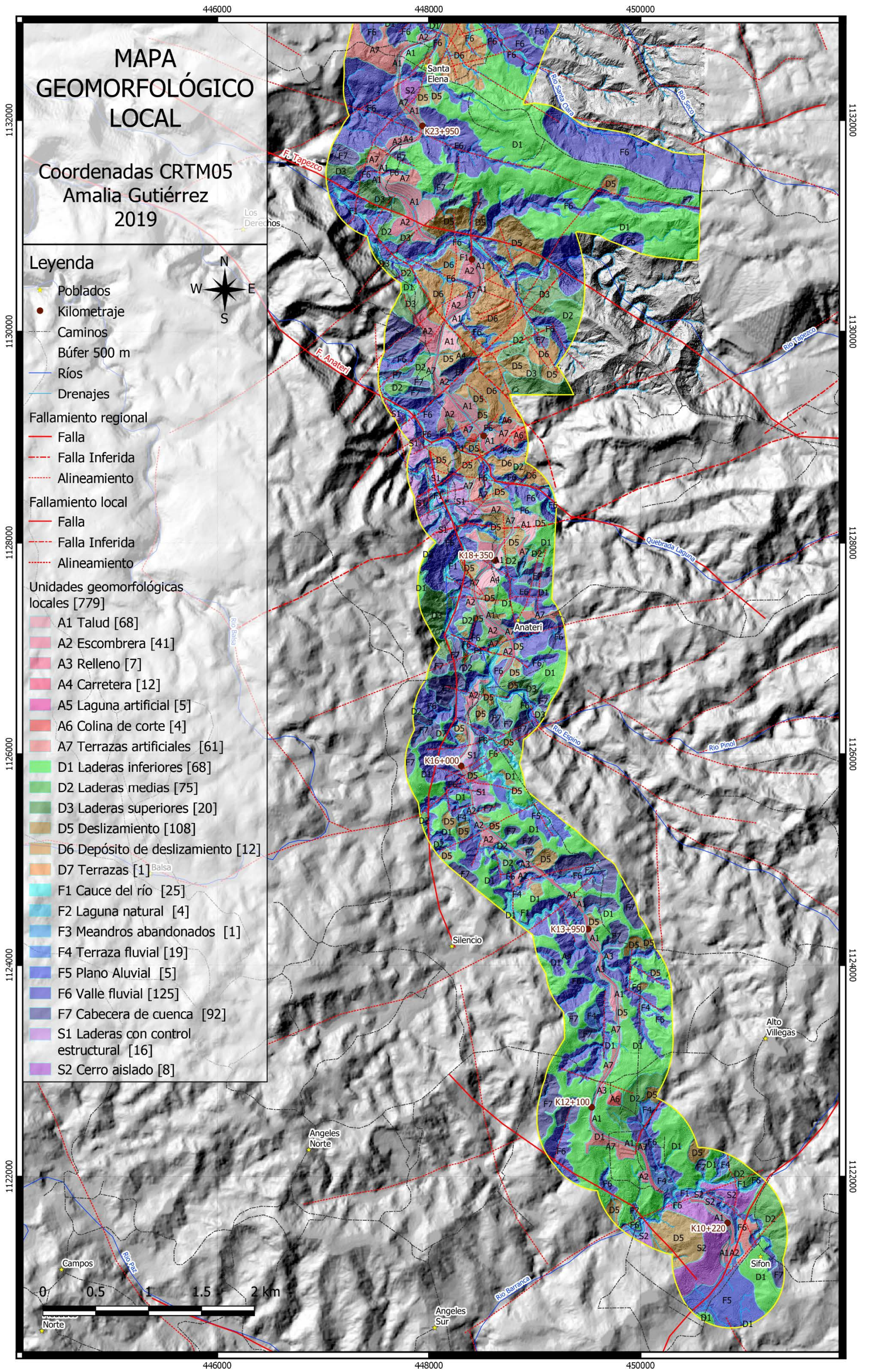


Figura 12: Mapa geomorfológico local.

A1: Talud

Todos los taludes se encuentran dentro del área del proyecto (construcción de la Ruta Nacional No. 35 en el tramo entre los poblados de Sifón y La Abundancia) y responden al trazado de dicha ruta. En el área se mapearon un total de 68 taludes. Están compuestos por uno o más sistemas de talud-berma-talud y cuentan con elementos adicionales como lo son las cunetas, contra-cunetas, obras de retención, gradas y otros tipos de drenaje. Algunos se encuentran afectados por deslizamientos cuyas dimensiones en general no sobrepasan las dimensiones del talud. Inicialmente, la mayoría de los taludes fueron diseñados con pendientes de entre 45 y 50 grados (informe LM-PI-AT-102-12); sin embargo, debido a problemas de inestabilidad, algunos han sido modificados y cuentan actualmente con ángulos de corte menores. Parte de los taludes se encuentran ya revegetados y cortan la mayoría de las unidades geológicas presentes en el área de estudio. Los taludes de mayores dimensiones se encuentran antes y después del puente sobre la quebrada Laguna y poseen hasta 700 m lineales de largo y 30 m de alto, en sistemas de bermas y taludes. Los taludes más pequeños poseen solo una sección y pueden ser menores a 3 m de alto. Debido a la escala de trabajo, es posible que taludes de muy pequeñas dimensiones (<2 m de alto) no hayan sido identificados.

A2: Escombrera

Al igual que los taludes, todas de las escombreras se encuentran sobre el trazado de la ruta a ambos lados de la carretera y responden a la necesidad de contar con sitios para el acomodo de material proveniente de los cortes de los taludes. Su forma se ajusta al espacio disponible para acomodar el material. En el área se mapearon un total de 41 escombreras. Varias escombreras presentan terrazas como forma de acomodo, y en algunas se observa material en condición muy suelta. Muy pocas cuentan con barreras de retención de sedimentos o mantos para control de erosión superficial. Según el Informe de Evaluación LM-PI-UE-001-2017 del Lanamme-UCR, el 58,8% de las escombreras se encuentran cubiertas por vegetación, de las cuales la mitad se encuentra en excelente estado. Por otra parte del 40,7% cubierto por suelo o escombros, casi un 70% se encuentran en mala condición, con presencia de surcos y cárcavas. Finalmente solo el 0.5% restante cuenta con mantos para el control de erosión. Las dos escombreras en estado crítico según este informe, son las escombreras S13 y la S13A. Debido a su origen, la composición litológica de estas unidades es diversa, en su mayoría están compuestas por material de los taludes pero también agregados usados para la carretera (bloques, grava, entre otros). La escombrera de mayores dimensiones (S13A) es de 300 m de ancho por 300 m de largo, con un desnivel de 40 m para un área de 57 300 m². La escombrera de menores dimensiones definida como unidad geomorfológica, es de aproximadamente 35 m por 64 m, para un área de 1362 m². La carretera aún se encuentra en construcción, por lo que la forma, tamaño y volumen de estas pueden cambiar en el futuro.

A3: Relleno

Esta unidad corresponde con una topografía que ha sido rellenada, por lo general para ampliar el área sobre la cual se pretende construir la carretera; ya sea debajo de esta o a los lados, y es conocida como relleno de sub-rasante o terraplén. También puede corresponder con escombreras no declaradas oficialmente. En el área se mapearon un total de 7 zonas de relleno. Al igual que las escombreras, generalmente están compuestas de material proveniente de lugares cercanos, pero pueden contar con aportes externos. Al no haber sido modificados recientemente, la mayoría se encuentran cubiertos por vegetación. Los rellenos correspondientes a terraplenes deben responder a un diseño formal, contar con caracterización de propiedades mecánicas, un modelo geotécnico establecido, planos y especificaciones para el control de calidad durante la construcción. Debido a su función, generalmente poseen formas alargadas a lo lado de la carretera y la unidad de mayores dimensiones posee 350 m de largo por 25 m de ancho, para un área de 5 385 m². Por su forma plana, pueden existir rellenos destinados a otros usos como son la construcción, apilamiento de material, entre otros.

A4: Carretera

Debido a que el proyecto se centra en la construcción de una carretera de cuatro carriles, esta unidad es la de mayor importancia para dicho proyecto. Corresponde con el trazado de la carretera en sus diferentes fases de construcción; algunos tramos presentan sub-base, base y carpeta asfáltica, mientras que otros solo se encuentran cortados o rellenos con lastre para permitir el tránsito de vehículos pesados durante la construcción. Debido a su diseño, esta unidad por lo general es alargada y plana, y cuenta con un desnivel máximo de 8%, según el oficio DIE-07-10-5356. El ancho promedio de la carretera es de 14 o 28 m, el cual incluye espacio para el acomodo de espaldones, medianeras, cunetas longitudinales y la estructura de pavimento. La carretera se extiende desde el km 9+683 hasta el kilómetro 39+427. Los tramos, tal y como fueron delimitados para la clasificación geomorfológica (12 en total), se encuentran cortados por los puentes, los cuales no se tomaron en cuenta para poder clasificar la topografía subyacente.

A5: Laguna artificial

Esta unidad corresponde con lagunas que han sido creadas artificialmente, ya sea para reemplazar lagunas pre-existentes que fueron alteradas con la construcción del proyecto (por ejemplo La Laguna), lagunas para usos comerciales (laguna del proyecto hidroeléctrico Chocosuela I), acuicultura o usos recreativos. En el área de estudio se mapearon un total de 5 lagunas. Se encuentran excavadas en las diferentes litologías presentes en el proyecto. Poseen formas alargadas con uno o más reservorios y su volumen de agua depende de la precipitación, cambios estacionales y regulación para fines comerciales. De estas, la más grande corresponde con la laguna de reservorio del proyecto hidroeléctrico Chocosuela I, de 270 m de largo por 95 m de ancho, para un área 25 149 m², y la más pequeña es adyacente y posee 62 m de largo por 15 m de ancho. La edad

de las lagunas de Chocosuela I son posteriores a 1999 y la laguna artificial de La Laguna es posterior al 2005.

A6: Colina de corte

Se definen como colinas pertenecientes a laderas denudacionales que han sido cortadas de manera que quedan aisladas, dando la falsa impresión de una colina o cerro aislado. En el área se mapearon un total de 4 colinas de corte. Por lo general, se encuentran cubiertas por vegetación o pastos y son redondeadas. Por su génesis, su litología corresponde con la del relieve circundante. Sus laderas poseen pendientes de hasta 20 grados, relieve suavizado con un desnivel de hasta 50 m y sus dimensiones son de hasta 230 m por 175 m, para un área de 24 553 m².

A7: Terrazas artificiales

Se denominan como terrazas artificiales, las formas de relieve que han sido cortadas en forma de terrazas para el acomodo de actividades humanas relacionadas con la construcción de la carretera o no. Para el área de estudio se delimitaron un total de 61 zonas con terrazas artificiales. Incluyen terrazas cortadas para el acceso a taludes de corte, producción de agregados, apilamiento del material, así como terrazas para la construcción de galerones dedicados a la avicultura o la construcción de viviendas de uso habitacional. Las terrazas que no presentan construcciones ni son usadas para la construcción de la carretera, suelen presentar pastos o vegetación. Estas se encuentran alrededor de la carretera en construcción, así como de las rutas secundarias aledañas. Son planas y en su conjunto pueden presentar hasta 40 m de desnivel. La más pequeña corresponde con una sola terraza de 331 m² mientras que la de mayor tamaño está compuesta por una serie de terrazas cubriendo un área de 153 281 m² en el barrio de Arco Iris, en las afueras de Ciudad Quesada. De la misma manera, estas terrazas cortan las litologías presentes en el área.

II. Relieve exógeno

En este apartado se describen las unidades geomorfológicas que surgen como consecuencia de la modificación del relieve por los actores erosivos como el agua, el viento y procesos de remoción en masa. En este caso, se asume que la mayoría de la topografía inicial es de origen volcánico y ha sido modificado por procesos exógenos (erosión y acumulación), para obtener las morfologías actuales. Las formas de erosión son más numerosas que las de acumulación, las cuales se limitan a movimientos de masa y agentes fluviales. En total se mapearon 581 polígonos de origen exógeno, divididos en formas de origen denudacional (285), formas de origen fluvial (272) y formas de origen estructural denudacional (24).

(D) Formas de origen denudacional

Las formas de origen denudacional son producto de la alteración del relieve de origen volcánico por los agentes erosivos. La dureza y composición de los materiales volcánicos predominantes (tobas e ignimbritas), junto con las altas precipitaciones, propicia una fuerte erosión

de los materiales que se ve reflejada en laderas muy inestables. Las laderas denudacionales se dividen según su pendiente. El grado de disectación no es tomado en cuenta, ya que los valles y cuencas fluviales son delimitados por aparte. Los procesos de remoción de masa, que son muy frecuentes, son identificados sin distinguir su edad, su tipo, ni la presencia de actividad en los deslizamientos. La clasificación de estos procesos será tomada en cuenta para la caracterización de las amenazas naturales en un apartado posterior. Debido a la escala de trabajo, es posible que deslizamientos muy pequeños no hayan sido mapeados; de igual manera, procesos de remoción de masa posteriores a la toma de imágenes y datos lidar (octubre 2014) no aparecen en esta clasificación. Éstos fueron mapeados junto con la geología local y serán tomados en cuenta para la determinación de la amenaza de deslizamientos.

D1: Laderas denudacionales de baja pendiente

Las laderas denudacionales de baja pendiente corresponden con gran parte de las laderas encontradas en el área de estudio. Surgen de la erosión de laderas compuestas por materiales volcánicos, los cuales se encuentran muy meteorizados debido a las altas precipitaciones. Se concentran en la parte sur del proyecto, antes del puente sobre el río Espino, así como en la parte central, entre el río Tapezco y el río La Vieja. Estas laderas fueron clasificadas como D2 en el mapa geomorfológico regional. En total se mapearon 68 de estas unidades. Presentan pendientes suaves (inferiores a los 15 grados) y topografía ondulada con poca disectación. Se encuentran cortados por valles fluviales en v, abiertos y poco profundos (40 m en promedio); el patrón de drenaje es dendrítico a rectangular. Están compuestas por materiales volcánicos: lavas, tobas, e ignimbritas. Debido a sus suaves pendientes, estas laderas son favorables para pastos o cultivos, por lo que presentan poca cobertura boscosa.

D2: Laderas denudacionales de moderada pendiente

Al igual que la unidad anterior, las laderas denudacionales de moderada pendiente corresponden con gran parte de las laderas encontradas en el área de estudio, con un total de 75 laderas mapeadas. Son producto de la erosión prolongada de las laderas compuestas por materiales volcánicos menos meteorizados que las laderas altas. Predominan en la parte norte del proyecto, después del puente sobre el río La Vieja. Estas laderas presentan pendientes moderadas (entre 15 y 30 grados), topografía ondulada a montañosa, con un grado moderado de disectación. Se encuentran cortadas por valles fluviales más angostos y el patrón de drenaje es más rectangular que dendrítico. Están compuestas por los materiales volcánicos del área de estudio: lavas, tobas, e ignimbritas, con una mayor proporción de lavas y bloques. El aumento en la pendiente se traduce en una disminución en el uso agrícola, el cual es aún predominante y favorece procesos de reptación, y un aumento de la cobertura boscosa.

D3: Laderas denudacionales de alta pendiente

Las laderas denudacionales de alta pendiente representan una menor proporción del área de estudio, para un total de 20 polígonos. Son producto de la erosión de las laderas compuestas por materiales volcánicos, de procesos tectónicos o de remoción de masa. No predominan en grandes zonas del proyecto, sino que se concentran en áreas específicas como alrededor del río Tapezco o el río La Vieja. Estas laderas presentan altas pendientes, de entre 30 y 55 grados; debido a la escasa presencia de pendientes superiores a los 55 grados, no se añadió una unidad adicional con pendientes muy altas. Presentan topografía montañosa abrupta, con un alto grado de disectación y por lo general se encuentran cercanos a los valles fluviales de mayor ancho y profundidad. Están compuestas por materiales volcánicos, con predominancia de lavas y materiales con ángulos de estabilización mayores pese a la meteorización sufrida, los cuales favorecen una mayor cobertura boscosa. Algunas de estas laderas pueden haber presentado caída de rocas.

D4: Cerro residual

Los cerros residuales son producto de la erosión diferencial del relieve, ya sea por factores tectónicos, diferencias en la litología o los procesos erosivos mismos. Se identificó un cerro residual en el área de estudio, el cual es redondeado, de poca altura (50 m desde la base) y se encuentra delimitado por cauces de ríos. Presenta laderas moderadas, con pendientes de hasta 30 grados, dos deslizamientos y está cortado por la carretera; sin embargo, su forma original es reconocible. Es de 340 m por 390 m y cubre un área de 77 337 m², está compuesto por materiales de la Unidad informal de Depósitos de caída indiferenciados (tQi) y se encuentra cubierto por pastos.

D5: Áreas con movimientos de masa severos

En el área de estudio se encontraron gran cantidad de zonas con procesos de remoción de masa claramente identificables. Incluyen deslizamientos antiguos, deslizamientos recientes o zonas con movimientos de masa; en particular gran parte de las laderas muestran reptación. Se mapearon un total de 108 áreas con movimientos de masa severos. No se tomaron en cuenta zonas de depósitos de deslizamientos antiguos, deslizamientos muy recientes (posteriores a la toma de imágenes y datos lidar en octubre del 2014) o muy pequeños (inferiores a 800 m²). Los movimientos de masa reflejan inestabilidades en las laderas, las cuales son debidas a la fuerte meteorización de las rocas por la precipitación, la escorrentía, la erosión, así como procesos tectónicos y modificaciones humanas.

Los deslizamientos más antiguos encontrados están cubiertos por vegetación, la cual varía entre pastos y árboles de poca altura, mientras que los más recientes presentan poca vegetación dispuesta de forma caótica o suelos descubiertos. Estos se encuentran en laderas, escombreras, taludes y valles de ríos, así como en ocasiones se asocian con zonas con gran cantidad de alineamientos. Se pueden dividir en diferentes tipos de movimientos: caída, basculamiento, separación lateral,

deslizamiento y flujo. Debido a la consistencia de los materiales predominantes en el área de estudio, los deslizamientos en tobas e ignimbritas meteorizadas se consideran como movimientos en suelos, según la clasificación de Hungr et al., (2014) En el área de estudio hay presencia de caída de bloques y flujos-deslizamientos de detritos; sin embargo, predominan los deslizamientos de tierra, deslizamientos rotacionales de suelos (“soil slump”) y flujos de tierra. Su forma y tamaño dependen del tipo de movimiento, no obstante los deslizamientos de mayor tamaño suelen ser deslizamientos rotacionales de suelos.

D6: Depósito de deslizamiento

Se clasifican como depósitos de deslizamiento, las zonas donde existen evidencias de movimientos de masa severos, cuyos depósitos presentan las siguientes características: relieve ondulado, pendientes bajas (inferiores a 20 grados), con lomas irregulares, suelos saturados, presencia de alineamientos y depósitos poco consolidados. En total se identificaron 12 zonas con este tipo de depósitos en el área de estudio. Son producto de la depositación de grandes deslizamientos rotacionales de suelo, los cuales son relativamente antiguos. Estos depósitos están compuestos por una mezcla de las diferentes litologías: tobas, clastos, bloques, entre otros y se definieron como una unidad litológica aparte. La mayoría de estos depósitos presentan poca vegetación, principalmente pastos y vegetación característica de ambientes muy húmedos. En particular, se distinguen tres regiones.

La primera se extiende entre la quebrada Laguna y el río Tapezco. Se compone de depósitos de al menos 4 deslizamientos distintos, de los cuales el mayor se extiende por lo menos 1 km al sur del cauce del río Tapezco. Se cree que la corona de este deslizamiento corresponde con las laderas en la margen derecha del río, antes del puente. En este caso el deslizamiento tendría una dirección hacia el sureste. Esta zona presenta una serie de alineamientos en dirección suroeste-noreste y posiblemente está cortada por una serie de fallas que afectan tanto los cursos del río Tapezco como la quebrada Laguna. Este depósito se encuentra dividido por la carretera en dos partes; hay varios taludes y escombreras a ambos lados de la carretera. La saturación del suelo discurre por los drenajes que cruzan el depósito perpendicularmente a la carretera y se asocian al fallamiento local, y hacia el noroeste hay una laguna natural producto del represamiento de las aguas.

La segunda de estas zonas se extiende 700 m al sur del cauce del río Santa Clara, corresponde con depósitos de un solo deslizamiento, cuya corona ha sido erosionada. Este depósito presenta gran cantidad de drenajes, alineamientos y está compuesto por una mezcla de tobas, clastos y bloques. Presenta poca vegetación y hay evidencia visual de una alta saturación del suelo.

La tercera zona se encuentra en la margen derecha del río La Vieja, al sur del Proyecto Hidroeléctrico Chocosuela I. Está compuesto por un escarpe de un deslizamiento antiguo y su depósito, visible en las hojas cartográficas escala 1:50 000, es atravesado por el trazado de la carretera. Se extiende 700 m al sur del cauce del río y posee un ancho de 450 m, aproximadamente. La corona del deslizamiento indica una dirección de movimiento hacia el noreste, y hacia el sureste

limita con cerros aislados con control estructural con fallamiento predominantemente de rumbo, observable en el talud antes del puente sobre el río La Vieja. En la parte norte se encuentra la Laguna González, la cual pone en evidencia la saturación del suelo, así como una zona catalogada como humedal según el Estado (Rojas, 2012, Bosque, 2018 y Loaiza, 2018) a pesar de no encontrarse en el inventario nacional de humedales (disponible a través de la página del SNIT). Sin embargo, se considera que esto corresponde a un represamiento de las aguas por los depósitos del deslizamiento. Además, presenta una topografía irregular, está cortado por alineamientos y está compuesto por una mezcla de materiales variados.

D7: Terrazas

Se encontró una terraza, cubierta por vegetación y rodeada por laderas denudacionales, de la cual no se tiene la certeza en cuanto a su origen. Por su cobertura se clasificó como denudacional. Se encuentra en los primeros 10 kilómetros de carretera, cerca del kilómetro 16. Es plana, de 70 m por 35 m con un área de 2 473 m² y no parece tener uso actualmente. Probablemente esté constituida por depósitos de la Unidad informal de Depósitos de caída indiferenciados (tQi).

(F) Formas de origen fluvial

Las formas de origen fluvial son producto de la erosión, transporte y sedimentación de los ríos y quebradas presentes en el área de estudio. Los ríos principales que atraviesan esta área son los ríos Barranca, Espino, Quebrada Laguna, Tapezco, Santa Clara, Seco, Quebrada Grande, La Vieja, Ronron, y Peje. También hay presencia de otras quebradas y sus numerosos afluentes.

Los patrones de drenaje varían poco con respecto a la geomorfología regional, sin embargo se detallan sus cambios a continuación. Los ríos Silencio, Quebrada Plata y sus respectivos afluentes bordean la carretera y son una morfología predominante, con un patrón de drenaje dendrítico a paralelo entre el kilómetro 12 y su confluencia con el río Espino. A partir de este punto predomina el valle del río Espino con sus afluentes: quebrada Arena (primera: km 17+400) y quebrada Yeguas, los cuales presentan un patrón de drenaje rectangular en este punto, hasta confluir con la quebrada Laguna cerca del kilómetro 20. El río Tapezco y sus afluentes presentan un patrón de drenaje paralelo con pocos afluentes y valles fluviales entre los kilómetros 21 y 24. A partir del kilómetro 25 la quebrada Arena (segunda: km 25+450) y otras quebradas presentan gran cantidad de afluentes con un patrón de drenaje dendrítico hasta llegar al río Seco en el kilómetro 28. Más al norte, la quebrada Chico Luís y sus afluentes presentan las mismas características. El río La Vieja y sus afluentes presentan un patrón de drenaje paralelo a subparalelo, entre los cuales la quebrada Rueda y sus afluentes representan la mayoría de los valles fluviales alrededor del kilómetro 33. Entre los kilómetros 34 y 38, el río Ronrón y sus afluentes presentan un patrón de drenaje paralelo a rectangular. Finalmente, el río Peje presenta poco afluentes en el área de estudio.

Dentro de las formas de origen fluvial se identificaron unidades de erosión, las cuales predominan en el área de estudio: valles y cabeceras de cuenca; también se identificaron formas de

sedimentación: meandros abandonados, terrazas fluviales, planos aluviales y depósitos lacustres; así como cauces de ríos y lagunas naturales.

F1: Cauce de río (lecho del río y planicie de inundación)

Se considera como cauce del río los lechos de los ríos principales, en ocasiones acompañados de la planicie de inundación, donde es posible distinguir un fondo de valle plano y sinuoso. El área debajo del curso de agua se denomina lecho y el resto, planicie de inundación. Debido a la escala de trabajo no era factible distinguir el lecho del río y la planicie de inundación del valle fluvial, por lo cual se consideran aquí como una sola unidad. Esta se forma por el flujo del agua del río, el cual acarrea sedimentos y los deposita en diferentes partes del cauce, dependiendo de su curso actual. La sedimentación depende de la energía, la dirección y la cantidad de flujo de agua y del tamaño y composición del sedimento. La composición de los sedimentos varía entre limos y grava y proviene principalmente de la erosión y acarreo de los materiales volcánicos (lavas e ignimbritas) presentes en las partes altas de la cuenca. En el área de estudio se mapearon 25 cauces de ríos. Estos son predominantemente sinuosos con ancho variable y un fondo relativamente plano. Específicamente, el ancho de las planicies de inundación mapeadas varían entre 10 m y 50 m de ancho, las pendientes son inferiores a los 5 grados y la profundidad del lecho en ellas no supera los 5 m. Debido a la profundidad de los valles (hasta 100 m), se especula que estos ríos han estado activos por lo menos durante el Holoceno.

F2: Laguna natural

Las lagunas naturales son producto de la desviación o represamiento del cauce de los ríos, por eventos naturales por ejemplo debido a factores tectónicos o por procesos de movimientos de masa. En el área de estudio se mapearon 4 lagunas de origen natural, de las cuales 3 se encuentran en un área de depósitos de deslizamientos y además la Laguna Zamora, asociada al cambio del curso de una quebrada sin nombre. Estas lagunas se encuentran sobre mezclas de litologías o sedimentos aluviales, en especial arcillas que favorecen su permanencia. Las lagunas son de formas redondeadas a alargadas con fondo relativamente plano, rodeadas de pastos y vegetación de zonas pantanosas. La laguna de mayor tamaño es la laguna González, la cual se encuentra cerca del río La Vieja y cuyas dimensiones son de aproximadamente 175 m por 100 m, para un área de 15 792 m²; su profundidad no supera los 2 metros. Se desconoce si estas lagunas son usadas para la pesca o alguna otra actividad.

F3: Meandros abandonados

Los meandros abandonados son partes del cauce del río que ya no se encuentran activos, ya sea debido a los cambios en el perfil de equilibrio del río, sobre todo en las partes bajas cerca de deltas y estuarios, o debido a procesos tectónicos. En el área de estudio solo se encontró un meandro abandonado, sobre el cauce de la quebrada Laguna, asociado a procesos tectónicos. Éste es corto, de 25 m de ancho y 150 m de largo, para un área de 2 425 m², posee una forma semicircular y se

encuentra cortado al norte por terrazas de relleno de material de un tajo, bordeando un cerro aislado de origen estructural. Posee un fondo plano, y muy posiblemente esta relleno de material fluvial (arenas y gravas) y se encuentra cubierto por pasto.

F4: Terraza fluvial

Las terrazas fluviales corresponden con antiguos niveles del río donde hubo depositación y que han sido cortados y erosionados hasta quedar separados del cauce actual. En el área de estudio se encontró un total de 19 terrazas fluviales de diferentes periodos, asociados a varios ríos. Están compuestas por material fluvial (arenas y gravas y en menor proporción limos y arcillas), y poseen formas y tamaños variados. Algunas terrazas son semicirculares y se encuentran a poca distancia del cauce actual, como por ejemplo cerca de la quebrada Arena (km 25+450); otras son triangulares, rectangulares o cuadradas e incluso su forma se encuentra cortada por el valle actual del río. Generalmente se encuentran cubiertas por pastos. La terraza de mayor tamaño se encuentra en el margen derecho del río Peje, posee un largo de 500 m y un ancho de 125 m, para un área de 35 213 m², mientras que la de menor tamaño se encuentra sobre la margen derecha de un afluente del río Silencio y posee un área de 3 393 m². Las terrazas fluviales se encuentran principalmente en las partes sur y central del proyecto y se asocian con valles de ríos más anchos con planicies de inundación donde hay presencia de sedimentación.

F5: Plano aluvial

Las formas de plano aluvial se originan por la sedimentación de material fluvial (desde limos hasta grava) acarreados por ríos. El tamaño de dicho plano depende de la energía del río, del tamaño del sedimento y del tiempo a través del cual se dio el proceso de sedimentación. En el área de estudio se delimitaron 5 planos de origen aluvial, poseen pendientes inferiores a los 10 grados y su forma y tamaño son variados. El plano de mayor tamaño se encuentra al inicio del proyecto, está asociado a afluentes del río Sifón, es de 475 m por 600 m, para un área de 263 257 m². Otro plano importante se encuentra alrededor de un afluente del río Silencio, tiene 880 m de largo y 250 m de ancho para un área de 112 898 m² y en su cabecera está posiblemente asociada con depósitos antiguos de un deslizamiento. El plano de menor tamaño cubre un área de 9 833 m². Por su pendiente, éstas son aptas para ganadería o cultivos y se encuentran predominantemente cubiertas por pastos.

F6: Valle fluvial

Los valles fluviales son la morfología predominante en el área de estudio, con 125 unidades mapeadas en total. Corresponden con valles de diferentes tamaños y profundidades, generalmente en forma de “V”, casi siempre asimétricos, con fondos poco anchos y generalmente sin presencia de una planicie de inundación. Estos son rectilíneos a sinuosos con direcciones predominantes hacia el norte-noroeste y sureste-este. Las pendientes de las laderas oscilan entre los 5 y los 55 grados, la profundidad promedio es de 50 m y el tramo más largo mapeado como una sola unidad

es de 2,5 km de largo. Los valles se forman por la erosión de los materiales circundantes debido a la acción de los ríos; por consiguiente, las paredes de los valles fluviales están compuestas por las distintas litologías del área de estudio. Muchos cauces de los ríos están controlados por fallas y/o alineamientos, por lo tanto los valles fluviales pueden presentar cambios debido a factores tectónicos. También hay laderas de los valles con gran cantidad de deslizamientos; sin embargo, por su tamaño y ubicación, no todos pudieron ser mapeados.

F7: Cabecera de cuenca

Se distinguen las cabeceras de cuencas de los valles fluviales debido a su forma redondeada con uno o más canales de drenaje, pendientes menores y poca profundidad con respecto a los valles fluviales. En el área de estudio se mapearon un total de 92 cabeceras de cuenca. Éstas se forman por la regresión del área de captación de una cuenca, la erosión de las laderas retrocede paulatinamente y los drenajes se van profundizando para luego formar un valle fluvial. La forma de estas cabeceras es generalmente redondeada, más o menos abierta de manera que algunas cabeceras podrían considerarse circos fluviales mientras que otras se parecen a pequeños valles fluviales. Las laderas de éstos son suaves a moderadas, entre 0 y 20 grados, su profundidad promedio varía entre 20 y 30 m y la de mayor tamaño cubre un área de 130 725 m². Al igual que los valles, las cabeceras de cuenca cortan el relieve circundante por lo que las litologías presentes corresponden con los materiales volcánicos del área de estudio. Por lo general se encuentran cubiertos por pastos o bosque. Debido a que corresponden con la etapa más reciente de erosión fluvial, se pueden considerar como actuales.

F8: Laguna seca

En el área de estudio se clasificó una unidad como una laguna seca, ya que corresponde con un área en la cercanía de un río, con mayor elevación que el nivel actual del río, y con vegetación que indica una saturación fuerte o por lo menos reciente del suelo. Se estima que coincide con los depósitos de una laguna, ya sea estacional o que se secó hace poco tiempo. Estos depósitos tienen forma alargada de 185 m por 90 m para un área de 19 342 m². La topografía es plana, de menos de 10 grados y el desnivel con respecto al río es de aproximadamente 20 m. Está compuesto por depósitos lacustres: limos y arcillas probablemente y cubierto por vegetación de poca altura.

(S) Formas de origen estructural denudacional

En el área de estudio se observa un fuerte control estructural, en el cual la dirección predominante de los esfuerzos corresponde con las direcciones noroeste-sureste y noreste-suroeste. En el mapa geomorfológico regional se visualizan una gran cantidad de alineamientos, fallas inferidas y fallas comprobadas, las cuales se ven reflejadas en la geomorfología local. En el área de estudio se mapearon una gran cantidad de alineamientos. Sin embargo, debido a la mala calidad de los materiales (tobas e ignimbritas alteradas en su mayoría), estos rara vez se observan en los afloramientos y es aún más difícil encontrar indicadores cinemáticos para determinar su

movimiento; por lo tanto, pocos pueden ser confirmados como fallas o fallas inferidas y las direcciones de movimiento se basan únicamente en rasgos geomorfológicos. En este apartado se describen las unidades geomorfológicas con control estructural, entre las cuales están las laderas denudacionales con control estructural y los cerros aislados. Gran parte de los valles fluviales pueden ser asociados con alineamientos, sin embargo debido a la predominancia de esta morfología, así como la falta de evidencia para asegurar la relación morfotectónica, se prefirió no incluir esta división.

S1: Laderas denudacionales con control estructural

Las laderas denudacionales con control estructural corresponden con laderas cuya erosión y pendiente se encuentra controlada por rasgos tectónicos. En el área de estudio se mapearon 16 unidades correspondientes con laderas denudacionales con control estructural, las cuales se concentran cerca de los kilómetros 16, 19 (cerca de la confluencia entre el río Espino y quebrada Laguna), 30 (río La Vieja), 36 y 39. La zona cerca del kilómetro 19 presenta la mayor cantidad de fallas y alineamientos, por lo tanto el mayor control estructural. Por otra parte, los taludes del río la Vieja muestran más claramente las fallas y su movimiento inferido, el cual es inverso dextral. Finalmente, se estima que el talud del kilómetro 36 puede ser asociado a una falla normal. Estas laderas presentan pendientes suaves a moderadas, entre 5 y 35 grados y por lo general se encuentran poco disectadas. La cobertura es variable con pastos, vegetación y bosques. Estas cortan las distintas litologías presentes en el área de estudio (predominantemente materiales volcánicos).

S2: Cerros aislados

Los cerros aislados son cerros rodeados por laderas suaves o valles fluviales y asociados a procesos tectónicos en la zona, que favorecen la erosión diferencial del relieve. En el área de estudio se encontraron 8 unidades que conforman 4 cerros aislados con control estructural, los primeros dos se encuentran al inicio del proyecto, cerca del kilómetro 10, el tercero se encuentra sobre el cauce del río La Laguna, cerca del kilómetro 19 y el cuarto cerca del kilómetro 24. Estos cerros son redondeados a alargados, con pendientes de entre 5 y 35 grados, y se encuentran poco disectados. El cerro de mayor tamaño (700 m por 650 m) se encuentra cortado por la carretera y una de sus laderas presenta un deslizamiento antiguo de 500 m de ancho. Los otros dos cerros son de 430 m por 200 m y 80 m por 50 m, en el caso del cerro de la quebrada Laguna. El Cerro del kilómetro 24 tiene dimensiones de 220 m por 190 m, para un área de 36 216 m². Los cerros del inicio del proyecto están constituidos por depósitos de la Unidad informal de Depósitos de caída indiferenciados (tQi) y Depósitos de caída recientes (vQ), mientras que el otro posiblemente esté compuesto por la Unidad Informal de Depósitos caóticos (dQ) u otros materiales debido a que se encuentra en una zona tectónicamente activa. Estos cerros están cubiertos por bosque y no poseen ningún uso en particular.

5. GEOLOGIA

5.1. Unidades geológicas regionales

5.1.1. Metodología

Los mapas geológicos incluidos en la recopilación de las unidades geológicas regionales, ya que poseen la pertenencia adecuada (escala, antigüedad, grado de detalle y respaldo científico), corresponden con Acuña et al. (2014), Gamboa (2005), Huapaya & Rojas (2012), Ocampo (2016), y Villegas (2004). Los trabajos escritos principales en esta área corresponden con Alvarado (1984, 2011), Alvarado Barrantes (1994), Alvarado & Carr (1993), Alvarado & Gans (2012), Bergoeing & Brenes (2007), Fajardo, (1994), Herrera et al. (1996), Pérez (2000), Rojas (2013), Rojas-Araya (2011), Tristán, (1994) y Villegas (1994, 1997).

De estos trabajos surge el mapa geológico regional preliminar (ver figura 13), el cual corresponde con una recopilación y extrapolación de los mapas anteriormente mencionados. Para su elaboración se georreferenciaron y digitalizaron partes de los mapas y trabajos mencionados anteriormente en el programa QGIS. Esto no corresponde con un mapa geológico propiamente dicho y se espera que el mapa geológico de la hoja Quesada, escala 1:50 000 (DGM, en proceso) venga a sustituir este trabajo en los próximos años.

5.1.2. Marco vulcanológico regional

En el área afloran principalmente unidades de origen volcánico asociadas a las “Cordilleras Neógenas del Arco Interno”, según la clasificación morfotectónica de Denyer et al. (2003, 2009). Esta cordillera se sitúa entre los Montes del Aguacate al sur y la cordillera de Tilarán al oeste y colinda con la cordillera Volcánica Central al este. Alvarado & Gans (2012) proponen una aproximación a la construcción de las morfologías volcánicas de esta zona con el siguiente orden:

- a. Presencia de un basamento volcánico antiguo (coladas de lava, depósitos de flujos piroclásticos, lahares) sobre el cual creció el macizo de Palmira-Platanar, con tres rangos de edades bien diferenciables: (a) 29,0? - 11,1 Ma, (b) 4,2 - 4,1 Ma y (c) 1,57 - 1,55 Ma.
- b. Crecimiento del paleo-volcán Chocosuela: 0,55 - 0,43 Ma.
- c. Colapsos del o de los volcanes con la generación de depósitos de flujos piroclásticos: 0,58 - 0,44 Ma.
- d. Posible desarrollo de edificios eruptivos menores (?): ¿0,35 - 0,25? Ma.
- e. Crecimiento de los volcanes Platanar y Porvenir: < 0,2 Ma?

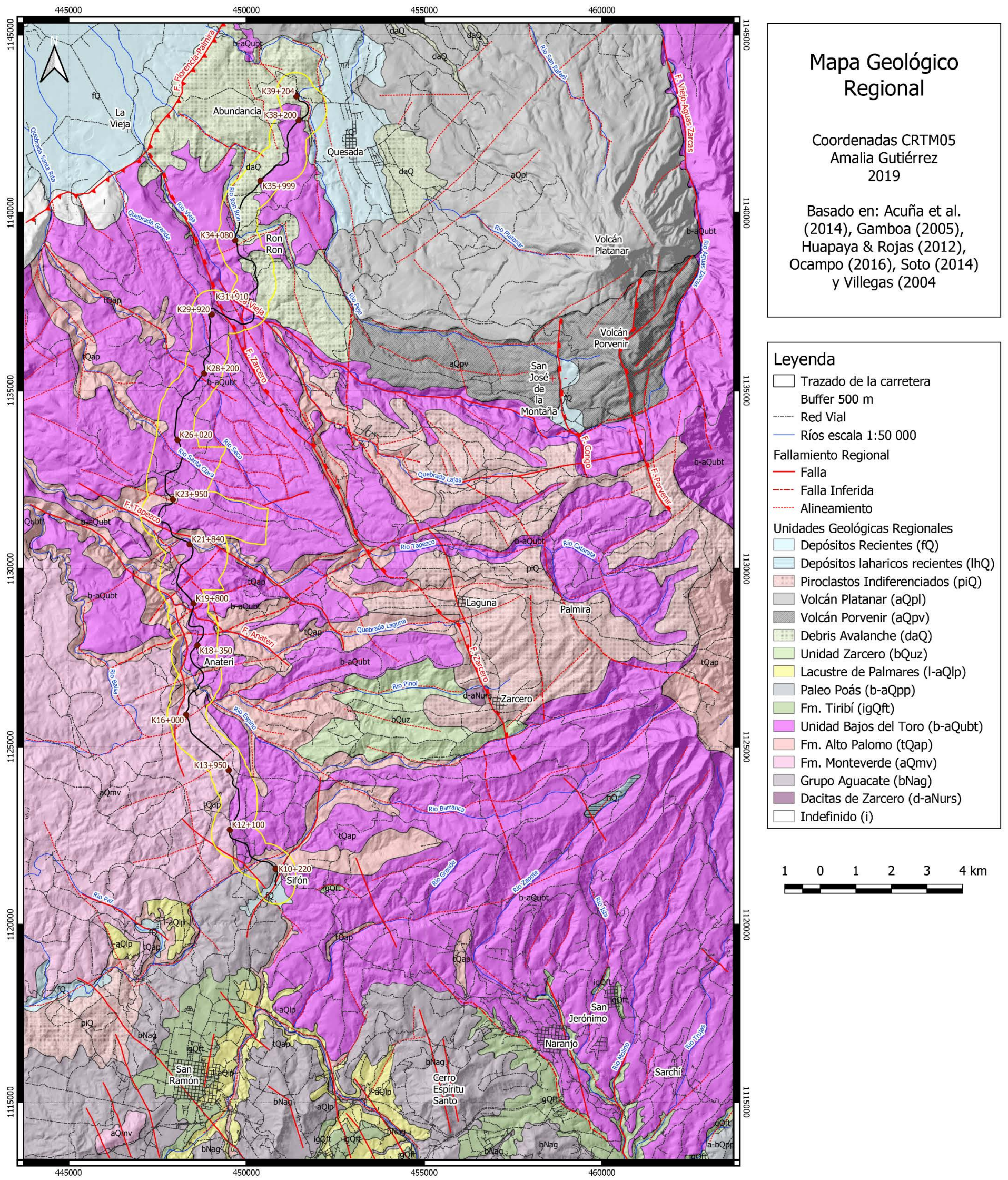


Figura 13: Mapa geológico regional.

La actividad de estos macizos se caracteriza por ser explosiva, con un vaciado rápido de las cámaras magmáticas, lo cual conlleva el colapso y destrucción parcial de los conos. El basamento volcánico es de edad Oligoceno-Plioceno, mientras que los productos de la caldera de Chocosuela son del Pleistoceno Medio. Los macizos de este complejo se encuentran más erosionados, mientras que al norte hay actividad de los conos piroclásticos de Aguas Zarcas (0,3 Ma). Luego crecen los volcanes Platanar y Porvenir con una actividad monogenética reciente. Finalmente, durante el Holoceno, esta región sufre de un intenso fallamiento (Alvarado, 2011).

Los depósitos principales están asociados a la actividad de la Caldera de Chocosuela, delimitada por Tournon (1980) como una caldera de colapso que cubre gran parte del área de estudio, en el centro de la cual crecieron dos estratovolcanes (Platanar y Porvenir) durante el Cuaternario (Alvarado & Carr, 1993). Estos autores nombran toda esta región como el centro volcánico del Platanar, el cual posee una forma elongada en dirección norte-sur y limita con el macizo volcánico del Poás al este, en el valle del Río Toro.

Por otro lado, Alvarado (2011) nombra el conjunto Platanar-Chocosuela como Cerros de Palmira, en incluye el “volcán” Viejo en el complejo de estratovolcanes (Chocosuela y Palmira) destruidos hace aproximadamente 0,6 Ma. En el borde este de la caldera de Chocosuela, Alvarado (2011) describe la caldera de erosión de Río Segundo y menciona la presencia de otra caldera descrita por Alvarado & Carr (1993) al sur de ésta. En este trabajo se refiere a la caldera de mayor tamaño como la caldera de Palmira, siguiendo la nomenclatura de Villegas (2004) y la caldera más al este como la Caldera del Volcán Viejo.

5.1.3. Unidades regionales

De este mapa (figura 13) se desprende que al sur y suroeste del área cerca del poblado de San Ramón afloran principalmente depósitos volcánicos del grupo Aguacate y la formación Monteverde (o un equivalente temporal a este), así como depósitos lacustres de Palmares y San Ramón e ignimbritas de la Formación Tiribí en menor proporción. Hacia el suroeste afloran principalmente depósitos lávicos y tobáceos de la unidad Bajos del Toro, así como algunos depósitos de caída asociados al macizo del volcán Poás. Hacia el oeste se encuentran, además de los depósitos asociados a la unidad Bajos del Toro, depósitos de caída de la Formación Alto Palomo, depósitos volcánicos de la Unidad Zarcero así como otros depósitos piroclásticos. Al noroeste y al norte, se encuentran principalmente coladas de lava y materiales volcánicos de los macizos de los volcanes Platanar y Porvenir, así como brechas volcanoclásticas de origen desconocido. Al noroeste hay presencia de depósitos aluviales recientes alrededor de Ciudad Quesada y en la Llanura de San Carlos, al norte de la Falla Florencia-Palmira. Al oeste, a pesar de no contar con información precisa, se espera encontrar lavas y depósitos volcánicos de la unidad Bajos del Toro.

a) Unidad Río Seco.

Está compuesta por dacitas hornbléndicas a flujos de lavas andesíticas, domos de lava y diques que se encuentran expuestos ampliamente en los alrededores de Zarcero, con espesores de 20 a 50 m (Alvarado & Carr, 1993). Herrera et al. (1996) la clasifican como una andesita con hornblenda y destacan su intenso lajamiento. Aflora en el Río Seco y entre los poblados de Laguna y La Peña. Más recientemente, dataciones realizadas por Alvarado & Gans (2012) indican que estas dacitas hornbléndicas poseen una edad de 16,8 Ma y se pueden correlacionar con otros domos en Boca Tapada, Chaparrón y Crucitas de San Carlos.

b) Grupo Aguacate (Formación Grifo Alto)

Las “andesitas” Aguacate habían sido descritas inicialmente por Attwood (1882) y son nombradas “Complejo Volcánico Aguacate” por Schaufelberger (1934) en (Dengo & Chaverri 1951). Dengo (1961, 1962) las describe como formación y las estudia ampliamente; finalmente, Madrigal (1970) la eleva al rango de grupo. Son definidas como rocas alcalinas por Pichler & Weyl (1975) y Kussmaul (1987) las divide en 3 series geoquímicas: Aguacate I, II y III.

Este grupo incluye materiales de origen volcánico cuya edad es anterior al emplazamiento de la Cordillera Volcánica Central, activa actualmente (Holoceno), por lo tanto datan del Mioceno al Plio-Pleistoceno, tal y como lo definen Denyer y Arias (1991). Estos autores dividen este grupo en las Formaciones La Cruz y Grifo Alto. La Formación la Cruz (Mioceno superior) está constituida por coladas de lava basáltica y tobas, y subyace la Formación Grifo Alto (Plioceno-Pleistoceno), la cual está constituida por lavas andesíticas y flujos piroclásticos.

En el área de estudio aflora la Formación Grifo Alto, la cual está constituida por rocas volcánicas andesíticas y rocas piroclásticas (brechas, ignimbritas y tobas) asociadas a un vulcanismo explosivo. Esta se encuentra en la mayoría de los cerros que rodean los depósitos lacustres de Palmares y San Ramón (Huapaya & Rojas, 2012; Rojas, 2013). Corresponde con el basamento local y por lo tanto posee un contacto superior discordante con las demás unidades (Alvarado, 1994; Fajardo, 1994; Tristán, 1994; Villegas, 1994; Huapaya & Rojas, 2012, Rojas 2013). Denyer & Arias (1991) le estiman un espesor de más de 1000 m y Alvarado & Gans (2012) aportan un rango de edad para la formación de entre 4,2 y 2,2 Ma.

La Formación Grifo Alto es descrita por Rojas (2013) en esta área de la siguiente manera: está compuesta principalmente por lavas andesíticas con plagioclasas y clinopiroxenos, en algunos sitios presenta una fuerte alteración hidrotermal, incluidas vetas de cuarzo. También existen afloramientos localizados de lavas andesito-basálticas con plagioclasas y piroxenos. Las brechas, compuestas por bloques subangulares de hasta 15 cm en una matriz clástica compuesta por plagioclasa, poco cuarzo y líticos andesíticos, presentan alteración a verde (clorita o epidota) y se encuentran al sur y suroeste de Palmares y San Ramón. Las ignimbritas poseen colores de blancos a rojizos, y otros por la alteración, están compuestas por líticos hidrotermalizados, escorias

milimétricas, minerales opacos y cuarzo lechoso. Además se presentan tobas de flujo no soldadas, entre las cuales esta autora describe las toba de flujo de Río Grande y una toba café con líticos.

Toba río Grande: corresponde con una ignimbrita gris oscuro, masiva con escorias centimétricas, fragmentos de lava en una matriz oxidada con cristales de plagioclasa con un espesor estimado de 50 m (Villegas, 1997). En el lecho del río Grande se encuentran sobreyacidas por paquetes de ceniza finas y gruesas constituidas por pómez, escorias y fragmentos de feldespatos (Rojas, 2013).

Toba con líticos: aflora en los cañones de los ríos y fue descrita por la Campaña de 1994 (Alvarado, 1994; Fajardo, 1994; Tristán, 1994; Villegas, 1994) como una toba bien consolidada de ceniza fina a gruesa con clastos de lava basálticos hasta decimétricos y algunas pómez centimétricas. También, se observaron clastos de plagioclasa y cristales negros (Rojas, 2013). Se estima un espesor de 30 m y un contacto discordante subyaciendo la Formación Alto Palomo y el Lacustre de Palmares.

c) Formación Monteverde

Se ubica al noroeste de la hoja 1:50 000 Naranjo, es descrita por Chávez & Sáenz (1974) como compuesta por lavas andesíticas y en menor porcentaje tobas de hasta 210 m de espesor, asociadas a un evento de vulcanismo efusivo fisural hace 2,1 a 1,1 Ma (Alvarado & Gans, 2012). Rojas (2013) la describe en esta hoja como lavas andesíticas y andesítico-basálticas color gris oscuro, de matriz vidriosa, con plagioclasas y piroxenos, con evidencias de laterización. Se infiere discordante tanto con las unidades infrayacentes como con las suprayacentes. Žáček et al. (2012) realizan dataciones con resultados de $1,77 \pm 0,11$ Ma y $1,71 \pm 0,25$ Ma, lo cual concuerda con la recopilación realizada por Alvarado & Gans (2012), que ubica la Formación Monteverde en una edad de 2,1 a 1,1 Ma.

d) Formación Alto Palomo

Es descrita por primera vez por Madrigal (1967) como depósitos de pómez y clastos de lava andesítica centimétricos en menor proporción. Según Alvarado & Carr (1993) esta unidad consiste en una serie de flujos pumíticos pobremente soldados de dacitas a flujos riolíticos de pómez, flujos de ceniza andesítica y flujos de ceniza blocosos con tobas y aluviones locales. También fue descrita por las campañas geológicas de 1993 y 1994 (Bonilla et al., 1993; Chávez & Áviles, 1993; Macías & Zamora, 1993; Alvarado, 1994; Fajardo, 1994; Tristán, 1994; Villegas, 1994).

Los flujos de pómez contienen al menos 10% de pómez cuyo tamaño promedio es de 2,5 cm y excepcionalmente bloques de hasta 20 cm. Los líticos varían de andesitas a basaltos y en promedio son de 6 cm, con clastos de hasta 30 cm. Dataciones de flujos pumíceos cerca de Zarcero indican una edad de 1,4 Ma y presentan un espesor entre 20 y 60 m (Alvarado & Carr, 1993). Herrera et al. (1996) describen esta unidad como flujos pumíceos con micas y anfíboles, intercalados con tobas, brechas y depósitos de nube ardiente.

Villegas (2004) define formalmente la Formación Alto Palomo y la divide en dos miembros: Miembro Palomo (inferior) y Palmitos (superior), que se describen a continuación.

Miembro Palomo: está compuesto principalmente por tobas de lapilli pumíticos de varios colores. Localmente se encuentran brechas basales pumíticas con poca ceniza fina, las cuales gradan a los depósitos de lapilli. En la base se encuentran capas delgadas de cenizas producto de oleadas piroclásticas y en la parte superior brechas co-ignimbríticas de caída. Todo esto corresponde a una misma secuencia eruptiva (Villegas, 2004). Esta unidad está relacionada con los depósitos de tobas con fragmentos de pómez de colores crema-rosado descritas por Macías & Zamora (1993) en Rojas (2013).

Miembro Palmitos: litológicamente está constituida de tobas de lapilli pumítico producto de flujos piroclásticos. En la base se presentan brechas pumíticas, en gradación con los depósitos de lapilli. También fueron descritas anteriormente por Macías & Zamora (1993), como parte de otra unidad, como depósitos de ceniza, con paquetes pumíticos, y tobas café con pómez que poseen cristales de biotita y clinopiroxenos. Estos depósitos se encuentran sobreyacidos por los depósitos lacustres (Villegas, 2004). Rojas (2013) menciona que en la hoja Naranja aflora principalmente las tobas de flujo del Miembro Palmitos, de color café claro, inconsolidadas, con líticos de lava, pómez con hornblenda y biotita y una matriz de ceniza con biotita, y le atribuye un espesor promedio de 20 m y máximo de 45 m.

Alvarado & Gans (2012) reportan un rango de 0,54 a 0,57 Ma para esta formación; según Villegas (2004), ambos miembros son del Pleistoceno Medio y estratigráficamente sobreyacen de manera discordante al Grupo Aguacate, algunos piroclastos indiferenciados y a la Formación Monteverde. Son sobreyacidos por los productos sedimentarios del Lacustre de Palmares y en menor grado por los productos volcánicos de la Cordillera Volcánica Central. Rojas (2013) describe un nivel rico en lapilli acrecional en el contacto de esta unidad con el Lacustre de Palmares. También menciona que es sub y sobreyacido por la Unidad Bajos del Toro.

La Formación Alto Palomo se distribuye entre la depresión de la Cordillera de Tilarán y las estribaciones occidentales de la Cordillera Volcánica Central, entre las localidades de Ciudad Quesada y Palmares, San Ramón y Zarcero (Villegas, 2004).

e) Lacustre de Palmares

Este relleno lacustre fue descrito inicialmente por Dóndoli (1949, 1951), como compuesto principalmente por capas de cenizas y arenas, con pómez blanca, así como fragmentos de lava y lentes de diatomita en menor porcentaje, en un ambiente lacustre formado por represamiento de las aguas por lavas de la Cordillera Volcánica Central.

Consiste de una serie de gravas, arenas y limo-arcillas con abundante influencia volcánica, mostrando gran cantidad de fragmentos de pómez, lapilli accrecional cenizas y localmente, lentes de diatomita en menor porcentaje (Rojas, 2013).

Distintas facies litológicas y sedimentológicas han sido descritas; Tristán (1994) describe litofacies mientras que Fajardo (1994) y Villegas (1994) describen facies sedimentológicas. Alvarado (1986) estima un espesor ligeramente mayor a 50 m, mientras que Matthers (1989) sugiere que sobrepasa los 90 m.

Diversos estudios paleontológicos han reportado restos de dientes de roedores, molares de un probable camélido, partes de gliptodontes, huesos de pájaros y otros animales pequeños indeterminados (Alvarado, 1986), restos de megamamíferos (Lucas et al., 1986), así como nuevas especies de gliptodontes (Laurito et al., 2005) que permitieron determinar una “edad mamífera” de Blancano Tardío o Irvingtoniano Temprano (2,6-1,6 Ma).

La edad del relleno lacustre se sitúa entre 0,54 y 0,57 Ma a 0,3 Ma, aproximadamente (Rojas, 2013), por encontrarse sobreyaciendo de la Formación Alto Palomo de entre 0,54 y 0,57 Ma (Alvarado & Gans, 2012) y subyaciendo los flujos de la Formación Tiribí datados en 0,32 Ma (Pérez et al., 2006).

Estratigráficamente, el relleno lacustre sobreyace de manera concordante (Tristán, 1994) a transicional o difuso (Villegas, 1994) a la Formación Alto Palomo y discordante con la Unidad de Tobas con líticos (Fajardo, 1994; Alvarado, 1994 y Tristán, 1994). Este es sobreyacido a su vez por la Formación Tiribí según Alvarado (1994), mientras que Villegas (1994) afirma que ambas formaciones se intercalan de manera irregular.

Más recientemente, Rojas (2013) realiza un análisis detallado del Lacustre de Palmares y determina lo siguiente:

- Este lacustre estuvo conformado por dos lagos, uno al noroeste del centro de San Ramón, denominado lago Los Ángeles y otro principal, en el área del centro de Palmares y San Ramón.
- El relleno está constituido por 70 m de alternancias de depósitos lacustres de aguas profundas y someras.
- Los depósitos se pueden dividir en 2 grupos de facies sedimentológicas principales, la asociación de facies I (inferior) y II (superior). La asociación I representada por las litofacies de gravas, arenas y limos pumíticos, así como diamicto pumítico y la asociación II está representada por gravas, arenas y limos con predominancia de líticos de lavas.
- Con respecto a los ambientes sedimentarios se reconocen dos facies batimétricas: someras y profundas. Las someras están representadas por ambientes deltaicos y litorales y las profundas son características del centro de la cuenca.
- Desde el punto de vista paleontológico, el Lacustre de Palmares contiene restos de megamamíferos y diatomeas, lo que le confieren un carácter continental.

- Se le asigna una edad de entre 0,58 - 0,44 Ma y 0,32 Ma, con base en las dataciones radiométricas de la Formación Alto Palomo y Tiribí, respectivamente.
- Se consideraron tres posibles orígenes de la cuenca lacustre: caldera de colapso, caldera de avalancha y cuencas por control tectónico, asumiéndose el último mencionado.
- La formación de los depocentros del Lacustre de Palmares, se produce posterior a la depositación de la Formación Alto Palomo (edad 0,58 a 0,44 Ma), ya que es producto de la erosión de ésta en cuencas con control tectónico, las cuales están activas incluso durante la depositación de la Formación Tiribí (0,32 Ma).
- Desde el punto de vista de deformación, el Lacustre de Palmares se ve afectado directamente durante su lapso de vida, por la falla Angelina, así como por el sistema de fallas Espíritu Santo.

f) Formación Tiribí

Es descrita inicialmente por Alfaro (1913), quien la define como una toba volcánica en los cañones de los ríos Tiribí & Virilla. Fue nominada como “Depósitos de Avalancha Ardiente” por Williams (1952) y definida como Formación Tiribí por Fernández (1968), el cual la divide en dos miembros. Echandi (1981) la divide en tres miembros y más recientemente Pérez (2000) realiza un análisis detallado sobre las ignimbritas del Valle Central (Denyer et al., 2003). Pérez (2000) define formalmente la Formación Ignimbrita Río Tiribí y la divide en cuatro litofacies: tipo Valle Central, tipo Puente de Piedra, tipo La Garita y tipo Orotina.

- La litofacies *Valle Central* presenta variaciones en la soldadura; las no soldadas están compuestas por escorias negras y fragmentos líticos en una matriz tobácea y las soldadas presentan fiames de obsidiana y líticos en una matriz gris claro.
- La litofacies *Puente de Piedra* es soldada y vidriosa, está dispuesta en columnas y cuenta con fiames, escasos líticos y pómez amarillentas.
- La litofacies *La Garita* se divide en 3 unidades: una ignimbrita basal, una unidad intermedia producto de fluidización y elutriación, y una unidad de ignimbrita superior. Están compuestas por escorias negras, gris y café, bandeadas, con pómez y líticos dentro de una matriz gris.
- Finalmente, la litofacies *Orotina* corresponde con ignimbritas color gris celeste, con fiames, escorias negras y pómez amarillas, pequeñas y en bajo porcentaje.

En general, corresponden con ignimbritas con disyunción columnar, con un espesor de 100 m. Pérez (2000) las describe como rocas con textura eutaxítica, gran cantidad de fiames de obsidiana y líticos lávicos, en una matriz vidriosa rica en plagioclasa color gris claro a negro. En microscopía se observan fiames de vidrio pardo oscuro, líticos y cristales de plagioclasa, clinopiroxeno, magnetita y accesorios, en una matriz de vidrio pardo con esquirilas de vidrio (Pérez, 2000).

En el área de estudio afloran principalmente la litofacies tipo Valle Central, y según Rojas (2013) se encuentran ambas facies. Corresponden con las descripciones de Pérez et al. (2006): “la facies soldada y compactada está constituida por fiames de obsidiana (10%-40%) y líticos lávicos (5%) en una matriz vidriosa color gris claro a negro, rica en cristales de plagioclasa” y “la facies menos soldada y compacta se caracteriza por estar compuesta por fragmentos de bombas escoriáceas negras, grises, bandeadas, líticos lávicos, fragmentos de obsidiana y poco o nada de pómez, en una matriz de ceniza media grisácea. Se presenta masiva, caótica y sin estructuras.”

Rojas (2013) observa un contacto irregular y quemado entre la secuencia Lacustre (inferior) y la Ignimbrita Tiribí (superior), al este del centro de San Ramón. También describe un depósito de flujo piroclástico subacuático, intercalado con el relleno lacustre encontrado en varios puntos al este de la ciudad de Palmares. En la base de este flujo se encontró un nivel delgado de peperitas, así como la presencia de intraclastos de sedimentos (limos) dentro del flujo piroclástico, así como diques clásticos de limo, lo cual es interpretado por Rojas (2013) como un depósito vulcaniclástico re-sedimentado. Rojas (2013) también describe un depósito inconsolidado de lapilli escoriáceo y ceniza gruesa a media escoriácea, interpretado como una toba escoriácea no soldada relacionada con un flujo piroclástico, probablemente el flujo de la Formación Tiribí, el cual probablemente no fue depositado en medios acuáticos.

En cuanto a las relaciones estratigráficas, Rojas (2013) infiere que la Formación Tiribí sobreyace discordantemente a las rocas del Grupo Aguacate y Formación Alto Palomo, y que además sobreyace y se interdigita con los sedimentos lacustres. Por otro lado, estima un espesor promedio de 15 m en el área de estudio y afirma que la edad $^{40}\text{Ar}/^{39}\text{Ar}$ es determinada por Pérez et al. (2006) en 322 ± 2 ka.

Según Pérez (2000), el ambiente de formación de este depósito se asocia a una erupción muy rápida y violenta, donde el flujo tenía gran fluidez en algunos sectores, por lo que se encauzó en el cañón del Río Grande de Tárcoles y llegó casi a la costa.

g) Unidad Bajos del Toro-Viejo

Según Alvarado & Carr (1993), esta unidad está compuesta por lavas basálticas y andesíticas intercaladas con flujos piroclásticos y otras rocas piroclásticas. Herrera et al. (1996) la caracterizan como lavas de composición variable, megabrechas, tobas y depósitos de nube ardiente. Una datación de K-Ar (Alvarado, sin publicar) señala una edad de 0,4 Ma, y los espesores son de hasta 1000 m. Los depósitos se presentan soldados y raramente se observan clastos pumíceos (Alvarado & Carr, 1993). Aflora en los cerros Viejo, Palmira y Bajos del Toro.

Herrera et al. (1996) realizan un trabajo geológico a detalle del área del Platanar –Porvenir y diferencian dentro de esta unidad una serie de subunidades, descritas a continuación:

Sección La Palmira: Esta subunidad presenta megabrechas compuestas por clastos andesíticos de hasta 1,5 m, en una matriz de ceniza color amarillento y flujos piroclásticos conformados por tobas de ceniza estratificadas (centimétricos a decimétricos) con líticos andesíticos-basálticos y pómez colapsados. Hay presencia de tobas líticas compuesta por feldespatos y clastos dacíticos con horizontes mineralizados negros. Estratigráficamente se encuentran las megabrechas en la base, sobreyacidas por las tobas; por encima se encuentran los depósitos de nube ardiente que son sobreyacidos por ceniza que se degrada a un suelo pardo. Esta sección aflora entre los poblados de Palmira, Picado y Laguna (Herrera et al., 1996).

Flujos piroclásticos San José de la Montaña: secuencias de depósitos de nube ardiente (brecha escoriácea rojiza < 2mm) sobreyacidas por tobas de grano medio a fino litificadas y estratificadas. Afloran en San José de la Montaña (Herrera et al., 1996).

Flujos piroclásticos y lavas río La Vieja: Es una intercalación de tobas pardas y depósitos de nube ardiente sobreyacida por lavas en bloques con contactos netos. Las tobas poseen un espesor de 60 cm, están compuestas por líticos milimétricos, piroxenos, feldespatos y pómez en una matriz de ceniza; los depósitos de nube ardiente están compuestos por dos capas con componentes escoriáceos. Las lavas son de composición andesítica de 9 m de espesor, según Herrera et al. (1996). Afloran cerca del puente sobre el Río la Vieja (Herrera et al., 1996).

Megabrechas Zapote: se compone de clastos andesíticos escoriáceos de hasta 20 cm en una matriz de ceniza rojiza. Se encuentra sobreyacida por depósitos inconsolidados de cenizas que producen un suelo pardo-rojizo. Afloran entre Zapote y la Quina (Herrera et al., 1996).

Lavas diferenciadas: Herrera et al. (1996) describe una serie de subunidades lávicas según su localidad (Lavas cerro El Siete, lavas Yurro Seco, lavas Lajas y lavas La Quina); sin embargo, Rojas-Araya (2011) las agrupa bajo el nombre de “Lavas Diferenciadas”. Petrográficamente todas las coladas de lava representan andesitas con augita y magnetita, a excepción de las lavas Lajas, las cuales corresponden con basaltos con augita (Rojas-Araya, 2011)

Rojas (2013) las describe, en el área correspondiente a la Hoja Naranja, como tobas de flujo cafés, no soldadas y poco consolidadas, con líticos centimétricos de varios colores, pómez, escorias y fragmentos de plagioclasas y piroxenos. Las lavas son andesitas y basaltos y afloran principalmente en los cauces de los ríos. En ciertos sitios se encuentran intercalaciones de esta unidad con las tobas de la Formación Alto Palomo, por lo que Rojas (2013) estima que la Unidad Bajos del Toro y la Formación Alto Palomo son contemporáneas y fueron depositadas hace 0,57 Ma.

h) Unidad Zarcero

Está compuesta de megabrechas inconsolidadas intercaladas con cenizas, lahares y aluviones. Estos depósitos se extienden en dirección NW, con espesores de más de 40 pero con fuertes

variaciones laterales y se presentan localizados, rellenando un paleovalle (Alvarado & Carr, 1993). Las mega-brechas se componen de bloques subredondeados a subangulares de composición basáltica a dacítica, pero las andesitas son más frecuentes con tamaños centimétricos a métricos. Se pueden deber a una explosión lateral o una avalancha de detritos, con asociaciones de depósitos de lahares (Alvarado & Carr, 1993). Aflora entre Palmita y la entrada a la Quina (Herrera et al. (1996).

i) Complejo Volcánico Platanar-Porvenir

Tanto el volcán Platanar como el Porvenir son estratovolcanes del Pleistoceno Medio a Superior. Muestras del volcán Porvenir evidencian que las lavas son andesíticas con medio a alto potasio. Las lavas del Platanar son basaltos bajos en magnesio a andesitas de potasio intermedio. Alvarado & Carr (1993) definen una sub-unidad geoquímica de los depósitos volcánicos recientes, denominada Aguas Zarcas.

Morfológicamente, los flujos de la Florida y Sucre del volcán Platanar, son las lavas más recientes (Alvarado & Carr, 1993). Estos fueron nombrados por Tournon (1980) y Alvarado (1984) estima que corresponden con la última fase de actividad del volcán. Por otra parte, Alvarado & Gans (2012) datan una colada de lava de la Quebrada Palo, morfológicamente asociada con la última fase eruptiva del volcán Platanar, la cual aporta una edad de 96 ka (Pleistoceno tardío).

Herrera et al. (1996) reconocen dos unidades relacionadas con estos depósitos volcánicos recientes con respecto a su lugar de origen; una unidad del volcán Platanar y otra unidad del volcán Porvenir.

Volcán Platanar

El volcán Platanar está constituido principalmente por coladas de lava de composición andesítica, además de brechas, tobas y cenizas. Las lavas son de composición variable, de blocosas a columnares; petrográficamente, las primeras son andesitas con augita y magnetita, mientras que las columnares son andesitas con magnetita. (Herrera et al., 1996).

Herrera et al. (1996) dividen los depósitos en dos secciones: Río Peje y La Pradera; sin embargo, debido a sus similitudes Rojas-Araya (2011) los agrupa estratigráficamente: lavas, brechas, tobas y otros depósitos de flujo y caída.

Las brechas están compuestas por líticos andesíticos-basálticos en una matriz de ceniza. Por encima de esta brecha, Herrera et al. (1996) describen una megabrecha compuesta por bloques de composición andesítica-basáltica de hasta 30 cm en una matriz arenosa.

Por último, se presentan intercalaciones centimétricas de tobas de ceniza rojiza con feldespatos y escasas micas, tobas de lapilli con gradación negativa y depósitos de nube ardiente de color negro rojizo, ricos en vidrio (Herrera et al. 1996).

Volcán Porvenir

Los depósitos del volcán Porvenir, se componen de coladas lávicas denominadas Laguna Congo por Herrera et al. (1996), las cuales sobreyacen los depósitos del volcán Platanar. Las lavas son vesiculares, masivas, con textura afanítica-porfirítica, con fenocristales de feldespatos y piróboles, en una matriz gris. Al igual que el macizo del Platanar, estas se encuentran sobreyacidas por brechas y tobas de ceniza (Herrera et al., 1996).

j) Unidad Depósitos Piroclásticos

Herrera et al. (1996) definen esta unidad como una brecha de matriz parda amarillenta, con clastos angulares a subredondeados de hasta 2 cm de composición variable, con pátinas de óxidos de manganeso. Los autores mencionan que sobreyaciendo este horizonte se encuentra un depósito de cenizas inconsolidadas con espesores que no superan los 3 m.

Esta unidad no es diferenciada por Alvarado & Carr, (1993) quienes definen para esta zona la unidad Bajos del Toro-Viejo, descrita anteriormente (Rojas-Araya, 2011).

k) Aluviones y depósitos recientes.

Depósitos sedimentarios inconsolidados (aluviales, lacustres, debris, lahares) del Holoceno que afloran sobre todo en los alrededores de Palmares, San Ramón, Ciudad Quesada y al norte de la falla Florencia-Palmera, en las llanuras del Norte. En varios lugares están intercalados o cubiertos por ceniza, probablemente por actividad del volcán Poás (Alvarado & Carr, 1993), así como Platanar y Porvenir. Se encontraron depósitos calientes y fríos de debris avalanche, en la caldera de erosión de Río Segundo y en el valle de Bajos del Toro. Depósitos similares fueron encontrados en el flanco oeste y suroeste del volcán Platanar y al noroeste de Zarcero (Alvarado & Carr, 1993).

5.2. Geología Local

5.2.1. Metodología

Para la determinación de las unidades geológicas locales se realizó, en primera instancia, una recopilación bibliográfica de los trabajos realizados correspondientes con el área de estudio; en este caso también se trabajó con el búfer de 500 metros a ambos lados de la carretera, por las razones mencionadas anteriormente. Los trabajos consultados son la tesis de Ocampo (2016), la cual a su vez está basada en el estudio de Macías y Vargas (M&V, 2000). También se contó con información del EIA a cargo de Siel & Siel (2004), así como los trabajos de Vargas & Garro (2012), Gamboa (2005) y los informes de Geotest S.A. (Más & Imbsen, S.A., en Expediente 40-2002 SETENA), Vieto (2010) y Ingeotec (2006).

Paralelamente se realizaron 10 giras de campo, durante las cuales se recolectó información de 72 puntos, de los cuales 53 cuentan con información litológica. Debido a la escasez de

afloramientos con litologías cementadas/consolidados, se tomaron datos estructurales únicamente en 3 afloramientos. Asimismo, debido a la ausencia de formaciones sedimentarias, no se tomaron datos sedimentológicos. De forma complementaria se realizó un mapeo in situ a lo largo de la carretera sobre láminas a escala 1:2 000, donde se registró la presencia de las unidades reconocidas anteriormente sobre ambos lados de la carretera. Se tomaron 45 muestras de roca, y se seleccionaron 16 para la realización de secciones delgadas. De éstas, 15 fueron descritas, ya que una muestra presentaba un grado demasiado avanzado de alteración para poder ser descrita; 10 corresponden a materiales volcánicos de flujo y de caída y 5 son lavas.

Con base en la información de campo se realizó una clasificación inicial de los afloramientos según su litología, éstos luego fueron agrupados en un total de 10 unidades informales, algunas de las cuales se pueden correlacionar con unidades geológicas regionales. Se delimitaron estas unidades en el área de estudio para obtener un mapa geológico local (ver figura 15), el cual se complementó con cinco perfiles longitudinales (ver figuras 16 a 20) y una columna estratigráfica local (ver figura 14) que muestran las relaciones estratigráficas presentes. Las unidades informales determinadas se detallan a continuación.

5.2.2. Unidades locales

Columna estratigráfica local

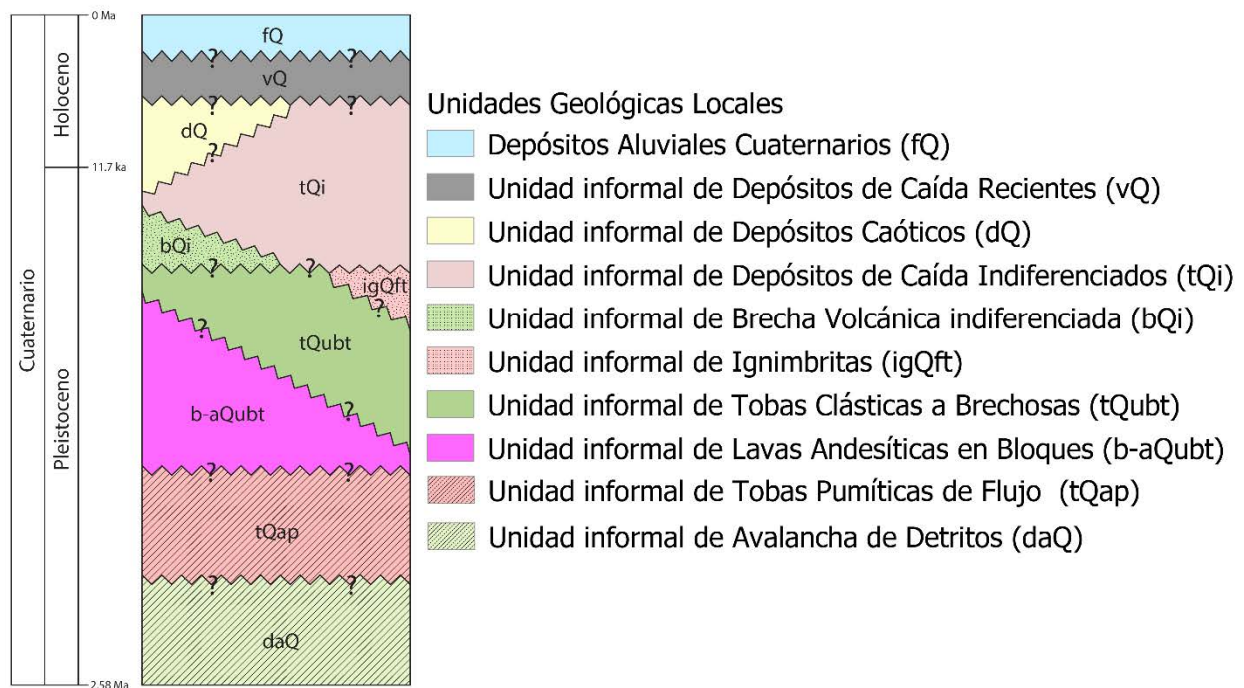


Figura 14: Columna estratigráfica local.

446000

448000

450000

452000

Leyenda

- ★ Poblados
- Kilometraje
- Carretera
- Caminos
- Búfer 500 m
- Ríos
- Fallamiento Regional
- Falla
- - - Falla Inferida
- ... Alineamiento

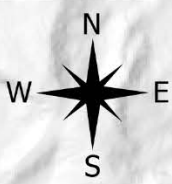
- Fallamiento Local
- ... Alineamiento

Unidades Geológicas Locales

- Depósitos Aluviales Cuaternarios (fQ)
- Unidad informal de Depósitos Caóticos (dQ)
- Unidad informal de Depósitos de Caída Indiferenciados (tQi)
- Unidad informal de Brecha Volcánica indiferenciada (bQi)
- Unidad informal de Lavas Andesíticas en Bloques (b-aQubt)
- Unidad informal de Avalancha de Detritos (daQ)
- Unidad informal de Tobas Pumíticas de Flujo (tQap)

MAPA GEOLÓGICO LOCAL

Coordenadas CRTM05
Amalia Gutiérrez
2019



1142000

1140000

1138000

1136000

1134000

1132000

1142000

1140000

1138000

1136000

1134000

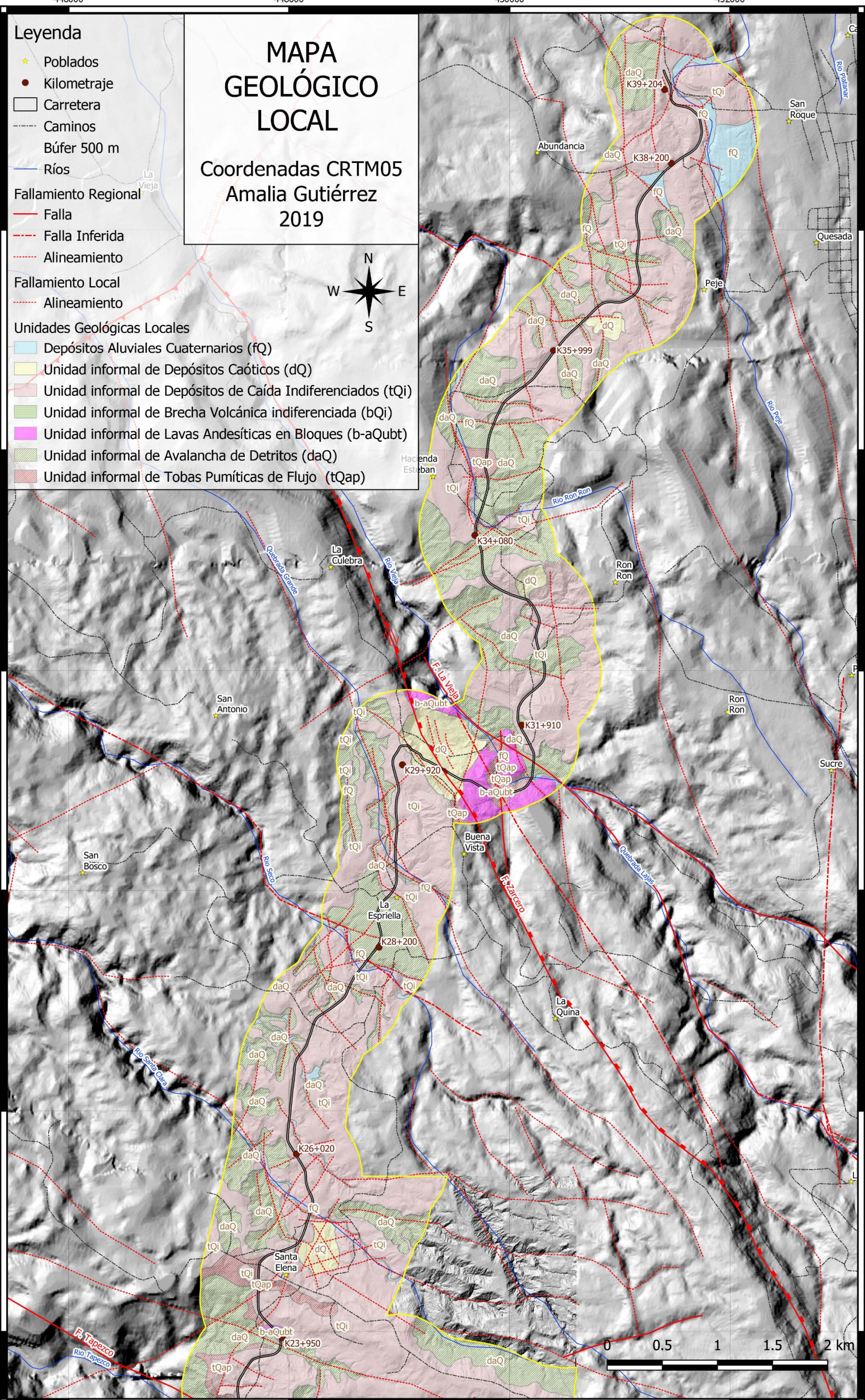
1132000

446000

448000

450000

452000



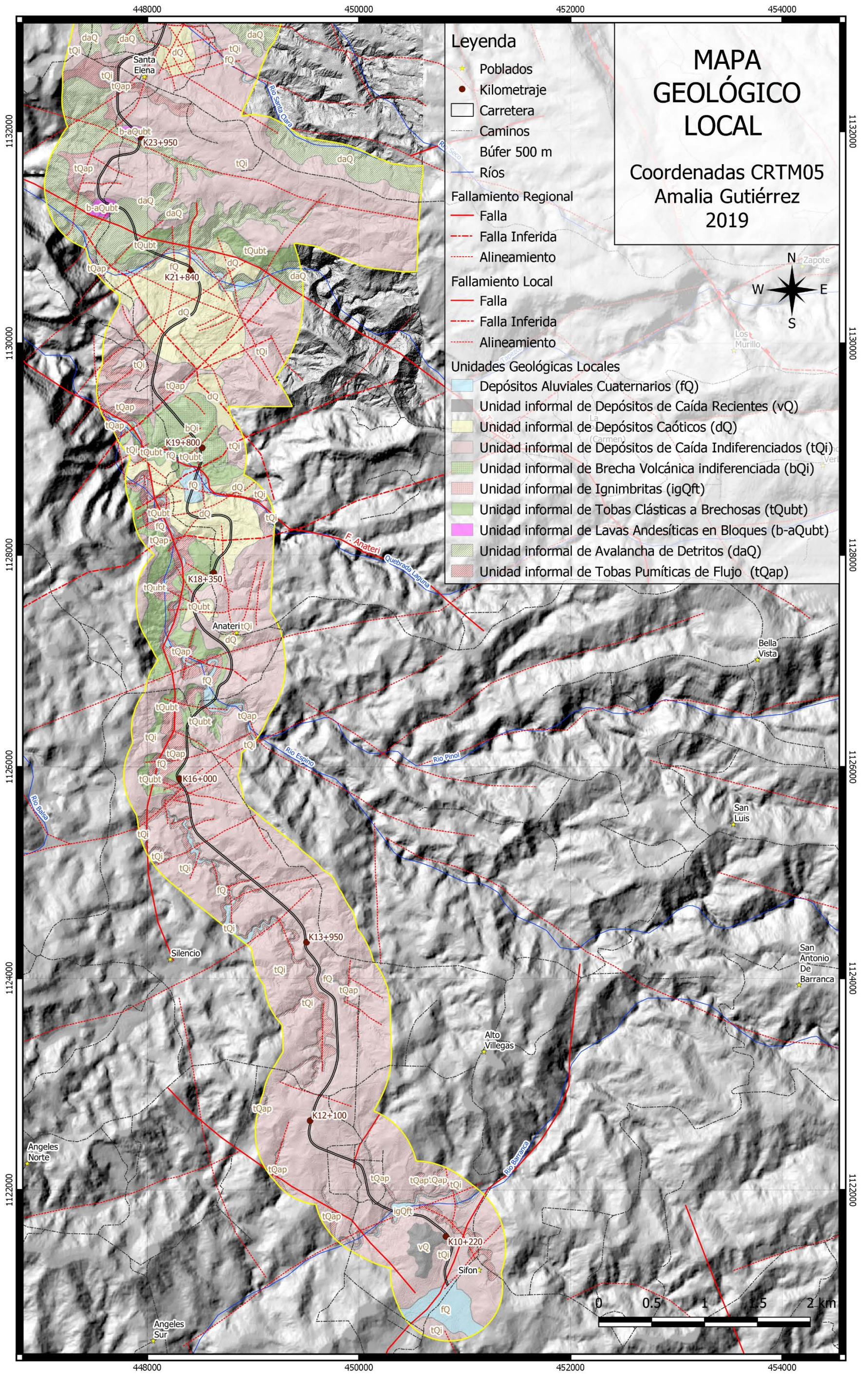
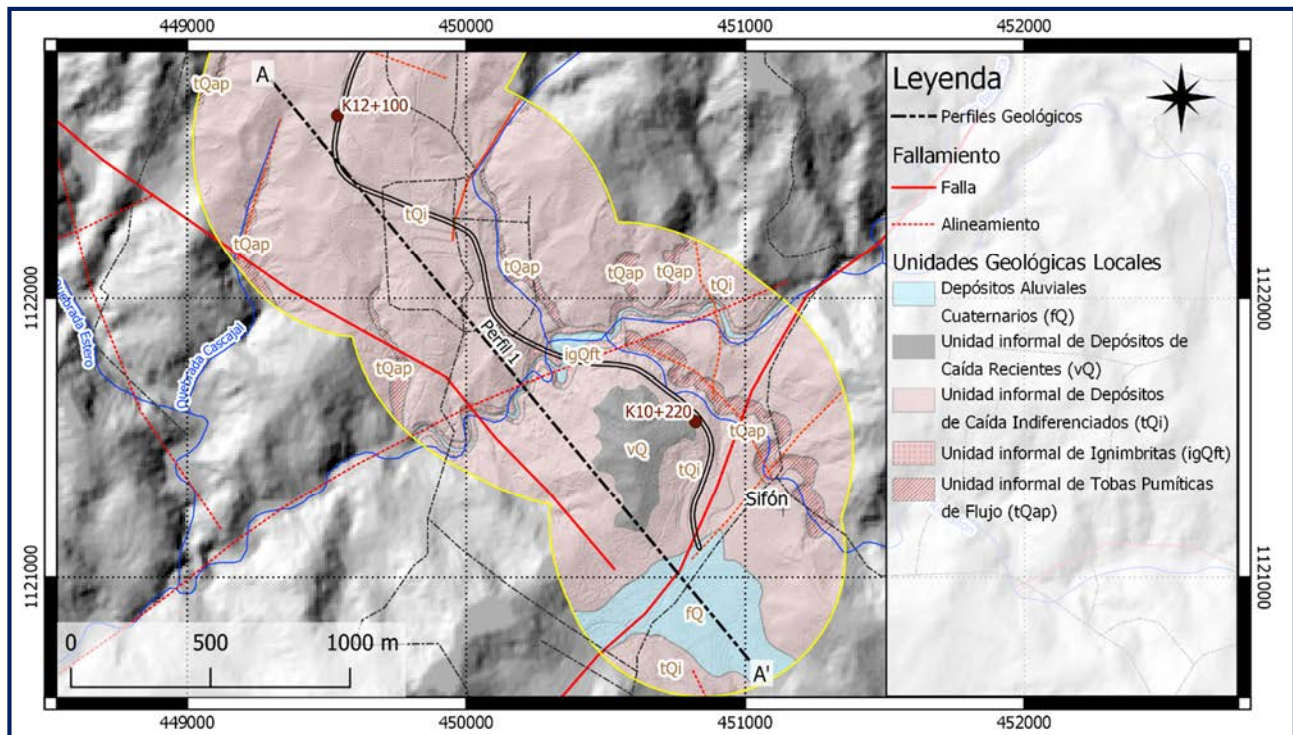


Figura 15: Mapa geológico local.



Perfil # 1: kilómetros 9+800 a 12+100

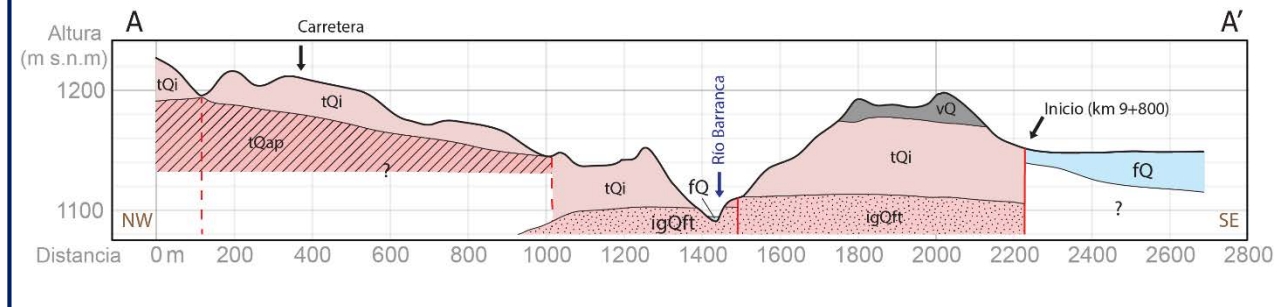


Figura 16: Perfiles geológicos del área de estudio: Perfil 1(km 9+800 a 12+100).

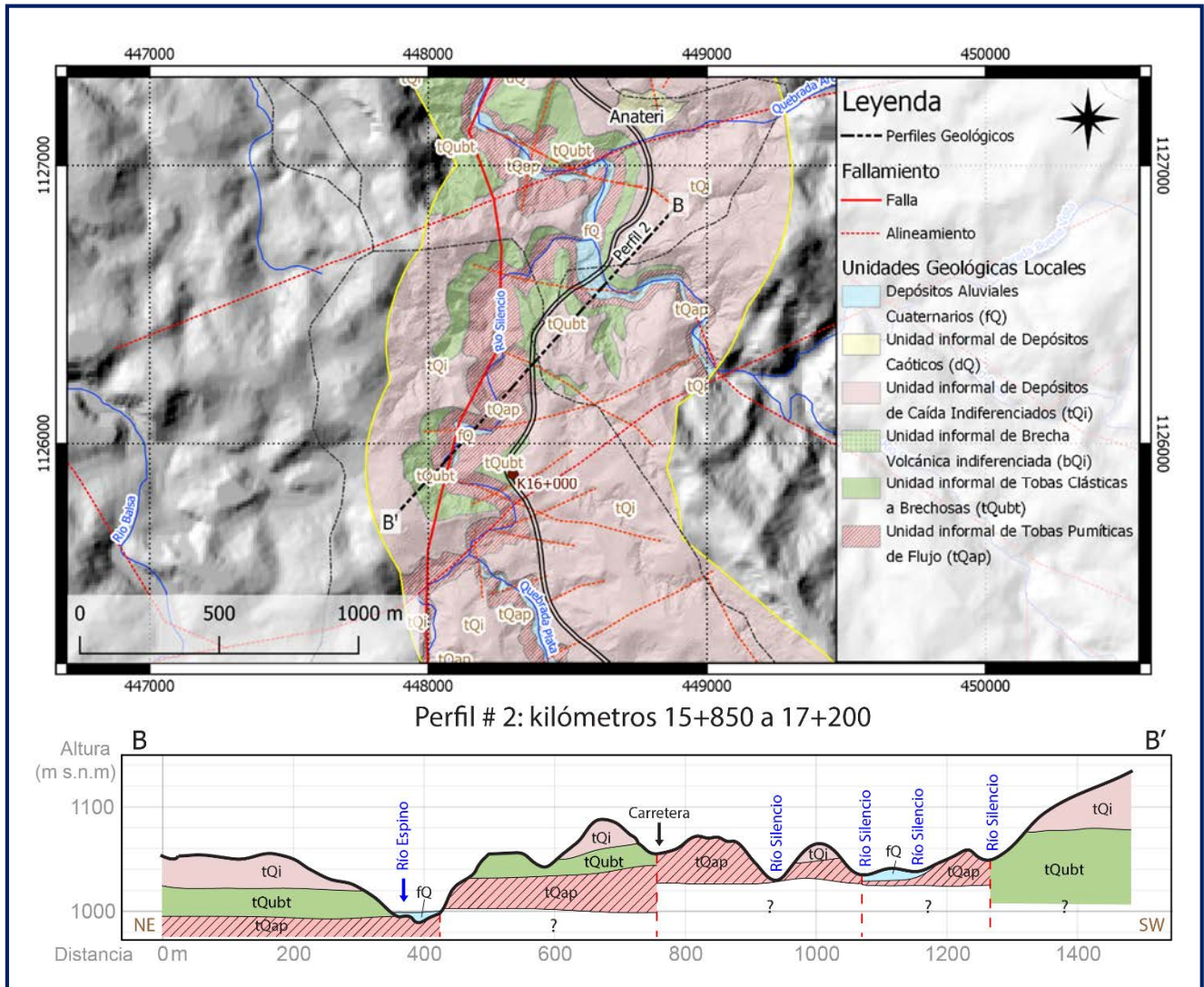


Figura 17: Perfiles geológicos del área de estudio: Perfil 2 (km 15+850 a 17+200).

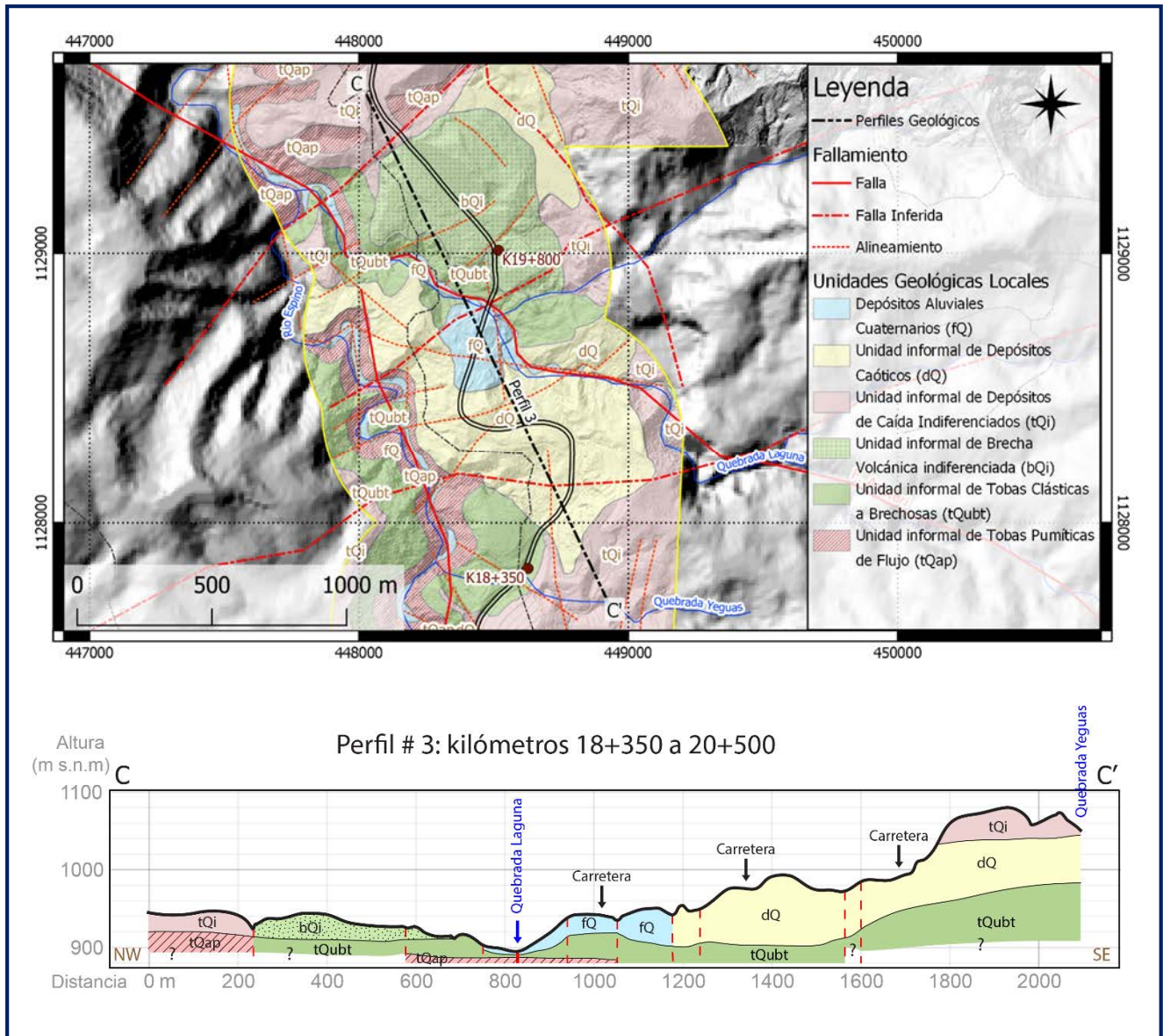


Figura 18: Perfiles geológicos del área de estudio: Perfil 3 (km 18+350 a 20+500).

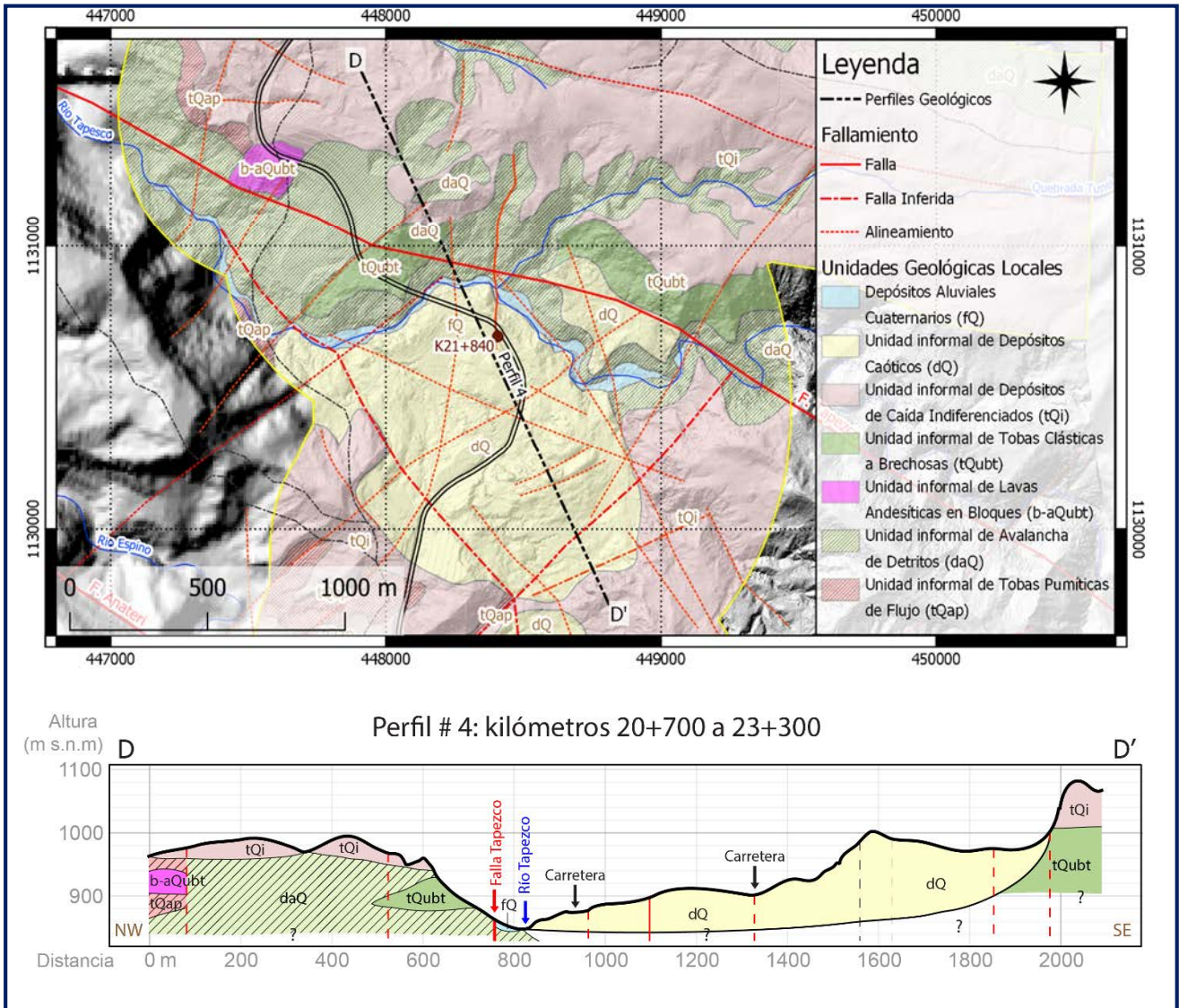


Figura 19: Perfiles geológicos del área de estudio: Perfil 4 (km 20+700 a 23+300).

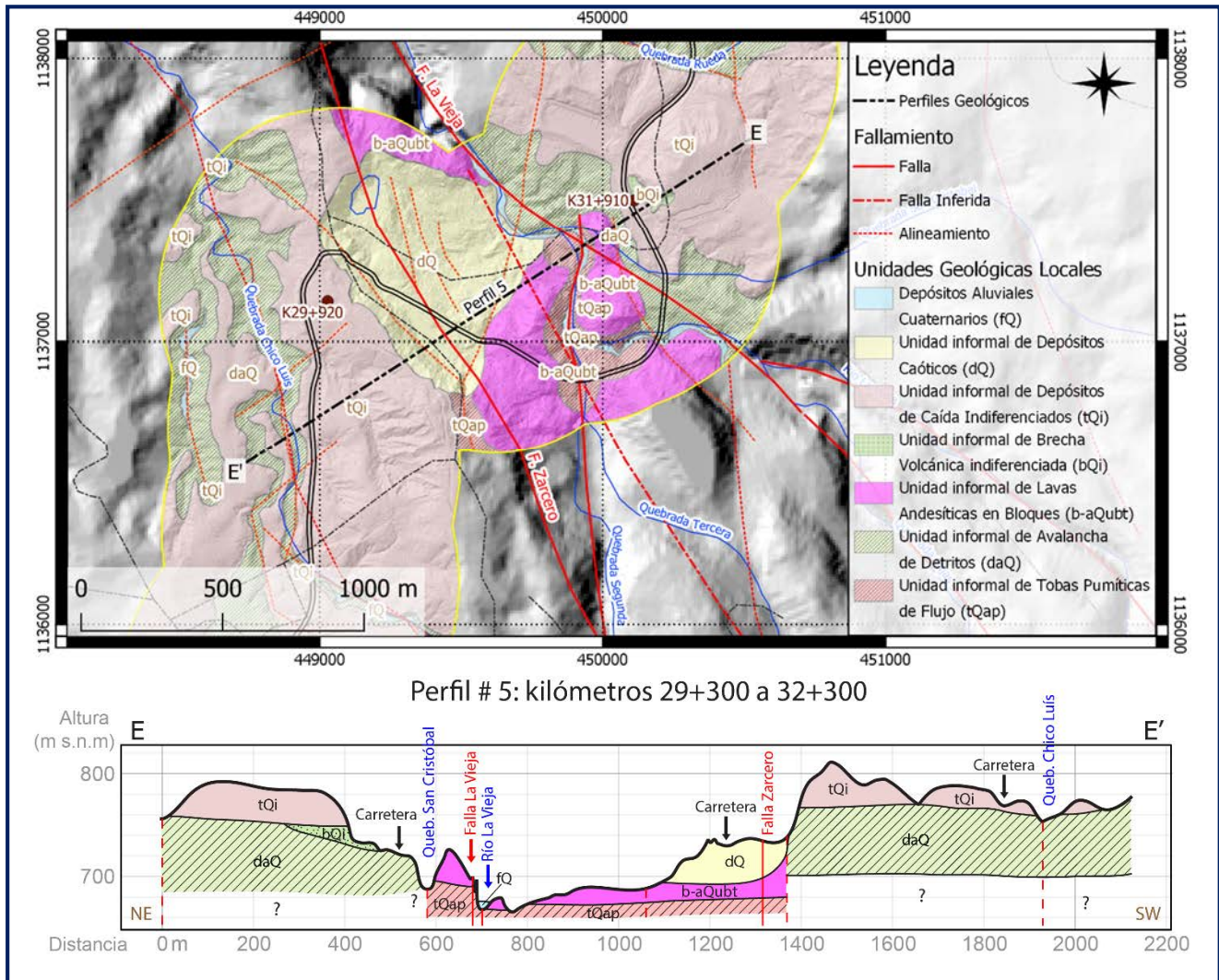


Figura 20: Perfiles geológicos del área de estudio: Perfil 5 (km 29+300 a 32+300).

a) Depósitos Aluviales Cuaternarios [fQ]

Estos depósitos aluviales son producto de la erosión y transporte de materiales por acción de los ríos; poseen granulometrías diversas: limos, arcillas, arenas hasta bloques. La mayoría de los depósitos encontrados en el campo corresponden con aluviones compuestos por bloques decimétricos a métricos en una matriz de arena o limo-arcillosa, poco a no consolidados. Se encuentran principalmente en los planos de inundación de los ríos Barranca, Quebrada Plata, Espino, Quebrada Laguna, Tapezco, Quebrada Arena, Seco, La Vieja, Ronrón y Peje, así como en algunas antiguas terrazas fluviales.

En el cauce del río Espino (coordenadas 448644 E, 1126560 N) se encuentra un depósito aluvial compuesto por clastos tamaño grava, redondeados a subredondeados de hasta 10 cm de largo, de composición lávica a ignimbrítica, en una matriz de arena fina con contacto puntual a flotante. En la margen derecha del río se encuentra soldado para formar un conglomerado, mientras que en la

margen izquierda se encuentra sin soldar formando un aluvión. De la misma manera, en el cauce del río Laguna (coordenadas 448 446 E, 1128 808 N) se encuentra una terraza compuesta por depósitos aluviales de bloques de hasta 2 m en una matriz arenosa. En la margen izquierda aflora un aluvión de composición similar, con matriz areno-limosa, el cual se encuentra parcialmente cementado, posee hasta 10 m de espesor y está siendo explotado en una cantera a la orilla del trazado de la carretera. Además, en los alrededores de Ciudad Quesada se encuentran depósitos aluviales mapeados por Acuña et al. (2014).

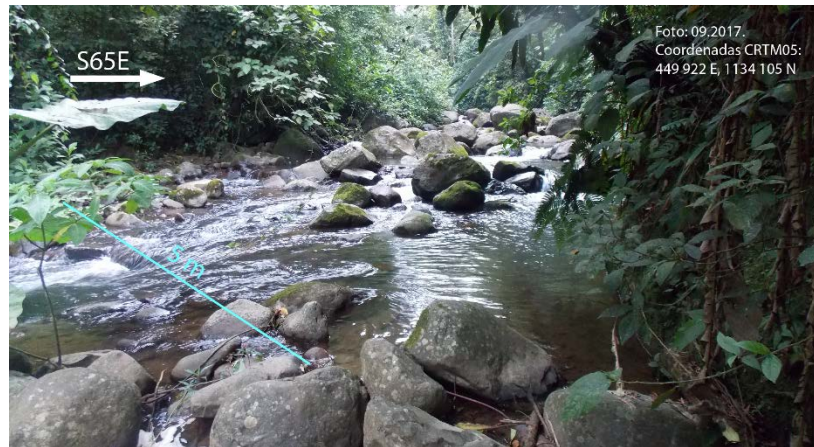


Figura 21: Depósitos aluviales en el cauce del río Seco.
[Foto: 09.2017. Coordenadas: 449 922 E, 1134 105 N. Azimut: S65E].

Estos depósitos sobreyacen discordantemente las unidades informales de Depósitos de caída recientes [vQ], Depósitos caóticos [dQ], Depósitos de caída indiferenciados [tQi], Tobas clásticas a brechosas [tQubt], Lava Andesítica en bloques [b-aQubt], Tobas pumíticas de flujo [tQap] y no son sobreyacidos por ninguna unidad, por lo que se le asigna una edad del Holoceno.

b) Unidad informal de Depósitos de caída recientes [vQ]

Son depósitos de caída, principalmente ceniza, hipotéticamente asociados a la actividad de los volcanes Platanar y Porvenir en su última fase eruptiva. Su espesor no supera 1 m, con excepción de los sitios donde se encuentra rellenando plaecauces (por ejemplo en las coordenadas 450 803 E; 1121 545 N), donde pueden llegar a 6 m de espesor (figura 22).

Afloran en la mayoría del área de estudio, sin embargo, debido a su espesor y por ser la capa más superficial se encuentran fuertemente alterados y en muchos taludes la transición entre estos depósitos y la capa de suelo (horizontes A y B) no se puede distinguir claramente. Por esta razón solo se mapeó en sitios donde muestran espesores significativos (> 2 m). Se puede describir como una toba de ceniza sin clastos reconocibles, de color café anaranjado, poco consolidada y fuertemente alterada. Sobreyacen la Unidad Informal de Depósitos de caída indiferenciados [tQi] y no son sobreyacidos por ninguna unidad. La edad estimada para estos depósitos con base en relaciones estratigráficas es Holoceno.



Figura 22: Interpretación del talud en el kilómetro 10+220.

Se observa el contacto (línea blanca punteada) entre la unidad de Depósitos de caída recientes [vQ] superior y la unidad de Depósitos de caída indiferenciados [tQi] inferior, además se observan las superficies de paleo-deslizamientos (líneas punteadas rojas) y un paleo-cauce relleno a la derecha. La imagen corresponde a un panorama por lo tanto posee cierto grado de distorsión. [Foto: 02.2016. Coordenadas: 450 827 E, 1121 572 N. Azimut: N43W]

c) Unidad informal de Depósitos caóticos [dQ]

Se denominan Unidad Informal de Depósitos caóticos a las áreas con fuerte control estructural, alteración hidrotermal, o afectadas por movimientos en masa antiguos, en las cuales se encuentran una gran variedad de materiales mezclados, interdigitados o depositados de manera contigua sin relación estratigráfica aparente. Se encuentran aflorando en varios sitios del área de estudio: antes del puente sobre la quebrada Laguna (coordenadas 448 881 E, 1128 151 N y 448 431 E, 1128 367 N) asociado a alteración hidrotermal y procesos tectónicos, antes del puente sobre el río Tapezco (coordenadas 448 130 E, 1129 944 N y 448 407 E y 1130 683 N) asociado a depósitos de movimiento en masa y procesos tectónicos, y antes del puente sobre el río La Vieja (coordenadas 449 355 E y 1137 135 N) también asociado a depósitos de movimiento en masa y procesos tectónicos. Asimismo se encontraron otros depósitos de menor tamaño.

En el sitio antes de la quebrada Laguna se encontró una afloramiento (ver figura 23) con lavas sobreyacidas por brecha volcánica alterada, ignimbritas y depósitos piroclásticos con evidencias de alteración hidrotermal (coloraciones negras, verdes, amarillas, anaranjadas, rojas y moradas), así como la presencia de una zona de falla con brecha asociada. Otro afloramiento 550 m más adelante sobre el trazado de la carretera muestra de igual manera, depósitos de la Unidad Informal de Tobas pumíticas de flujo [tQap] sobreyacidos por depósitos de caída y en contacto lateral con brechas, ignimbritas con alteración hidrotermal y lavas, con evidencias de movimiento.



Figura 23: Interpretación del talud antes del río Laguna.

Se observan lavas (LaB), brechas volcánicas (BrV) y zonas de alteración (zA), así como depósitos de caída (tQi) en contacto lateral. [Foto: 02.2016. Coordenadas: 448 822 E, 1128 196 N. Azimut N05E]

De la misma manera, los afloramientos antes del río Tapezco muestran una secuencia discontinua, compuesta de bloques métricos de Tobas pumíticas de flujo [tQap] medianamente consolidadas, Depósitos de caída indiferenciados [tQi] y alterados e ignimbritas asociadas con la Unidad informal de Tobas clásticas a brechosas [tQubt], en contacto lateral discordante por falla con bloques decimétricos en una matriz arcillosa. Esta secuencia se encuentra cortada por una falla a la altura de una quebrada sin nombre, cuyo movimiento asociado también a la heterogeneidad del depósito, se ve reflejado en grietas longitudinales presentes en el pavimento en este sitio. Se estima que este depósito es producto de un proceso de movimiento en masa a gran escala, controlado por la falla Tapezco y evidenciado por indicios morfológicos como lo son la presencia de una zona de depósito/acumulación de material con crestas transversales y grietas radiales.

Estos depósitos incluyen fragmentos de las Unidades Informales principales, por lo que se estima que sobreyace un basamento volcánico desconocido y es sobreyacido por la Unidad informal de Depósitos de caída indiferenciados [tQi]. Al incluir unidades del Pleistoceno, se estima que la edad de estos depósitos data del Holoceno.

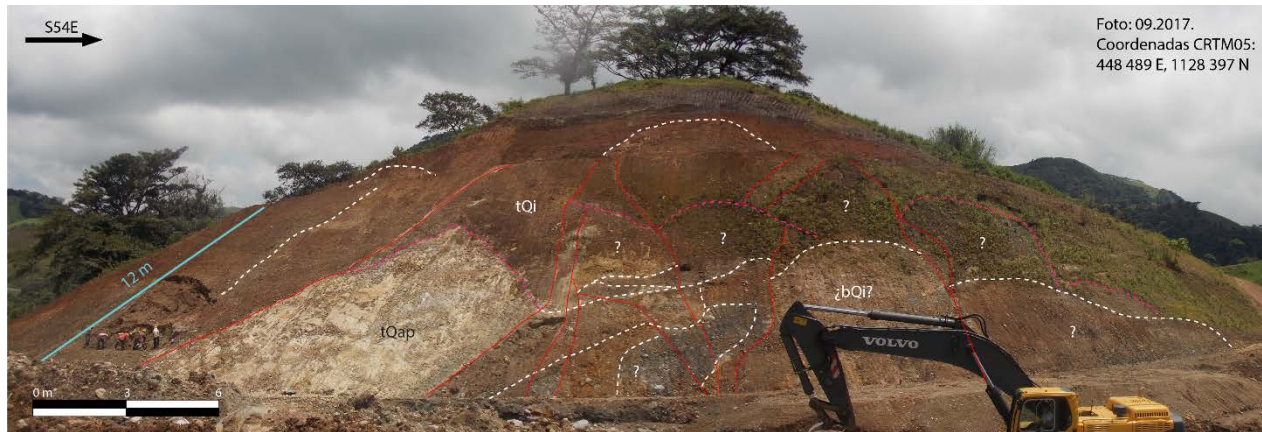


Figura 24: Interpretación de otro talud antes del río Laguna.

Con presencia de Depósitos de caída indiferenciados [tQi] y Tobas pumíticas de flujo [tQap], nótese los contactos laterales por falla en rojo. La imagen corresponde a un panorama por lo tanto posee cierto grado de distorsión. [Foto: 09.2017. Coordenadas: 448 489 E, 1128 397 N, azimuth: S54E]

d) Unidad informal de Depósitos de caída indiferenciados [tQi]

Corresponde con una secuencia de capas milimétricas a métricas de depósitos de caída (ver figura 25): tobas cineríticas, pumíticas y vitroclásticas, brechas pumíticas y depósitos lapillíticos; también presentan brechas volcánicas asociadas en la base de algunos afloramientos. Estos depósitos afloran a lo largo del área de estudio en gran parte de los taludes del proyecto, presentan coloraciones de anaranjado pardo a blanco rosado y se encuentran cortados por fallas y superficies de deslizamientos. Algunos de los afloramientos principales corresponden al cruce de Santa Elena (coordenadas 447 772 E, 1132 656 N), antes del cruce hacia Alto Villegas (coordenadas 449 557 E, 1122 492 N), entre los poblados de Sifón y Alto Villegas (ligeramente afuera del área de estudio, coordenadas 451 019 E, 1122 110 N), entre otros.

Columna estratigráfica esquemática de los depósitos de caída indiferenciados

(basado en taludes del km 24)

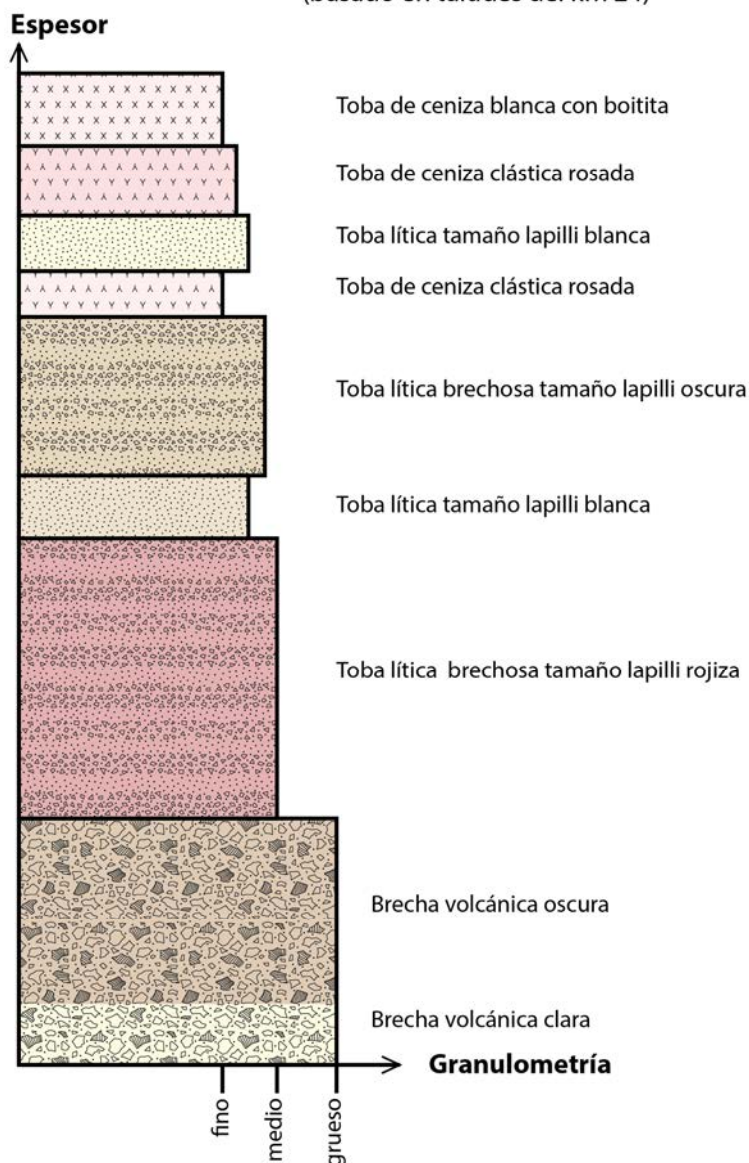


Figura 25: Columna estratigráfica esquemática de la unidad informal de Depósitos de caída indiferenciados [tQi]. Basado en los afloramientos del km 24 (cruce a Santa Elena).

Se levantaron secciones detalladas para algunos de los afloramientos registrados; sin embargo, debido a la predominancia de estos depósitos en el área de estudio, no se realizó un análisis tefroestratigráfico ni se levantaron columnas para cada afloramiento, ya que la información recopilada sobrepasaría los alcances de este trabajo. A continuación se describen las distintas capas de materiales, las cuales aparecen una o más veces dentro de la secuencia. En los sitios mapeados posee un espesor total superior a los 20 m, con contactos entre las capas irregulares, netos, quemados y/o con alteración.

- Capa de toba blanca con biotita: macroscópicamente se describe como una toba blanca con fenocristales de plagioclasa (15%) y biotita alterada a dorado (10%) de 1-2 mm, en una matriz de ceniza blanca (65%) con vitroclastos (10%) de pómez blanco de 1 a 5 mm. Se encuentra alterada y posee una dureza media. Microscópicamente se clasifica como una toba cristalina.
- Capas de toba rosada fina: toba de ceniza rosada con líticos (5%) volcánicos y pómez de hasta 5mm, en una matriz (95%) de ceniza, con vetas blancas y alteración. Al hidratarse, su plasticidad es sumamente alta. El espesor máximo medido es de 2 metros. En algunos afloramientos hay presencia de biotita alterada.
- Capas de toba blanca lítica tamaño lapilli: corresponde con una toba blanca compuesta por litoclastos (60-70%) volcánicos y de pómez (10%), así como cristaloclastos (10%) de plagioclasas hidratadas y biotitas en una matriz (10-20%) de ceniza blanca. Presenta variaciones horizontales con aumentos en la cantidad de litoclastos y pómez, estratificación paralela milimétrica a centimétrica con paquetes de estratos de hasta 50 cm, para un espesor total de 1 m. Posee alteración a hematita y al hidratarse aumenta su plasticidad.
- Capas de toba lítica tamaño lapilli oscura : macroscópicamente se describe como una toba de lapilli con textura piroclástica, compuesta por fenocristales (25-30%) de plagioclasas, máficos y minerales de alteración, líticos (20-25%) de clastos volcánicos y pómez centimétricos (5%), en una matriz (50%) de ceniza y lapilli. Presenta variaciones laterales en los porcentajes de litoclastos, los cuales en su mayoría son inferiores a 5 cm. En la mayoría de los afloramientos se encuentra alterado con coloraciones lilas, rojizas y pardas y presenta una dureza baja a media. También hay presencia de hematita y pátinas de manganeso. Microscópicamente se clasifica como una toba cristalina andesítica vesicular con litoclastos andesíticos. En algunos afloramientos, el contacto superior presenta un horizonte de 1,5 cm carbonizado. Cuando se encuentra completamente hidratada, su plasticidad aumenta significativamente.
- Capas de brecha volcánica: compuesta por litoclastos (60%) centimétricos a métricos, subangulares a subredondeados, de lavas andesíticas e ignimbritas, pómez (5%) en una matriz de ceniza alterada de color café a blanca (35%). El espesor medido es de 2 metros y el contacto es transicional con la capa superior.

Se encuentran sobreyaciendo las unidades informales de Tobas clásticas a brechosas [tQubt], Lavas Andesíticas en bloques [b-aQubt], Avalancha de Detritos [daQ] y Tobas pumíticas de flujo [tQap]; subyace la Unidad informal de Depósitos de caída recientes [vQ]. Se pueden asociar con los flujos piroclásticos descritos para la Unidad Bajos del Toro, así como las tobas pumíticas de la Formación Alto Palomo, los cuales se encuentran interdigitados (Herrera et al., 1996) por lo que su edad varía del Pleistoceno medio a superior.



Figura 26: Interpretación del talud en el km 24+620 (intersección hacia Santa Elena).

Se observan las distintas capas de los Depósitos de caída indiferenciados [tQi] así como la capa guía (cg) correspondiente a la capa de toba blanca con biotita. En rojo se observan las superficies de falla y/o deslizamiento. [Foto: 05.2017.Coordenadas: 447 714 E, 1132 550 N, Azimut: N]

e) Unidad informal de Brecha Volcánica indiferenciada [bQi]

Corresponde a una brecha volcánica con clastos centimétricos en una matriz de ceniza, su ocurrencia es localizada y predominante después del puente sobre la Quebrada Laguna (coordenadas 448 518 E, 1129 007 N). Está compuesta de clastos (20%) subredondeados a angulares, con tamaños entre 5 y 50 cm, de lavas andesíticas masivas a escoriáceas y tobas con biotita, en una matriz (80%) de ceniza parda. Algunos depósitos se encuentran soldados y sanos, mientras que otros (coordenadas 448 313 E, 1125 855 N) se encuentran fuertemente alterados y meteorizados. Estos depósitos se pueden correlacionar con las brechas y megabrechas de la Unidad Bajos del Toro-Viejo. Se encuentran sobreyaciendo las unidades informales de Tobas clásticas a brechosas [tQubt], Lavas Andesíticas en Bloques [b-aQubt] y son sobreyacidas por la unidad informal de Depósitos de caída indiferenciados [tQi], por lo que la edad asignada es del Pleistoceno.



Figura 27: Clastos volcánicos centimétricos de la brecha volcánica indiferenciada.
[Foto: 06.2018. Coordenadas: 448 520 E, 1128 978 N].

f) Unidad informal de Ignimbritas [igQft]

En el río Barranca (coordenadas 450 342 E, 1121 767 N) aflora un flujo de litoclastos y bloques en una matriz de ceniza. Este flujo se asocia con la formación Tiribí, la cual es descrita de manera general por Huapaya & Rojas (2012), como una ignimbrita gris, con escoria, vidrio volcánico, líticos lávicos y pocas pómez. Macroscópicamente se describe como un flujo no soldado con bloques (20 %) de basaltos vesiculares medianamente redondeados, con litoclastos (15 %) de menor tamaño de fragmentos volcánicos y pómez, en una matriz (65 %) de ceniza fina a media. Microscópicamente los bloques de basaltos se clasifican como calco-alcalinos.

Según Rojas (2013) al sur, fuera del área de estudio, esta formación sobreyace discordantemente a las rocas del Grupo Aguacate y Formación Alto Palomo, y además sobreyace y se interdigita con los sedimentos lacustres. En el área de estudio se encontró sobreyaciendo Tobas pumíticas de flujo [tQap] y sobreyacido por la unidad de Depósitos de caída indiferenciados [tQi]. Según dataciones radiométricas (Pérez et al., 2006), su edad es del Pleistoceno Medio.

g) Unidad informal de Tobas clásticas a brechosas [tQubt]

Se agrupan bajo el nombre de tobas clásticas a brechosas una serie de tobas clásticas a ignimbritas, de color gris claro a gris azulado, compuestas por cristales de plagioclasa y máficos, líticos volcánicos y pómez en cantidades variables, en una matriz de ceniza oscura. Afloran en la base del puente sobre la Quebrada Laguna (Coordenadas 448 366 E, 1128 869 N), así como antes del puente sobre el río Espino (coordenadas 448 369 E, 1126 253 N).

Macroscópicamente, las tobas clásticas que afloran en la quebrada Laguna se describen como una toba gris oscura de textura piroclástica compuesta por fenocristales (10%) de plagioclasa y máficos de hasta 1 mm, líticos (20-40%) volcánicos y pómez de hasta 1,5 cm, en una matriz gris (50-70%) de ceniza. Presenta vetas de calcita, esporádicamente lapilli acrecional y algunos restos de madera carbonizada; su dureza es media-alta. Microscópicamente se clasifican como tobas vítreas que gradan a tobas pumíticas. Debido a la presencia de dos fallas que se intersecan debajo del puente sobre la Quebrada Laguna, se encuentran alteraciones de esta misma litología: en la margen derecha del río se encuentra una zona alterada de color blanco y con mayor predominancia de pómez y en la margen izquierda aguas abajo se encuentra la misma litología, de color verde, completamente epidotizada y/o cloritizada. Este tipo de alteración también se encuentra después el río Tapezco, asociado a la zona de la falla de mismo nombre.



Figura 28: Tobas clásticas de la Quebrada Laguna.
[Foto: 02.2018. Coordenadas: 448 373 E, 1128 843 N. Azimut: N73W].

Las ignimbritas que afloran antes del puente sobre el río Espino, poseen una transición lateral hacia tobas clásticas con composición similar a las descritas anteriormente, pero con granulometría más gruesa. Las ignimbritas son de color gris azulado a morada, son masivas con diaclasamiento y poseen variaciones laterales con fiames de pómez y escoria milimétricos a centimétricos, en cantidades variables (10-40%) en una matriz de ceniza.

Éstas se pueden correlacionar con las tobas y flujos piroclásticos (depósitos de nube ardiente) descritos para la Unidad Bajos del Toro-Viejo, por lo que se asigna una edad del Pleistoceno. Sobreyacen las unidades informales de Lavas Andesíticas en bloques [b-aQubt], y Tobas pumíticas de flujo [tQap] y son sobreyacidos a su vez por la unidad de Depósitos de caída indiferenciados [tQi].

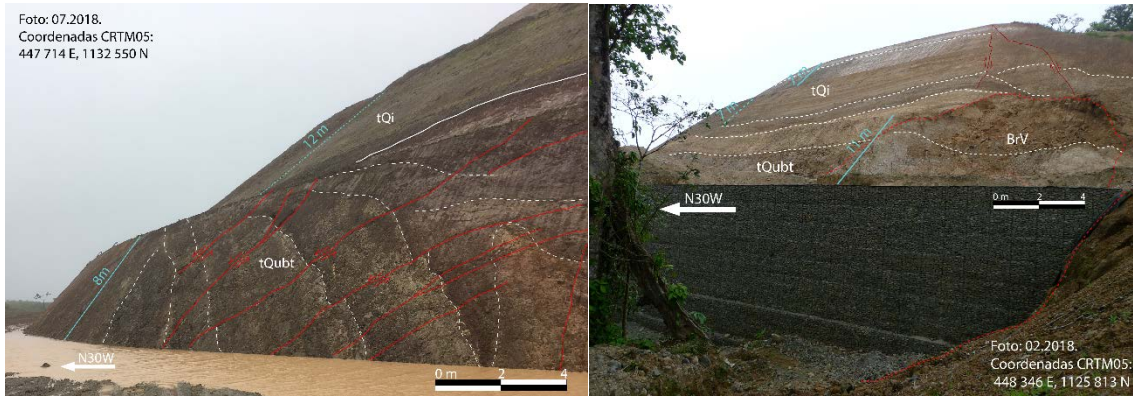


Figura 29: Afloramientos alrededor del km 16.

En la imagen de la derecha se observa la inestabilidad del talud correspondiente principalmente con las brechas volcánicas (BrV) y el contacto entre los Depósitos de caída indiferenciados [tQi] y las Tobas clásticas a brechosas [tQubt]. En la imagen de la izquierda se aprecia el intenso fallamiento que ha sufrido esta litología en el sitio. [Foto 1 (izq.): 07.2018. Coordenadas: 447 714 E, 1132 550 N. Azimut: N30W. Foto 2 (der.): 02.2018. Coordenadas: 448 346 E, 1125 813 N. Azimut: N40W].

h) Unidad informal de Lavas Andesíticas en Bloques [b-aQubt]

Corresponden con una serie de flujos de lava andesíticos a basálticos en bloques (o autobrecha) con brechas subordinadas y flujos piroclásticos asociados, afloran en varios sitios del área de estudio después del cruce sobre el río Tapezco, el cual corresponde con uno de los bordes propuestos de la caldera del complejo Chocosuela. El afloramiento principal corresponde al talud justo antes del puente sobre el río La Vieja (coordenadas 450 086 E, 1136 899 N) donde afloran al menos cuatro episodios de flujos lávicos distintos (ver figura 31). Aunque también afloran en dos sitios después del puente sobre el río Tapezco (coordenadas 447 621 E, 1131 334 N y 447 926 E, 1131968 N).



Figura 30: Lavas andesíticas en bloques (km 24).

[Foto: 03.2018. Coordenadas: 447 926 E, 1131 968 N. Azimut: N30W]

Macroscópicamente, las lavas se describen como rocas con textura afanítica porfírica, color gris claro, compuestas por fenocristales (20-50%) de plagioclasa, máficos, con o sin olivinos alterados, de hasta 5 mm en una matriz de vidrio (50-80%), con o sin alteración a cuarzo y hematita. Algunos flujos presentan variaciones en color (de gris negro a rojizo) y en vesicularidad (hasta 20%) y poseen pátinas de alteración. En general, están poco meteorizadas (2-3/5), y presentan una dureza alta. Microscópicamente se clasifican como andesitas piroxénicas, andesita basálticas y basaltos alcalinos.

Estos flujos de lava con brechas subordinadas se pueden correlacionar con los Flujos piroclásticos y lavas río La Vieja, así como las Lavas Diferenciadas de la Unidad Bajos del Toro-Viejo descritos por Herrera et al., (1996) por lo que la edad probable es del Pleistoceno medio. Son sobreyacidas por las unidades informales de Depósitos de caída indiferenciados [tQi] y a su vez sobreyacen la unidad de Tobas pumíticas de flujo [tQap].



Figura 31: Interpretación del talud en el km 31.

Se observan las Tobas pumíticas de flujo [tQap] en la base, sobreyacidos por Lavas Andesíticas en Bloques [b-aQubt] así como depósitos aluviales (al), nótese el fallamiento principalmente dextral-normal asociado a la falla La Vieja. La imagen corresponde a un panorama por lo tanto posee cierto grado de distorsión. [Foto: 05.2018. Coordenadas: 450 112 E, 1136 928 N].

i) Unidad informal de Tobas pumíticas de flujo [tQap]

Corresponden a una serie de flujos pumíticos (pómez > 10%), con o sin biotita en la matriz y con hornblenda y/o biotita en las pómez. Afloran a lo largo del área de estudio en particular cerca de la intersección hacia Santa Elena (coordenadas 447 647 E, 1132 612 N) y en la base del afloramiento del río La Vieja (coordenadas 450 086 E, 1136 899 N); se diferencian de los Depósitos de caída indiferenciados [tQi] por la cantidad de pómez y la presencia de hornblenda y biotitas en estas.

Macroscópicamente se describen como una toba de color beige, gris, rosado o rojizo (debido a la presencia de óxidos de hierro), compuesto por cristaloclastos (10-30%) de plagioclasa y biotita,

vitroclastos (10-40%) de pómez blanca a rosada de hasta 10 cm y litoclastos (10-15%) de hasta 7 cm de ignimbrita en una matriz (50-70%) de ceniza poco soldada. Presentan variaciones horizontales en la cantidad de los componentes, así como en el grado de aplastamiento de las pómez; algunos afloramientos presentan gradación inversa. Esta litología se encuentra alterada en intensidades variables, por lo que su dureza también varía entre suave y medianamente dura. Al estar completamente hidratada, muestra un comportamiento plástico. Microscópicamente se clasifican como tobas vítreas con o sin pómez bandeada, con litoclastos no reconocibles y trizas vítreas.



Figura 32: Tobas pumíticas de flujo pertenecientes a la Formación Alto Palomo.
[Foto: 04.2018. Coordenadas: 452 180 E, 1124 673 N. Azimut: S70W]

Un afloramiento tipo, asociado a la Formación Alto Palomo y que se encuentra fuera del área de estudio (coordenadas 452 181 E, 1124674 N) corresponde con una toba beige a parda blanca, compuesta por litoclastos (20-30%) y cristaloclastos (10-15%) en una matriz de ceniza (65-70%). Los litoclastos son milimétricos a centimétricos de pómez fibroso con cristales de biotita (1-5 cm), lavas y escorias lávicas andesíticas a basálticas (1-7 cm), toba gris soldada con hornblendas y tobas amarillentas. Hay mala selección, los granos son subredondeados, no hay contacto (los granos son flotantes), y el depósito se encuentra medianamente consolidado y algo alterado.

Se correlacionan con los depósitos de tobas de flujo de la Formación Alto Palomo y por lo tanto poseen una edad de 0,5 Ma según Alvarado & Gans (2012), es decir Pleistoceno medio. Esta unidad es sobreyacida discordantemente por las unidades informales de Depósitos de caída recientes [vQ], Tobas clásticas a brechosas [tQubt] y Lavas Andesíticas en bloques [b-aQubt], y sobreyace la unidad de Avalancha de Detritos [daQ].

j) Unidad informal de Avalancha de Detritos (Debris Avalanche) [daQ]

La unidad informal de Avalancha de Detritos (llamado también Debris Avalanche) corresponde a depósitos de bloques y clastos (10-30%) decimétricos a métricos de lavas e ignimbritas en una matriz de ceniza (70-90%) alterada a suelo. Se encuentra a lo largo de la carretera, a partir del puente sobre el río Tapezco (coordenadas 447 914 E, 1131 001 N). Los bloques corresponden a lavas andesíticas a basálticas así como algunos clastos de ignimbritas consolidadas, son subredondeados a angulares, poseen contacto puntual a flotante, la selección es mala y no hay gradación visible. Con respecto a la génesis, se relacionan con el colapso parcial o total de los remanentes de la caldera de Chocosuela. Se asocia con el basamento de la parte norte del proyecto, por lo tanto subyace las unidades informales asociadas a la Unidad Bajos del Toro-Viejo (Tobas clásticas a brechosas [tQubt] y Lavas Andesíticas en bloques [b-aQubt]), y su edad corresponde al Plioceno superior a Pleistoceno inferior.



Figura 33: Depósitos de la avalancha de detritos. Obsérvese los bloques métricos. [Foto: 03.2018. Coordenadas 447 885 E, 1131 023 N]

5.3. Fallamiento regional

En el área de estudio las principales estructuras neotectónicas identificadas (ver figura 34) son la Falla Florencia-La Palmera hacia el norte y noroeste, la Falla Zarcero que corta el área de interés de sureste a noroeste, hacia el este se ubican las Fallas Gata, Congo, Porvenir y el complejo Volcánico Platanar-Porvenir, con varias estructuras caldéricas. Más hacia el este se encuentra la Falla el Viejo-Aguas Zarcas.

El predominio cinemático de las fallas es de tipo inverso en el caso de orientaciones E-W (concordante con la Falla Florencia-La Palmera y varias fallas inversas), y de tipo normal con componente dextral en el caso de orientaciones N-S a NW-SE (concordante con las fallas Viejo-Aguas Zarcas, Zarcero, Gata, y Congo) (Acuña et al, 2014).

Cabe resaltar que hacia el este se ubica el macizo del volcán Poás. En este macizo Montero (2010) propone una zona transtensiva con extensión E-W, en la cual se orientan el cráter Botos, el cráter actual del volcán Poás y el cono Von Frantzius, los conos piroclásticos de Sabana Redonda, Volcán Congo, el conjunto volcánico Bosque Alegre (incluyendo sus conitos piroclásticos internos), la laguna Hule y el maar de Río Cuarto. A continuación se hablará a detalle de las fallas más importantes contenidas dentro de la zona de esfuerzos que corresponden con el área de estudio.

a) Falla Florencia-La Palmera

Está ubicada al norte del complejo volcánico Platanar-Porvenir en la zona limítrofe con la llanura aluvial. Consiste en una serie de escarpes con orientaciones E-W, los cuales Montero (2001) considera como fallas inversas inclinadas hacia el sur, basado en su expresión geomorfológica y similitud en rumbo con otros escarpes de la cordillera volcánica Central (fallas Alajuela, San Miguel y Guápiles) que se han asociado con este tipo de fallas. Estos escarpes son limitados por las fallas Viejo-Aguas Zarcas (hacia el este) y Zarcero (hacia el oeste).

b) Falla Viejo-Aguas Zarcas

Fue descrita por primera vez por Alvarado et al., (1988b), que la considera como una falla en tijera con un rumbo NNW, con un escarpe oriental más prominente. Se caracteriza por un valle lineal a lo largo del río Aguas Zarcas y una longitud mínima de 25 km (Montero et al, 2010). Montero et al. (2010) hacen referencia a un perfil magnético realizado por Barquero et al. (2007) [Informe Interno del ICE] donde se evidencia la traza de la falla según un contraste entre las susceptibilidades magnéticas de las rocas presentes a ambos lados de la falla.

c) Falla Zarcero

Esta falla cruza el área de estudio de sureste a noroeste. Está caracterizada por un rumbo oscilante N-NW y se encuentra dividida en dos ramales en un sector central (Montero, 2001). Según los estudios de Rojas-Araya (2011) posee un movimiento normal con componente dextral. Al igual que la Falla Congo, sus contraescarpes generan represamientos de drenaje (Montero, 2001). Tiene una longitud similar a la Falla Viejo-Aguas Zarcas, de aproximadamente 25 km.

d) Fallas Congo y Gata

La Falla Gata presenta una fuerte componente normal y se encuentra orientada al NNW, al igual que la Falla Zarcero, mientras que la Falla Congo es de componente normal y rumbo N-S (Montero 2001). Según Alvarado et al. (1988) en su contraescarpe ha generado una laguna por represamiento. Ambas fallas son de corta extensión (aproximadamente 5 a 6 km) y se caracterizan por escarpes juveniles con facetamiento rectangular (Montero, 2001).

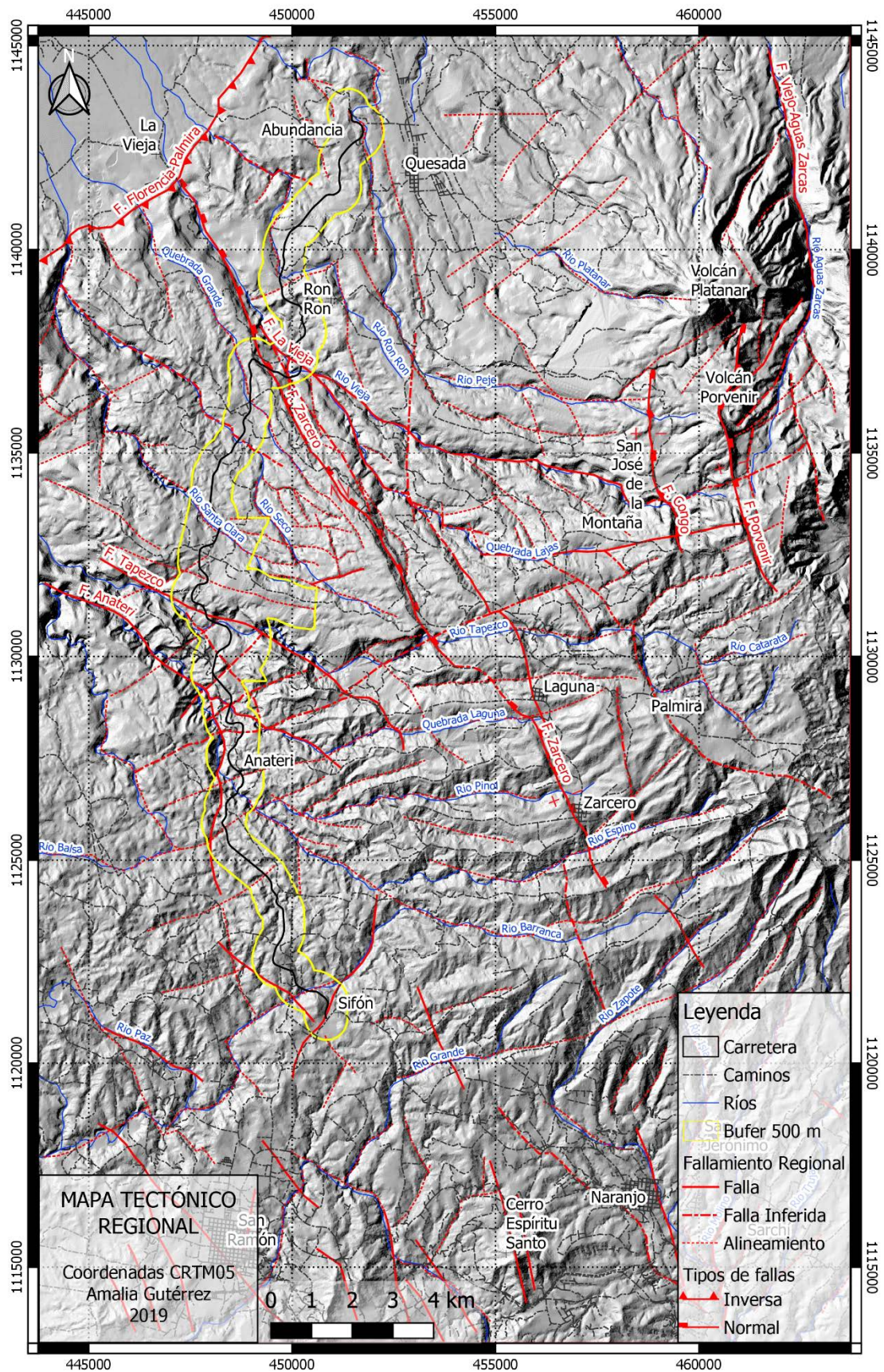


Figura 34: Mapa tectónico regional.

6. AMENAZAS NATURALES

Costa Rica se sitúa en la zona intertropical, con influencia climática del Océano Pacífico y el Mar Caribe, así como de los vientos alisios, lo que lo hace propenso a sufrir los efectos de Ondas, Depresiones y Tormentas Tropicales. Además, hace parte del Cinturón de Fuego del Pacífico, con un arco volcánico y 5 volcanes activos: Rincón de la Vieja, Arenal, Poás, Irazú y Turrialba (Barquero, 2010). Finalmente, se encuentra en el límite de subducción entre las placas del Coco y Caribe, cerca de un punto triple con la Zona de Fractura de Panamá. Todo esto lo hace propenso a sufrir efectos de una gran cantidad de amenazas naturales: sísmicas, volcánicas e hidrometeorológicas, entre otras.

Por otra parte, el clima tropical se traduce en altas precipitaciones en gran parte del país (entre 1000 a más de 4000 mm/año), así como una predominancia de altas temperaturas (22° C en promedio) según Solano & Villalobos (2000). Esto tiene una influencia directa sobre la meteorización, alteración y erosión de los materiales, en particular materiales volcánicos poco consolidados, lo cual aumenta la susceptibilidad a procesos de remoción en masa.

En el área de estudio, se seleccionaron las amenazas naturales consideradas de mayor relevancia para el desarrollo futuro; estas son las amenazas sísmica, volcánica, hidrometeorológicas (específicamente de inundación) y de deslizamientos. A continuación se detallan los resultados de la investigación para cada una de las amenazas mencionadas anteriormente.

Para el estudio de las amenazas naturales presentes en el área de estudio, se tomaron como base los mapas elaborados por la Comisión Nacional de Prevención de Riesgos y Atención de Emergencias para los cantones de San Ramón, Zarceros y San Carlos. Además, se realizó una recopilación bibliográfica de los trabajos y estudios relacionados sobre las amenazas volcánica, de inundación, de deslizamientos, potencial sísmico de fallas cercanas, así como otras amenazas hidrometeorológicas y climáticas específicas o cercanos al área de estudio.

Para la determinación de la amenaza volcánica en el área de interés, se tomaron en cuenta los volcanes activos cercanos al área de estudio con una distancia máxima de 35 km de la carretera (Poás y Arenal) para los cuales se realizó una recopilación bibliográfica de estudios realizados; y los volcanes dormidos presentes dentro del área de estudio (Platanar y Porvenir) para los cuales se realizó una extrapolación de la posible actividad. No se tomaron en cuenta los volcanes extintos (Volcán Viejo) ni los conos piroclásticos de Aguas Zarcas ya que por el tipo de actividad asociada esta es muy localizada y probablemente no tengan un impacto significativo para el área de estudio.

Con respecto a la amenaza sísmica, se evaluó el potencial sísmico de las fallas regionales ubicadas dentro o a proximidad del área de estudio; además, se revisó la base de datos de los sismos de la Red Sismológica Nacional y se determinó el mecanismo focal para dos sismos someros de magnitud intermedia asociados al fallamiento local propuesto.

Con respecto a las amenazas hidrometeorológicas, se trabajó principalmente con la amenaza por inundación, se revisó un inventario histórico de inundaciones y se cartografiaron las áreas con inundaciones históricas registradas. Además, se aplicó la metodología de Das (2019) basada en parámetros geospaciales para determinar la susceptibilidad por inundación en el área de estudio.

Finalmente, para la amenaza por deslizamientos, se tomaron los resultados de trabajos previos en el área de estudio local con metodologías diversas y además, se realizó un inventario histórico detallado con base en la geomorfología para el área de estudio local, el cual fue analizado y comparado con los resultados de los trabajos anteriores.

6.1. Amenaza volcánica

Como se mencionó anteriormente, el área de estudio está compuesta principalmente por productos de la actividad volcánica de las “Cordilleras Neógenas del Arco Interno” (Denyer et al., 2003, 2009) y está limitada por la cordillera de Tilarán con el volcán Arenal al oeste, y la cordillera Volcánica Central con el volcán Poás al este. Asimismo, en la parte noreste del área de estudio se sitúan los volcanes Plantar y Porvenir, los cuales se consideran volcanes dormidos, sin embargo no se excluye la posibilidad de que presenten actividad volcánica en el futuro.

Se define como amenaza volcánica “el peligro latente representado por la posible ocurrencia de un fenómeno peligroso, de origen volcánico, capaz de producir efectos adversos en las personas, los bienes, los servicios públicos, y el ambiente” (Ley 8488, 2006 y CNE, 2014c). A pesar de encontrarse a una distancia relativamente segura de dos volcanes activos, es importante determinar la exposición no solo del proyecto sino de toda el área de interés, a peligros de origen volcánico. En este sentido se espera que el desarrollo y planificación territorial de la región una vez finalizada la carretera tome en cuenta la amenaza volcánica presente. Además, Costa Rica se sitúa sobre el cinturón de Fuego del Pacífico y por esto no está exento de sufrir también los efectos de erupciones volcánicas de gran tamaño, de volcanes situados en países vecinos, como las de los volcanes Santa María (Guatemala) en 1902, y Cosigüina (Nicaragua) en 1835, o la erupción asociada al depósito de ceniza de Los Chocoyos proveniente de la Caldera de Atitlán hace aproximadamente 84 000 años (Alvarado et al, 2007).

6.1.1. Determinación de los peligros volcánicos

a) Volcán Arenal

El volcán Arenal (1750 m.s.n.m) es un estratovolcán cónico adosado, ubicado en la provincia de Alajuela al extremo sureste de la Cordillera de Tilarán, aproximadamente 30 kilómetros al oeste de la Ruta Nacional No. 35. Conocido desde el siglo XIX pero considerado un volcán dormido, fue poco estudiado hasta su repentina erupción el 29 de Julio de 1968, a raíz de la cual fallecieron 78 personas (Soto & Sjöbohm, 2007). A partir de este evento, el volcán ganó fama internacional,

estuvo catalogado como uno de los dieciséis volcanes más activos del mundo y ha sido intensamente estudiado por investigadores nacionales e internacionales (Alvarado et al., 2006). El macizo volcánico se encuentra dentro del Parque Nacional Volcán Arenal, establecido por el MINAE en 1991 (Berrocal, 2008).

Es geológicamente joven, con menos de 7000 años de historia eruptiva (Soto & Alvarado, 2006) y su actividad se ha caracterizado por la alternancia de fases con mayor o menor actividad con fases de inactividad (Barquero et al., 2010). Un estudio al detalle de la historia eruptiva del volcán Arenal, realizado por Soto & Alvarado (2006), determinó patrones eruptivos con base en el estudio de los depósitos de las erupciones mayores; de tipo plinianas, sub-plinianas, estrombolianas y vulcanianas, entre 7000 años antes del presente y el año 1986. Barquero et al., (2010) determinan que en los últimos 650 años el volcán ha modificado parcialmente su estilo de actividad, con una progresiva disminución de las erupciones explosivas que han sido reemplazadas por una actividad de tipo efusiva y estromboliana.

Más recientemente la actividad del volcán Arenal fue continua a partir de julio de 1968 y estuvo caracterizada por explosiones estrombolianas, flujos piroclásticos y de lava, efusión de gases, actividad fumarólica y un lago de lava permanente desde 1974; algunas veces con pequeños flujos piroclásticos y enjambres de temblores volcano-tectónicos. (Barquero et al., 2010). Sin embargo, la actividad del volcán Arenal decreció significativamente a partir de julio del 2010 y terminó por mermar en enero del 2011. Desde entonces, no se volvió a reportar incandescencia relacionada con explosiones, ni con el avance de coladas de lava, únicamente salida de gases, con una baja tasa de sismicidad en la actualidad (RSN, 2019a).

Con respecto a los peligros volcánicos del Arenal, la gran cantidad de información publicada desde 1968 (más de 335 publicaciones, según lo recopilado por Alvarado et al., 2006) ha permitido conocer de forma detallada sus características geológicas, además de su historia volcánica. Además, se encuentra en un área que sufrió fuertes cambios en su ocupación y actividades (de uso rural al establecimiento de la represa hidroeléctrica y un aumento sustancial de las actividades turísticas), por lo que surgió un fuerte interés por los peligros volcánicos, su cartografía y la zonificación de los usos del suelo desde 1990 (Soto & Sjöbohm, 2005).

El primer trabajo publicado sobre los peligros del volcán Arenal estuvo a cargo de Alvarado et al., (1997), otros trabajos incluyen Alvarado & Arroyo (2000), Berrocal & Malavassi (2004), Geotérmica Italiana (1992), Kerle (1996), Malavassi (1981), Villari (1984), entre otros. A partir de estas y otras investigaciones, en el 2001 se publicaron el reglamento “Uso de suelos en los alrededores del Volcán Arenal” y la norma “Restricciones para el uso del suelo en los alrededores del Volcán Arenal” (La Gaceta, 11 de enero 2001 pp. 41-47), suscritos por la Comisión Nacional de Prevención de Riesgos y Atención de Emergencias (CNE) y el Comité Asesor Técnico (CAT) en Vulcanología. Los peligros tomados en cuenta para estos reglamentos incluyen caída de ceniza y bloques, flujos piroclásticos, y clastos eyectados. La zonificación oficial propuesta (Esquivel, 2004) consiste en dos niveles de restricción: un primer nivel con uso condicionado con un radio de

5,5 km y un segundo nivel de restricción de no construcción y condicionamiento de las actividades humanas. Cabe recordar que con base en el sistema de evaluación de volcanes peligrosos (Yokoyama et al., 1984), el Arenal alcanza 14 sobre 16 puntos posibles en su periodo de mayor actividad, y la población expuesta para el 2004 rondaba las 12 000 personas.

Soto y Sjöbohm (2005, 2006, 2007) realizan una revisión de los trabajos anteriores, incluyendo la zonificación, en la cual reevalúan y amplían las bases conceptuales para la producción del mapa de peligros del Arenal. Identifican los siguientes peligros volcánicos: salida y dispersión de gases, caída balística de bloques, caída de piroclastos, flujos piroclásticos, apertura de bocas eruptivas laterales y generación de explosiones dirigidas, coladas de lava, lahares, deslizamientos y avalanchas volcánicas, generación de olas dentro del embalse del Arenal (seiche) y sismos volcánicos. Al observar los mapas de peligros (Soto & Sjöbohm, 2005) los de mayor alcance (distancia con respecto a la fuente) corresponden al bombardeo balístico y la caída de piroclastos. La determinación del alcance de las erupciones se basan en una compilación global de efectos de erupciones con la distancia para un VEI (Índice de Explosividad Volcánica por sus siglas en inglés) de 3 a 5, donde se encontró que para erupciones pequeñas a moderadas, los peligros severos solo alcanzan de 5 a 10 km de la fuente (Newhall & Hoblitt, 2002) lo cual corresponde con el caso del Arenal, a pesar de esto aún no alcanza el área de estudio. Además, casi todos los depósitos de caída del Arenal se han distribuido hacia el oeste o suroeste, de acuerdo con los vientos regionales predominantes, con una única excepción conocida hacia el norte (Ghigliotti, et al., 1992 y Soto & Alvarado, 2006) por lo que las posibilidades de transportar ceniza y gases hacia el este, cerca de la carretera (Ruta Nacional No. 35), parece ser inexistente.

b) Volcán Poás

El volcán Poás es un estratovolcán de la cordillera Volcánica Central de Costa Rica, el cual junto con los volcanes Barva, Irazú y Turrialba, se encuentra alineado con una dirección aproximada de N60°W. El macizo del volcán Poás se encuentra ubicado sobre una fractura vulcano tectónica alineada norte-sur (Ruiz et al, 2010 y Ruiz et al, 2019) y está delimitado por las fallas San Miguel al norte y Alajuela al sur. Comprende los conos monogenéticos de Sabana Redonda al sur de cráter principal, así como la laguna Botos, el cono von Frantzius, el cerro Congo, el maar Laguna Hule y el maar de río Cuarto hacia el norte (Alvarado, 2011). Este volcán se encuentra ubicado aproximadamente 25 km al oeste de la carretera (Ruta Nacional No. 35).

Existen reportes de actividad en el volcán Poás desde el año 1828 hasta el presente, con explosiones vulcanianas y estrombolianas leves (Prosser y Carr 1987), siendo las erupciones más mencionadas las de 1910 y 1953-1955 (Blunda, 2010). Según Mora (2010) la mayor erupción fue en el periodo de 1953-1955, con una columna eruptiva de poco menos de 5 000 m, a la cual se le asigna un VEI de 3. Los peligros volcánicos reportados por Mora (2010) corresponden con caída de cenizas, proyección balística, gases volcánicos, lluvia ácida, oleadas piroclásticas y lahares; sin embargo, Barrantes & Malavassi (2015) incluyen coladas de lava y flujos piroclásticos en el análisis realizado. A partir del 2016 se han registrado erupciones freáticas, señales sísmicas

(enjambres de sismos vulcanotectónicos, trémores y eventos de baja frecuencia) y explosiones (RSN; 2019b). Esto provoca un cierre temporal, para luego dar paso a la construcción de refugios y un cambio en la modalidad de las visitas en el Parque Nacional Volcán Poás, ya que hasta la fecha ha seguido mostrando actividad.

En cuanto a los mapas de peligros volcánicos, el primer mapa de reconocimiento de peligros volcánicos de la Cordillera Volcánica Central de Costa Rica fue realizado por Paniagua y Soto (1986), el cual incluye el volcán Poás. Posteriormente, la CNE emitió un mapa de peligros volcánicos (CNE, 2009) basado en observaciones de la RSN y el OVSICORI, el cual delimita áreas potenciales de caída de ceniza, afectación por gases y proyección balística de piroclastos (Barrantes & Malavassi, 2015). Más recientemente, Barrantes & Malavassi, (2015) realizan un análisis detallado de los peligros volcánicos asociados a la actividad del volcán Poás y proponen un mapa de peligros volcánicos, el cual está diseñado para servir de insumo en procesos de planificación territorial y gestión del riesgo.

Según estos autores, un aumento en la actividad eruptiva del cráter principal podría afectar directamente la parte alta de los cantones de Poás, Valverde Vega, Alajuela y Grecia y, de manera indirecta o en menor grado, los cantones de Alfaro Ruiz, Naranjo y una pequeña sección del cantón de San Carlos (Barrantes & Malavassi, 2015). Los posibles daños para el primer grupo de cantones incluyen caída de tefra, y en caso de unas erupciones mayores, de coladas de lava y flujos y oleadas piroclásticas. El segundo grupo de cantones podría verse afectado por lluvia ácida como ocurrió en 1968, 1989 y 1994 y/o por cenizas, como sucedió en 1834, 1910, 1914-1915 y 1955 (Barrantes & Malavassi, 2015).

Los mapas resultantes muestran como el peligro por caída de ceniza (ver figura 35) es bajo a muy bajo en la mayoría del área de estudio regional (en rojo), con excepción de la esquina sureste que presenta un valor de peligrosidad medio. En el trabajo de Barrantes & Malavassi, (2015) las direcciones de caída de cenizas fueron calculadas con base en el registro de vientos promedios en altura, de la estación Juan Santamaría (Alvarado y Fernández, 2001), relacionadas con las alturas de columnas (m s.n.m), estimadas por Mora (2010) para eventos históricos. La distribución de las zonas de peligro está determinada por los vientos alisios, los cuales soplan predominantemente hacia el suroeste del cráter principal.

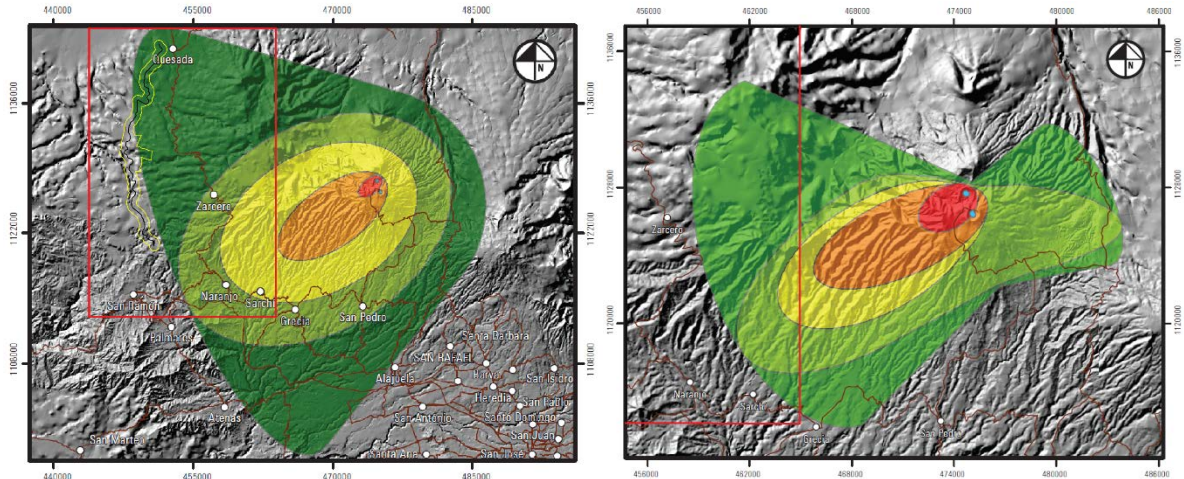


Figura 35: Mapas de peligro por caída de ceniza (izquierda) y de acidificación por gases volcánicos (derecha) para el Volcán Poás (Modificado de: Barrantes & Malavassi, 2015).

Los peligros volcánicos se clasifican en muy bajos (verde oscuro), bajos (verde claro), medio (amarillo), alto (anaranjado) y muy alto (rojo). El área de estudio regional está delimitada por el cuadro rojo.

Con respecto al mapa de peligrosidad por acidificación (ver figura 35), este peligro cubre una menor proporción del área, con valores leves a muy leves concentrados en la parte sureste de esta. Los autores mencionan que la emanación de gases representa un peligro, no solo por los gases propiamente dichos sino también por la lluvia ácida (Barrantes & Malavassi, 2015). Según Scott (1993), en condiciones normales el efecto nocivo está restringido al radio de unos 10 km desde del foco de emisión y, para el caso del volcán Poás, la depositación ácida se restringe a un área de hasta 3 km de longitud, en la dirección principal del viento (Martínez et al., 2000). Para la definición de las zonas propensas a acidificación, se consideraron las direcciones predominantes del viento (vientos alisios del noroeste) y la proximidad de la cima; sin embargo debido a la escasez de datos meteorológicos de esta área, se utilizaron los registros de radio sonda meteorológico correspondientes a los 700 hPa (Barrantes & Malavassi, 2015).

Por otra parte un estudio realizado por Báez (2010) determinó, con base en entrevistas realizadas en la cuenca alta del río La Vieja, que esta área vivió una intensa caída de cenizas entre el final de la década de 1950 y principios de la década de 1960. Según los pobladores de la zona, no existe la menor duda de que esta ceniza provino del volcán Poás. El autor determina que esta actividad no corresponde ni con la erupción de 1953 del volcán Poás ni la erupción de 1963 del volcán Irazú, sino que corresponde a un periodo de actividad con erupciones intermitentes y fuerte actividad fumarólica entre 1956 y 1963, así como erupciones de ceniza en 1961 y 1963, que alcanzaron 20 km de distancia. Determina que las condiciones climáticas que favorecen la presencia de gases y ceniza en la cuenca alta del río la Vieja corresponden a un clima de época seca (entre noviembre y abril) con ausencia de lluvias, y la presencia de vientos alisios que soplan en dirección sureste a noroeste. Según Martínez (2000), los gases y cenizas se canalizan, junto con las masas de aire, en el valle del río Desagüe y viajan ladera abajo hasta Bajos del Toro. Báez (2010) propone además que en época seca, estas masas de aire viajan luego por los valles de Quebrada

Grande, Río Segundo y Quebrada Azufrada, hasta llegar al Cerro Pelón, el cual constituye la divisoria de aguas, y logran sobrepasar este cerro para llegar a la parte alta de la cuenca del río La Vieja, donde se perciben caídas de ceniza, olores a azufre y lluvia ácida.

c) Complejo volcánico Platanar-Porvenir

El volcán Platanar (2 183 m s.n.m) es un estratovolcán poco estudiado, ubicado en la provincia de Alajuela, a 8 km al sureste de Ciudad Quesada; es considerado parte de cordillera Central y se encuentra a una distancia de aproximadamente 10 kilómetros de la carretera (Ruta Nacional No. 35). Se encuentra edificado sobre la caldera del complejo Chocosuela, limita al oeste y al norte con las llanuras de San Carlos y al este, la traza de la falla Viejo-Aguas Zarcas lo separa del macizo del volcán Viejo. Se clasifica como inactivo o dormido por Alvarado (2011) y la edad estimada para la última actividad eruptiva según dataciones radiométricas es de 96 ka (Alvarado & Gans, 2012).

Morfológicamente presenta un cráter destruido (1700 m por encima del terreno circundante) y erosionado hacia el oeste, Alvarado (2011) menciona la presencia de una caldera destruida hacia el noreste del cráter. Como se mencionó anteriormente, el macizo es de un tamaño mediano (50-90 km²), presenta coladas de lava (La Florida y Sucre) algo estudiadas, así como otros depósitos incluyendo piroclastos, detritos y brechas volcánicas, lahares y aluviones (Alvarado, 2011). No presenta evidencias de actividad volcánica reciente a pesar de la presencia de fuentes termales en Aguas Zarcas, las cuales se asocian al campo geotérmico regional; así como la presencia de actividad sísmica vinculada más bien a la tectónica local.

Existe un alineamiento con sentido NNW entre los cráteres del volcán Platanar, Porvenir y un cono adventicio descrito en la geomorfología regional, lo cual encaja con la dirección aproximada de la falla Porvenir, por lo que se puede plantear la hipótesis que la construcción de estos edificios responde a una debilidad cortical.

Por otra parte, el volcán Porvenir (2 267 m s.n.m.) corresponde con un estratovolcán pequeño (15 km²) ubicado 3 km al sur del volcán Platanar; este se eleva 430 m sobre el terreno circundante y se encuentra 12 km al este de la carretera (Ruta Nacional No. 35). Ha sido objeto de pocos estudios, sin embargo se conoce su relación con la falla Congo, así como con las lagunas Congo y Pozo Verde.

Aunque es un volcán pequeño y poco mencionado en la geografía costarricense, se ubica en la misma línea de los estratovolcanes principales, es decir Porvenir, Poás, Barva e Irazú, mientras que los grandes volcanes Platanar y Turrialba, se ubican detrás de dicha línea eruptiva, conformando un segundo alineamiento de conos: Platanar, Congo, Cacho Negro y Turrialba (RSN, 2019c).

Morfológicamente, presenta una caldera con un borde erosionado hacia el este, un cono de poca elevación (30 m) con un cráter de 160 m de diámetro con una laguna en el centro (Alvarado, 2011). La traza de la falla Porvenir pasa por el borde oeste de la caldera, de donde surgen las coladas de

lava más recientes, las cuales llegan hasta la laguna de represamiento creada por la falla Congo, de sentido norte-sur. Tampoco se cuentan con registros de actividad volcánica reciente, histórica o prehistórica.

Determinación del peligro volcánico del complejo Platanar-Porvenir

Con respecto a la peligrosidad volcánica, se sabe que los volcanes dormidos son los más peligrosos, ya que no se cuenta con información para estimar la magnitud de su posible actividad. La estimación de periodos de reposo de volcanes basado en dataciones de ^{14}C y recopilaciones históricas, determinó que estos periodos varían en el orden de cientos a miles de años (Alvarado et al, 2007). Además, si no se cuentan con datos de tefroestratigrafía, para el edificio volcánico en cuestión no se pueden determinar la magnitud de las erupciones, así como los periodos de recurrencia medios. Para este caso se tomaron datos de magnitud (VEI) así como periodos de recurrencia promedio para los volcanes de la cordillera Volcánica Central, los cuales se extrapolaron a una posible erupción de los volcanes Platanar, Porvenir o un nuevo cono. Con esto y datos de humedad y dirección promedio de los vientos, se creó el mapa de peligro de caída de ceniza, lluvia ácida y lahares, ya que los otros peligros volcánicos (coladas de lavas y proyección balística), se restringen a una pequeña área alrededor de la cúspide del cono en actividad.

Estudios de los vientos en Costa Rica entre 1972 y 1987 muestran que la dirección predominante en la que soplan los vientos es hacia al oeste (corresponde a un viento del este -E-; ya que en meteorología se da la dirección de donde proviene el viento) para erupciones por encima de los 1800 m s.n.m entre mayo y octubre, mientras que para la época seca la dirección dependería de las oscilaciones bienales (Zárate, 1988). Esto explica la presencia de depósitos de caída orientados predominantemente hacia el oeste (viento E) u oeste-suroeste (ENE), como el caso del Arenal (Soto & Alvarado, 2006). Sin embargo, debido a los cambios en los patrones de viento, existe la posibilidad de movimiento de vientos del noreste (NE), noroeste (NW) y sureste (SE). Un estudio más amplio en la estación Ciudad Quesada-Coopelesca, realizado por Araya & Sanabria (2010) con datos climatológicos del IMN para el periodo 1987-1992, muestra una dirección del viento predominante desde el norte (N), sur (S) y noreste (NE), con velocidades entre 12 a 16 km/h. Finalmente, un estudio reciente del IMN (2016) en el aeropuerto Juan Santamaría, determina que el viento en el Valle Central, por lo general, presenta dos componentes bien establecidas: la componente este (E) propia de los vientos alisios y la del suroeste (SO), característica de la brisa marina; además, se presentan posibles direcciones transitorias del sureste (SE) y sur (S); y en ciertas ocasiones, se presenta la componente del noreste (NE).

En cuanto a la precipitación, se vio anteriormente que según la clasificación de las zonas de vida de Holdridge para Costa Rica (Holdridge, 1967), el área de estudio corresponde principalmente con bosque muy húmedo a húmedo con precipitaciones entre 2000 y más de 6000 mm de precipitación media anual. Esto favorece la formación de lluvia ácida al mezclarse la lluvia con los gases volcánicos emanados.

Para la determinación del VEI probable, se propone un escenario conservador con un valor de 2 y de tipo estromboliana a vulcaniana, con una pluma de 1 a 5 km de altura y un volumen aproximado de 1 000 000 m³, ya que según Paniagua & Soto (1988), desde 1934 han ocurrido cuatro erupciones de VEI 2 en el volcán Poás, seis en el Irazú y una en el Turrialba. Esto concuerda con la recopilación realizada por Alvarado et al. (2007), que muestra que para los volcanes activos de Costa Rica, las erupciones máximas oscilan entre valores de VEI de 3 a 5 y son de tipo vulcanianas a plinianas. Por otra parte, para erupciones plinianas en el Arenal se tiene un periodo de recurrencia de 750-1100 años (Alvarado et al., 2007), mientras que para los otros volcanes activos de la Cordillera Volcánica Central (Poás, Irazú y Turrialba) no se tienen datos de ciclos eruptivos a macro escala (cientos a miles de años) sino a meso y microescala (días, meses y años). Con datos del Global Volcanism Program del Smithsonian Institute (<http://volcano.si.edu/>) se calcularon promedios de periodicidad eruptiva de 300 a 2000 años para el Poás, 200 años para el Irazú y 500 años para el Turrialba (ver anexo 3); sin embargo, estos deben tomarse como un aproximado basado únicamente en la literatura. Finalmente, Stine & Banks (1991) indican que la falta de estudios geológicos impide determinar los estilos eruptivos y peligro volcánico del macizo Platanar-Porvenir; sin embargo, la presencia de suelos espesos y fuertemente alterados indica inactividad o muy largos periodos de reposo entre erupciones. Además, establecen que los peligros más importantes corresponden a lahares, avalanchas de detritos y caída de tefra.

6.1.2. Mapa de peligros volcánicos en el área de estudio

Con estos datos se determinaron las áreas de peligro para una erupción volcánica de tipo estromboliana a vulcaniana con un VEI de 2. Para la amenaza de proyección balística de materiales gruesos se usó un radio (interno) de 2 km para un valor de peligro muy alto (5) alrededor de los cráteres de los volcanes Platanar y Porvenir y un radio (externo) de 4 km para un valor de peligro moderado (3), siguiendo la guía de Paniagua & Soto (1988). Sin embargo, este último se pierde al determinar las áreas con peligro de caída de ceniza (ver figura 36).

Para la determinación de los elipses donde existe peligro de caída de ceniza, se determinaron valores propios siguiendo la metodología de Barrantes & Malavassi (2015) tomando como dirección predominante de los vientos (en este caso alisios) E (hacia el oeste) y NE (hacia el suroeste), según Araya & Sanabria (2010). Las elipses fueron dibujadas con semiejes mayores de 5 km para la zona de peligro alto (4), 10 km para la zona de peligro medio (3), 15 km para la zona de peligro bajo (2) y 20 km para la zona de peligro muy bajo (1), en dirección suroeste (azimut 225) y oeste (azimut 270).

De manera similar para la determinación de las áreas con susceptibilidad de acidificación y caída de lluvia ácida, se consideran las direcciones predominantes del viento próximas a la cima. Los efectos de los gases, ya sea su efecto propiamente dicho o la lluvia ácida que deriva de ellos, están ligados a su concentración, la cual decrece rápidamente a medida que se aleja de la fuente (Barrantes & Malavassi, 2015). Para el caso del Poás, se reconoce un callejón con dirección desde el cráter principal, el cual se restringe a una longitud de 3 km aunque se sabe en ocasiones esta

llegó más lejos (hasta 15 km) (Barrantes & Malavassi, 2015). Por lo tanto, para el caso de los volcanes Platanar y Porvenir se considera que las áreas con máximo peligro por emanación de gases se encuentran circunscritos dentro del radio de 2 km de muy alta peligrosidad (5) y las elipses con semiejes mayores de 5 km en la dirección preferencial de los vientos con peligro alto (4) (ver figura 36).

Finalmente, para la delimitación de las áreas susceptibles a formación de lahares en caso de una erupción de los volcanes Platanar o Porvenir, se propone una delimitación basada en criterios geomorfológicos, donde el área con peligro de lahares corresponde con los cauces de los ríos principales que nacen dentro del radio de 2 km alrededor del cráter (con algunas excepciones). Se toma el cauce del río como el área por donde transita el lahar y para su terminación, el lóbulo frontal se ubicó en partes del cauce del río con más de 50 m² con pendientes inferiores a 10 grados. Esto ya que debido a la resolución del MED no se puede determinar las áreas con pendientes menores a 1°, correspondiente al valor usado por Barrantes & Malavassi, (2015). Por otra parte, las áreas con peligro por formación de lahares, no se clasificaron con la escala usada anteriormente (tomada de Barrantes & Malavassi, 2015), sino que se clasificaron a parte como un solo grado de peligro, ya que no se cuenta con las herramientas para modelar diferentes escenarios.

El mapa resultante (ver figura 36) toma en cuenta los escenarios determinados en los párrafos anteriores para los volcanes Platanar y Porvenir, así como el mapa de peligros volcánicos para el volcán Poás propuesto por Barrantes & Malavassi (2015). Los mapas encontrados para el volcán Arenal no contemplan ningún escenario que alcance al área de estudio, por lo que no se tomaron en cuenta. Se observa que el área de estudio local está expuesto a un nivel de peligro bajo entre el inicio del proyecto y el río Santa Clara y moderado hasta el final del proyecto, en caso de erupciones de los volcanes Platanar o Porvenir, además existe peligro de llegada de lahares provenientes del volcán Porvenir en los la intersección con el cauce de los ríos la Vieja y Peje.

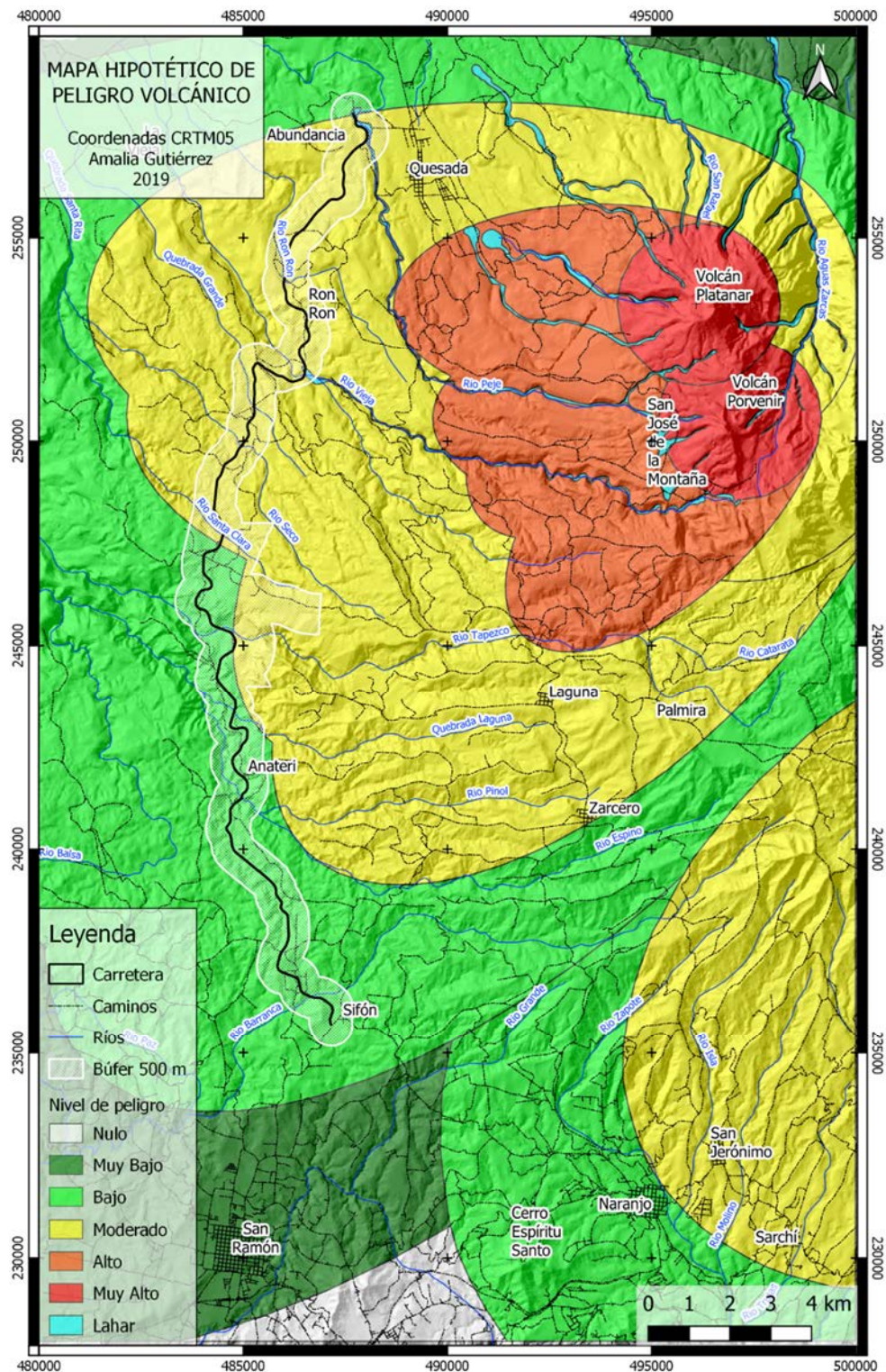


Figura 36: Mapa de peligros volcánicos en el área de estudio.

Están clasificados según su nivel de peligrosidad (nulo a muy alto). En celeste se observan las áreas con posibilidad de formación y tránsito de lahars. Nótese que la mayoría del área posee peligro volcánico únicamente en caso de reactivación de los conos Platanar, Porvenir o la formación de un nuevo cono volcánico.

6.2. Amenaza sísmica

Costa Rica se encuentra en una región tectónicamente compleja donde interactúan las placas Caribe, Coco, Nazca y la microplaca de Panamá, lo cual resulta en una sismicidad importante a lo largo de todo el territorio nacional. La fuente sísmica de mayor relevancia corresponde con la zona de subducción de la placa del Coco bajo la placa Caribe en la región del Pacífico, la cual presenta características sismogénicas (dirección, rugosidad, distancia de la trinchera a la costa y profundidad de la zona de Wadatti-Benioff) distintas en el norte, sur y la región central del país (Montero et al., 2001). Otras fuentes sísmicas importantes, son la zona de fractura de Panamá y el punto triple al sur del país, así como el Cinturón Deformado del Centro de Costa Rica (CDCCR) y el Cinturón Deformado del Norte de Panamá (CDNP) en la región Caribe.

Esto, junto con la gran cantidad de fallas corticales, resulta en una actividad sísmica importante y continua a lo largo del tiempo, con probabilidad de eventos con magnitudes de hasta 7,8 Mw (Climent et al., 2008). Por ejemplo en el año 2017 la Red Sismológica Nacional (RSN) localizó un total de 2261 sismos en territorio nacional, de los cuales 216 fueron sentidos y cuatro sismos tuvieron magnitudes entre 5,5 y 6,3 (Porrás et al., 2018). Por esta razón, es relevante el estudio de las condiciones de sismicidad profunda y somera en el área de estudio.

El proyecto RESIS II (Climent et al., 2008) define la amenaza sísmica como “la probabilidad de excedencia de un determinado nivel de movimiento del terreno, como resultado de la acción de terremotos en el área de influencia, durante un periodo de tiempo especificado”. Según esta definición, la amenaza es un concepto probabilista, en el que se debe especificar el nivel de movimiento del suelo considerado un peligro potencial y el periodo de tiempo durante el cual se espera que ocurra un sismo que produzca tal movimiento (Climent et al., 2008). Para caracterizar el movimiento, se consideran parámetros como la aceleración, la velocidad o desplazamiento con los valores máximos históricos o con valores espectrales. La amenaza (H) queda definida por el nivel de movimiento (Y) en un emplazamiento (E) en un tiempo determinado (t), según la relación:

$$H = P\left[y \geq Y; \text{en } t \text{ años, en el emplazamiento } E\right]$$

Los métodos de cálculo de la amenaza sísmica han evolucionado a lo largo del tiempo; empezaron con los métodos determinísticos en los años 60, pasando por los métodos probabilísticos en los años 70, los espectros de amenaza uniforme en los años 80, hasta la combinación de métodos probabilísticos y determinísticos en la metodología usada actualmente conocida como PSHA (Probabilistic Seismic Hazard Assessment en inglés) (Climent et al., 2008). Los métodos de análisis determinísticos se basan en la determinación de escenarios sísmicos que pueden afectar una región, con información de estudios neotectónicos y de sismicidad (Climent et al., 2006). Por su parte el análisis probabilístico busca determinar una tasa de ocurrencia y/o excedencia, además de que considera como elemento básico la frecuencia de ocurrencia de los eventos sísmicos y su relación con la tectónica, la definición de las fuentes sísmicas y las características de atenuación de las ondas

en la región. Además, asume que: la ocurrencia de eventos sigue el proceso de Poisson, que los eventos son independientes espacial y temporalmente, y que siguen la relación de Gutenberg-Richter (ver Climent et al., 2006).

Debido a la complejidad del proceso y la falta de insumos para determinar de manera formal la amenaza sísmica en la región de interés, se detallará en una primera parte el potencial sísmico de las fallas de mayor importancia dentro y cerca del área de estudio, con énfasis en las fallas activas; y en una segunda parte se rescatarán los resultados de algunos estudios de amenaza sísmica para la región de interés, incluyendo los resultados del proyecto RESIS II (Climent et al., 2008) y un estudio de amenaza sísmica para el Proyecto Hidroeléctrico (P.H.) Toro 3 (Climent et al., 2006).

6.2.1. Potencial sísmico de las fallas principales

Las fallas activas que se encuentran dentro del área de estudio incluyen las fallas Zarcero, Congo y Porvenir, mientras que las fallas que se encuentran fuera del área pero presentan un potencial de generación de sismos someros mayores a 5,0 Mw incluyen las fallas Javillos, Jamaical, Peñas Blancas, Danta, San Miguel, Carbonera, El Ángel y Alajueta (figura 37). Por último, las fallas activas inferidas, tomadas en cuenta para este trabajo, son las fallas El Viejo-Aguas Zarcas y Florencia-Palmira.

Adicionalmente, se proponen dentro del área de proyecto, con base en evidencias geomorfológicas e informes externos, la presencia de las fallas Anateri, Tapezco y La Vieja. Las fallas Tapezco y Anateri se proponen como fallas paralelas con rumbo NW que transcurren por los valles fluviales de sus ríos homónimos, posiblemente de tipo normal. La falla Tapezco se propone aquí como una falla normal, con un plano de falla buzando en dirección suroeste. Por otra parte, los estudios de Macías & Vargas (M&V, 2000) proponen que el plano de la falla Anateri buza 50° al sureste mientras que la falla La Vieja buza 85° al nor-noreste. Esta última falla se encuentra en el margen derecho del río del mismo nombre, y se propone aquí como un ramal asociado a la falla Zarcero. Estas se unen aproximadamente 1,5 kilómetros después de la intersección de ambas fallas con la carretera.

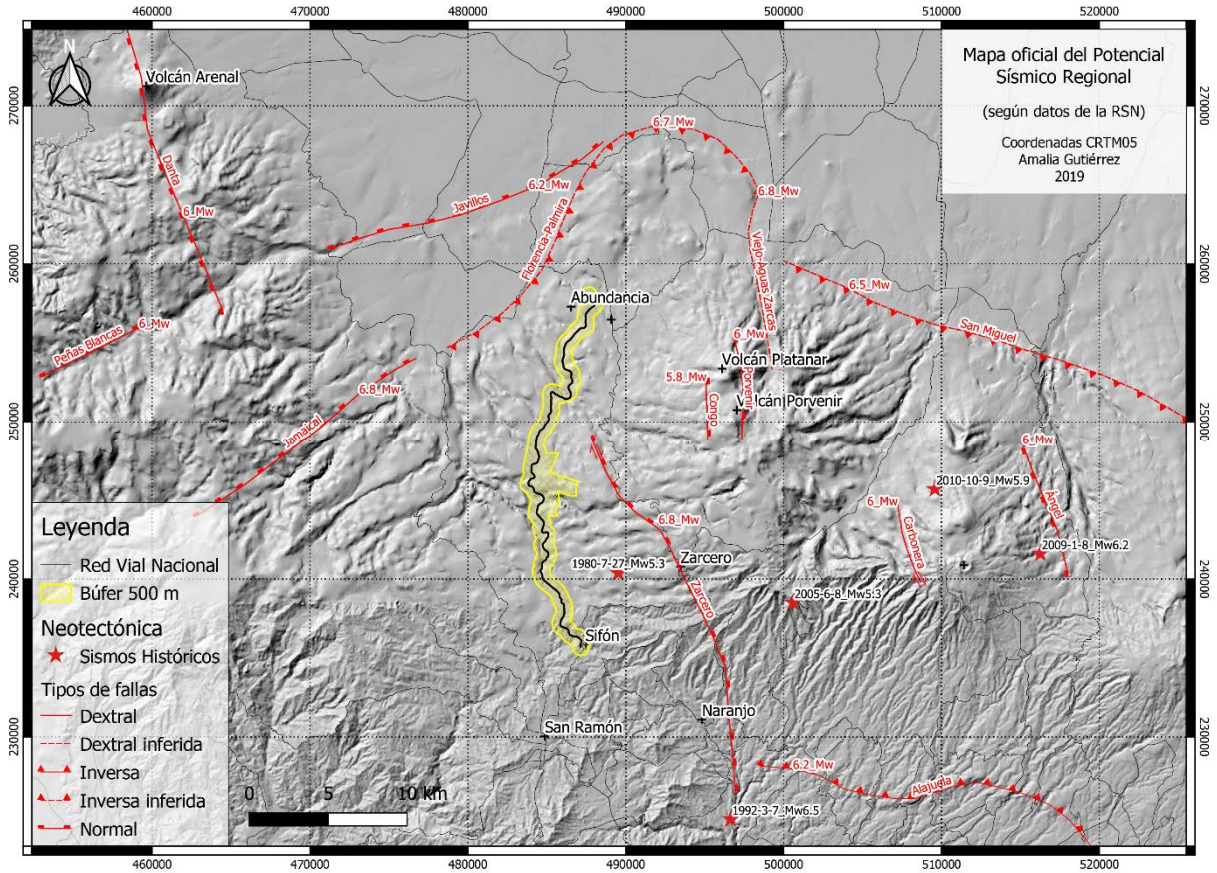


Figura 37: Mapa de potencial sísmico regional para fallas oficiales, según la RSN (2019d-o). Se observan la localización de las fallas (con la extensión comprobada oficialmente por la RSN) con nombre y potencial de generación, así como de los sismos históricos más importantes con su fecha (año-mes-día) y su magnitud.

Falla Zarcero: como se mencionó anteriormente, esta falla posee un rumbo oscilante N-NW, posee un movimiento normal con componente dextral y tiene una longitud aproximada de 25 km (Montero, 2001; Rojas-Araya, 2011 y Astorga, 2014). Está asociada a la formación de paleo-lagos en Zarcero y Laguna. Es catalogada como falla geológicamente activa por Rojas-Araya (2011) y se le asocian, con cierto grado de incertidumbre, al menos tres sismos ocurridos desde 1990 (Rojas-Araya, 2011 y Montero, 2001). Para una longitud de 15 km (extensión oficial comprobada) y usando las relaciones empíricas de Wells & Coppersmith (1994), se le asigna un potencial sísmico de magnitud Mw 6,8 (RSN, 2019d).

Falla Congo: posee un rumbo N-S, es de desplazamiento normal con un plano de falla que buza hacia el E y tiene una extensión aproximada de 5 km (Montero, 2001). Además, posee un escarpe juvenil con facetamiento rectangular de hasta 40 m de altura y en su contraescarpe se ha generado una laguna efímera por represamiento del drenaje (Alvarado et al., 1988). Es considerada una falla neotectónica por Montero et al., (1998) y tanto Rojas-Araya (2011), como Montero (2001) consideran que algunos eventos sísmicos de la zona puedan estar relacionados

con la actividad de esta falla. Finalmente, con base en una tasa de deslizamiento aproximado de 1-5 mm/año y una longitud de 5 km, aplicando las relaciones empíricas de Wells & Coppersmith (1994) la RSN (2019e) le asigna un potencial sísmico de hasta 5,8 a 5,9 Mw.

Falla Porvenir: corta el cráter del volcán Porvenir. Al igual que la falla Congo, posee un rumbo N-S, su desplazamiento es normal, con un plano de falla que buza hacia el E (Montero et al., 1998 & Denyer et al., 2009). Posee una longitud de 8 km, con escarpes juveniles de 4 a 5 m de altura, corta deslizamientos del Holoceno y posee desplazamientos de hasta 200 m en depósitos volcánicos del Cuaternario según Montero et al. (1998) y Alvarado et al. (1988); por lo que esta falla es considerada como neotectónica. Rojas-Araya (2011) considera la posibilidad de que algunos eventos sísmicos del macizo del Platanar-Porvenir puedan estar asociados a la actividad de esta falla. Finalmente, usando la tasa de deslizamiento de la Falla Congo y una longitud de 8 km, al aplicar las relaciones empíricas de Wells & Coppersmith (1994) se obtiene un potencial sísmico de hasta 6,0 Mw (RSN, 2019f).

Falla Viejo-Aguas Zarcas: forma un valle lineal con facetamiento triangular hacia el E, por el cual discurre un río del mismo nombre. La falla posee una longitud mínima de 25 km en dirección N09E (Montero et al., 1998). Montero et al. (2010) la consideran como una falla de alto ángulo, de desplazamiento de rumbo dextral. Alvarado et al. (1988) la consideran una falla en tijera, mientras que Montero et al. (1998) sugiere una componente normal. Es considerada una falla neotectónica por Montero et al. (1998) y Denyer et al. (2009); además, una serie de sismos entre 1911 y 1955 pueden asociarse potencialmente con la actividad de esta falla, según Alvarado et al. (1988) y Montero et al. (2010). Con base en su longitud y aplicando las relaciones empíricas de Wells & Coppersmith (1994), se puede estimar un potencial sísmico máximo de 6,8 Mw (RSN, 2019g).

Falla Florencia-Palmira: Separa las estribaciones del complejo volcánico del Platanar-Porvenir, de la llanura aluvial del norte. Posee una dirección cambiante entre NW, W, SW y S, y se extiende por 28 km (Denyer et al., 2009). Consiste en una serie de escarpes con orientaciones variables (N-S, E-W y SW), consideradas como fallas inversas inclinadas hacia el sur por Montero (2001), que describe dos niveles de escarpes: uno superior de 100 m de altura y uno inferior de 40 a 60 m de altura. Denyer et al. (2009) la consideran como neotectónica a pesar de no existir información de sismos relacionados con esta falla. Aplicando las relaciones empíricas de Wells & Coppersmith (1994), para una longitud de 28 km se puede estimar un potencial sísmico máximo de 6,7 Mw (RSN, 2019h).

Falla Javillos: Se extiende 18 km desde la Tigra hasta Platanar, según Denyer et al. (2009). Corresponde con una falla normal de rumbo E-NE y posee un escarpe con dirección NW (RSN, 2019i). Levanta un bloque geológico extenso (Alvarado, 2009) y está asociada a algunas fuentes termales. Rojas & Schmidt (2012) asocian a esta falla una microsismicidad ocurrida entre 1985 y 2005 y consideran un potencial sísmico de magnitud 6,2 Mw, con aceleraciones

máximas de $0,88 \text{ m/s}^2$ a pesar de no conocer los periodos de recurrencia de esta falla. Finalmente, Denyer et al. (2009) consideran esta falla como neotectónica.

Falla Jamaical: esta falla se extiende más de 32 km entre el final de la falla Florencia-Palmera y el poblado de Miramar (Villegas, 1997 y Denyer et al., 2009). Posee un rumbo aproximado entre $N50^\circ E$ y $N55^\circ E$ y un movimiento de tipo normal donde el bloque sureste se levanta con respecto al bloque noroeste (Denyer et al., 2009). Villegas (1997) asocia la traza de la falla a algunos lineamientos de rumbo noroeste. Denyer et al (2009) la clasifican como neotectónica y Rojas (2007, en RSN, 2019j) asocia hipotéticamente algunos sismos a la traza de la falla. Usando la longitud de 32 km y las relaciones empíricas de Wells & Coppersmith (1994), se le asigna un potencial sísmico de hasta 6,8 Mw (RSN, 2019j).

Falla Peñas-Blancas: Se extiende 12 km (Denyer et al., 2009) entre la cabecera del río Peñas Blancas hasta 3km al oeste del Cerro Pocosal. Corresponde con una falla normal con rumbo NE, presenta escarpes mirando al NW y su bloque E se encuentra levantado (Alvarado, 2009 y Rojas & Schmidt, 2012). Es considerada neotectónica por Denyer et al. (2009) y por su expresión se asume que posiblemente es una falla activa. Usando las relaciones de Wells & Coppersmith (1994), esta falla tiene el potencial de originar un sismo de magnitud alrededor de 6,0 Mw (RSN, 2019k).

Falla Danta: Corresponde con una falla con dirección N-S que se extiende por aproximadamente 10 km y atraviesa el cono del volcán Arenal (Montero et al., 1998 y Denyer et al., 2003). Mediciones realizadas directamente en el plano de falla indican que es una falla de tipo normal, con un plano de buzamiento de alto ángulo (Montero et al., 1998), presenta valles lineales y escarpes con un desplazamiento vertical mínimo de 1,2 m en las tefras del volcán Arenal. Los registros de la RSN contienen sismos potencialmente asociados a esta falla, mientras que el último movimiento registrado es del Holoceno. Además, dataciones radiométricas indican que es una falla activa (Montero et al., 1998). Se le asocia un potencial sísmico de 6,0 Mw (RSN, 2019l).

Falla San Miguel: La falla San Miguel posee 18 km de largo y separa la parte norte del macizo del volcán Poás y el Complejo de Bosque Alegre, del maar de Río Cuarto (Montero, 1998). Borgia et al. (1990), y Montero et al. (2010) la describen como una falla inversa con una orientación de $N70^\circ W$ y un plano inclinado hacia el S-SW. Las expresiones morfológicas de la falla incluyen un escarpe rectilíneo de más de 15 km de largo (Alvarado et al., 1998), cambios en los valles de los ríos y los patrones de drenaje, según Montero et al. (2010), quienes la consideran una falla potencialmente activa. No se tiene registro de eventos sísmicos importantes relacionados con esta falla (RSN, 2019m) y Montero et al. (2010) consideran según su longitud y las fallas cercanas que la falla San Miguel puede generar sismos superficiales con magnitud cercanos a 6,5 Mw.

Falla Carbonera: Corta el sector W del volcán Poás y posee una extensión mínima de 6,5 km según Alvarado et al. (1988) y Montero et al. (1998). Alvarado et al. (1988) la definen como una falla dextral con orientación NNW, mientras que Climent et al. (2006), Denyer et al. (2009), Montero et al. (2010) y Montero et al. (1998) indican que puede tener una posible componente normal. Morfológicamente, presenta una garganta de falla con escarpes y divisorias de aguas desplazadas (Alvarado et al., 1988 y Montero et al., 1998). Es considerada como neotectónica por Montero et al. (1998, 2010) y Denyer et al. (2009). Montero et al. (2010) indican que las fallas someras del macizo del volcán Poás pueden generar sismos de hasta 6,5 Mw, mientras que con base en su longitud y usando las relaciones de Wells & Coopersmith (1994), la RSN (2019n) estima que la falla Carbonera específicamente puede generar sismos de hasta 6,0 Mw.

Falla el Ángel: Corta la parte E del macizo del volcán Poás y el flanco W del volcán Barva, entre el Cerro Congo y el poblado de Birrí. Fue redefinida por Montero et al. (2010) como una falla segmentada con rumbos N50W a N-S, de más de 20 km de largo. En su parte sur se junta con la falla Sabanilla, que posee un rumbo SE. Corresponde con una falla de desplazamiento dextral con componente normal en algunos sectores con un alto ángulo de inclinación (Montero et al., 2010). Entre las expresiones geomorfológicas resaltan ríos desviados, contra-escarpes facetados al oeste, valles lineales, lagunas y sillas de falla, así como paleo-deslizamientos, lagos y descansos topográficos (Montero et al., 2010). Corresponde con una falla activa con sismos históricos en 1772, 1982, 1988, 2005 (Alvarado et al., 1988; Climent et al., 2006 y Montero et al., 2010), además del terremoto de Cinchona del 8 de enero del 2009. Este sismo tuvo una magnitud de 6,2 Mw con una profundidad de 4,6 km, una intensidad máxima de IX (IMM) en el área mesosísmica y aceleraciones máximas cercanas a 1 g (Barquero et al., 2009). Al igual que la falla Carbonera, la falla Ángel puede generar sismos de hasta 6,5 Mw según Montero et al. (2010), mientras que con base en su longitud y usando las relaciones empíricas de Wells & Coopersmith (1994), se estima un potencial sísmico de hasta 6,0 Mw (RSN, 2019o).

Falla de Alajuela: Se extiende por más de 10 km al norte de la ciudad de Alajuela, entre Grecia y Santa Bárbara de Heredia (Denyer et al., 2003 y Montero et al., 2010). Corresponde con una falla inversa de bajo ángulo con un escarpe facetado hacia el sur, el cual es pronunciado y con 150 a 200 m de altura. Se asocian dos sismos destructivos a esta falla: el terremoto de Barba del 15 de febrero de 1772 (Peraldo & Montero, 1994) y el de Fraijanes del 30 de diciembre de 1888 (Alvarado et al., 1988), así como otros sismos de menor magnitud. Se clasifica como una falla activa (Montero et al., 2010) y se estima un potencial sísmico de hasta 6,2 Mw (Rojas et al., 2004).

Adicionalmente se tiene información de algunos enjambres sísmicos en el área de estudio. El primero de estos en el volcán Platanar (Rojas et al., 2009) con sismos alineados en sentido N-S, profundidades entre 1 y 10 km e intensidades entre I y II (IMM), y una solución de mecanismo focal con rumbo N08W movimiento sinistral (Alvarado et al., 1988). En 1986 se dio un enjambre en Venecia de San Carlos, con sismos de baja magnitud durante dos semanas en un área de 3 km

de radio (Rojas et al., 2009). Finalmente, en abril y mayo de 1998 en la zona del Volcán Viejo se tienen datos de sismos de magnitud moderada registrados por la RSN (Rojas et al., 2009), hipotéticamente asociados con la falla Viejo-Aguas Zarcas

6.2.2. Catálogo sísmico regional

Inicialmente se trabajó con el catálogo sísmico total de la RSN (<https://rsn.ucr.ac.cr/rsn/doi>), con el fin de observar de manera general la sismicidad del área. Sin embargo al contener sismos tanto someros como profundos (figura 38), se realizó un primer filtro para obtener únicamente los sismos superficiales (< 25 km), con el fin de correlacionarlos con el mapa tectónico regional. De esto se desprende el mapa epicentral del catálogo sísmico, en el cual se observa una correlación entre la localización epicentral de ciertos sismos y las fallas propuestas en el mapa.

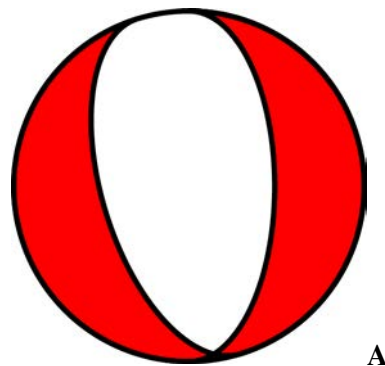
Para la obtención del catálogo sísmico regional de sismos corticales (< 20 km de profundidad) de mayor calidad y certeza, se consultó la base de datos de la Red Sismológica Nacional, y se seleccionaron los sismos con las siguientes características:

- Ventana temporal: 01.01.1991 a 31.01.2019 (sistema de localización digital).
- Estaciones: mínimo 8.
- Latitud: entre 10.067 y 10.358.
- Longitud: entre -84.514 y -84.358.
- RMS: máximo 1.
- Profundidad: máximo 20 km.
- Gap (ángulo máximo en grados entre estaciones que registran un sismo): 200.

Con esto se obtuvo un catálogo inicial de 28 sismos (ver anexo 4), con magnitudes entre 2,4 y 3,8 Mw y profundidades inferiores a los 10 km, los cuales fueron relocalizados manualmente. De estos únicamente 3 contaban con una cantidad suficiente de lecturas de polaridad de la onda “P” para obtener un mecanismo focal; sin embargo, uno no dio resultados satisfactorios, por lo que únicamente se obtuvieron dos mecanismos focales, los cuales se muestran a continuación (figura 39).

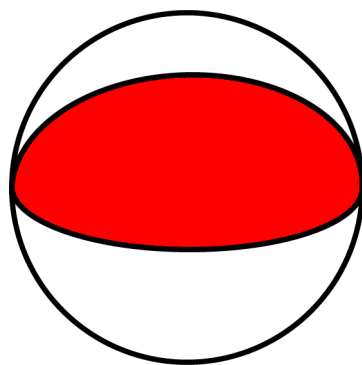
Las soluciones de mecanismos focales muestran un movimiento normal con rumbo norte-sur para el evento del 4 de agosto del 2014, el cual se encuentra al norte de la falla Congo. Al concordar con el rumbo y tipo de fallamiento, así como uno de los planos de buzamiento (al este) se puede afirmar que el sismo probablemente fue generado sobre la falla, la cual se extiende al norte por debajo de los depósitos del volcán Platanar. De igual manera, la solución del mecanismo focal para el evento del 12 de noviembre del 2016, corresponde a un movimiento de fallamiento inverso, con rumbo este-oeste, posiblemente asociado a la falla que transcurre por el valle de la quebrada Lajas. En caso de comprobarse dicha relación, el plano de buzamiento de la falla sería hacia el norte. .

Fecha	Hora	Latitud	Longitud
2013-08-04	7:53	10.289	-84.375
Profundidad	RMS	Magnitud	Gap
2 km	0.4	4.1	102
# fases	23	# polaridades	11
Solución			
strike	dip	rake	
7	45	-72	



A

Fecha	Hora	Latitud	Longitud
2016-11-12	11:07	10.246	-84.405
Profundidad	RMS	Magnitud	Gap
7.3 km	0.3	3.1	48
# fases	56	# polaridades	27
Solución			
strike	dip	rake	
268	32	88	



B

Figura 39: Resultados de los mecanismos focales para los sismos del 4 de Agosto del 2014 (A) y 12 de Noviembre del 2016 (B) con los datos del evento, la localización y la solución escogida.

Adicionalmente, del mapa de los sismos relocalizados (figura 40) se observa una predominancia de los sismos entre las fallas Zarcero y La Vieja, así como entre los volcanes Platanar y Porvenir, por lo que se puede interpretar que estas dos zonas son las más activas en la actualidad. Sin embargo, también se observan eventos sobre el borde de la caldera de Palmira, sobre la traza de la falla Zarcero, al oeste de Zarcero, posiblemente asociados a la continuación de la falla Anateri, y sobre la traza de la falla Florencia Palmira. En el área de estudio local, correspondiente al búfer de 500 m a ambos lados de la carretera, se encuentra un evento cerca del cruce hacia el Alto Villegas (kilómetro 12+300) y cerca del río Seco (kilómetro 27+700) posiblemente asociado a la traza de la falla hipotética propuesta a lo largo del valle de dicho río.

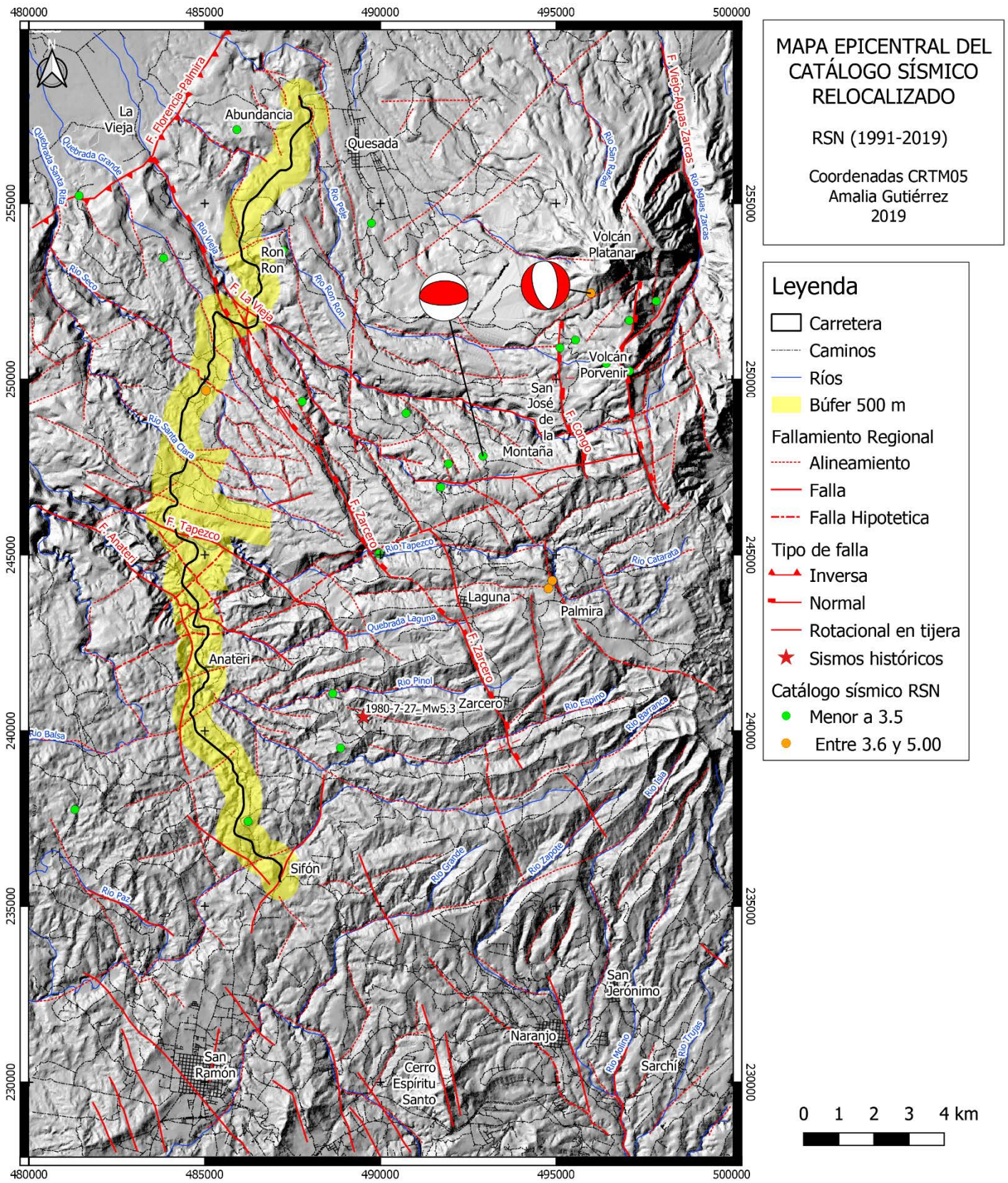


Figura 40: Mapa epicentral del catálogo de sismos de la RSN (1991-2019) con sismos someros y dos mecanismos focales.

6.2.3. Estudios de amenaza sísmica regional

Entre los estudios de amenaza sísmica regional tomados en cuenta para este trabajo se encuentra el Proyecto RESIS II, el cual corresponde con una segunda fase de un proyecto respaldado por la agencia de cooperación de Noruega (NORAD) y el Centro de Coordinación para la Reducción de Desastres en América Central (CEPREDENAC), con la participación de sismólogos de los países de Centroamérica, el cual busca evaluar la amenaza sísmica en América Central (Benito et al., 2012). En esta fase se obtuvieron nuevos mapas de amenaza sísmica para las capitales de 6 países centroamericanos y, en el caso de Costa Rica, este estudio estuvo a cargo de Climent et al. (2008). El modelo usado es el de Probabilistic Seismic Hazard Assessment (PSHA), desarrollado en una fase anterior del proyecto, el cual usa un banco de datos regionales y una zonificación específica para cada país. Los datos de entrada corresponden al catálogo sísmico, la definición de las zonas sismogénicas y la selección de leyes de atenuación o modelos de movimiento fuerte (Climent et al., 2008).

Para este trabajo, las zonas de interés corresponden a la zona cortical: Cordillera Volcánica Central y Valle Central (área C6), la cual incluye la zona de estudio y las fallas circundantes (Florencia-Palmera, San Miguel, Zarcero, Gata, Carbonera, entre otras). Los autores establecen que en esta zona ocurrieron los terremotos destructivos de Toro Amarillo de agosto de 1911 (Ms 6,0), de julio de 1912 (Ms 6,5) y de setiembre de 1955 (Ms 5,8). También se deben tomar en cuenta los resultados para la zona sísmica relacionada con la subducción intraplaca Central (Csp 15), la cual se caracteriza por sismos con profundidades de hasta 125 km, con un ángulo de subducción de 50° al NE, entre 50 y 150 km de profundidad. En esta zonas el sismo histórico conocido para esta fuente es el de febrero de 1916 de magnitud 7,3 Ms; por lo que en esta zona se pueden esperar eventos del orden de 7,5 Mw (Climent et al., 2008).

Entre los resultados obtenidos por el proyecto RESIS II para Costa Rica, es de interés el mapa de amenaza sísmica en términos de PGA para un periodo de retorno de 500 años (figura 41) en el cual se observa que la mayoría de la zona de estudio presenta altos valores de PGA entre 451 y 601 gal (Climent et al., 2008). Estos valores máximos se encuentran alineados con las cadenas volcánicas, mientras que en otros estudios (GSHAP y Tanner & Shedlock, 2004; ver Climent et al., 2008) los valores máximos se asocian a sismos en la zona límite de placas, cerca de las costas. El estudio concluye que “la mayoría de la infraestructura en Costa Rica se ubica en zonas sísmicamente activas, amenazada no solo por las fuentes sísmicas corticales, sino también por eventos de subducción” (Climent et al., 2008). Esto es importante ya que indica que, a pesar de tratarse de un proyecto lineal con poca infraestructura pesada y/o de gran altura susceptible a dañarse fácilmente, el proyecto de la Ruta Nacional No. 35 no está exento de sufrir y padecer los efectos de un sismo destructivo. Adicionalmente, Climent et al. (2008) mencionan que en esta zona se prevén intensidades mayores a VII (IMM) y en algunos casos de hasta X, por lo que esto debe

contemplarse no solo en la construcción de la carretera sino también para el ordenamiento del territorio y el desarrollo del país.

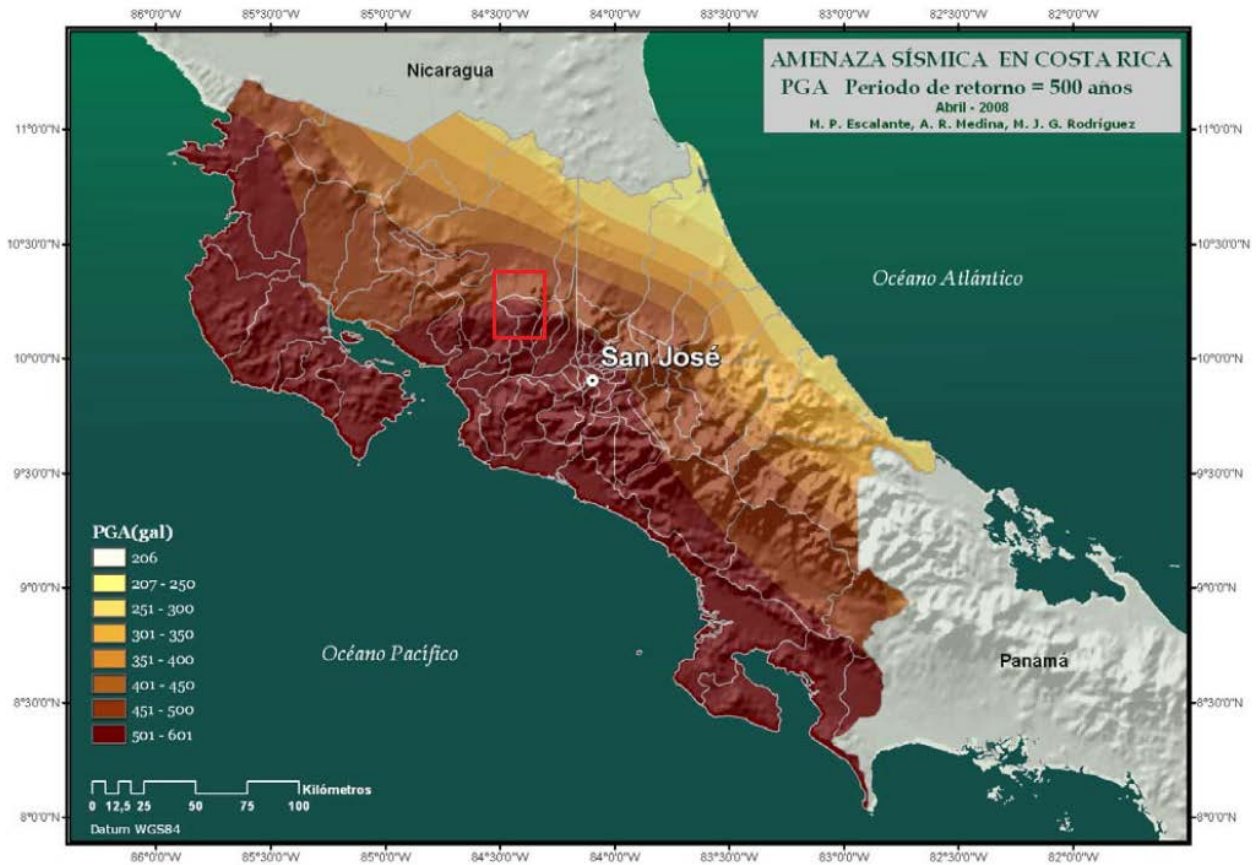


Figura 41: Mapa de Amenaza sísmica para Costa Rica en términos de PGA para un periodo de retorno de 500 años. El área de estudio se encuentra delimitada por el cuadro rojo. (Modificado de: Climent et al., 2008)

Por otro lado se tomaron en cuenta los resultados del estudio de amenaza sísmica para el Proyecto Hidroeléctrico (P.H.) Toro 3, el cual fue construido por el ICE, realizado por Climent et al. (2006). Debido a la fecha del estudio, este no contempla los efectos del terremoto de Cinchona del 8 de Enero del 2009, los cuales se detallarán más adelante. El P.H. Toro 3 se ubica en el valle del río Toro, el cual separa la parte NW del macizo del volcán Poás con el macizo del volcán Viejo; localizado al este del área de estudio.

De acuerdo con las revisiones históricas para los siglos XIX y XX realizadas por Climent et al. (2006), la zona del P.H. Toro 3 ha sido afectada por cinco sismos destructivos con magnitudes entre 5,0 y 6,5 M. Tres de ellos son conocidos como los sismos de Bajos del Toro (1911, 1912 y 1955), asociados a la fallas Carbonera y Volcán Viejo-Aguas Zarcas, mientras que los otros dos son los terremotos de Fraijanes (1851 y 1888), posiblemente asociados a la falla Ángel-Vara Blanca (Climent et al., 2006 y Alvarado et al., 1988). Además, en el 2005 se registraron una serie

de sismos en el extremo sur de la Falla Ángel-Vara Blanca (Climent et al., 2006), donde luego se originó el terremoto de Cinchona en el año 2009.

Para la determinación de la amenaza sísmica, los autores utilizaron tanto la metodología probabilística como la determinística, las cuales corresponden a la base de las teorías para la estimación de la amenaza sísmica y aportan información para obtener un panorama más claro de las amenazas en el área del proyecto (Climent et al., 2006).

El análisis determinístico de Climent et al. (2006) usa los escenarios sísmicos para las fuentes principales que son la falla San Miguel, la falla Volcán Viejo-Aguas Zarcas y la falla Ángel Vara Blanca. Los autores determinan el potencial de generación máximo y el período de recurrencia para estas fuentes. Con esto se proponen tres escenarios sísmicos, para los cuales se calculan las aceleraciones horizontales pico del terreno (sacudida sísmica) con la ecuación de Climent et al., (1994). Se determinó una alta probabilidad de excedencia de una aceleración horizontal pico (PGA en inglés) de 0,28 g en el proyecto y un Sismo Máximo Creíble con PGA de 0,51 g ocasionado por un sismo hipotético de magnitud 7,5 Mw en la falla San Miguel.

Como se mencionó anteriormente, el análisis probabilístico toma en cuenta la frecuencia de ocurrencia de los sismos, su relación con la tectónica, la definición de las fuentes sísmicas y las relaciones de atenuación en la zona de interés. En el estudio de Climent et al. (2006) se tomaron en cuenta únicamente las fuentes sísmicas regionales definidas por Climent et al. (2002); la zonificación usada divide las fuentes en superficiales y de subducción profunda y se asignó la sismicidad asociada a cada fuente. Con esto se calcularon índices, se uniformizó y filtró el catálogo sísmico y se calculó la atenuación con la ecuación de Climent et al., (1994). Finalmente, se calculó la amenaza sísmica probabilística en función del PGA para tres sitios del proyecto para periodos de retorno entre 100 y 10 000 años. Los resultados indican un sismo de Operación Base con PGA de 0,28 g para un periodo de retorno de 150 a 200 años y un Sismo Máximo Creíble con PGA entre 0,53 y 0,59 g, correspondientes a periodos de retorno de 3000 y 5000 años, respectivamente (Climent et al., 2006).

Cabe mencionar que los autores indican una alta probabilidad de la ocurrencia de un sismo con magnitudes entre 5,1 y 6 en las fallas Volcán Viejo-Aguas Zarcas y Ángel-Vara Blanca, debido a que el periodo de recurrencia ($34,5 \pm 10,3$ años) ya se había cumplido (Climent et al., 2006). Esto concuerda relativamente bien con el terremoto de Cinchona que ocurrió en el 2009, con una magnitud de 6,2 y una profundidad de 4,6 km.

Recopilaciones históricas realizadas por Montero et al. (2010) muestran que en la cordillera volcánica central y la mayor parte del área de estudio, las intensidades máximas (Mercalli Modificada) son de VII a VIII, lo cual corresponde con daños en estructuras frágiles y deslizamientos. Excepcionalmente se pueden esperar intensidades de IX, como las registradas para el terremoto de Cinchona (Barquero, 2009), que corresponden a grandes daños en edificios importantes con derrumbes parciales.

6.3. Amenaza hidrometeorológica

Los fenómenos hidrometeorológicos son procesos de origen atmosférico, oceanográfico e hidrológico, los cuales producen eventos tales como ciclones tropicales, lluvias extremas, inundaciones pluviales, fluviales, costeras y lacustres; tormentas de nieve, granizo, polvo y electricidad; heladas, sequías, ondas cálidas y gélidas, y tornados (UNGRD, 2018; Ley General de Protección Civil de México, 2012). En Costa Rica, las amenazas asociadas a estos fenómenos son primordialmente inundaciones, sequías e indirectamente deslizamientos provocados por lluvias intensas.

El istmo centroamericano, por su localización geográfica con respecto a las masas de agua, está controlado principalmente por sistemas sinópticos como lo son la zona de alta presión subtropical del Atlántico Norte, la migración de la Zona de Convergencia Intertropical (ZCIT), la intrusión de frentes fríos o polares y la migración de perturbaciones tropicales (ondas, depresiones, tormentas y huracanes) (Alfaro & Pérez-Briceño, 2014). Según Retana (2012), los eventos hidrometeorológicos extremos que provocan mayores impactos por exceso de lluvias en Costa Rica son los huracanes provenientes del Caribe; mientras que la Zona Norte es más frecuentemente afectada por los frentes fríos, aunque estos no corresponden a los eventos individuales con mayor aporte de lluvia. Algunos de los eventos más importantes que han acontecido con impactos directos en la Región Norte son: la Tormenta Tropical Irene (1971), el Huracán Fifi (1974), el Huracán Mitch (1998), algunas ondas y depresiones tropicales, la Tormenta Tropical Nicole (2010), la Tormenta Tropical Nate (2017) y el huracán Otto (2016).

Por otra parte, Costa Rica está sujeto a los efectos de El Niño Oscilación del Sur (ENOS), el cual es un fenómeno cíclico y aperiódico producido por el acople de anomalías térmicas (enfriamiento o calentamiento) entre el Océano Pacífico y la atmósfera circundante. La fase cálida -calentamiento del océano- se denomina El Niño y la fase inversa -enfriamiento-, La Niña. En Costa Rica, el fenómeno de El Niño suele provocar un aumento en las temperaturas, lo cual origina sequías en la vertiente Pacífica e inundaciones en la vertiente Caribe (IMN, S.F.).

Una inundación se puede definir como “la sumersión temporal de terrenos normalmente secos, como consecuencia de la aportación inusual y más o menos repentina de una cantidad de agua superior a la que es habitual en una zona determinada” (MIR, 1995) o “el desbordamiento del agua fuera de los confines normales de un río o cualquier masa de agua y/o la acumulación de agua procedente de drenajes en zonas que normalmente no se encuentran anegadas” (OMM N°385, 2012), según lo recopilado por el IDEAM (2017). Debido a la rapidez y la magnitud de los daños ocasionados por inundaciones (Rodríguez-Gaviria, 2012), así como las consecuencias económicas que éstas tienen para el país (Alfaro & Pérez-Briceño, 2014), se tratará en este apartado la susceptibilidad a la amenaza de inundación en el área de estudio. De manera general, las inundaciones suelen ser más frecuentes en las zonas tropicales debido a la predominancia de un clima lluvioso, así como de eventos hidrometeorológicos extremos.

Las inundaciones se pueden clasificar según diferentes características, ya que por ejemplo la magnitud de una inundación provocada por procesos de origen hidrometeorológico, depende de la intensidad de las lluvias, de su distribución en el espacio y tiempo, del tamaño de las cuencas hidrológicas afectadas, de las características del suelo y del drenaje natural o artificial de las cuencas y/o cauces (UNGRD, 2018). Entre las clasificaciones más sencillas se pueden separar las inundaciones lentas y las crecientes súbitas o inundaciones rápidas (UNGRD, 2018). Por otra parte, según el IDEAM (2017) y el Instituto Geológico y Minero de España (2008), existen tres tipos de inundaciones: naturales, inducidas y antrópicas, donde las naturales se dividen a su vez en terrestres y litorales. Las inundaciones terrestres se deben al desbordamiento de cauces fluviales o el encharcamiento de zonas planas, sin necesidad de estar vinculado a la red fluvial, mientras que las inundaciones costeras pueden relacionarse con aumentos del nivel del agua durante eventos como marejadas, tormentas, fenómenos ciclónicos o incluso tsunamis.

Entre los principales mecanismos de inundación se pueden citar: marejadas, tsunamis, liberación súbita de grandes masas de agua (provenientes de embalses u otros reservorios), pluviales, fluviales (hidrológicos y geomorfológicos), seiches, represamientos no intencionales de agua, rompimiento de obras de protección, terremotos, erupciones volcánicas y desprendimiento de masas glaciares (Botero, 2011). Algunas de las variables con las que se pueden caracterizar un evento son: el tiempo de arribo, la duración del evento, la extensión espacial del evento, el tipo de flujo y la velocidad de éste (Botero et al., 2016).

Existen una gran cantidad de métodos para estimar o calcular la susceptibilidad y/o amenaza de inundación en un área determinada, los cuales dependen principalmente de la escala de estudio y los datos y/o herramientas al alcance del investigador. Rodríguez-Gaviria (2012) realiza una recopilación de los estudios realizados a nivel internacional y colombiano y los divide en: geológicos-geomorfológicos, históricos-geomorfológicos, paleo-hídricos, histórico e histórico-estadísticos, así como hidrológicos e hidráulicos, los cuales requieren de datos y modelaciones numéricas para su obtención.

Por otro lado, se consultaron las guías y metodologías propuestas en cuatro proyectos realizado por la Universidad Nacional de Colombia, Sede Medellín, para el Instituto de Hidrología, Meteorología y Estudios Ambientales de Colombia (IDEAM).

6.3.1. Inundaciones fluviales: inventario histórico

En primera instancia se tomaron los mapas de amenazas naturales potenciales de los cantones de Alfaro Ruíz, Naranjo, San Ramón y San Carlos, disponibles en la página de la Comisión Nacional de Emergencias de Costa Rica (<https://www.cne.go.cr/index.php/prevencie-desastres-menuprincipal-93/mapas-de-amenazas>), los cuales se encuentran en una escala 1:50 000 o menor para todos los cantones del país. De estos mapas se extrajo la información de zonas con amenaza potencial de inundación a escala regional, la cual fue mejorada con el MED y el mapa de pendientes, para delimitar de forma más precisa las zonas planas ($< 5^\circ$) con potencial de

inundación. En segunda instancia se mapearon las planicies de inundación (zonas a ambos lados del río con pendientes inferiores a los 3°) de los ríos principales (escala 1:50 000 del Atlas 2014). En la zona noroeste del área de estudio, donde empiezan las planicies de San Carlos, la susceptibilidad por amenaza de inundación aumenta significativamente al tratarse de una zona plana (< 3°).

Posteriormente se extrajeron todos los registros de inundación para los cantones de Naranjo, Palmares, San Carlos, San Ramón, Valverde Vega y Zarceró (Alfaro Ruiz), en los distritos cubiertos por el área de estudio; estos datos fueron tomados del inventario de desastres DesInventar (<https://www.desinventar.org/>) entre 1968 y 2018, para los eventos de tipo inundación (376), avenida torrencial (7) y lluvias (34). Sin embargo, el evento tipo lluvia se refiere principalmente a daños materiales ocasionados por la caída de lluvia, por lo que no fue tomado en cuenta para este trabajo. Para los registros de inundación y avenida torrencial, estos fueron localizados de forma manual, cuando la descripción lo permitía, ya que los datos no cuentan con coordenadas geográficas. Otras zonas con susceptibilidad a inundación fueron delimitadas con base en los datos de DesInventar, el MED, los mapas de pendiente (total y áreas planas) y los mapas de curvatura de perfil y tangencial. Algunos sitios urbanos con inundaciones puntuales asociadas a un mal manejo de las obras hidráulicas no fueron tomados en cuenta para esta delimitación. Las zonas se dividen en zonas con susceptibilidad a inundación asociada a procesos fluviales y asentamientos urbanos, con grados de susceptibilidad bajo, medio y alto. Estos datos fueron usados posteriormente para corroborar los resultados del apartado siguiente.

6.3.2. Susceptibilidad a la inundación con base en datos geoespaciales

Das (2019) presenta un análisis innovador con el cual obtiene un modelo de susceptibilidad a la inundación en la cuenca de río Ulhas. Este es obtenido a través de un Proceso de Jerarquía Analítica (PJA) y calcula la respuesta hidro-geomorfológica a la inundación, al implementar en primera instancia un análisis geoespacial y luego un modelamiento de Unidad de Energía de la Corriente Fluvial (Unit Stream Power Modelling en inglés). Para efectos de este trabajo es de interés la metodología basada en el análisis geoespacial para calcular la susceptibilidad a las inundaciones en el área de estudio, ya que no se cuenta con datos de caudales para el modelado de la “energía de corriente”. El mapa de susceptibilidad se construye con base en doce parámetros de influencia, la mayoría de ellos derivados de datos geoespaciales, los cuales son: la elevación, pendiente, distancia de la red de drenaje, geomorfología, densidad de drenaje, acumulación de flujo, precipitación diaria, uso del suelo, geología, índice de energía de la corriente (SPI), índice de humedad topográfico (TWI) y curvatura. Al contar con la mayoría de los datos necesarios para la implementación de este método, éste fue aplicado en el área de estudio, con algunas modificaciones descritas a continuación.

Los datos geoespaciales usados fueron derivados de un MED, el cual fue calculado en el programa ILWIS 3.3 a partir de las curvas de nivel escala 1:50 000 con elevaciones cada 20 m. El

procesamiento fue realizado principalmente en QGIS, usando herramientas de GRASS y SAGA, así como el software ILWIS en algunas ocasiones. En este caso ya se contaban con mapas geomorfológicos y geológicos regionales, los cuales fueron generalizados para el propósito de susceptibilidad a la inundación. Los datos de uso del suelo fueron tomados de la base de CENIGA (Centro de Información Geográfica del MINAE) para el 2013, combinados en un solo archivo. Finalmente, los datos de precipitación diaria fueron estimados a partir de los datos de precipitación mensual para 7 estaciones del IMN.

El área de estudio cubre parte de 3 sub-cuencas principales: más de la mitad el área al norte corresponde con la cuenca del río San Carlos de la vertiente Caribe, al sur se divide en las cuencas del río Barranca y Grande de Tárcoles, ambos de la vertiente Pacífica. Con la excepción de los parámetros de acumulación de flujo, SPI y TWI, los parámetros son independientes de la extensión de las cuencas, por lo que el mapa de susceptibilidad a inundación fue calculado para la totalidad del área.

a) Elevación

Los valores de elevación corresponden con un factor determinante en la susceptibilidad de inundación, ya que el agua tiende a moverse de sitios con mayor elevación a sitios con menor elevación (Das, 2019). En este caso, los valores de elevación son representados en el MED calculado anteriormente (figura 42.A), el cual cuenta con curvas de nivel cada 20 m y los valores se extienden entre 180 m s.n.m. en las llanuras de San Carlos y 2320 m s.n.m. en la Caldera de Palmira. La clasificación se realizó con base en la distribución de los datos, usando la herramienta *r.reclass* de GRASS GIS, con un mayor peso para valores de elevación bajos (≥ 400) y un menor peso a valores de elevación más altos (ver tabla 5).

b) Pendiente

Los valores de pendiente (figura 42.B) fueron calculados en QGIS con base en el MED del área, al ejecutar el algoritmo “slope” de GDAL en la caja de herramientas, posterior al relleno de depresiones con la herramienta “fill sinks (Wang & Liu) de SAGA. Según Das (2019) la pendiente de un sitio juega un papel fundamental al regular la descarga superficial, en el modelamiento hidrológico. Existe una correlación positiva importante entre la pendiente y la velocidad del flujo superficial. Además, el gradiente controla de manera parcial el proceso de infiltración, al existir una correlación negativa entre el porcentaje de infiltración con respecto a escorrentía superficial y el gradiente (Das, 2019). Esto tiene como resultado que las regiones con una disminución brusca de pendiente sean más susceptibles a la inundación. La clasificación de la pendiente fue realizada con la misma herramienta *r.reclass* y se atribuyó un mayor peso a zonas con bajas pendientes (ver tabla 5).

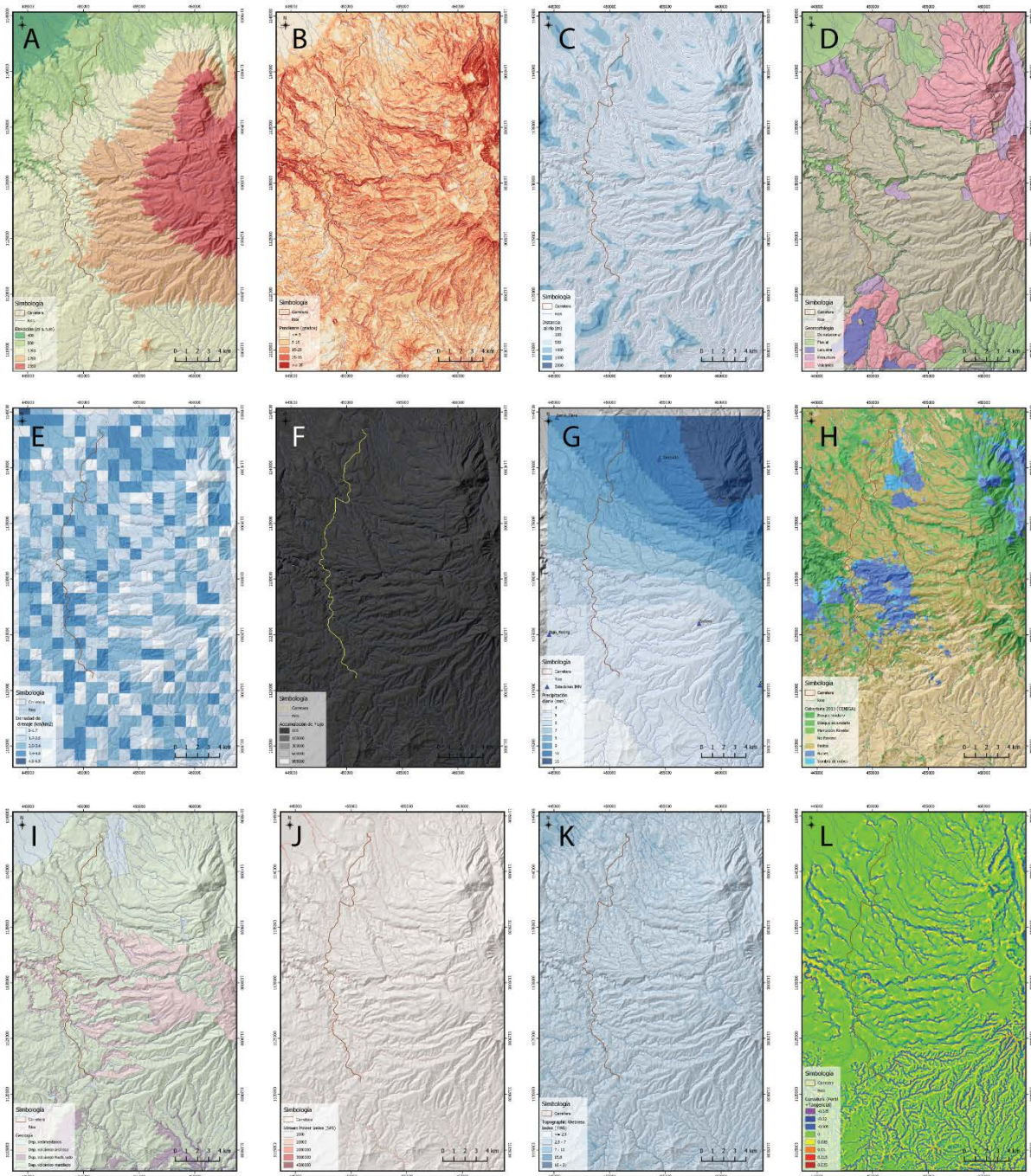


Figura 42: Mapas de los componentes que controlan la susceptibilidad a la inundación.

Los mapas son de: (A) elevación, (B) pendiente, (C) distancia al río, (D) geomorfología, (E) densidad de drenaje, (F) acumulación de flujo, (G) precipitación diaria, (H) uso del suelo, (I) geología, (J) SPI, (K) TWI y (L) curvatura. (ver mapas completos en Anexo 6).

c) Distancia al río

Durante una inundación, la distancia con respecto a los drenajes (figura 42.C) determina la expansión de la inundación, con una mayor susceptibilidad a la inundación para zonas cercanas al río (Das, 2019). El radio entre el drenaje y el área con mayor susceptibilidad a la inundación varía con el criterio de distintos expertos, y adicionalmente depende de las características del drenaje y la topografía circundante. Para este caso se trabajó con valores de 100 m, 0,5, 1, 1,5 y 2 km y se delimitaron las áreas con el complemento “Multidistance Búfer” en QGIS. Posteriormente, se reclasificaron las áreas con la herramienta v.to.rast de GRASS, según lo descrito en la tabla 5.

d) Geomorfología

Las unidades geomorfológicas descritas pueden jugar un papel determinante en la susceptibilidad a la inundación de un área; las planicies fluviales son altamente propensas a inundaciones, mientras que para las áreas montañosas y muy empinadas, la susceptibilidad disminuye considerablemente (Das, 2019). En este caso se simplificó el mapa geomorfológico regional propuesto anteriormente (ver fig. 10); las unidades descritas fueron agrupadas según su origen, ordenadas de mayor a menor susceptibilidad a la inundación: fluvial, lacustre, denudacional, estructural y volcánico (figura 42.D). Para esto se usó la herramienta v.dissolve de GRASS, con el atributo de código de origen; posteriormente se rasterizó el mapa según el valor de inundación con la herramienta v.to.rast de GRASS. La clasificación usada se puede encontrar en la tabla 5.

e) Densidad de drenaje

Una mayor densidad de drenaje posee una correlación positiva con la susceptibilidad a la inundación, ya que indica una mayor tasa de escorrentía superficial (Das, 2019). Adicionalmente, la expansión del riesgo de inundación aumenta con un aumento en la escorrentía superficial.

Para el cálculo de la densidad de drenaje se usaron herramientas de hidro-procesamiento en ILWIS 3.3. A partir del MED mencionado anteriormente, se rellenaron las depresiones con la herramienta “fill sinks”, luego se calculó la dirección de flujo con “Flow direction”, la acumulación de flujo con “Flow accumulation”, se extrajo el drenaje con “Drainage network extraction”. Para la jerarquización de cauces se usó “Drainage Network Ordering” y finalmente se calculó la densidad de drenaje con la función “Segment Density” para el mapa de segmentos de drenaje extraído anteriormente. Para el cálculo de la densidad de drenaje se trabajó con una densidad de pixel de 1001 m, es decir el valor de drenaje es de km de drenaje por 1.001 km², ya que existía un error en el programa para el valor de 1 km². Sin embargo, para efectos de creación del mapa de densidad (figura 42.E) y de la reclasificación llevada a cabo (ver tabla 5), el efecto es insignificante sobre los valores de corte usados.

f) Acumulación de flujo

La acumulación de flujo (figura 42.F) indica la acumulación de flujo de agua en un pixel, proveniente de los pixeles circundante e indica las zonas de escorrentía; corresponde con un parámetro esencial en la cartografía de inundaciones, según Kazakis et al. (2015). Además, existe una fuerte correlación positiva entre la acumulación de flujo y la susceptibilidad a la inundación (Das, 2019). Para el cálculo de la acumulación de flujo se usó el mapa de “Flow accumulation” generado en el flujo de trabajo de hidro-procesamiento en ILWIS realizado anteriormente. Esto porque corresponde a la red de drenaje usada para el cálculo de densidad de drenaje, donde las áreas con valores negativos (cuencas que sobrepasan el límite del área de trabajo) corresponden únicamente con los bordes del área. De la misma manera, la reclasificación se realizó con r.reclass con los parámetros descritos en la tabla 5.

g) Precipitación

Existe una fuerte correlación entre la precipitación y la ocurrencia de la inundación en un área (Das, 2019), a pesar de que no existe un consenso con respecto a la medida en qué un aumento en la precipitación influye en la susceptibilidad a la inundación. Adicionalmente, la precipitación es considerada por numerosos autores como el factor de influencia principal para la cartografía de potencial de inundación (Das, 2019). En la metodología propuesta por Das (2019), el autor usó datos de precipitación diaria de pixeles de la misión Landsat a lo largo de 63 años. Para efectos de este trabajo, el análisis de datos satelitales, además de su disponibilidad, sobrepasa los límites de capacidad en tiempo y poder de computación. Por lo tanto, se trabajó con datos de precipitación mensual para 7 estaciones del IMN entre el 2005 y el 2018; los datos fueron obtenidos del boletín meteorológico mensual del IMN (<https://www.imn.ac.cr/boletin-meteorologico>) para el periodo mencionado. Las estaciones seleccionadas, por su proximidad al área de estudio son: Santa Clara, Zarcero, San Vicente, Ciudad Quesada (centro), La Balsa (San Ramón), Grecia y Sarchí. La completitud de los registros para las distintas estaciones es variable (tabla 4); la estación con el registro más corto es la de Balsa (San Ramón), la cual cuenta con registros únicamente entre el 2006 y el 2010.

Tabla 4: Resumen de los datos obtenidos para las estaciones meteorológicas en el área de estudio.

Estacion	Latitud	Longitud	Fecha inicio	Fecha final	# datos	Precipit. diaria	Precip. norm.
Santa Clara	10.350	-84.500	Enero 2005	Diciembre 2018	137	9.4167	9.1389
Zarcero	10.183	-84.383	Marzo 2005	Diciembre 2018	157	5.5160	5.0989
San Vicente	10.283	-84.366	Octubre 2005	Diciembre 2018	137	12.0390	11.2461
Ciudad Quesada	10.316	-84.416	Junio 2005	Diciembre 2016	82	11.3320	10.5518
Bajo Rodriguez	10.174	-84.506	Mayo 2006	Abril 2011	43	5.6720	5.4628
Grecia	10.033	-84.350	Enero 2005	Diciembre 2016	121	5.8094	5.3449
Sarchí Norte	10.133	-84.333	Enero 2005	Diciembre 2018	159	8.6714	7.7853

Luego de una recopilación de los valores mensuales válidos (se excluyeron los meses con registros de ND/no dato) para cada estación, se construyeron gráficos mostrando la distribución de los datos (mm de lluvia mensual) con respecto al número de registro (figura 43). En estos se

observan valores mensuales de lluvia extraordinarios, usualmente ligados a ondas, depresiones y tormentas tropicales. Estos son considerados valores atípicos para efectos de este trabajo, por lo que se realizó un análisis estadístico con el cual se eliminaron los valores superiores a dos veces la desviación estándar para la serie de datos correspondiente a cada estación (ver figura 43). Luego de ordenar los datos y eliminar los valores atípicos, se volvió a realizar un análisis estadístico para la obtención de un promedio mensual para la serie de datos de cada estación, el cual fue dividido entre 30 para obtener un aproximado de la precipitación diaria promedio, independientemente de las estaciones y los eventos hidro-meteorológicos extremos. La comparación entre los datos de precipitación diaria para cada estación antes y después del tratamiento de datos, muestra que la variación es pequeña, menor a un orden de magnitud a la baja, con excepción de las estaciones de San Vicente y Ciudad Quesada.

Con los valores de precipitación diaria promedio obtenidos, se realizó una interpolación de los datos para cada estación con el programa Surfer® de Golden Software, con el método de Kriging. Esto ya que provee mejores resultados con pocos datos y permite obtener una interpolación que cubre la mayoría del área de estudio. El mapa obtenido (figura 44) fue introducido en QGIS y reclasificado según los valores de precipitación (ver tabla 5).

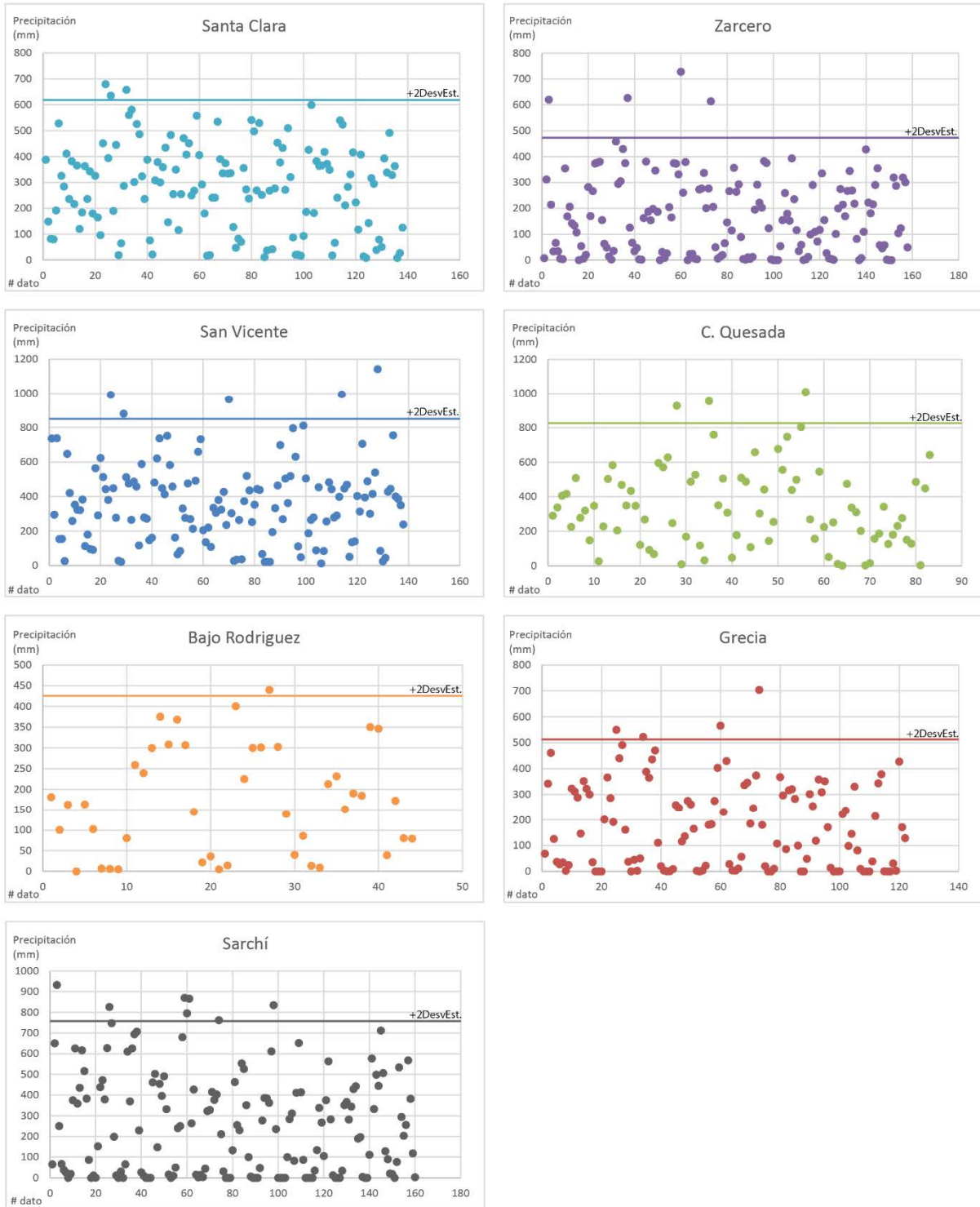


Figura 43: Gráficos de datos de precipitación mensual (mm) para las estaciones presentes en el área de estudio. Nótese que no todas las estaciones presentan la misma cantidad de registros. Se muestra la línea de corte para la cual se eliminaron valores superiores a dos veces la desviación estándar.

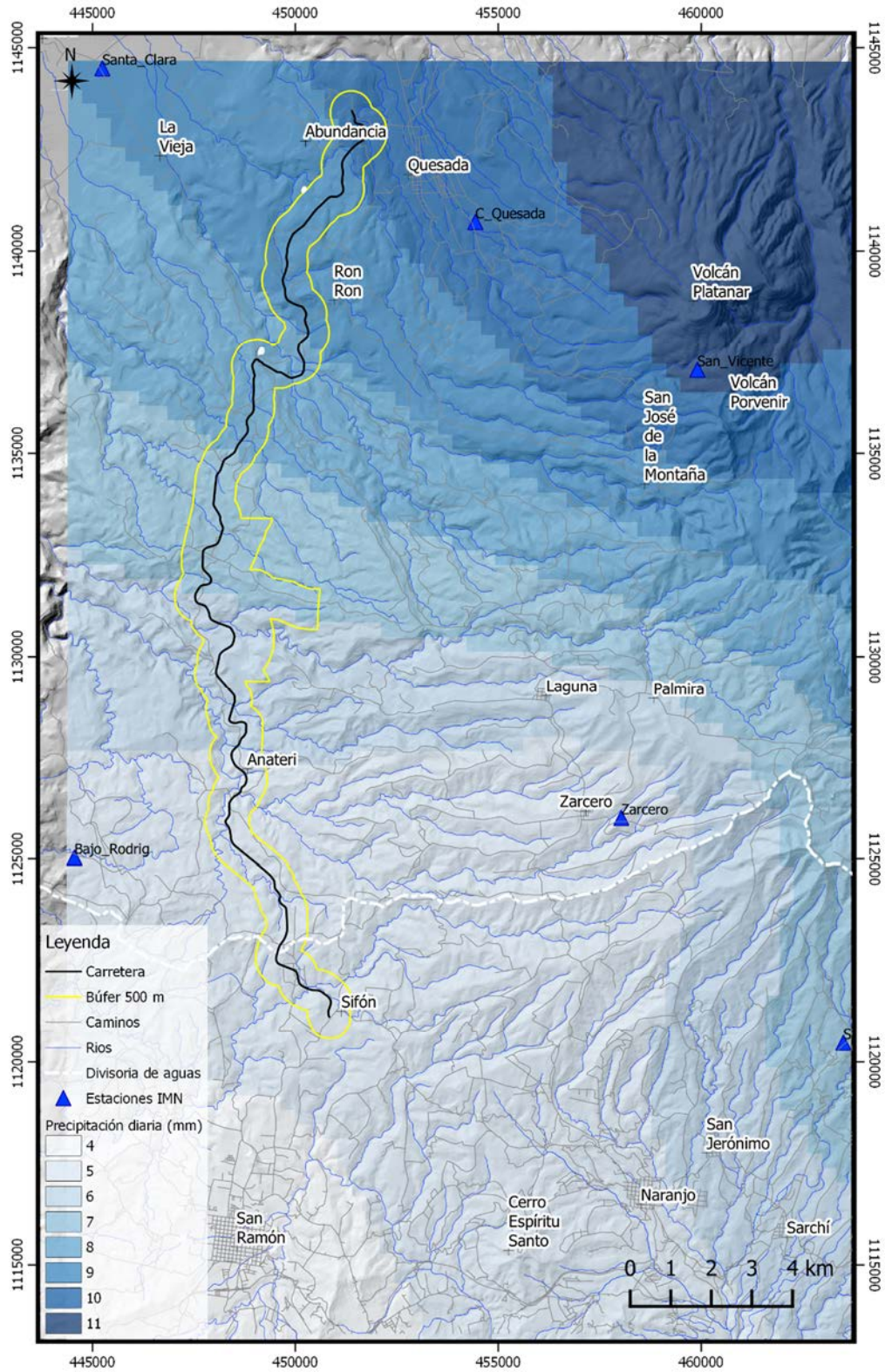


Figura 44: Mapa de precipitación promedio en el área de estudio a partir de datos del IMN. Nótese la diferencia de precipitación entre las vertientes Pacífico (sur) y Caribe (norte).

h) Uso del suelo

El uso del suelo y su evolución temporal poseen una influencia directa sobre la susceptibilidad de un área a la inundación y la recurrencia de este tipo de eventos (Das, 2019). Según García-Ruiz et al. (2008), el uso del suelo posee una influencia destacada sobre las respuestas hidrológicas en diferentes periodos de tiempo. Adicionalmente, fue demostrado que los cambios en el uso del suelo aceleran la probabilidad de la inundación en un área (Beckers et al., 2013).

Para este trabajo, los mapas de uso del suelo consultados corresponden con mapas de cobertura forestal para el 2005 (obtenido del Atlas Digital de Costa Rica, 2014) y para el 2014 (del Centro de Información Geográfica del MINAE, disponible a través del SNIT). Para esta base de datos existe una capa separada en formato shapefile para cada cobertura, por lo que se procedió a cortar y unir en una sola capa los polígonos correspondientes al área de estudio. Para la cobertura forestal del 2013 se cuenta con las siguientes categorías (ver tabla 5): bosque maduro, bosque secundario, plantación forestal, no forestal, pastos, nubes y sombras de nubes. Estas últimas categorías fueron unidas y se le atribuyó un valor de 0, ya que no aporta información sobre el uso del suelo. Las categorías restantes fueron clasificadas tal y como se observa en la tabla 5, donde la cobertura forestal es la menos propensa a la inundación y la no forestal la más propensa. Esto concuerda con lo descrito anteriormente para el caso de las construcciones urbanas que propician inundaciones en sitios dónde naturalmente no las habría.

i) Geología

La geología de un sitio, así como el perfil de una cuenca, se puede ver fuertemente influenciado por un evento de inundación temporal (Das, 2019), además de aportar información sobre eventos de paleo-inundación. La permeabilidad de una formación geológica condiciona la tasa de infiltración de un terreno (antes de llegar a la saturación) y por lo tanto, la susceptibilidad a la inundación del mismo. En este caso cabe recordar la presencia de depósitos volcánicos inconsolidados, que debido a las condiciones físico-químicas imperantes, son transformados en suelos arcillosos, altamente impermeables, que favorecen la rápida saturación y, por lo tanto, la inundación de terrenos con bajas pendientes.

Las unidades descritas en el mapa geológico regional (figura 13), fueron clasificadas en las siguientes categorías, con base en su composición predominante, relacionadas a la permeabilidad de las formaciones y la susceptibilidad a la inundación de las mismas: depósitos sedimentarios permeables (con predominancia de arenas y gravas), depósitos volcánicos masivos fracturados con permeabilidad secundaria intermedia, depósitos volcánicos mezclados con permeabilidad media a baja y depósitos volcánicos arcillosos (tobas y piroclastos), con baja permeabilidad (ver tabla 5). Estos atributos (clasificación según la permeabilidad, código y valor de susceptibilidad a la inundación) fueron añadidos a la tabla de atributos del mapa geológico (figura 42.I), el cual fue convertido a ráster con la herramienta v.to.rast de GRASS.

j) Stream Power Index (SPI)

El índice de energía de la corriente (Stream Power Index en inglés) puede ser descrito como el rendimiento de la corriente en la erosión del canal y el transporte de sedimentos (Das, 2019). Además, su valor es significativo para procesos en el ambiente fluvial y un poder de corriente puede alterar de manera dramática un canal fluvial. Este índice se calcula a partir de la ecuación propuesta por Moore et al. (1991), en función del área de captación específica de la cuenca (A_s) y el gradiente de la pendiente (β), tenemos:

$$SPI = A_s \tan \beta.$$

Para el cálculo del SPI se usó la función `r.watershed` de GRASS, la cual calcula una gran cantidad de parámetros hidrológicos de las cuencas y necesita únicamente de un modelo de elevaciones sin depresiones y la especificación del área mínima de la cuenca (300m). Para el modelo de elevación se usó el MED calculado de las curvas 1:50 000 mencionado anteriormente y se usó la herramienta de SAGA “Fill sinks (Wang & Liu)”. Para la clasificación (tabla 5), los valores de corte fueron determinados con base en los cambios visibles en el histograma; esto con el fin de visualizar, en valores de SPI altos, la red de drenaje (ver figura 42.J).

k) Topographic Wetness Index (TWI)

El índice de humedad topográfica (Topographic Wetness Index en inglés) es una representación física de las áreas con posibilidad de inundación, e indica dos medidas: áreas planas y posiciones hidrográficas (Das, 2019). Existe una correlación importante entre la geomorfología y el TWI de un área, con valores de TWI mayores en planicies de inundación. Este índice es calculado con la ecuación propuesta por Moore et al. (1991) en función de A_s y β , donde A_s representa el área pendiente arriba de un punto de vertido de una cuenca y β el ángulo de pendiente en el punto de vertido. La ecuación es la siguiente:

$$TWI = \ln\left(\frac{A_s}{\tan \beta}\right).$$

Al igual que para el SPI, el TWI fue calculado usando la función `r.watershed` de GRASS, con los mismos datos de entrada y especificaciones. Los valores de salida (entre 0 y 25) fueron clasificados según lo mostrado en la tabla 5, con una correlación positiva entre el valor de TWI y la susceptibilidad a la inundación (ver figura 42.K).

l) Curvatura

La curvatura, en su definición dada por Roberts (2001), es una propiedad bidimensional de una curva, que cuantifica la desviación de la curva con respecto a una línea recta. Para el análisis de superficies, la curvatura corresponde a la segunda derivada de la curva en una dirección en particular. Las curvaturas usadas para la descripción de una superficie son principalmente las

ortogonales a la superficie (curvaturas normales) y existen una gran cantidad de curvaturas que se pueden calcular y que son de utilidad para el análisis topográfico (Roberts, 2001). La curvatura de una superficie topográfica es de importancia para la escorrentía superficial y el proceso de infiltración de un área. Algunos estudios determinan valores precisos de curvatura ligados a la susceptibilidad de inundación (Das, 2019); sin embargo, debido a la gran variedad de tipos de curvatura, esto no es constante. La inclusión del mapa de curvatura en la metodología propuesta por Das (2019) responde a una representación más precisa de la velocidad de flujo para una estimación de la profundidad de inundación.

La metodología usada por Das (2019) usa el valor de curvatura general calculado en el ambiente de ArcGis. Según Buckley (2010), este valor corresponde a la suma de las curvaturas relacionadas al buzamiento: la curvatura de perfil (profile curvature), la cual es paralela a la dirección de máxima pendiente, y la curvatura de plano (planform curvature), la cual es perpendicular a la dirección de máxima pendiente. En el ambiente de QGIS existen algoritmos tanto de GRASS como de SAGA para el cálculo de los diferentes tipos de curvatura.

Roberts (2001) define como dip curvature (curvatura de buzamiento), la curvatura en la dirección de máximo buzamiento, llamada profile curvature (curvatura de perfil) por Wood (1996) (ver Chavarría, 2017). La curvatura de rumbo o strike curvature, según Roberts, (2001) es la curvatura en las direcciones perpendiculares a la dirección de máximo buzamiento, en otras palabras perpendicular al rumbo de buzamiento, la cual es llamada curvatura tangencial o tangential curvature por Wood (1996). Adicionalmente, la curvatura de contorno (contour curvature según Roberts, 2001), también llamada planform curvature, definida por Mitsova & Hofiecka (1993), es muy similar a la curvatura tangencial. Con base en las comparaciones numéricas hechas por Roberts (2001), se escogió trabajar con una sumatoria de la curvatura de perfil y curvatura tangencial, calculadas con los geoalgoritmos de GRASS en el ambiente de QGIS. Adicionalmente, se filtró en resultado de cada curvatura (de perfil y tangencial) con un filtro Gaussiano (geoalgoritmo de SAGA), antes de realizar la sumatoria de ambas curvaturas.

El resultado de la sumatoria de curvaturas corresponde con un mapa con valores positivos y negativos, en este caso comprendidos entre -0,025 y 0,025. Los valores negativos corresponden con una superficie cóncava hacia arriba, es decir que los vectores normales a la superficie son convergentes. Los valores cercanos a cero corresponden con una superficie plana horizontalmente o inclinada, y los valores positivos corresponden con una topografía convexa hacia arriba, con vectores normales divergentes. Para la reclasificación del mapa obtenido, este fue multiplicado por 100 y se le sumó 5 para obtener valores positivos enteros, ya que los geo-algoritmos de GRASS no admiten la reclasificación de rásters con valores negativos.

Una vez obtenidos los mapas de cada uno de los 12 componentes usados para determinar la susceptibilidad de inundación, se realizó la sumatoria de los mapas con la herramienta “raster

Calculator” en QGIS. Para esta sumatoria no se usaron pesos, con el fin de darle la misma importancia a cada uno de los parámetros usados. El resultado de esto se observa en la figura 45

Resultados

Tabla 5: Clasificación de valores de los insumos para la sumatoria de susceptibilidad a la inundación.

Valor	0	1	2	3	4	5
Susceptibilidad	nula	baja	media-baja	media	media-alta	alta
<i>Elevación (m s.n.m)</i>	de mayor a menor elevación	>= 1700	1200-1700	800-1200	400-800	<= 400
<i>Pendiente (grados)</i>		>= 35	25-35	15-25	5-15	0-5
<i>Distancia al río (m)</i>		1500-2000	1000-1500	500-1000	100-500	0-100
<i>Geomorfología (origen)</i>		Volcánico	Estructural	Denudacional	Lacustre	Fluvial
<i>Densidad de drenaje (km/km²)</i>		0-1.7	1.7-2.5	2.5-3.4	3.4-4.8	4.8-6.8
<i>Acumulación de Flujo (píxeles)</i>		0-100	100-100000	100000-300000	300000-600000	600000-955000
<i>Precipitación (mm/día)</i>		4.5-6	6-7.5	7.5-9	9-10.5	10.5-12
<i>Cobertura (Uso del suelo)</i>	Nubes + Sombras de nubes	Bosque Maduro	Bosque Secundario	Plantación Forestal	Pastos	No Forestal
<i>Geología</i>	tipo depósito		Sedimentario	Volcánico fracturado	Volcánico mezclado	Volcánico arcilloso
	permeabilidad		alta	media	media-baja	baja
	código		D1	D2	D3	D4
<i>Stream Power Index (SPI)</i>		3000000-4500000	1000000-3000000	10000-1000000	1000-10000	0-1000
<i>Topographic Wetness Index (TWI)</i>		0-2.5	2.5-7	7-11	11-16	16-21
<i>Curvatura (Perfil +Tangencial)</i>	Valor original	0.015-0.025	0.005 - 0.015	(-0.005) - 0.005	(-0.015) - (-0.005)	(-0.025)-(-0.015)
	(Valor*100)+5	6.5-7.5	5.5-6.5	4.5-5.5	3.5-4.5	2.5-3.5
	signo	positivo		plano		negativo

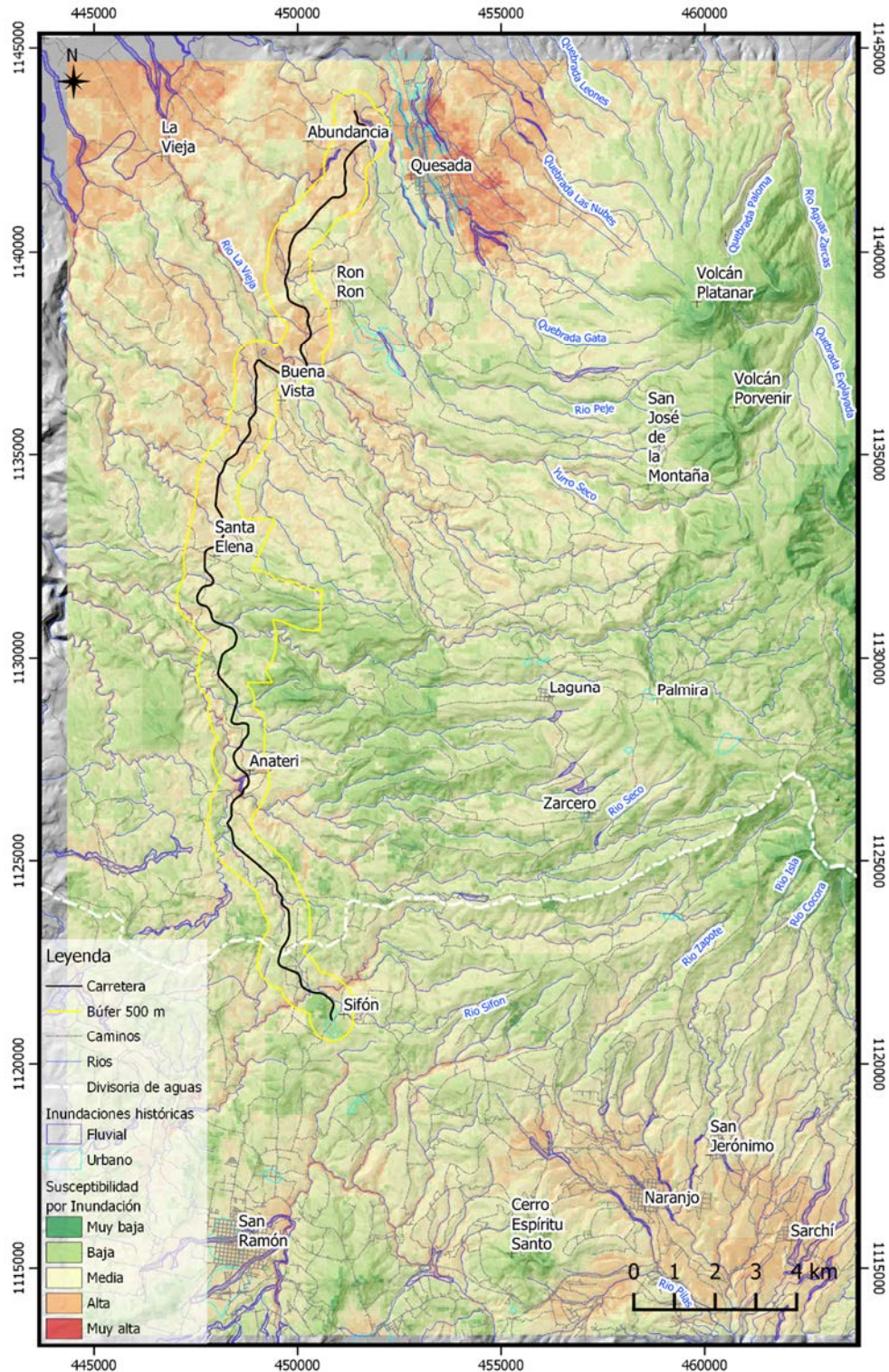


Figura 45 Mapa de susceptibilidad a inundación del área de estudio con base en datos geoespaciales. Las áreas delimitadas en azul muestran zonas con registros de inundación según la base de datos de DesInventar.

El mapa resultante muestra la susceptibilidad a inundación en el área de estudio, clasificada en las categorías muy baja, baja, media, alta y muy alta. El área sin valores se debe a que el mapa de

sumatoria generado se encuentra limitado por la extensión de los insumos, en particular el mapa de precipitación. La mayor parte del área presenta valores de susceptibilidad media a baja, con una susceptibilidad muy baja en las partes de mayor elevación. Al contrario, las áreas con mayor susceptibilidad corresponden con la ubicación de Ciudad Quesada y sus alrededores, así como el área ubicada sobre la llanura de Santa Clara. En el caso de Ciudad Quesada, ésta presenta los mayores valores por ubicarse en una zona con gran cantidad de drenajes, sobre una topografía de origen aluvial y donde el uso del suelo es mayoritariamente urbano. Al igual que en las partes urbanas de San Ramón y Naranjo, hay concordancia entre la susceptibilidad a la inundación (alta a muy alta) con los datos históricos recopilados del inventario de DesInventar. Con respecto a la ubicación del proyecto, se observa una zona con valores de susceptibilidad medios a altos desde la intersección con el río Arenas (1ero) hasta el poblado de La Abundancia. Esto es de particular importancia en los alrededores del puente sobre el río La Vieja (el cual aún no ha sido completado), ya que esta zona presenta también una fuerte inestabilidad de laderas, lo cual en caso de un evento hidrometeorológico extremo, podría ocasionar un represamiento del río debido a un deslizamiento, lo cual conllevaría daños importantes así como un corte en la comunicación entre los poblados de Buenavista y Ronron. Finalmente, cabe resaltar la zona de susceptibilidad media a alta entre Naranjo, San Gerónimo y Sarchí donde hay una predominancia de zonas urbanas que, junto con las pendientes, representa, un riesgo potencial para los pobladores de esta zona.

6.4. Amenaza por inestabilidad de laderas

Los deslizamientos corresponden a “desplazamientos, ladera-abajo de suelos, rocas y biomasa, por influencia de la gravedad y de acuerdo con la susceptibilidad intrínseca de los materiales que constituyen la ladera (como lo son: resistencia al corte de los materiales, discontinuidades, presencia de humedad y agua subterránea, etc.). Los mecanismos de disparo más frecuentes suelen ser: lluvias de intensidad alta, socavación por ríos u oleaje, sismos y acción antrópica (excavación, socavación, sobrecarga); asimismo, la actividad humana: excavaciones, rellenos, fugas en conductos de agua, vibraciones del tránsito, extracción de materiales” (CNE, 2014a).

Por otra parte, el manual de deslizamientos del USGS (Highland et al., 2008) define un deslizamiento de manera general como un desplazamiento descendente de roca o suelo (o ambos), sobre una superficie de ruptura ya sea curva (movimiento rotacional) o plana (movimiento traslacional), en la que el material se mueve como una masa coherente, sin deformación interna.

Finalmente, Hungr et al. (2014) visualizan los deslizamientos como un sistema físico, desarrollado a lo largo del tiempo en varias etapas, que comprende deformaciones pre-falla, syn-falla y post-falla. Muchos deslizamientos poseen varios episodios de movimiento, separados por periodos más o menos largos de quietud. Estos autores proponen una clasificación, correspondiente a la actualización de la clasificación de Varnes (1978), con respecto al tipo de movimiento y el tipo de material involucrado, al igual que la clasificación usada por el USGS. Los tipos de movimiento describen el tipo de desplazamiento de la masa del deslizamiento y son: caída, volcamiento, deslizamiento, propagación, flujo y deformación de la ladera. Por otra parte los

materiales deslizados corresponden a rocas o a suelo, subdivididos según la terminología geotécnica (Hungar et al., 2014) en: rocas, arcillas, lodos, limos, arenas, gravas, bloques, detritos, turba o hielo (tabla 6).

Tabla 6: Clasificación de los tipos de movimiento de masa según Hungar et al. (2014) [traducido al español].

Tipo de movimiento	Roca	Suelo
Caída	1. Caída de roca/hielo	2. Caída de bloques/detritos/limos
Volcamiento	3. Caída de bloque de roca	4. Volcamiento de gravas/arenas/limos
	5. Volcamiento flexural de roca	
Deslizamiento	6. Deslizamiento rotacional de roca	11. Deslizamiento rotacional de arcillas/limos
	7. Deslizamiento planar de roca	12. Deslizamiento planar de arcillas/limos
	8. Deslizamiento de cuña de roca	13. Deslizamiento de gravas/arenas/detritos
	9. Deslizamiento compuesto de roca	14. Deslizamiento compuesto de arcillas/limos
	10. Deslizamiento irregular de roca	
Propagación	15. Propagación de ladera de roca	16. Propagación licuada de arcillas/limos 17. Propagación de arcillas sensibles
Flujo	18. Avalancha de rocas/hielo	19. Flujos secos de arenas/limos/detritos
		20. Flujo deslizamiento de arenas/limos/detritos
		21. Flujo-deslizamiento de arcillas sensibles
		22. Flujo de detritos
		23. Flujo de lodo
		24. Torrente de detritos
		25. Avalancha de detritos
		26. Flujo de tierra
27. Flujo de turba		
Deformación de ladera	28. Deformación de ladera de montaña	30. Deformación de ladera de suelo
	29. Deformación de ladera de roca	31. Reptación (de suelo)
		32. Soliflucción

Según la guía de la CNE. (2014a), las acciones para el manejo del riesgo derivado de la amenaza por inestabilidad de laderas se centran, generalmente, en la mitigación de la inestabilidad, como por ejemplo: muros de contención, drenajes, terrazas, bermas, anclajes, revegetación o en la reducción de la exposición humana (reubicación), mediante la zonificación y los procesos de toma de decisiones respectivos.

En Costa Rica, al igual que en gran parte de América Central, los materiales de origen volcánico están expuestos a altas precipitaciones (entre 1000 y 7000 mm/año para el área de estudio), meteorización intensa, procesos de alteración hidrotermal y alteración a arcillas, así como fuerte erosión y temperaturas fluctuantes. Esto, aunado a las acciones antrópicas, los hacen

extremadamente susceptibles a procesos de remoción en masa o deslizamientos, los cuales han producido gran cantidad de daños y muertes en el pasado (Alvarado et al., 1988, Barrantes et al., 2013, Ruiz, 2012). Los factores de disparo más comunes, tomados en cuenta para la determinación de la amenaza de deslizamientos (por ejemplo Mora & Vahrson, 1993) son eventos hidrometeorológicos extremos (fuertes lluvias) y sismos con magnitudes mayores a 5,5 Mw, así como una combinación de ambos (Ruiz, 2012). Además, la región centroamericana es conocida por tener un número desproporcional, por lo menos un orden de magnitud mayor (Malamud et al, 2004) de deslizamientos disparados por sismos con respecto a otras regiones del mundo.

Para efectos de este trabajo, la determinación de la amenaza por deslizamiento sobrepasa los objetivos del estudio, además de existir estudios previos con respecto a la amenaza por deslizamiento en el área de estudio local, específicamente a lo largo de la carretera. Por esto se detallará en primera instancia los resultados de la evaluación de la “Susceptibilidad a Deslizamiento de las laderas de suelos residuales en el corredor del proyecto Sifón–La Abundancia” realizado por Vargas & Garro (2012), el cual está basado en parámetros geotécnicos, y los resultados del trabajo titulado “Sistema de clasificación geotécnica de laderas para proyectos de carretera basado en el índice de calidad HSQI: aplicación en Costa Rica”, realizado por Ocampo (2016). En una segunda parte se completó el inventario histórico de deslizamientos para el búfer de 500 m a ambos de la carretera y se realizó un análisis de los datos obtenidos. Esto con el fin de proveer los parámetros propios del área, con miras a una posterior aplicación de metodologías para la determinación de la amenaza por deslizamiento, por ejemplo con la metodología Mora-Varhson y sus modificaciones: (Mora et al., 1992, Mora et al., 1993, 1994, Ruiz, 2012).

6.4.1. Determinación de la susceptibilidad a deslizamientos por el método de Ángulo Crítico y HSQI

a) Ángulo crítico

La metodología de “ángulo crítico”, propuesta por Vargas y Garro (2005), busca identificar las zonas susceptibles a inestabilidad de una ladera natural de suelo residual, mediante un análisis estadístico de la pendiente en las zonas deslizadas, que han sido separadas según el tipo de material de origen. La hipótesis básica de la metodología es que el ángulo de la pendiente del terreno en las áreas deslizadas tiene una distribución normal, cuyo valor promedio o media es el “ángulo crítico”. Esta metodología utiliza información topográfica, geológica y un catálogo de deslizamientos para obtener los parámetros de la zonificación.

Para la determinación de la susceptibilidad al deslizamiento por ángulo crítico, Vargas & Garro (2012) trabajaron en un área de 1 km a ambos lados de la carretera. La información topográfica con escala 1:5 000, proveniente de los planos del proyecto, fue usada para calcular el mapa de pendientes del terreno. Para la cartografía del mapa geológico, además de los trabajos a nivel regional (principalmente Gamboa (2005)) los autores usaron, a nivel local, las unidades geológicas propuestas por la empresa M&V (2000) para el diseño de la obra, mencionadas anteriormente, al

igual que Ocampo (2016). Debido a la escala del trabajo, los autores no utilizaron ni el inventario de deslizamientos propio (con base en una visita de campo en marzo del 2012) ni el realizado por M&V en el 2000, el primero por poseer escasa información y el segundo por no corresponder a la topografía usada para llevar a cabo el análisis. Sin embargo, ambos inventarios fueron usados para verificar la validez de la zonificación. Al no utilizarse el inventario de deslizamientos se usó un solo valor de ángulo crítico (ϕ_c) de pendiente, para cada una de las unidades litológicas. Los valores de ángulo crítico (correspondiente a la media) así como el valor de desviación estándar (σ) fueron determinados al realizar un análisis estadístico de los valores de pendiente para una unidad litológica. Los intervalos de ángulos de la pendiente (θ) y nivel de amenaza (susceptibilidad) asociado, se calculan con base en estos valores, para cada unidad litológica, según la siguiente tabla.

Tabla 7: Rangos de susceptibilidad a deslizamientos según el ángulo crítico, la desviación estándar y los ángulos de pendiente para el método de Ángulo Crítico (Fuente: Vargas & Garro, 2012).

Nivel de susceptibilidad	Intervalo de ángulos de la pendiente
Muy baja	$\theta < \Phi_c - 1,5\sigma$
Baja	$\Phi_c - 1,5\sigma \leq \theta < \Phi_c - 0,5\sigma$
Moderada	$\Phi_c - 0,5\sigma \leq \theta < \Phi_c + 0,5\sigma$
Alta	$\Phi_c + 0,5\sigma \leq \theta < \Phi_c + 1,5\sigma$
Muy alta	$\Phi_c + 1,5\sigma \leq \theta$

Con estos intervalos se reclasifican las pendientes dentro de cada unidad litológica, para obtener una zonificación final de la susceptibilidad a deslizamientos. Finalmente, se verifica la validez de la clasificación comparando los niveles con el porcentaje de área realmente deslizada según los inventarios.

Los resultados obtenidos presentan ángulos críticos con valores bajos, alrededor de 15° en promedio, y buenos coeficientes de correlación. Los valores de ángulos críticos son menores para las unidades recientes (tobas y depósitos sedimentarios no consolidados), asociado por los autores a materiales con baja resistencia y propensos a la inestabilidad. La zonificación por susceptibilidad obtenida (ver tabla 8) no presenta ningún área con muy baja susceptibilidad mientras que las zonas con niveles de susceptibilidad moderada, alta y muy alta cubren 27,7%, 46,6 y 20,4% de la longitud del trazado original de la carretera, respectivamente. En especial, las áreas con niveles muy altos de susceptibilidad se concentran principalmente alrededor de los kilómetros 20+000 (Río Laguna) y 30+000 (Río la Vieja), lo cual concuerda con los resultados del inventario propio, expuesto en el siguiente apartado.

Tabla 8: Rangos de susceptibilidad a deslizamientos según el método de Ángulo Crítico para cada una de las unidades litológicas presentes en el área de estudio (Fuente: Vargas & Garro, 2012).

Susceptibilidad	Unidad Geológica					
	TMPV1	QRVA	TMPV2	QRCA	QLPVF2	TPV3
Muy baja	-	-	-	-	-	-
Baja	0 - 12,4	0 - 10,6	0 - 13,7	0 - 8,7	0 - 9,1	0 - 10,2
Moderada	12,4 - 23,1	10,6 - 19,1	13,7 - 26,6	8,7 - 17,9	9,1 - 17,0	10,2 - 20,6
Alta	23,1 - 33,8	19,1 - 27,6	26,6 - 39,4	17,9 - 27,1	17,0 - 25,0	20,6 - 31,1
Muy alta	33,8 - 90	27,6 - 90	39,4 - 90	27,1 - 90	25,0 - 90	31,1 - 90

b) Hillslope Quality Index (HSQI)

Ocampo (2016) realizó un análisis de estabilidad de taludes, específico para proyectos lineales, usando la metodología de Hillslope Quality Index (HSQI) propuesta por Moreno-Ceballos (2015), la cual consiste en una modificación del Método de análisis de Estabilidad de la Escuela de Minas de Nancy (Sánchez, 1989).

La metodología de Nancy busca la obtención de factores de seguridad con base en la geometría del talud y los parámetros de caracterización de los materiales. Los mecanismos de falla se separan en planar y circular, cada uno con funciones distintas, y se aplican dos ecuaciones: 'X', la cual depende de la cara del talud, el ángulo de fricción del material (ϕ), del nivel freático (H_w) y de la altura del talud; y 'Y' la cual es función de la cohesión del material (c), de su peso específico (γ) y de la altura del talud (H). Las condiciones freáticas se dividen en tres: sin nivel freático, drenado y saturado, al igual que las condiciones del talud: con discontinuidades, sin discontinuidades y con discontinuidades saturadas. Según las condiciones se escoge una de las seis opciones de ecuaciones para 'X' al igual que para 'Y'. Al introducir los resultados de las ecuaciones en el ábaco se obtiene el factor de seguridad del talud.

El método HSQI (Moreno-Ceballos, 2015) corresponde con una simplificación del método descrito anteriormente, usando los mismos criterios para analizar la susceptibilidad al deslizamiento de las laderas por medio de un valor HSQI. Consiste en un análisis previo (aunque también puede realizarse posterior al inicio del proyecto) para determinar las condiciones de construcción para los taludes de una carretera. Se realiza un análisis de cada talud, a los cuales se les asigna un valor HSQI y éstos se clasifican según su susceptibilidad a ser deslizados. Finalmente, el método proporciona recomendaciones de estabilización para mitigar los daños a la vía por eventuales fallas en las laderas. La clasificación del HSQI se divide en alta ($\leq 0,5$) media ($1 \leq x \leq 1,4$) y baja ($\geq 1,4$). Adicionalmente, el autor propone tres hipótesis probabilísticas para estimar la confiabilidad de los datos. Al evaluar la metodología en dos sitios con condiciones distintas, el autor concluyó que en la mayoría de las laderas el clasificador HSQI corresponde con la condición de estabilidad real de la ladera. Los pasos a seguir para la aplicación del método se resumen a continuación:

- a. Recolección de información de la zona de estudio (Geología, registros de precipitaciones, topografía, datos geotécnicos, inventarios de deslizamientos, etc.).

- b. Definición de las secciones a lo largo de la vía para análisis HSQI, cada sección con condiciones geométricas, geológicas e hidrológicas únicas.
- c. Determinación del valor HSQI para cada sección previamente definida, usando las ecuaciones 'X' y 'Y' del modelo de Nancy, así como las modificaciones para el nivel freático, modelos físicos y ábaco de Moreno-Ceballos, (2015).
- d. Definición de la importancia de la vía (de acuerdo con el flujo de vehículos y la localización de la vía) y determinación del factor de corrección de la altura de la ladera.
- e. Análisis de las recomendaciones de estabilización y mantenimiento para mitigar los daños provocados por las laderas inestables en sectores críticos.

Ocampo (2016) aplica la metodología en el corredor Sifón-La Abundancia, entre los kilómetros 9+800 y 29+154, usando las imágenes Lídár con resolución de 15 cm para la caracterización geomorfológica, la obtención de los perfiles (87 secciones de 150 por 150 m) y el inventario de deslizamientos. Las modificaciones corresponden principalmente a la inclusión de la influencia climática, al usar valores de precipitación mensuales, para la obtención del parámetro de humedad del suelo (Sh) definido por Mora-Vahrson (1993). Esto permite obtener diferentes valores para el nivel freático. El inventario de deslizamientos realizado incluye 81 deslizamientos a proximidad de la carretera, los cuales fueron posteriormente analizados por frecuencia, según la metodología de Malamud et al. (2004). Finalmente, se realizó un análisis ROC (Receiver operating characteristics analysis) para determinar el desempeño del método HSQI, con resultados positivos en el área de estudio.

Algunas de las conclusiones más importantes de este estudio, con respecto a la susceptibilidad al deslizamiento a lo largo de la carretera, se enumeran a continuación:

- a. Los suelos en el área de estudio son clasificados como limos de alta plasticidad, con alto índice de vacíos, alta porosidad y alto contenido de humedad. Poseen cohesiones efectivas generalmente bajas, en el rango de 0-22 kPa, y ángulos de fricción entre 14-38°.
- b. Al aplicar el método FOSM, se concluye que el ángulo de fricción ejerce una mayor influencia que el factor de cohesión sobre los resultados del parámetro HSQI.
- c. Alrededor de 37% de los deslizamientos cartografiados fueron provocados por factores antrópicos; además la mayoría de los deslizamientos con áreas menores a 450 m² son inducidos por efectos antrópicos.
- d. De los 19 kilómetros analizados, el 57% fue clasificado con susceptibilidad alta a deslizamientos, 31% con susceptibilidad media y 12% con susceptibilidad baja; lo cual refleja las condiciones geotécnicas y climáticas adversas presentes en el área de estudio.
- e. Al analizar los deslizamientos ocurridos en las secciones evaluadas previamente con el sistema HSQI, se encontró que el 67% de los casos coinciden con una clasificación de susceptibilidad alta, comprobando la correlación entre este parámetro y la condición real de los taludes.
- f. Las soluciones de estabilización a lo largo de la vía corresponden con la creación de bermas, construcción de cunetas y drenajes superficiales, así como algunos muros de

gaviones. Sin embargo, según las recomendaciones de Moreno-Ceballos (2015) la altura de los taludes y las soluciones propuestas no son adecuadas para asegurar la estabilidad de los taludes a largo plazo. Esto se ve reflejado en algunos taludes que presentan fallas, colapsos y deslizamientos.

Tabla 9: Comparación de los niveles de susceptibilidad al deslizamiento de los taludes obtenidos por Ocampo (2016) para el método HSQI, con los resultados del método de Ángulo Crítico (Vargas & Garro, 2012) a lo largo de la ruta.

Kilómetro	Método de ángulo crítico	Método HSQI
13 a 14	Moderado a alto	Alto
16 a 17	Alto a muy alto	Bajo a alto
18 a 18+500	Alto a muy alto	Alto
19 a 23	Moderado a muy alto	Medio a alto
23 a 29	Alto a muy alto	Medio a alto

6.4.2. Completitud y análisis del inventario histórico de deslizamientos

El inventario de deslizamientos históricos con base en indicios morfológicos se llevó a cabo en un corredor de 500 m a ambos lados de la carretera, entre los kilómetros 9+800 y 39+400, para un total de 29,96 km². Los insumos para el cartografiado de los deslizamientos son similares a los insumos usados para la geomorfología a escala local: se usó un mapa de sombras derivado de las curvas de nivel cada 1 m extraído de los datos del MED lidar, el cual cuenta con resolución de 15 centímetros (AeroDiva S.A, 2014). Además, se usó el mosaico de 354 ortofotografías con resolución de 15 cm proveniente del mismo sobrevuelo (AeroDiva S.A para el LanammeUCR en Octubre del 2014). Adicionalmente, se crearon dos mapas de pendientes para el área de trabajo, el primero con la escala de colores habitual (ver figura 6) y el segundo con escala de rojos para visualizar cambios bruscos en la topografía. Este último permitió, junto con las imágenes aéreas, visualizar y encontrar las áreas con índices de deslizamientos con base en rasgos morfológicos principales: presencia de una corona, escarpe, grietas, superficies de ruptura, cuerpo principal y depósitos del deslizamiento. En las áreas con cobertura boscosa, sobre todo en el cauce de los ríos, la determinación de zonas con movimientos de masa se basó únicamente en las curvas de nivel. Se trabajó a una escala variable entre 1:1 000 y 1:10 000 en QGIS, para la delimitación de un total de 2378 polígonos con base en evidencias geomorfológicas (figura 46). Cabe resaltar que el inventario corresponde con los deslizamientos ocurridos hasta Octubre 2014 (fecha de las imágenes aéreas), con la excepción de pequeños deslizamientos recientes en los taludes de la carretera y del deslizamiento de gran tamaño del km 20+900 (con fecha del 21 de agosto del 2017). Ya que estos fueron cartografiados en las láminas usadas durante las visitas de campo, entre el 2016 y el 2018.

Estos se dividieron en primera instancia cualitativamente según la edad relativa: 4 deslizamientos “muy antiguos”, de gran tamaño, sumamente erosionados, y con evidencias de

movimientos antiguos (descritos en el apartado 4.3.2); 2137 deslizamientos “antiguos”, cuya morfología es aún evidente pero ha sido afectada en mayor o menor medida por la erosión y 237 deslizamientos “recientes”, cuya superficie de ruptura es aún evidente y/o fueron mapeados en los taludes de la carretera durante las visitas de campo. De manera general, los deslizamientos se agrupan alrededor de los valles y cañones fluviales (figuras 46 y 47) y se pueden dividir en taludes de erosión fluvial, deslizamientos rotacional/traslacional/compuesto y flujos de tierra. Una vez delimitados los polígonos y clasificados cualitativamente según la edad, se procedió a determinar una serie de atributos para cada polígono, descritos a continuación:

Tabla 10: Descripción de los parámetros determinados para cada uno de los polígonos del Inventario de Deslizamientos

Parámetro	Especificaciones
<i>Identificador (id)</i>	Número de deslizamiento.
<i>Edad</i>	Dividido en: muy antiguo, antiguo, reciente.
<i>Área, perímetro</i>	Calculados automáticamente en m ² y metros, respectivamente
<i>X, Y</i>	Del centroide del polígono, en coordenadas CRTM05.
<i>Provincia, Cantón, Distrito.</i>	Con base a los límites del Atlas (2014).
<i>Elevación: media, promedio, mínimo y máximo</i>	Calculados automáticamente con la herramienta “zonal statistics” sobre el ráster de elevación (MED).
<i>Pendiente: media, promedio, mínimo y máximo</i>	Calculados automáticamente con la herramienta “zonal statistics” sobre el ráster de pendiente.
<i>Geología</i>	Código de la litología predominante.
<i>Kilómetro</i>	Estacionamiento más cercano (valores cada 100m).

Una vez completada la tabla de atributos para el inventario de deslizamientos, se procedió a realizar diversos análisis a partir de éste con el fin de obtener información indicativa de la condición de las laderas en el área estudiada. En primera instancia, se realizó un análisis espacial de los deslizamientos con los atributos de área y frecuencia en una cuadrícula de 500 por 500 m y, en segunda instancia, se realizó un análisis estadístico de los demás atributos para todos los polígonos (frecuencia por tipo de litología, localización geográfica y edad, así como elevación máxima y pendiente promedio).

Algunos de los sitios identificados con gran cantidad de problemas de inestabilidad de laderas (figura 46), durante las visitas de campo, corresponden a los siguientes sitios: antes del cruce sobre el río Espino (kilómetros 15+900 a 16+700), antes y después del cruce sobre la quebrada Laguna (km 18+500 a 20+500) y Tapezco (20+800 a 22+500), antes y después del cruce sobre el río la Vieja (km 30 a 32) y sobre el borde del antiguo deslizamiento de Ronrón (km 33+200 a 34+200).

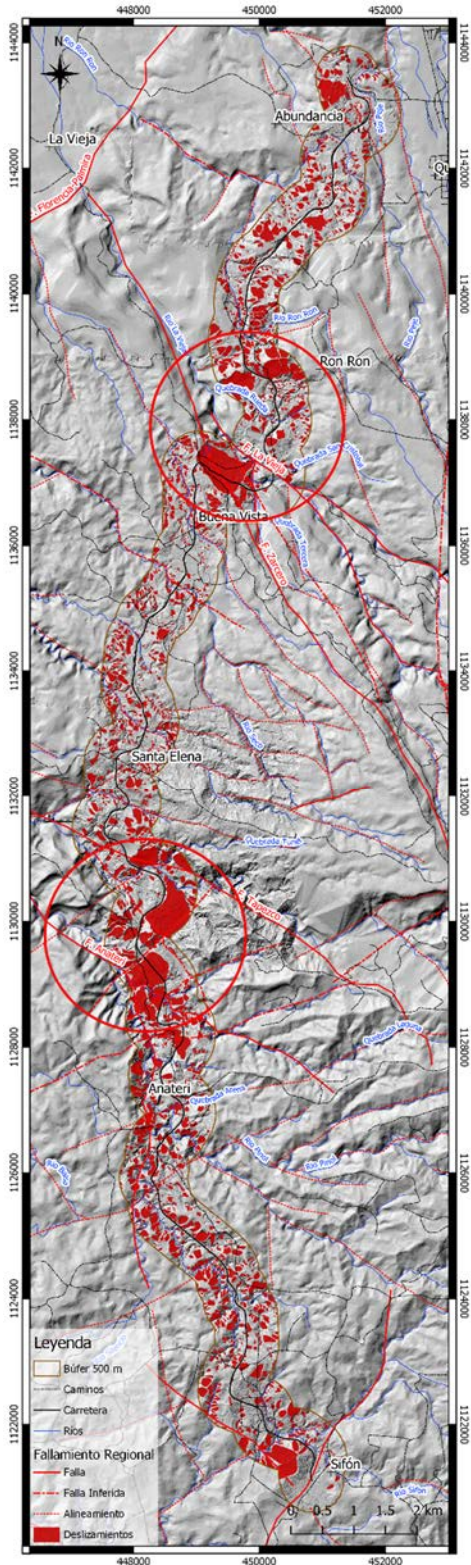


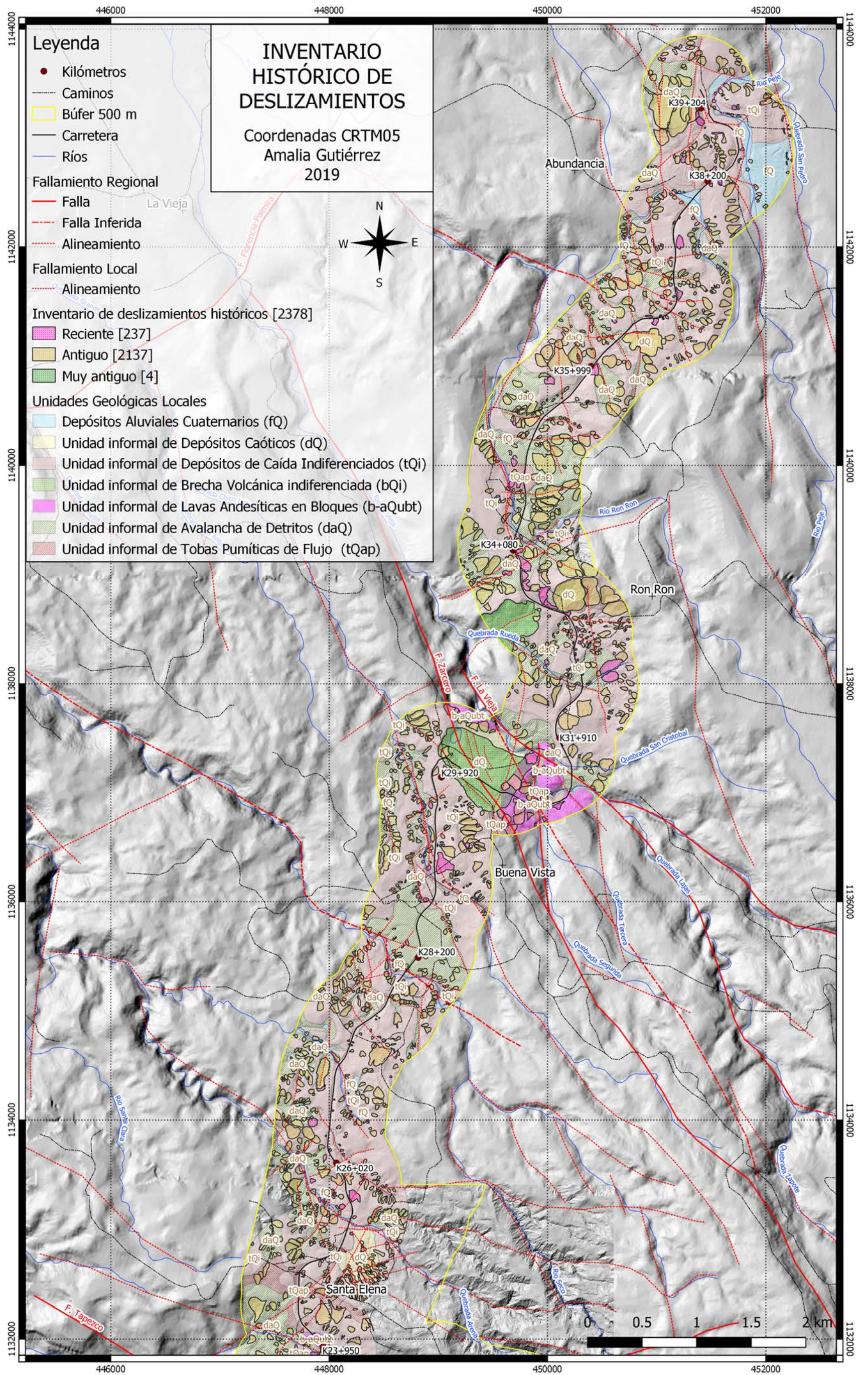
Figura 46: Inventario de deslizamientos históricos y sitios con inestabilidades identificadas

- Las inestabilidades antes del cruce sobre el **río Espino** se estima están relacionadas con el fallamiento local (hipotético) propuesto, los cambios en la litología, así como las acciones antrópicas (corte de taludes, presencia de escombreras y excavación para la construcción del bastión del puente).

- Las inestabilidades antes y después del cruce sobre la **quebrada Laguna** se consideran las más importantes en toda el área de estudio y se relacionan con varios factores. El primero es la presencia de fallamiento a escala local y regional (falla del valle del río Espino), lo cual se ve reflejado en los cauces de los ríos y los deslizamientos pasados y presentes. El segundo es la presencia de varios deslizamientos antiguos, los cuales fueron reactivados con las acciones antrópicas: cortes de taludes y establecimiento de escombreras. El tercero es la variedad en las unidades litológicas y sobretodo la presencia de zonas de alteración asociadas a las fallas principales, lo cual disminuye la resistencia de los materiales. Finalmente, se estima que tanto las fallas que cortan el cauce del río como los deslizamientos asociados, se encuentran activos, al punto que el deslizamiento en el margen izquierdo de la quebrada Laguna ha imposibilitado la continuación de la construcción del puente y ha cortado el paso por el río (Marzo 2019).

- Las inestabilidades antes y después del puente sobre el **río Tapezco** se asocian sobre todo a la presencia de depósitos de un deslizamiento antiguo, con gran heterogeneidad en los materiales, presencia de fallamiento local y regional (falla Tapezco), así como suelos muy saturados (presencia de lagunas y pantanos) asociados a dicho depósito.

- Las inestabilidades antes y después del cruce sobre el río **la Vieja** son menos importantes, sin embargo se propone aquí que están relacionadas con la presencia de las fallas Zarcero y La Vieja, así como la presencia de un deslizamiento muy antiguo, lo cual junto a las acciones antrópicas (cortes de taludes > 50 m) no favorecen la estabilidad de las laderas.
- Por otra parte, las inestabilidades cerca del borde del antiguo deslizamiento de **Ronrón**, se correlacionan con las laderas de erosión de este movimiento en masa, la presencia de unidades litológicas suaves a medias (Depósitos de caída indiferenciados [tQi] y Avalancha de detritos [daQ]) y taludes antrópicos de gran altura (> 50 m).



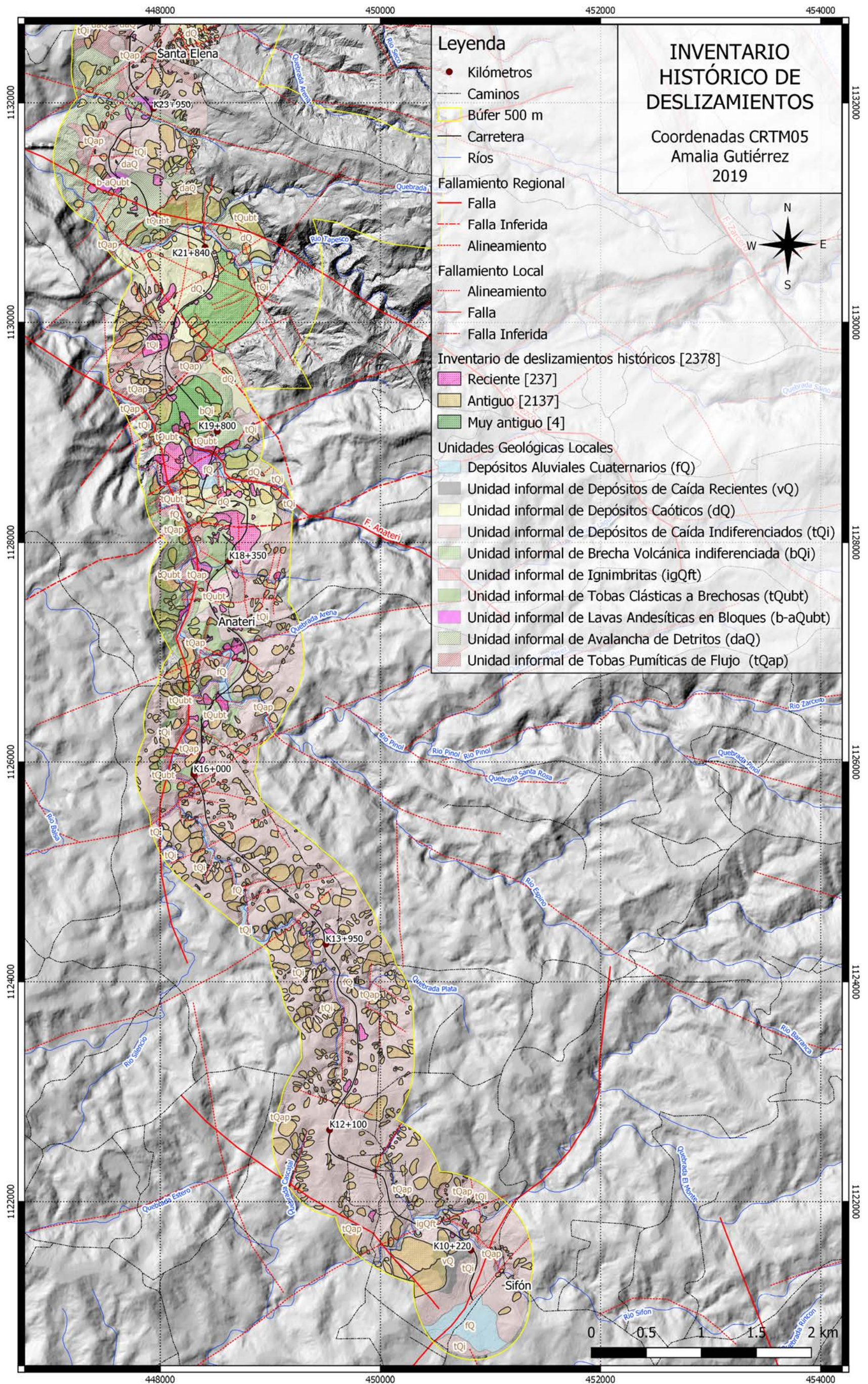


Figura 47: Mapa de inventario de deslizamientos, clasificados según su edad sobrepuesto al mapa de las unidades geológicas locales.

a) Análisis espacial

Para llevar a cabo el análisis espacial se creó una grilla de 1 km², con el fin de analizar el área cubierta por deslizamientos, así como el número de estos, por km². Sin embargo, debido a las características del área (lineal, con curvas y rumbos variables) algunos de los cuadrantes de la grilla resultante cubrían parcialmente el búfer de 500 m, de manera que los valores de área y frecuencia obtenidos poseían un grado de error debido a la influencia del área. Por lo tanto, se escogió trabajar con una grilla de 500 por 500 m para un área de 0,25 km², de manera que los cuadrantes de la grilla estuvieran en su mayoría cubiertos por el búfer de 500 m y por lo tanto por el inventario de deslizamientos, con el fin de disminuir el error. Con la herramienta “join attributes by location (summary)” se calculó la suma de las áreas deslizadas así como el número de deslizamientos por cuadrante. A continuación se muestran los mapas para frecuencia de deslizamientos y área acumulada (figura 48).

Al observar los resultados del análisis espacial con respecto al área y frecuencia de deslizamientos por 0,25 km², se nota en primera instancia que no existe necesariamente una correlación directa entre el número de deslizamientos y el área cubierta por deslizamientos en un cuadrante en particular. Esto es debido sobre todo a la presencia de grandes deslizamientos “muy antiguos”, los cuales aumentan el área sin cambiar el número de deslizamientos en dicho cuadrante. Por otro lado, existen valles fluviales y zonas con una gran cantidad de deslizamientos pequeños, lo cual aumenta la frecuencia de deslizamientos, sin incidir realmente en el área cubierta por estos.

Al comparar los resultados de estos mapas con los resultados de los estudios anteriores, se puede decir que la mayoría de los sitios identificados con alta o muy alta susceptibilidad según Ocampo (2016) o Vargas y Garro (2012), como lo son los kilómetros 14, 16 a 17, 18+500 a 22 (Quebrada Laguna), y 30 a 32 (Río La Vieja), poseen un alto porcentaje de área cubierta por deslizamientos (> 30%). Adicionalmente, a partir del kilómetro 30, área que no fue evaluada en el trabajo de Ocampo (2016), existen también sitios con un alto porcentaje de área cubierta por deslizamientos, que corresponden a las estaciones en los kilómetros 33 a 34 y el kilómetro 39.

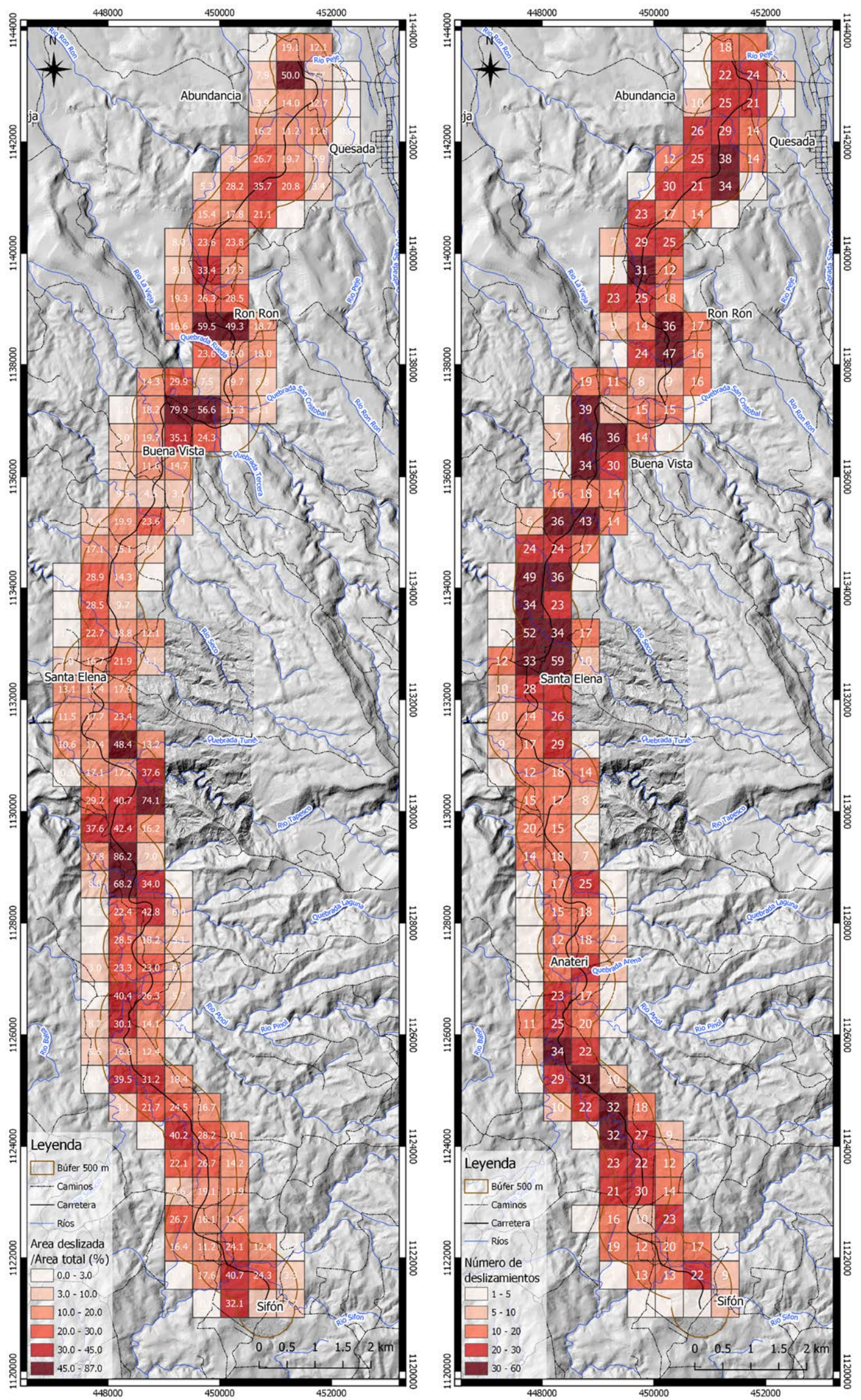


Figura 48: Mapas de cálculo del área deslizada por 0,25 km² (izquierda) y conteo de deslizamientos por 0,25 km² (derecha).

Nótese que las áreas con mayor cantidad de deslizamientos no corresponden siempre con el mayor área deslizada, lo cual es particularmente cierto para zonas con grandes deslizamientos “muy antiguos”.

b) Análisis estadístico

Para este análisis se tomaron los valores de la tabla de atributos y se analizaron estadísticamente, con el fin de determinar las relaciones entre el número de deslizamientos, el área cubierta, con respecto a la ubicación geográfica, la pendiente y la litología. Estos análisis tienen como propósito servir de insumo para la posterior aplicación de metodologías, con los parámetros obtenidos para cada uno de los factores de susceptibilidad determinados en este estudio.

En primera instancia se realizó un análisis básico del número de deslizamientos con respecto a la edad y la ubicación, el cual muestra una predominancia de deslizamientos antiguos (90%) con respecto a los recientes (10%) y muy antiguos (< 1%). Geográficamente se dividieron los deslizamientos según su provincia, cantón y distrito. Se puede observar en la figura 49.A una predominancia del número de deslizamientos en los distritos de Quesada (San Carlos) y Zapote (Alfaro Ruíz). Sin embargo, al comparar las áreas deslizadas para cada distrito con respecto al área total para el búfer de 500m (figura 49B), se observa que el distrito de Laguna presenta comparativamente un área mayor cubierta por deslizamientos (44%), lo cual se puede correlacionar con la gran cantidad de deslizamientos presentes entre los kilómetros 19 y 20, después del cruce con la Quebrada Laguna.

Tabla 11: Agrupación de las unidades litológicas según su dureza usando la misma nomenclatura que para el apartado 6.3.2 (Susceptibilidad a la inundación).

Código	Unidad litológica	Código dureza	Dureza
b-aQubt	Lavas Andesíticas en Bloques	D2	Alta
bQi	Brecha Volcánica Indiferenciada	D3	Media
daQ	Avalancha de Detritos	D3	Media
dQ	Depósitos Caóticos	D3	Media
fQ	Depósitos Aluviales Cuaternarios	D3	Media
igQft	Ignimbritas	D2	Alta
tQap	Tobas Pumíticas de Flujo	D4	Baja
tQi	Depósitos de Caída Indiferenciados	D4	Baja
tQubt	Tobas Clásticas a Brechosas	D3	Media
vQ	Depósitos de Caída Recientes	D4	Baja

Con respecto a las unidades litológicas, se comparó el área deslizada con respecto al área total (figura 49C), lo cual muestra que la unidad informal de Depósitos de caída indiferenciados [tQi] posee mayor extensión y también mayor área deslizada. Esto también se debe a que está compuesta principalmente por tobas, las cuales se alteran a arcillas y forman gran parte de los suelos del área de estudio, los cuales son propensos a deslizarse. Como no se observó ninguna tendencia con respecto a las demás unidades, estas se agruparon por dureza según la siguiente tabla. Las tobas y depósitos de caída se clasificaron como dureza baja, los depósitos mezclados (bloques decimétricos en una matriz de ceniza) y sedimentarios como dureza media y las lavas como dureza alta.



Figura 49: Análisis de los datos obtenidos del inventario de deslizamientos.

(A) Distribución del número de deslizamientos según su provincia, cantón y distrito. (B) Comparación del área deslizada con respecto al área total para cada distrito en el búfer de 500 m. (C) Comparación del área deslizada y área total para cada unidad litológica en el área de estudio. (D) Comparación del número de deslizamientos por litologías agrupadas según su dureza (D1-duro a D4-suave). (E) Gráfico acumulado de valor de pendiente promedio por cada deslizamiento, ordenadas de menor a mayor. (F) Cantidad de deslizamientos por cada rango de pendiente promedio.

Los resultados del análisis (ver figura 49D) muestran que el área total para la clasificación de litologías por dureza aumenta según disminuye la dureza; sin embargo, el área cubierta por deslizamientos no aumenta proporcionalmente (38% para D3 contra 20% para D4), lo que lleva a suponer que los depósitos volcánicos mezclados, compuestos por bloques en una matriz de ceniza, se rigen más por las propiedades físicas de la matriz que por la dureza de los bloques.

Finalmente, al analizar el gráfico acumulado de los valores de pendiente promedio por cada deslizamiento (figura 49E), se observa que la mayoría de los valores se encuentran entre 18 y 40 grados de pendiente. Para observar una tendencia, se agruparon los valores en rangos de 5 a 10 grados; el gráfico para estos rangos (figura 49F) muestra una distribución gaussiana ligeramente desplazada: el rango de pendientes con mayor cantidad de deslizamientos se encuentra entre los 25 y los 30 grados. Estos valores son ligeramente mayores a los obtenidos por Vargas & Garro (2012), cuyos resultados arrojan laderas con alta susceptibilidad de deslizamiento a partir de los 20 grados en promedio y muy alta a partir de los 30 grados en promedio, para todas las unidades litológicas. Por otra parte los resultados de Ocampo (2016) no proveen información sobre los ángulos de pendiente críticos, por implementarse únicamente sobre los taludes de la carretera; sin embargo, la zonificación obtenida concuerda relativamente bien con los resultados de Vargas & Garro (2012), por lo que se puede decir que la inestabilidad de las laderas a lo largo de la vía y en las áreas aledañas corresponde no solamente a los efectos de las acciones antrópicas sino que también responde a las condiciones naturales de los materiales y las condiciones climáticas.



Figura 50: Deslizamiento del kilómetro 21.

El evento sucedió el 21 de agosto del 2017, luego de varios días de fuertes lluvias. La imagen corresponde a un panorama por lo tanto posee cierto grado de distorsión. [Foto: 08.2017. Coordenadas: 448 027 E, 1129 830 N. Azimut: N10E]

7. GEOTECNIA

Los estudios geotécnicos tienen como propósito dar a conocer, de manera previa al inicio de la ejecución de una obra ingenieril, las condiciones del subsuelo para un adecuado diseño y planificación de la obra. En el caso de obras viales esto corresponde principalmente al diseño y construcción de taludes, rellenos, puentes (cimentaciones), muros de contención, drenajes, pavimentos y estabilización de eventuales deslizamientos.

Las propiedades físicas y mecánicas de los suelos, son derivadas de las características de la litología madre, en conjunto con las condiciones de presión, temperatura, químicas, biológicas, u otras las cuales modifican tanto la composición como el comportamiento del material a lo largo del tiempo. Algunas de las condiciones (presión, humedad, temperatura) varían de manera cíclica o estacionaria, mientras que otras (como el estado de los esfuerzos) se encuentran condicionadas tanto por factores externos como internos, y pueden variar de manera súbita o gradual.

Para depósitos de origen volcánico en el Valle Central, Mora (1998) determina que sus propiedades físicas presentan amplios rangos de variación, ligados a los diferentes estados de meteorización de los materiales, así como las variaciones en la composición mineralógica de los mismos. Sin embargo los suelos derivados de estos depósitos se agrupan principalmente en la clasificación de limos de alta plasticidad (MH) en condiciones húmedas, mientras que en condiciones secas corresponden principalmente a arenas limosas (SM). Un análisis micrográfico de las arcillas en tobas meteorizadas determina que las propiedades físicas, hidráulicas y mecánicas de estos materiales son regidas por la matriz, compuesta de partículas de tamaño limo. La resistencia cohesiva de las tobas aumenta a medida que avanza el estado de meteorización, debido al desarrollo de minerales secundarios como arcillas y óxidos de hierro, lo cual causa una disminución de la resistencia friccionante. Por otra parte los análisis micrográficos en lavas meteorizadas realizado por Mora (1998) determina que los estados avanzados de meteorización están ligados a la formación de arcillas del grupo de la alofana, las cuales presentan expansión al humedecerse y fracturación al secarse.

Como se mencionó anteriormente, existen una gran cantidad de estudios geotécnicos asociados a la planificación y construcción de la Ruta Nacional No. 35. Además de los estudios iniciales, considerados insuficientes para un adecuado diseño de construcción del proyecto (según el informe LM-PI-AT-102-12), se comisionaron al menos 18 estudios geotécnicos y geofísicos en sitios específicos del proyecto para los diferentes componentes: taludes, puentes, pavimento, manejo de aguas, zonas de falla e inestabilidad de taludes (ver anexo 1 del informe). Estos se han usado para solventar algunos de los problemas geotécnicos encontrados por las empresas constructoras, sin embargo algunos de estos problemas son tan significativos que el proyecto aún no se ha terminado y se encuentra actualmente detenido de manera indefinida.

Los datos de dichos estudios geotécnicos son importantes para la caracterización física y mecánica de los suelos presentes a lo largo de la ruta, sin embargo cubren únicamente sitios

específicos en algunas partes del área de estudio local y además las condiciones de muestreo no necesariamente son iguales a las condiciones actuales en los cortes y taludes correspondientes.

Por lo tanto, con el fin de establecer una caracterización geotécnica básica según el Sistema Unificado de Clasificación de Suelos (SUCS) para los materiales presentes en el área de estudio local, diferenciados según la litología madre; se propone en este capítulo realizar un muestreo de suelos a lo largo de la carretera (km 9+600 a km 39+400 de la Ruta Nacional No. 35). Esta información se complementó con los datos disponibles de los estudios geotécnicos anteriores, con el fin de obtener un inventario más amplio de las condiciones geotécnicas de los suelos a lo largo de la ruta.

7.1. Metodología

Una vez obtenido el mapa geológico local con las unidades informales (ver apartado 5.2) se realizó un muestreo de los suelos presentes en el área de estudio, para las unidades litológicas predominantes. Para esto se establecieron puntos de muestreo cada 1 kilómetro (aproximadamente), evitando sitios donde se tenía información de estudios previos. Se recogieron un total de 13 muestras en una gira de campo realizada en agosto del 2018, con un peso aproximado de 2 kg, y se empacaron en bolsas plásticas debidamente rotuladas.

Estas fueron luego analizadas por el Laboratorio de Geotecnia del Lanamme-UCR, con el fin de realizar los siguientes ensayos, con sus respectivas normas ASTM. Para más información sobre los ensayos y la acreditación de los mismos ver el anexo 5.

- Análisis de tamaño de partículas de suelo: vía húmeda (ASTM D 422) y vía seca con tamices (ASTM D 6913).
- Determinación del contenido de humedad (ASTM D 2216).
- Determinación de la gravedad específica con picnómetro (ASTM D 854).
- Determinación de los límites líquido, plástico e índice de plasticidad (ASTM D 4318)
- Determinación del porcentaje de finos mediante lavado (ASTM D 1140).
- Clasificación según el Sistema Unificado de Clasificación de Suelos (ASTM D 2487)

De manera paralela al muestro de suelos y obtención de los resultados se realizó una recopilación de los informes geotécnicos disponibles, con datos para los siguientes parámetros en el área del proyecto: limite líquido, limite plástico, índice de plasticidad, gravedad específica, porcentaje de finos, contenido de humedad, clasificación según el SUCS, nivel freático y ángulo de fricción interno para el material. La información recopilada proviene de los estudios de Ingeotec (2006), el cual posee datos de perforaciones en los kilómetros 11+470, 11+950, 12+630, 13+005, 17+200, 18+020, 19+900, 20+820, 20+720, 29+970, 34+740, así como los informes de Vieto (2009, 2010, 2011) en los kilómetros 17+200, 18+100, 18+100 a 18+450, 18+700 y 20+700, y finalmente la tesis de Venegas (2011) en los estacionamientos 17+807, 24+797 y 26+721.

Tabla 12: Resumen de los resultados obtenidos para los ensayos geotécnicos de suelos. Los datos específicos para cada uno de los ensayos realizados se encuentran en el Anexo 5.

Codidgo Lanamme	Codigo tesis	X_crtm05	Y_crtm05	Kilometro	Unidad litologica	LL (%)	LP (%)	IP	Gs (g/cm3)	Finos (%)	Humedad (%)	SUCS	Nombre SUCS
M-1913-18	TA-Ms1	450116	1121869	11+000	tQi	60	39	21	2.673	87.9	41.7	MH	limo elastico
M-1914-18	TA-Ms2	449557	1122555	11+900	tQi	70	52	18	2.681	97.4	72.4	MH	limo elastico
M-1915-18	TA-Ms4	449539	1124178	13+800	tQi	68	54	14	2.661	90.8	71.2	MH	limo elastico
M-1916-18	TA-Ms5	448385	1125594	15+500	tQi	54	44	10	2.539	57.4	73.8	MH	limo elastico
M-1917-18	TA-Ms8	448515	1126601	16+800	tQubt	47	40	7	2.54	41.2	48.0	SM	arena limosa
M-1918-18	TA-Ms11	448409	1128352	18+300	dQ	47	38	9	2.67	40.4	54.9	SM	arena limosa
M-1919-18	TA-Ms13	448395	1130224	21+300	dQ	79	36	43	2.658	82.1	58.5	MH	limo elastico
M-1920-18	TA-Ms17	447649	1132572	24+700	tQap	46	34	12	2.673	82.2	45.4	ML	limo
M-1921-18	TA-Ms18	448178	1132971	25+300	tQi	57	49	8	2.695	42.4	92.6	SM	arena limosa
M-1922-18	TA-Ms19	449007	1136781	29+500	tQi	51	38	13	2.755	86.5	50.8	MH	limo elastico
M-1923-18	TA-Ms20	450147	1137716	32+200	tQi	70	41	29	2.691	94.9	49.8	MH	limo elastico
M-1924-18	TA-Ms22	449800	1139605	34+500	daQ	57	41	16	2.704	65.4	46.3	CH	arcilla de alta plasticidad
M-1925-18	TA-Ms24	451615	1142649	38+350	tQi	67	47	20	2.65	89.7	60.7	MH	limo elastico

Fuentes: Informes I-1512-18 y I-1568-18, Lanamme-UCR, 2019.

Una vez compilados todos los datos para cada uno de los sitios mencionados anteriormente, estos se analizaron estadísticamente con el fin de determinar el comportamiento geotécnico general de los materiales en el área de estudio local. Adicionalmente se realizó una selección de los deslizamientos recientes del inventario de deslizamientos (apartado 6.4.2) los cuales estuvieran ubicados sobre o al costado de un talud, y contaran con al menos un sitio con datos geotécnicos a proximidad (< 100 m).

Para los 17 deslizamientos seleccionados, se realizó un análisis con respecto a la litología, la clasificación del tipo de suelo, la altura del talud, la pendiente y el ángulo de fricción del material (para algunos puntos con este dato). Los datos de litología provienen de la intersección con el mapa geológico local mientras que los datos de tipo de suelo y ángulo de fricción fueron tomados del punto de muestreo geotécnico más cercano al deslizamiento. Por otra parte la altura del talud fue calculado con base en el MED lÍdar, al realizar perfiles topográficos (de manera automatizada en QGIS) y se tomó desde la altura de carretera hasta la parte alta del talud, o hasta la base de la zona plana al pie de los deslizamientos ubicados ladera abajo del trazado de la carretera. En los casos donde el pie del deslizamiento está cubierto por los depósitos el porcentaje de error para este dato es mayor. Finalmente para la determinación del dato de pendiente, se calculó el promedio de los ángulos de reposo de un talud general con los datos de los taludes individuales, en los sistemas de berma-talud-berma. Esto presenta limitantes ya que para la mayoría de los taludes los ángulos de los taludes inferiores son cercanos a 45 o 50 grados mientras que a mayor altura disminuye el ángulo de reposo. Por lo tanto el valor final obtenido se encuentra fuertemente influenciado por la altura total del talud y el número de taludes de corte presentes.

7.2. Análisis de datos geotécnicos

En primera instancia se buscó correlacionar las unidades litológicas locales propuestas con el tipo de suelo derivado de dicha litología (ver figura 54). Para esto se buscó el tipo de suelo predominante y secundario en cada una de las unidades informales propuestas. La tabla 13 muestra cada una de las unidades con su código, la dureza propuesta en el apartado 6.4.2 según la

composición del material, y la clasificación del SUCS correspondiente según los datos de la figura 51.A.

Tabla 13: Tipo de suelo predominante para cada unidad litológica propuesta.

Código	Unidad litológica	Dureza	SUCS	Nombre
b-aQubt	Lavas Andesíticas en Bloques	Alta	-	
bQi	Brecha Volcánica Indiferenciada	Media	ML	Limo arcilloso
daQ	Avalancha de Detritos	Media	CH	Arcilla de alta plasticidad
dQ	Depósitos Caóticos	Media	MH-SM	Limo elástico-arena limosa
fQ	Depósitos Aluviales Cuaternarios	Media	SM	Arena limosa
igQft	Ignimbritas	Alta	-	
tQap	Tobas Pumíticas de Flujo	Baja	SM	Arena limosa
tQi	Depósitos de Caída Indiferenciados	Baja	MH	Limo elástico
tQubt	Tobas Clásticas a Brechosas	Media	SM	Arena limosa
vQ	Depósitos de Caída Recientes	Baja	-	

Se determinó anteriormente que dentro del área de estudio local predominan los materiales volcánicos suaves, compuestos por cenizas y tobas, las cuales en las condiciones de humedad imperantes se alteran fácilmente a arcillas. En particular la unidad de Depósitos de caída indiferenciados [tQi] cubre gran parte de área de estudio local y los suelos derivados se clasifican en su mayoría como limos elásticos (MH) de alta plasticidad (ver figura 51.A), en concordancia con lo determinado por Mora (1998). En ciertos sitios se encontraron suelos derivados clasificados como arcillas de alta plasticidad (CH), los cuales poseen problemas de estabilidad que se detallarán a continuación.

La unidad de Tobas clásticas a brechosas [tQubt] así como las Tobas pumíticas de flujo [tQap] por otra parte presentan una predominancia de arenas limosas (SM), probablemente por la presencia de clastos de pómez y lapilli, los cuales no se alteran tan fácilmente. De la misma manera los Depósitos Fluviales [fQ] presentan una predominancia de arenas (SM), en los sitios muestreados ya que debido a la metodología de muestreo no se tomaron muestras en sitios con granulometría gruesa. Por otra parte la unidad de Depósitos caóticos [dQ] presenta materiales con distintos comportamientos: tanto limos elásticos (MH) como arenas limosas (SM) en menor proporción. La unidad de Avalancha de Detritos [daQ] presenta una sola muestra, clasificada como una arcilla de alta plasticidad (CH), probablemente ligado a la edad y el avanzado estado de alteración del material. Además, al tratarse de un depósito de avalancha, corresponde a materiales depositados y parcialmente alterados antes de ser removidos, mezclados y depositados nuevamente, lo cual contribuye negativamente al estado de alteración y composición de este material. Finalmente la unidad de Brecha Volcánica Indiferenciada [bQi] posee información de una muestra clasificada como un limo arcilloso (ML), posiblemente con fuerte alteración.

Por el contrario las unidades de Lavas Andesíticas en Bloques [b-aQubt] así como las Ignimbritas [igQft] no fueron muestreadas, esto por tratarse de unidades soldadas, poco

superficiales y para las cuales hay poca presencia de suelos residuales. Para concluir, la unidad de Depósitos de Caída Reciente [vQ] no fue muestreada por encontrarse de forma localizada.

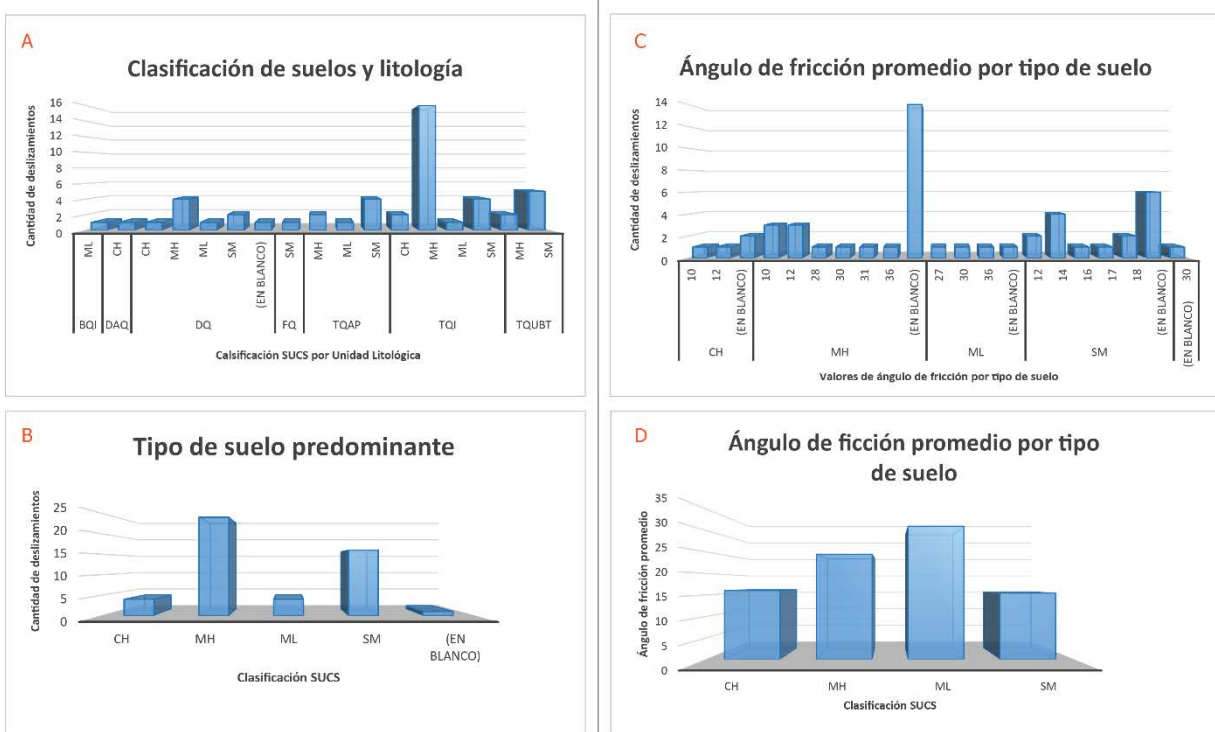


Figura 51: Análisis de datos geotécnicos.

(A) Comparación de la clasificación de suelos por unidad litológica y (B) determinación del tipo de suelo predominante para el área de estudio local. (C) Comparación de los datos de ángulo de fricción para cada material a partir del cual se calculó (D) el ángulo de fricción promedio para cada tipo de suelo.

De manera general en la figura 51.B se puede observar que en toda el área de estudio local, el tipo de suelo predominante según el muestreo realizado corresponde a los limos elásticos (MH), mientras que las arenas limosas (SM) ocupan el segundo lugar, esto se asocia a la presencia de unidades con mayor proporción de granulometría gruesa (pómez, lapilli) así como menos húmedas. La presencia de arenas es significativo para la determinación de soluciones geotécnicas en cortes y taludes, ya que debido al tamaño de grano y la falta de cohesión son más susceptibles a la erosión. Por otra parte existe la misma cantidad de muestras clasificadas como limos arcillosos (ML) que arcillas de alta plasticidad (CH). Estas últimas representan un problema de estabilidad en los cortes y taludes expuestos con este tipo de suelo, ya que al hidratarse aumenta la presión de poros, disminuyen los esfuerzos efectivos y esto provoca una disminución en la resistencia al corte permitiendo que el material fluya. Este comportamiento se observó en algunos de los taludes como por ejemplo en los kilómetros 21+900 (antes del puente sobre el río Tapezco) y 24+600 (cruce hacia Santa Elena) y se asocia a un estado avanzado de alteración de los materiales a arcillas plásticas.

Con respecto a los ángulos de fricción, en la figura 51.D se observa que el valor promedio es mayor para limos arcillosos (ML) alrededor de 35 grados, mientras que disminuye ligeramente para los limos elásticos (MH) con un valor promedio de 25 grados. Por otra parte tanto las arcillas de alta plasticidad (CH) como las arenas limosas (SM) presentan valores promedio de alrededor de 15 grados. Esto concuerda con los resultados generales para materiales volcánicos obtenidos por Mora (1998), los cuales enfatizan la extensión del rango de valores (entre 14 y 38 grados para materiales volcánicos) y la necesidad de realizar estudios específicos para cada sitio muestreado. Sin embargo hay que considerar que existe cierto grado de error debido a que los datos de ángulos de fricción fueron determinados en distintos años por distintas empresas, no obstante el rango general concuerda con los resultados de Ocampo (2016) y que determina ángulos de fricción entre 14 y 38 grados para el área de estudio (kilómetros 9+800 a 30 aproximadamente).

7.3. Correlación con litología y presencia de deslizamientos

Como se mencionó anteriormente se realizó una selección de deslizamientos con el fin de buscar alguna correlación entre los parámetros físicos y geotécnicos y la inestabilidad de laderas. Para esto se seleccionaron los deslizamientos recientes, a menos de 100 m de la carretera, asociados a algún talud de corte y que contara con por lo menos un sitio de muestreo geotécnico a proximidad. El resultado es un inventario de 17 deslizamientos para los cuales se determinó los siguientes parámetros (ver tabla 14):

- Tipo de deslizamiento: según la clasificación de Hungr (2014).
- Abreviación del tipo de deslizamiento.
- Código del tipo de movimiento: (D) deslizamiento, (FD) Flujo-deslizamiento y (Dcñ) deslizamiento en cuña.
- Altura máxima del talud correspondiente.
- Pendiente promedio de los cortes en el talud correspondiente.
- Clasificación del tipo de suelos según el Sistema Unificado de Clasificación de Suelos.
- Unidad litológica correspondiente al área deslizada.
- Ángulo de fricción del material en caso de existir ese dato para el muestreo geotécnico.

Tabla 14: Tabla de los deslizamientos seleccionados para el análisis geotécnico y los parámetros correspondientes.

fid	Edad	Tipo_D	Codigo_D	Tipo	Alt_talud	Pend_talud	SUCS	Lito	Ang_fricc
18	Reciente	Dcñ	Dcñ-r	Deslizamiento de cuña de roca	38	50	SM	tQubt	
40	Reciente	FD	FD-la	Flujo-deslizamiento de limos/arenas	41	35	MH	tQap	31
106	Reciente	D	Dc-la	Deslizamiento compuesto de limos/arenas	30	40	MH	tQi	
109	Reciente	FD	FD-ax	Flujo-deslizamiento de arcillas sensibles	24	35	ML	tQap	
135	Reciente	D	Dr-la	Deslizamiento rotacional de limos/arenas	45	35	SM	tQubt	15
136	Reciente	D	Dr-la	Deslizamiento rotacional de limos/arenas	26	45	MH	tQi	
161	Reciente	D	Dc-la	Deslizamiento compuesto de limos/arenas	28	45	ML	tQi	36
192	Reciente	D	Dr-la	Deslizamiento rotacional de limos/arenas	50	45	CH-SM	tQi	
209	Reciente	D	Dc-la	Deslizamiento compuesto de limos/arenas	11	45	MH	tQi	36
250	Reciente	D	Dr-la	Deslizamiento rotacional de limos/arenas	83	35	I	dQ	
252	Reciente	D	Dc-la	Deslizamiento compuesto de limos/arenas	100	40	MH	dQ	12
268	Reciente	D	Dc-la	Deslizamiento compuesto de limos/arenas	44	30	SM	tQap	14
275	Reciente	D	Dc-la	Deslizamiento compuesto de limos/arenas	86	40	MH	dQ	
374	Reciente	D	D-la	Deslizamiento de limos/arenas	13	45	MH	tQi	
391	Reciente	D	D-la	Deslizamiento de limos/arenas	68	35	MH	tQi	
487	Reciente	D	Dr-la	Deslizamiento rotacional de limos/arenas	26	45	MH	tQi	
1166	Reciente	D	Dr-la	Deslizamiento rotacional de limos/arenas	8	35	SM	dQ	

Con respecto a la clasificación de deslizamientos, se observa que la mayoría corresponde a deslizamientos rotacionales (Dr), compuestos (Dc) o simples (D) en limos y arcillas (ver figura 52.A), mientras que los deslizamientos de cuña (Dcñ) y los Flujos-Deslizamientos (FD) corresponden a eventos esporádicos y localizados.

Por otra parte se observa que el tipo de suelo predominante en los deslizamientos seleccionados (figura 52.B) corresponde a los limos elásticos (MH) con una menor proporción de arenas limosas (SM), esto se deriva del hecho que corresponden a los tipos de suelo predominantes en el mismo orden para toda el área de estudio local.

Con respecto a los ángulos de pendiente promedio (figura 52.C), se nota una distribución bimodal con una mayor proporción de taludes con pendientes de 35 y 45 grados, mientras que en segundo lugar se encuentran pendientes con 40 grados, y por último los extremos inferior y superior con 30 y 50 grados respectivamente. Cabe resaltar que esta distribución se ve fuertemente influenciada por tratarse de datos de pendiente promedio calculados a partir de las pendientes de los taludes individuales, los cuales son cercanos a los 45 grados para taludes de poca altura y se aproximan a los 30 grados a medida que aumenta la altura de los taludes. Esto está ligado a un diseño original de taludes con pendientes de 45 grados (1H:1V, ver Ocampo, 2016 así como LM-PI-AT-102-12), usados de manera general por Moh and Associates, Inc., sin tomar en cuenta las condiciones propias para cada talud. A raíz de la gran cantidad de problemas e inestabilidades en los taludes producto de este diseño original, se han realizado estudios específicos en algunos sitios para contar con soluciones geotécnicas adecuadas a las condiciones de los taludes. Sin embargo los problemas de inestabilidad persistentes demuestran que aún falta mejorar el diseño e implementación de soluciones geotécnicas adecuadas en los taludes (ver Ocampo, 2016).

Finalmente al comparar los deslizamientos con la litología (figura 52.D) se obtiene un comportamiento similar al observado con el inventario de deslizamientos completo (ver apartado 6.4.2) con una predominancia de deslizamientos para la unidad informal de Depósitos de caída

indiferenciados [tQi], en segundo lugar se encuentra la unidad de Depósitos caóticos [dQ] y en tercer lugar la unidad de Tobas pumíticas de flujo [tQap]. En particular el comportamiento inestable de los Depósitos caóticos [dQ] está fuertemente influenciado por tratarse de a una mezcla de materiales, poco o no consolidados, muy poroso y por lo tanto más húmedo y propenso a la remoción.

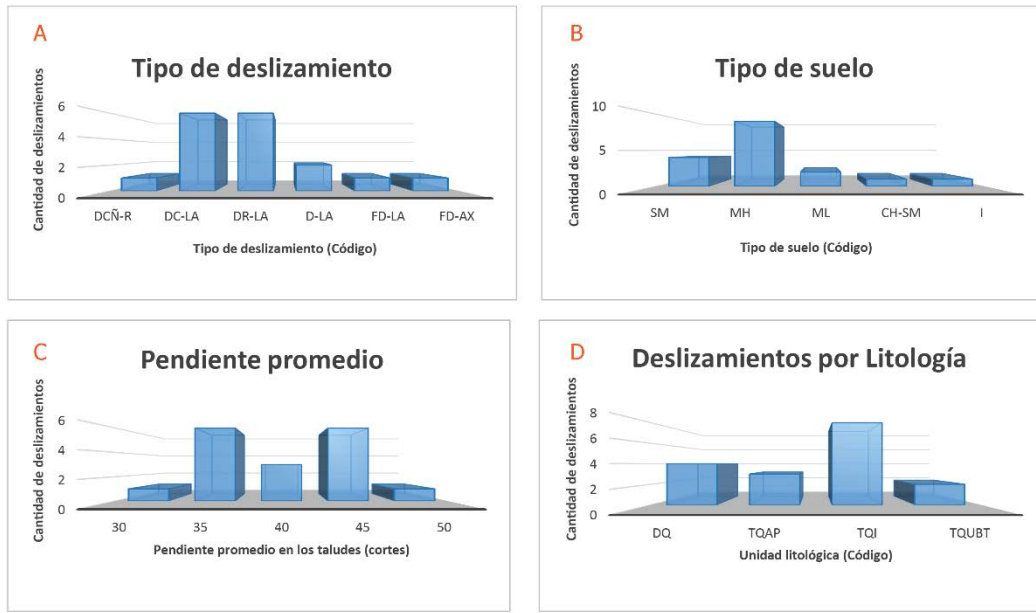


Figura 52: Análisis de los deslizamientos seleccionados. Por tipo de deslizamiento (A), tipo de suelo (B), pendiente promedio (C) y litología (D).

En una segunda etapa se realizó un análisis más complejo con respecto a la litología, el tipo de deslizamiento, los rangos de altura, la pendiente y los tipos de suelo. Con respecto a los tipos de deslizamientos se observa (figura 53.A) que para la mayoría de las litologías el tipo de movimiento corresponde a un deslizamiento (D) por tratarse de depósitos suaves, poco consolidados o fuertemente alterados; mientras que los deslizamientos en cuña de roca (Dcñ) se dan en una sola litología correspondiente a las Tobas clásticas a brechosas soldadas [tQubt] al igual que los Flujos-Deslizamientos (FD), presentes únicamente en la unidad de Tobas pumíticas de flujo [tQap].

Al separar los deslizamientos por valor de pendiente y unidad litológica, no se observan tendencias clara para la mayoría de las unidades excepto una predominancia de deslizamientos en taludes de 35 grados para las Tobas pumíticas de flujo [tQap] y de 45 grados para los Depósitos de caída indiferenciados [tQi]. Sin embargo esto está probablemente ligado a las modificaciones realizadas a los taludes a lo largo del tiempo y la tasa de éxito obtenida para los ángulos de reposo seleccionados en función de la litología y/o tipo de suelo.

Al separar los deslizamientos por valor de pendiente y tipo de suelo (figura 53.C) se observa que algunos tipos de suelos (indefinido I y arcillas de alta plasticidad CH) poseen un único valor de pendiente, sin embargo esto es por la cantidad de deslizamientos asociados a este tipo de suelo.

Por otra parte los limos elásticos (MH) poseen pendientes entre 35 y 45 grados con una mayor proporción de deslizamientos para este último valor. Los limos arcillosos (ML) al igual presentan valores de 35 y 45 grados sin una tendencia definida mientras que las arenas limosas (SM) presentan valores entre 30 y 40 grados con una mayor proporción de valores de 35 grados. Esto está probablemente ligado, al igual que para la comparación anterior, a la altura de los taludes para cada tipo de suelo y la estabilidad o inestabilidad de estos a lo largo del tiempo.

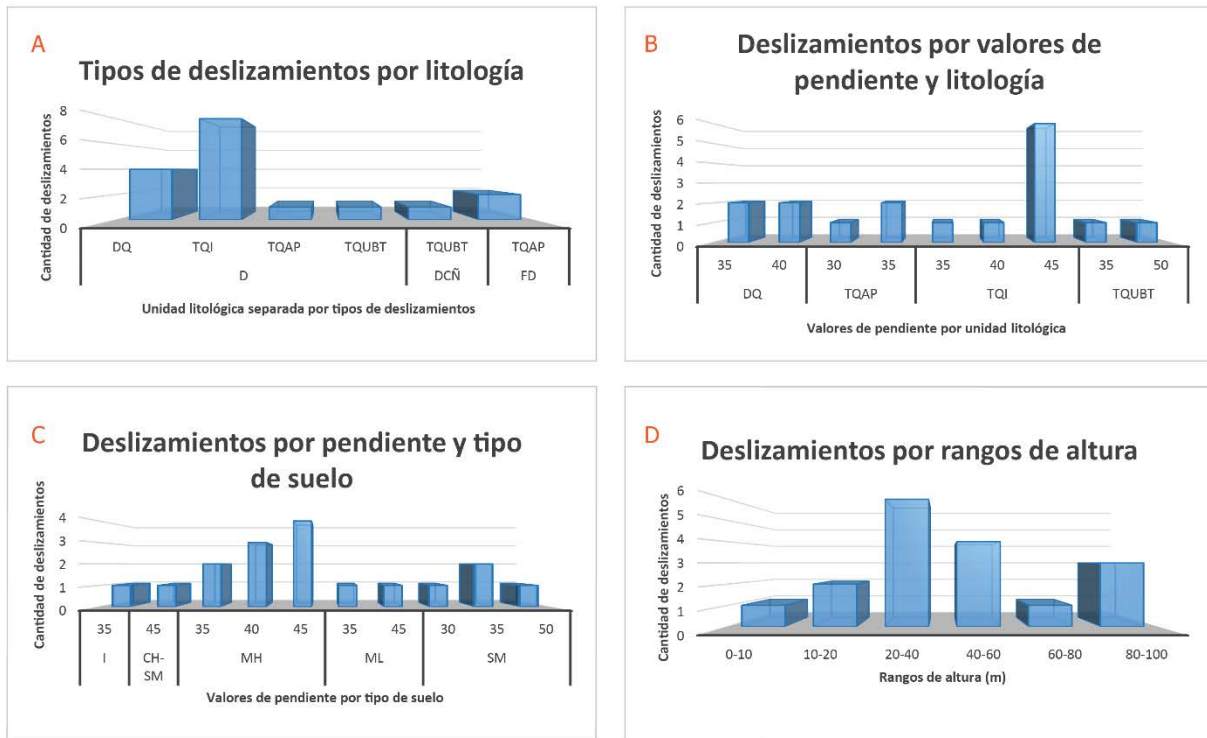


Figura 53: Análisis de los deslizamientos seleccionados (parte 2).

Por: (A) Tipo de deslizamiento y litología, (B) Valor de pendiente y litología, (C) Valor de pendiente y tipo de suelo, y (D) Rangos de altura.

Finalmente, al comparar los rangos de altura con deslizamientos (figura 53.D) se observa una distribución bimodal con un pico para deslizamientos para taludes entre 20 y 40 metros de alturas, y otro pico para taludes entre 80 y 100 m de altura. La altura de los taludes está condicionada tanto por la topografía del terreno como por las modificaciones realizadas al trazado y ancho de la carretera, la cual posiblemente haya obligado al corte de taludes con mayor altura. En general existe una mayor estabilidad del talud a medida que disminuye la altura del mismo, en este caso se observa una distribución relativamente normal con una mayor proporción de deslizamientos para taludes entre 20 y 40 metros de altura, posiblemente ligados a la topografía del terreno. En segundo lugar, la cantidad de deslizamientos en taludes de entre 80 y 100 m de altura, los cuales presentan mayores inestabilidades, probablemente son producto de una mala planificación o condiciones muy limitantes. Según las conclusiones de Ocampo (2016), estos taludes en su mayoría no cuentan con las soluciones geotécnicas adecuadas con respecto a la altura del talud.

De manera general del análisis de las condiciones geotécnicas (ver figura 54) se desprende una predominancia suelos clasificados como limos elásticos (MH) seguido por arenas limosas (SM) y presencia de arcillas de alta plasticidad (CH) en algunos sitios, producto de la meteorización intensa de materiales volcánicos, los cuales por lo general presentan problemas de estabilidad.

Con respecto a la inestabilidad de laderas y taludes, del análisis realizado se desprende una predominancia de deslizamientos rotacionales a compuestos (Dr a Dc) en los tipos de suelos predominantes, con ángulos de pendiente agrupados entre 35 y 45 grados y taludes de hasta 80 m con distribución normal, y valores anómalos de deslizamientos en taludes de más de 80 metros. Esto está ligado no solo a la topografía del terreno sino también a la escogencia del trazado original de la carretera y de los ángulos de corte, y sus posteriores modificaciones; con problemas de inestabilidad recurrentes y persistentes, en detrimento del avance y la conclusión de la construcción del proyecto.

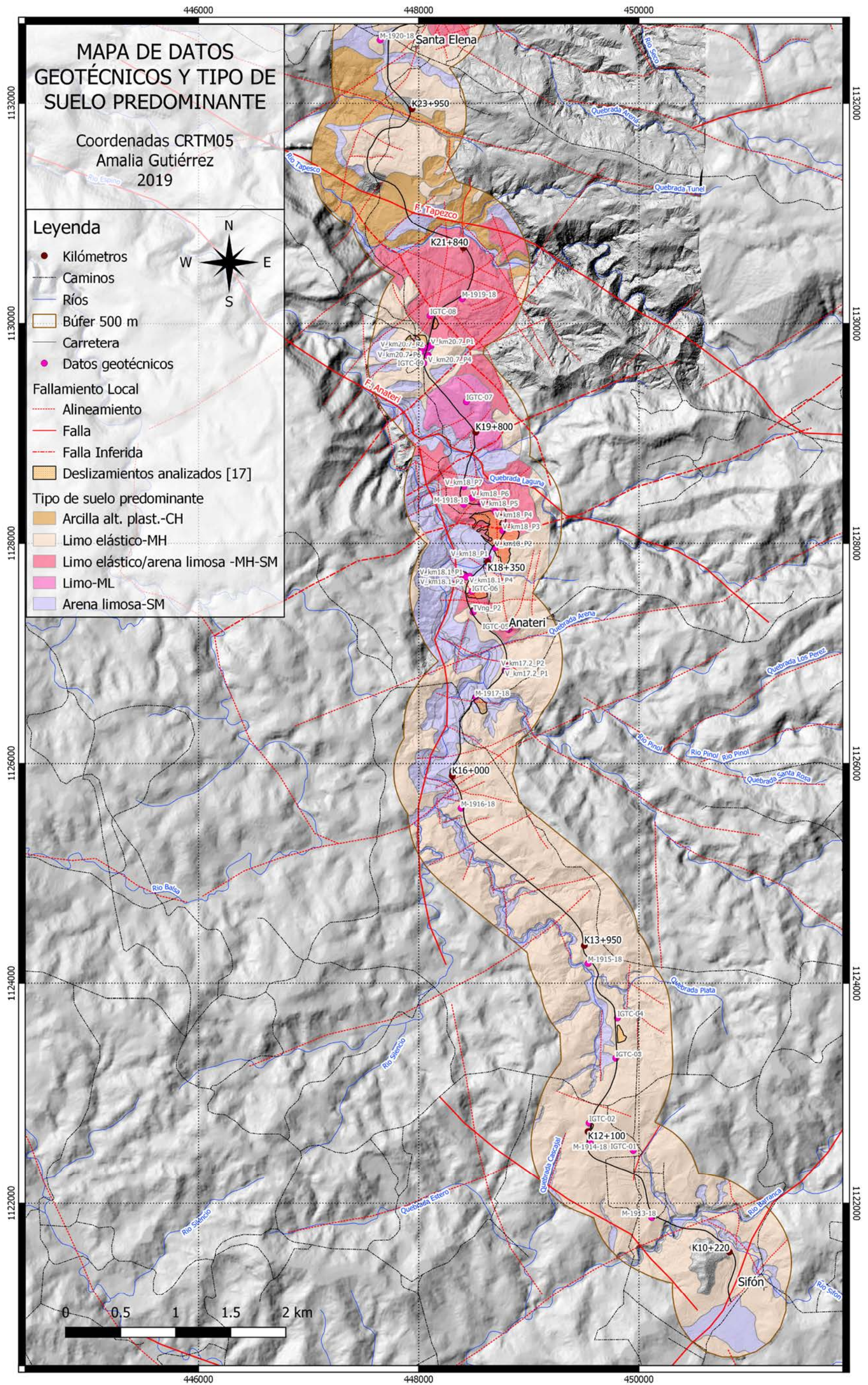


Figura 54: Mapa de tipos de suelo según la clasificación asociada a cada unidad litológica (ver tabla 12). Así como localización de los sitios de muestreo geotécnicos y los deslizamientos seleccionados para el análisis geotécnico.

8. DISCUSIÓN DE RESULTADOS

A la luz del estado del conocimiento de los componentes geológicos en el área de estudio y en particular con miras al ordenamiento territorial, o re-ordenamiento territorial esperado una vez finalizada la Ruta Nacional No. 35; se pueden agrupar los resultados obtenidos a dos escalas distintas: 1) a nivel regional y 2) a nivel local.

8.1. Contexto regional

La determinación de las morfologías presentes en el área de estudio, a nivel regional, constituye la base para la determinación posterior tanto de las condiciones geológicas como de las amenazas naturales presentes (figura 55). El área de estudio se encuentra dominada por formas de origen volcánicas asociadas a la construcción y destrucción de los conos y calderas de Palmira, Chocosuela y más recientemente el complejo Platanar-Porvenir. La presencia del vulcanismo activo, junto con el fallamiento local, constituyen los agentes internos formadores de relieve principales, mientras que, entre los agentes externos presentes, las altas precipitaciones y humedad contribuyen en mayor medida a la modificación del relieve. Por otra parte, la intensa meteorización de materiales volcánicos suaves y el fallamiento constituyen el origen de la mayoría de los grandes deslizamientos discernibles a nivel regional. Por lo tanto se desprenden, del mapa de integración regional (figura 55), las siguientes áreas con características relativamente homogéneas.

El sureste del área de estudio regional, entre Naranjo y Sarchí (A1), está dominada por formas de origen aluvial, controlados por fallamiento local y ligados a los afluentes del río Colorado. Al norte está delimitado por las laderas medias asociados al antiguo foco volcánico Bajos del Toro-Volcán Viejo, y al oeste por laderas volcánicas denudacionales y el cerro Espíritu Santo el cual corresponde a un cono volcánico erosionado y fallado. Los materiales de las formas aluviales y laderas medias pertenecen principalmente a la Formación Bajos del Toro Viejo, mientras que los materiales volcánicos de la parte oeste corresponden a Ignimbritas de la Formación Tiribí y materiales de la Formación Grifo Alto, del Grupo Aguacate en el área de estudio. Los materiales volcánicos (lavas y piroclastos) de la Formación Bajos del Toro Viejo, Tiribí y Grifo Alto, en el área de estudio presentan intensa meteorización con altos espesores de suelos, que junto al fallamiento local se traducen (posiblemente) en problemas de inestabilidad en las laderas medias a altas, mientras que, en las partes bajas de origen fluvial, índice directamente en una alta susceptibilidad a la inundación. Por otra parte, esta zona posee influencia del volcán Poás, situado 25 km al este, con peligro bajo a moderado de lluvia ácida y caída de cenizas. El desarrollo de asentamientos humanos en esta parte está concentrado en las partes planas, de origen fluvial, aunque las laderas inferiores a medias no están exentas de construcciones. Para las partes planas es de importancia la susceptibilidad a la inundación mientras que para los asentamientos en montaña predomina la susceptibilidad a la inestabilidad de laderas.

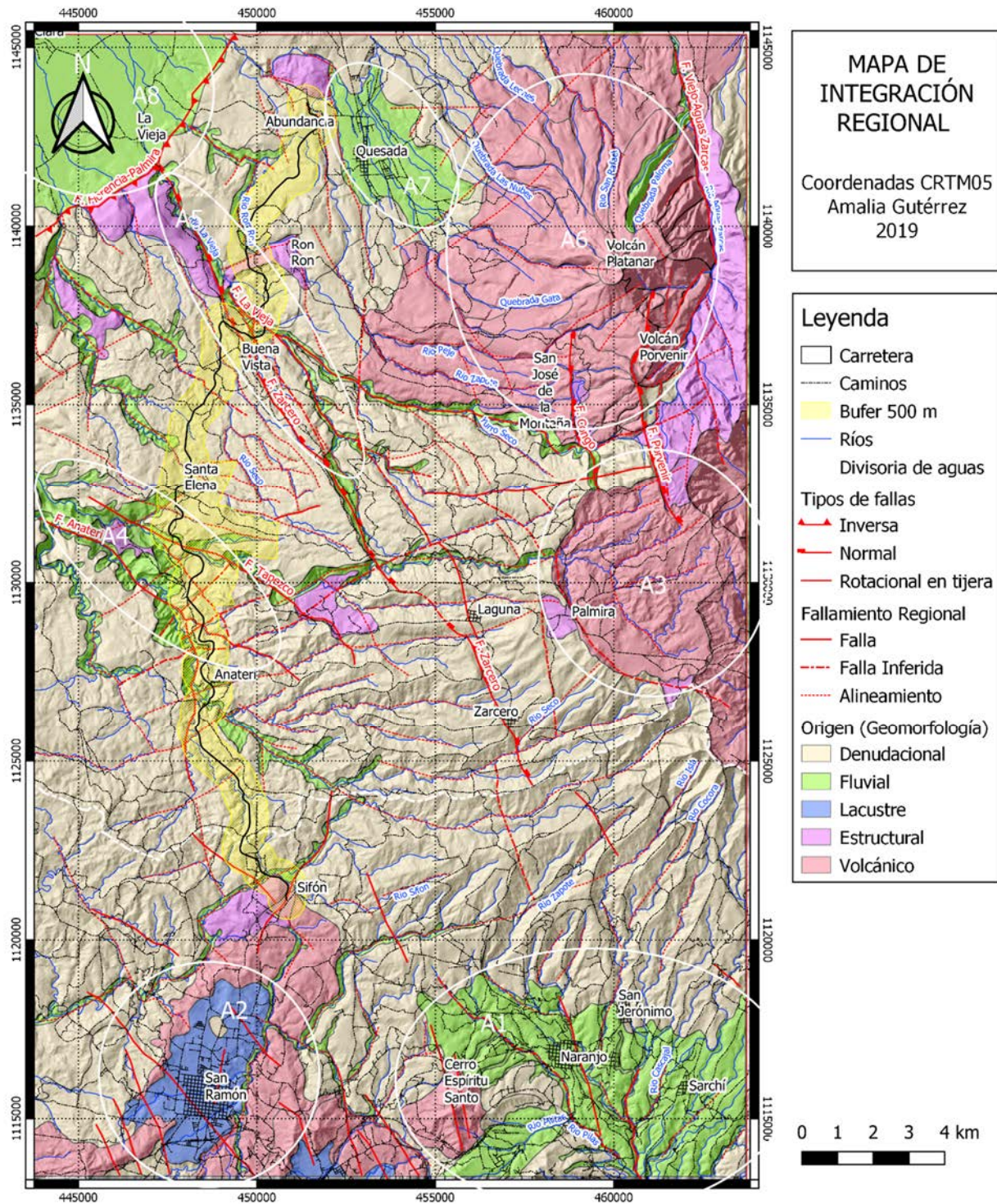


Figura 55: Mapa de integración regional.

Al suroeste del área de estudio, entre Palmares y San Ramón (A2), el relieve está dominado por calderas volcánicas erosionadas que bordean dos paleolagos homónimos de control tectónico. Al este y al oeste se encuentran delimitadas por laderas inferiores a medias de las Formaciones Bajos del Toro-Viejo (al este) y Grupo Aguacate (al oeste). En esta zona la erosión del relieve

volcánico, asociado a los montes del Aguacate, sirve de protección natural contra las condiciones climáticas, en particular el viento, así como anteriormente sirvió para el relleno y formación de los lagos en las cuencas de tracción. La presencia de depósitos sedimentarios finos en los antiguos lagos es de particular importancia ya que tanto las ciudades de Palmares como la de San Ramón se encuentran edificadas sobre estos depósitos, los cuales indican en una alta susceptibilidad a la inundación. Además, cabe investigar la influencia de los suelos derivados para efectos de la amenaza sísmica en estas dos ciudades. La influencia volcánica es muy baja a nula, tanto para el volcán Poás, como para el caso hipotético de reactivación de los volcanes Platanar, Porvenir o un nuevo cono.

La porción intermedia del área de estudio, entre los poblados de San Gerónimo al sur y San José de la Montaña al norte está compuesta principalmente por las laderas medias a superiores del complejo de Palmira-Alto Palomo-Volcán Viejo. Están limitadas al este con las calderas de erosión de Palmira, y del Volcán Viejo, las cuales poseen fuerte erosión (A3). La caldera de Palmira posee un borde con control tectónico en su parte oeste, el cual se encuentra cortado en un solo punto por donde drenan todos los ríos hacia la vertiente Caribe. Los materiales encontrados en esta zona corresponden a los depósitos de la Formación Alto Palomo, por encima de la Formación Bajos del Toro-Viejo y en menor proporción depósitos de Piroclastos Indiferenciados, las Dacitas de Zarcero y depósitos de la Unidad Zarcero (sensu Alvarado & Carr, 1993). Las laderas medias poseen fuerte erosión, así como control tectónico, en particular con la falla Zarcero la cual corta la zona de sureste a noroeste, y corresponde a una fuente sísmica de peso para la zona. La erosión de las laderas propiciadas por las condiciones climáticas propias de la vertiente Caribe, junto con el control tectónico, favorecen la presencia de inestabilidad de laderas y depresiones estructurales. Los valles fluviales asociados a fallas locales como el valle del río Espino, identificado como el posible borde de la caldera de Chocosuela; las fallas Anateri y Tapezco (A4), así como Zarcero y La Vieja (A5) son de particular importancia para el trazado de la Ruta Nacional No. 35 y la estabilidad de los puentes y taludes en la misma. En toda esta zona la amenaza sísmica es importante, asociada a la falla Zarcero, mientras que la amenaza por inundación es baja a media, con la excepción de algunas zonas al oeste del trazado de la carretera, asociado a una disminución de la elevación. En general el peligro volcánico asociado a una actividad hipotética de los volcanes Platanar o Porvenir es baja a moderada, con zonas de alto peligro a proximidad de los conos volcánicos.

En la parte intermedia, al oeste del área se encuentran cerros altamente erosionados de los Montes del Aguacate. Están compuestos por lavas fuertemente alteradas de la Formación Grifo Alto, del grupo Aguacate, con topografía suave y fallamiento menos intenso que en el resto del área. Con respecto al clima, éste es menos lluvioso y más cálido por ser más cercano a la vertiente Pacífica, a pesar de drenar en su mayoría hacia el Caribe. Esto se traduce en condiciones más favorables para la estabilidad de las laderas, así como una menor susceptibilidad a la inundación, excepto en los valles fluviales, los cuales poseen planicies de inundación más anchas. La influencia volcánica es débil y la densidad de la población es relativamente menor que en el resto del área. El límite norte corresponde al valle fluvial del río La Vieja (A5), asociado a la falla del mismo nombre.

Al norte de San José de la Montaña se encuentran los conos de los volcanes Platanar y Porvenir (A6), relativamente recientes (Pleistoceno medio a superior) compuestos por materiales volcánicos provenientes de sus respectivos conos. Morfológicamente se distinguen una gran cantidad de coladas de lava provenientes de ambos conos, las cuales llegan casi hasta Ciudad Quesada al oeste. Al este se encuentran limitados por la falla Viejo-Aguas Zarcas y el valle fluvial correspondiente. El volcán Porvenir se encuentra más al sur, es de menor tamaño, presenta coladas más cortas y una fuerte influencia tectónica: está cortada por una falla del mismo nombre y limitada por la falla Congo al oeste. Datos de la Red Sismológica Nacional indican que esta zona posee actividad sísmica reciente, así como un importante potencial sísmico. Al este del volcán Porvenir se encuentra una zona con gran cantidad de estructuras de colapso, asociados a la confluencia de las fallas Viejo-Aguas Zarcas, Porvenir y otras de menor tamaño. Por otra parte, el volcán Platanar es de mayor tamaño, posee pendientes medias a altas, y el fallamiento observado es menor. Sin embargo, se considera una fuente volcánica de mayor importancia por su tamaño y la distancia recorrida por las coladas de lava distinguibles provenientes de este cono. En caso de reactivación de alguno de los focos volcánicos, o en su defecto un nuevo foco a proximidad, esta corresponde al área con mayor tasa de peligrosidad volcánica, por coladas de lava, proyección de balísticos, caída de ceniza y emanación de gases. Gran parte de los conos está cubierta por bosques pertenecientes al Parque Nacional Juan Castro Blanco, por lo tanto, a pesar que la amenaza sísmica y volcánica hipotética es media a alta, la vulnerabilidad en esta zona es baja. Por otra parte, las condiciones climáticas en general son sumamente húmedas, sin embargo debido a las pendientes, la susceptibilidad a la inundación es baja a muy baja.

Al oeste del volcán Platanar se ubica el plano aluvial sobre el cual se encuentra Ciudad Quesada (A7), este es producto de la erosión de los materiales circundantes y la confluencia de los ríos en este sitio. Posee un relieve relativamente plano, su extensión posiblemente está limitado por alineamientos propuestos en sus alrededores y su clima es muy húmedo. Presenta una muy alta susceptibilidad a la inundación debido a la topografía, los depósitos recientes que la componen, así como la proximidad de las construcciones a los ríos. Las laderas medias a inferiores que rodean Ciudad Quesada corresponden a remanentes de la erosión de la caldera de Chocosuela, compuesta principalmente por la Unidad Bajos del Toro-Viejo y la Avalancha de Detritos -producto del colapso de la caldera-. Esto está limitado al noroeste por la traza de la falla Florencia-Palmira, la cual condiciona la presencia de cerros aislados. La edad y la composición de los materiales, así como el fallamiento local, favorecen la inestabilidad de laderas en esta zona. El peligro volcánico es moderado a bajo mientras que la susceptibilidad a la inundación es media a alta. A pesar que la densidad de población es menor que para Ciudad Quesada, sigue siendo de importancia una correcta evaluación de las amenazas presentes previo a cualquier desarrollo.

Finalmente, la esquina noroeste del área corresponde a la llanura de Santa Clara (A8), limitada al sur por la traza de la falla Florencia-Palmira, la cual separa de las laderas volcánicas del complejo Chocosuela. Esta llanura está compuesta por sedimentos provenientes de la erosión de las laderas volcánicas, y el uso del suelo es principalmente para cultivos y ganadería. Debido a la topografía

plana, la composición de los suelos, un régimen climático húmedo y la presencia de ríos de gran caudal, la amenaza por inundación en esta área es sumamente importante. Por otro lado, los peligros volcánicos son bajos a muy bajos, mientras que la amenaza sísmica es importante, debido a la presencia de la falla Florencia-Palmira.

8.2. Contexto local

A partir de la información regional tanto recopilada como determinada en este trabajo, se obtiene una visión de las condiciones del área de estudio local. Esta área corresponde no solamente al trazado de la carretera sino también a la zona circundante, la cual se extiende más allá de los 500 metros en algunas partes.

De manera general, con base en lo determinado en el apartado anterior, se puede dividir el área de estudio en al menos 5 secciones distintas, con propiedades geomorfológicas, geológicas, tectónicas, y geotécnicas relativamente homogéneas (figura 56). La primera (S1) se extiende desde el inicio del proyecto (km 9+600) hasta el puente sobre el Río Espino (km 16+800), la segunda (S2) entre el río Espino y el río Tapezco (22+200), la tercera (S3) llega hasta antes del cruce sobre el río La Vieja (km 29+900), la cuarta (S4) hasta el puente sobre el río Ronrón (34+200) y la última (S5) se extiende hasta el final del proyecto (39+400).

La primera sección (S1), presenta una topografía suave con pendientes bajas, y un grado importante de disectación con valles fluviales en “v”. Está compuesto por materiales volcánicos suaves de las unidades de Depósitos de caída indiferenciados [tQi] y Tobas pumíticas de flujo [tQap] las cuales producen grandes espesores de suelo, clasificados en su mayoría como limos elásticos (MH). Estos suelos junto al fallamiento local, en particular entre los kilómetros 14+500 y 16+800, se traducen en laderas potencialmente inestables. En efecto los valores de porcentaje de área deslizada y conteo de deslizamientos son medios a altos, con una gran cantidad de deslizamientos antiguos, ya sean de erosión fluvial o asociados a los taludes de la carretera. Las laderas denudacionales antes del kilómetro 13+000 presentan condiciones relativamente más favorables si se llegaran a considerar para la ubicación de infraestructura, en contraposición con las laderas después de dicho estacionamiento.

La segunda sección (S2), está ubicada entre los ríos Espino y Tapezco, corresponde al tramo con la mayor cantidad de condiciones adversas, tanto para el desarrollo futuro como para la construcción de la carretera. Presenta pendientes moderadas a altas con una fuerte disectación. Está constituido por una gran cantidad de laderas denudacionales con control estructural, morfologías de origen antropogénico (de corte y relleno), valles fluviales profundos, deslizamientos antiguos a muy antiguos, y depósitos asociados. El control estructural es sumamente importante con la presencia de las fallas Tapezco y Anateri y una gran cantidad de fallas hipotéticas secundarias; las cuales se traducen en una fuerte inestabilidad de laderas.

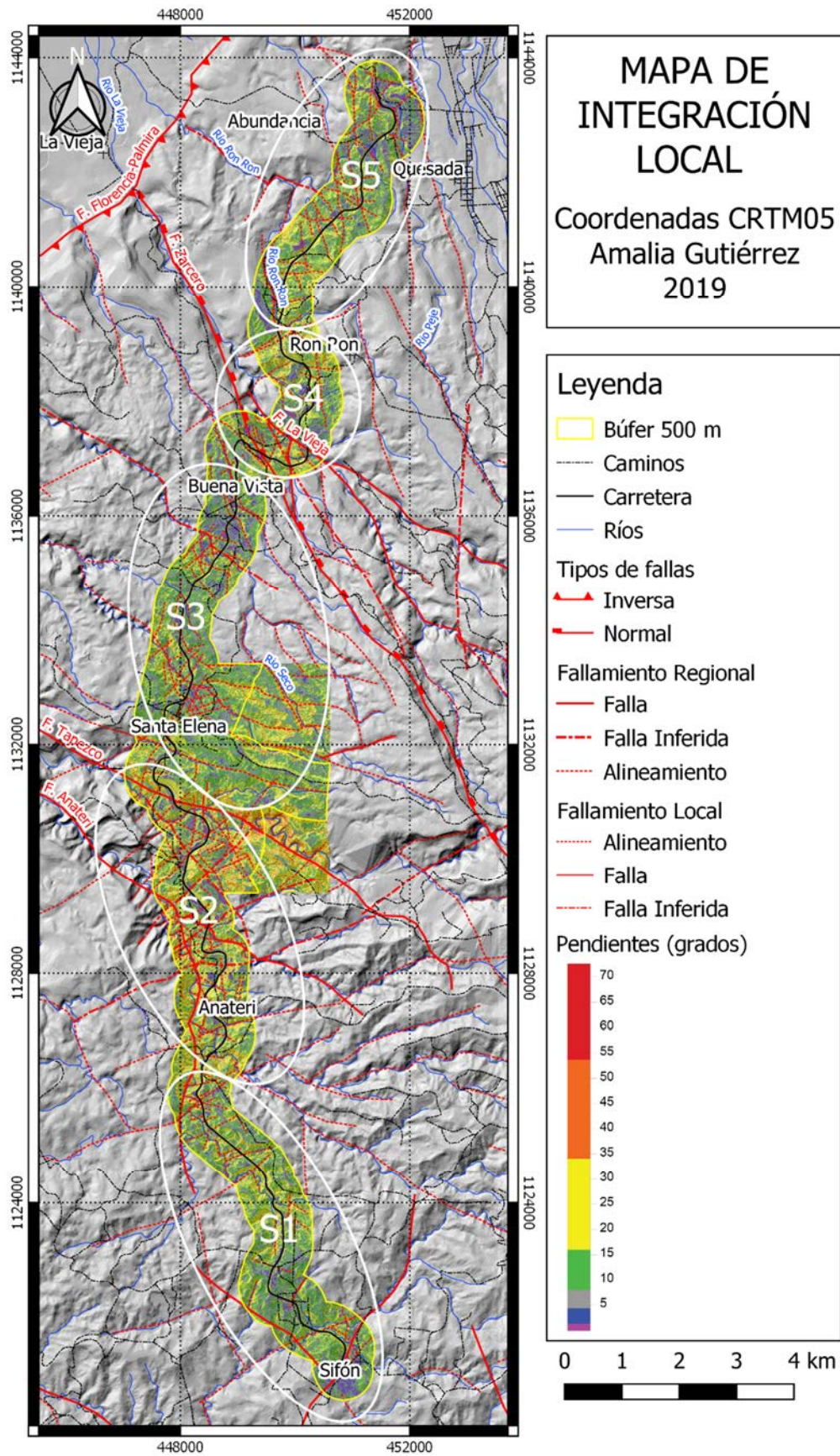


Figura 56: Mapa de integración local.

Los materiales corresponden a los depósitos suaves mencionados para la sección anterior, junto con depósitos de las unidades de Tobas clásticas a brechosas [tQubt], Brecha Volcánica indiferenciada [bQi] y Depósitos caóticos [dQ]. Estos últimos son particularmente propensos a la inestabilidad de laderas por tratarse de una mezcla de materiales alterados, con poca cohesión y compactación, y particularmente propensos a la erosión. Los tipos de suelos correspondientes son una mezcla de limos elásticos (MH) provenientes de los materiales volcánicos suaves y arenas limosas (SM) derivadas de las tobas clásticas y brechas. En esta sección se agrupan la mayoría de los deslizamientos recientes según el inventario de deslizamientos, en particular alrededor de la quebrada Laguna, la cual está cortada por una falla activa; y en general presenta un porcentaje de área deslizada alto a muy alto. Debido a las condiciones desfavorables en esta sección se recomienda la realización de estudios previos detallados antes de cualquier construcción.

La tercera sección (S3), ubicada entre los ríos Tapezco hasta antes del valle del río La Vieja, corresponde a las laderas distales del complejo Chocosuela-Palmira-El Viejo. Está compuesto por pendientes moderadas a bajas, posee valles fluviales menos profundos, una gran cantidad de cabeceras de cuenca y una sección con depósitos de deslizamientos muy antiguos. Tanto las formas de origen antropogénico como los deslizamientos son menos numerosos que para la sección anterior. El control tectónico es más predominante que para la primera sección, por encontrarse entre las fallas Tapezco y Zarcero, pero menos activo que para la segunda. Los materiales corresponden predominantemente a Depósitos de caída indiferenciados [tQi] y Avalancha de Detritos [daQ] y en menor proporción Tobas pumíticas de flujo [tQap], Tobas clásticas a brechosas [tQubt], Lavas Andesíticas en Bloques [b-aQubt] y Depósitos caóticos [dQ]. Esto se traduce en suelos de limos elásticos (MH), una pequeña proporción de arenas (SM) y depósitos de la Avalancha de Detritos [daQ] con meteorización intensa y posibilidad de alteración a arcillas de alta plasticidad (CH), las cuales presentan problemas de estabilidad. Con respecto al inventario de deslizamientos, esta sección presenta porcentaje de área deslizada bajo a medio, con conteos de deslizamientos alto a muy altos. Esto es debido a la presencia de laderas fluviales de la unidad de Avalancha de detritos [daQ], con gran cantidad de deslizamientos pequeños; así como una sub-sección (km 24+700 a 25+200) con Depósitos caóticos [dQ], compuestos por materiales blandos, un intenso fallamiento y una gran cantidad de flujos de tierra. Por lo tanto, las condiciones naturales son menos favorables antes del kilómetro 28+000 y más favorables entre este estacionamiento y el kilómetro 29+900, donde empieza el escarpe del deslizamiento muy antiguo del río La Vieja.

La cuarta sección (S4) presenta condiciones adversas, pero en menor medida que la segunda sección; ya que comprende deslizamientos muy antiguos de La Vieja y Ronrón (visible a nivel regional) y está cortado por las fallas Zarcero, La Vieja y un alineamiento en el río Ronrón. Está compuesta por laderas con pendientes medias a altas, valles fluviales estrechos, una gran cantidad de deslizamientos y formas de origen antropogénico asociadas a la carretera y el P.H: Chocosuela. La sub-sección del río La Vieja (km 29+900 a 31+900) presenta condiciones particularmente complejas por encontrarse en una zona de falla, con laderas de control estructural, y depósitos de un deslizamiento muy antiguo. En esta sub-sección se encuentran Lavas Andesíticas en Bloques

[b-aQubt], Tobas pumíticas de flujo [tQap] y Depósitos caóticos [dQ] además de los Depósitos de caída indiferenciados [tQi] y Avalancha de Detritos [daQ] presentes a lo largo de toda la sección. Esto se traduce en suelos de tipo limos elásticos (MH), con una menor proporción de arenas limosas (SM) y la posibilidad de presencia de arcillas de alta plasticidad (CH). Esto junto al fallamiento relativamente intenso, se traduce en condiciones inestables para las laderas, con valores medios a muy altos tanto para el porcentaje de área deslizada como para el conteo de deslizamientos. Por lo tanto, esta sección presenta condiciones desfavorables, y se recomienda estudios previos antes de cualquier construcción.

La última sección (S5), entre el río Ronrón y el poblado de La Abundancia, presenta pendientes suaves a medias, una cantidad importante de valles fluviales, formas de origen antropogénico, un par de laderas con control estructural y algunos deslizamientos de tamaño intermedio. Hay presencia de fallamiento local con alineamientos, pero con menos indicios de actividad que la sección anterior. Corresponde principalmente a Depósitos de caída indiferenciados [tQi] y depósitos de la Avalancha de Detritos [daQ] al igual que las secciones anteriores, así como Tobas pumíticas de flujo [tQap], Depósitos caóticos [dQ] y algunos depósitos Aluviales Cuaternarios [fQ]. Los suelos corresponden a limos elásticos (MH), arenas limosas (SM) asociados a depósitos aluviales, algunos limos (ML) y posibilidad de presencia de arcillas de alta plasticidad (CH). Con respecto a la inestabilidad de las laderas, el inventario de deslizamientos muestra porcentajes de área deslizada medios a bajos, mientras que la densidad de deslizamientos es media a muy alta. Esto es debido de nuevo a la gran cantidad de pequeños deslizamientos de erosión fluvial en los valles compuestos por materiales de la unidad de Avalancha de Detritos [daQ]. En general las condiciones son favorables; en efecto los últimos kilómetros son los más poblados del área de estudio local, siempre y cuando que se tomen previsiones para asegurar la estabilidad de las laderas y taludes.

9. CONCLUSIONES

Sobre el objetivo No. 1: Establecer las unidades geomorfológicas presentes en el área de estudio, para conocer las características geodinámicas del terreno, se concluye:

- a. La determinación de las unidades Geomorfológicas regionales es posible con el uso de bases de datos de acceso abierto: en este caso se usaron curvas 1:25 000 y 1:50 000 y otras capas del Atlas Digital de Costa Rica (2008), capas del SNIT, imágenes de Google Earth, y datos de relieve de la aplicación gratuita GeoMapApp. Las capas geoespaciales derivadas (pendiente, curvatura) se obtuvieron con las herramientas del software gratuito QGIS, por lo tanto, el acceso a la información no es una limitante para la determinación de la geomorfología regional.
- b. El área de estudio regional está compuesta principalmente de morfologías de origen volcánico, asociadas a la construcción y destrucción de los conos y calderas de Palmira, Chocosuela y más recientemente el complejo Platanar-Porvenir. Las laderas denudacionales son principalmente de origen volcánico. Las morfologías de origen estructural denudacional corresponden a escarpes de falla, cerros aislados y depresiones estructurales, condicionadas por una cantidad importante de fallas activas a nivel regional. Además, hay presencia de formas de origen fluvial y lacustre. La determinación del origen de las morfologías asienta las bases para la determinación de la geología en el área, en particular para depósitos sedimentarios recientes.
- c. Con el cese del vulcanismo, la geodinámica actual se rige principalmente por la acción de agentes externos (temperatura, humedad, escorrentía superficial, entre otros), con la presencia en menor medida de agentes internos (específicamente tectonismo); los cuales provocan la meteorización y erosión de los materiales, así como una gran cantidad de deslizamientos.
- d. La determinación de las unidades geomorfológicas regionales es de importancia pues conlleva necesariamente la identificación de las fallas y alineamientos, discernibles por rasgos morfológicos a nivel regional; así como la geodinámica del terreno, la cual sirve de base para la determinación de las amenazas naturales presentes.
- e. La recopilación bibliográfica, tanto de las unidades regionales descritas por otros autores, como para la determinación del origen, la litología y la cronología de las unidades regionales propuestas en este trabajo, permite tener una primera aproximación del contexto geológico del área.
- f. Con respecto a la determinación de las unidades geomorfológicas locales, los insumos usados (lídár y mosaico de ortofotografías) son de alto costo y acceso restringido, sin embargo, poseen un alto grado de detalle lo cual permite una delimitación sumamente

precisa de las morfologías observadas, inclusive las de origen humano, en un tiempo determinado.

- g. El uso de insumos con un alto grado de detalle conlleva una serie de retos entre los cuales se destacan: la adaptación de métodos tradicionales de clasificación de geoformas, la inclusión de morfologías de origen antropogénico de poca extensión, la escogencia de una escala de trabajo adecuada y la optimización del manejo de bases de datos de gran tamaño (peso de la información).
- h. A escala local se identificaron el mayor número de formas de origen antropogénico, ligadas a la construcción de la Ruta Nacional No. 35 y los asentamientos humanos. El segundo lugar corresponde a formas de origen fluvial, debido al alto grado de disectamiento de las laderas. Seguidamente se encuentran las formas de origen denudacional, en particular áreas con movimientos de masa y depósitos de deslizamientos antiguos, y por último algunas formas de origen estructural denudacional.
- i. Son de particular importancia las morfologías de áreas con control estructural, movimientos de masa severos, y depósitos de deslizamientos antiguos, ya que poseen condiciones intrínsecas desfavorables para la modificación del relieve. Sobresalen dos secciones del área de estudio local (16+800 a 20+200 y 29+900 a 31+900) con condiciones adversas para futuras construcciones.

Sobre el objetivo No. 2: Establecer las unidades geológicas presentes en el área de estudio, para conocer las condiciones geológicas del área, se concluye:

- a. El Mapa Geológico Regional preliminar surge de la recopilación de los mapas y trabajos geológicos principales a nivel regional, así como la extrapolación de estos para las áreas con vacíos de información. No corresponde con un mapa geológico propiamente dicho y se espera que el mapa geológico de la hoja Quesada, Escala 1:50 000 (DGM, en proceso) venga a sustituir este trabajo en los próximos años.
- b. Las unidades geológicas presentes en el área de estudio se encuentran, en su mayoría relacionadas con construcción y destrucción de los conos y calderas de Palmira (Oligoceno-Plioceno), Chocosuela (Pleistoceno Medio) y más recientemente el complejo Platanar-Porvenir (Pleistoceno Medio a superior). La parte suroeste del área está compuesta principalmente por depósitos del Grupo Aguacate y de las Formaciones Tiribí y Monteverde; la parte central por depósitos de la Unidad Bajos del Toro-Viejo, la Formación Alto Palomo y depósitos piroclásticos indiferenciados; mientras que la porción norte y noroeste está compuesto por depósitos de los volcanes Platanar y Porvenir –poco estudiados-, depósitos de Avalancha de detritos -asociados al colapso de la caldera de Chocosuela-, y depósitos sedimentarios recientes.

- c. La determinación de las unidades y formaciones geológicas oficialmente reconocidas a nivel regional sirve de base para la determinación general de las unidades geológicas visibles a escala local. Sin embargo, el grado de alteración de los materiales y la interdigitación entre los depósitos de caída de la unidad Bajos del Toro y la Formación Alto Palomo, no permite una identificación clara en el campo sin la realización de un estudio tefroestratigráfico detallado. Por lo tanto, las unidades propuestas a nivel local son unidades informales agrupadas según la litología.
- d. Para la determinación de las unidades geológicas locales, el trabajo realizado consistió en 10 giras de campo, durante las cuales se recopiló información de 72 puntos, 53 con información litológica. Se recolectaron un total de 45 muestras de mano, de las cuales se seleccionaron 16 para la elaboración de secciones delgadas. De éstas 15 fueron descritas, ya que una muestra presentaba un grado demasiado avanzado de alteración para poder ser descrita. Al clasificar estas secciones, 10 corresponden a materiales volcánicos de flujo y de caída, y 5 son lavas. La topografía corresponde a una limitante para un muestreo homogéneo del área, en particular en los valles fluviales.
- e. Las unidades geológicas locales propuestas corresponden principalmente a depósitos volcánicos: en particular Depósitos de caída indiferenciados asociadas a la formación Alto Palomo y/o unidad Bajos del Toro, brechas y lavas de la unidad Bajos del Toro, tobas pumíticas de flujo asociadas a la Formación Alto Palomo, e ignimbritas de la formación Tiribí. Por otra parte, se encontraron depósitos de avalancha de detritos asociados al colapso de la caldera de Chocosuela, así como algunos depósitos aluviales cuaternarios en los valles fluviales y planos aluviales. Los depósitos en zonas de intenso fallamiento y/o alteración, así como provenientes de deslizamientos antiguos se agruparon bajo “depósitos caóticos” ya que presentan una gran homogeneidad en los materiales, su granulometría, composición y estado de alteración.
- f. La delimitación de las unidades geológicas locales sirve de base para la determinación de las propiedades físicas y geotécnicas de los materiales presentes a lo largo de la carretera, así como para la caracterización de la inestabilidad de taludes y laderas.
- g. La recopilación de información de las fallas oficialmente identificadas a nivel regional, determina que éstas se dividen en fallas inversas con orientaciones E-W (Falla Florencia-La Palmera y varias fallas inversas) y normales con componente dextral con rumbos N-S a NW-SE (fallas Viejo-Aguas Zarcas, Zarcero, Gata, y Congo). Además de las fallas oficiales, hay fallas a nivel regional y local, las cuales poseen influencia directa sobre la carretera.

Sobre el objetivo No. 3: Identificar los sitios expuestos a las amenazas naturales (sísmica, volcánica, hidrometeorológicas, y de deslizamiento) presentes en el área de estudio, para conocer la vulnerabilidad de nuevas construcciones ante estas amenazas, se concluye:

- a. Para la determinación de la amenaza volcánica para el área de estudio regional, se tomaron en cuenta la presencia de los volcanes Poás y Arenal, este último se descartó por encontrarse demasiado alejado del área de estudio, al igual que los conos de Aguas Zarcas. Además, se realizó un mapa de peligros hipotéticos en caso de reactivación de los conos de Plantar, Porvenir o la aparición de un nuevo cono.
- b. El volcán Poás posee una influencia leve, con peligro por caída de ceniza y acidificación por ceniza, predominantemente en las partes sur y este del área de estudio. Por otra parte la aplicación de los métodos de Barrantes & Malavassi (2015) y Paniagua & Soto (1988), con valores de VEI promedio para la Cordillera Volcánica Central, permite obtener una buena aproximación de los peligros volcánicos por proyección de balísticos, caída de ceniza y acidificación en caso de reactivación de los volcanes Platanar y Porvenir, o un nuevo cono. Para el peligro de formación de lahares se realizó una aproximación basado en el método de Barrantes & Malavassi (2015), sin embargo, se recomienda una mejor estimación del volumen del material emitido -con base en estudios tefroestratigráficos locales-, así como el uso de software especializado (LaharZ, Flow2D) para la determinación del peligro por lahares.
- c. Se observa que el área de estudio local está expuesta a un nivel de peligro volcánico hipotético bajo entre el inicio del proyecto y el río Santa Clara, y moderado hasta el final del proyecto en caso de erupciones de los volcanes Platanar o Porvenir. Además, existe peligro de llegada de lahares provenientes del volcán Porvenir en la intersección entre los ríos la Vieja y Peje.
- d. Con respecto a la determinación de la amenaza sísmica para el área de estudio regional, a pesar de no contar con las herramientas necesarias para la determinación de la amenaza con métodos probabilísticos o determinísticos en sí, se contaron con tres insumos distintos: la recopilación de información sobre el potencial sísmico de las fallas oficiales (según la RSN) circundantes, la caracterización de la actividad sísmica en el área de estudio y recopilación de información sobre la amenaza sísmica según estudios regionales; los cuales permiten aproximar la exposición de las construcciones a la amenaza.
- e. Para la caracterización del potencial sísmico de las fallas regionales, se tomaron únicamente datos oficiales de la Red Sismológica Nacional (RSN) con la extensión de las fallas y determinación del potencial sísmico correspondiente. Las fallas tomadas en cuenta corresponden a las fallas Zarcero, El Viejo-Aguas Zarcas, Congo, Porvenir Florencia-Palmira, Javillos, Jamaical, Peñas Blancas, Danta, San Miguel, El Ángel y Alajucla. Las

magnitudes estimadas son de 5.8 a 6.8 M_w , mientras que los sismos históricos recopilados poseen magnitudes entre 5.3 y 6.5 M_w . La falla con mayor influencia para el área de estudio local corresponde a la falla Zarcero, la cual corta la carretera en el cruce sobre el río La Vieja según Rojas-Araya (2011) y este estudio, con un potencial de generación de un sismo de hasta 6.8 M_w .

- f. Para el área de estudio se propone la presencia de las fallas Anateri, Tapezco y La Vieja, con base en indicadores morfológicos; las cuales deberían ser comprobadas posteriormente mediante visitas de campo y correlación con la actividad sísmica local.
- g. Para la caracterización de la actividad sísmica cortical en el área de estudio regional, se extrajeron 28 sismos, con los estándares de calidad descritos del catálogo sísmico de la RSN, los cuales fueron relocalizados manualmente y adicionalmente se calcularon mecanismos focales para 2 eventos. Los dos mecanismos focales obtenidos corresponden con la extensión al norte de la falla Congo y con una falla inversa no comprobada asociada al valle de la quebrada Lajas. La actividad sísmica relocalizada muestra una predominancia de sismos entre las fallas Zarcero y La Vieja así como entre las fallas Congo y Porvenir, por lo que se infiere que estas zonas son las de mayor actividad sísmica en la actualidad.
- h. Los resultados de los estudios de amenaza sísmica regional tanto del proyecto RESIS II como para el P.H. Toro 3 determinan una elevada amenaza sísmica tanto para sismos corticales como de subducción, con eventos máximos estimados con magnitudes de 7,5 M_w tanto a nivel local como por subducción, y un PGA máximo de 0,59 g para un periodo de retorno de 5000 años. Además, estiman intensidades máximas de IX para el área de estudio, comprobadas para el terremoto de Cinchona del año 2009.
- i. Con respecto a las amenazas hidrometeorológicas, se trabajó principalmente con la susceptibilidad a la inundación, para lo cual se determinó en primera instancia los sitios con registros de inundaciones históricas usando la base de datos de DesInventar, y en segunda instancia la susceptibilidad a la inundación con base en datos geoespaciales usando la metodología de Das (2019), para lo cual se usaron datos geomorfológicos, geológicos y topográficos generados anteriormente.
- j. La información de registros históricos de desastres disponibles a través de la página del programa DesInventar, a pesar de no contar con datos de coordenadas para cada evento, son de utilidad al localizar los eventos y para la determinación de áreas propensas a sufrir los efectos de una amenaza natural, siempre y cuando existan registros para el tipo de evento correspondiente. En este caso la información se usó para la delimitación de las áreas con ocurrencia histórica (1968 a 2018) de inundaciones, la cual fue usada posteriormente para validar los resultados del método usado para la determinación de la susceptibilidad a la inundación en el área de estudio regional.

- k. El método de determinación de la susceptibilidad a la inundación propuesto por Das (2019) se construye con base en doce parámetros de influencia, la mayoría de ellos derivados de datos geoespaciales, los cuales son: la elevación, pendiente, distancia de la red de drenaje, geomorfología, densidad de drenaje, acumulación de flujo, precipitación diaria, uso del suelo, geología, índice de potencia de la corriente (SPI), índice de humedad topográfico (TWI) y curvatura. Por lo tanto, solo necesita la obtención de datos topográficos, geomorfológicos y geológicos, así como registros de precipitación y cobertura del suelo, en contraposición a métodos más complejos que requieren de datos hidrológicos o hidráulicos así como software especializado. Esto facilita su implementación en áreas con pocos datos espaciales, la cual además es posible usando únicamente software gratuito (en su mayoría herramientas de QGIS).
- l. En el mapa resultante, la mayor parte del área presenta valores de susceptibilidad a la inundación media a baja, con una susceptibilidad muy baja en las partes de mayor elevación. Al contrario, las áreas con mayor susceptibilidad corresponden a la ubicación de las llanuras aluviales de Ciudad Quesada y Santa Clara, seguidos por los depósitos aluviales de Naranjo y lacustres de San Ramón y Palmares; lo cual concuerda con los datos históricos recopilados del inventario de DesInventar. Además, se demuestra que la litología, en su clasificación por permeabilidad, posee una fuerte influencia sobre el resultado final. Finalmente, para el área de estudio local, la mayor susceptibilidad se ubica en la intersección de la carretera con el río La Vieja.
- m. Con respecto a la amenaza de deslizamientos, esta se trabajó para el área de estudio local; ya que la determinación de la amenaza regional sobrepasa los alcances de este trabajo. Al contar con información de estudios anteriores para la determinación de la inestabilidad de laderas con los métodos de Ángulo Crítico y HSQI a lo largo del proyecto, se retomaron estos resultados. Además, se realizó de un inventario de deslizamientos, con base en datos geoespaciales y con comprobación de campo, con el fin de servir de insumo para la posterior aplicación de diversas metodologías así como la comprobación de los resultados ya obtenidos por estudios anteriores.
- n. Los resultados obtenidos de la aplicación del método de Ángulo Crítico (Vargas & Garro, 2012) presentan ángulo crítico para los materiales bajos, alrededor de 15° , con valores más altos para depósitos recientes, y con susceptibilidades altas a muy altas de inestabilidad de laderas a partir de aproximadamente 20° . Por otra parte, el método HSQI (Ocampo, 2016) determina las propiedades geomecánicas generales de los materiales presentes a lo largo de la vía y concluye que las actividades antrópicas indican directamente en la mayor parte de las inestabilidades en los taludes, que las soluciones de estabilización no son las más adecuadas, y que el 57% de los 19 kilómetros analizados poseen alta susceptibilidad a

deslizarse. Según ambos estudios las zonas cerca del río Laguna y La Vieja son las más inestables del proyecto.

- o. El inventario de deslizamientos a nivel local se compone de 2137 deslizamientos “antiguos”, 237 deslizamientos “recientes” y 4 deslizamientos “muy antiguos”; corresponden a taludes de erosión deslizamientos rotacionales, traslacionales, o compuestos, y flujos de tierra. Se identificaron cinco sitios con problemas importantes de inestabilidades: en las proximidades de los ríos Espino, quebrada Laguna, río Tapezco, río La Vieja y deslizamiento de Ronrón.
- p. Del análisis estadístico del inventario se determina que hay una predominancia de deslizamientos antiguos, el distrito de Laguna presenta la mayor proporción de deslizamientos, la litología de Depósitos de caída indiferenciados [tQi] posee la mayor extensión, así como la mayor área deslizada, y que la dureza de los materiales incide en la estabilidad de las laderas, con la excepción de los depósitos compuestos que se rigen por las propiedades de la matriz (fina). Finalmente, al analizar los valores de pendiente se obtiene una mayor cantidad de deslizamientos entre 25 y 30 grados, lo cual es ligeramente superior a lo obtenido por Vargas & Garro (2012)

Sobre el objetivo No. 4: Determinar las propiedades geomecánicas básicas de cada una de las unidades geológicas identificadas, en los cortes y taludes del área de estudio, para su caracterización y que estos sirvan como parte de los insumos para poder emitir recomendaciones generales sobre el uso de la tierra en esta área, se concluye:

- a. Con base en la delimitación de las unidades geológicas locales se realizó un muestreo de suelos, para el cual se recogieron un total de 13 muestras, las cuales fueron analizadas en el laboratorio de geotecnia del LanammeUCR, con el fin de determinar las siguientes propiedades: tamaño de partículas vía húmeda y vía seca, contenido de humedad, gravedad específica (con picnómetro), límite líquido, límite plástico, índice de plasticidad, porcentaje de finos (mediante lavado), y clasificación según el SUCS. Los resultados obtenidos fueron complementados con datos de estudios geotécnicos realizados por empresas consultoras para la construcción de la Ruta Nacional No. 35, en los cuales además se encontraron datos de nivel freático y ángulos de fricción para algunos puntos. Se realizó en primero un análisis estadístico de la información recopilada y luego una selección de deslizamientos recientes para analizar las propiedades geomecánicas de las laderas correspondientes.
- b. Los datos geotécnicos analizados muestran que la mayoría de los suelos muestreados corresponden a limos elásticos (MH) asociados en su mayoría a la unidad de Depósitos de caída indiferenciados [tQi], la cual cubre gran parte del área de estudio. En menor proporción se encontraron suelos de tipo arena limosa (SM) asociados a materiales más

granulares y algunos sitios con presencia de arcillas de alta plasticidad (CH) las cuales representa potenciales problemas de estabilidad en los cortes y taludes correspondientes. En efecto en algunos sitios los materiales presentan un comportamiento fluido al hidratarse, lo cual se asocia a una alteración de cenizas a arcillas plásticas (alofana). Los rangos de valores obtenidos para los ángulos de fricción 15 a 35 grados, corresponden tanto a los resultados obtenidos tanto por Ocampo (2016) como resultados generales obtenidos por Mora (1998) para materiales volcánicos del valle central.

- c. La determinación de un tipo de suelo predominante a cada una de las unidades litológicas muestreadas permite tener una idea general de la distribución de los tipos de suelo en el área de estudio local para emitir recomendaciones del uso del suelo (junto a la información geomorfológica, geológica, y de inestabilidad de laderas), sin embargo no exime de la necesidad de realizar estudios geotécnicos para cualquier construcción que lo amerite.
- d. Para el análisis de datos geotécnicos de deslizamientos recientes asociadas a la carretera se seleccionaron 17 deslizamientos del inventario y se realizó un análisis con respecto a la litología, la clasificación del tipo de suelo, la altura del talud, la pendiente y el ángulo de fricción del material (para algunos puntos). Según la clasificación de deslizamientos la mayoría corresponden a deslizamientos rotacionales y compuestos, con algunos flujos-deslizamientos y deslizamiento de cuña.
- e. Según el análisis simple se desprende que el tipo de suelo predominante son limos elásticos (MH) seguidos de arenas limosas (SM), la litología predominante son los Depósitos de caída indiferenciados [tQi], y el ángulo de la pendiente está fuertemente condicionado por el diseño original de los taludes (1H: 1V) así como la altura de los taludes. Cabe resaltar el comportamiento inestable de los Depósitos caóticos [dQ] fuertemente influenciado por tratarse de a una mezcla de materiales, poco o no consolidados, muy porosos y por lo tanto más húmedos y propenso a la remoción.
- f. Con respecto a la inestabilidad de laderas y taludes, del análisis complejo realizado se desprende una predominancia de deslizamientos rotacionales a compuestos (Dr a Dc) en los tipos de suelos predominantes (MH), con ángulos de pendiente agrupados entre 35 y 45 grados, taludes de hasta 80 m con distribución normal, y valores anómalos de deslizamientos en taludes de más de 80 metros. Esto está ligado no solo a la topografía del terreno sino también a la escogencia del trazado original de la carretera y de los ángulos de corte, y sus posteriores modificaciones; con problemas de inestabilidad recurrentes y persistentes, en detrimento del avance y la conclusión de la construcción del proyecto.

Conclusiones Generales:

- a. A nivel regional, la determinación de las morfologías constituye la base para la determinación posterior tanto de las condiciones geológicas como de las amenazas naturales presentes. La determinación de las condiciones climáticas generales permite estimar el efecto de este sobre las unidades geológicas propuestas, que a su vez sirven para la caracterización de las amenazas. En este caso se recopiló y se aportó información sobre las amenazas sísmica y volcánica, mientras que fue posible determinar la susceptibilidad a la inundación con datos propios del área. La integración de la información topográfica, geomorfológica, climática, geológica, volcánica, y de inundación permite una caracterización general del área de estudio regional, la cual constituye un insumo básico para la reducción de la vulnerabilidad de los asentamientos humanos y el desarrollo mediante el re-ordenamiento territorial. En este sentido la información aportada por este trabajo puede usarse como complemento (nunca como base) en los estudios necesarios para la elaboración de planes de ordenamiento territorial en los cantones de San Ramón, Zarceró y San Carlos, los cuales deben necesariamente tomar en cuenta el desarrollo esperado una vez inaugurada la Ruta Nacional No. 35.
- b. A nivel local, la delimitación de las morfologías permite la determinación del origen y los mecanismos de formación de estas, en particular con respecto a las actividades humanas. Para la delimitación de las unidades geológicas locales, el trabajo de campo realizado permitió la delimitación de unidades litológicas informales, sin embargo, para una caracterización más rigurosa es necesario llevar a cabo estudios de tefrostratigrafía. La delimitación de las unidades litológicas permite la caracterización geotécnica de los materiales, predominantemente materiales volcánicos suaves y fuertemente alterados, la cual junto con la determinación del fallamiento local sirve como base para evaluar la estabilidad de las laderas. La integración de toda la información a nivel local permite una zonificación del área de estudio local, asociada a la construcción de la Ruta Nacional No. 35 así como el desarrollo posterior en los alrededores, para emitir recomendaciones generales sobre el ordenamiento del territorio. En particular cabe resaltar dos secciones (kilómetros 16+800 a 20+200 y 29+900 a 31+900) con condiciones muy desfavorables tanto para la construcción de la carretera como para el desarrollo posterior.
- c. Con respecto a la planificación y construcción de la Ruta Nacional No. 35 el análisis de la información recopilada y generada permite determinar lo siguiente:
- La determinación de las unidades geomorfológicas regionales, usando información topográfica escala 1:50 000 junto con las herramientas y metodologías usando antes del año 2000 (previo al inicio de la obra), hubiese provisto información lo suficientemente detallada para la zonificación de las pendientes y el fallamiento a lo largo del trazado de la carretera.
 - Se considera que la información presentada en este trabajo posee un grado de detalle suficiente para servir de insumo para la zonificación de la carretera con el fin de priorizar las obras necesarias para la conclusión del proyecto, así como identificar las

secciones con mayor número de condiciones desfavorables, las cuales deben ser investigadas a detalle para poder brindar soluciones geotécnicas e ingenieriles adecuadas.

- Es importante tomar en cuenta la variedad de condiciones geológicas y geotécnicas encontradas a lo largo de la carretera, para aplicar soluciones geotécnicas “a la medida” y así evitar problemas recurrentes (como por ejemplo la inestabilidad de un talud).
- Finalmente, el desarrollo esperado a lo largo de la Ruta Nacional No. 35 responde a las mismas condiciones de amenaza naturales presentes, con la diferencia que la vulnerabilidad dependerá del manejo de las construcciones, de la realización de estudios específicos y de las demás previsiones tomadas frente a las amenazas presentes.

10. RECOMENDACIONES

- a. Para la determinación de las morfologías a escala regional en cualquier área se recomienda el uso de los mapas de curvatura, en particular las curvaturas de rumbo y de perfil ya que permite no solo la identificación de drenajes, lomas y valles fluviales, sino que también son de utilidad para la identificación de conos, calderas, depresiones y laderas con control estructural. Para el cálculo de la curvatura se recomienda el uso de modelos de elevación digital creados mediante la interpolación de una grilla de puntos, en vez de curvas de nivel, para evitar la distorsión creada en el MED por el uso de curvas de nivel con métodos de interpolación lineal.
- b. Al trabajar con información lidar con alto grado de detalle, para determinación de la geología y geomorfología local en proyectos lineales, se recomienda la escogencia de una escala de trabajo adecuada que permita obtener la información necesaria sin perderse en los detalles, así como una optimización o conversión de las capas a un formato de menor peso para permitir un manejo fácil de la información sin recargar el procesamiento de los datos o imágenes.
- c. Con respecto a la geología regional propuesta en este trabajo, se recomienda el uso de la geología de la hoja Quesada escala 1:50 000 (DGM, en proceso) apenas esta esté disponible; así como una investigación a detalle de la geología y tefrostratigrafía (isopacas) de los volcanes Platanar y Porvenir, con el fin de estimar el tipo de erupción y el volumen emitido por cada uno de los conos en el pasado.
- d. Para el trabajo geológico de campo a escala local en otros proyectos lineales se recomienda la creación de una serie de mapas a lo largo de la ruta con el grado de detalle suficiente, sobre los cuales se puede registrar ó dibujar tanto la litología observada en los cortes y taludes, el uso del suelo, la presencia de escombreras, deslizamientos, cambios en los taludes etc. Esto facilita el registro de la información durante las giras de campo y permite el mapeo fluido del área para un proyecto lineal.
- e. Para investigaciones geológicas futuras a lo largo del área de estudio, se recomienda el levantamiento de columnas tefrostratigráficas y realización secciones delgadas (cuando el grado de alteración de los materiales lo permita) a lo largo de la ruta, con el fin de diferenciar y delimitar los depósitos de caída pertenecientes a las diferentes formaciones y unidades. Además, se recomienda, cuando sea posible la realización de micrografía para la determinación de los tipos de arcillas formados, producto de la alteración de las unidades litológicas presentes, lo cual sirve de insumo para una mejor caracterización geotécnica de los materiales y un mejor manejo de la inestabilidad en las laderas.

- f. Con respecto al peligro hipotético por formación de lahares en los volcanes Platanar y Porvenir, se recomienda una mejor estimación del volumen del material emitido -con base en estudios de tefroestratigrafía locales-, así como el uso de software especializado (LaharZ, Flow2D) para una modelación real de los flujos y su posible extensión.
- g. Con respecto al fallamiento local, se propone aquí la presencia de las fallas Anateri, Tapezco, y La Vieja, así como una gran cantidad de fallas hipotéticas y alineamientos, con base en indicadores morfológicos; sin embargo, se recomienda que estas sean comprobadas mediante estudios neotectónicos y sismológicos para determinar tanto su localización, extensión y movimiento así como la actividad sísmica asociada.
- h. Se recomienda el uso de la metodología de Das (2019) con las modificaciones propuestas para áreas donde se busque conocer la susceptibilidad a la inundación, ya que se considera que esta metodología es de aplicación relativamente simple, fácilmente reproducible y que los insumos básicos necesarios (información topográfica, mapas de geomorfología, geología, precipitación, y uso del suelo) se encuentran al alcance de la mayoría de los investigadores.
- i. Con respecto a la base de datos de DesInventar se recomienda su uso para la verificación de modelos de amenaza o susceptibilidad aplicados a diversas zonas, a pesar de necesitar una re-localización manual de los eventos en sitios específicos. Se espera que los próximos años la base de datos pueda integrar datos de coordenadas geográficas para mejorar su utilidad.
- j. A nivel regional se recomienda la aplicación de metodologías para la determinación de la amenaza por deslizamientos, por ejemplo la metodología Mora-Varhson y sus modificaciones: (Mora et al., 1992, Mora et al., 1993, 1994, Ruiz, 2012); usando como insumos los datos topográficos, litológicos, sísmicos y de precipitación propuestos en este trabajo, y ajustando la clasificación de los parámetros al área de estudio, mediante el uso de los resultados de los análisis al inventario de deslizamientos históricos local.
- k. Para la administración del proyecto se recomienda estudios específicos sobre la mineralogía y los tipos de arcillas presentes para los distintos tipos de suelos y depósitos de caída ó litologías correspondientes a los taludes del proyecto con el fin de poder proveer soluciones adecuadas y definitivas a los problemas de inestabilidad de laderas a lo largo de la Ruta Nacional No. 35.
- l. A la administración, se recomienda la recopilación exhaustiva de la información generada para el proyecto, para ser usada junto con los resultados propuestos de zonificación y las recomendaciones generales para el uso de la tierra a escala local. Esto con el fin de planificar y priorizar las obras faltantes, así como realizar los estudios necesarios para las zonas con

mayor cantidad de condiciones adversas, lo cual permitiría concluir de manera eficiente la construcción de la Ruta Nacional No. 35.

11. AGRADECIMIENTOS

Este trabajo es el producto de los aportes y esfuerzos de muchas personas, desde su concepción hasta su materialización.

En primera instancia quisiera agradecer profundamente a mi director y mentor el Dr. Paulo Ruiz Cubillo, por su apoyo, guía y consejos; por las oportunidades brindadas para mi desarrollo profesional, así como para la facilitación de este trabajo y por el apoyo, junto al Ing. Ronald Naranjo Ureña, para el desarrollo del trabajo de campo. Al Lanamme-UCR y las personas que trabajan allí, por las oportunidades brindadas, los consejos dados y por proveer un espacio de aprendizaje y crecimiento profesional. A mis co-directores MSc. Elena Badilla Coto y el Ing. Ronald Naranjo Ureña por su guía y consejos para la elaboración de este trabajo así como por el tiempo dedicado a la revisión y mejoramiento del mismo.

Me gustaría agradecer a mis padres Carlos e Isabelle, por su amor y apoyo incondicional a lo largo de esta etapa y a mis hermanos Amanda, Agustín, Adrián y Angelina por su apoyo y acompañamiento a pesar de la distancia. Al Lic. Juan Luis Porras Loría por su guía, motivación, consejos, apoyo y gran paciencia, los cuales me permitieron concluir este trabajo de manera exitosa.

A mis compañeros, en particular a los Lic. Juan Pablo Solano Monge por sus aportes para la descripción de los depósitos de caída así como su ayuda para el mejoramiento de este trabajo. Al Lic. Erick Aragón Valle y al geólogo Randall Caraballo por su acompañamiento y recomendaciones a lo largo de este proceso.

A la Red Sismológica Nacional por las facilidades brindadas para el análisis del catálogo sísmico, al Dr. Lepolt Linkimer y en particular a la Dra. Ivonne Arroyo por su ayuda y consejos.

A los profesores y personal docente de la Escuela Centroamericana de Geología, por la educación brindada. Al Dr. Sergio Mora Castro por su guía para la conceptualización de este trabajo, al Dr. Oscar Lücke por sus recomendaciones sobre el análisis de curvatura y al Dr. Marco Barahona Palomo por el apoyo continuo a lo largo de la carrera.

REFERENCIAS

- Acuña, A. L., Araya, C. D., Campos, F., Castro, J., Chavarria, N., Fallas, M., Miller, R., Solis, J., Vargas, J. D., Aguilar, I., Barrantes, G., Caravaca, J. D., Chamorro, C., Escobedo, D., Garcia, A., Salas, L. A., Sequeira, J., Suarez, C., Villalobos, G., Sedo, A., Duran, P., Peraldo, G., Arias, O., (2014). Informe Geológico Integral De La Parte Suroeste De La Hoja Topográfica Aguas Zarcas Y Noroeste De La Hoja Quesada, Escala 1: 50 000 - 48 págs + anexos color [Informe Campaña]. Escuela de Geología-UCR.
- Alfaro B., A. (1913). Rocas Sedimentarias de Costa Rica. –Bol. Fomento Costa Rica, 3 (12): 123-131
- Alfaro, A., Araya, M., Cambronero, L., Carmona M., T., Cascante, A., Fernandez, D., Gomez, C., Martinez, A., Montero, A., Murillo, F., Oviedo, J., Rodriguez, J. M., Santamaria, R., Sojo, D., Ureña, G., Vargas, L., Peraldo, G., Duran, P., Arias, O., (2013). Informe Geológico Integral de una parte de la Hoja Topográfica Aguas Zarcas, Escala 1:50.000 - 84 págs + anexos color [Informe Campaña]. Escuela de Geología-UCR.
- Alfaro, L. (2011). Los desastres naturales en Costa Rica. – periódico La Nación, (20 Febrero 2011), San José, Costa Rica.
- Alfaro, E. J., & Pérez-Briceño, P. M. (2014). Análisis del impacto de fenómenos meteorológicos en Costa Rica, América Central, originados en los mares circundantes. Revista de Climatología, 14.
- Alvarado B., E. (1994). Estudio geológico, ambiental y estratigrafía de la región oeste de San Ramón, parte de la hoja San Ramón (1:10 000), Alajuela, Costa Rica. 55 págs. Univ. de Costa Rica.
- Alvarado, G. E. (1986). Hallazgos de megamamíferos fósiles en Costa Rica.- Rev. Geol. Amér. Central, 4: 1-46.
- Alvarado, G. E. (1984). Aspectos petrológicos-geológicos de los volcanes y unidades lávicas del Cenozoico Superior de Costa Rica.-183 págs. Univ. de Costa Rica [Tesis de Lic.].
- Alvarado, G. E. (2009). Geología de la hoja Fortuna, Alajuela, Costa Rica. Revista Geológica de América Central, (41), 117-122.
- Alvarado, G. (2011). Los volcanes de Costa Rica: geología, historia, riqueza natural y su gente. San José: Editorial Universidad Estatal a Distancia, 386.
- Alvarado, G.E. & Arroyo, I., (2000). Los flujos piroclásticos del volcán Arenal (Costa Rica) entre 1975 y 2000: Origen, frecuencia, distribución y peligro asociado. Boletín del Observatorio Sismológico y Vulcanológico de Arenal y Miravalles, 12(23-24), 39-53.
- Alvarado, G. E., & Carr, M. J. (1993). The Platanar-Aguas Zarcas volcanic centers, Costa Rica: Spatial-temporal association of Quaternary calc-alkaline and alkaline volcanism. Bulletin of volcanology, 55(6), 443-453.
- Alvarado, G. E., & Gans, P. B. (2012). Síntesis geocronológica del magmatismo, metamorfismo y metalogenia de Costa Rica, América Central. Revista Geológica de América Central, (46).
- Alvarado, G.E., Matumoto, T., Borgia, A., Barquero, R. (1988a). Síntesis geovulcanológica del Arenal (Costa Rica): 20 años de continua actividad eruptiva (1968-1988). Boletín del Observatorio Sismológico y Vulcanológico de Arenal y Miravalles. 1 (1):1-55.
- Alvarado, G. E., Morales, L. D., Montero, W., Climent, A., & Rojas, W. (1988b). Aspectos sismológicos y morfotectónicos en el extremo occidental de la Cordillera Volcánica Central de Costa Rica. Revista Geológica de América Central, (09).
- Alvarado, G., Sandoval, M., & Madrigal, L. (2006). Referencias bibliográficas del volcán Arenal al 2006. Boletín del Observatorio Sismológico y Vulcanológico de Arenal y Miravalles. 16-17 (28-29); 61-86, San José.

- Alvarado, G., Soto, G., Ghigliotti, M. & Frullani, A., (1997). Peligro volcánico del Arenal. Boletín del Observatorio Sismológico y Vulcanológico de Arenal y Miravalles, 8(15-16), 62-82.
- Alvarado, G. E., Soto, G. J., Pullinger, C. R., Escobar, R., Bonis, S., Escobar, D., & Navarro, M. (2007). Volcanic activity, hazards, and monitoring. *Central America: Geology, Resources and Hazards*, 2, 1155-1188.
- Alvarado, L. F., & Fernández, W. (2001). Climatología de la atmósfera libre sobre Costa Rica. *Tópicos en Meteorología y Oceanografía*, 8(2), 89-115.
- Araya, M. C. & Sanabria, N. (2010). Climatología de periodos quincenales secos, húmedos y de transición en las regiones climáticas del Norte y Pacífico Norte, Costa Rica. Tesis de Licenciatura. Universidad Nacional de Costa Rica.
- Araya, R.; Valenciano, M., Masís, C. (2015) Propuesta de Plan Operativo Institucional alcaldía Municipal de Zarcero periodo 2016 –2020. PLN. Recuperado de: <https://www.crhoy.com/site/dist/documentos/especiales/elecciones-municipales/2/canton/11/PLN%20Zarcero.pdf>
- Arrieta, O. (2010). Ordenamiento Territorial y Planes Reguladores: notas al margen de nuestra experiencia en la ECG–UNA. *Revista Geográfica de América Central*, 1(44).
- A. S. T. M.-Estándar (2011). D2487-11. Standard Practice for Classification of Soils for Engineering Purposes (Unified Soil Classification System), ASTM International, West Conshohocken, PA.
- Astorga, A. (2014). Estudio neotectónico de la falla Zarcero, para la ciudad de Zarcero y alrededores. Estudio para CNE N° 2013LA. 96 pgs.
- Astorga, A. (19 de abril del 2016). Planes reguladores, ProDUS UCR y SETENA: juzgue usted. - Opinión, Diario Extra, 16 de Abril del 2016, San José, Costa Rica. Recuperado de: <http://www.diarioextra.com/Noticia/detalle/289827/planes-reguladores>
- Attwood, G. (1882). On the Geology of a part of Costa Rica: With an Appendix by WH Hudleston, Esq., MA, FGS, FCS, &c. *Quarterly Journal of the Geological Society*, 38(1-4), 328-336.
- Báez, A. (2010). La presencia del volcán Poás en la cuenca alta del río La Vieja, Alajuela, Costa Rica.-*Rev. Geol. Amér. Central*, 43: 191-200.
- Barquero, R. (2010). LOS PRINCIPALES VOLCANES ACTIVOS DE COSTA RICA: Rincón de la Vieja, Arenal, Poás, Irazú y Turrialba. Red Sismológica Nacional [Inf. Interno]. Recuperado de https://rsn.ucr.ac.cr/images/Biblioteca/Informes_Y_Otros_Documentos/Otros/Volcanes_activos_CR_2010.pdf
- Barquero, R., Alvarado, G., Soto, G. & Taylor, W. (2010). Volcán Arenal, 42 años de actividad continua. RSN (UCR-ICE) [Informe Interno]. Recuperado de: https://rsn.ucr.ac.cr/images/Biblioteca/Informes_Y_Otros_Documentos/Volcan%20Arenal/Arenal_42%20Aniversario.pdf
- Barquero, R. (2009). El terremoto de Cinchona del 8 de enero de 2009. Red Sismológica Nacional (RSN: ICE-UCR), Reporte Técnico.
- Barrantes Castillo, G., Jiménez Campos, C., & Ocón García, M. J. (2013). Deslizamientos provocados por el terremoto de Cinchona de 2009, Costa Rica. *Revista Geográfica de América Central*, 2(51).
- Barrantes, G. & Malavassi, E. (2015). “Mapa de peligros del volcán Poás”. Cuadernos de Geografía: Revista Colombiana de Geografía 24 (2): 157-172. DOI: 10.15446/rcdg.v24n2.50219

- Beckers, A., Dewals, B., Ercicum, S., Dujardin, S., Detrembleur, S., Teller, J., ... & Archambeau, P. (2013). Contribution of land use changes to future flood damage along the river Meuse in the Walloon region. *Natural Hazards and Earth System Sciences*, 13, 2301-2318.
- Benito, M. B., Lindholm, C., Camacho, E., Climent, Á., Marroquín, G., Molina, E., Rojas, W., Escobar, J.J., Talavera, E., Alvarado, G.E. & Torres, Y. (2012). A new evaluation of seismic hazard for the Central America region. *Bulletin of the Seismological Society of America*, 102(2), 504-523.
- Bergoeing, J.P. & Brenes, L. G. (2007). Las Calderas concéntricas del Volcán Platanar, Costa Rica. - *Revista Geográfica*, pp.165-178.
- Bergoeing, J. P., Brenes, L. G., Protti, R., Arce, R., Artavia, L. G., Salas, D., Carrillo, M., (1997). Atlas geomorfológico del Caribe de Costa Rica. Escala 1: 350.000, 1:1.000.000 -Escuela de Geografía, UCR, San José, Costa Rica
- Bergoeing J.P. & Malavassi E. (1982). Geomorfología de la hoja Naranja.
- Bergoeing J.P. & Malavassi E. (1982b). Carta Geomorfológica del Valle Central. Escala: 1:50.000 (9 hojas más texto) editada en colores Por Instituto Geográfico Nacional, Costa Rica.
- Bergoeing, J.P. & Masís, R. (2013). Geomorfología del área Palmares, San Ramón, Cerro Espíritu Santo, Costa Rica. *Revista Geográfica (Mexico)*, (154), pp.133-142.
- Bergoeing J.P. & Murillo H., M. (2012). El asentamiento en San Ramón y su imbricación Geomorfológica. *Revista Geográfica*, N° 152, México DF, México.
- Berrocal, M. (2008). Análisis y evaluación de la vulnerabilidad de la población de La Fortuna de San Carlos a la actividad volcánica del Volcán Arenal, Costa Rica. *Universitat de Girona*.
- Berrocal, M., & Malavassi, E. (2004). Free Visiting and Land Use Restrictions at Arenal volcano and surroundings: Costa Rica. *Memoria Asamblea General IAVCEI*. Chile: IAVCEI.
- Blunda, Y. (2010). Percepción del riesgo volcánico y conocimiento de los planes de emergencia en los alrededores del volcán Poás, Costa Rica. *Revista Geológica de América Central*, (43).
- Bonilla, J.; De Lemos, R.; Fallas, Y. (1993). Estudio geológico-ambiental de la hoja topográfica Colorado 3346-III-13, esc. 1:10 000, Naranja, Alajuela. -89 págs. Univ de Costa Rica [Campaña de Bachillerato].
- Borgia, A., Burr, J., Montero, W., Morales, L. D., & Alvarado, G. E. (1990). Fault propagation folds induced by gravitational failure and slumping of the central Costa Rica volcanic range: Implications for large terrestrial and Martian volcanic edifices. *Journal of Geophysical Research: Solid Earth*, 95(B9), 14357-14382.
- Bosque, D. (8 de abril del 2018). Ruta Sifón-La Abundancia corre riesgo de paralizarse a partir de mayo. *La Nación*. Recuperado de <https://www.nacion.com/el-pais/infraestructura/ruta-sifon-la-abundancia-corre-riesgo-de/WFWXLWXIHNBUXARHRUROMQ2YG4/story/>
- Botero, V. (2011). Zonificación de amenazas por inundación en las cuencas del Bajo Magdalena Cauca - San Jorge, Sinú y Atrato: Propuesta Metodológica y Aplicación. Universidad Nacional de Colombia, Sede Medellín. Recuperado de <http://redulacrrd.org/wp-content/uploads/2017/11/Dra.-Veronica-Botero-Fernandez..pdf>
- Botero, V., Veléz, J. I. & Caballero, J. H. (2016). Prevenir DESASTRES por inundaciones en el territorio nacional. Propiedad Pública – Apropiación Social del conocimiento. Recuperado de: <http://www.propiedadpublica.com.co/prevenir-desastres-por-inundaciones-en-el-territorio-nacional/>
- Buckley, A. (2010). Understanding curvature rasters. ESRI, ArcGis blog. Recuperado de: <https://www.esri.com/arcgis-blog/products/product/imagery/understanding-curvature-rasters/>

- Cardona, O. (2003). La necesidad de repensar de manera holística los conceptos de vulnerabilidad y riesgo. Una crítica y una revisión necesaria para la gestión. Recuperado de: <http://www.desenredando.org/public/articulos/2003/rmhcvr/>
- Casagrande, A. (1947). Sistema Unificado de Clasificación de Suelos.
- Chavarría, N. (2017). Estudio de morfología tectónica de detalle y sismotectónica de las fallas Navarro y Aguacaliente en la provincia de Cartago. -150 págs. Universidad de Costa Rica [Tesis de Lic.].
- Chávez, C. & Áviles, L. (1993). Estudio geológico integral de la hoja topográfica Cirrú 3346III-8, esc. 1:10 000, cantón de Naranjo, provincia de Alajuela, Costa Rica. -153 págs. Univ. de Costa Rica. [Campaña de Bachillerato].
- Chávez, R. & Sáenz, R. (1974). Geología de la Cordillera de Tilarán (Proyecto Aguacate, 2da Fase). - Plan Nacional Minero, Informes Técnicos y notas geológicas.- Dirección de Geología y Minas y Petróleo. San José, Costa Rica, 53 (46): 1-21.
- CIF, OIT. (2013). El riesgo de desastres: origen, evaluación, reducción y prevención en el marco del desarrollo local sostenible, Turín, Italia.
- Climent, A., Alvarado, G., & Boschini, I. (2006). PH Toro 3: estudio de amenaza sísmica. Instituto Costarricense de Electricidad, San José, 22.
- Climent, A. & Arroyo, I., (2002): P.H. Boruca, Estudio de Amenaza Sísmica. [Inf. Interno] ICE. C.S. Exploración Subterránea, PySA. 27 pp + figs.
- Climent, A., Barquero, R., & Alvarado, G., (2002): Estimación de la Amenaza Sísmica del P.H. Cariblanco. [Inf. Interno] ICE.
- Climent, A., Rojas, W., Alvarado, G., & Benito, B. (2008). Proyecto Resis II: Evaluación de la amenaza sísmica en Costa Rica. RSN: UCR-ICE, Universidad de Madrid, 125p.
- Climent, A., Taylor, W., Ciudad Real, M., Strauch, W., Santana, G., Villagran, M., Dahle, A. & Bungum, H. (1994). Spectral Strong Motion Attenuation in Central America. NORSAR Technical Report No. 2-17 RONDICA Project. 46 pp. [Inf. Técnico]
- CNE [Comisión Nacional de Atención y Prevención de Emergencias]. (2009). Mapa de amenazas naturales potenciales: hoja Poás. Escala 1: 50.000. San José: CNE.
- CNE. (2014a) Normas y elementos básicos de gestión municipal del riesgo de desastre con énfasis en prevención, control y regulación territorial. Javier Saborío Bejarano, María del Mar Saborío Víquez, Sergio Mora Castro. – 1a. Ed. – San José, C.R.
- CNE. (2014b). Gestión municipal del riesgo de desastres: normas y elementos básicos de la gestión del riesgo para su inclusión en la planificación y el aprovisionamiento presupuestal municipal, énfasis en reducción y prevención del riesgo. La Comisión, Javier Saborío Bejarano, María del Mar Saborío Víquez y Sergio Mora Castro, coautores. - 1a. Ed. - San José, C.R.
- CNE. (2014c). El riesgo derivado de la amenaza volcánica en Costa Rica. La Comisión; Red Sismológica Nacional, Guillermo E Alvarado Induni; Alberto Vargas Villalobos; Nuria Campos Sánchez e Ignacio Chaves Salas, coautores – 1a. Ed. – San José, C. R.
- CNE (2015a). Política Nacional de Gestión del Riesgo 2016-2030. –San José, Costa Rica. Recuperado de: https://www.cne.go.cr/pendiente/prevencion/POLITICA_NACIONAL_DE_GESTION_DEL_RIESGO.pdf

- CNE (2015b) Plan Nacional de Gestión del Riesgo 2016-2020. –San José, Costa Rica. Recuperado de <http://politica.cne.go.cr/index.php/plan/plan>
- Corella, C., (2016): Plan regulador que rige en San Carlos data de 1971 y, solo abarca el centro de Ciudad Quesada – Radio Santa Clara, (28 de junio de 2016), San Carlos, Costa Rica. Recuperado de: <https://www.radiosantaclara.org/articulo/plan-regulador-que-rige-en-san-carlos-data-de-1971/>
- Das, S. (2019). Geospatial mapping of flood susceptibility and hydro-geomorphic response to the floods in Ulhas basin, India. *Remote Sensing Applications: Society and Environment*, 14, 60-74.
- Dengo G (1961) Notas sobre la geología de la parte central del litoral Pacífico de Costa Rica. – Inst. Geogr. Nac. Informe Semestral Julio–Diciembre 2:43–63.
- Dengo, G. (1962). Tectonic-igneous sequence in Costa Rica. *Petrologic Studies: A Volume to Honor A.F. Buddington*, 133-161.
- Dengo, G., y Chaverri, G. (1951). Reseña geológica de la región sudoeste de la Meseta Central de Costa Rica. *Rev Univ Costa Rica* 5:313–326.
- Denyer, P. & Arias, O. (1991). Estratigrafía de la región central de Costa Rica. -*Revista Geológica de América Central*, 12:1-59.
- Denyer, P., Montero, W., & Alvarado, G. E. (2003). Atlas tectónico de Costa Rica. Editorial de la Universidad de Costa Rica.
- Denyer, P., Montero, W & Alvarado, G.E. (2009). Atlas tectónico de Costa Rica.- 79 págs. Ed. Univ. Costa Rica, San José.
- Diario Oficial de la Federación [México] (2012). Ley General de Protección Civil. 6 de junio 2012.
- Dóndoli, C. (1949). Visión rápida geoagronómica de la Meseta Central.- *Bol. Técnico*, 45-46: 1-3.
- Dóndoli, C. (1951). Zona de Palmares, Estudio geoagronómico.- *Ministerio de Agricultura e Industria* 5: 1-16.
- Echandi, E. (1981). Unidades volcánicas de la vertiente norte de la cuenca del Río Virilla. – Univ. de Costa Rica, San José [Tesis PhD].
- Esquivel, L., (2004). Restricción del uso de la tierra en áreas bajo amenaza volcánica: el caso del Arenal. En: Soto, G.J. & Alvarado, G.E. (Eds.), 2004: La Vulcanología y su entorno geoambiental, *Revista Geológica de América Central*, Número especial, 30, 203-211.
- Fajardo, H. (1994). Geología de una parte de la hoja Oratorio (1:10 000) cantones Naranjo, Palmares y San Ramón, provincia de Alajuela. -45 págs. Universidad de Costa Rica [Tesis de Lic.].
- Fernández, M. (1968). Las unidades hidrogeológicas y los manantiales de la vertiente norte de la cuenca del Río Virilla. *Informe Técnico Ministerio Agricultura Ganadería* 27:1–44.
- Ferrufino, C., & Grande, C. (2013). Tendencias del Ordenamiento Territorial en América Central y República Dominicana (2009-2012). San Salvador: Cooperación Alemana para el Desarrollo (GIZ).
- Gamboa, A. S. (2005) Estudio para la definición preliminar de prioridades en reducción de riesgos naturales de dos rutas de acceso al cantón de San Carlos. Universidad de Costa Rica [Tesis de Lic.]

- García-Ruiz, J. M., Regüés, D., Alvera, B., Lana-Renault, N., Serrano-Muela, P., Nadal-Romero, E., ... & Arnáez, J. (2008). Flood generation and sediment transport in experimental catchments affected by land use changes in the central Pyrenees. *Journal of Hydrology*, 356(1-2), 245-260.
- Geomeka. (2013). Informe Técnico DN-GMK-003. Estudio Geológico-Geotécnico del deslizamiento en el P.K. 36+800. Carretera Nacional Naranjo- Florencia. 24 diciembre 2013. [Inf. Interno]
- Geomeka (Consultores Geomecánicos de Centroamérica S.A.). (2014) Informe Técnico DN-GMK-003. Estabilización Geotécnica del Puente sobre la Quebrada Laguna. Carretera Naranjo- Florencia. 06 febrero 2014. [Inf. Interno]
- Geotérmica Italiana, (1992). Evaluación del riesgo y Monitoreo del volcán Arenal. Inf. Interno ICE. 40 pp.
- Ghigliotti, M., Frullani, A., Alvarado, G.E. & Soto, G.J., (1992). Distribución areal y características de los depósitos de tefra más recientes (1080-1968 dC) del Volcán Arenal. *Boletín del Observatorio Vulcanológico del Arenal*, 4(8), 11-33.
- González De Vallejo, L., (2002). Ingeniería geológica. - Pearson Education, España
- Herrera, A., Mata, A., Monroe, R. y Sibaja, G. (1996). Geología del área Platanar-Porvenir.-59 págs. Práctica geológica de la Escuela Centroamericana de Geología, Universidad de Costa Rica [Informe inédito].
- Herrera, J. A. & Laporte, G. (2009). Evaluación Geológica-geotécnica del riesgo de deslizamiento estaciones 31+450 a 32+050. Sector Chocosuela. Proyecto: Carretera San Ramón – San Carlos [Inf. Interno].
- Herrera, J., (2017). Plan Regulador. Presentación de Prezi. Recuperado de: <https://prezi.com/ffya1-di44c5/plan-regulador/>
- Highland, L.M., and Bobrowsky, Peter, (2008). The landslide handbook—A guide to understanding landslides: Reston, Virginia, U.S. Geological Survey Circular 1325, 129 p.
- Holdridge, L. R. (1967). Life zone ecology. Centro de Estudios Tropicales, San José, Costa Rica.
- Huapaya S. & Rojas V. (2012). Mapa Geológico de la hoja Naranjo (3346-III) 1:50.000. República de Costa Rica.- Dirección de Geología y Minas, San José, Costa Rica.
- Hungr, O., Leroueil, S., & Picarelli, L. (2014). The Varnes classification of landslide types, an update. *Landslides*, 11(2), 167-194.
- IDEAM [Instituto de Hidrología, Meteorología y Estudios Ambientales]. (2017). Guía Metodológica para la Elaboración de Mapas de Inundación. Bogotá, D.C., Colombia. 110 páginas.
- Ingeotec S. A. (2006). Ministerio de Obras Públicas y Transportes: Estudio Geotécnico de taludes en el proyecto de Carretera Naranjo-Ciudad Quesada. Alajuela, Costa Rica. -40 págs [Inf. Interno].
- Instituto Geológico y Minero de España. (2008). Mapas de peligrosidad de avenidas e inundación: Métodos, experiencia y aplicación. Ministerio de Ciencia e Innovación, Madrid, España.
- Instituto Meteorológico Nacional – IMN. (2016). Climatología Aeronáutica: Aeropuerto Internacional Juan Santamaría (Costa Rica). Inf. Interno, San José, Costa Rica.
- Instituto Meteorológico Nacional – IMN. (S.F.). Sobre algunos fenómenos meteorológicos en Costa Rica. Instituto Meteorológico Nacional. Recuperado el 22 de junio del 2019 en: <https://www.imn.ac.cr/documents/10179/20909/Compendio+sobre+fen%C3%B3menos+meteorol%C3%B3gicos>

- Kazakis, N., Kougias, I., & Patsialis, T. (2015). Assessment of flood hazard areas at a regional scale using an index-based approach and Analytical Hierarchy Process: Application in Rhodope–Evros region, Greece. *Science of the Total Environment*, 538, 555-563.
- Keipi, K., Mora-Castro, S., & Bastidas, P. (2005). Gestión de riesgo de amenazas naturales en proyectos de desarrollo: Lista de preguntas de verificación (" Checklist"). Inter-American Development Bank.
- Kerle, N., (1996). An economic evaluation and human perspective for a moderate volcanic eruption at Arenal. *Boletín del Observatorio Vulcanológico del Arenal*, 6(11-12), 53-70.
- Kussmaul, S. (1987). Petrología de las rocas intrusivas neógenas de Costa Rica. *Revista Geológica de América Central*.
- LanammeUCR, Programa de Infraestructura del Transporte (PITRA). (2012) Informe de Auditoría Técnica LM-PI-AT-102-12. Evaluación de los Estudios Geotécnicos Preliminares. Proyecto: Construcción de la Carretera a San Carlos, sección: Sifón –La Abundancia. Informe Final. Unidad de Auditoría Técnica, Diciembre 2012. [Inf. Interno].
- LanammeUCR, Programa de Infraestructura del Transporte (PITRA). (2017) Informe de Evaluación LM-PI-UE-001-2017.Ruta Nacional No. 35 Sector Sifón –La Abundancia. Unidad de Evaluación de la Red Vial Nacional. Mayo 2017 [Inf. Interno]
- Laurito, C., Valerio, A. & Pérez, E. (2005). Los Xenarthras fósiles de la localidad de Buenos Aires de Palmares (Blancano Tardío, Irvingtoniano Temprano), Provincia de Alajuela, Costa Rica.- *Rev. Geol. Amér. Central*, 33: 83-90.
- Loaiza, V. (26 de noviembre del 2012). Humedal y falla en el terreno encarecen nueva vía a San Carlos. *La Nación*. Recuperado de: <https://www.nacion.com/el-pais/servicios/humedal-y-falla-en-el-terreno-encarecen-nueva-via-a-san-carlos/VEUAJWG65FESVMYGMVDPVQDMFUQ/story/>
- Lucas, S., Alvarado, G. E. & Vega, E. (1997). The Pleistocene Mammals of Costa Rica.- *J. Vertebrate Paleontol.* 17(2): 413-427
- Macías, J. & Zamora, E. (1993). Geología de la topografía Cañuela edición 1 IGNCR, esc. 1:10 000, cantón de Naranjo, Alajuela, Costa Rica.- 93 pág., Univ. Costa Rica, San José [Campaña de Bachillerato].
- Madrigal, R. (1970). Geología del mapa básico Barranca, Costa Rica. -Informe Técnico, *Notas Geológicas*, 37.
- Madrigal, R. (1967). Estudio geológico y evaluación de algunos yacimientos de piedra pómez en Costa Rica. - *Informes Técnicos y Notas Geológicas*.- 9 pág.
- Madrigal, R., (1980). Mapa geomorfológico de Costa Rica, escala 1: 200 000: San José. SEPSA, Instituto Geográfico Nacional, 9 p.
- Madrigal, G., & Rojas, E. (1980). Manual descriptivo del mapa geomorfológico de Costa Rica (escala 1: 200.000) (No. P34/3446). Secretaría Ejecutiva de Planificación Sectorial Agropecuaria, San José, Costa Rica.
- Madrigal, G. & Rojas, E. (1980b) Mapa Geomorfológico de la hoja San José. Escala 1:250.000. San José, Costa Rica.
- Madrigal, R. & Salazar, G. (1993). Mapa Geomorfológico del Gran Área Metropolitana, escala 1:200.000 –Escuela Centroamericana de Geología, UCR.
- Malamud, B. D., Turcotte, D. L., Guzzetti, F., & Reichenbach, P. (2004). Landslide inventories and their statistical properties. *Earth Surface Processes and Landforms*, 29(6), 687-711.

- Malavassi, E. (1981). Avances en la evaluación del riesgo potencial del volcán Arenal: Costa Rica. Simposio su rischio sismico e vulcanico, Istituto Italo Latino Americano, Roma.
- Malavassi, E., & Madrigal, R. (1970). Reconocimiento geológico de la zona norte de Costa Rica. Dirección de Geología, Minas y Petróleo, Costa Rica. Informe Técnico y Nota Geológica, 9(38), 12.
- Martínez, M., Fernández, E., Valdés, J., Barboza, V., Van der Laat, R., Duarte, E., Malavassi, E., Sandoval, L., Barquero, J. & Marino, T. (2000). Chemical evolution and volcanic activity of the active crater lake of Poás volcano, Costa Rica, 1993–1997. *Journal of Volcanology and Geothermal Research*, 97(1-4), 127-141.
- Matthers, S. (1989). Costa Rican diatomite: A review of existing knowledge and future potential. - *Rev. Geol. Amér. Central*, 10: 3-17.
- MIDEPLAN (2010) Plan Nacional de Desarrollo, 2011-2014: “María Teresa Obregón Zamora”. San José, Costa Rica. Recuperado de: <http://www.documentos.una.ac.cr/bitstream/handle/unadocs/1591/PND-2011-2014-Maria-Teresa-Obregon-Zamora%5B1%5D.501.pdf?sequence=1&isAllowed=y>
- MINAM. (2013). Ordenamiento Territorial y su vinculación con la planificación de Ciudades Sostenibles. [Infografía] –Ministerio del Ambiente, Perú. Recuperado de: <http://www.minam.gob.pe/ordenamientoterritorial/wp-content/uploads/sites/18/2013/10/images.pdf>
- MIR [Ministerio del Interior], España (1995). Directriz básica de planificación de protección civil ante el riesgo de inundaciones. Boletín Oficial del Estado.
- Mitášová, H., & Hofierka, J. (1993). Interpolation by regularized spline with tension: II. Application to terrain modeling and surface geometry analysis. -*Mathematical Geology*, 25(6): 657-669.
- MIVAH. (2012) Política Nacional de Ordenamiento Territorial (PNOT) 2012 a 2040, - 40 págs., San José, Costa Rica.
- MIVAH. (2013). Plan Nacional de Ordenamiento Territorial (PLANOT) 2014 a 2020, - 94 págs., San José, Costa Rica.
- Montero, W. (2001). Neotectónica de la región central de Costa Rica: frontera oeste de la microplaca de Panamá. *Revista Geológica de América Central*, 24, 29-56.
- Montero, W., Denyer, P., Barquero, R., Alvarado, E., Cowan, H., Machette, M. N., Haller, K. M., & Dart, R. L. (1998) Map and Database of Quaternary Faults and Folds in Costa Rica and its Offshore Regions. – Reporte preliminar de USGS.
- Montero, W., Soto, G. J., Alvarado, G. E., & Rojas, W. (2010). División del deslizamiento tectónico y transtensión en el macizo del volcán Poás (Costa Rica), basado en estudios neotectónicos y de sismicidad histórica. *Revista Geológica de América Central*, (43).
- Mora Chinchilla, R. (1998). Propiedades físicas, hidráulicas y mecánicas de suelos de origen volcánico, en sitios seleccionados del Valle Central, Costa Rica. *Revista geológica de América Central*, (21), 81-98.
- Mora, R. (2010). “Peligrosidad volcánica del Poás basada en las principales erupciones históricas de 1834, 1910 y 1953- 1955”. [Tesis de maestría], Universidad de Costa Rica.
- Mora, R., Mora S. and Vahrson, W. (1992). Microzonificación de la amenaza de deslizamientos y resultados obtenidos en el área del valle central de Costa Rica. Escala 1:286 000. Cerepredenac, San José, Costa Rica.
- Mora, S. (2001). América Latina y el Caribe; las amenazas naturales y los desastres: desafíos para el desarrollo sostenible. -III Congreso Suramericano de Deslizamientos. Cartagena de Indias; Colombia.

- Mora, S. y Barrios, R. (2001). Conceptualización estratégica para la prevención de desastres en América Latina. Segundo Simposio Panamericano de Deslizamientos. Cartagena, Colombia, 9 pp. Recuperado de: <http://www.cne.go.cr/CEDO-Riesgo/docs/2641/2641.pdf>
- Mora, S., & Vahrson, W. G. (1993). Determinación "a priori" de la amenaza de deslizamientos utilizando indicadores morfodinámicos. *Tecnología ICE*, 3(1), 32-42.
- Mora, C., Vahrson, W.-G., (1994): Macrozonation methodology for landslide hazard determination. *Bulletin of the Association of Engineering Geologist* 31 (1), 49-58.
- Moreno Ceballos, C. A. (2015). Sistema de classificação Geotécnica de encostas para projetos de estradas baseado no Índice de Qualidade HSQI: Proposta Metodológica e Validação.
- M&V (Macías y Vargas Soluciones Geotécnicas S. A.). (2000). San Carlos Highway Project, Geological Report. San José Costa Rica (Para: Moh and Associates Inc.) [Inf. Interno].
- Newhall, C.G. & Hoblitt, R.P., (2002), "Constructing event trees for volcanic crises", *Bulletin of Volcanology*, 64, 3-20.
- Ocampo, M. (2016). Sistema de Clasificación Geotécnica de Pendientes para Proyectos de Carreteras Basado en el índice de Calidad HSQI: Aplicación en Costa Rica. – 189 págs. Universidad de Brasilia, Brasil [Tesis M. Sc.]
- OCDE. (2016). Costa Rica, Estudio de Apertura de Mercados, Aspectos Claves. Recuperado de: http://www.comex.go.cr/OCDE/publicaciones/MOR_28.2.24.pdf
- OMM. (1985). Seminario Itinerante Sobre Los Modelos Matemáticos Utilizados en la Predicción Hidrológica. Notas de conferencia.
- Otero, W.A., García, J.I.C., Solano, G.E.B., Castillo, M.P. y Troncoso, J. F., (1998). Guía Simplificada para la Elaboración de Plan de Ordenamiento Territorial Municipal. – 76 págs., Convenio, I.G.A.C. y Checua-CAR–GTZ-KFW, P., Santa Fe de Bogotá, Colombia.
- Palacio-Prieto, J.; Sánchez-Salazar, M.; Casado, J.; Propin, E.; Delgado, J.; Velázquez, A.; Chias, L.; Ortiz, M.; González, J.; Negrete, G.; Morales, J.; y Márquez, R. (2004). Indicadores para la caracterización y ordenamiento del territorio. Secretaría de Desarrollo Social, Secretaría del Medio Ambiente y Recursos Naturales, Instituto Nacional de Ecología, Universidad Nacional Autónoma de México, México, 161 pp.
- Paniagua, S., & Soto, G. (1988). Peligros volcánicos en el Valle Central de Costa Rica. *Ciencia y Tecnología*, 12(1), 2.
- Peraldo, G. & Montero, W. (1994). Terremotos coloniales de Costa Rica.- Editorial Tecnológica de Costa Rica, 162 p.
- Pérez, W. (2000). Vulcanología y petroquímica del evento ignimbrítico del pleistoceno medio (0.33 M.a.) del Valle Central de Costa Rica. -170 págs. Universidad de Costa Rica [Tesis de Lic.].
- Pérez, W., Alvarado, G. & Gans, P. (2006). The 322 ka Tiribí Tuff: Stratigraphy, geochronology and mechanisms of deposition of the largest and most recent ignimbrite in the Valle Central, C.R.- *Bull. Volcanology*, 69: 25-40
- Pichler, H., & Weyl, R. (1975). Magmatism and crustal evolution in Costa Rica (Central America). *Geologische Rundschau*, 64(1), 457-475.
- Porras, J. L., Linkimer, L., Arroyo, I. G., Arroyo, M., & Taylor, M. (2018). Actividad sísmica percibida en Costa Rica durante el 2017. *Revista Geológica de América Central*.

- Prosser, J. T., & Carr, M. J. (1987). Poás volcano, Costa Rica: geology of the summit region and spatial and temporal variations among the most recent lavas. *Journal of volcanology and geothermal research*, 33(1-3), 131-146.
- Radio Santa Clara. (2007). Diseño de Plan Regulador para el cantón de San Carlos – Radio Santa Clara. [14 de agosto de 2007], San Carlos, Costa Rica. Recuperado de: <https://radiosantaclara.org/article/diseno-de-plan-regulador-para-el-canton-de-san-car/>
- Retana, J. (2012). Extreme Hydrometeorological Events in Costa Rica from the Perspective of Adaptation to Climate Change. *Revista de Ciencias Ambientales*; Vol. 44, Núm. 2 (2012); 5-16.
- Roberts, A. (2001). Curvature attributes and their application to 3D interpreted horizons. *First break*, 19(2), 85-100.
- Rodríguez-Gaviria, E. (2012). Diseño Metodológico para la Evaluación del Riesgo por Inundación a Nivel Local con Información Escasa. Proyecto de Tesis Doctoral. Universidad Nacional de Colombia, Sede Medellín.
- Rojas-Araya, M., (2011): Neotectónica del extremo occidental de la Cordillera Volcánica Central, enfocado en la falla Zarcero, sector oeste del complejo volcánico Platanar-Porvenir.- 90 págs. Univ. Costa Rica, San José [Tesis de Lic.].
- Rojas, K. V. (2013). Relación entre los procesos volcano-sedimentarios y el neotectonismo de la Cuenca lacustrina de Palmares y San Ramón, Costa Rica. -123 págs. Universidad de Costa Rica [Tesis de Lic.]
- Rojas, P. (5 de junio del 2018). Pugna por humedal en vía a San Carlos suma dos años varado en Sala IV. CRHoy. Recuperado de <https://www.crhoy.com/nacionales/pugna-por-humedal-en-via-a-san-carlos-suma-2-anos-varada-en-sala-iv/>
- Rojas, W. (2007). Estudio de amenaza sísmica para el proyecto relleno sanitario “Parque de Tecnología Ambiental” en Zagala, prov. Puntarenas.- 14 págs. Univ. Costa Rica, San José [Inf. Interno por venta servicios UCR].
- Rojas, W., Montero, W., Schmidt, V., Hidalgo, P. & Moya, C. (2004): Estudio de amenaza sísmica de Costa Rica y respuesta del suelo para las diez ciudades con mayor índice de población del país. Informe técnico final, Proyecto FUNDEVI (UCR) No. 1515-01 para el Instituto Nacional de Seguros (INS). 178p.
- Rojas, W. y Schmidt, V. (2012). Fallamiento activo y consideraciones de amenaza sísmica para el “Proyecto Hidroeléctrico Javillos”, San Carlos, prov. de Alajuela. Informe técnico de la Escuela Centroamericana de Geología para empresa Hidroeléctrica Javillos SA. 42p.
- RSN -Red Sismológica Nacional, (2009). El terremoto de Cinchona del jueves 8 de enero de 2009. - *Rev. Geol. Amér. Central*, 40: 91-95.
- RSN -Red Sismológica Nacional, (2019a). Volcán Arenal. Artículo de la página web. Recuperado de <https://rsn.ucr.ac.cr/component/content/article/13-vulcanologia/volcanes-de-costa-rica/17-arenal?Itemid=225>
- RSN -Red Sismológica Nacional, (2019b). Volcán Poás. Artículo de la página web. Recuperado de <https://rsn.ucr.ac.cr/component/content/article/109-vulcanologia/volcanes-de-costa-rica-ii/31-poas?Itemid=225>
- RSN -Red Sismológica Nacional, (2019c). Volcán Porvenir. Artículo de la página web. Recuperado de: <https://rsn.ucr.ac.cr/component/content/article/109-vulcanologia/volcanes-de-costa-rica-ii/26-porvenir?Itemid=225>
- RSN -Red Sismológica Nacional, (2019d). Falla Zarcero. Artículo de la página web. Recuperado de: <https://rsn.ucr.ac.cr/component/content/article/103-actividad-sismica/fallas-activas-iii/4105-falla-zarcero?Itemid=225>

- RSN -Red Sismológica Nacional, (2019e). Falla Congo. Artículo de la página web. Recuperado de: <https://rsn.ucr.ac.cr/component/content/article/57-sismologia/fallas-activas2/4437-falla-congo?Itemid=225>
- RSN -Red Sismológica Nacional, (2019f). Falla Porvenir. Artículo de la página web. Recuperado de: <https://rsn.ucr.ac.cr/component/content/article/103-actividad-sismica/fallas-activas-iii/4753-falla-porvenir?Itemid=225>
- RSN -Red Sismológica Nacional, (2019g). Falla Viejo-Aguas Zarcas. Artículo de la página web. Recuperado de: <https://rsn.ucr.ac.cr/component/content/article/103-actividad-sismica/fallas-activas-iii/4750-falla-viejo-aguas-arcas?Itemid=225>
- RSN -Red Sismológica Nacional, (2019h). Falla Florencia-Palmira. Artículo de la página web. Recuperado de: <https://rsn.ucr.ac.cr/component/content/article/57-sismologia/fallas-activas2/4433-falla-florencia-palmira?Itemid=225>
- RSN -Red Sismológica Nacional, (2019i). Falla Javillos. Artículo de la página web. Recuperado de: <https://rsn.ucr.ac.cr/component/content/article/99-actividad-sismica/fallas-activas-ii/4521-falla-javillos?Itemid=225>
- RSN -Red Sismológica Nacional, (2019j). Falla Jamaical. Artículo de la página web. Recuperado de: <https://rsn.ucr.ac.cr/component/content/article/99-actividad-sismica/fallas-activas-ii/4457-falla-jamaical?Itemid=225>
- RSN -Red Sismológica Nacional, (2019k). Falla Peñas Blancas. Artículo de la página web. Recuperado de: <https://rsn.ucr.ac.cr/component/content/article/99-actividad-sismica/fallas-activas-ii/4570-falla-penas-blancas?Itemid=225>
- RSN -Red Sismológica Nacional, (2019l). Falla Danta. Artículo de la página web. Recuperado de: <https://rsn.ucr.ac.cr/component/content/article/57-sismologia/fallas-activas2/3516-falla-danta?Itemid=225>
- RSN -Red Sismológica Nacional, (2019m). Falla San Miguel. Artículo de la página web. Recuperado de: <https://rsn.ucr.ac.cr/component/content/article/103-actividad-sismica/fallas-activas-iii/2786-falla-san-miguel?Itemid=225>
- RSN -Red Sismológica Nacional, (2019n). Falla Carbonera. Artículo de la página web. Recuperado de: <https://rsn.ucr.ac.cr/component/content/article/57-sismologia/fallas-activas2/4012-falla-carbonera?Itemid=225>
- RSN -Red Sismológica Nacional, (2019o). Falla Ángel. Artículo de la página web. Recuperado de: <https://rsn.ucr.ac.cr/component/content/article/57-sismologia/fallas-activas2/4013-falla-angel?Itemid=225>
- Ruiz, P. (2012). Reconstruction of the Paleo and Neo stages of Poás and Turrialba volcanoes, Costa Rica: Competing processes of growth and destruction. [Tesis doctoral]. Rutgers University, New Jersey.
- Ruiz, P., Gazel, E., Alvarado, G., Carr, M., & Soto, G. (2010). Caracterización geoquímica y petrográfica de las unidades geológicas del macizo del volcán Poás, Costa Rica. *Revista Geológica de América Central*, (43).
- Ruiz P., Mana S., Gazel E., Soto G.J., Carr M.J., Alvarado G.E. (2019) Geochemical and Geochronological Characterisation of the Poas Stratovolcano Stratigraphy. In: Tassi F., Vaselli O., Mora Amador R. (eds) Poás Volcano. Active Volcanoes of the World. Springer, Cham
- Sánchez, A. (1989). Apuntes de geotecnia: Curso de geotecnia y prácticas geotécnicas. Facultad de Minas. Universidad Nacional de Colombia. Medellín, 1-120.

- Scott, W. E. (1993). Los peligros volcánicos. Curso breve sobre los peligros volcánicos (pp. 9-24). Organización Mundial de Observatorios Vulcanológicos.
- SEGEPLAN, (2011). Guía para la elaboración de un Plan de Ordenamiento Territorial Municipal. Marco conceptual y metodológico. Ciudad de Guatemala, Guatemala.
- Siel-Siel (Asesores Ambientales) (2004). Estudio de Impacto Ambiental Carretera naranjo Florencia. Expediente 040-2002 SETENA [Inf. Interno].
- Solano, J., & Villalobos, R. (2000). Regiones y subregiones climáticas de Costa Rica. San José, Costa Rica: Instituto Meteorológico Nacional.
- Soto, G.J. & Alvarado, G.E., (2006), Eruptive history of Arenal Volcano, Costa Rica, 7 ka to present. En: Gill, J., Reagan, M., Tepley, F. & Malavassi, E. (Eds): Arenal Volcano Special Volume, Journal of Volcanology and Geothermal Research, 157(1-3):254-269 [doi 10.1016/j.jvolgeores.2006.03.041].
- Soto, G.J. & Sjöbohm, L., (2005). Sobre el mapeo de los peligros volcánicos del Arenal (Costa Rica) como una herramienta para la planificación del uso del suelo y la mitigación de desastres. Memoria VIII Seminario de Ingeniería Estructural y Sísmica, San José, Costa Rica, septiembre 2005, 26 pp.
- Soto, G. J., & Sjöbohm, L. (2006). Amenaza volcánica a la infraestructura vial en el Arenal. Memorias IX Seminario Nacional de Geotecnia, San José, Costa Rica, 16-17.
- Soto, G.J. & Sjöbohm, L., (2007). Los peligros volcánicos del Arenal. Entorno a la Prevención – CNE, (4).
- Stine, C. M., & Banks, N. G. (1991). Costa Rica volcano profile (No. 91-591). US Geological Survey.
- Tourmon, J. (1980). Contribución a la morfología de la parte occidental de la cordillera central de Costa Rica. –Ins.t Geogr. Nac. Informe Semestral Julio-Dic 26:73-83. San José, Costa Rica.
- Tourmon, J., & Alvarado, G. (1997). Mapa geológico de Costa Rica: Escala 1: 500 000. Editorial Tecnológica de Costa Rica.
- Tristán, E. (1994). Estudio geológico integral de la sección este de la hoja topográfica San Ramón 3346III-11, esc. 1:10 000, cantón de San Ramón, provincia de Alajuela, Costa Rica. -129 págs. Univ. de Costa Rica [Tesis de Lic.].
- UNGRD [Unidad Nacional para la Gestión del Riesgo de Desastres – Colombia]. (2018). Atlas de Riesgo de Colombia: revelando los desastres latentes. Bogotá, D.C., Colombia.
- Van Zuidam, R. A. (1985). Aerial photo-interpretation in terrain analysis and geomorphic mapping. International Institute for Aerospace Survey and Earth Science (ITC).
- Vargas, W. & Garro, J.F. (2012). Evaluación de la susceptibilidad a deslizamientos en las laderas de suelos residuales en el corredor del proyecto Sifón – La Abundancia. LanammeUCR, San José, Costa Rica [Inf. Interno].
- Varnes, D. J. (1978). Slope movement types and processes. Special report, 176, 11-33.
- Venegas, D. (2011). Caracterización de la deformabilidad y resistencia de suelos lateríticos en tres puntos de la nueva carretera San Ramón-San Carlos. [Tesis de Lic.]. Universidad de Costa Rica.
- Verstappen, H. T., & Van Zuidam, R. (1991). El sistema ITC para levantamientos geomorfológicos. Publicación ITC, (10), 15.

- Vieto (Ingenieros Consultores) (2009). Estudio de Suelos, Ministerio de Obras Públicas y Transportes. 09-OTS-0161-1644. Estudio de suelos en estación 18+100. [Inf. Interno].
- Vieto (Ingenieros Consultores) (2010). Estudio de Suelos, Ministerio de Obras Públicas y Transportes. 09-OTS-0001-1644, 09-OTS-0034d-1644, 09-OTS-0094-1644. Estudios de suelos en estaciones 20+700, 18+700, 17+200. [Inf. Interno].
- Vieto (Ingenieros Consultores) (2011). Estudio de Suelos, Ministerio de Obras Públicas y Transportes. 09-OTS-0176-1644. Estudio de suelos en estación 18+100 a 18+450. [Inf. Interno].
- Villari, L. (1984). Vulcano Arenal, Costa Rica. Evaluazione preliminare del rischio. Instituto Italo Latine Americano (IILA), Roma [Reporte Interno, ICE]
- Villegas, A. (1994). Geología de una parte de la hoja Oratorio 3346III-12, provincia de Alajuela, Costa Rica. -130 págs. Univ. de Costa Rica.
- Villegas, A. (1997). Geodinámica de la Cordillera de Tilarán, relación entre la volcanología y la tectónica.- 147 págs. Univ. Costa Rica, San José [Tesis de Lic.].
- Villegas, A. (2004). La formación Alto Palomo: flujos pumíticos de la Cordillera Volcánica Central, Costa Rica. Revista Geológica de América Central, (30), 73-82.
- Walters, D.R., (2007). Designing Community: charrettes, master plans and form-based codes. Routledge.
- Wells, D. & Coppersmith, K., (1994): New Empirical Relationships among Magnitude, Rupture Length, Rupture Width, Rupture Area, and Surface Displacement.- Bulletin of the Seismological Society of America, 84, 4: 974-1002.
- Williams, H. (1952). Volcanic history of the Meseta Central, Costa Rica. -Univ. Calif. Publ. Geol. Sci. 29:145-180
- Wood, J. (1996). The geomorphological characterisation of digital elevation models (Doctoral dissertation, University of Leicester).
- Yokoyama, I., Tilling, R.I. & Scarpa, R., (1984). International Mobile Early-Warning Systems for Volcanic Eruptions and Related Seismic Activities. UNESCO, París, 102 pp.
- Žáček, V., Vorel, T., Kycl, P., Huapaya, S., Mixa, P., Grygar, R., Havlíček, P., Čech, S., Hrazdíra, P., Metelka, V., Ševčík, J. & Pécskay, Z. (2012). Geología y estratigrafía de la hoja 3246-II Miramar, Costa Rica.- Rev. Geol. Amér. Central, 47: 7-54.
- Zárate, E. (1988). Factores meteorológicos asociados a desastres causados por erupciones volcánicas en Costa Rica. Ciencia y Tecnología, 12(1-2), 41-52.

Leyes y Decretos

Decreto No. 32967, Ministerio de Ambiente y Energía. Diario Oficial la Gaceta. La Uruca, San José, Costa Rica. 20 de febrero del 2006.

Decreto Ejecutivo N° 39150-MINAE-MAG-MIVAH-PLAN-TUR. Diario Oficial la Gaceta, No. 172. La Uruca, San José, Costa Rica. 3 de setiembre del 2015.

Ley 833. (1949). Ley de Construcciones. Asamblea Legislativa de la República de Costa Rica. San José, Costa Rica. 02 de noviembre de 1949

Ley No. 4240: Ley de Planificación Urbana. (1968). Asamblea Legislativa de la República de Costa Rica. San José, Costa Rica. 15 de noviembre de 1968.

Ley 8114: Ley de Simplificación y Eficiencia Tributarias, (2001). Asamblea Legislativa de la República de Costa Rica. San José, Costa Rica. 4 de julio del 2001.

Ley 8488: Ley Nacional de Emergencias y Prevención del Riesgo (2005). Asamblea Legislativa de la República de Costa Rica. San José, Costa Rica. 22 de noviembre del 2005.

Ley General de Protección Civil de México, (2012). Diario Oficial de la Federación de Estados Unidos Mexicanos. 6 de junio de 2012

Reglamento No. 3332 (1982). Instituto de Vivienda y Urbanismo. Diario Oficial La Gaceta. 22 de junio de 1982.

Reglamento No. 3822 (1987) Reglamento de Construcciones. Instituto de Vivienda y Urbanismo. 4 de mayo de 1987.

Reglamento “Uso de suelos en los alrededores del Volcán Arenal”. (2001) Comisión Nacional de Prevención de Riesgos y Atención de Emergencias. Diario oficial La Gaceta. 11 de enero del 2001.

Norma “Restricciones para el uso del suelo en los alrededores del Volcán Arenal”. (2001) Comisión Nacional de Prevención de Riesgos y Atención de Emergencias. Diario oficial La Gaceta. 11 de enero del 2001

ANEXOS

Anexo 1. Tabla de afloramientos visitados.

Anexo 2. Tabla resumen de las secciones delgadas descritas.

Anexo 3. Fotos de las secciones delgadas descritas.

Anexo 4. Aproximación de los ciclos volcánicos para volcanes de la CVCCR.

Anexo 5. Catálogo sísmico seleccionado de la RSN, con sismos relocalizados para el área de estudio.

Anexo 6. Mapas de los 12 parámetros geospaciales para la determinación de susceptibilidad a inundación.

Anexo 7. Catálogo histórico de deslizamientos para el área de estudio local (ejemplo).

Anexo 8. Informes de la clasificación de SUCS y ensayos realizados por el laboratorio de Geotecnia del LanammeUCR.

ANEXOS

“CARACTERIZACIÓN DE LOS COMPONENTES GEOLÓGICOS PARA EL RE-ORDENAMIENTO TERRITORIAL EN LA RUTA NACIONAL NO. 35 EN EL TRAMO ENTRE LOS POBLADOS DE SIFÓN Y LA ABUNDANCIA.”

Realizado por:

C. Amalia Gutiérrez Secretan

San José, Costa Rica

2019

ANEXO 1: Tabla de afloramientos visitados

Afloramiento	Fecha	# muestra	Este	Norte	Roca	Sitio	Datos estruct	Notas	Unidad
TA-001	3/31/2017	-	450761	1121203	Toba café con clastos milimétricos a centimétricos de pómez y líticos. Pátinas de manganeso. Meteorización (4/5)	Talud a la entrada del proyecto LI.	-		tQi
TA-002	3/31/2017	TA-002	450850	1121569	Toba café con clastos milimétricos de pómez y líticos. Paleocanal relleno de clastos cm a dm de pómez y líticos en una matriz volcánica. Meteorización (4/5)	Curva antes del puente sobre el río Barranca LD	varios paleodeslizamientos		tQi
TA-003	3/31/2017	TA-003	450125	1121877	Toba blanca con mucha pómez, biotita y máficos. Líticos mm. Alteración hidrotermal.	Después del puente sobre el río Barranca LI	-		tQap
TA-004	3/31/2017	TA-004	450340	1121769	Aluvión con clastos dm a m. Toba con clastos mm de pómez y líticos. Ignimbrita con líticos y bloques dm de lavas andesíticas (Tirbí-Aguacate).	Afloramiento sobre el río Barranca, aguas abajo del puente		-	igQft
TA-005	3/31/2017	-	449897	1121886	Toba café meteorizada (5/5) con lentes de pómez.	Punto sobre Ruta 2nd (hacia Volio)		Drenaje expuesto & lavado	tQi
TA-006	3/31/2017	-	449789	1121812	Suelo café meteorizado	Punto sobre Ruta 2nd (hacia Volio)		fin de reconocimiento	tQi
TA-007	5/12/2017	-	449858	1122352	"Toba" color café rojizo. Altamente meteorizada. No consolidada. Muy fácilmente desmenuzable	Al borde de la calle 2nd.	-		s (suelo)
TA-008	5/12/2017	-	449629	1122546	-	Tanque o naciente	-	del AyA	
TA-009	5/12/2017	-	449655	1122774	*movimiento de tierra por paso a desnivel	Escombrera	-	Escombrera.	
TA-010	5/12/2017	-	450136	1123015	-	Tanque de captación	-	del AyA	
TA-011	5/12/2017	?	451189	1123847	Toba café meteorizada (5/5). Muy fácilmente desmenuzable.	Afloram peq. En camino 2nd.		Similar a aflor TA-001	tQi
TA-012	5/12/2017	-	451043	1123951	-	Tanque o naciente	-	del AyA	
TA-013	5/12/2017	*	450579	1124010	Toba lítica con pómez, micas y líticos mm. Meteorización (4/5)	Calle 2nd .		*terreno para pasto. Reptación severa causada por bovinos.	tQi
TA-014	5/12/2017	*	449999	1124338	Toba café. Toba rosada con clastos y pómez. Ignimbrita blanca lítica. Plasticidad (4/5)	Calle 2nd. Deslizam con veget.			tQi
TA-015	5/12/2017	?	449163	1125625	Toba café líticos mm, sin pómez, desmenuzable.	Calle 2nd.		Parece: plasticidad alta	tQi
TA-016	5/12/2017	-	448761	1126186	Deslizamiento	Calle 2nd			
TA-017	5/12/2017	-	449096	1122997	Tanque	Calle 2nd		del AyA	
TA-018	5/12/2017	-	449037	1123004	Roca meteorizada (5/5) café	Calle 2nd			s
TA-019	5/12/2017	-	448107	1123834	Vista hacia el NE: deslizamientos	Calle 2nd			
TA-020	5/12/2017	-	447835	1124926	Toba meteorizada (5/5) café. Deslizamiento	Calle 2nd.			s

TA-020 B	5/31/2017	*	447818	1132660	Toba lítica café, clastos mm a cm presencia de pómez. Toba de lapilli mm. Tobas blancas y rosadas.	Aprox km 24. Después cruce sobre Río Tapezco . Cruce con caminos 2nd		Capas cortadas por fallas/desliz.	tQi
TA-021	5/31/2017		446691	1132526	Capa de caída rosada c/ pómez & biotita alterada.				tQi
TA-022	5/31/2017	-	446954	1132335	-	Sobre la calle 2nd		Cultivo de caña. N: bosque S: ganadería	
TA-023	5/31/2017	-	447262	1132622		A la par de la calle 2nd		Torre de alta tensión (ICE)	
TA-024	5/31/2017	*	447646	1132611	Paquete tobas rosadas finas, con líticos y pómez en proporciones variables (capas)	A la par de la calle 2nd		*CB inf, CA sup	tQap
TA-025	5/31/2017	-	448053	1132418	Inicio de la escombrera	Sobre la calle 2nd		Inicio escombrera	
TA-026	5/31/2017	-	448166	1132363	Fin de la escombrera	Sobre la calle 2nd		Fin escombrera	
TA-027	5/31/2017	-	448570	1132006	Torre de transmisión	A la par de la calle 2nd		Torre eléctrica	
TA-028	5/31/2017	-	449063	1131910	Torre de transmisión	Cerca de la calle 2nd			
TA-029	5/31/2017	-	450534	1131236	Suelo café oscuro muy arenoso.				s
TA-030	9/12/2017	Sí	448370	1126252	Tobas rosadas con pómez, líticos cm. Toba azul grisácea con líticos cm.	Antes del puente sobre el Espino (15+500 ?)		2 litolog + alteración. Corte por movim tierra.	tQap tQubt
TA-031	9/12/2017		448431	1128368		Corte antes de La Laguna **		* escombrera del Espino	
TA-31B: D Km21	9/13/2017	2	448087	1129710		Deslizamiento km 21			tQap
TA-032	9/12/2017	1	447770	1132657		Cruce camino 2nd			tQi
TA-033	9/12/2017		449786	1135542	Suelo café rojizo granuloso	Sobre calle 2nd			s
TA-034	9/12/2017		449648	1135339	Idem pero más arcilloso	Sobre calle 2nd		Ganadería	s
TA-035	9/12/2017	1	449530	1135294	Bloques de lava andesítica métricos. Toba rosada suave.	Sobre camino 2nd, cruce con río		Viveros & caña de azúcar	daQ
TA-036	9/12/2017	-	449030	1135171	Flujo altamente meteorizado.	margen izq río que cruza camino 2nd			tQi
TA-037	9/29/2017	2	449557	1122494	Toba café meteorizada (5/5) pómez y líticos mm. Toba rosada suave.	Talud del lado derecho de camino 2nd			tQi
TA-038	9/29/2017	1 (= TA-09)	449658	1122893		talud LD carretera (12+300)			tQi
TA-039	9/29/2017	-	449814	1123317	Suelo café rojizo granuloso. Toba beige . Bloques de toba con gran cantidad de pómez aplastados.	talud LD carretera			tQi
TA-040	9/29/2017	-	449742	1123851	Suelo café rojizo granuloso. Toba café. Meteoriz (5/5)	talud LD carretera			tQi
TA-041	9/29/2017	-	449555	1124198	Toba rojiza con líticos mm a cm, contactos quemados.	Talud LI carretera en 1curva			tQi

TA-42	2/15/2018	1 clasto	448319	1125859	Brecha volcániclaústica parda, clastos cm a dm, pómez, biotita alterada. Meteorización (4-5/5)	Talud en desliz constante encima de muro de gaviones donde termina el asfalto (\pm km 16)	no		bQi
TA-43	2/15/2018	1	448366	1128868	Toba oscura con líticos mm, en una matriz con plagioclasa y máficos.	Río abajo del puente sobre el Río La Laguna	no		tQubt
TA-44	2/15/2018	2	448327	1128840	Roca volcánica alterada a verde, cristales de plagioclasa y otros. Dureza (2/5). Alteración (5/5)	Aguas abajo MI del paso sobre el río La Laguna			tQubt
TA-45	2/15/2018	1	448494	1128813	Flujo volcánico pumíticos con plagioclasa y piroxenos mm, clastos grises y pómez de mm a cm. Dureza (1/5). Meteorización (3/5.)	Aguas arriba MD del paso sobre el río La Laguna		*deslizamiento y prof. del cauce por falla	tQubt
TA-46	2/15/2018	5	448509	1128789	Tobas vítreas clásticas a brechosas grises a azules con alteración a epidota y/o clorita. Partes pumíticas alteradas a blanco.	Aguas arriba MD del paso sobre el río La Laguna			tQubt
TA-47	3/7/2018	M1, M2	448001	1130901	Rocas volcánicas alteradas a verde (por falla). Tobas lilas con pocos clastos. Tobas beige a rojizas. Toba café con pómez y líticos: lava escorias.	Talud LD después del puente sobre el Río Tapezco.			dQ
TA-47 B	3/7/2018	M1, M2, M3	447911	1131002	Bloques dm de lavas	idem + 50 m sobre carretera			daQ
TA-48	3/7/2018	M1, M2	447620	1131335	Lava andesítica en bloques , partes vesiculares, varía en colores ceslestre-rojo-negro.	Talud LD de la carretera	Datos ESTRUCT: 350/26, 215/90	Amenaza: caída de bloques	b-aQubt
TA-49	3/7/2018	M1, M2, M3	447926	1131969	Lava andesítica en bloques variaciones en dureza y vesicularidad. .	Km 23+984, talud LD de la carretera	Datos ESTRUCT: 215/80, 263/85, 260/30		b-aQubt
TA-50	3/7/2018	-	448163	1132959	Toba café arenosa con lapilli. Meteorización (5/5)	Km 25+220. Taludes LD + LI carretera.			tQi
TA-51	3/7/2018	1	448188	1133061	Toba con líticos mm y pómez. Toba rosada alterada (5/5). Humedad 100%, dureza 1/5.	Debajo del puente sobre el Río Arenas (1) sobre cauce del río (2) detrás del bastión central			tQi
TA-52	3/7/2018	1	448159	1133412	Toba café meteorizada. Toba rosada a rojiza con cantidades variables de líticos y pómez.	Talud LD después del desliz. c/ muro de gaviones bajo la lechería.			tQi
TA-52B	3/8/2018	-			Toba café a beige c/ clastos & pómez. Humedad 100%.	Deslizamiento pequeño Km 27+560		*Comportamiento como flujo	
TA-53	3/7/2018	-	448519	1135170	Toba blanca a gris, dureza 1/5 c/ abundante alteración a anaranjado. Toba blanca: matriz arcillosa, fácilmente desmenuzable, clastos mm de pómez, lavas & otros clastos cm idem.	Entrada a una finca LI antes del puente sobre el río Seco.			tQi

TA-G1	4/15/2018		464996	1121117	Vista hacia el NW : lomas redondeadas, cauces profundos, probablemente asociados a depósitos de tobas de Alto Palomo	Trojas, Valverde Vega	no		
TA-G2	4/15/2018	TA-G2	465426	1124390	Vista hacia el Poás. Depósitos superiores correspondientes a actividad del Poás. En la parte inferior toba/roca gris claro.	Mirador, antes de cruzar la divisoria de aguas	no		tQap
TA-G3	4/15/2018		465779	1126886	Material de caída, pardo a café, capas de toba de lapilli, gradación inversa, contactos quemados.	Caldera de Alto Palomo a Bajos del Toro, ruta en uso	no		tQi tQap
TA-G3 bis	4/15/2018		465623	1127726	Toba café alterada. Zona de falla con alteración. Lavas andesíticas en bloques. Material de caída con lapilli.	Calle de Alto Palomo a Bajos del Toro (RN 708) en construcción			b-aQubt
TA-G4	4/15/2018		462595	1127863	Toba gris meteorizada (5/5) caliche por raíces. Toba lítica meteorizada. Óxidos de manganeso.	Borde de la calle entre Bajos del Toro y Palmira			tQi
TA-G5	4/15/2018		458936	1128911	Tobas lila con plagioclasa hinchadas.	Punto en el borde externo de la Caldera de Palmira			tQi
TA-G6	4/15/2018		457956	1127477	Geomorfología: vista sobre zarceros, la falla y hacia el SW (San Ramón)	Carretera Palmira-Zarceros			
TA-G7	4/15/2018	No	452181	1124674	Toba con biotita de la Formación Alto Palomo. Vegetación similar a taludes de Sifón.	Calle 2nd entre San Antonio de Barranca y Alto de Villegas			tQap
TA-G7 bis	4/16/2018	no	451016	1122114	Toba parda a rosada, con cantidades distintas de pómez, gradación y capas horizontales con diferentes relaciones de los mismos materiales en la parte inferior una toba lítica (de caída).	Proyecto de construcción en calle entre San Ramón y Zarceros		Base del proyecto de construcción	tQi

ANEXO 2: Tabla resumen de las secciones delgadas descritas

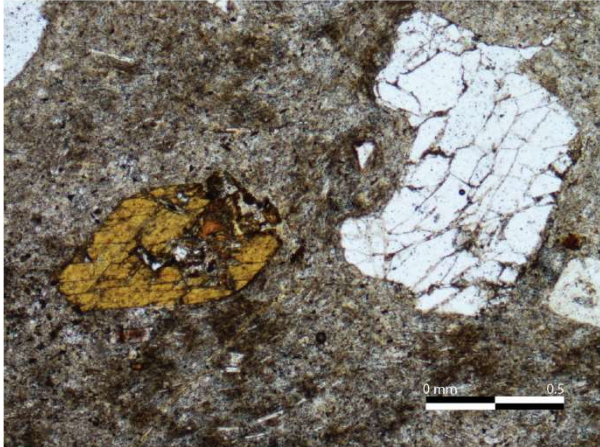
Nº	Código	Coordenadas CRTM05	Descripción microscópica	Nombre	Unidad Geológica
1	TA-04-M4	450 340 E y 1121 769 N	Textura holocristalina hipidiomórfica porfírica seriada con mega fenocristales (57%) de augitas de hasta 5 mm, fenocristales de plagioclasa (31.7%) , augita (19.7%, con inclusiones de olivinos), olivinos y opacos (magnetita) en una matriz (41%) con textura intergranular compuesta por microlitos de plagioclasa, augita, opacos y olivinos. Hay presencia de minerales de alteración (1.5%) como iddingsita y serpentinita.	Basalto calcoalcalino	Unidad informal de Ignimbritas (igQft)
2	TA-35-1	449 530 E y 1135 294 N	Textura holocristalina hipidiomórfica porfírica con fenocristales (24.6%) de plagioclasa (21.2%), augita, fantasmas de olivinos y opacos en una matriz (72%) intergranular con textura ortofídica compuesta por microlitos de plagioclasa (39.5%), piroxenos y/u olivinos (22.5%), y opacos (10%, magnetita). Se encuentran vesículas (3.4%) rellenas de material deutérico. Hay presencia de minerales de alteración asociados al olivino como son la iddingsita y la serpentinita y otros como la hematita.	Andesita con olivino	Unidad informal de Avalancha de Detritos (daQ)
3	TA-47B-M1	447 910 E y 1131 002 N	Textura holocristalina hipidiomórfica porfírica seriada con fenocristales (54.1%) de plagioclasa (29.4%), augita (13.1%), fantasmas de olivinos y opacos en una matriz (42.9%) intergranular con textura ortofídica compuesta por microlitos de plagioclasa (20.9%), piroxenos y/u olivinos (14.8%), y opacos. Se encuentran vesículas (3%) rellenas de material deutérico. Hay presencia de minerales de alteración como la calcita y otros asociados al olivino como iddingsita y serpentinita.	Basalto alcalino	Unidad informal de Avalancha de Detritos (daQ)
4	TA-48-M2	447 620 E y 1131 335 N	Roca hipocristalina hipidiomórfica porfírica con fenocristales (33.6%) de plagioclasa (22%), augita (8.6%) y magnetita en una matriz (58.5%) compuesta por vidrio (24.8%) y microlitos de plagioclasa, piroxenos y opacos. Hay presencia de vesículas (7.9%) y cumulitos de plagioclasas con augitas.	Andesita piroxénica	Unidad informal de lavas andesíticas en bloques (b-aQubt)
5	TA-49-M1	447 926 E y 1131 969 N	Roca holocristalina hipidiomórfica porfírica con fenocristales (57.5%) de plagioclasa (37.3%), augita (9.7%), olivinos, ortopiroxeno y opacos en una matriz (42.5%) intergranular compuesta por microlitos de plagioclasa (18.5%), piroxenos y/u olivinos, y opacos (9.8%, magnetita de hasta 0.1 mm). Hay presencia de minerales de alteración asociados al olivino como lo es la iddingsita.	Andesita Basáltica	Unidad informal de lavas andesíticas en bloques (b-aQubt)
6	TA-04-M1	450 340 E y 1121 769 N	Textura piroclástica, con cristaloclastos (22.7%) de plagioclasas (11.2%) y augitas (6.3%). Litoclastos (12.2%) de lavas andesíticas y vitroclastos (4.1%) de escoria en una matriz (61%) compuesta por vidrio café oscuro (15.7%), microlitos de plagioclasas y piroxenos (9.3%), y vesículas (36%) redondeadas, alargadas o de vacíos minerales	Toba cristalina andesítica vesicular	Unidad informal de depósitos de caída indiferenciados (tQi)
7	TA-04-M3	450 340 E y 1121 769 N	Textura piroclástica, con cristaloclastos (29%) de plagioclasas (16.5%) y piroxenos (4.9%), litoclastos (15.1%) de lavas hipocristalinas hipidiomórficas y vitroclastos (0.4%) de escoria en una matriz (55.5%) compuesta por vidrio café claro (21.3%), cristallitos (7.2%), y vesículas (27%) redondeadas, alargadas o de vacíos minerales.	Toba cristalina andesítica vesicular con litoclastos andesíticos	Unidad informal de depósitos de caída indiferenciados (tQi)
8	TA-30-1	448 370 E y 1126 252 N	Roca con textura piroclástica de color parda, fuertemente alterada. Compuesta por cristaloclastos (12.5%) de plagioclasas, opacos, minerales de alteración y otros, litoclastos (13.2%) no reconocibles y vitroclastos (21.1%) de pómez bandeado, en una matriz (53.2%) de shards (17.5%, de hasta 0.38 mm) y ceniza.	Toba vítrea con pómez bandeado, litoclastos no reconocibles y shards	Unidad informal de tobas pumíticas de flujo (tQap)
9	TA-31B-1	448 086 E y 1129 710 N	Roca con textura piroclástica de color parda, fuertemente alterada. Compuesta por cristaloclastos (7.0%) de plagioclasas, opacos, minerales de alteración y otros, litoclastos (7.7%) no reconocibles y vitroclastos (7.8%) de pómez parcialmente destruidos y escoria, en una matriz (77.5%) de shards (22.5%) y ceniza (26.5%).	Toba vítrea con litoclastos no reconocibles	Unidad informal de tobas pumíticas de flujo (tQap)
10	TA-32-1	447 770 E y 1132 656 N	No se pudo describir (muy alterada).	Toba alterada	-
11	TA-45	448 494 E y 1128 813 N	Textura piroclástica color café claro a transparente, con vitroclastos (24.5%) de pómez (14.5%), pómez bandeado, escoria y fragmentos de vidrio; cristaloclastos (12.0%) de plagioclasas, cuarzo, opacos y minerales de alteración; y litoclastos (9.8%) de en una matriz (53.7%) compuesta por vidrio café claro (18.8%), trizas vítreas (16.4%), y vesículas (17%) redondeadas con algunos microlitos (1.5%).	Toba vítrea con shards y pómez	Unidad informal de tobas clásticas a brechosas (tQubt)
12	TA-46A	448 509 E y 1128 789 N	Textura vitroclástica color café oscuro, con vitroclastos (25 %) de pómez (12%), pómez bandeado (11.2%), y escorias; cristaloclastos (9.1%) de plagioclasas, cuarzo, máficos, opacos, calcita y otros minerales de alteración; y litoclastos (13.7%) andesíticos en una matriz (52.2%) compuesta por ceniza alterada café oscuro (23.5%), vesículas (18%) redondeadas, shards desvitrificados (5.4%) y microlitos (5.3%).	Toba vítrea con clastos andesíticos	Unidad informal de tobas clásticas a brechosas (tQubt)

13	TA-46B	448 509 E y 1128 789 N	Textura volcánico-clástica color café oscuro, con vitroclastos (18 %) de pómez (11.4%), pómez bandeado (5.3%), y escorias; cristaloclastos (11.6%) de plagioclasas (3.5%), máficos, opacos, calcita (2.6%) y minerales de alteración; y litoclastos (16.9%) de en una matriz (53.5%) compuesta por ceniza alterada café oscuro (18.8%), vesículas (8.8%) redondeadas y microlitos (5.7%).	Toba vítrea con litoclastos andesíticos	Unidad informal de tobas clásticas a brechosas (tQubt)
14	TA-46C	448 509 E y 1128 789 N	Textura piroclástica, con vitroclastos (32.6%) de pómez (26.5%), pómez bandeado (3.7%), escoria y fragmentos de vidrio; cristaloclastos (9.3%) de plagioclasas (4.7%) y minerales de alteración y litoclastos (6.8%) de en una matriz (51.3%) compuesta por vidrio café oscuro (14%), trizas vítreas (9.3%), y vesículas (28%) redondeadas	Toba vítrea pumítica vesicular con shards	Unidad informal de tobas clásticas a brechosas (tQubt)
15	TA-03(P3)	450 125 E y 1121 877 N	Roca hipocristalina hipidiomórfica porfírica con fenocristales (22%) de plagioclasas (14.3%), biotitas (3%) alteradas a hematita, hornblendas (basáltica y barqueviquita) en una matriz (74.5%) compuesta por vidrio (38.9%) y microlitos de plagioclasa (30.1%), biotita y opacos. La matriz es hialopilitica, hay presencia de vesículas y fantasmas de minerales: Presenta alteración, principalmente en las micas	Toba cristalina	Unidad informal de tobas pumíticas de flujo (tQap)
16	TA-G2-M1	465 426 E y 1124 390 N	Roca Hipocristalina hipidiomórfica porfírica con fenocristales (33.3%) de plagioclasa (19.4%), piroxenos (augita e hipersteno) y magnetita en una matriz (58.6%) compuesta por vidrio (30.5%) y microlitos de plagioclasa (22.4%), piroxenos y opacos. Hay gran cantidad de vesículas (8.1%), y presencia de cumulitos de plagioclasas con piroxenos	Basalto calcoalcalino	-

ANEXO 3: Fotos de las secciones delgadas descritas.

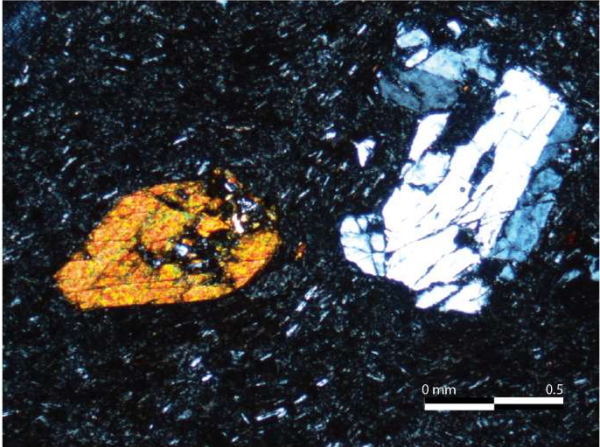
TA-03(P3) N//

tQap



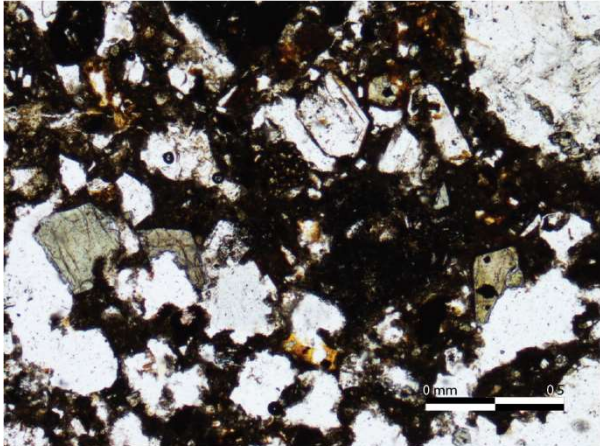
TA-03(P3) NX

tQap



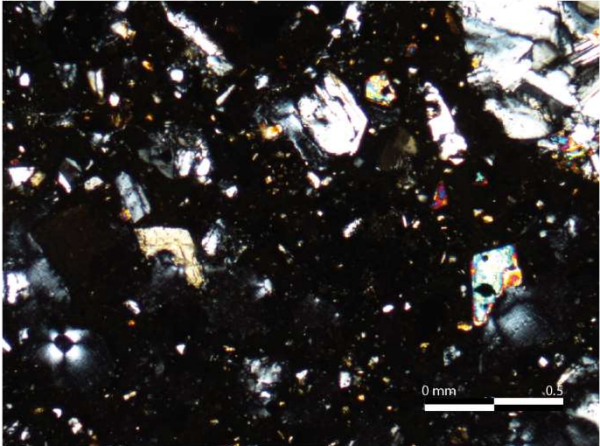
TA-04-M1 N//

tQi



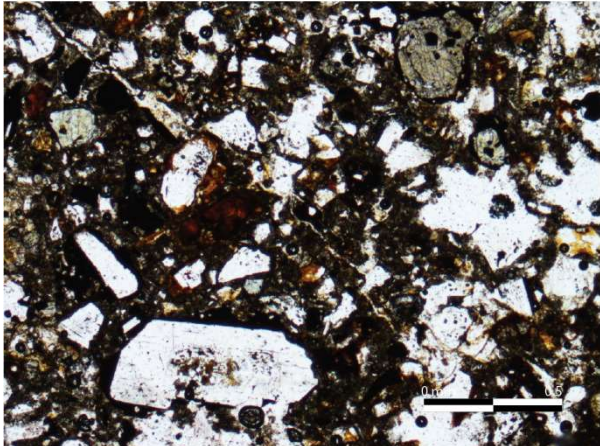
TA-04-M1 NX

tQi



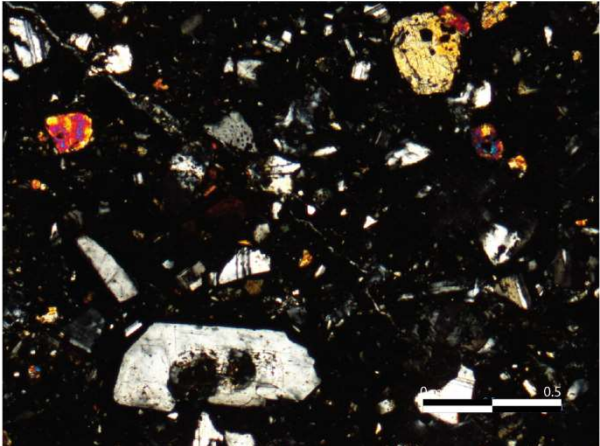
TA-04-M3 N//

tQi



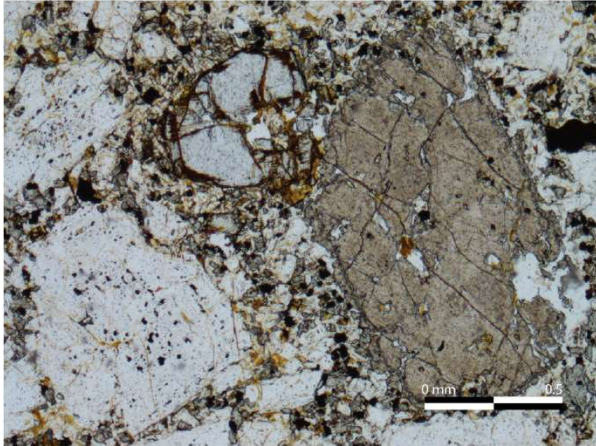
TA-04-M3 NX

tQi



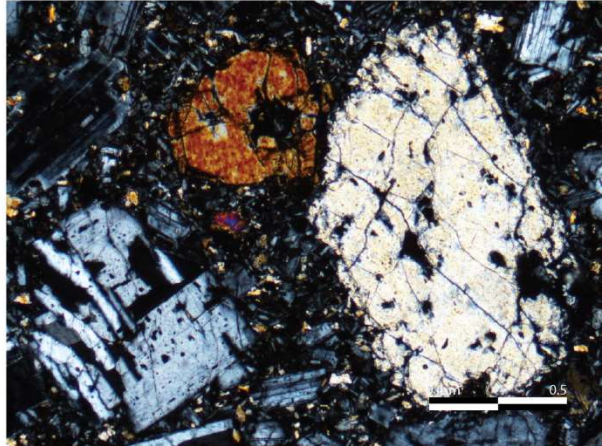
TA-04-M4 N//

igQft



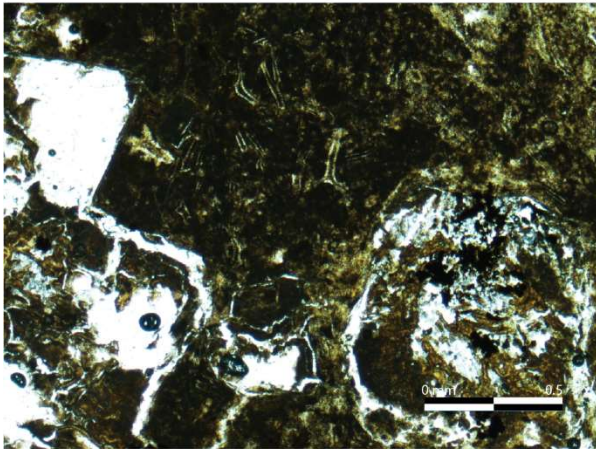
TA-04-M4 NX

igQft



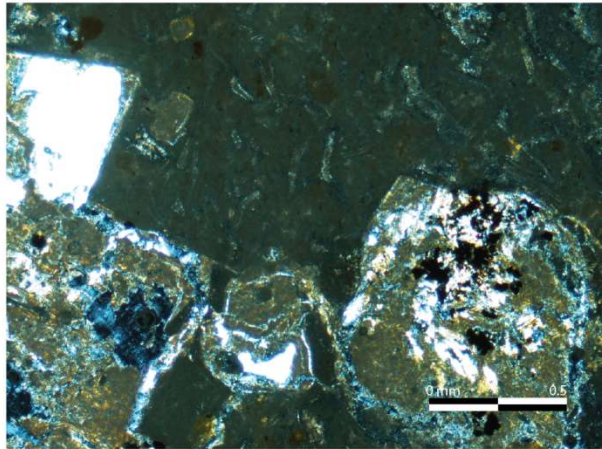
TA-30-1 N//

tQap



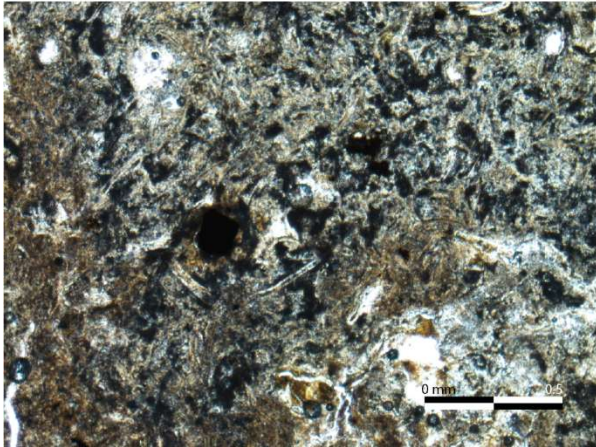
TA-30-1NX

tQap



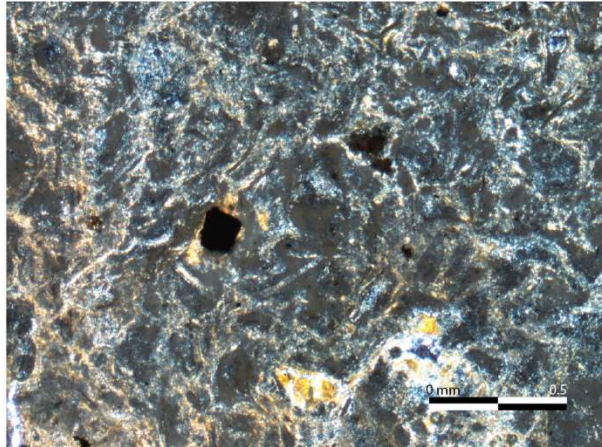
TA-31B-1 N//

tQap



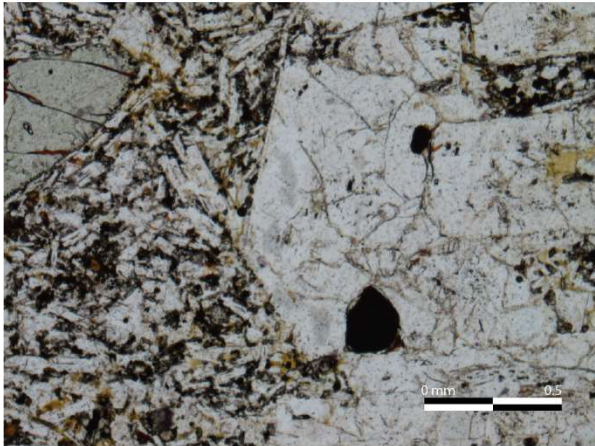
TA-31B-1NX

tQap



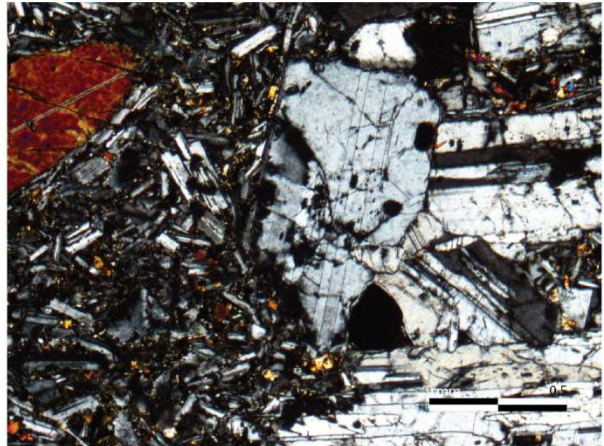
TA-35-1 N//

daQ



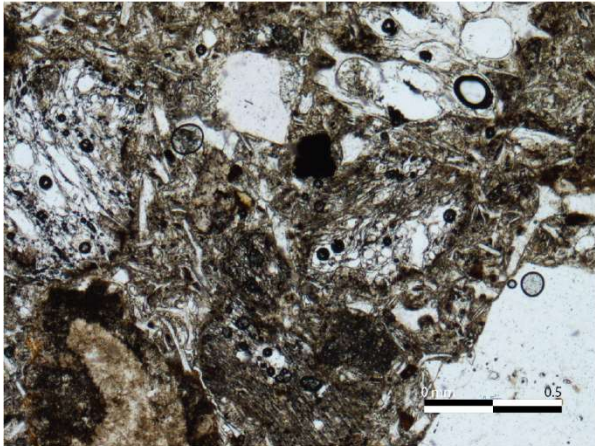
TA-35-1 NX

daQ



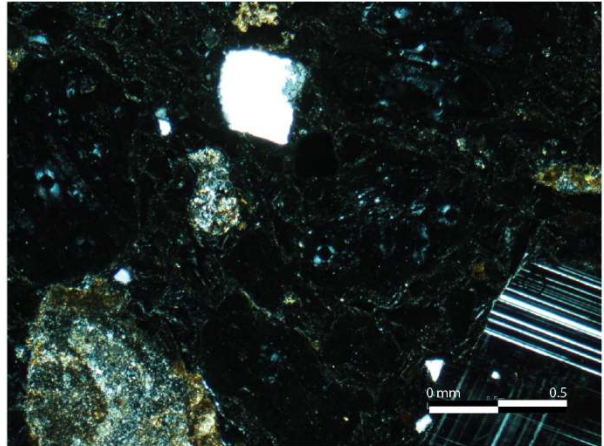
TA-45 N//

tQubt



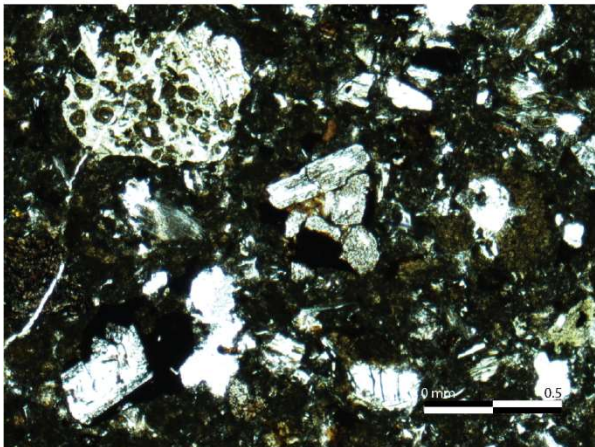
TA-45 NX

tQubt



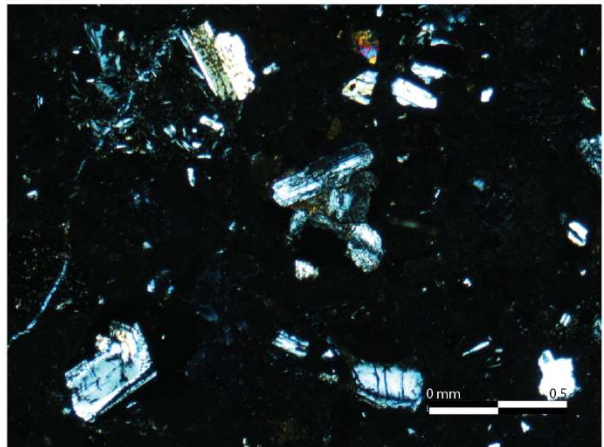
TA-46A N//

tQubt



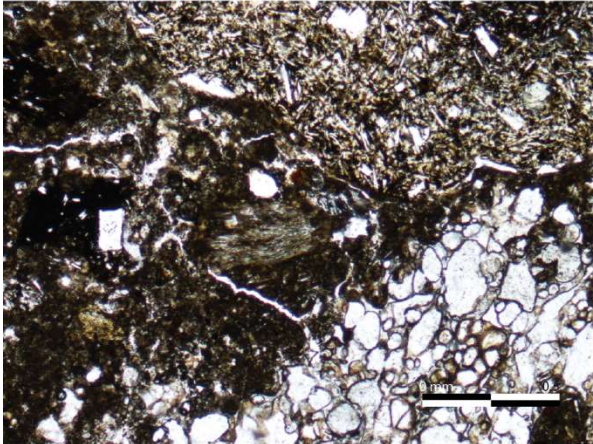
TA-46A NX

tQubt



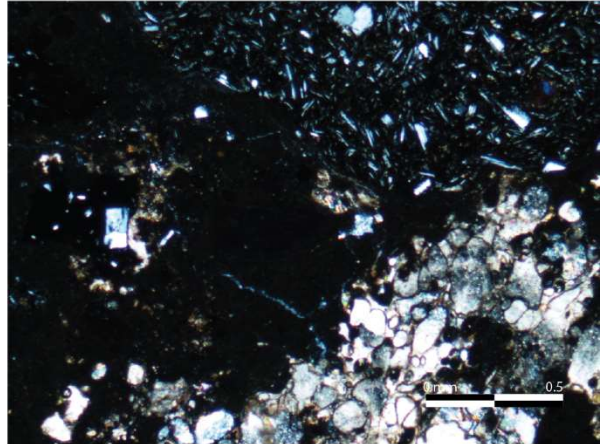
TA-46B N//

tQubt



TA-46B NX

tQubt



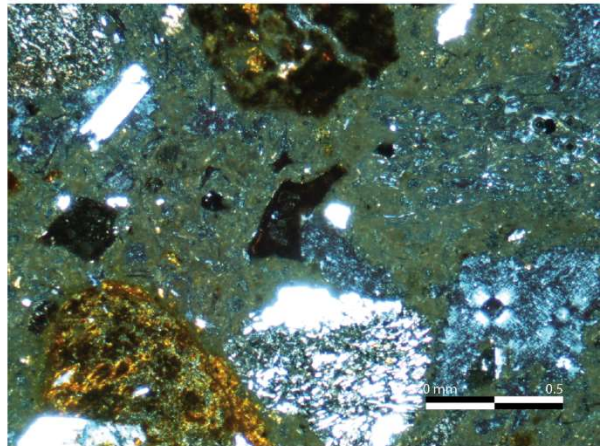
TA-46C N//

tQubt



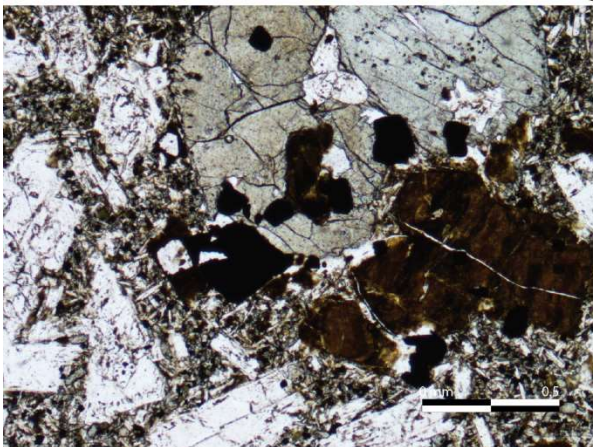
TA-46C NX

tQubt



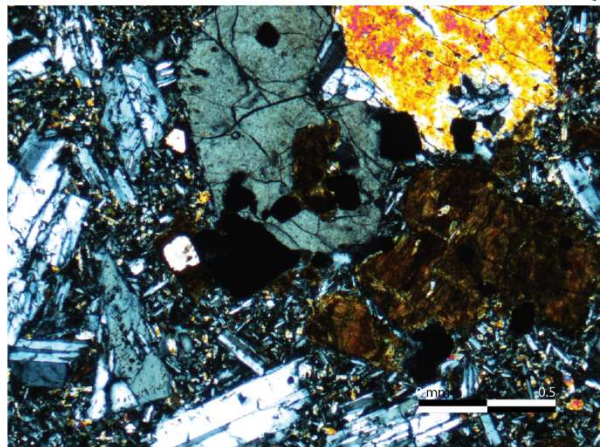
TA-47B-M1 N//

daQ



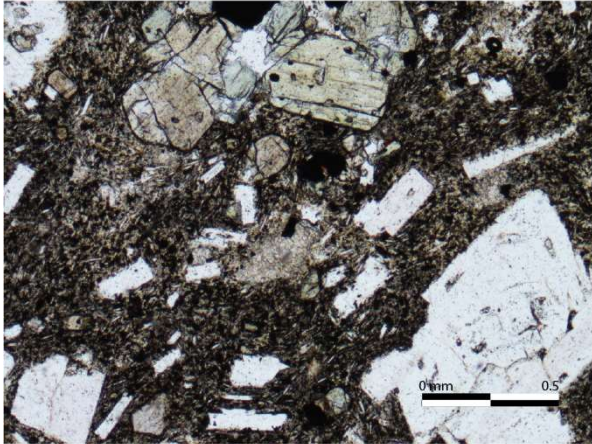
TA-47B-M1 NX

daQ



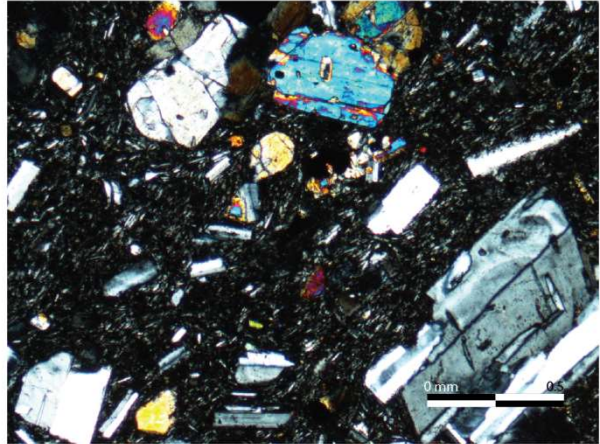
TA-48-M2 N//

b-aQubt



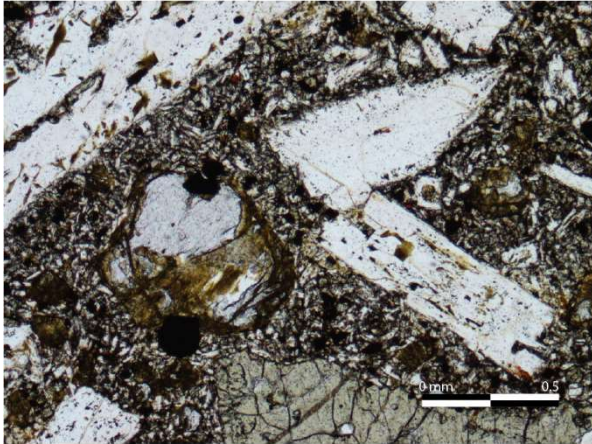
TA-48-M2 NX

b-aQubt



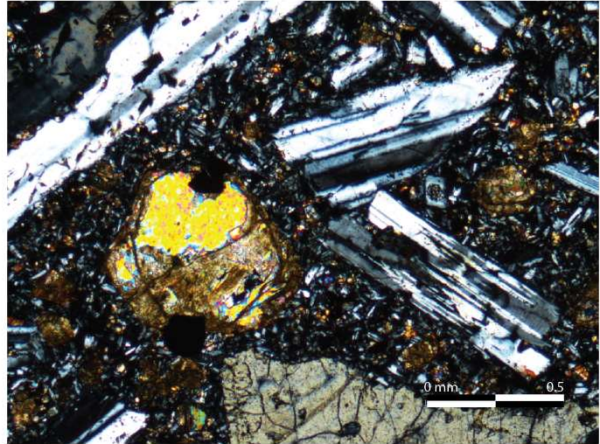
TA-49-M1 N//

b-aQubt

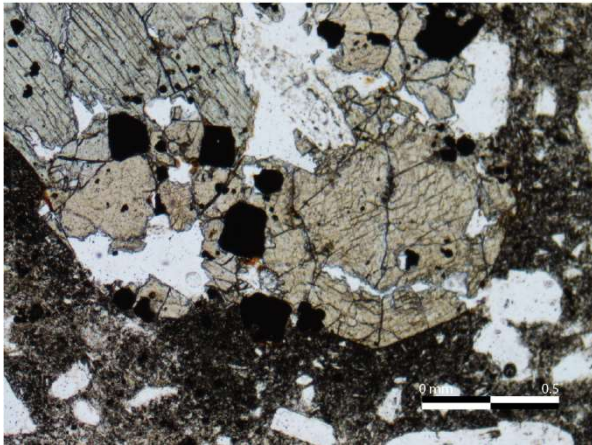


TA-49-M1 NX

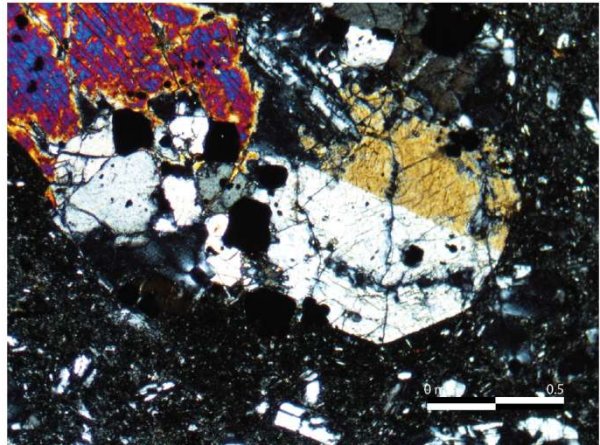
b-aQubt



TA-G2-M1 N//



TA-G2-M1 NX



ANEXO 4: Aproximación de los ciclos volcánicos para volcanes de la CVCCR.

Turrialba	años al 2018	diferencia
2010	8	150
1860	158	510
1350	668	710
640 +- 40	1378	600
0040 +- 50	1978	870
830 BCE +- 150	2848	290
1120 BCE +- 200	3138	300
1420 BCE +- 300	3438	5840
7260 BCE +- 300	9278	
Promedio		490

Irazú	años al 2018	diferencia
1994	24	24
1970	48	40
1930	88	80
1850	168	125
1725	293	165
1560 +- 75	458	450
1110 +- 100	908	420
690 +- 40	1328	260
430 +- 500	1588	1070
640 BCE +- 500	2658	
Promedio		195.5

Poás	años al 2018	diferencia
1994	24	19
1975	43	15
1960	58	45
1915	103	5
1910	108	76
1834	184	87
1747	271	467
1280	738	1070
210	1808	970
760 BCE +- 200	2778	3190
3950 BCE	5968	1640
5590 BCE +- 100	7608	2030
7620 BCE +- 100	9638	300
7920 BCE +- 75	9938	
	Promedio 1	41.2
	Promedio 2	383.5
	Promedio 3	1780

*datos obtenidos del Global Volcanism Program del Smithsonian Institute

ANEXO 5: Catálogo sísmico seleccionado de la RSN, con sismos relocalizados para el área de estudio.

Año	Mes	Día	Hora	Minuto	Segundo	L/D	Latitud	Longitud	Profundidad	red	fases	RMS	Magnitud	tipo
1997	2	16	1	44	53.4	L	10.187	-84.435	6.4	RSN	10	0.2	3.1	WRSN
1998	9	4	14	42	53.8	L	10.216	-84.378	3	RSN	8	0.2	3.6	WRSN
1998	9	4	21	29	42.7	L	10.214	-84.379	4	RSN	11	0.3	4.1	CRSN
1999	11	26	11	57	50.4	L	10.265	-84.468	8.2	RSN	14	0.3	4.1	CRSN
2001	4	11	5	10	5.3	L	10.173	-84.433	8.7	RSN	13	0.3	3.2	WRSN
2004	11	30	16	55	27.5	L	10.27	-84.358	4.1	RSN	8	0.3	2.8	WRSN
2005	11	15	2	40	48.5	L	10.262	-84.443	6.3	RSN	8	0.3	2.9	WRSN
2006	12	25	19	29	38.6	L	10.315	-84.501	6	RSN	7	0.1	2.6	WRSN
2012	4	11	7	9	23.7	L	10.154	-84.457	20.8	RSN	7	0.3	2.5	WRSN
2012	4	11	7	10	40.9	L	10.223	-84.423	13	RSN	14	0.4	3.2	WRSN
2012	9	20	4	0	26.6	L	10.29	-84.368	3.4	RSN	18	0.3	3.8	WRSN
2013	8	4	5	10	29.6	L	10.276	-84.376	7.7	RSN	12	0.4	3.1	WRSN
2013	8	4	5	11	12	L	10.288	-84.351	1.6	RSN	9	0.3	3.2	WRSN
2013	8	4	5	19	24.3	L	10.272	-84.364	4.1	RSN	7	0.2	3	WRSN
2013	8	4	5	23	54.8	L	10.283	-84.358	5.9	RSN	10	0.2	3.1	WRSN
2013	8	4	5	43	21.7	L	10.278	-84.372	8.6	RSN	8	0.2	3	WRSN
2013	8	4	7	53	9.1	L	10.289	-84.375	2	RSN	23	0.4	4.1	WRSN
2013	8	8	9	58	11.8	L	10.299	-84.479	10	RSN	28	0.4	3.5	WRSN
2015	2	20	5	36	25.9	L	10.301	-84.448	4.2	RSN	26	0.6	2.9	WRSN
2015	2	22	20	47	10.4	L	10.308	-84.425	6.1	RSN	18	0.3	3.3	WRSN
2015	6	4	20	50	41.2	L	10.259	-84.416	6	RSN	21	0.3	3	WRSN
2015	6	7	20	34	54.5	L	10.24	-84.407	8.9	RSN	26	0.3	2.6	WRSN
2015	9	15	5	20	36.4	L	10.248	-84.396	6	RSN	42	0.4	3	WRSN
2016	7	24	1	56	57.7	L	10.332	-84.46	11.9	RSN	21	0.3	3	WRSN
2016	9	7	1	49	20.3	L	10.157	-84.502	24.7	RSN	10	0.2	2.4	WRSN
2016	11	12	11	7	47.3	L	10.246	-84.405	7.3	RSN	56	0.3	3.1	WRSN
2017	4	29	0	30	35.7	L	10.267	-84.297	6.3	RSN	13	0.4	2.6	WRSN
2017	8	12	22	52	19.3	D L	10.099	-84.63	0.4	RSN	12	0.8	3.8	WRSN

ANEXO 6: Mapas de los 12 parámetros geoespaciales para la determinación de susceptibilidad a inundación.

- a) Elevación
- b) Pendiente
- c) Distancia al río
- d) Geomorfología
- e) Densidad de drenaje
- f) Acumulación de flujo
- g) Precipitación diaria
- h) Uso del suelo
- i) Geología
- j) Stream Power Index (SPI)
- k) Topographic Wetness Index (TWI)
- l) Curvatura

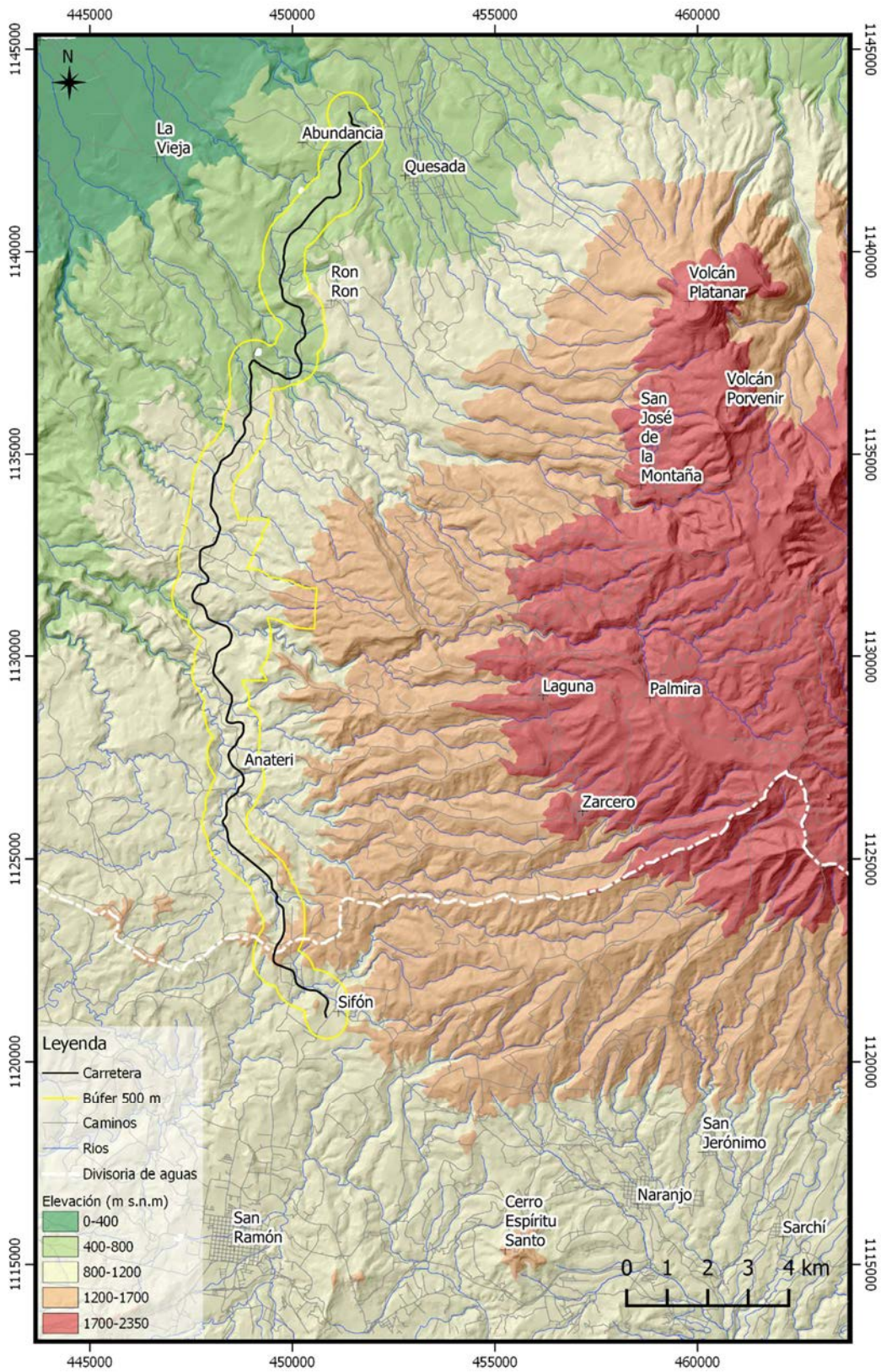


Figura 1: Mapa de elevación.

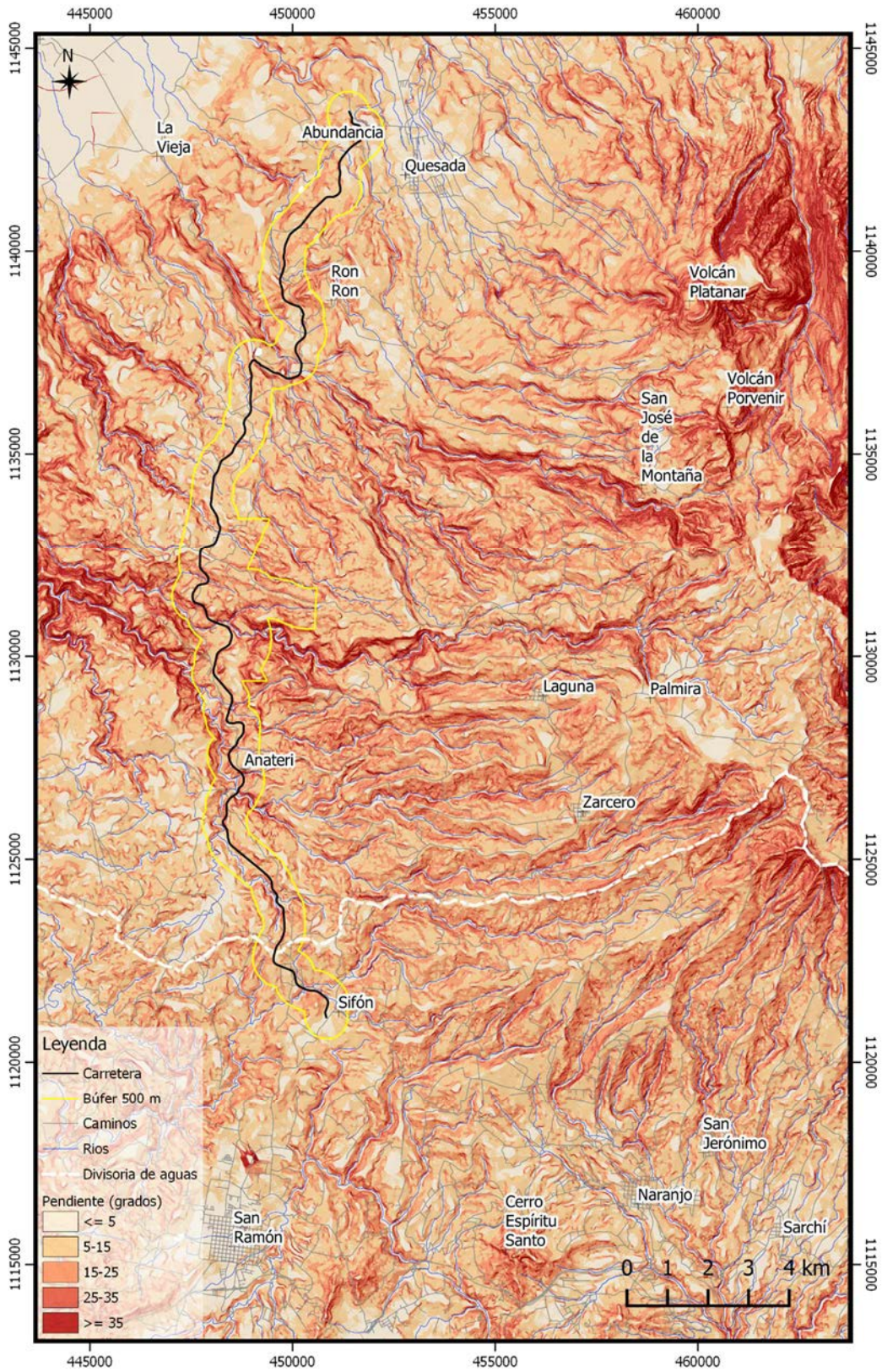


Figura 2: Mapa de pendientes.

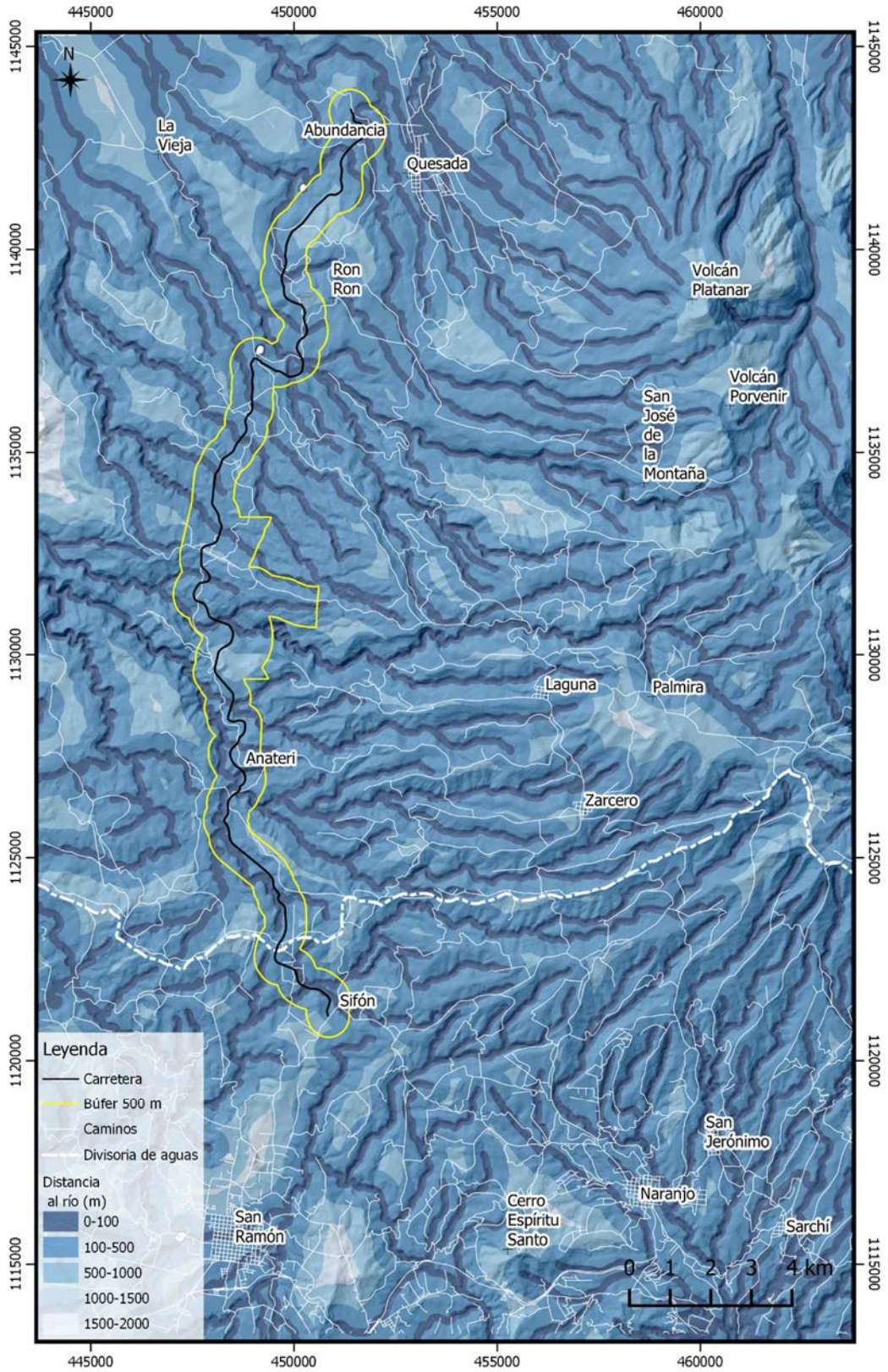


Figura 3: Mapa de distancia al río.

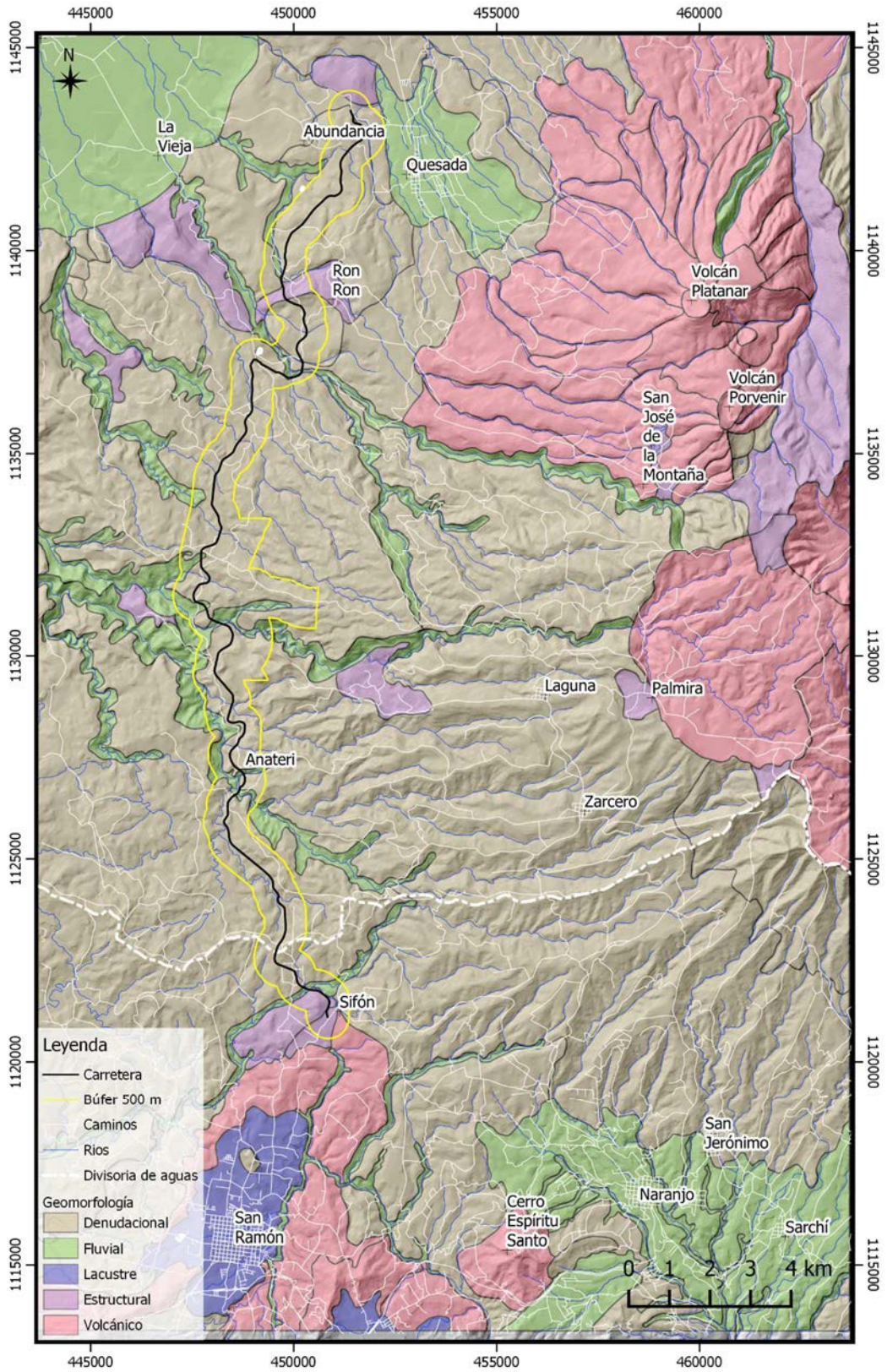


Figura 4: Mapa geomorfológico simplificado.

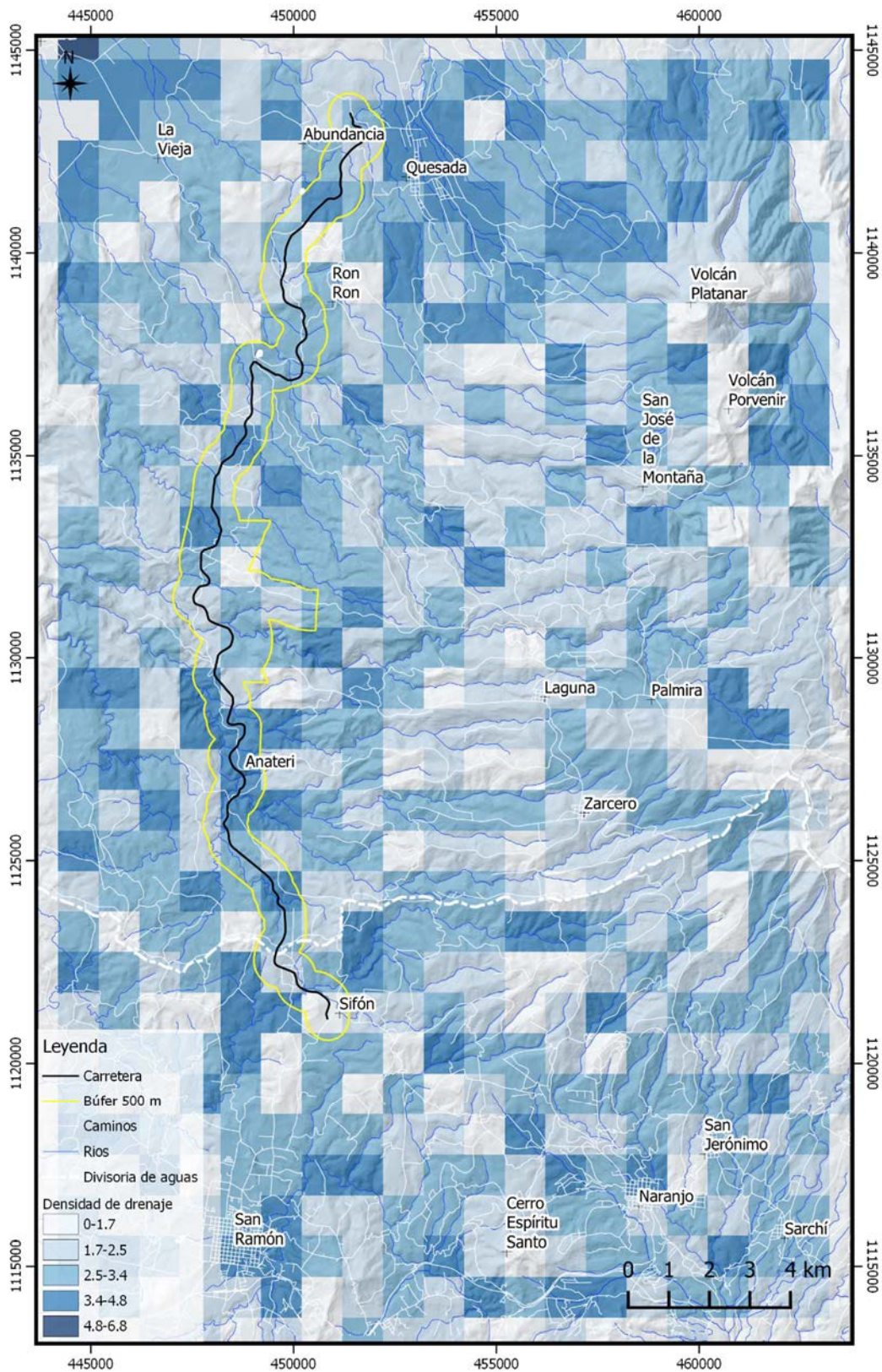


Figura 5: Mapa de densidad de drenaje.

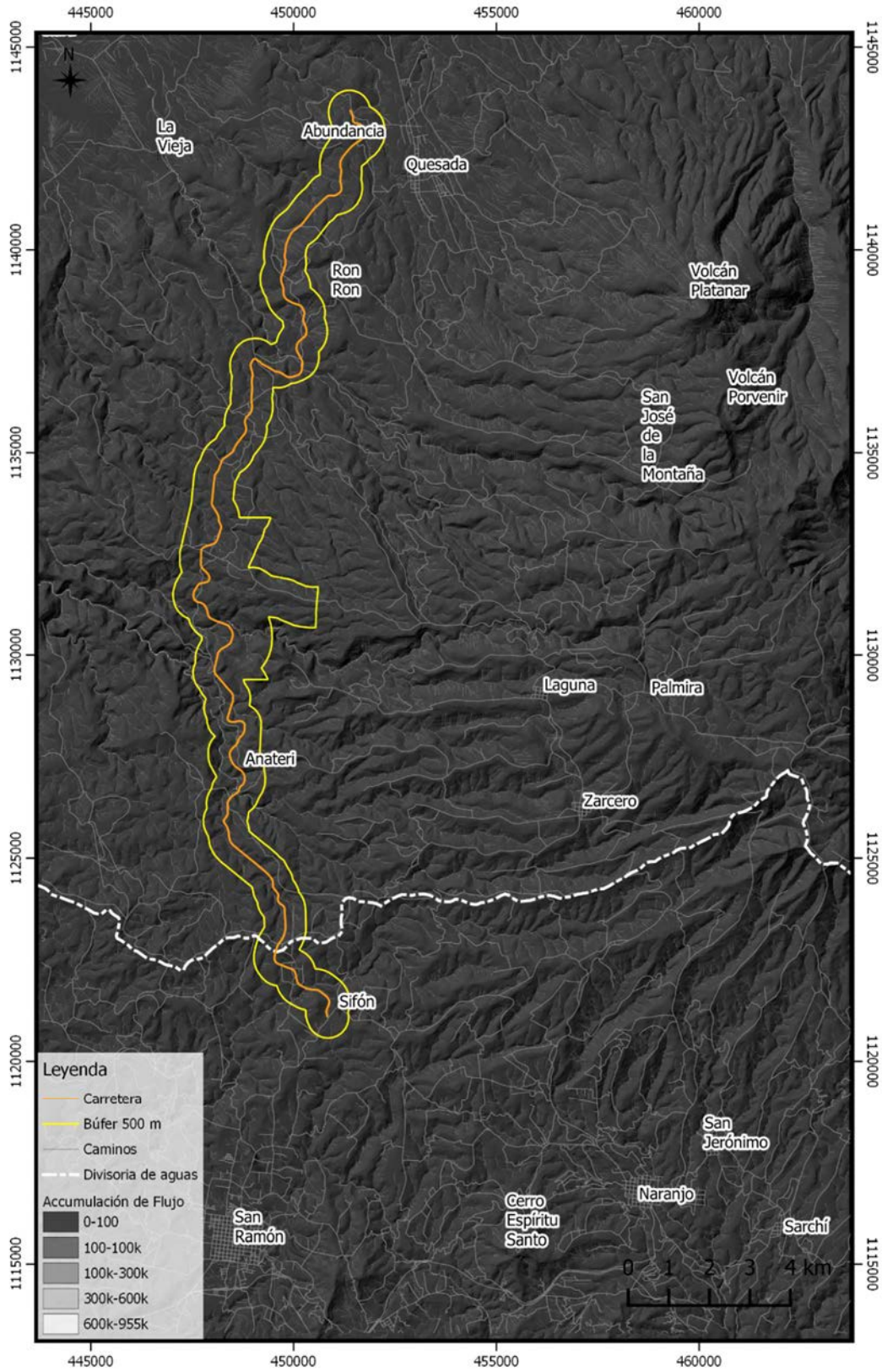


Figura 6: Mapa de acumulación de flujo.

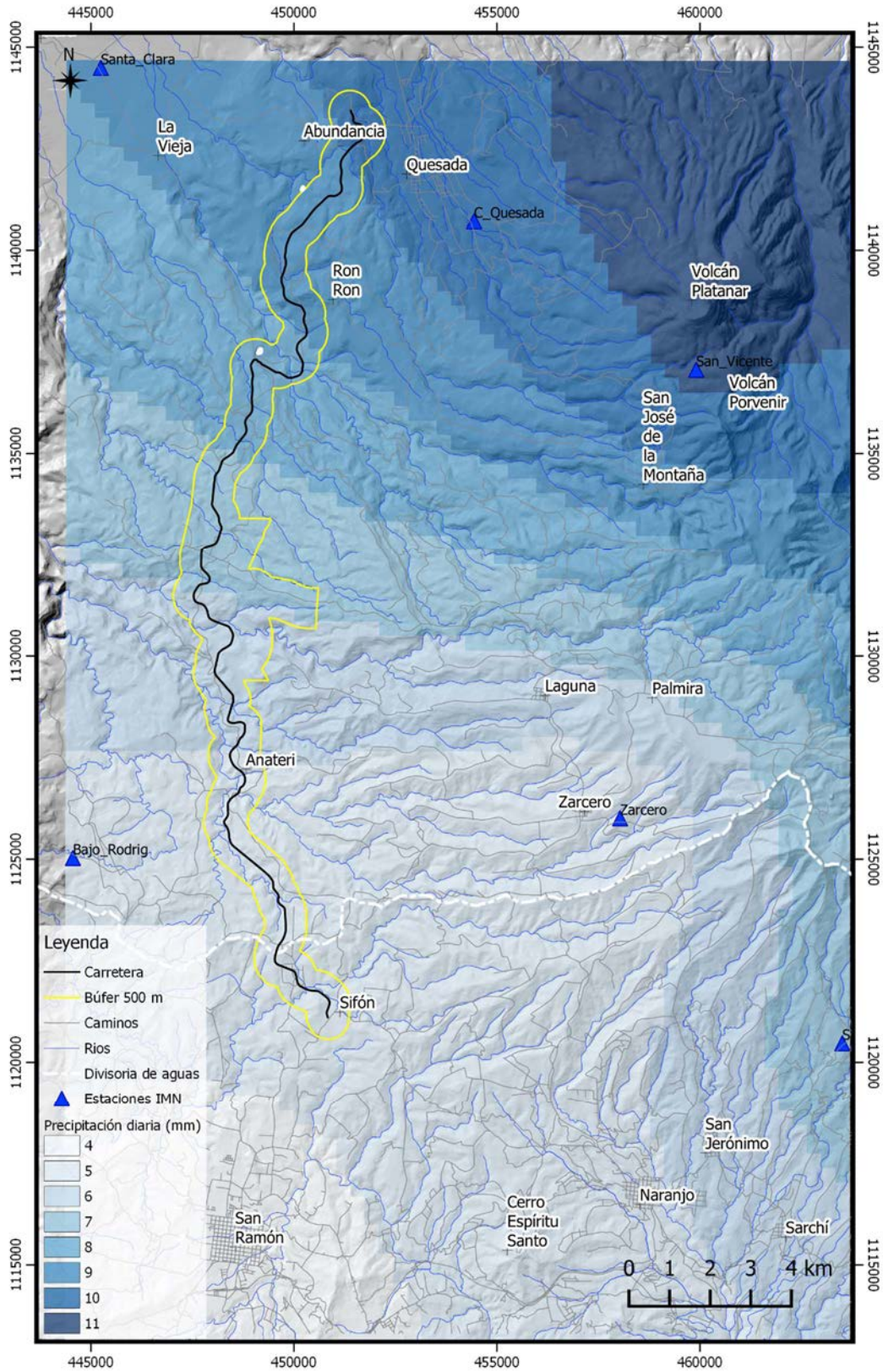


Figura 7: Mapa de precipitación diaria.

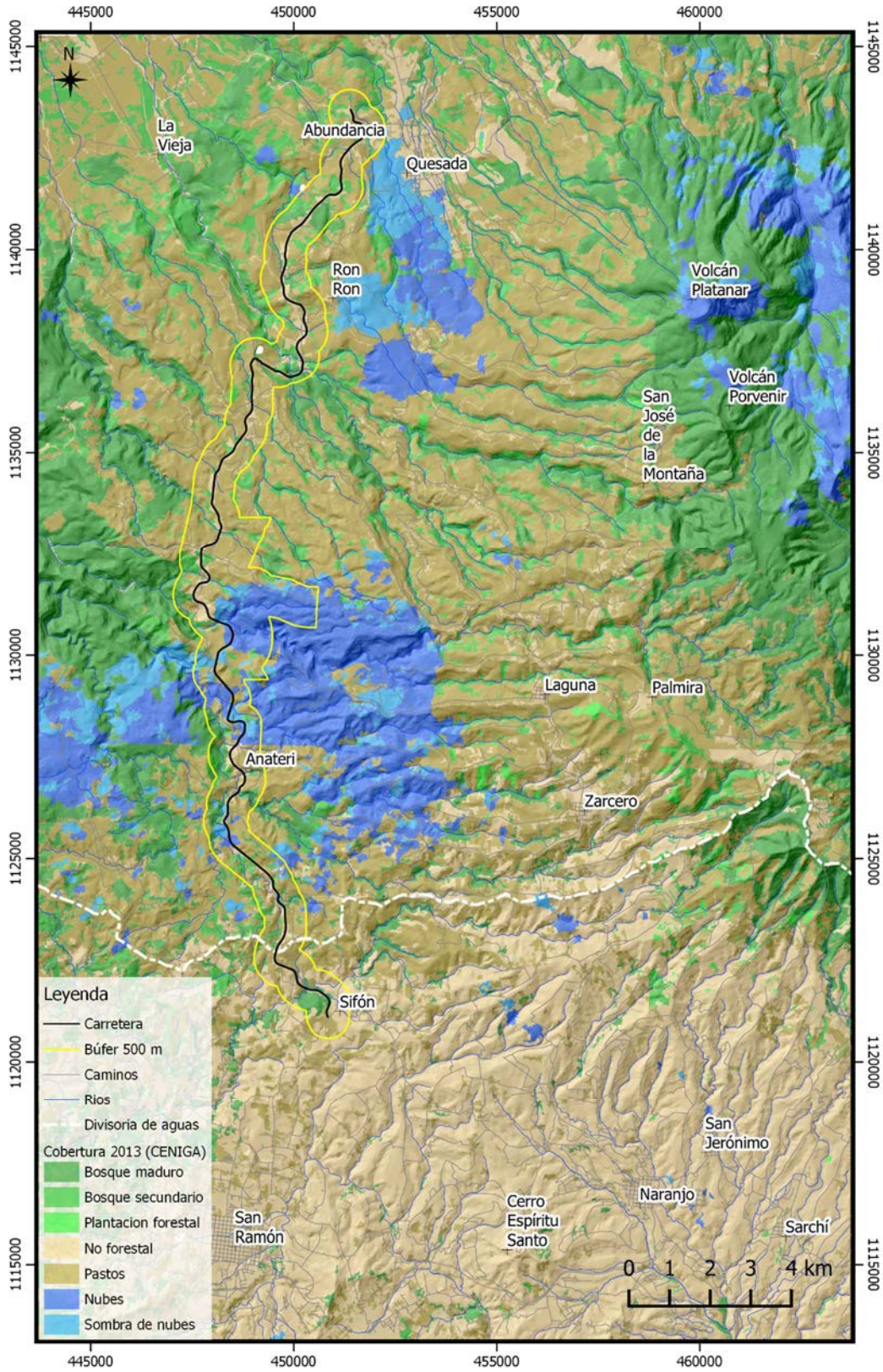


Figura 8: Mapa de uso del suelo y cobertura forestal.

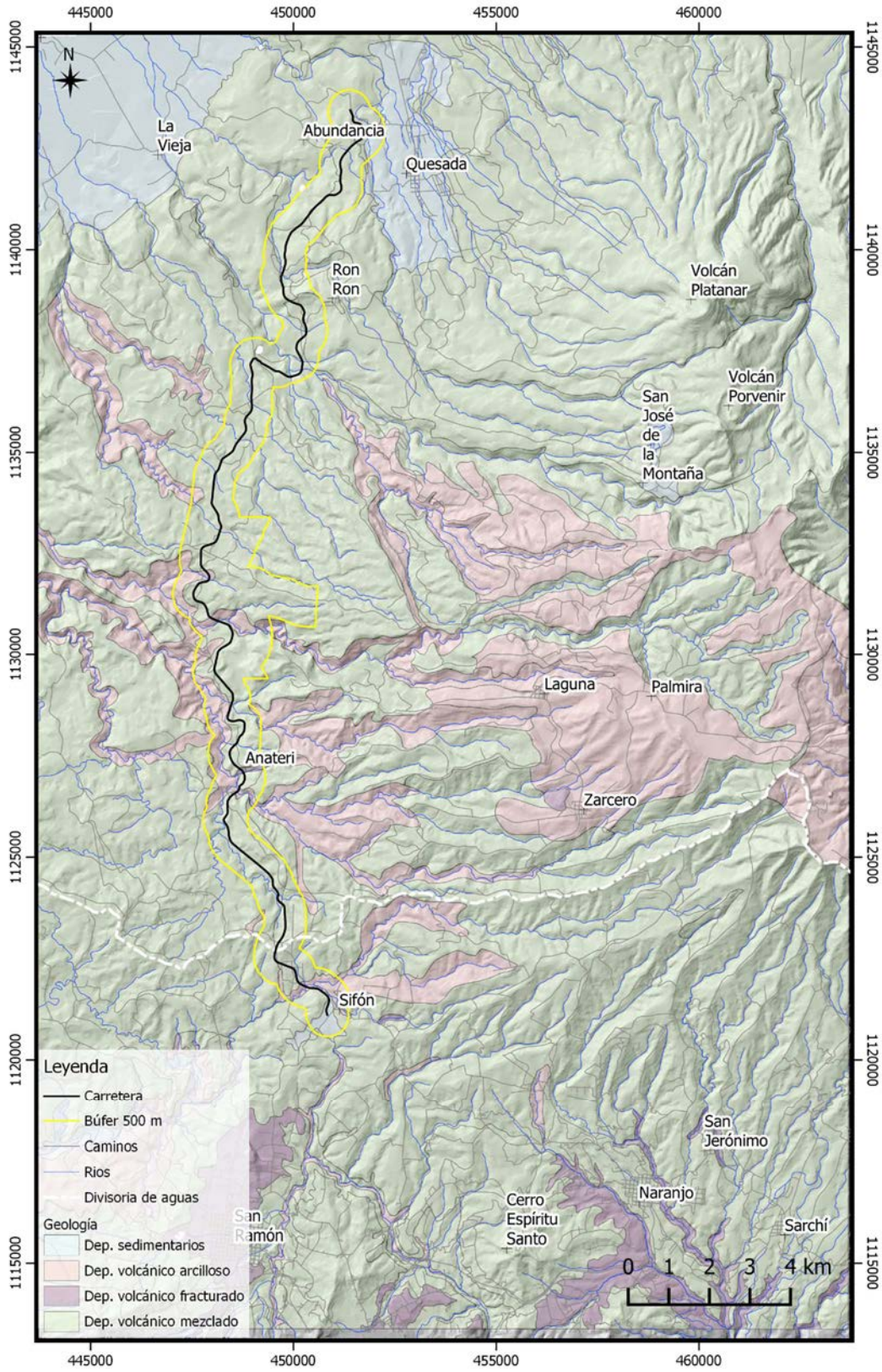


Figura 9: Mapa de geología simplificado.

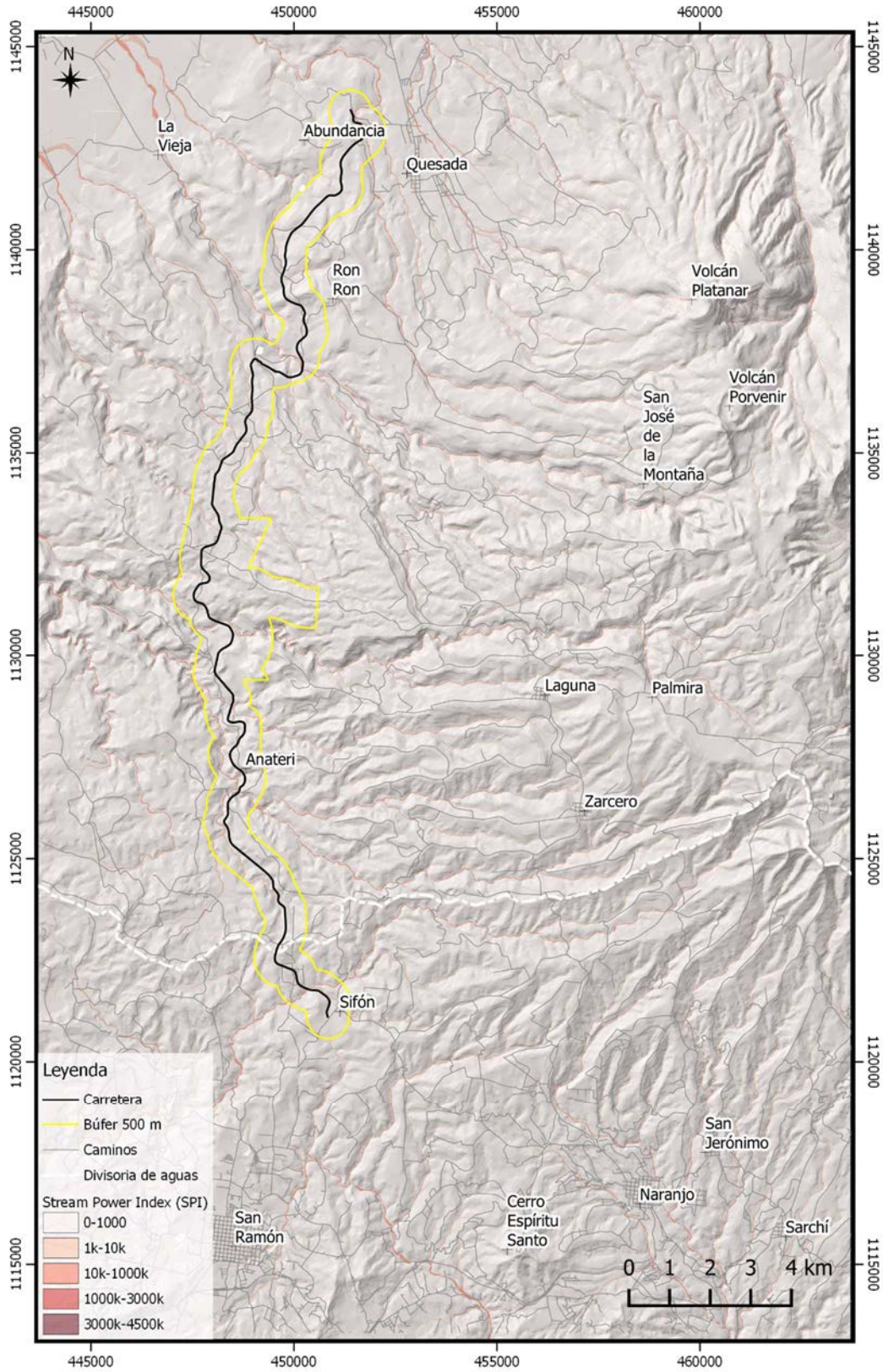


Figura 10: Mapa de índice de energía de la corriente (SPI).

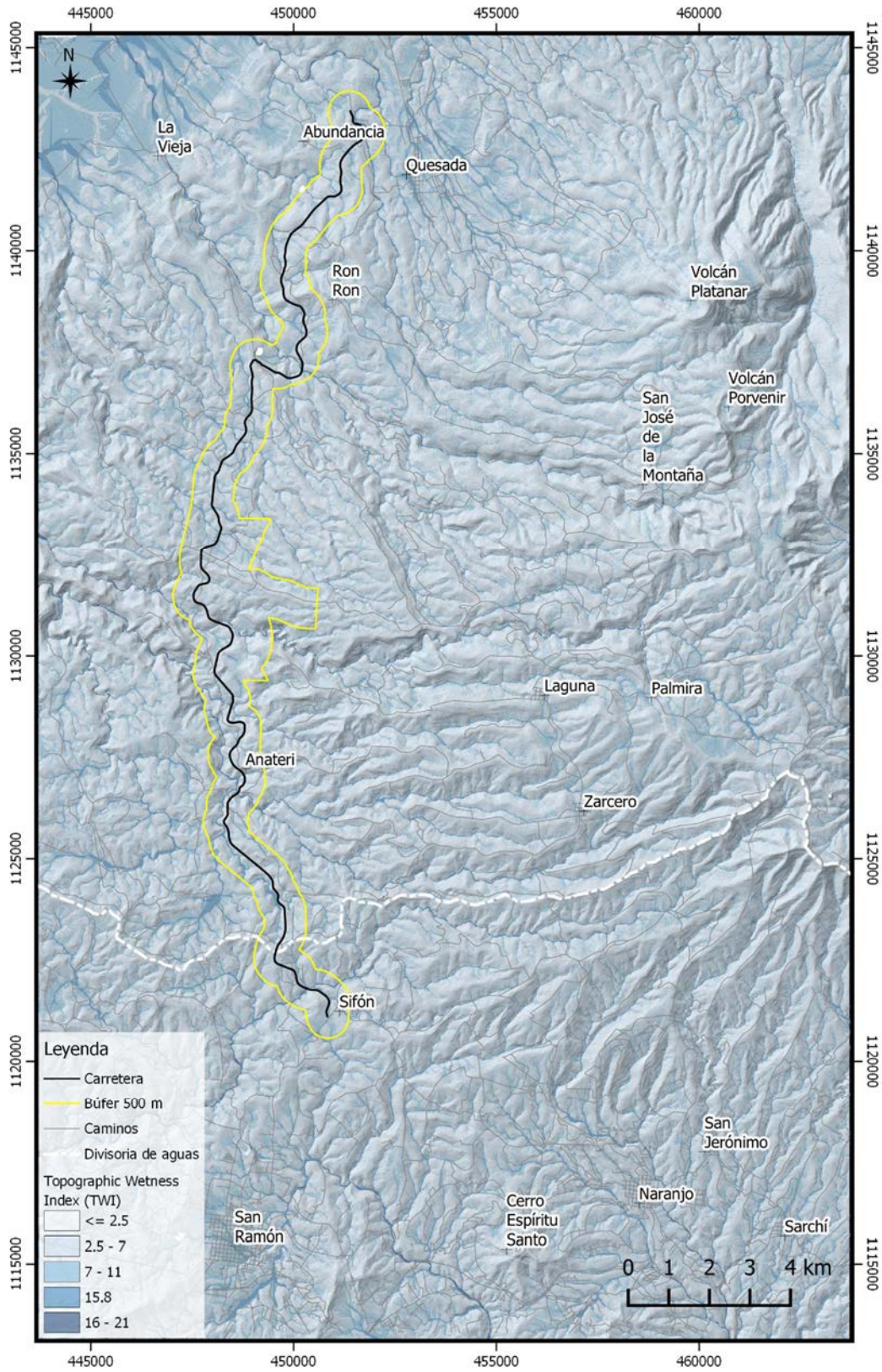


Figura 11: Mapa de índice de humedad topográfica (TWI).

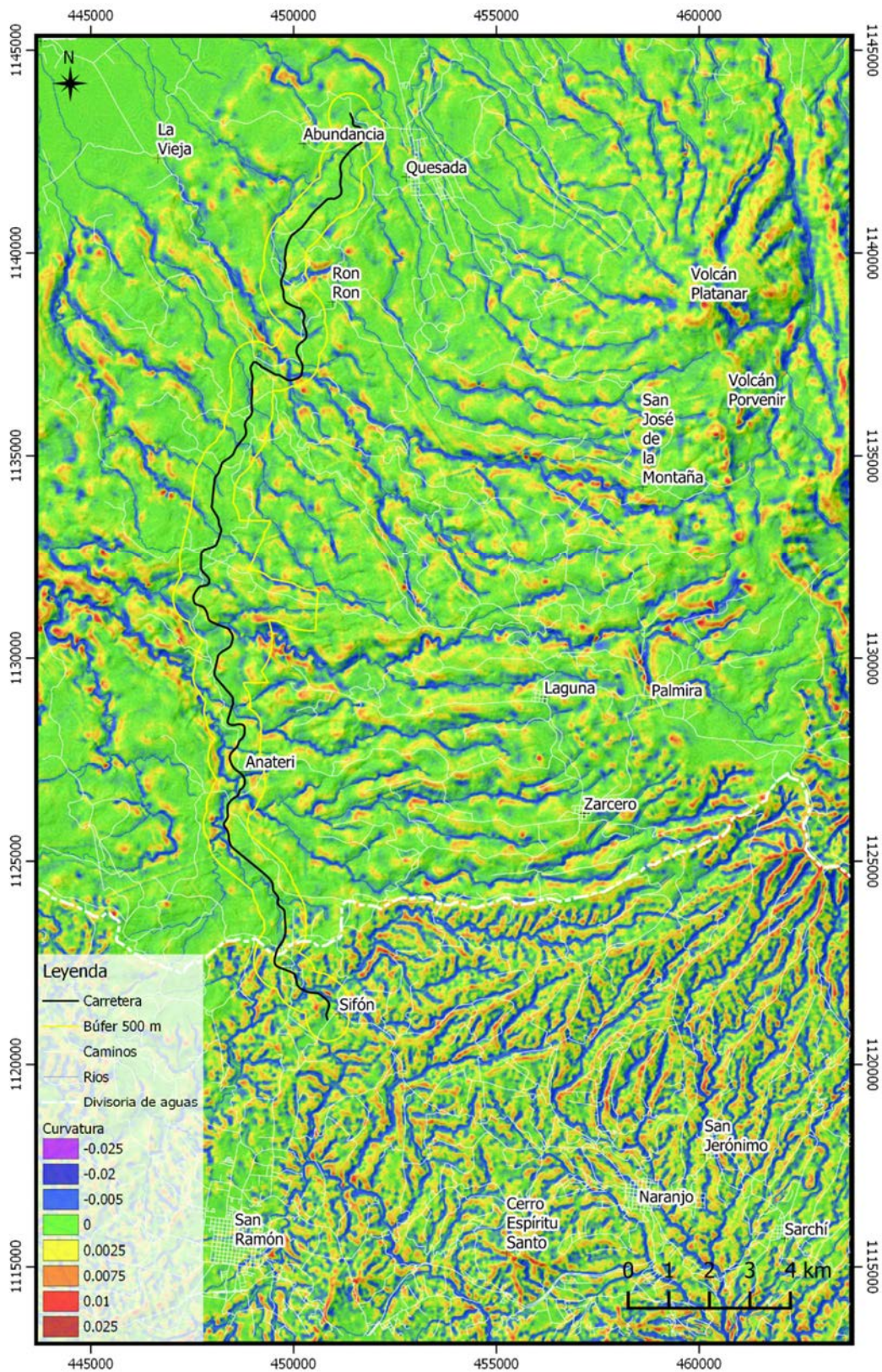


Figura 12: Mapa de curvatura.

ANEXO 7: Catálogo histórico de deslizamientos para el área de estudio local (ejemplo: deslizamientos 1 a 60 de 2378)

fid	Edad	Area	Perimetro	X_crtm05	Y_crtm05	Provincia	Canton	Distrito	dem_max	Slope_mean	geo_CODE	km
0	Antiguo	87056	1294.2	448854.82	1130918.65	Alajuela	Alfaro Ruiz	Zapote	1111	28.5251475	dQ	21900
1	Antiguo	26016.1	700.2	449751.45	1121681.54	Alajuela	San Ramon	Volio	1124	19.3968168	igQft	11000
2	Antiguo	6794.2	339.5	450020.44	1123801.97	Alajuela	San Ramon	Volio	1200	21.710058	tQi	13200
3	Antiguo	24188.5	734.9	449937.16	1124190.51	Alajuela	San Ramon	Volio	1227	24.1964528	tQi	13700
4	Antiguo	7229.7	359.3	450076.37	1124210.21	Alajuela	San Ramon	Volio	1207	19.9594375	tQi	13600
5	Antiguo	24044.9	569.5	449080.48	1124988.03	Alajuela	San Ramon	Volio	1180	23.9274313	tQi	14700
6	Antiguo	2741.8	199.6	448915.83	1124666.63	Alajuela	San Ramon	Volio	1131	24.6102653	tQi	14600
7	Antiguo	14155.5	453.1	449020.51	1124710	Alajuela	San Ramon	Volio	1149	17.9977992	tQi	14600
8	Antiguo	1528.4	165.1	448706.4	1124968.79	Alajuela	San Ramon	Volio	1115	28.0520612	tQi	15000
9	Antiguo	12980.3	451	448322.17	1125252.17	Alajuela	San Ramon	Angeles	1117	18.264925	fQ	15400
10	Antiguo	5278.6	357.9	448822.25	1125646.42	Alajuela	San Ramon	Volio	1158	26.8542631	tQi	15700
11	Antiguo	2709	224.9	448696.02	1125829.26	Alajuela	San Ramon	Volio	1125	25.2983592	tQi	15800
12	Antiguo	10563.6	448.2	448618.17	1125313.5	Alajuela	San Ramon	Volio	1146	26.329229	tQi	15300
13	Antiguo	6315.3	344	448521.97	1125387.38	Alajuela	San Ramon	Volio	1124	20.2477204	tQi	15400
14	Antiguo	10678.1	460.6	448167.67	1125034.53	Alajuela	San Ramon	Angeles	1128	16.9273015	tQap	15400
15	Antiguo	18739.9	554.9	448188.79	1125359.92	Alajuela	San Ramon	Angeles	1118	15.4490519	tQi	15500
16	Antiguo	6409.3	346.5	448751.96	1126111.02	Alajuela	San Ramon	Volio	1112	15.6492809	tQi	16200
17	Antiguo	13889.7	452.1	448487.41	1126379.38	Alajuela	San Ramon	Volio	1096	33.5652825	tQi	16600
18	Reciente	11874.5	495.3	448562.58	1126535.02	Alajuela	San Ramon	Volio	1063	35.5463752	fQ	16700
19	Antiguo	7745.5	364.1	448795.28	1126646.17	Alajuela	Alfaro Ruiz	Guadalupe	1066	25.8785591	tQap	17000
20	Antiguo	8817.5	380.2	448809.86	1126768.12	Alajuela	Alfaro Ruiz	Guadalupe	1078	26.0851585	tQi	17100
21	Antiguo	5593.1	299.4	448836.36	1126844.56	Alajuela	Alfaro Ruiz	Guadalupe	1059	25.3570382	tQi	17100
22	Antiguo	3779.5	244.8	448342.15	1127130.71	Alajuela	Alfaro Ruiz	Guadalupe	1019	32.6018743	tQap	17700
23	Reciente	2599.1	198.3	448566.55	1127392.81	Alajuela	Alfaro Ruiz	Guadalupe	1060	30.9074135	dQ	17800
24	Antiguo	8694.8	449.1	448641.61	1127303.05	Alajuela	Alfaro Ruiz	Guadalupe	1072	28.2627675	tQi	17600
25	Antiguo	28137.8	740.2	450534.25	1122225.81	Alajuela	San Ramon	Volio	1208	18.2394721	tQap	10600
26	Reciente	17534.5	778.1	448369.1	1127773.57	Alajuela	Alfaro Ruiz	Guadalupe	1007	35.8133294	tQap	18100
27	Reciente	44557.3	920.5	448362.78	1128745.68	Alajuela	Alfaro Ruiz	Guadalupe	954	23.0595022	fQ	19600
28	Antiguo	9899.2	485.5	448505.33	1129203.64	Alajuela	Alfaro Ruiz	Laguna	1000	28.7057371	bQi	20100
30	Antiguo	13182.4	635.2	448070.89	1132226.28	Alajuela	Alfaro Ruiz	Zapote	1033	21.6231982	tQi	24000
31	Antiguo	7847	406.6	448694.61	1135203.47	Alajuela	San Carlos	Buena Vista	874	24.4023556	tQi	27800
32	Antiguo	10248.5	391.2	450534.21	1137260.34	Alajuela	San Carlos	Quesada	789	26.0653388	daQ	31600
33	Antiguo	11727.3	462.9	449802.19	1138050.66	Alajuela	San Carlos	Quesada	742	21.48694	daQ	32300
34	Antiguo	20792.7	552.4	450187.46	1137651.75	Alajuela	San Carlos	Quesada	798	24.6056743	tQi	32200
35	Antiguo	997.5	120.5	450614.29	1138376.46	Alajuela	San Carlos	Quesada	786	17.3494477	tQi	33000
36	Reciente	10212.2	490.4	449963.44	1138820.77	Alajuela	San Carlos	Quesada	801	31.3789089	tQi	33500
37	Antiguo	13722.7	502.1	449496.38	1139087.28	Alajuela	San Carlos	Quesada	681	23.0100338	tQi	34000
38	Antiguo	1646.5	169.9	449871.17	1139674.98	Alajuela	San Carlos	Quesada	673	26.8324925	daQ	34600
39	Antiguo	30623.9	784.6	449973.07	1140020.11	Alajuela	San Carlos	Quesada	723	22.7043448	daQ	34900
40	Reciente	1462.7	152.1	449824.36	1139888.54	Alajuela	San Carlos	Quesada	676	34.4108159	tQap	34800
41	Antiguo	37301.4	828.6	450119.7	1140939.48	Alajuela	San Carlos	Quesada	680	19.7075385	tQi	35900
42	Antiguo	60217.3	1187	450892.75	1141134.5	Alajuela	San Carlos	Quesada	697	20.9039134	dQ	36500
43	Reciente	1996.1	176	451579.59	1142599.71	Alajuela	San Carlos	Quesada	624	28.8500458	tQi	38400
44	Antiguo	32052.8	997.9	451190.46	1143141.6	Alajuela	San Carlos	Quesada	625	17.3000052	daQ	39200
45	Antiguo	53927.8	952.9	451052.5	1143266.53	Alajuela	San Carlos	Quesada	631	25.6929527	daQ	39400
46	Antiguo	2945	219.2	448410.97	1125797.84	Alajuela	San Ramon	Volio	1105	17.1794783	tQi	15800
47	Reciente	6487.6	332.7	451211.72	1142039.96	Alajuela	San Carlos	Quesada	643	24.2978037	tQi	37600
48	Antiguo	1635.5	172.6	448763.89	1125024.92	Alajuela	San Ramon	Volio	1126	29.0638011	tQi	15000
49	Antiguo	5617.1	319.7	450140.05	1123926.72	Alajuela	San Ramon	Volio	1209	20.4173815	tQi	13300
50	Reciente	21073.1	706.5	448423.23	1128891.93	Alajuela	Alfaro Ruiz	Laguna	934	24.5832642	fQ	19800
51	Antiguo	19167.9	579.5	448485.46	1131029.08	Alajuela	Alfaro Ruiz	Zapote	1015	35.375477	daQ	22100
52	Antiguo	100279.5	1365.5	448201.63	1131020.17	Alajuela	Alfaro Ruiz	Zapote	1000	31.6786548	daQ	22300
53	Antiguo	7945.5	409.7	449051.69	1128184.92	Alajuela	Alfaro Ruiz	Guadalupe	1119	26.3354415	dQ	18700
54	Antiguo	6646.9	324.7	448770.63	1135192.37	Alajuela	San Carlos	Buena Vista	874	25.7614059	tQi	27900
55	Antiguo	2393.4	196	449158.05	1137737.72	Alajuela	San Carlos	Buena Vista	748	29.0640823	b-aQubt	30100
56	Reciente	9858.5	400.5	449853.99	1137316.26	Alajuela	San Carlos	Buena Vista	684	21.2763521	dQ	31800
57	Antiguo	11507.8	418.8	449701.03	1137095.03	Alajuela	San Carlos	Buena Vista	761	32.8329737	dQ	30800
58	Antiguo	17043	535.8	450336.81	1137770.67	Alajuela	San Carlos	Quesada	800	24.8823649	tQi	32400
59	Antiguo	4591.6	305.3	449885.58	1138876.89	Alajuela	San Carlos	Quesada	770	26.7964867	daQ	33700
60	Antiguo	71588	1038.5	450203.89	1138803.67	Alajuela	San Carlos	Quesada	867	28.5715247	dQ	33300

ANEXO 8: Informes de la clasificación de SUCS y ensayos realizados por el laboratorio de Geotecnia del LanammeUCR



Informe de Ensayo

RC-80 v.10 (Sistema de Gestión de Calidad, LanammeUCR. Norma INTE ISO/IEC 17025)

ST-1150-18

Informe Final

1. Información del cliente:

Nombre: Unidad de Gestión y Evaluación de la Red Vial Nacional / Geól. Paulo Ruíz

Proyecto: Ruta Sifón-La Abundancia

Domicilio: LanammeUCR, San Pedro de Montes de Oca, San José.

2. Método de ensayo:

IT-GC-01 (ASTM D 422) (**)

Método de ensayo para el análisis de tamaño de partículas de suelo (vía húmeda).

IT-GC-02 (ASTM D 2216) (*).

Procedimiento para determinar el contenido de humedad de suelos y rocas.

IT-GC-04 (ASTM D 854) (*)

Procedimiento para determinar la gravedad específica del suelo mediante un picnómetro con agua.

IT-GC-05 (ASTM D 4318) (*)

Procedimiento para determinar el límite líquido, límite plástico e índice de plasticidad de un suelo. (ASTM D 6913) (**)

Método de ensayo para el análisis de tamaño de partículas de suelo (utilizando tamices).

ASTM D-1140 (*)

Métodos de ensayo estándar para determinar la cantidad de material más fino que el tamiz de 75 µm (Nº 200) en suelos mediante lavado.

ASTM D 2487 (**)

Práctica estándar para clasificación de suelos con propósitos ingenieriles (Sistema Unificado de Clasificación de Suelos).



(*) Ensayo acreditado. Ver alcance en www.eca.or.cr.

(**) Ensayo no acreditado

No. de informe: I-1568-18

3. Información de las muestras o especímenes de ensayo:

<u>No. de identificación:</u>	<u>Descripción:</u>
M-1913-18	Código de muestreo: TA-Ms1. X (crtm05): 450116. Y (crtm05): 1121869. Litología madre: Ignimbrita blanca con boitita. Suelo arcilloso color café claro, combinado con suelo semicompacto color amarillento, no presenta roca compacta. Suelo homogéneo en su tamaño máximo.
M-1914-18	Código de muestreo: TA-Ms2. X (crtm05): 449557. Y (crtm05): 1122555. Litología madre: Paquete Ignimbrita Rosada. Suelo limo arcilloso color café claro, combinado con suelo semicompacto de veta color grisácea y amarillenta. Tamaño homogéneo de partículas y no presenta roca compacta.
M-1918-18	Código de muestreo: TA-Ms11. X (crtm05): 448409. Y (crtm05): 1128352. Litología madre: Desconocido. Suelo limoso color café oscuro, tamaño de partículas homogéneas y finas, no presenta roca compacta pero sí algunas partículas de materia orgánica (raíces).
M-1920-18	Código de muestreo: TA-Ms17. X (crtm05): 447649. Y (crtm05): 1132572. Litología madre: Paquete Ignimbrita Rosada. Suelo arcilloso color rojizo, combinado con pequeños grumos de suelo semicompacto de color grisáceo y pigmentos blancuzcos. Tamaño máximo de partículas homogéneo (finos).
M-1921-18	Código de muestreo: TA-Ms18 X (crtm05): 448178. Y (crtm05): 1132971. Litología madre: Ignimbrita Rosada (rojiza). Suelo arcillo-limoso color café oscuro, de tamaño máximo de partículas finas, no presenta roca compacta y tiene leves partículas orgánicas (raíces).
M-1924-18	Código de muestreo: TA-Ms22. X (crtm05): 449800. Y (crtm05): 1139605. Litología madre: Brecha Volcánica. Suelo limoso color café oscuro, presenta leves o pequeñas partículas de suelo semicompacto de color amarillentas y rojizas. También tiene pocas partículas de roca compacta de un tamaño no mayor a 10 mm.
<u>Aportadas por:</u>	Geól. Paulo Ruíz
<u>Fecha de recepción:</u>	2018/09/10
<u>Fecha de realización del ensayo:</u>	2018/09/10-2018/11/30

No. de informe: I-1568-18

4. Información del muestreo:

Fecha de muestreo:

2018/08/24

Ubicación:

Muestra: M-1913-18

Ubicación de muestreo: Sifón - La Abundancia, estacionamiento:
km 11+000.

Muestra: M-1914-18

Ubicación de muestreo: Sifón - La Abundancia, estacionamiento:
km 11+900.

Muestra: M-1918-18

Ubicación de muestreo: Sifón - La Abundancia, estacionamiento:
km 18+300.

Muestra: M-1920-18

Ubicación de muestreo: Sifón - La Abundancia, estacionamiento:
km 24+700.

Muestra: M-1921-18

Ubicación de muestreo: Sifón - La Abundancia, estacionamiento:
km 25+300.

Muestra: M-1924-18

Ubicación de muestreo: Sifón - La Abundancia, estacionamiento:
km 25+300.

Procedimiento de muestreo:

Muestreo de agregado realizado por personal técnico de la Unidad de Gestión y Evaluación de la Red Vial Nacional de acuerdo a la norma ASTM D-75. Personal responsable de la muestra: Geól. Paulo Ruíz Cubillo.

Condiciones ambientales:

No aplica pues en el laboratorio los especímenes se acondicionan.



5. Resultados:

Tabla 1. Límite líquido, límite plástico e índice de plasticidad de las muestras.

MUESTRA	LÍMITE LÍQUIDO	LÍMITE PLÁSTICO	ÍNDICE PLÁSTICIDAD
1913-18	60	39	21
1914-18	70	52	18
1918-18	47	38	9
1920-18	46	34	12
1921-18	57	49	8
1924-18	57	41	16

Nota:

-La muestra fue acondicionada por el método de preparación en seco.

-El límite líquido se determina según el método A (método multipunto) de la norma ASTM D 4318.

Tabla 2. Gravedad específica del suelo.

MUESTRA	MÉTODO	G_T	G_S
1913-18	B	2,675	2,673
1914-18	B	2,683	2,681
1918-18	B	2,672	2,670
1920-18	B	2,675	2,673
1921-18	B	2,697	2,695
1924-18	B	2,706	2,704

Tabla 3. Resultados del ensayo para determinar la cantidad de material más fino que el tamiz de 75 μm (N° 200) en suelos mediante lavado.

MUESTRA	MASA SECA INICIAL (g)	MATERIAL MAS FINO QUE 75 μm (%)	MÉTODO UTILIZADO	TIEMPO DE INMERSIÓN (h)
1913-18	597,2	87,9	A (sin sumergir)	-
1914-18	479,2	97,4	A (sin sumergir)	-
1918-18	291,0	40,4	B (con defloculante)	1,0
1920-18	652,1	82,2	A (sin sumergir)	-
1921-18	258,6	42,4	B (con defloculante)	1,0
1924-18	538,2	65,4	B (con defloculante)	1,0

- La masa inicial se determina por medio del método de masa constante.



No. de informe: I-1568-18

Tabla 4. Contenido de Humedad de los suelos y rocas de las muestras.

MUESTRA No.	HUMEDAD NATURAL (%)
1913-18	41,7
1914-18	72,4
1918-18	54,9
1920-18	45,4
1921-18	92,6
1924-18	46,3

Tabla 5. Análisis granulométrico de suelos vía húmeda. Muestra: M-1913-18.

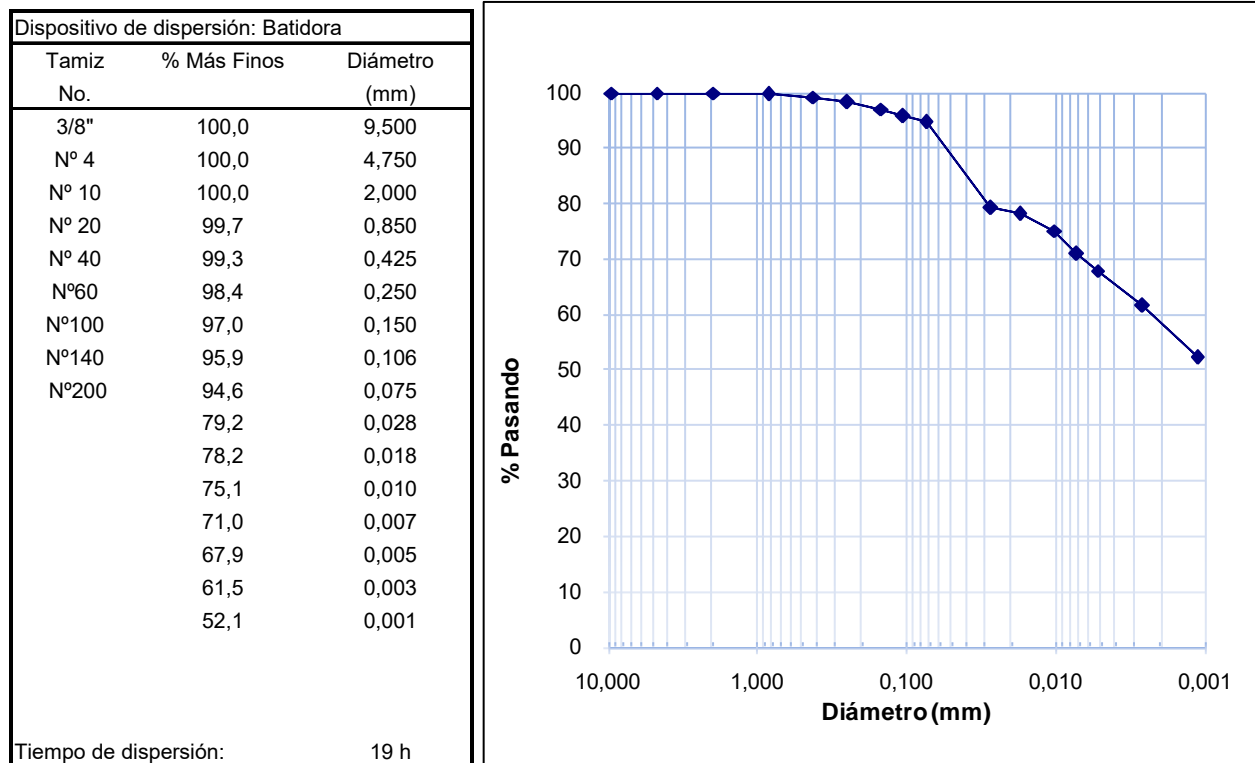


Tabla 6. Análisis granulométrico de suelos vía húmeda. Muestra: M-1914-18.

Dispositivo de dispersión: Batidora		
Tamiz No.	% Más Finos	Diámetro (mm)
3/8"	100,0	9,500
Nº 4	100,0	4,750
Nº 10	100,0	2,000
Nº 20	99,7	0,850
Nº 40	99,0	0,425
Nº60	97,9	0,250
Nº100	95,9	0,150
Nº140	94,0	0,106
Nº200	91,6	0,075
	80,3	0,027
	74,1	0,018
	67,9	0,010
	62,8	0,008
	56,5	0,005
	44,9	0,003
	32,4	0,001

Tiempo de dispersión: 19 h

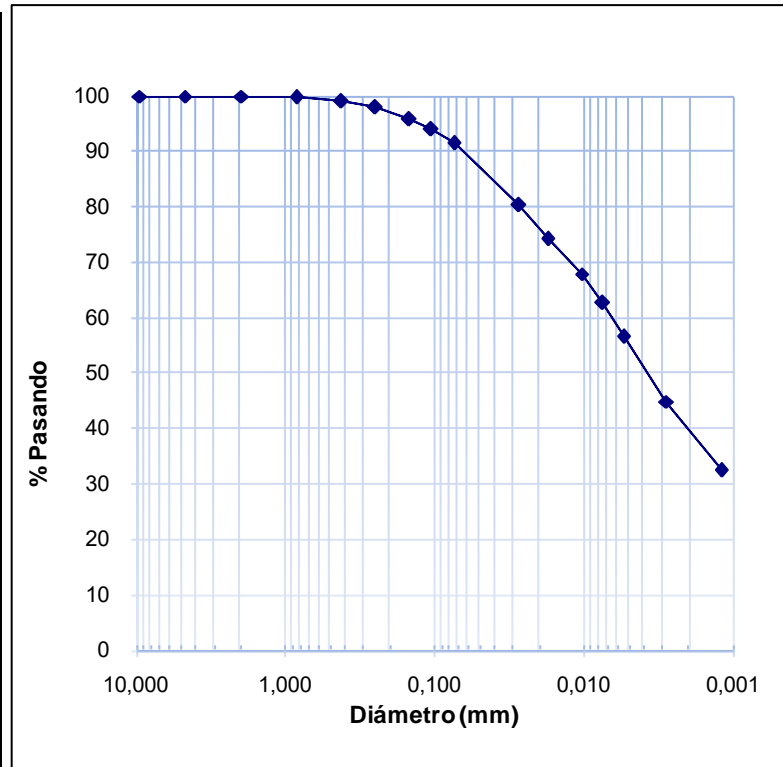
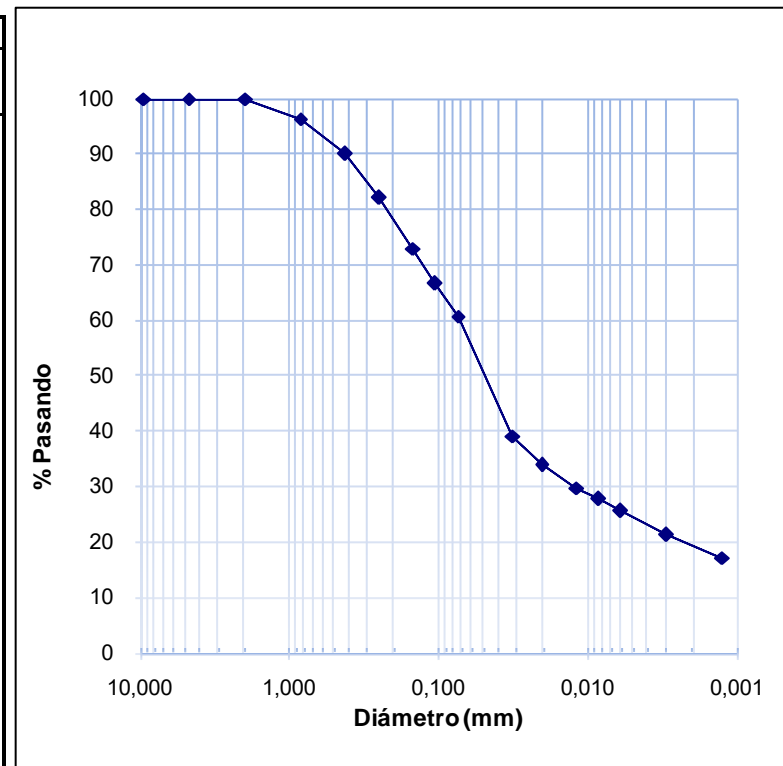


Tabla 7. Análisis granulométrico de suelos vía húmeda. Muestra: M-1918-18.

Dispositivo de dispersión: Batidora		
Tamiz No.	% Más Finos	Diámetro (mm)
3/8"	100,0	9,500
Nº 4	100,0	4,750
Nº 10	100,0	2,000
Nº 20	96,3	0,850
Nº 40	90,1	0,425
Nº60	82,2	0,250
Nº100	72,9	0,150
Nº140	66,7	0,106
Nº200	60,7	0,075
	39,1	0,032
	33,9	0,021
	29,7	0,012
	27,7	0,009
	25,7	0,006
	21,2	0,003
	17,2	0,001

Tiempo de dispersión: 21 h





No. de informe: I-1568-18

Tabla 8. Análisis granulométrico de suelos vía húmeda. Muestra: M-1920-18.

Dispositivo de dispersión: Batidora		
Tamiz No.	% Más Finos	Diámetro (mm)
3/8"	100,0	9,500
Nº 4	100,0	4,750
Nº 10	100,0	2,000
Nº 20	99,1	0,850
Nº 40	97,4	0,425
Nº60	95,2	0,250
Nº100	92,4	0,150
Nº140	90,5	0,106
Nº200	88,4	0,075
	82,2	0,027
	79,1	0,017
	73,0	0,010
	67,9	0,007
	61,8	0,005
	48,3	0,003
	32,1	0,001

Tiempo de dispersión: 21 h

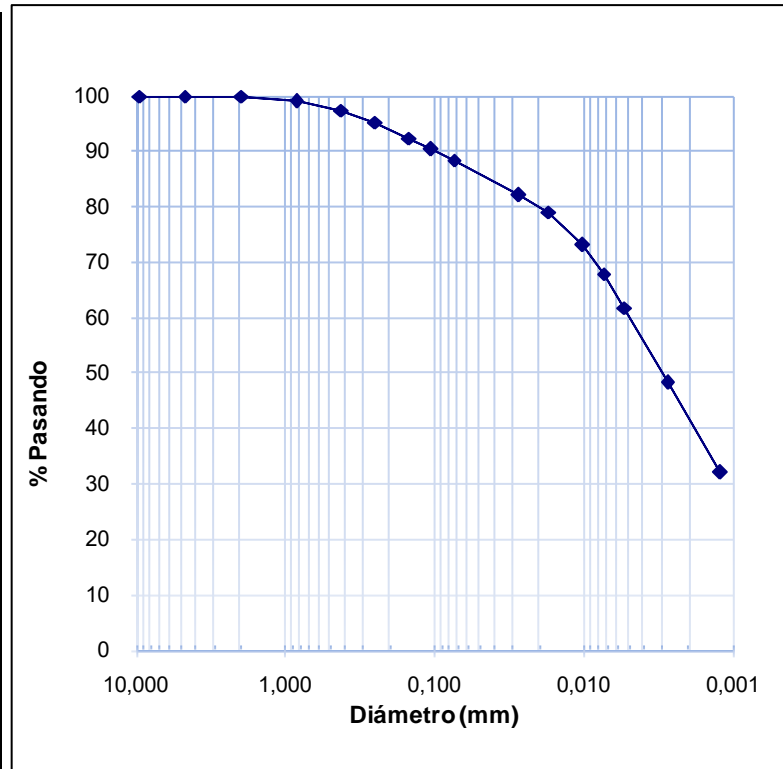
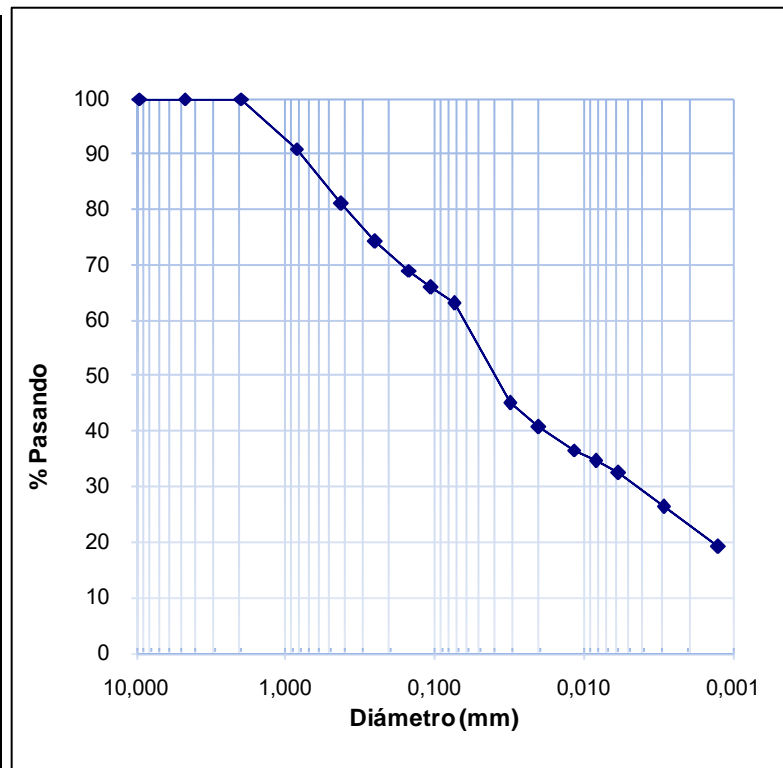


Tabla 9. Análisis granulométrico de suelos vía húmeda. Muestra: M-1921-18.

Dispositivo de dispersión: Batidora		
Tamiz No.	% Más Finos	Diámetro (mm)
3/8"	100,0	9,500
Nº 4	100,0	4,750
Nº 10	100,0	2,000
Nº 20	91,0	0,850
Nº 40	81,0	0,425
Nº60	74,2	0,250
Nº100	68,9	0,150
Nº140	65,8	0,106
Nº200	62,9	0,075
	45,0	0,032
	40,8	0,020
	36,6	0,012
	34,5	0,008
	32,4	0,006
	26,3	0,003
	19,2	0,001

Tiempo de dispersión: 21 h



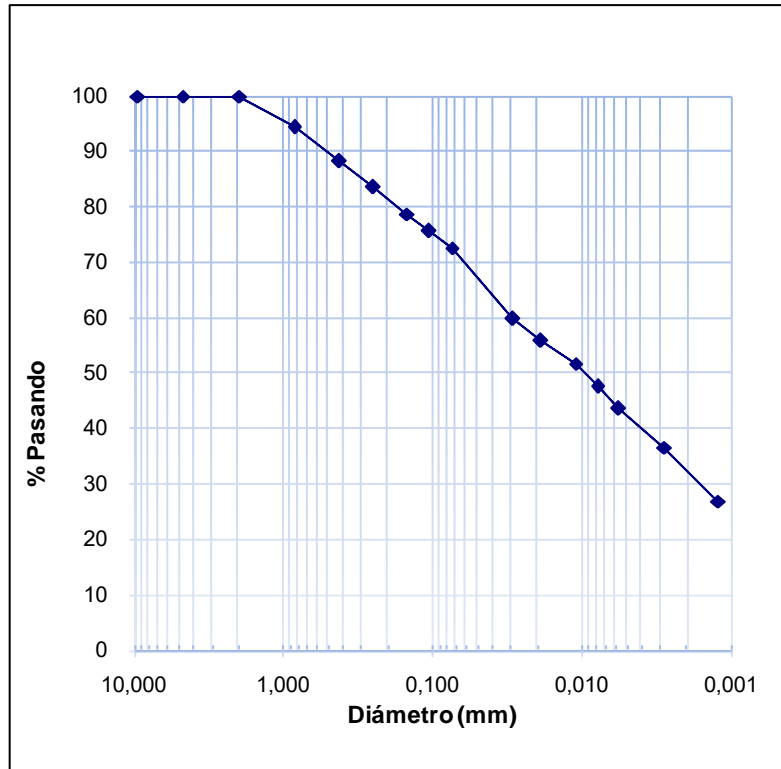


No. de informe: I-1568-18

Tabla 10. Análisis granulométrico de suelos vía húmeda. Muestra: M-1924-18.

Dispositivo de dispersión: Batidora		
Tamiz No.	% Más Finos	Diámetro (mm)
3/8"	100,0	9,500
Nº 4	100,0	4,750
Nº 10	100,0	2,000
Nº 20	94,4	0,850
Nº 40	88,4	0,425
Nº60	83,4	0,250
Nº100	78,7	0,150
Nº140	75,6	0,106
Nº200	72,6	0,075
	59,9	0,029
	55,8	0,019
	51,7	0,011
	47,7	0,008
	43,6	0,006
	36,6	0,003
	26,8	0,001

Tiempo de dispersión: 20 h





No. de informe: I-1568-18

Tabla 11. Análisis granulométrico de suelos vía seca. Muestra: M-1913-18.

MALLA No.	ABERTURA (mm)	MASA RET.	% RET.	% RET AC.	% PAS.
2"	50,0	0,00	0,00	0,00	100
1 1/2"	37,5	0,00	0,00	0,00	100,0
1"	25,0	0,00	0,00	0,0	100,0
3/4"	19,0	0,00	0,00	0,0	100,0
1/2"	12,5	0,00	0,00	0,0	100,0
3/8"	9,50	0,00	0,00	0,0	100,0
Nº 4	4,75	0,29	0,0	0,0	100,0
Nº 10	2,00	4,85	0,4	0,4	99,6
Nº 20	0,85	68,47	5,8	6,3	93,7
Nº 40	0,43	93,80	8,01	14,3	85,7
Nº60	0,25	54,29	4,64	18,9	81,1
Nº100	0,15	43,46	3,71	22,7	77,3
Nº140	0,11	42,00	3,59	26,2	73,8
Nº200	0,08	63,40	5,42	31,7	68,3

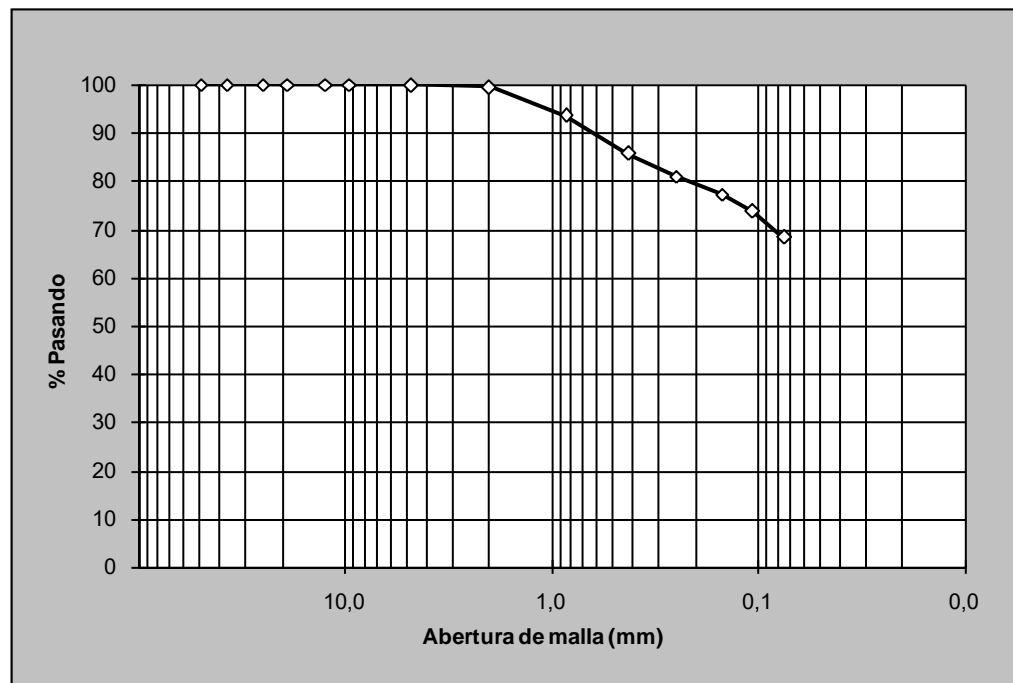


Gráfico 1. Curva granulométrica. Muestra: M-1913-18.



No. de informe: I-1568-18

Tabla 12. Análisis granulométrico de suelos vía seca. Muestra: M-1914-18.

MASA INICIAL: 976 g MASA FINAL: 265 g

MALLA No.	ABERTURA (mm)	MASA RET.	% RET.	% RET AC.	% PAS.
2"	50,0	0,00	0,00	0,00	100
1 1/2"	37,5	0,00	0,00	0,00	100,0
1"	25,0	0,00	0,00	0,0	100,0
3/4"	19,0	0,00	0,00	0,0	100,0
1/2"	12,5	0,00	0,00	0,0	100,0
3/8"	9,50	0,00	0,00	0,0	100,0
Nº 4	4,75	0,00	0,0	0,0	100,0
Nº 10	2,00	2,99	0,3	0,3	99,7
Nº 20	0,85	15,15	1,6	1,9	98,1
Nº 40	0,43	36,27	3,72	5,6	94,4
Nº60	0,25	38,74	3,97	9,5	90,5
Nº100	0,15	50,63	5,19	14,7	85,3
Nº140	0,11	53,71	5,50	20,2	79,8
Nº200	0,08	67,87	6,95	27,2	72,8

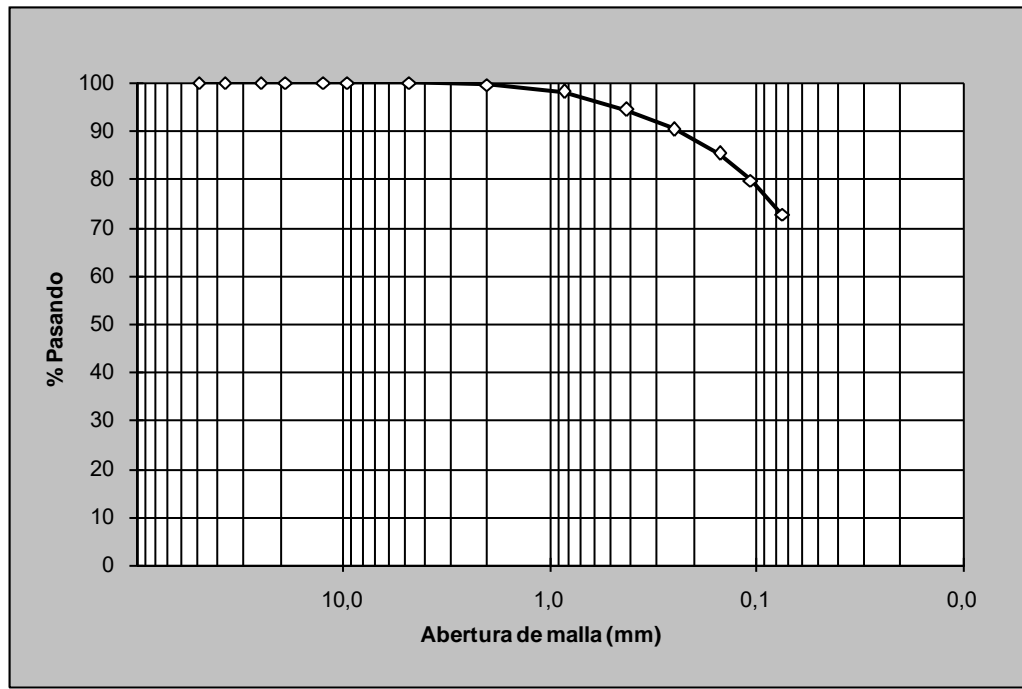


Gráfico 2. Curva granulométrica. Muestra: M-1914-18.



No. de informe: I-1568-18

Tabla 13. Análisis granulométrico de suelos vía seca. Muestra: M-1918-18.

MASA INICIAL: 1077 g MASA FINAL: 688 g

MALLA No.	ABERTURA (mm)	MASA RET.	% RET.	% RET AC.	% PAS.
2"	50,0	0,00	0,00	0,00	100
1 1/2"	37,5	0,00	0,00	0,00	100,0
1"	25,0	0,00	0,00	0,0	100,0
3/4"	19,0	0,00	0,00	0,0	100,0
1/2"	12,5	0,00	0,00	0,0	100,0
3/8"	9,50	0,00	0,00	0,0	100,0
Nº 4	4,75	8,07	0,7	0,7	99,3
Nº 10	2,00	53,46	5,0	5,7	94,3
Nº 20	0,85	80,43	7,5	13,2	86,8
Nº 40	0,43	100,54	9,33	22,5	77,5
Nº60	0,25	119,17	11,06	33,6	66,4
Nº100	0,15	129,92	12,06	45,6	54,4
Nº140	0,11	93,11	8,64	54,3	45,7
Nº200	0,08	102,84	9,55	63,8	36,2

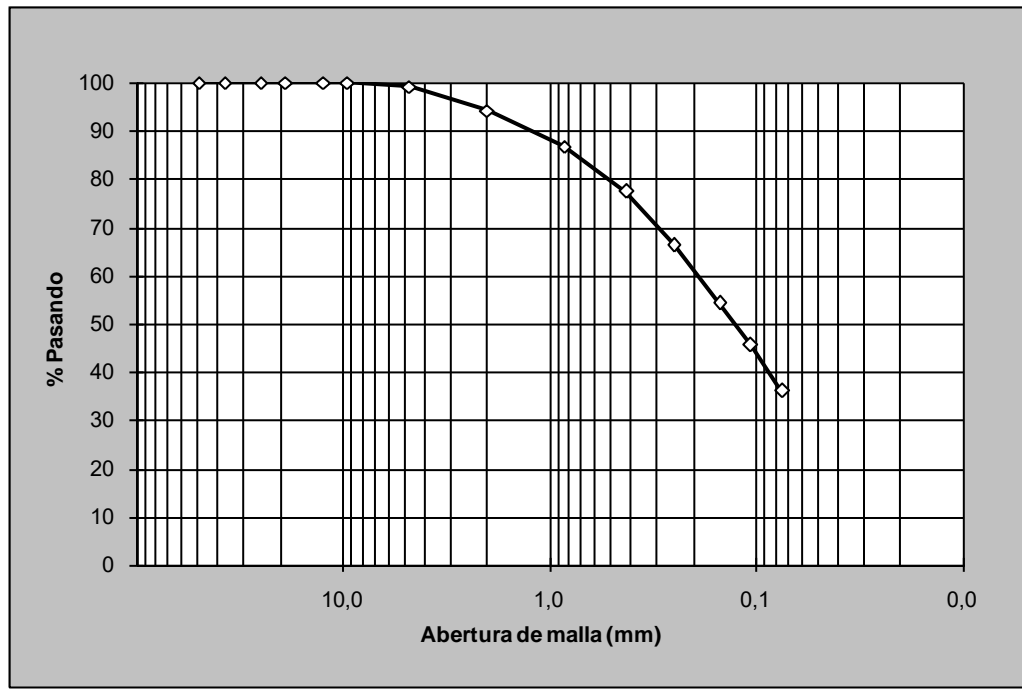


Gráfico 3. Curva granulométrica. Muestra: M-1918-18.



No. de informe: I-1568-18

Tabla 14. Análisis granulométrico de suelos vía seca. Muestra: M-1920-18.

MASA INICIAL: 1192 g MASA FINAL: 267 g

MALLA No.	ABERTURA (mm)	MASA RET.	% RET.	% RET AC.	% PAS.
2"	50,0	0,00	0,00	0,00	100
1 1/2"	37,5	0,00	0,00	0,00	100,0
1"	25,0	0,00	0,00	0,0	100,0
3/4"	19,0	0,00	0,00	0,0	100,0
1/2"	12,5	0,00	0,00	0,0	100,0
3/8"	9,50	0,00	0,00	0,0	100,0
Nº 4	4,75	2,30	0,2	0,2	99,8
Nº 10	2,00	16,32	1,4	1,6	98,4
Nº 20	0,85	40,95	3,4	5,0	95,0
Nº 40	0,43	40,91	3,43	8,4	91,6
Nº60	0,25	41,18	3,46	11,9	88,1
Nº100	0,15	44,63	3,75	15,6	84,4
Nº140	0,11	36,78	3,09	18,7	81,3
Nº200	0,08	43,84	3,68	22,4	77,6

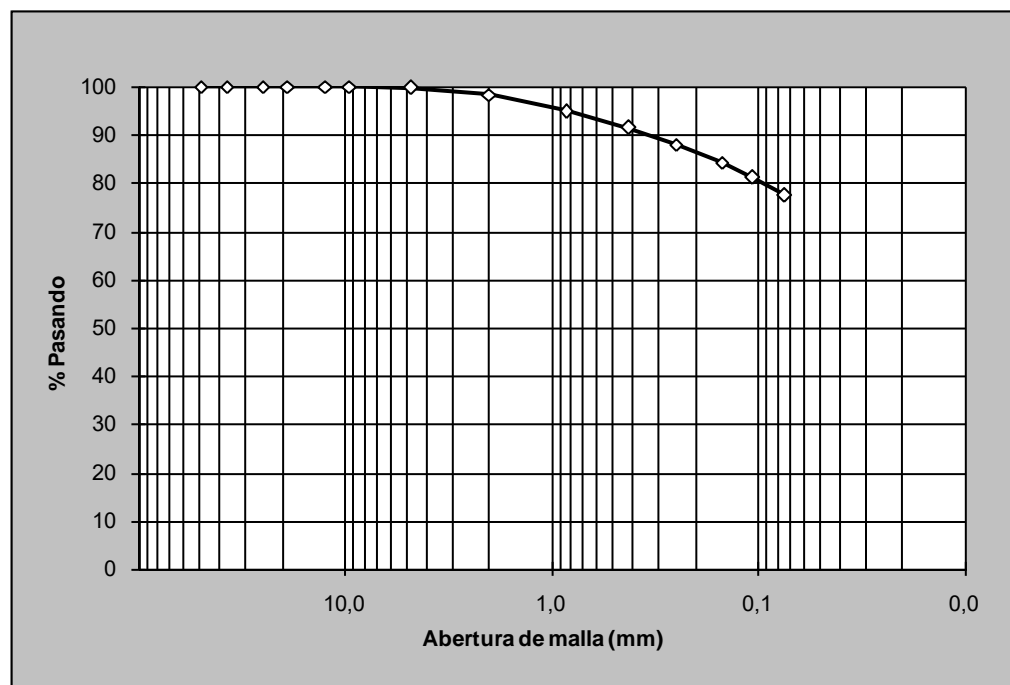


Gráfico 4. Curva granulométrica. Muestra: M-1920-18.



No. de informe: I-1568-18

Tabla 15. Análisis granulométrico de suelos vía seca. Muestra: M-1921-18.

MALLA No.	ABERTURA (mm)	MASA RET.	% RET.	% RET AC.	% PAS.
2"	50,0	0,00	0,00	0,00	100
1 1/2"	37,5	0,00	0,00	0,00	100,0
1"	25,0	0,00	0,00	0,0	100,0
3/4"	19,0	0,00	0,00	0,0	100,0
1/2"	12,5	0,00	0,00	0,0	100,0
3/8"	9,50	3,15	0,24	0,2	99,8
Nº 4	4,75	35,85	2,8	3,0	97,0
Nº 10	2,00	168,20	13,0	16,0	84,0
Nº 20	0,85	223,46	17,3	33,3	66,7
Nº 40	0,43	161,15	12,45	45,7	54,3
Nº60	0,25	107,06	8,27	54,0	46,0
Nº100	0,15	81,28	6,28	60,3	39,7
Nº140	0,11	58,32	4,50	64,8	35,2
Nº200	0,08	66,25	5,12	69,9	30,1

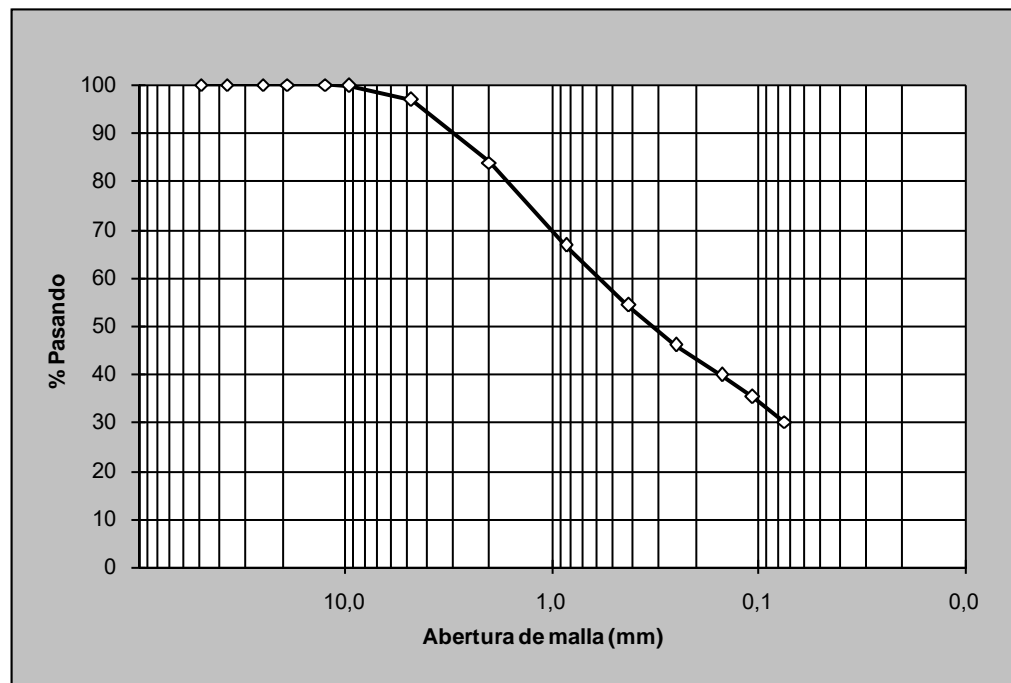


Gráfico 5. Curva granulométrica. Muestra: M-1921-18.



No. de informe: I-1568-18

Tabla 16. Análisis granulométrico de suelos vía seca. Muestra: M-1924-18.

MALLA No.	ABERTURA (mm)	MASA RET.	% RET.	% RET AC.	% PAS.
2"	50,0	0,00	0,00	0,00	100
1 1/2"	37,5	0,00	0,00	0,00	100,0
1"	25,0	0,00	0,00	0,0	100,0
3/4"	19,0	0,00	0,00	0,0	100,0
1/2"	12,5	0,00	0,00	0,0	100,0
3/8"	9,50	0,00	0,00	0,0	100,0
Nº 4	4,75	0,00	0,0	0,0	100,0
Nº 10	2,00	8,47	1,2	1,2	98,8
Nº 20	0,85	29,62	4,2	5,4	94,6
Nº 40	0,43	38,56	5,46	10,9	89,1
Nº60	0,25	38,97	5,52	16,4	83,6
Nº100	0,15	37,47	5,31	21,7	78,3
Nº140	0,11	23,56	3,34	25,0	75,0
Nº200	0,08	23,39	3,31	28,3	71,7

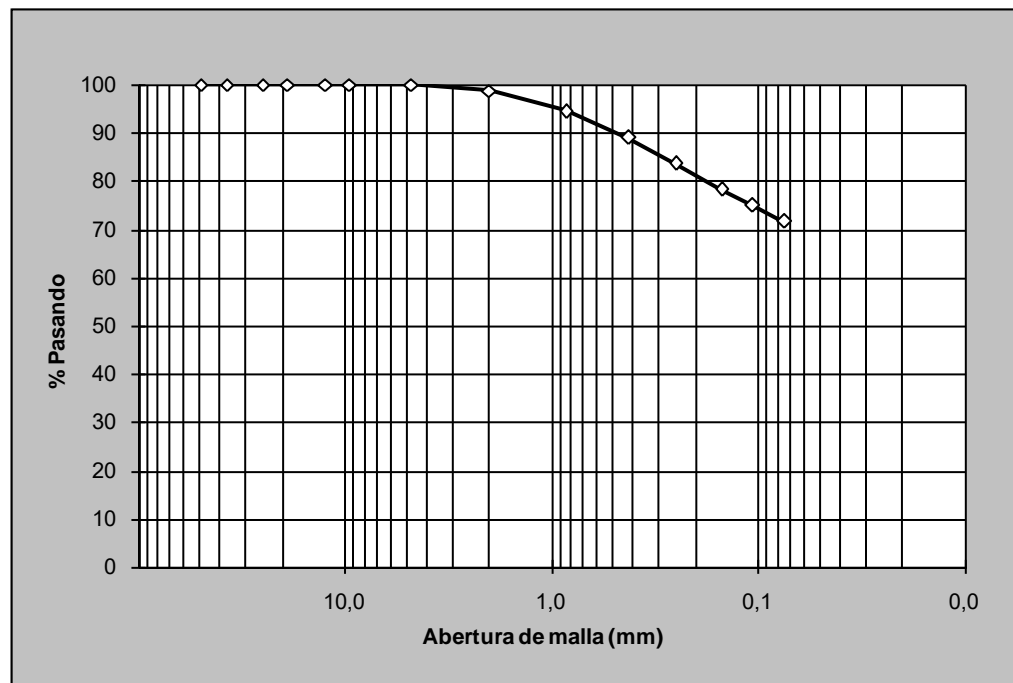


Gráfico 6. Curva granulométrica. Muestra: M-1924-18.



No. de informe: I-1568-18

Tabla 17. Clasificación de los materiales.

MUESTRA	SÍMBOLO SUCS	NOMBRE
M-1913-18	MH	Limo elástico
M-1914-18	MH	Limo elástico
M-1918-18	SM	Arena limosa
M-1920-18	ML	Limo
M-1921-18	SM	Arena limosa
M-1924-18	CH	Arcilla de alta plasticidad

Nota:

SUCS – Sistema Unificado de Clasificación de suelos.

Aclaraciones:

- Este informe complementa el informe I-1512-18.
- El presente informe de ensayo sólo ampara las mediciones reportadas en el momento y condiciones ambientales y de uso en que se realizó esta prueba, para las muestras indicadas en este informe.
- Este informe de resultados tiene validez únicamente en su forma íntegra y original.
- No se permite la reproducción parcial de este documento sin la autorización del Director del LanammeUCR.

Preparó:

Revisó:

Aprobó:

Ing. Oscar Valerio Salas
Jefe Laboratorio de Geotecnia

Ing. Luis Carlos Meseguer Quesada, MBA.
Coordinador de Laboratorios
Área de Construcción

Ing. Alejandro Navas Carro, M.Sc.
Director LanammeUCR

-----ÚLTIMA LÍNEA-----



Informe de Ensayo

RC-80 v.10 (Sistema de Gestión de Calidad, LanammeUCR. Norma INTE ISO/IEC 17025)

ST-1150-18

Informe Parcial

1. Información del cliente:

Nombre: Unidad de Gestión y Evaluación de la Red Vial Nacional / Geól. Paulo Ruíz

Proyecto: Ruta Sifón-La Abundancia

Domicilio: LanammeUCR, San Pedro de Montes de Oca, San José.

2. Método de ensayo:

IT-GC-01 (ASTM D 422) (**)

Método de ensayo para el análisis de tamaño de partículas de suelo (vía húmeda).

IT-GC-02 (ASTM D 2216) (*).

Procedimiento para determinar el contenido de humedad de suelos y rocas.

IT-GC-04 (ASTM D 854) (*)

Procedimiento para determinar la gravedad específica del suelo mediante un picnómetro con agua.

IT-GC-05 (ASTM D 4318) (*)

Procedimiento para determinar el límite líquido, límite plástico e índice de plasticidad de un suelo.

(ASTM D 6913) (**)

Método de ensayo para el análisis de tamaño de partículas de suelo (utilizando tamices).

ASTM D-1140 (*)

Métodos de ensayo estándar para determinar la cantidad de material más fino que el tamiz de 75 µm (Nº 200) en suelos mediante lavado.

ASTM D 2487 (**)

Práctica estándar para clasificación de suelos con propósitos ingenieriles (Sistema Unificado de Clasificación de Suelos).



(*) Ensayo acreditado. Ver alcance en www.eca.or.cr.

(**) Ensayo no acreditado

3. Información de las muestras o especímenes de ensayo:

No. de identificación:

Descripción:

M-1915-18	Código de muestreo: TA-Ms4. X (crtm05): 449539. Y (crtm05): 1124178. Litología madre: Ignimbrita Rosada (parte roja). Suelo limoso color café oscuro, presenta pequeños grumos de suelo semicompacto de color rojizo y pigmentos blancuzcos. Suelo homogéneo en su tamaño máximo (fino). No presenta roca compacta.
M-1916-18	Código de muestreo: TA-Ms5. X (crtm05): 448385. Y (crtm05): 1121869. Litología madre: IgRo. flujos de pómez con hbl. Suelo limoso color café-grisáceo, combinado con pequeños grumos de suelo semicompacto color grisáceo y pigmentos blancuzcos. No presenta roca compacta y su tamaño de partículas es homogéneo (finas).
M-1917-18	Código de muestreo: TA-Ms8. X (crtm05): 448515. Y (crtm05): 1126601. Litología madre: Ignimbrita Brechosa. Suelo limoso (arena) color gris claro, combinado con vetas de suelo semicompacto de origen volcánico color amarillentas y blancuzcas. Tamaño máximo de partículas homogéneo (finas). No presenta roca compacta.
M-1919-18	Código de muestreo: TA-Ms13. X (crtm05): 448395. Y (crtm05): 1130224. Litología madre: Mélange de Ignimbritas. Suelo arcilloso color gris claro, combinado con vetas de color amarillentas y negruzcas. Homogéneo en su tamaño de partículas y presenta solo una piedra de tamaño de 5,08 cm.
M-1922-18	Código de muestreo: TA-Ms19. X (crtm05): 449007. Y (crtm05): 1136781. Litología madre: Suelo café rojizo granular. Suelo arcillo-limoso color café oscuro, combinado con vetas de suelo semicompacto de color grisáceas. No presenta roca compacta y su tamaño de partículas es homogéneo y fino.
M-1923-18	Código de muestreo: TA-Ms20. X (crtm05): 450147. Y (crtm05): 1137716. Litología madre: Ignimbrita Rosada. Suelo arcilloso de color rojizo, de tamaño de partículas homogéneo (finas). No presenta roca compacta.



No. de informe: I-1512-18

M-1925-18

Código de muestreo: TA-Ms24. X (crtm05): 451615. Y (crtm05): 1142649. Litología madre: Ignimbrita Rosada (rojiza). Suelo arcilloso color café claro vetado de pigmentos blancuzcos. De tamaño máximo homogéneo de partículas finas, no presenta roca compacta.

Aportadas por:

Geól. Paulo Ruíz

Fecha de recepción:

2018/09/10

Fecha de realización del ensayo:

2018/09/10-2018/11/12

4. Información del muestreo:

Fecha de muestreo:

2018/08/24

Ubicación:

Muestra: M-1915-18
Ubicación de muestreo: Sifón - La Abundancia,
Estacionamiento: km 13+800.

Muestra: M-1916-18
Ubicación de muestreo: Sifón - La Abundancia,
Estacionamiento: km 15+500.

Muestra: M-1917-18
Ubicación de muestreo: Sifón - La Abundancia,
Estacionamiento: km 16+800.

Muestra: M-1919-18
Ubicación de muestreo: Sifón - La Abundancia,
Estacionamiento: km 21+300.

Muestra: M-1922-18
Ubicación de muestreo: Sifón - La Abundancia,
Estacionamiento: km 29+500.

Muestra: M-1923-18
Ubicación de muestreo: Sifón - La Abundancia,
Estacionamiento: km 32+200.

Muestra: M-1925-18
Ubicación de muestreo: Sifón - La Abundancia,
Estacionamiento: km 38+350.



No. de informe: I-1512-18

Procedimiento de muestreo:

Muestreo de agregado realizado por personal técnico de la Unidad de Gestión y Evaluación de la Red Vial Nacional de acuerdo a la norma ASTM D-75. Personal responsable de la muestra: Geól. Paulo Ruíz Cubillo.

Condiciones ambientales:

No aplica pues en el laboratorio los especímenes se acondicionan.

5. Resultados:

Tabla 1. Límite líquido, límite plástico e índice de plasticidad de las muestras.

MUESTRA	LÍMITE LÍQUIDO	LÍMITE PLÁSTICO	ÍNDICE PLÁSTICIDAD
1915-18	68	54	14
1916-18	54	44	10
1917-18	47	40	7
1919-18	79	36	43
1922-18	51	38	13
1923-18	70	41	29
1925-18	67	47	20

Nota:

-La muestra fue acondicionada por el método de preparación en seco.

-El límite líquido se determina según el método A (método multipunto) de la norma ASTM D 4318.

Tabla 2. Gravedad específica del suelo.

MUESTRA	MÉTODO	G _T	G _S
1915-18	B	2,663	2,661
1916-18	B	2,541	2,539
1917-18	B	2,542	2,540
1919-18	B	2,660	2,658
1922-18	B	2,756	2,755
1923-18	B	2,692	2,691
1925-18	B	2,652	2,650

Tabla 3. Resultados del ensayo para determinar la cantidad de material más fino que el tamiz de 75 µm (N° 200) en suelos mediante lavado.

MUESTRA	MASA SECA INICIAL (g)	MATERIAL MAS FINO QUE 75µm (%)
1915-18	490,8	90,8
1916-18	621,9	57,4
1917-18	695,4	41,2
1919-18	1016,8	82,1
1922-18	726,6	86,5
1923-18	476,6	94,9
1925-18	505,4	89,7

No. de informe: I-1512-18

Tabla 4. Contenido de Humedad de los suelos y rocas de las muestras.

MUESTRA No.	HUMEDAD NATURAL (%)
1915-18	71,2
1916-18	73,8
1917-18	48,0
1919-18	58,5
1922-18	50,8
1923-18	49,8
1925-18	60,7

Tabla 5. Análisis granulométrico de suelos vía húmeda. Muestra: M-1915-18.

Dispositivo de dispersión: Batidora		
Tamiz No.	% Más Finos	Diámetro (mm)
3/8"	100,0	9,500
Nº 4	100,0	4,750
Nº 10	100,0	2,000
Nº 20	98,7	0,850
Nº 40	95,4	0,425
Nº60	90,8	0,250
Nº100	85,2	0,150
Nº140	81,3	0,106
Nº200	77,1	0,075
	54,8	0,030
	49,6	0,019
	40,3	0,012
	34,0	0,008
	27,7	0,006
	19,2	0,003
	15,0	0,001

Tiempo de dispersión: 19 h

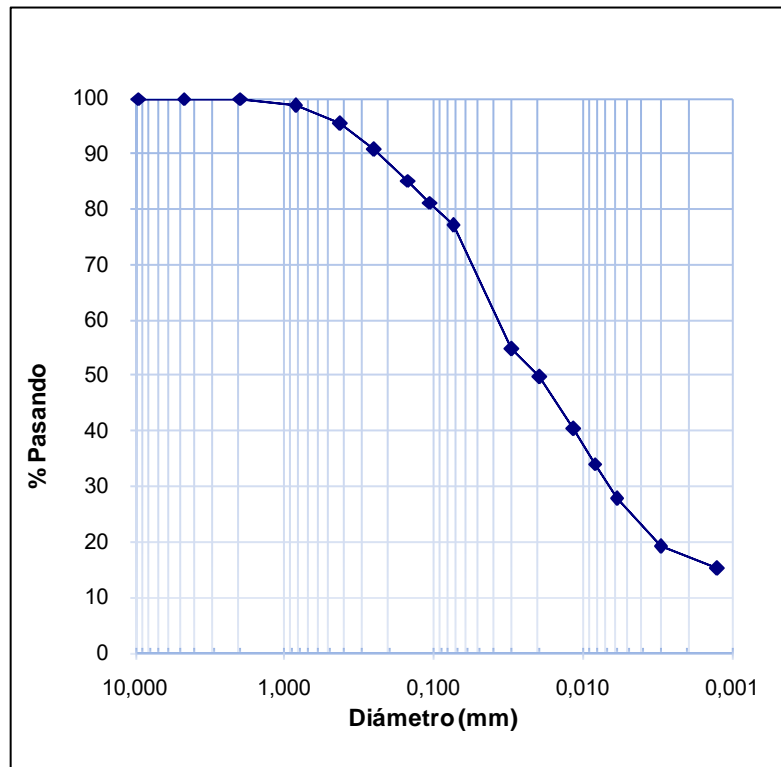


Tabla 6. Análisis granulométrico de suelos vía húmeda. Muestra: M-1916-18.

Dispositivo de dispersión: Batidora		
Tamiz No.	% Más Finos	Diámetro (mm)
3/8"	100,0	9,500
Nº 4	100,0	4,750
Nº 10	99,8	2,000
Nº 20	91,1	0,850
Nº 40	80,2	0,425
Nº60	72,2	0,250
Nº100	65,2	0,150
Nº140	60,7	0,106
Nº200	56,1	0,075
	47,4	0,033
	42,1	0,021
	33,6	0,012
	28,3	0,009
	22,0	0,006
	13,3	0,003
	6,8	0,001

Tiempo de dispersión: 19 h

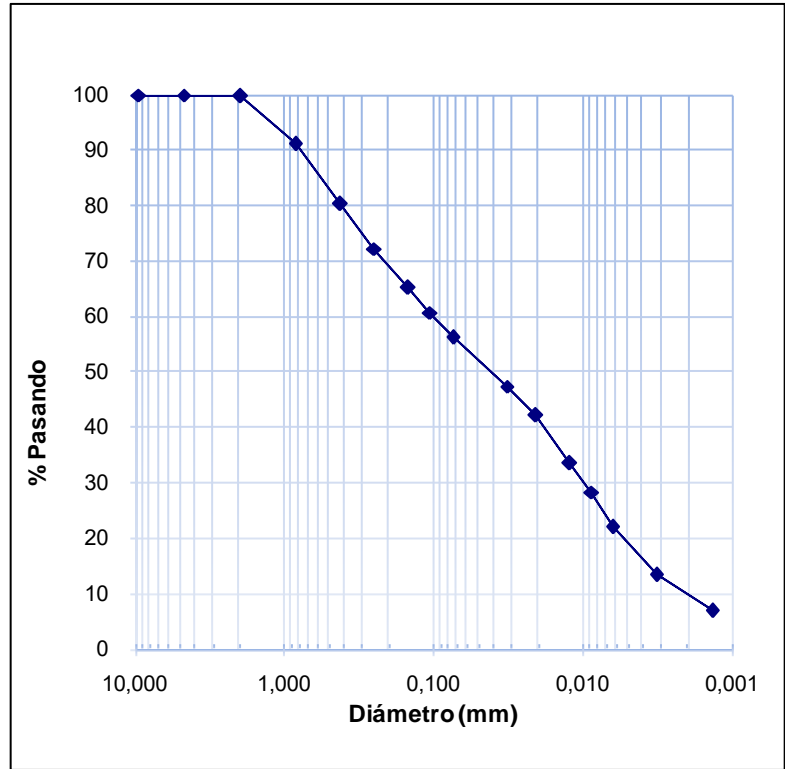
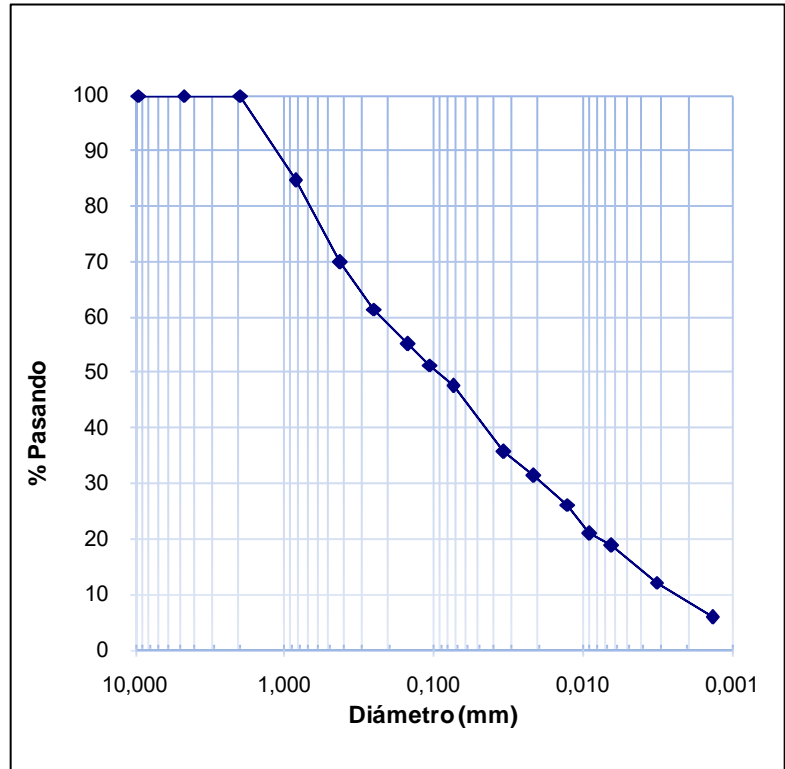


Tabla 7. Análisis granulométrico de suelos vía húmeda. Muestra: M-1917-18.

Dispositivo de dispersión: Batidora		
Tamiz No.	% Más Finos	Diámetro (mm)
3/8"	100,0	9,500
Nº 4	100,0	4,750
Nº 10	100,0	2,000
Nº 20	84,5	0,850
Nº 40	69,8	0,425
Nº60	61,4	0,250
Nº100	55,1	0,150
Nº140	51,3	0,106
Nº200	47,4	0,075
	35,7	0,034
	31,4	0,022
	26,1	0,013
	20,8	0,009
	18,8	0,006
	12,2	0,003
	5,8	0,001

Tiempo de dispersión: 21 h



No. de informe: I-1512-18

Tabla 8. Análisis granulométrico de suelos vía húmeda. Muestra: M-1919-18.

Dispositivo de dispersión: Batidora		
Tamiz No.	% Más Finos	Diámetro (mm)
3/8"	100,0	9,500
Nº 4	100,0	4,750
Nº 10	100,0	2,000
Nº 20	96,2	0,850
Nº 40	92,7	0,425
Nº60	89,6	0,250
Nº100	86,4	0,150
Nº140	84,1	0,106
Nº200	81,9	0,075
	63,8	0,030
	62,7	0,019
	61,7	0,011
	60,5	0,008
	59,4	0,006
	57,7	0,003
	57,8	0,001

Tiempo de dispersión: 19 h

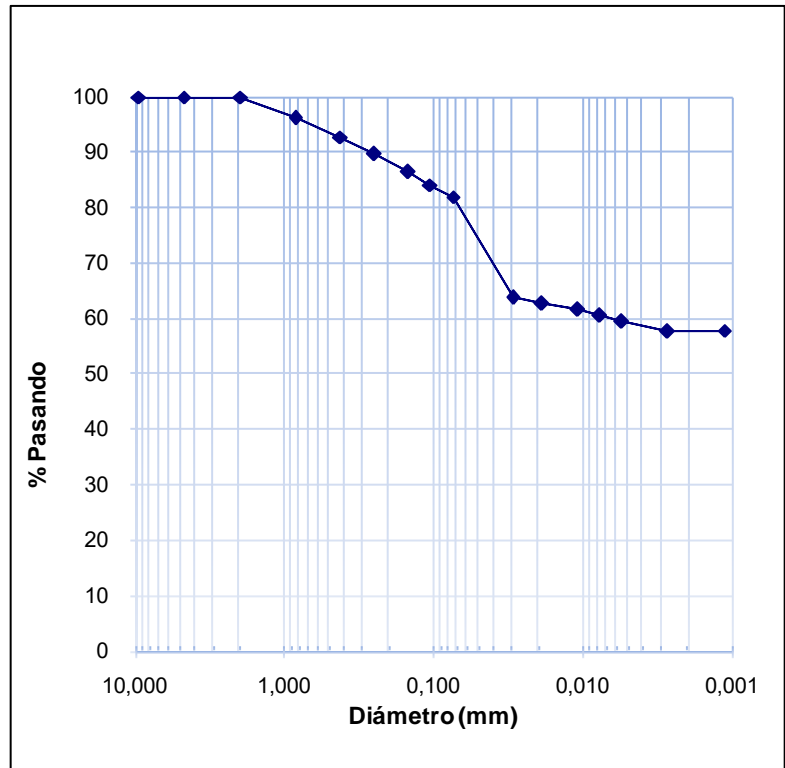


Tabla 9. Análisis granulométrico de suelos vía húmeda. Muestra: M-1922-18.

Dispositivo de dispersión: Batidora		
Tamiz No.	% Más Finos	Diámetro (mm)
3/8"	100,0	9,500
Nº 4	100,0	4,750
Nº 10	100,0	2,000
Nº 20	96,5	0,850
Nº 40	93,8	0,425
Nº60	91,3	0,250
Nº100	88,3	0,150
Nº140	85,8	0,106
Nº200	82,8	0,075
	63,9	0,029
	59,8	0,018
	53,8	0,011
	49,7	0,008
	45,6	0,006
	35,6	0,003
	25,7	0,001

Tiempo de dispersión: 22 h

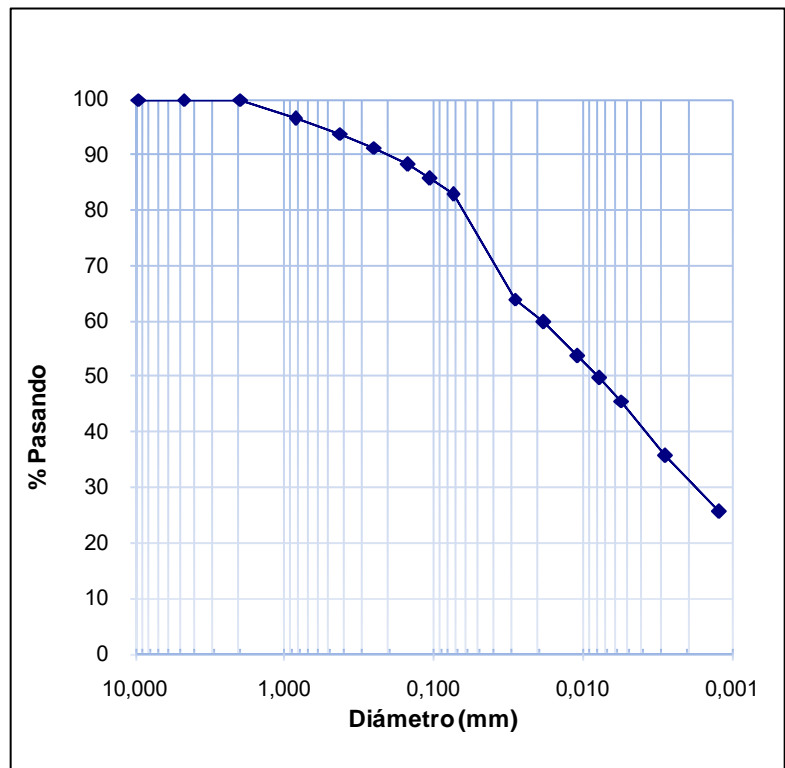


Tabla 10. Análisis granulométrico de suelos vía húmeda. Muestra: M-1923-18.

Dispositivo de dispersión: Batidora		
Tamiz No.	% Más Finos	Diámetro (mm)
3/8"	100,0	9,500
Nº 4	100,0	4,750
Nº 10	100,0	2,000
Nº 20	100,0	0,850
Nº 40	99,8	0,425
Nº60	99,2	0,250
Nº100	97,9	0,150
Nº140	96,6	0,106
Nº200	94,9	0,075
	79,3	0,027
	77,2	0,018
	69,0	0,010
	62,8	0,008
	56,6	0,005
	42,3	0,003
	29,2	0,001

Tiempo de dispersión: 21 h

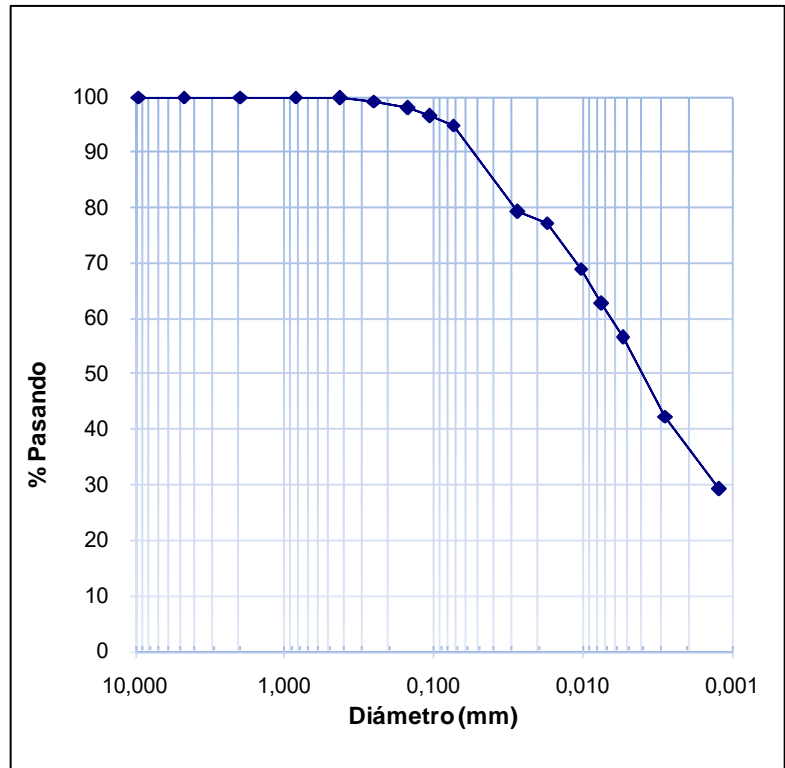
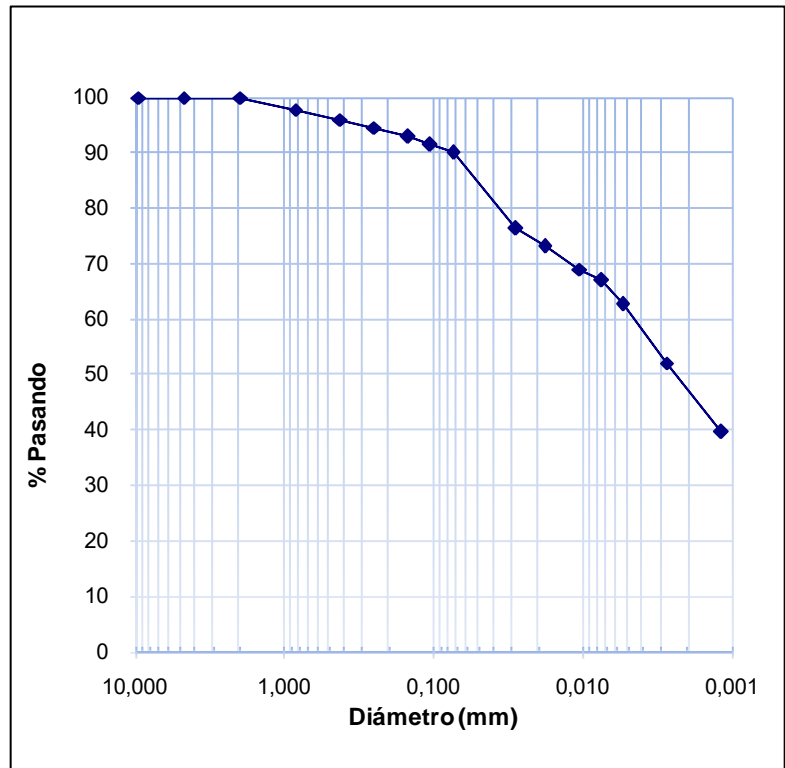


Tabla 11. Análisis granulométrico de suelos vía húmeda. Muestra: M-1925-18.

Dispositivo de dispersión: Batidora		
Tamiz No.	% Más Finos	Diámetro (mm)
3/8"	100,0	9,500
Nº 4	100,0	4,750
Nº 10	99,9	2,000
Nº 20	97,8	0,850
Nº 40	95,9	0,425
Nº60	94,6	0,250
Nº100	92,9	0,150
Nº140	91,6	0,106
Nº200	89,9	0,075
	76,2	0,028
	73,1	0,018
	69,0	0,011
	66,9	0,008
	62,7	0,005
	52,1	0,003
	39,7	0,001

Tiempo de dispersión: 19 h





No. de informe: I-1512-18

Tabla 12. Análisis granulométrico de suelos vía seca. Muestra: M-1915-18.

MASA INICIAL: 921 g MASA FINAL: 441 g

MALLA No.	ABERTURA (mm)	MASA RET.	% RET.	% RET AC.	% PAS.
2"	50,0	0,00	0,00	0,00	100
1 1/2"	37,5	0,00	0,00	0,00	100,0
1"	25,0	0,00	0,00	0,0	100,0
3/4"	19,0	0,00	0,00	0,0	100,0
1/2"	12,5	0,00	0,00	0,0	100,0
3/8"	9,50	0,00	0,00	0,0	100,0
Nº 4	4,75	0,18	0,0	0,0	100,0
Nº 10	2,00	21,28	2,3	2,3	97,7
Nº 20	0,85	96,11	10,4	12,8	87,2
Nº 40	0,43	96,53	10,48	23,2	76,8
Nº60	0,25	68,79	7,47	30,7	69,3
Nº100	0,15	62,09	6,74	37,4	62,6
Nº140	0,11	46,13	5,01	42,5	57,5
Nº200	0,08	49,41	5,36	47,8	52,2

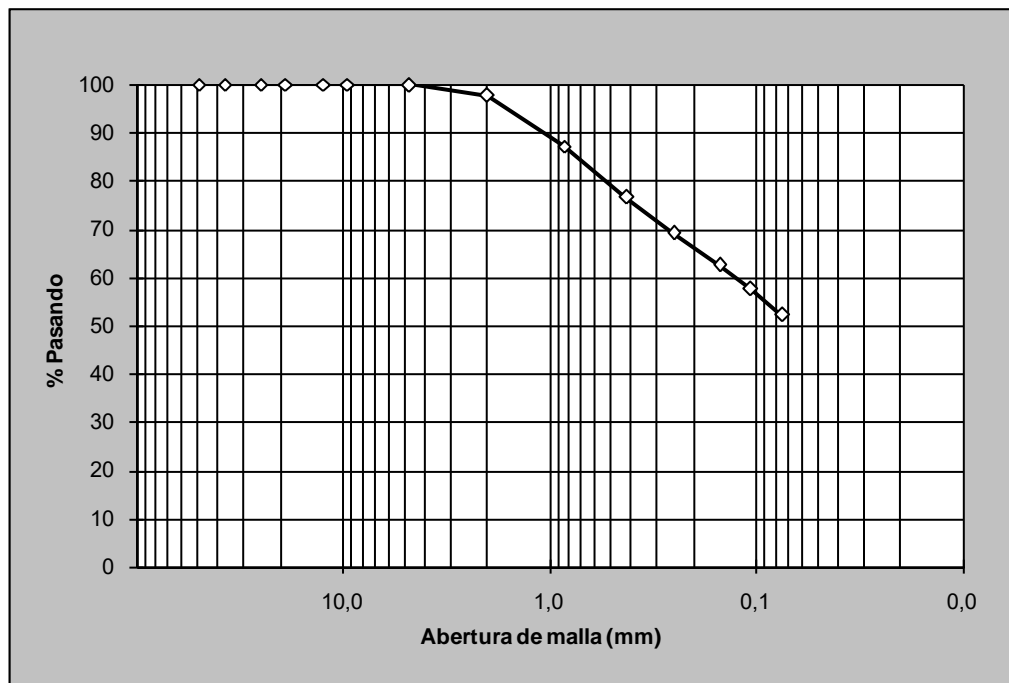


Gráfico 1. Curva granulométrica. Muestra: M-1915-18.



No. de informe: I-1512-18

Tabla 13. Análisis granulométrico de suelos vía seca. Muestra: M-1916-18.

MASA INICIAL: 1009 g MASA FINAL: 472 g

MALLA No.	ABERTURA (mm)	MASA RET.	% RET.	% RET AC.	% PAS.
2"	50,0	0,00	0,00	0,00	100
1 1/2"	37,5	0,00	0,00	0,00	100,0
1"	25,0	0,00	0,00	0,0	100,0
3/4"	19,0	0,00	0,00	0,0	100,0
1/2"	12,5	0,00	0,00	0,0	100,0
3/8"	9,50	0,00	0,00	0,0	100,0
Nº 4	4,75	4,05	0,4	0,4	99,6
Nº 10	2,00	60,31	6,0	6,4	93,6
Nº 20	0,85	96,70	9,6	16,0	84,0
Nº 40	0,43	82,32	8,16	24,1	75,9
Nº60	0,25	68,74	6,81	30,9	69,1
Nº100	0,15	66,82	6,62	37,6	62,4
Nº140	0,11	48,79	4,84	42,4	57,6
Nº200	0,08	44,20	4,38	46,8	53,2

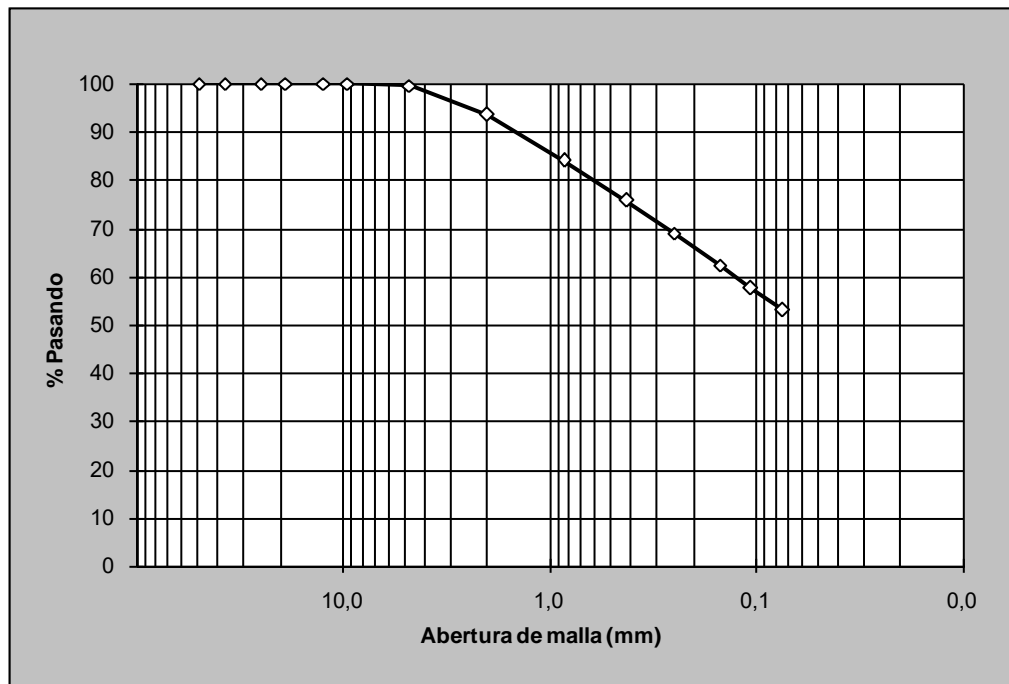


Gráfico 2. Curva granulométrica. Muestra: M-1916-18.



No. de informe: I-1512-18

Tabla 14. Análisis granulométrico de suelos vía seca. Muestra: M-1917-18.

MASA INICIAL: 1082 g MASA FINAL: 577 g

MALLA No.	ABERTURA (mm)	MASA RET.	% RET.	% RET AC.	% PAS.
2"	50,0	0,00	0,00	0,00	100
1 1/2"	37,5	0,00	0,00	0,00	100,0
1"	25,0	0,00	0,00	0,0	100,0
3/4"	19,0	0,00	0,00	0,0	100,0
1/2"	12,5	0,00	0,00	0,0	100,0
3/8"	9,50	0,00	0,00	0,0	100,0
Nº 4	4,75	5,44	0,5	0,5	99,5
Nº 10	2,00	82,44	7,6	8,1	91,9
Nº 20	0,85	147,76	13,7	21,8	78,2
Nº 40	0,43	117,08	10,83	32,6	67,4
Nº60	0,25	78,46	7,25	39,9	60,1
Nº100	0,15	62,82	5,81	45,7	54,3
Nº140	0,11	41,82	3,87	49,5	50,5
Nº200	0,08	41,42	3,83	53,4	46,6

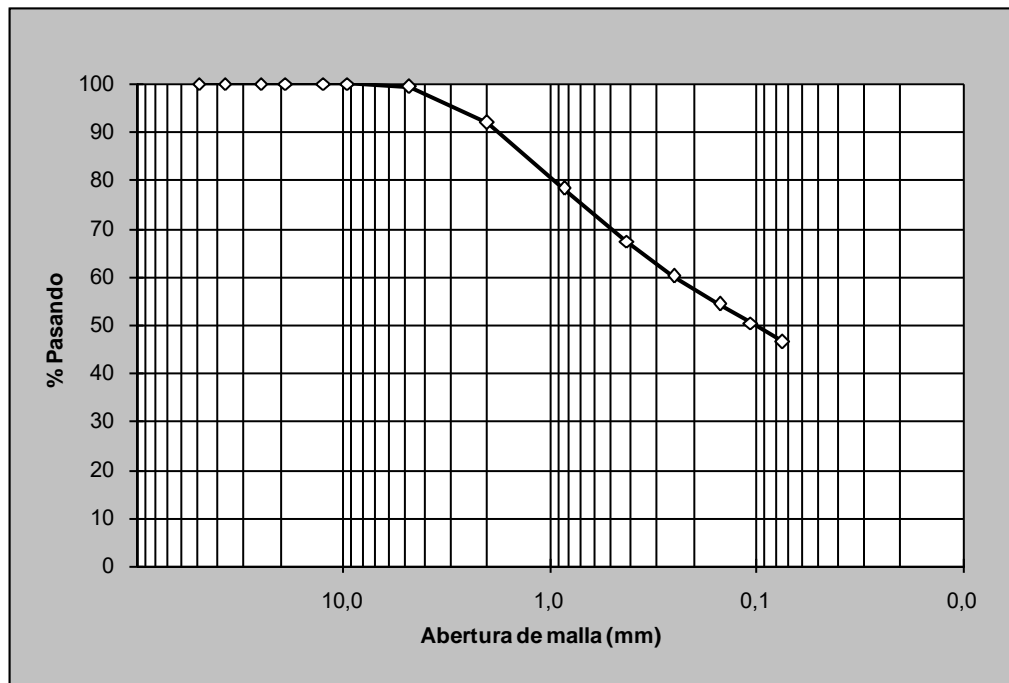


Gráfico 3. Curva granulométrica. Muestra: M-1917-18.



No. de informe: I-1512-18

Tabla 15. Análisis granulométrico de suelos vía seca. Muestra: M-1919-18.

MASA INICIAL: 1579 g MASA FINAL: 484 g

MALLA No.	ABERTURA (mm)	MASA RET.	% RET.	% RET AC.	% PAS.
2"	50,0	0,00	0,00	0,00	100
1 1/2"	37,5	0,00	0,00	0,00	100,0
1"	25,0	0,00	0,00	0,0	100,0
3/4"	19,0	10,53	0,67	0,7	99,3
1/2"	12,5	8,77	0,56	1,2	98,8
3/8"	9,50	10,89	0,69	1,9	98,1
Nº 4	4,75	23,66	1,5	3,4	96,6
Nº 10	2,00	36,33	2,3	5,7	94,3
Nº 20	0,85	36,56	2,3	8,0	92,0
Nº 40	0,43	34,15	2,16	10,2	89,8
Nº60	0,25	52,13	3,30	13,5	86,5
Nº100	0,15	94,10	5,96	19,5	80,5
Nº140	0,11	86,06	5,45	24,9	75,1
Nº200	0,08	90,64	5,74	30,6	69,4

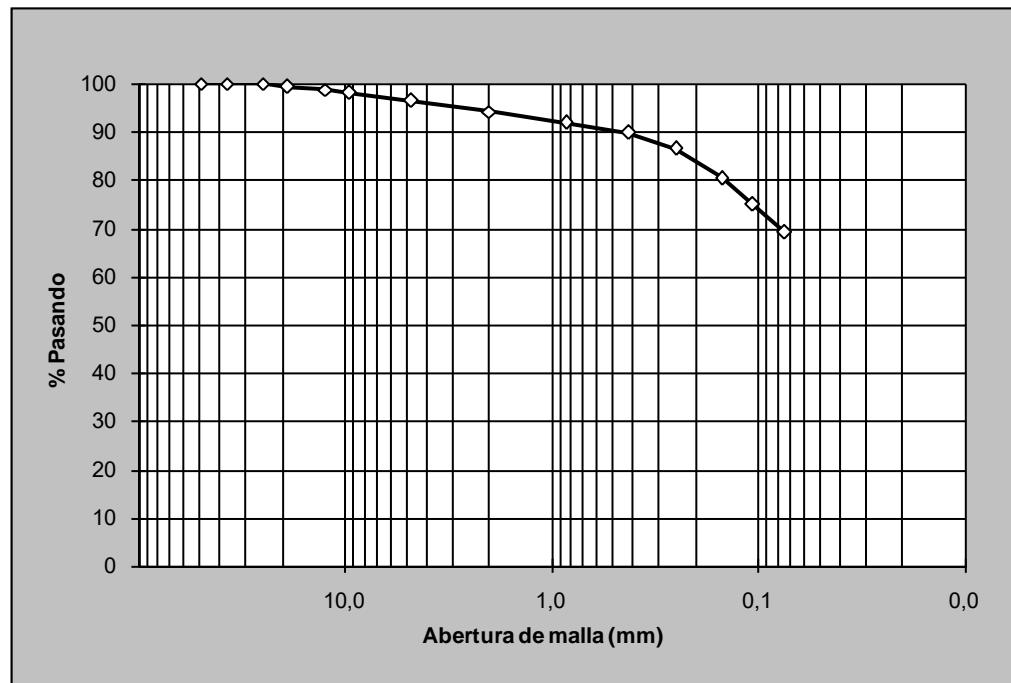


Gráfico 4. Curva granulométrica. Muestra: M-1919-18.



No. de informe: I-1512-18

Tabla 16. Análisis granulométrico de suelos vía seca. Muestra: M-1922-18.

MASA INICIAL: 1477 g MASA FINAL: 272 g

MALLA No.	ABERTURA (mm)	MASA RET.	% RET.	% RET AC.	% PAS.
2"	50,0	0,00	0,00	0,00	100
1 1/2"	37,5	0,00	0,00	0,00	100,0
1"	25,0	0,00	0,00	0,0	100,0
3/4"	19,0	0,00	0,00	0,0	100,0
1/2"	12,5	0,00	0,00	0,0	100,0
3/8"	9,50	0,00	0,00	0,0	100,0
Nº 4	4,75	1,12	0,1	0,1	99,9
Nº 10	2,00	9,84	0,7	0,7	99,3
Nº 20	0,85	34,25	2,3	3,1	96,9
Nº 40	0,43	31,64	2,14	5,2	94,8
Nº60	0,25	29,04	1,97	7,2	92,8
Nº100	0,15	38,40	2,60	9,8	90,2
Nº140	0,11	48,92	3,31	13,1	86,9
Nº200	0,08	79,11	5,36	18,4	81,6

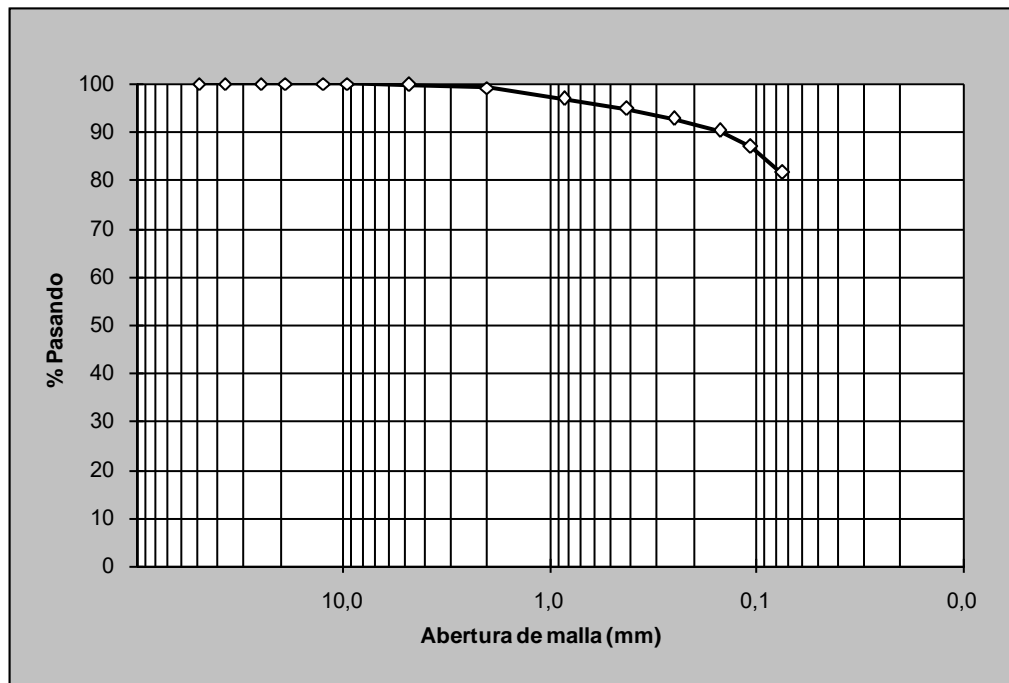


Gráfico 5. Curva granulométrica. Muestra: M-1922-18.



No. de informe: I-1512-18

Tabla 17. Análisis granulométrico de suelos vía seca. Muestra: M-1923-18.

MASA INICIAL: 1185 g MASA FINAL: 44 g

MALLA No.	ABERTURA (mm)	MASA RET.	% RET.	% RET AC.	% PAS.
2"	50,0	0,00	0,00	0,00	100
1 1/2"	37,5	0,00	0,00	0,00	100,0
1"	25,0	0,00	0,00	0,0	100,0
3/4"	19,0	0,00	0,00	0,0	100,0
1/2"	12,5	0,00	0,00	0,0	100,0
3/8"	9,50	0,00	0,00	0,0	100,0
Nº 4	4,75	0,00	0,0	0,0	100,0
Nº 10	2,00	0,00	0,0	0,0	100,0
Nº 20	0,85	0,02	0,0	0,0	100,0
Nº 40	0,43	1,41	0,12	0,1	99,9
Nº60	0,25	8,16	0,69	0,8	99,2
Nº100	0,15	13,72	1,16	2,0	98,0
Nº140	0,11	10,21	0,86	2,8	97,2
Nº200	0,08	10,80	0,91	3,7	96,3

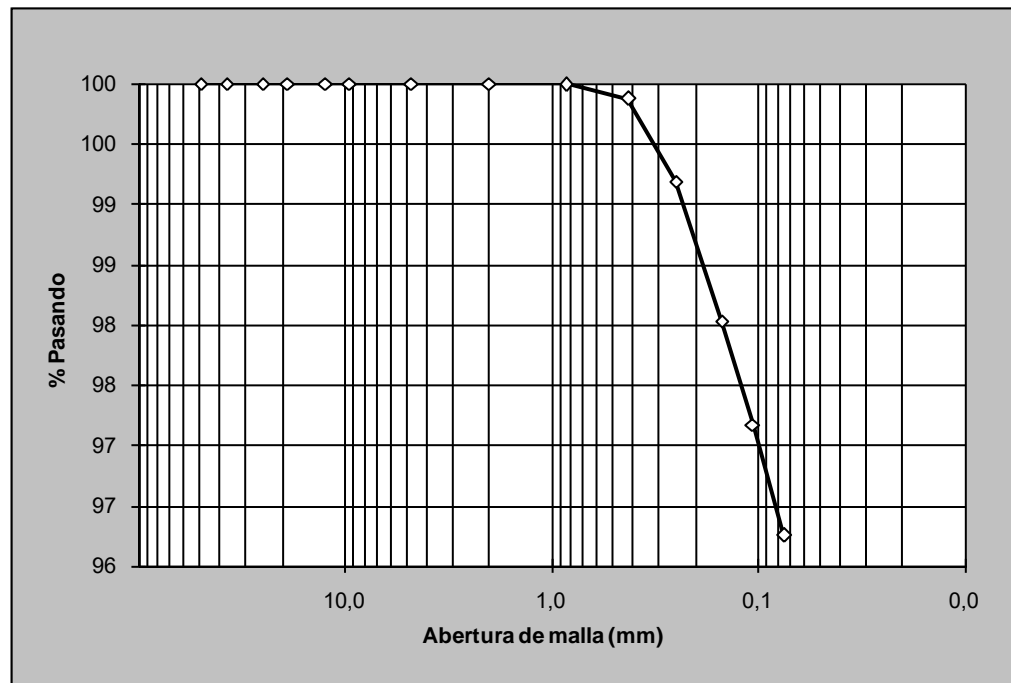


Gráfico 6. Curva granulométrica. Muestra: M-1923-18.



No. de informe: I-1512-18

Tabla 18. Análisis granulométrico de suelos vía seca. Muestra: M-1925-18.

MASA INICIAL: 749 g MASA FINAL: 104 g

MALLA No.	ABERTURA (mm)	MASA RET.	% RET.	% RET AC.	% PAS.
2"	50,0	0,00	0,00	0,00	100
1 1/2"	37,5	0,00	0,00	0,00	100,0
1"	25,0	0,00	0,00	0,0	100,0
3/4"	19,0	0,00	0,00	0,0	100,0
1/2"	12,5	0,00	0,00	0,0	100,0
3/8"	9,50	0,00	0,00	0,0	100,0
Nº 4	4,75	0,00	0,0	0,0	100,0
Nº 10	2,00	4,02	0,5	0,5	99,5
Nº 20	0,85	21,79	2,9	3,4	96,6
Nº 40	0,43	17,59	2,35	5,8	94,2
Nº60	0,25	9,67	1,29	7,1	92,9
Nº100	0,15	11,02	1,47	8,6	91,4
Nº140	0,11	13,58	1,81	10,4	89,6
Nº200	0,08	25,86	3,45	13,8	86,2

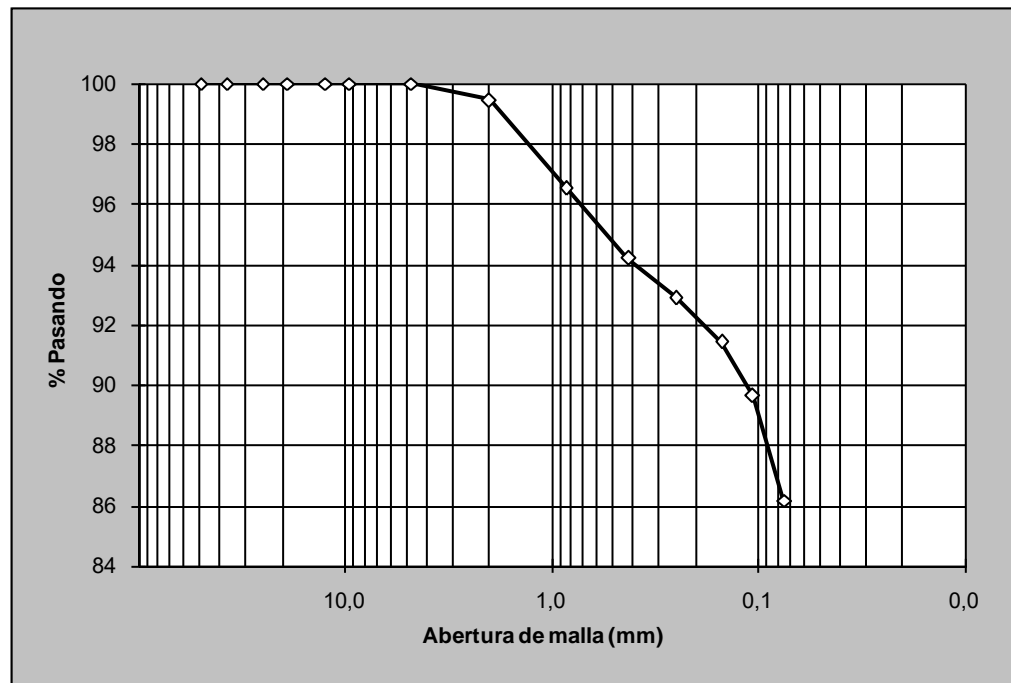


Gráfico 7. Curva granulométrica. Muestra: M-1925-18.



No. de informe: I-1512-18

Tabla 19. Clasificación de los materiales.

MUESTRA	SÍMBOLO	NOMBRE
M-1915-18	MH	Limo elástico
M-1916-18	MH	Limo elástico
M-1917-18	SM	Arena Limosa
M-1919-18	MH	Limo elástico
M-1922-18	MH	Limo elástico
M-1923-18	MH	Limo elástico
M-1925-18	MH	Limo elástico

Nota:

SUCS – Sistema Unificado de Clasificación de suelos.

Aclaraciones:

- El presente informe de ensayo sólo ampara las mediciones reportadas en el momento y condiciones ambientales y de uso en que se realizó esta prueba, para las muestras indicadas en este informe.
- Este informe de resultados tiene validez únicamente en su forma íntegra y original.
- No se permite la reproducción parcial de este documento sin la autorización del Director del LanammeUCR.

Preparó:

Revisó:

Aprobó:

Ing. Oscar Valerio Salas
Jefe Laboratorio de Geotecnia

Ing. Luis Carlos Meseguer Quesada, MBA.
*Coordinador de Laboratorios
Área de Construcción*

Ing. Alejandro Navas Carro, M.Sc.
Director LanammeUCR

-----ÚLTIMA LÍNEA-----