

Universidad de Costa Rica

Facultad de Ciencias

Escuela Centroamericana de Geología

Aplicación y determinación de la eficiencia del método HSQI en la sección de montaña, entre el peaje del Zurquí y el cruce de Río Frío de la Ruta Nacional No.32

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


Elaborado por:

Randall Alonso Carballo Benavides

San José, Costa Rica

2019

Tesis sometida a defensa pública y aprobada el día 18 de julio del 2019 en la facultad de Ciencias Básicas por el tribunal examinador conformado por:




Dr. Javier Trejos Zelaya
Presidente del tribunal



Dr. Paulo Ruíz Cubillo
Director



Dr. Hernán Martínez Carvajal
Lector



M. Sc. José Francisco Cervantes Loaiza
Lector



M. Sc. Giovanni Peraldo Huertas
Miembro del Tribunal

“Do not go gentle into that good night
Old age should burn and rave at close of day;
Rage, rage against the dying of the light

...

Grave men, near death, who see with blinding sight
Blind eyes could blaze like meteors and be gay
Rage, rage against the dying of the light.

...”

Dylan Thomas – Do not go gentle into that good night

Dedicatoria

A mi madre, a mi padre, a mi hermana y a mis abuelos. Gracias por su apoyo, cariño y firme creencia en mí.

Agradecimientos

La civilización de la que somos parte ha llegado al nivel de desarrollo actual no gracias a acciones individuales de personas ilustradas, en cambio, es el conjunto de acciones de la mayoría lo que ha construido la sociedad a la que pertenecemos. El decir que este proyecto de graduación no fue influenciado por los conocimientos, opiniones y consejos de otras personas sería no más que una farsa.

Primeramente y sobre todo debo agradecer a mi familia, el apoyo emocional y económico que me proporcionaron me permitió no solo realizar este trabajo, sino además, crecer en la persona que soy hoy en día.

Al comité asesor formado por el Dr. Paulo Ruiz Cubillo, el Dr. Hernán Martínez Carvajal y el Msc. Jose Francisco Cervantes Loaiza, los cuales a través de conocimiento, consejo y paciencia, me permitieron lograr elevar este trabajo a alturas que no estaban contempladas al inicio del mismo.

A los miembros (tanto funcionarios como asistentes) de la Unidad de Gestión y Evaluación del Red Vial Nacional del LanammeUCR, los cuales no solo me ofrecieron de su tiempo y conocimiento para sobreponerme a obstáculos técnicos, sino también, brindaron una atmosfera cálida y jovial en la que el desarrollo de este trabajo se tornó en una tarea mucho menos agobiante.

Al Ing. Oscar Valerio Salas y al personal del laboratorio de geotecnia del LanammeUCR por su dedicación y consejo durante los ensayos de laboratorio, sin los cuales este trabajo no hubiera avanzado más allá de una mera simulación teórica.

A la Geol. Amalia Gutiérrez Secretan por los innumerables días compartiendo cubículo en los cuales no solo se despejaron dudas, sino también, se compartieron risas, anécdotas y ánimos.

A todos mis amigos, cuyas meras sonrisas, me impulsaron a alcanzar el objetivo más ambicioso de mi vida hasta este momento. En especial debo agradecer a Cindy Montes, Pablo Saborio, Ana Lucía Ortiz, José Pablo Jiménez, Cristhian Blanco, Luis Calvo, Angily Molina, Mario Cordero y Nicole Jiménez por su innegable amistad y cariño.

Indice

Dedicatoria	iii
Agradecimientos	iv
Resumen	viii
Lista de abreviaciones y símbolos	x
Capítulo 1: Introducción	1
1.1 Objetivos del proyecto de graduación.....	8
1.1.1 Objetivo general.....	8
1.1.2 Objetivos específicos:	8
1.2 Disparadores de deslizamientos en el área	9
1.2.1 Precipitación	9
1.2.2 Sismicidad	11
Capitulo 2: Marco Teórico	17
2.1 Clasificación de deslizamientos.....	17
2.2 Rock Mass Rating (RMR).....	22
2.3 Slope Mass Rating (SMR)	23
2.4 Geological Strength Index (GSI).....	24
2.5 Estimación de la cohesión y ángulo de fricción mediante el criterio de Hoek y Brown.	25
2.6 Ajuste de los parámetros de cohesión y ángulo de fricción según Lade (2010).....	27
2.7 Metodología Mora-Vahrson-Mora.....	28
2.8 Metodología Hill-Slope Quality Index (HSQI).....	30
2.9 Receiver Operating Characteristics (Característica Operativa del Receptor, ROC)	37
Capítulo 3: Metodología	40
3.1 Recopilación bibliográfica.....	40
3.2 Análisis geomorfológico de las secciones a trabajar.....	41
3.3 Identificación de deslizamientos con imágenes Lidar	42
3.4 Cartografiado geológico	43
3.5 Obtención de muestras de suelo y roca	44
3.6 Definición de las secciones de estudio	45
3.7 Ensayos de laboratorio.....	50
3.8 Aplicación del método HSQI.....	52

3.9 Cálculo de la exactitud del método mediante un análisis Receiver Operating Characteristics (ROC)	54
Capítulo 4: Geomorfología	57
4.1 Análisis de pendientes.....	57
4.2 Geomorfología regional	60
4.2.1 Volcán Irazú.....	61
4.2.2 Volcán Barva	62
4.2.3 Cuencas hidrográficas	63
4.3 Unidades Geomorfológicas Locales	67
4.3.1 Formas de origen denudacional.....	71
4.3.2 Formas de origen fluvial.....	72
4.3.3 Fallamiento en el área de estudio	75
4.4 Inventario de deslizamientos	76
4.4.1 Área y volúmen de los deslizamientos	83
4.4.1 Clasificación de deslizamientos	88
Capítulo 5: Geología.....	90
5.1 Geología regional	90
5.2 Geología local	93
5.2.1 Unidad brechas.....	98
5.2.2 Unidad flujos piroclásticos.....	100
5.2.3 Unidad lavas	103
Capítulo 6: Aplicación de la metodología Hill Slope Quality Index.....	108
6.1 Delimitación de las secciones.....	108
6.2 Muestreo y ensayos de laboratorio.....	111
6.3 Resultados de los ensayos.....	116
6.4 Selección de las ecuaciones a usar.....	121
6.5 Susceptibilidad a deslizamiento de las secciones.....	123
6.5.1 Comportamiento de la clasificación según los parámetros H_w , c y ϕ	125
6.5.2 Susceptibilidad según la pendiente natural	128
6.5.3 Susceptibilidad según el corte del talud	131
6.5.4 Comportamiento del Retroanálisis	133
6.6 Visualización de la susceptibilidad	134
Capitulo 7: Análisis Receiver Operating Characteristics.....	137

Capítulo 8: Discusión de resultados.....	149
Capitulo 9: Conclusiones y recomendaciones.....	153
8.1 Recomendaciones.....	159
Referencias	161

Resumen

La metodología Hill Slope Quality Index (HSQI) es una herramienta pre-constructiva que permite la determinación de la susceptibilidad a deslizamiento de un corredor vial, sin embargo, su capacidad de ejercer un papel forense en una carretera ya construida y en uso no se ha estudiado lo suficiente. Anteriormente se ha aplicado el método en la carretera Las Palmas y la Ruta Nacional No.25 de Colombia, en Costa Rica anteriormente se ha aplicado en el tramo Sifón-La Abundancia de la Ruta Nacional No.35. En el presente trabajo se aplica el método en la Ruta Nacional No.32 (RN-32) en su sector montañoso, del peaje del Zurquí al cruce de Río Frío. Debido a su historial de deslizamientos, a las litologías volcánicas altamente meteorizadas, a la importancia de la ruta para el país y a la información topográfica Lidar de la zona con la que se cuenta, esta sección de la ruta es ideal para aplicar la metodología HSQI. De esta forma se estaría evaluando el método en este tipo de condiciones y generando insumos valiosos para el análisis de susceptibilidad de deslizamientos para la carretera. Todo esto hace de este trabajo una importante oportunidad de determinar las ventajas y desventajas del método en este tipo de ambiente geológico y las posibilidades de aplicarlo en otras zonas con condiciones similares. Para aplicar la metodología fue necesario un cartografiado geomorfológico y geológico de los cerros del Zurquí, los cuales, hasta este momento no habían sido estudiados a detalle. El análisis geomorfológico consistió en el uso de información Lidar para analizar las pendientes, unidades geomorfológicas y el drenaje de la zona (insumos para el HSQI), además se realizó un inventario de los deslizamientos dentro del área a partir de MED generados con Lidar y las ortofotografías de alta resolución con que se visualizó las zonas con mayor cantidad histórica de deslizamientos. El cartografiado geológico se realizó mediante trabajo de campo restringido a los taludes y afloramientos de la carretera y descripciones de secciones delgadas, con esto se identificaron brechas, lavas y flujos piroclásticos dentro del tramo estudiado. Las unidades geológicas y geomorfológicas así como el drenaje se usaron para dividir la carretera en 212 secciones a las cuales se les calculó un HSQI individual. Debido a la cantidad de variación que puede tener el HSQI en sus fórmulas, las cuales dependen de parámetros de nivel freático, cohesión, ángulo de fricción de los materiales e inclinación y altura de los taludes, se realizó un total de 41 iteraciones que permitieron ver en que escenarios el método logró una mejor aproximación a la susceptibilidad del sector montañoso de la carretera. Para evaluar la exactitud de la clasificación de susceptibilidad del HSQI se compararon las clasificaciones de cada iteración con el inventario de deslizamientos y usando un análisis Receiver Operating Characteristics (ROC) se observó en cuales secciones la clasificación concordó con los deslizamientos del

catálogo levantados en este trabajo. Los resultados mostraron que bajos niveles freáticos, altas cohesiones, bajas pendientes y alturas sobreestiman la susceptibilidad de la carretera a la inestabilidad, mientras que el uso de niveles freáticos medios a altos y la geometría propia de los taludes devuelven resultados al modelo con una mejor aproximación. Un caso especial, cuyo resultado fue sumamente positivo usó un retroanálisis para determinar los parámetros de resistencia de los materiales de la zona, esto en diferencia a los ensayos triaxiales y de corte directo usados para los demás. La aplicación del HSQI en estos tipos de ambientes debe hacerse con un buen entendimiento de la zona de estudio y por lo tanto usando los parámetros geométricos, de resistencia de suelos y niveles freáticos que reflejen de mejor manera el área en estudio. Además es recomendable usar topografía detallada como la Lidar la cual mejora en gran manera la exactitud de los parámetros geométricos y del cartografiado geomorfológico que se usa.

Palabras Clave: Braulio, Carrillo, Ruta 32, Geología, Geomorfología, Geotecnia, Zurquí, HSQI, ROC, Cohesión, Ángulo de Fricción, Susceptibilidad, Deslizamiento, Inventario, Retroanálisis.

Lista de abreviaciones y símbolos

Abreviaciones

ASTM	American Society for Testing and Materials
CONAVI	Consejo Nacional de Vialidad
FPR	False Positive Rate
GSI	Geological Strenght Index
HSQI	Hill Slope Quality Index
LanammeUCR	Laboratorio Nacional de Materiales y Modelos Estructurales de la Universidad de Costa Rica
MOPT	Ministerio de Obras Publicas y Transportes
MVM	Mora Vahrson Mora
RN-32	Ruta Nacional Numero 32 de Costa Rica
ROC	Receiver Operating Characteristics
RSN	Red Sismológica Nacional
RMR	Rock Mass Rating
SMR	Slope Mass Rating
TPR	True Positive Rate

Simbolos

σ'_n	Esfuerzo normal efectivo
σ_c	Resistencia a la compresión uniaxial de la roca en RMR
σ_3	Esfuerzo confinante RMR
β	Ángulo de inclinación de la familia principal de discontinuidades
t	Esfuerzo cortante
%	Porcentaje
ϕ'	Ángulo de fricción efectivo
c'	Cohesión efectiva
a	Valor adimensional en el ajuste de Lade (2010)
b	Valor adimensional en el ajuste de Lade (2010)
p_a	Presión atmosférica
D	Factores de disparo
D_s	Disparo por sismicidad
D_l	Disparo por lluvia
EP	Elementos pasivos en el MVM
i	Inclinación de la pendiente
F_1	Variable del SMR
F_2	Variable del SMR
F_3	Variable del SMR
F_4	Variable del SMR
Hd	Altura inferior de análisis
Hu	Altura superior de análisis
H_w	Altura del nivel freático

H	Altura de la pendiente
m	Constante de material en RMR
s	Constante de material en RMR
S_I	Susceptibilidad Litológica en el MVM
S_H	Humedad del terreno en el MVM
S_P	Parámetro de la pendiente
γ	Peso específico
Z_o	Profundidad de las fracturas

Capítulo 1: Introducción

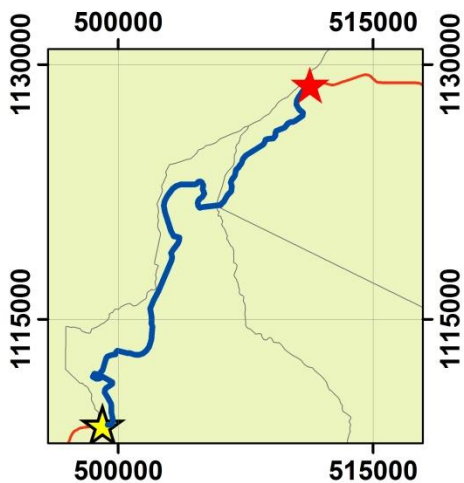
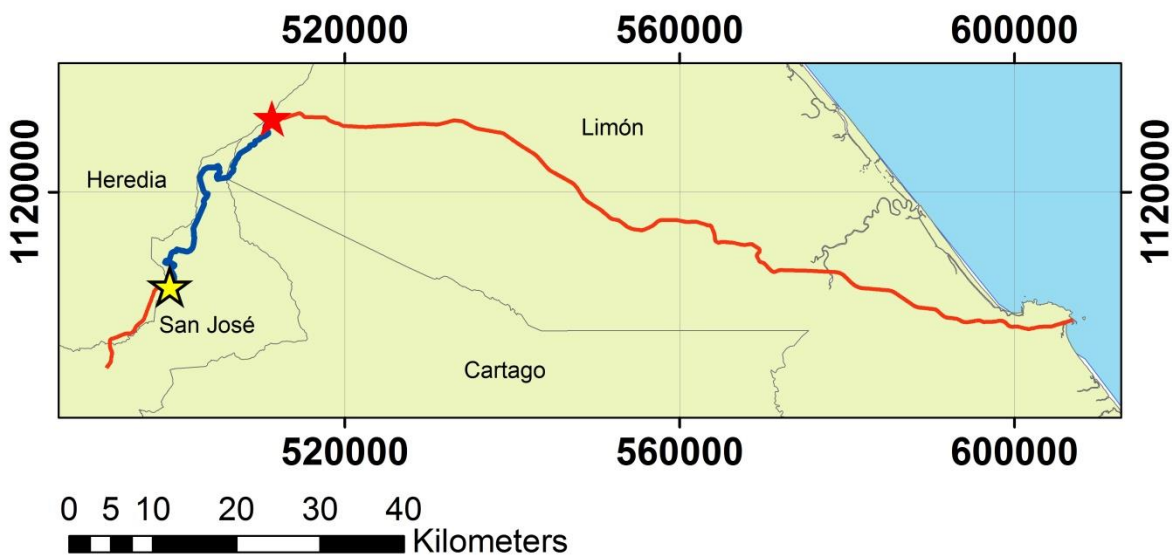
La metodología Hill Slope Quality Index (HSQI) es una metodología desarrollada y propuesta por Moreno-Ceballos (2015) para determinar la susceptibilidad al deslizamiento que podrían presentar las laderas de una ruta vial antes de su construcción. La metodología considera las ecuaciones propuestas en la Escuela Nacional Superior de Ingeniería de Nancy, Francia (Sánchez, 1989), las cuales utilizan parámetros de mecánica de suelos tales como el peso unitario, el ángulo de fricción, la cohesión y variables locales, como la topografía y nivel freático. Estos parámetros son introducidos en dos ecuaciones (elegidas de un total de 6) cuyos valores resultantes son introducidos en gráficos bi-axiales proporcionados por Moreno-Ceballos (2015), con el fin de establecer el valor del índice HSQI. Posteriormente el HSQI es clasificado en rangos de valor, brindando una clasificación de la susceptibilidad al deslizamiento de la ladera. Con el resultado de la aplicación de este método se recomiendan obras de estabilización para prevenir cualquier tipo de inestabilidad dentro del talud, estas medidas son elegidas de acuerdo al valor de HSQI, a la importancia de la vía y el flujo vehicular que se espera en ella, esta herramienta será desarrollada y detallada en el apartado 2.8.

Si bien el HSQI es una herramienta pre-constructiva, su capacidad de análisis forense en circuitos viales en operación no se ha demostrado lo suficiente. Moreno-Ceballos aplicó el método en la carretera Las Palmas y la Ruta Nacional No.25 de Colombia mientras que Ocampo (2016) aplicó la metodología en el tramo Sifón-La Abundancia en la provincia de Alajuela en Costa Rica. Sin embargo, este proyecto no ha terminado su construcción y el HSQI no fue parte de su diseño previo. En este trabajo se eligió la Ruta Nacional No.32 (RN-32) de Costa Rica, en su sector montañoso, para evaluar la exactitud del HSQI en un corredor vial ya finalizado y en uso. Los elevados ángulos y altura de los taludes, el elevado nivel de meteorización de las rocas (las cuales son de origen volcánico) y la elevada cantidad de deslizamientos en este corredor vial (144 contabilizados en este trabajo), hacen de este corredor vial un ambiente en el cual el HSQI no se ha aplicado, permitiendo la evaluación del método no solo como una herramienta forense, si no también, en un nuevo medio geológico, climático y de tan alta inestabilidad como este.

En este tramo de la carretera se cuenta con información Lidar y ortofotografías las cuales facilitan la ubicación y medición de los deslizamientos tanto recientes como aquellos que ocurrieron en los primeros años de la ruta (de

1987 en adelante). Estos datos permiten crear un inventario de deslizamientos con el cual se pudo ubicar las zonas que han experimentado mayor inestabilidad con el paso de los años y al mismo tiempo dieron la oportunidad de comparar la clasificación realizada por el HSQI con la realidad de la susceptibilidad a deslizamiento en la ruta. Estas circunstancias dieron otra razón por la cual aplicar esta metodología en esta zona, pues no se conocía qué tanto una topografía de tan alto detalle como la que proporciona el Lidar influiría en los resultados.

La RN-32 (ver Figura 1.1) también conocida como Autopista Braulio Carrillo no solo es especial para este trabajo debido a sus características intrínsecas, si no también, representa una importante ruta de comercio para Costa Rica. Esta carretera fue inaugurada en 1987, su kilómetro cero se ubica en el cruce conocido como “La República” en el Barrio Tournon en San José (1158 m.s.n.m) y una vez recorridos 156 km termina en la llanura atlántica en la ciudad de Limón. Su punto de mayor elevación se encuentra en el cerro Zurquí a 1762 m.s.n.m y su punto más bajo es en Puerto Limón al nivel del mar (Cordero et al, 2009).



Simbología

-  Peaje RN-32
-  Cruce de Río Frio
-  Sección a estudiar
-  Ruta Nacional 32
-  Provincias

Figura 1.1: Mapas de ubicación de la RN-32 y el tramo marcado en azul representa la sección de la carretera que se analizará en este trabajo (aproximadamente 34 km).

Al ser una ruta de importancia económica para el país, su constante cierre debido a los múltiples deslizamientos genera pérdidas económicas, según el Ministerio de Obras Públicas y Transportes de Costa Rica (MOPT) en su Plan Nacional de Transportes 2011-2035 publicado en el año 2011, la cantidad de vehículos que transitan por día por esta ruta está en aumento por lo que el riesgo generado por los deslizamientos aumentará consecuentemente. En el plan se divide la ruta en diversos tramos y se proyecta en estos el flujo vehicular en periodos de 5 años (2010-2035), además categorizan (de A a F) la fluidez del flujo vehicular. En la tabla 1.1 se listan las diferentes categorías mencionadas:

Tabla 1.1
Categorías de flujo vehicular en el Plan Nacional de Transportes 2011-2035 (2011) del MOPT.

Categoría	Descripción
A	La velocidad de los vehículos es igual a la que los conductores elegirían libremente de no verse obligados a modificarla por la presencia de obstáculos.
B	Flujo libre razonable, pero la velocidad empieza a ser restringida por las condiciones del tránsito. La demora de los conductores no es mayor al 50% del total del tiempo de viaje.
C	Se mantiene en zona estable, pero muchos conductores empiezan a sentir restricciones en su libertad para seleccionar su propia velocidad. La demora de los conductores alcanza el 65% del total del tiempo de viaje.
D	Acercándose a flujo inestable, los conductores tienen poca libertad para maniobrar. La demora de los conductores es cercana al 80% del total del tiempo de viaje.
E	Flujo inestable, suceden pequeños congestionamientos. La demora de los conductores es mayor al 80% del total del tiempo de viaje.
F	Flujo forzado, condiciones de “pare y siga”, congestión de tránsito.

El MOPT (2011) asigna, por lo tanto, una categoría a cada periodo de 5 años según la proyección de aumento de vehículos por día en cada tramo de la carretera. El presente trabajo comprende aproximadamente los estacionamientos 14+000 al 50+000 de la RN-32, los cuales corresponden a la zona montañosa de la carretera, la cual al mismo tiempo es dividida en tres tramos. El primer tramo fue definido por el MOPT (2011) como la carretera entre el límite de Heredia-San José y el límite Moravia-Vásquez de Coronado (aproximadamente Km 13+750 -

18+750), el segundo tramo entre los límites Moravia-Vásquez de Coronado y San José-Limón (aproximadamente Km 18+750 - 39+275), el tercer tramo de San José-Limón y La Y griega (aproximadamente Km 39+275 - 49+570). En la tabla 1.2 se listan los datos de tránsito establecidos por el MOPT (2011) para la zona de estudio.

Tabla 1.2

Estimación de la cantidad de vehículos que transitan a través de la RN-32 en el periodo comprendido del año 2010 a 2035 y su categoría de flujo vehicular (MOPT, 2011).

	Km 13+750 - 18+750		Km 18+750 - 39+275		Km 39+275 - 49+570	
Año	Vehículos /Día	Categoría	Vehículos /Día	Categoría	Vehículos /Día	Categoría
2010	8370	B	20524	E	20524	D
2015	8660	B	23329	E	23329	E
2018	8839	B	25193	E	25193	E
2020	8979	B	25868	E	25868	E
2025	9337	B	27635	E	27635	E
2030	9711	B	29522	E	29522	E
2035	10099	B	31539	E	31539	E

Estos datos indican un aumento de hasta un 50 % en los vehículos que transitan este sector de la vía, no obstante, el riesgo de los deslizamientos no es solo para con la cantidad de vehículos que transitan por la vía sino con la importancia que estos tienen para la economía nacional, dado que esta es la principal ruta que mueve los productos que llegan al país desde el Océano Atlántico y el Mar Caribe hacia el área metropolitana. Un congestionamiento vial causado por el cierre de la carretera puede incrementar el tiempo de recorrido en varias horas a la vez que perjudica la economía, debido a que el transporte de diversos productos perecederos es ralentizado lo cual lleva a pérdidas económicas de las empresas e impacta al país en general.

Como se ha mencionado, el tránsito por el tramo montañoso de la RN-32 se ha visto dificultado y en diversas ocasiones cerrado debido a deslizamientos disparados por las lluvias que entran en contacto con las litologías altamente

meteorizadas de la zona. En la tabla 1.3 se hace una recopilación de varios deslizamientos cubiertos por la prensa local.

Tabla 1.3

Lista de deslizamientos ocurridos en los últimos 7 años en varios sectores de la RN-32. La información recolectada de diversos medios informativos corresponde al día que se dio el cierre, su localización y su duración (la información fue recolectada de diferentes periódicos y noticieros nacionales en sus páginas web).

Fecha	Lugar del deslizamiento	Duración del cierre	Referencia
22/06/2010	Kilómetro 23	-	Recio (2010)
09/04/2010	Kilómetro 23	-	López (2010) - Fernández (2010)
15/05/2012	2 km después del puente sobre el río Sucio	-	Altamirano (2012)
13/06/2012	10 km después del túnel Zurquí hacia Guápiles	-	Guerrero (2012)
31/12/2014	Kilómetro 27	12 horas	Cerdas (2014)

La presencia de estos deslizamientos afecta económicamente a la administración encargada de mantener las rutas nacionales, la cual en Costa Rica es el Consejo de Nacional de Vialidad (CONAVI). Según datos dados por el LanammeUCR en sus evaluaciones de la Red Vial Nacional de los años 2012 a 2018, se calcula un total de 5.081.263.890 colones (no se considera la inflación) usados en mantenimiento de la vía en los tramos indicados en la tabla 1.2. De este total un monto de 220.603.215 colones (aproximadamente un 4% del total, Figura 1.2) ha sido usado para la limpieza de derrumbes sobre la carretera. Otras actividades pueden representar un mayor porcentaje del total, sin embargo, teniendo en cuenta la cantidad total de dinero que se ha usado un 4% es una cantidad significativa.

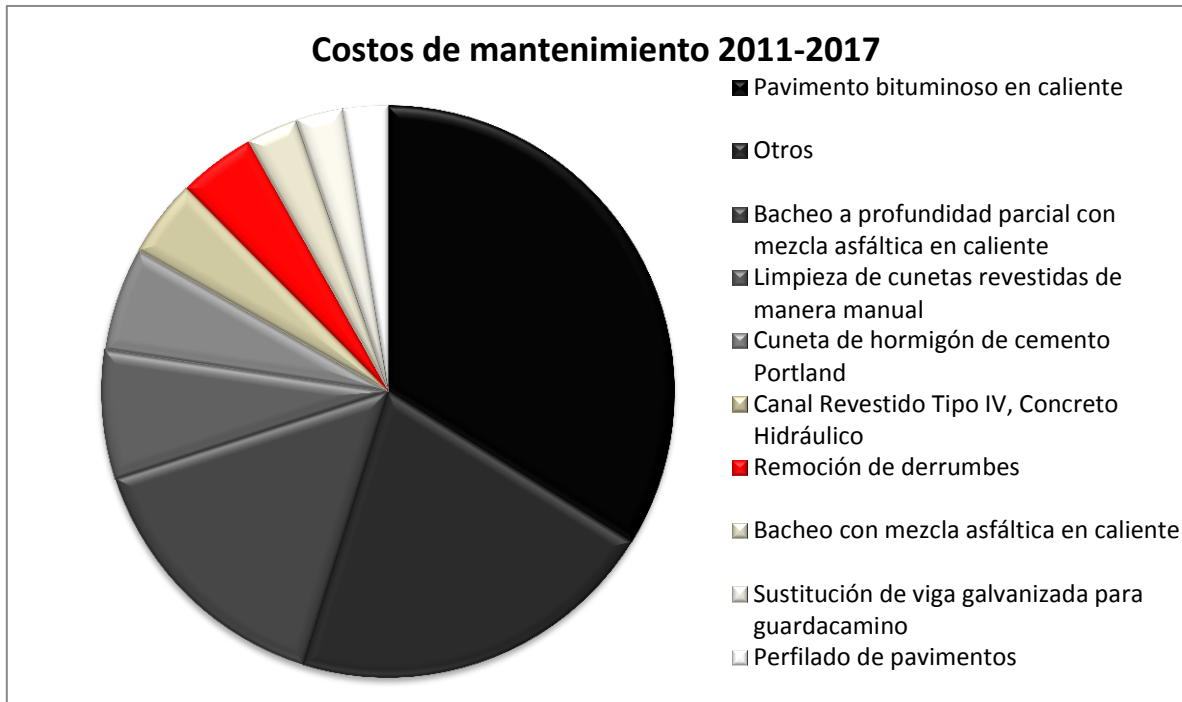


Figura 1.2: Gastos en mantenimiento de la RN-32 en la sección montañosa (LanammeUCR, 2012-2018). En rojo, representando un 4% del costo total, se encuentran las actividades de remoción de derrumbes (material caído sobre la carretera).

Al analizar espacialmente la información de los costos de remoción de derrumbes, podemos observar zonas que han requerido una mayor inversión para mantener el flujo vehicular desobstaculizado (ver Figura 1.3). Los tramos de la carretera que presentan más gastos coinciden con las zonas que, históricamente, han presentado más deslizamientos (discutido en el capítulo 4).

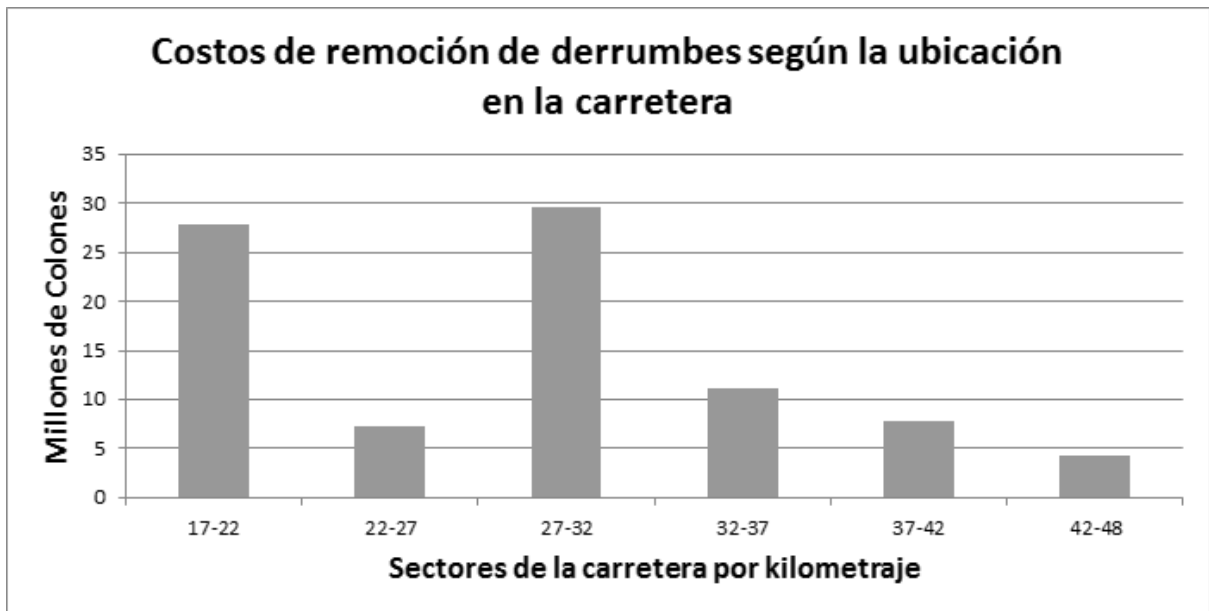


Figura 1.3: Costos de remoción de derrumbes por zonas en la carretera. En la zona entre el estacionamiento 17 al 22 se encuentra el túnel del Zurquí y como será discutido en el apartado 4.3, esta zona es una de la más críticas en cuanto a densidad de deslizamientos. La segunda zona de altos costos (del estacionamiento 27 al 32) representa otra zona, no tan crítica, pero con importante frecuencia de eventos.

1.1 Objetivos del proyecto de graduación

1.1.1 Objetivo general

- Determinar mediante un análisis ROC la eficiencia del método Hill Slope Quality Index para caracterizar la susceptibilidad a deslizamiento de los taludes de una carretera ya finalizada, en uso y construida en suelos de origen volcánico en un ambiente tropical.

1.1.2 Objetivos específicos:

- Conocer las pendientes, unidades geomorfológicas, patrón de drenaje del área de estudio mediante análisis remotos, con el fin de aplicar la metodología HSQI en secciones donde estas sean homogéneas.
- Inventariar los deslizamientos presentes en los taludes del tramo de la carretera a estudiar mediante métodos remotos con el fin de contar con una base de datos para determinar el grado de certeza del método, en su posterior evaluación.

- Cartografiar la geología a lo largo del tramo de la carretera a estudiar mediante giras al campo, con el fin de contar con la información necesaria para definir secciones de geología homogénea en las que se aplicará el método.
- Obtener mediante ensayos de laboratorio los parámetros mecánicos de los suelos y rocas de las unidades que afloran en el tramo de la RN-32 a estudiar, con el fin de obtener los datos de entrada para las ecuaciones del método.
- Clasificar las secciones de estudio según su susceptibilidad a deslizamiento mediante la aplicación del método HSQI para posteriormente analizar el grado de certeza que este obtuvo en la clasificación.
- Determinar estadísticamente mediante un análisis ROC, los resultados de la clasificación, comparándolos con el estado actual e inventario de deslizamientos del tramo a estudiar para determinar la eficiencia que mostró el método.

1.2 Disparadores de deslizamientos en el área

Los deslizamientos en la sección vial en estudio no son eventos lentos que abarquen una amplia cantidad de tiempo, en cambio, son sucesos rápidos (segundos) que no se pueden prever. Estos eventos (en su mayoría) son disparados por lluvias de gran intensidad o durante la estación lluviosa anual. La zona también ha experimentado a través de los años el impacto de ondas sísmicas producto de sismos cuyos hipocentros pueden ubicarse tanto cerca como lejos de la ruta. A continuación se detallan estos dos factores.

1.2.1 Precipitación

El agua (y por ende la precipitación de esta) es un factor clave en la estabilidad de un talud, pues, a mayor cantidad de esta más inestable es un determinado talud. Esto se debe a que el agua reduce la resistencia al corte de los planos de ruptura, aumenta la presión en las fracturas de tracción, el peso total del talud y la erosión interna de este (González de Vallejo *et al.*, 2002).

Los deslizamientos en el tramo montañoso de la ruta son causados mayoritariamente por eventos de precipitación atípicos (mayores a la precipitación promedio) los cuales, en consecuencia, generan los efectos en los materiales previamente mencionados. Estos eventos pueden suceder tanto en la temporada lluviosa del año como en algún evento atípico como un huracán o una onda tropical. La zona presentó en el 2004 un promedio de precipitación igual a 7000

mm/año, convirtiéndola en una de las zonas mas lluviosas del país (ver Figura 1.4).

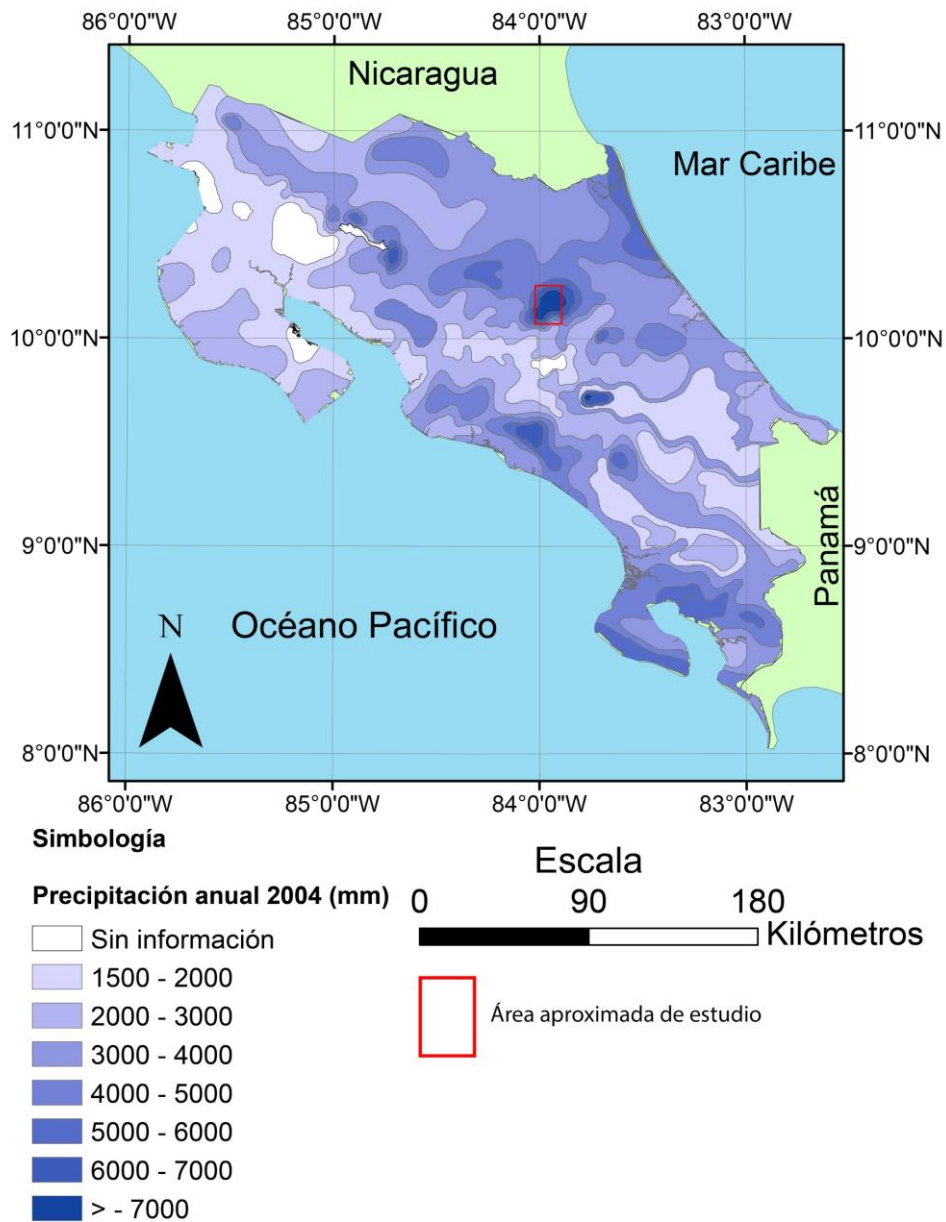


Figura 1.4: Mapa de precipitación del 2004, los datos de precipitación fueron obtenidos del Instituto Meteorológico Nacional (IMN). El cuadro rojo encierra la zona de estudio y evidencia la intensidad de las precipitaciones durante el año 2004 (> 7000 mm).

Recientemente, en julio del año 2018, un total de 10 ondas tropicales golpearon al país generando un superávit en la precipitación en el Caribe y la zona norte del país de 100% a 160% (IMN, 2018), el cual afectó particularmente a la RN-32 en el tramo montañoso. Al menos una decena de deslizamientos tuvieron lugar durante este evento, bloqueando el paso a través de la ruta y atrapando cerca de 350 personas (Repretel, 14 de julio del 2018 a las 7:00 pm) durante varias horas. En el proceso de la quinta onda tropical del mes de Julio una persona falleció en las inmediaciones del estacionamiento 21 de la carretera. Este suceso reafirma la necesidad de conocer y entender las zonas críticas a deslizamiento de la vía, así como qué sectores representan una mayor amenaza debido a su susceptibilidad.

1.2.2 Sismicidad

Al igual que en el resto del territorio nacional la zona de los cerros del Zurquí se ve amenazada por un alto grado de sismicidad proveniente de las múltiples zonas sismogénicas del país. La aceleración producida por un sismo es la que genera efectos negativos en las laderas y en su estabilidad, pues es el cómo reaccionaron los materiales a las ondas sísmicas lo que define su probabilidad de deslizarse. La Figura 1.5 muestra unos mapas de la sismicidad histórica de la zona cercana al área de estudio.

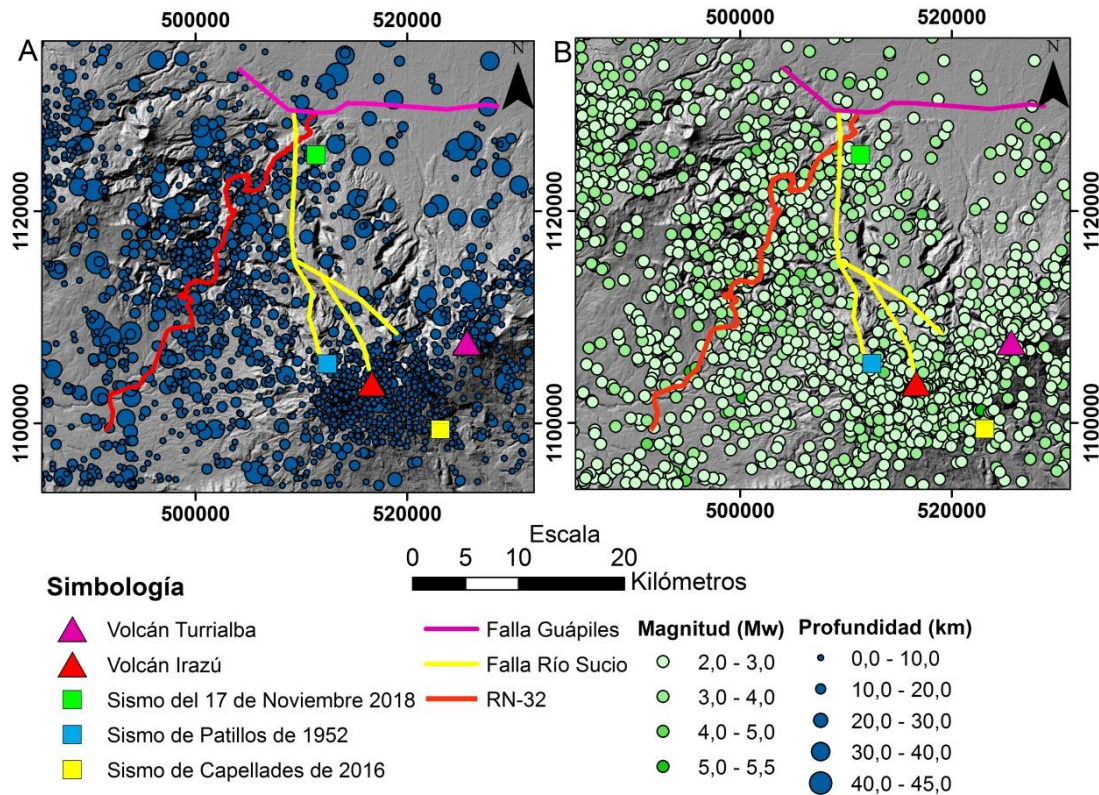


Figura 1.5: Mapas de la sismicidad histórica (año 1975 a 2017) cercana al área de estudio según el catálogo de la Red Sismológica Nacional de Costa Rica. A) Profundidad de los sismos: En cuanto a profundidad se refiere los sismos no muestran patrones de ubicación distingibles, exceptuando el macizo del volcán Irazú que muestra una gran cantidad de sismicidad cortical de poca profundidad (<10 km). B) Magnitudes de los sismos: La zona no presenta un historial de magnitudes muy altas (un promedio de 3 M_w de 58205 sismos usados), sin embargo, los sismos más grandes, como el de Patillos, pueden generar aceleraciones importantes que pueden comprometer la seguridad de estructuras y personas.

Un ejemplo de un sismo que haya generado intensidades importantes en la zona fue el sismo conocido como Patillos localizado en las inmediaciones del Volcán Irazú, el cual ocurrió el día 30 de diciembre del año 1952. Este evento tuvo una magnitud de 5,9 y generó intensidades en la zona del túnel del Zurquí (la vía RN-32 todavía no había sido construida) de VI en la escala de Intensidad Modificada de Mercalli (Montero & Alvarado, 1995). La Figura 1.6 muestra las intensidades generadas por el sismo.

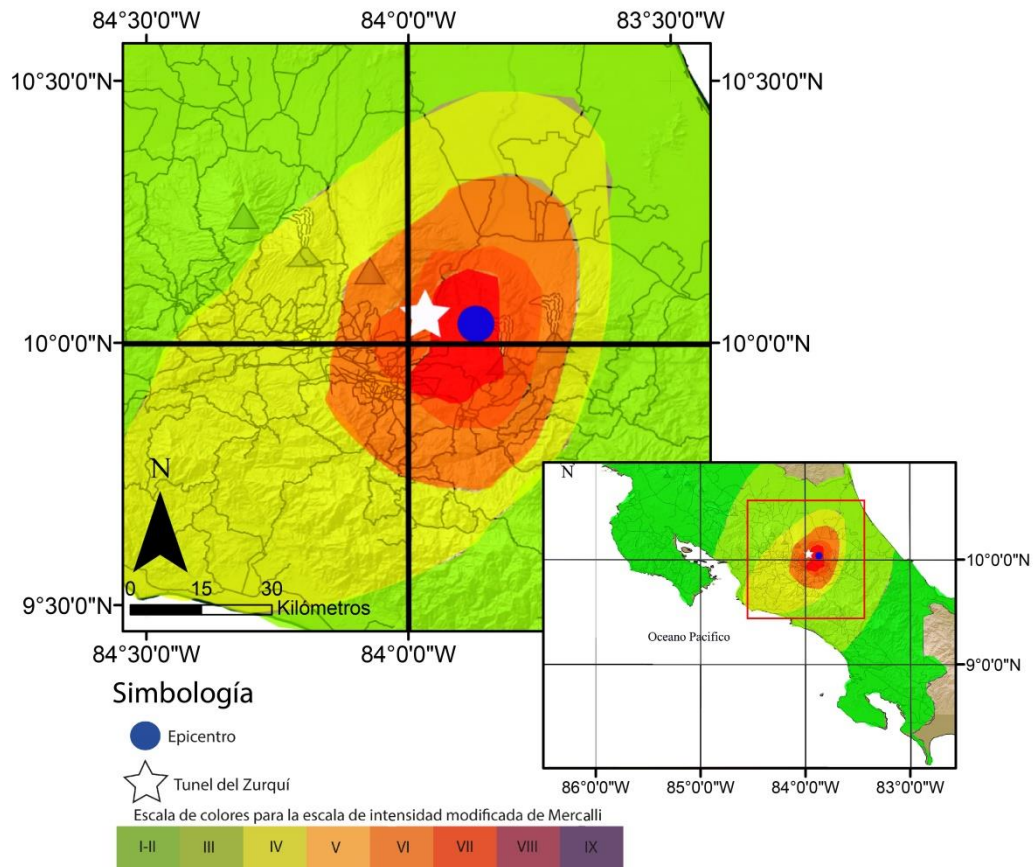


Figura 1.6: Mapa de intensidades generadas por el sismo de Patillos de 1952. Modificado de Montero & Alvarado (1995).

Montero & Alvarado (1995) mencionan como este sismo generó “impresionantes deslizamientos” en la zona oeste del volcán Irazú, los cuales resultaron en la pérdida de 21 vidas humanas. Estos deslizamientos tuvieron una extensión de 3 kilómetros de largo con 300 a 400 m de alto. Montero & Alvarado (1995) también mencionan que los deslizamientos bloquearon ciertos cauces de ríos como el río Blanco y el río Sucio. Estos bloqueos en los ríos pueden provocar problemas en las vías, particularmente por la avenida de lahares y afectar los puentes que se encuentran en su trayectoria, en este caso el puente sobre el río Sucio. Cualquier cabeza de agua o lahar que baje por los cauces podría comprometer la integridad de la estructura y amenazar con cerrar la ruta por tiempo indefinido.

En el año 2016, el 30 de noviembre a las 6:25 pm (GMT -6), en el poblado de Capellades de Alvarado en la provincia de Cartago, se presentó un sismo de magnitud M_w 5,5 (Linkimer et al, 2018). Este sismo se dio a aproximadamente 23 km al SSE del área de estudio (peaje del Zurquí), fue generado por una falla de

desplazamiento de rumbo dextral con dirección N9W a N41°W (Linkimer et al, 2018). Aunque el sismo está relativamente lejos del área de estudio, fue generado en el mismo contexto geológico que el sismo de Patillos de 1952 (en un edificio volcánico) con la diferencia que Patillos se dio en el volcán Irazú y Capellades en el Turrialba. Linkimer et al (2018) reportan una intensidad instrumental en la zona del túnel del Zurquí de IV en la escala de Intensidad Modificada de Mercalli, la cual generó deslizamientos importantes en 32 km² alrededor del epicentro. Este evento sísmico demuestra la capacidad de los edificios volcánicos cercanos a la carretera de generar sismos de importante magnitud e impacto en el terreno.

El 17 de noviembre del 2018 a las 8:12 am se produjo un sismo de magnitud M_w 5,1 a 12 km al Oeste de la ciudad de Guápiles, este lugar está ubicado a tan solo 2 km de la carretera (en su punto más cercano), lo cual genera preocupación por la posibilidad de disparo de un deslizamiento. El sismo tuvo una réplica a las 10:56 pm de magnitud M_w 3,3 a 800 m al SW de evento principal. Para ninguno de los dos eventos se reportaron deslizamientos o algún tipo de problema en la carretera, sin embargo, la ocurrencia de estos dos eventos confirma la constante actividad tectónica en el área y la amenaza que representa para la RN-32.

LanammeUCR en su informe de evaluación del Túnel Zurquí del año 2017, hace un repaso de la actividad sísmica que ha afectado la zona en los últimos años y tabulan (ver tabla 1.4) las intensidades en la zona junto a su aceleración pico máxima (PGA_{max}) usando las ecuaciones propuestas por Linkimer (2008).

Tabla 1.4

Relación intensidad con PGAmáx según las ecuaciones de Linkimer (2008) para sismos que hayan presentado intensidades de más de IV en la zona montañosa de la RN-32, tomada de LanammeUCR (2017).

Información del Sismo				PGA		Referencia
Fecha	Nombre del sismo	Magnitud (M _w)	Intensidad	Ecuaciones 1y2	Ecuaciones 3y4	
30/12/1952	Patillos	5,9	VI	80,3-146,7	84,7-139,6	Montero, W., Alvarado, G., 1995: El terremoto de patillos del 30 de diciembre de 1952(M _s =5,9) y el contexto neotectónico del volcán Irazú, Costa Rica
25/03/1990	Cóbano	7	V	36,0-80,3	40,3-84,7	RSN., 1991: La crisis sísmica del golfo de Nicoya y eventos sísmicos relacionados, Costa Rica, 1990
22/12/1990	Piedras Negras	6	V	36,0-80,4	40,3-84,8	http://www.lis.ucr.ac.cr/index.php?id=68
22/04/1991	Limón	7,7	VI	80,3-146,7	84,7-139,6	http://www.lis.ucr.ac.cr/index.php?id=75
20/08/1999	Quepos	6,9	IV	13,3-36,0	15,0-40,3	ROJAS,W.,REDONDO,C.,2002: El temblor de Quepos del 20 de agosto de 1999(6.9 M _w): Fuente sísmica y evolución de la sismicidad.-Revista Geológica de America Central, 26: 65-70, 2002.
25/12/2003	Puerto Armuelles	6,5	IV	13,3-36,1	15,0-40,2	http://www.lis.ucr.ac.cr/index.php?id=69
20/11/2004	Damas	6,2	IV	13,3-36,0	15,0-40,3	RSN.,2004: Terremoto de Damas(Quepos) del 20 de Noviembre del 2004
08/01/2009	Cinchona	6,2	VI	80,3-146,7	84,7-139,6	RSN.,2009: El terremoto de Cinchona del 8 de enero de 2009.- 138 pags
13/05/2011	Acosta	5,8	IV	13,3-36,0	15,0-40,3	http://www.lis.ucr.ac.cr/mapas/2011-05-13-16:50:21/
05/09/2012	Sámara	7,6	V	36,0-80,3	40,3-84,7	RSN.,2012: El terremoto de Sámara del 5 de septiembre del 2012.-136 pags

En la tabla 1.4 se aprecia como la zona ha experimentado intensidades de VI en la escala IMM generadas por sismos que no necesariamente tuvieron su epicentro en las cercanías, ejemplo de esto es el sismo de Sámara (cuyo epicentro se encuentra aproximadamente a 170 km de distancia). Este sismo se originó en la zona sismogénica (a diferencia del origen cortical del sismo de Patillos o el del 17 de noviembre del 2018) del país y generó intensidades de V y aceleraciones de entre 36,0 y 84,7 cm/s^2 . Por lo que se demuestra que las fuentes sísmicas que representan una amenaza para la zona son variables y pueden encontrarse a distancias lejanas.

Capítulo 2: Marco Teórico

A través de los años se han desarrollado distintos métodos de cálculo basados en modelos de equilibrio límite y/o elemento finito para medir, clasificar y estimar las propiedades de un talud o de un macizo rocoso, y a partir de esta información, diseñar y recomendar medidas para disminuir los riesgos que estos imponen a una obra de infraestructura, a sus usuarios o a una población vecina. Ejemplos de estos son el Rock Mass Rating de Bieniawski (1973), el Slope Mass Rating de Romana (1993), el Geological Strength Index de Hoek (1994), la metodología Mora-Vahrson-Mora de Mora-Vahrson (1993) y Mora (2002) y el ya mencionado HSQI de Moreno-Ceballos (2015). En este capítulo se hará una breve descripción de los principales y más reconocidos métodos en este campo además de una descripción de la terminología de deslizamientos.

2.1 Clasificación de deslizamientos

Gracias a una gran diversidad en los materiales, movimientos, causas y otras características que pueda presentar un deslizamiento, es necesario poder clasificarlos en un sistema que permita discernir con claridad entre estos factores, con el fin de determinar un nombre o categoría para un deslizamiento en particular.

El sistema de clasificación más usado o más conocido fue propuesto por Varnes en 1978, en este trabajo, el autor define como “movimientos de pendientes” a todo movimiento de masa en una ladera a excepción de subsidencias u otras formas de hundimiento del suelo. Esto lo hace con el fin de usar el término “deslizamiento” en casos donde realmente haya un deslizamiento de material sobre otro y no caída, volcamiento, etc.

Si bien este sistema de clasificación es ampliamente reconocido, Hungr (2014) propone una modificación para hacer al sistema de Varnes (1978) compatible con las terminologías geotécnicas y geológicas aceptadas para suelos y rocas.

Un deslizamiento comprende: deformación antes del fallamiento, el propio fallamiento y el desplazamiento posterior al fallamiento (Skempton and Hutchinson, 1969). El fallamiento es el episodio de movimiento más significativo

en la historia de un deslizamiento, el cual representa la formación de una superficie de ruptura (Hungr, 2014). El grado de pérdida de resistencia durante el fallamiento determina la velocidad del deslizamiento y puede implicar un cambio en el movimiento deslizante a uno de flujo o caída (Hungr, 2014).

La velocidad del deslizamiento es clasificada según la Sociedad Geotécnica Internacional en el Inventario Mundial de Deslizamientos de la UNESCO y por Cruden & Varnes (1996). En esta escala se trabaja con deslizamientos que varían su velocidad de varios metros por segundo a eventos que pasarían desapercibidos si no fuera por una medición instrumentada a lo largo de meses o años. Esta clasificación se presenta en la tabla 2.1.

Tabla 2.1
Clasificación de un deslizamiento según su velocidad de movimiento (WP/WLI 1995, Cruden & Varnes 1996).

Clase	Descripción	Velocidad (mm/s)	Velocidad típica
7	Extremadamente rápida	5×10^3	5 m/s
6	Muy rápida	5×10^1	3 m/min
5	Rápida	5×10^{-1}	1,8 m/h
4	Moderada	5×10^{-3}	13 m/mes
3	Lenta	5×10^{-5}	1,6 m/año
2	Muy lenta	5×10^{-7}	16 mm/año
1	Extremadamente lenta	-	-

Para definir los tipos de deslizamientos Hungr (2014) usa como referencia a Varnes (1978), Hutchinson (1988) y Hungr et al (2001), entre otros, con los cuales logra describir 32 tipos de deslizamiento, desde caídas de hielo y roca hasta licuefacción. A continuación se muestran las descripciones de los principales o más importantes tipos de deslizamientos presentes en Hungr (2014):

Caída de roca o hielo: Desprendimiento, caída, rodaje o rebote de rocas o fragmentos de hielo. Puede ocurrir en bloques individuales o en grupos. La interacción entre los distintos bloques es mínima y esta se da mayoritariamente entre los fragmentos y el sustrato. Los fragmentos pueden romperse al impacto.

Caída de bloques, escombros o limos: Desprendimiento, caída, rodaje o rebote de fragmentos de suelo como grandes clastos en depósitos de suelo o bloques de suelo cohesivo. Los impactos son de menor intensidad debido a la debilidad de las partículas en movimiento.

Volcamiento de roca o bloques de grava, arena o limo: Rotación hacia adelante de columnas o láminas de roca, las cuales están separadas por diaclasas con un alto ángulo de buzamiento. El movimiento es lento pero la última etapa de volcamiento es extremadamente rápida. Puede ocurrir en todas las escalas de tamaño.

Deslizamiento rotacional de roca: Deslizamiento de una masa de roca en una superficie de ruptura cilíndrica u otra geometría rotacional. Después de este evento se observa un escarpe prominente y un depósito inclinado hacia la corona.

Deslizamiento planar de roca: Deslizamiento de una masa de roca en una superficie planar, la superficie puede estar inclinada hacia adelante, fisuras de tensión, usualmente extremadamente rápido.

Deslizamiento rotacional en arcilla o limo: Deslizamiento de una masa de suelo homogéneo y cohesivo en una superficie rotacional. Poca deformación interna. Escarpe remanente y depósito inclinado hacia la corona. Puede ser lento a rápido.

Deslizamiento planar en arcilla o limo: Deslizamiento de un bloque de suelo cohesivo en una superficie planar inclinada, formada por una capa débil. Lento a rápido.

Deslizamiento de grava, arena o escombros: Deslizamiento de una masa de material granular en una superficie planar poco profunda paralela con el suelo. Usualmente la masa deslizante es un coluvio, suelo meteorizado o depósitos piroclásticos deslizándose sobre un estrato más resistente. Pueden transformarse en avalanchas de escombros extremadamente rápidas.

Extensión de arena o limo por licuefacción: Extensión extremadamente rápida de una serie de bloques de suelo, flotando en una capa de suelo granular suelto saturado, el experimenta licuefacción debido a un terremoto.

Avalancha de roca y suelo: Movimiento similar a un flujo de hielo o roca fragmentados provenientes de un deslizamiento o caída de los mismos.

Flujo de escombros: Muy o extremadamente rápido flujo de escombros saturados en un canal escarpado.

Avalancha de escombros: Muy o extremadamente rápido flujo superficial de de escombros parcial o totalmente saturados en una pendiente sin confinamiento. Puede abarcar todas las escalas de tamaño.

Reptación de suelo: Movimiento extremadamente lento de capas de suelo superficiales (menos de 1 metro de profundidad) como resultado de cambios de volumen debido a saturación y posterior secado del suelo.

Hungr (2014) indica que si bien la modificación a la clasificación de Varnes (1978) no contempla deslizamientos mixtos en ciertas ocasiones resulta necesario usar dos nombres para describir un evento. Para este caso Hungr (2014) indica que los nombres resultantes de combinaciones de los pasados tipos deben ser decididos por el profesional a cargo del estudio. La totalidad de las clasificaciones propuestas por Hungr (2014) se resumen en la tabla 2.2.

Tabla 2.2

Clasificación propuesta por Hungr (2014) para los distintos tipos de deslizamientos basados en Varnes (1978).

Tipo de movimiento	Roca	Suelo
Caída	Caída de hielo o roca	Caída de bloques, escombros o limo
Volcamiento	Volcamiento de bloque Volcamiento flexural	Volcamiento de grava, arena o limo
Deslizamiento	Deslizamiento rotacional	Deslizamiento rotacional de arcilla o limo
	Deslizamiento planar	Deslizamiento planar de arcilla o limo
	Deslizamiento de cuña	Deslizamiento de grava, escombros o limo
	Deslizamiento compuesto Deslizamiento irregular	Deslizamiento compuesto de arcilla o limo
Extensión	Extensión de pendiente	Licuefacción de arena o limo Extensión de arcilla sensitiva
Flujo	Avalancha de hielo o roca	Flujo seco de arena, limo o escombros
		Flujo/deslizamiento de arena, limo o escombros
		Flujo/deslizamiento de arcilla sensitiva
		Flujo de escombros
		Flujo de lodo
		Inundación de escombros
		Avalancha de escombros
Deformación de pendiente	Deformación de pendiente de montaña Deformación de pendiente de roca	Flujo de tierra
		Flujo de turba
		Deformación de pendiente de suelo
		Reptación Soliflucción

2.2 Rock Mass Rating (RMR)

Bieniawski (1973) introduce el concepto de Rock Mass Rating al analizar distintas características intrínsecas de un macizo rocoso. Constituye un método de clasificación geomecánica, que otorga un valor y designa una categoría de calidad al macizo con base a la sumatoria de varios componentes geométricos y de resistencia de la roca. El primer parámetro tomado por Bieniawski (1973) es el valor RQD (Deere, 1964) de un macizo, este cuantifica el macizo con base al porcentaje de recuperación de núcleos de roca \geq a 10 cm en una perforación exploratoria.

Seguidamente Bieniawski (1973) valora las discontinuidades en el macizo. Características como longitud de las discontinuidades, apertura, rugosidad, relleno y meteorización son valoradas con base en una estandarización empírica, a cada una se le asigna un valor dependiendo de su categorización, los cuales, son sumados. La resistencia a la compresión uniaxial y el flujo de agua en las discontinuidades también son evaluados.

El método de Bieniawski (1973) posee una corrección debido a la orientación de las discontinuidades y cómo estas pueden disminuir la calidad del macizo dependiendo de su orientación con la obra. Por ejemplo, de ser la orientación desfavorable a la disposición de la obra, el método propone una corrección de hasta -60 puntos del total. La puntuación total del RMR puede variar entre 0 y 100, los rangos de valor que asignan las diferentes categorías se muestran en la tabla 2.3.

Tabla 2.3

Clasificación de la calidad geomecánica del macizo rocoso con base en el RMR, Bieniawski (1973).

Puntuación	100-81	80-61	60-41	40-21	20-0
Clase	I	II	III	IV	V
Calidad	Muy Buena	Buena	Media	Mala	Muy mala

2.3 Slope Mass Rating (SMR)

Romana (1993) propone el método para taludes rocosos Slope Mass Rating (SMR), este representa una ligera variación del método del Rock Mass Rating (RMR) de Bieniawski (1973). El valor SMR es calculado de acuerdo a la ecuación 1:

$$SMR = RMR + (F_1 * F_2 * F_3) + F_4,$$

Ecuación 1

donde:

RMR: Variable calculada a partir de Bieniawski (1979) en la cual se toman en cuenta cinco parámetros, la fuerza de la roca intacta, la calidad del núcleo de perforación, distancia entre discontinuidades, condición de las discontinuidades y flujo de agua a través de las discontinuidades,

F_1 = Depende del paralelismo entre la dirección de la cara del talud y fracturas, su valor varía de 1,00 a 0,15 y se calcula mediante la ecuación 2, donde A es el ángulo entre la dirección del talud y fracturas,

$$F_1 = (1 - \sin A)^2,$$

Ecuación 2

F_2 = Se refiere al ángulo de inclinación de las uniones en una ruptura planar, su valor varía de 1,00 a 0,15 y su cálculo se realiza mediante la ecuación 3,

$$F_2 = \operatorname{tg}^2(B_j),$$

Ecuación 3

F_3 = Es la relación entre la cara del talud y la inclinación de fracturas, calculada mediante Bieniawski (1976),

F_4 = Es una variable empírica la cual depende del método de excavación.

Una vez realizados los cálculos de SMR, el valor debe situarse en un rango de 0 a 100, y según este valor la obra es categorizada dentro de una de las cinco clases, las cuales se detallan en la Tabla 2.4.

Tabla 2.4
Clasificación de taludes según las clases de SMR, tabla tomada de Romana (1993)

Clase	SMR	Descripción	Estabilidad	Fallas	Mantenimiento
I	81-100	Muy buena	Completamente estable	Ninguna	Ninguno
II	61-80	Buena	Estable	Algunos bloques	Ocasional
III	41-60	Normal	Parcialmente estable	Algunas fracturas o algunas porciones	Sistemático
IV	21-40	Mala	Inestable	Planar o grandes porciones	Correctivo/Importante
V	0-20	Muy mala	Completamente inestable	Planar grande o similar a suelo	Re excavación

2.4 Geological Strength Index (GSI)

Hoek (1994), Hoek et al (1995) y Hoek & Brown (1998) proponen este método basado en la hipótesis de que un macizo rocoso contiene una cantidad de fracturas orientadas aleatoriamente que le permiten comportarse como una masa isotrópica.

Con base en observaciones de campo el método GSI provee una manera de estimar la reducción en la fuerza de un macizo rocoso en diferentes condiciones geológicas. Los aspectos a ser evaluados para la clasificación corresponden al nivel de diaclasamiento del macizo y a la condición de las fracturas y discontinuidades. Al analizar estos dos parámetros usando la tabla presentada en la Figura 2.1 se obtiene un amplio rango de clasificaciones de macizos rocosos, los cuales varían desde macizos sólidos con pocos y grandes bloques hasta masas de roca altamente trituradas. (Hoek & Brown, 1998).

GSI	Very Good	Good	Fair	Poor	Very Poor
	Very rough, fresh, unweathered surfaces	Rough, slightly weathered, iron stained surfaces	Smooth, moderately weathered or abraded surfaces	Stickensided highly weathered surfaces with compact coating or fillings of angular fragments	Stickensided highly weathered surfaces with soft clay coating or fillings
Blocky: very well interlocked undisturbed rock mass consisting of cubical blocks formed by three orthogonal discontinuity sets	80	70			
Very Blocky: interlocked, partially disturbed rock mass with multifaceted angular blocks formed by four or more discontinuity sets		60	50		
Blocky/Disturbed: Folded and/or faulted angular blocks formed by many interesting discontinuity sets			40	30	
Desintegrated: poorly interlocked, heavily broken rock mass with a mixture of angular and rounded rock pieces				20	10

Figura 2.1: Tabla usada para calcular el valor GSI de un macizo rocoso. En el eje X se encuentra las condiciones de la superficie de las discontinuidades y en el eje Y la estructura del macizo con respecto a la frecuencia de discontinuidades (modificado de Hoek, 1994).

2.5 Estimación de la cohesión y ángulo de fricción mediante el criterio de Hoek y Brown.

Tanto la cohesión como el ángulo de fricción pueden ser estimados por medio del criterio de Mohr-Coulomb (Jaeger & Cook, 1976), el cual combina las teorías de Mohr (1900) y Coulomb (1776). Este criterio establece las condiciones para las cuales un material isotrópico falla al analizar los distintos esfuerzos aplicados a este. Hoek (1990) y Hoek et al. (2002) describen cómo usar el criterio Hoek-Brown (Hoek & Brown, 1980) para aproximar teóricamente los valores de cohesión y ángulo de fricción mediante el valor de la resistencia a la compresión confinada de la roca.

Hoek & Brown (1980) proponen el criterio de falla de Hoek-Brown por medio de la ecuación 5, donde σ_1 representa el mayor esfuerzo principal al momento de falla, σ_3 el esfuerzo confinante, σ_c la resistencia a la compresión uniaxial de la

roca, m y s son constantes de los materiales. En el ensayo de compresión uniaxial se sustituye $\sigma_3 = 0$ en la ecuación 5, dando como resultado la ecuación 6.

$$\sigma'_1 = \sigma'_3 + \sqrt{m\sigma_c\sigma'_3 + s\sigma_c^2},$$

Ecuación 5

$$\sigma_{cmasshb} = \sqrt{s\sigma_c}.$$

Ecuación 6

Seguidamente Hoek & Brown (1990) proponen las ecuaciones 7 a 9 para obtener las variables de esfuerzo normal efectivo (σ'_n), esfuerzo cortante (t), y el ángulo de fricción del material (ϕ'_i).

$$\sigma'_n = \frac{2s\sigma_c}{4\sqrt{s}+m},$$

Ecuación 7

$$t = \sigma'_n \sqrt{1 + \frac{m}{2\sqrt{s}}},$$

Ecuación 8

$$\phi'_i = 90 - \arcsin\left(\frac{2t}{\sqrt{s\sigma_c}}\right).$$

Ecuación 9

Una vez obtenidos estos tres parámetros Hoek (1990) se remite a Hoek & Brown (1988) en donde propone la ecuación 10 para obtener finalmente el valor de la cohesión del material.

$$c'_i = t - \sigma'_n \tan(\phi'_i).$$

Ecuación 10

Esta primera manera de calcular los parámetros de cohesión y ángulo de fricción del criterio de Mohr-Coulomb fue luego actualizada por Hoek et al (2002), en donde hace varias modificaciones al criterio generalizado de Hoek-Brown. La ecuación 11 es resultado de esta modificación.

$$\sigma'_1 = \sigma'_3 + \sigma_{ci} \left(m_b \frac{\sigma'_3}{\sigma_{ci}} + s \right)^a,$$

Ecuación 11

en donde m_b , s y a son constantes que dependen del valor GSI del macizo rocoso. Posteriormente se definen nuevas ecuaciones para los valores c' y ϕ' al aproximar

una relación lineal para la curva generada por la ecuación 11. Las ecuaciones resultantes son la 12 y 13.

$$\phi' = \sin^{-1} \left(\frac{6am_b(s+m_b\sigma'_{3n})^{a-1}}{2(1+a)(2+a) + 6am_b(s+m_b\sigma'_{3n})^{a-1}} \right),$$

Ecuación 12

$$c' = \frac{\sigma_{ci}[(1+2a)s+(1-a)m_b\sigma'_{3n}](s+m_b\sigma'_{3n})^{a-1}}{(1+a)(2+a)\sqrt{1+(6am_b(s+m_b\sigma'_{3n})^{a-1}/((1+a)(2+a)))}}$$

Ecuación 13

Hoek et al (2002) concluye recomendando un software “RockLab” para la realización de estos cálculos. Para este trabajo se usó el software recomendado para facilitar los cálculos.

2.6 Ajuste de los parámetros de cohesión y ángulo de fricción según Lade (2010)

Lade (2010) propone una curva de ajuste a los círculos de Mohr-Coulomb diferente a la clásica recta tangencial. Este ajuste los hace basándose en la sobreestimación de los esfuerzos efectivos a los cuales es sometido un suelo no cementado en deslizamientos superficiales. Su propuesta se fundamenta en el hecho que a menos de 5 m de profundidad es muy difícil encontrar 50,100 o 200 kPa (esfuerzos usados tradicionalmente en ensayos de corte directo y triaxiales) sobre los materiales a tan poca profundidad. Lade (2010) propone una función potencial (ver ecuación 14) que afirma explica mejor los esfuerzos a los cuales un suelo no cementado está sometido a bajas presiones efectivas.

$$s = a * p_a * \left(\frac{\sigma'}{p_a}\right)^b,$$

Ecuación 14

En esta ecuación a y b son valores adimensionales y p_a es la presión atmosférica en las unidades de s y σ' . Los valores de resistencia en esta nueva envolvente potencial serán obtenidos calculando los esfuerzos a los que el material esta sometido a la profundidad en estudio y trazando una tangente a la envolvente en este punto de esfuerzos (ver Figura 2.2).

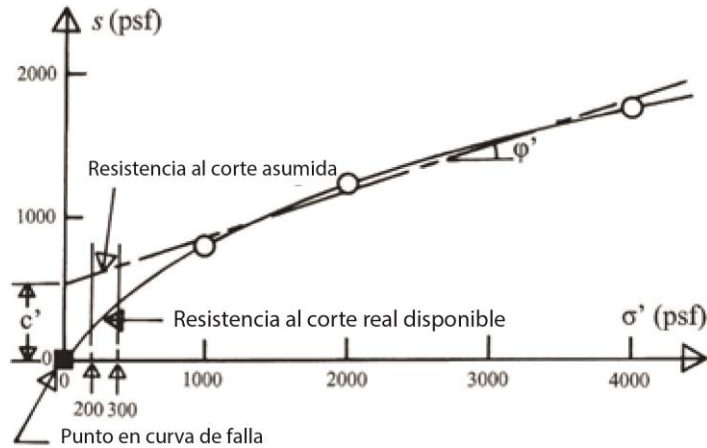


Figura 2.2: Diferencia entre la envolvente lineal común y la envolvente potencial propuesta por Lade (2010). Se puede apreciar como esta envolvente comienza en 0,0 y en valores bajos de esfuerzos presenta una inclinación muy alta. Las cohesiones y ángulos de fricción según esta curva resultan de una línea tangente a la misma en donde la cohesión es la intersección con el eje Y y el ángulo de fricción la pendiente de esta recta (modificada de Lade, 2010).

2.7 Metodología Mora-Vahrson-Mora

El método Mora-Vahrson-Mora es una modificación realizada al método de determinación de amenaza o susceptibilidad a deslizamientos de Mora & Vahrson (1993) conocido como Mora-Vahrson, esta modificación fue propuesta por Mora et al (2002).

Los parámetros agregados con respecto a la propuesta original fueron el ángulo de la pendiente del terreno (en sustitución del índice de relieve relativo), el análisis de resistencia al corte del suelo en estudio y la clasificación de macizos rocosos de Bieniawski (1989). Mora et al (2002) también propone una simplificación al grado de amenaza la cual denominan Susceptibilidad al Deslizamiento.

Este método trabaja bajo la hipótesis de que la ocurrencia de deslizamientos se ve influenciada por los elementos pasivos (EP) y los elementos activos o factores de disparo (D). Estos se relacionan mediante la ecuación 15.

$$H = EP * D.$$

Ecuación 15

A su vez EP se ve definido por la ecuación 16 y D por la ecuación 17.

$$EP = S_I * S_H * S_P,$$

Ecuación 16

donde:

S_I : Valor del parámetro de susceptibilidad litológica, usa propiedades propias del suelo como la mineralogía, la retención de humedad, espesores, grado de meteorización, fracturamiento, buzamiento, niveles freáticos, etc.,

S_H : Valor del parámetro de humedad del terreno, para este parámetro se utiliza un promedio mensual de precipitación y un balance hídrico simple, una vez obtenidos los promedios se les asigna un valor según su magnitud y se realiza una sumatoria anual.

S_P : Valor del parámetro de la pendiente, utiliza las clases de pendientes de van Zuidam (1986), la cual describe los procesos y condiciones esperadas del terreno.

$$D = D_S + D_I,$$

Ecuación 17

donde:

D_S : Valor del parámetro de disparo por sismicidad, de ser posible debe utilizar la relación de Trifunac & Brady (1975) en la cual se relaciona la intensidad Mercalli-Modificada con una aceleración pico, de no ser posible se pueden utilizar otras metodologías a criterio personal.

D_I : Valor del parámetro de disparo por lluvia, para este parámetro se usa la precipitación máxima en 24h con un periodo de retorno de 100 años.

Una vez realizados los análisis descritos anteriormente, Mora et al. (2002) proceden a clasificar la susceptibilidad en cinco categorías, estas son presentadas en la tabla 2.5, cabe decir que los rangos numéricos de cada clase dependen del lugar del análisis, por lo que los autores recomiendan dividir los valores obtenidos y asignarles los calificativos siguientes.

Tabla 2.5

Clasificación de la susceptibilidad según el método Mora-Vahrson-Mora.

Clase	Susceptibilidad al deslizamiento	Característica
I	Muy baja	Estable, no es necesario tomar medidas correctivas.
II	Baja	Estable, medidas correctivas menores en casos especiales.
III	Moderada	No se debe construir a menos que se mejore las condiciones del sitio.
IV	Alta	Alta probabilidad de deslizamiento en sismos importantes, se ocupan estudios a detalle y medidas correctivas que aseguren la estabilidad.
V	Muy alta	Alta probabilidad de deslizamientos en sismos importantes y lluvias de alta intensidad, se ocupan estudios de detalle y medidas correctivas que aseguren la estabilidad.

2.8 Metodología Hill-Slope Quality Index (HSQI)

La metodología HSQI es una nueva herramienta creada para diseñar taludes de carreteras antes de la construcción de esta, su intención es eliminar o disminuir el potencial de inestabilidad evitando así el disparo de deslizamientos que puedan causar daño a la vía o a los que transitan por ella. Esta metodología fue propuesta y usada por Moreno-Ceballos (2015) en la carretera de Las Palmas cerca de Medellín usando curvas de nivel cada 2 m. Para esto siguió paso a paso la metodología que será explicada en detalle más adelante, los resultados fueron prometedores pues se cumplió con los criterios probabilísticos propuestos.

Posteriormente Moreno-Ceballos(2015) aplica el método HSQI en la Carretera Nacional 25 de Colombia en el sector de La Pintada-La Felisa. En este sector logra determinar las susceptibilidades de distintos tramos de la carretera, las cuales son verificadas comparando con la realidad actual de cada talud en el campo. Por otra parte Ocampo (2016), aplica y evalúa el método HSQI en la Ruta Nacional No.35 de Costa Rica (Sifón-La Abundancia,Alajuela ,Costa Rica) usando información topográfica Lidar, sus resultados muestran que el método HSQI puede determinar la susceptibilidad de taludes de acuerdo con los parámetros geológicos, geomorfológicos y geométricos introducidos.

Moreno-Ceballos (2015) usa como base ecuaciones y metodología propuestas por la Escuela Nacional Superior de Ingeniería de Nancy, obtenidas de Sánchez (1989), para definir al HSQI como un índice de calidad de pendiente, cuyo concepto es similar al clásico factor de seguridad. Los insumos del método HSQI son los siguientes:

Altura de la pendiente (H): Diferencia de elevación entre la superficie de la carretera y un cambio topográfico significativo tanto en la pendiente superior como en la inferior.

Inclinación de la pendiente (i): Inclinación en grados de las laderas o taludes superiores e inferiores

Altura máxima o estabilizada del nivel freático (Hw): Porcentaje de la altura de la pendiente debajo de la superficie del nivel freático, multiplicado por 0,01.

Profundidad de las fracturas (Zo): Diferencia de elevación vertical entre la superficie de la ladera o talud y el punto mas bajo de una grieta en este.

Ángulo de inclinación de la familia principal de discontinuidades (β): Inclinación en grados de la familia mas numerosa de fracturas o de aquella familia que buze desfavorablemente a la estabilidad de una talud o ladera.

Cohesión efectiva (c'): Maxima resistencia tangencial movilizable en un plano cualquiera cuando la tensión efectiva normal en dicho plano es nula (Gonzalez de Vallejo *et al.*, 2004).

Ángulo de fricción efectivo(ϕ'): Representación matemática del coeficiente de rozamiento, el cual es un concepto básico de la física (Diaz, 1998)

Peso específico (γ): Es la relación entre el peso de un material y su volumen (Gonzalez de Vallejo *et al.*, 2002)

El método analiza dos mecanismos de falla: circular y planar. En general las rupturas circulares aparecen en rocas muy meteorizadas, fuertemente fisuradas o propiamente en suelos, mientras que las rupturas planares son típicas de macizos rocosos poco meteorizados o cuando la ruptura es controlada por las discontinuidades del macizo (Moreno-Ceballos, 2015).

El método propone un total de 12 ecuaciones, seis se utilizan en el caso de estudio de un deslizamiento planar y seis en el de un deslizamiento circular (ver Figuras 2.3 y 2.4). De las seis ecuaciones escogidas (según el tipo de deslizamiento) tres dependen de la condición del nivel freático en la sección de estudio y tres de la presencia de fracturas o grietas en la superficie de los taludes o laderas. Estos juegos de tres ecuaciones brindan un valor X (ecuaciones dependientes del nivel freático) y Y (ecuaciones dependientes de fracturas o grietas).

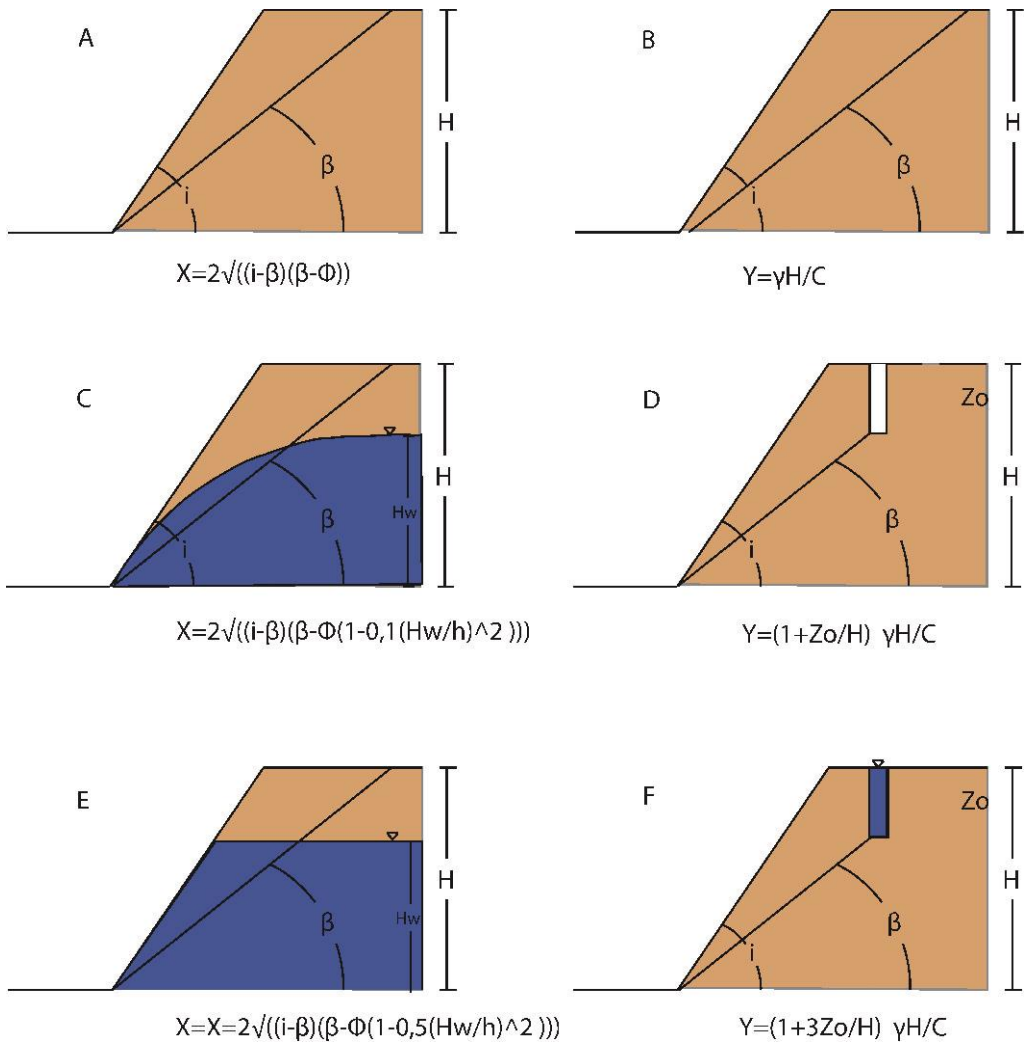


Figura 2.3: Ecuaciones definidas para el análisis de un deslizamiento planar o controlado por estructuras geológicas (modificado de Sánchez ,1989).

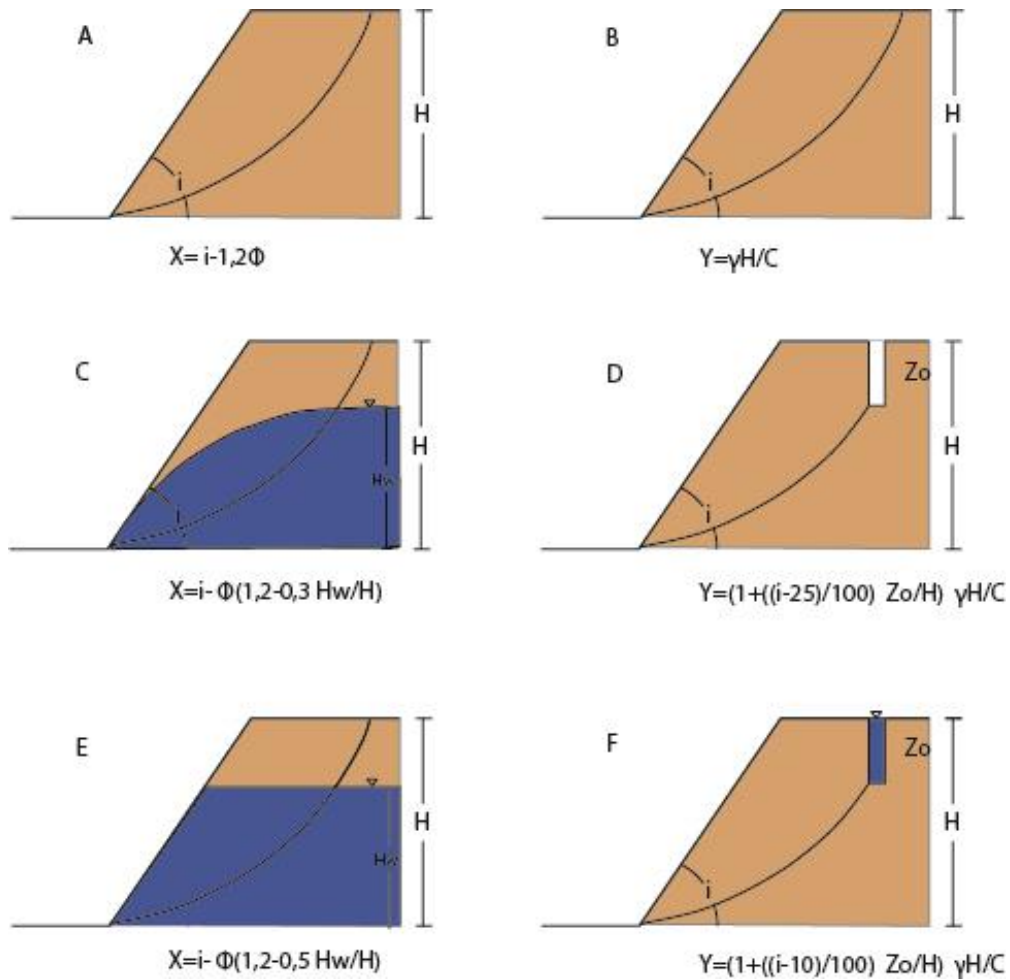


Figura 2.4: Ecuaciones definidas para el análisis de un deslizamiento circular (modificado de Sánchez ,1989).

Bajo el método HSQI un corredor vial propuesto es dividido en diversas secciones (los parámetros de división se explicaran mas adelante). Para aplicar una ecuación en una sección dada, la susodicha sección debe cumplir con el criterio que la define a la ecuación. La tabla 2.6 brinda una lista de las ecuaciones junto al criterio requerido para su aplicación.

Tabla 2.6

Ecuaciones a usar para el cálculo de los factores X y Y según el tipo de deslizamiento y las características que se deben presentar en la sección de estudio para la escogencia de una determinada ecuación.

Ecuaciones para un deslizamiento planar o controlado estructuralmente (estructuras geológicas)	
<p>A) Talud sin nivel freático</p> $x = 2\sqrt{(i - B)(B - \theta)}$	<p>B) Talud sin fracturas</p> $y = \frac{yH}{c}$
<p>C) Talud con nivel freático no aflorante</p> $x = 2\sqrt{(i - B)(B - \theta(1 - 0,1(\frac{Hw}{h})^2))}$	<p>D) Talud con fracturas</p> $y = (\frac{1 + Zo}{H}) \frac{yH}{c}$
<p>E) Talud con nivel freático aflorante</p> $x = 2\sqrt{(i - B)(B - \theta(1 - 0,5(\frac{Hw}{h})^2))}$	<p>F) Talud con fracturas saturadas</p> $y = (\frac{1 + 3Zo}{H}) \frac{yH}{c}$
Ecuaciones para un deslizamiento circular	
<p>A) Talud sin nivel freático</p> $x = i - 1,2\theta$	<p>B) Talud sin fracturas</p> $y = \frac{yH}{c}$
<p>C) Talud con nivel freático no aflorante</p> $x = i - (1,2 - 0,3\frac{Hw}{H})\theta$	<p>D) Talud con fracturas</p> $y = \frac{yH}{c} (1 + (\frac{i + 25}{100}) \frac{Zo}{H})$
<p>E) Talud con nivel freático aflorante</p> $x = i - (1,2 - 0,5\frac{Hw}{H})\theta$	<p>F) Talud con fracturas saturadas</p> $y = \frac{yH}{c} (1 + (\frac{i + 10}{100}) \frac{Zo}{H})$

Una vez obtenido un resultado para cada ecuación (X y Y) se grafican los valores en los ejes correspondientes de los gráficos mostrados en la Figura 2.5. La coordenada resultante define un índice HSQI, ya sea porque interseca una curva o por la interpolación de las curvas vecinas (Moreno-Ceballos, 2015).

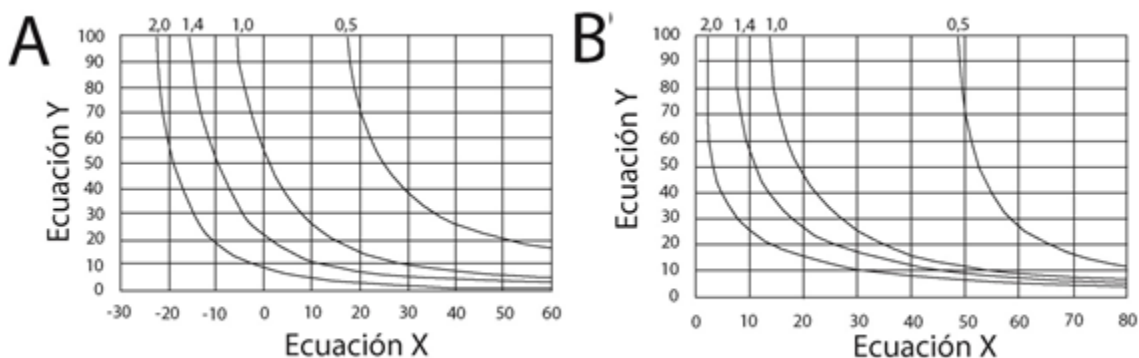


Figura 2.5: Gráficos para el cálculo del valor HSQI, el gráfico A corresponde con deslizamientos circular, mientras que el gráfico B representa deslizamientos planares (Moreno-Ceballos, 2015).

El análisis HSQI se realiza para ambos lados de la vía, cada talud o ladera (izquierda y derecha) presenta una pendiente y altura distintas por lo que el valor de HSQI será diferente para cada uno. Una vez obtenidos ambos valores se seleccionará aquel que sea menor (mayor posibilidad de falla) con el fin de elegir “el peor caso posible”. El valor elegido será el valor representativo de la sección como tal (Moreno-Ceballos, 2015).

El valor HSQI obtenido en una sección de estudio mediante los gráficos (ver Figura 2.5) debe ser clasificado posteriormente según los rangos de valor mostrados en la tabla 2.7. Al finalizar este proceso ya se tendría clasificada la sección según su susceptibilidad, sea esta alta, media o baja.

Tabla 2.7

Clasificación del método HSQI según el valor del índice obtenido

Intervalos y clasificación del HSQI, tomado de Ceballos(2015)	
Valor HSQI	Clasificación de Susceptibilidad
$HSQI \leq 1,0$	Alta
$1,0 < HSQI < 1,4$	Media
$HSQI > 1,4$	Baja

En la Figura 2.6 se aprecia gráficamente la susceptibilidad asignada según la ubicación de la coordenada resultante en los gráficos.

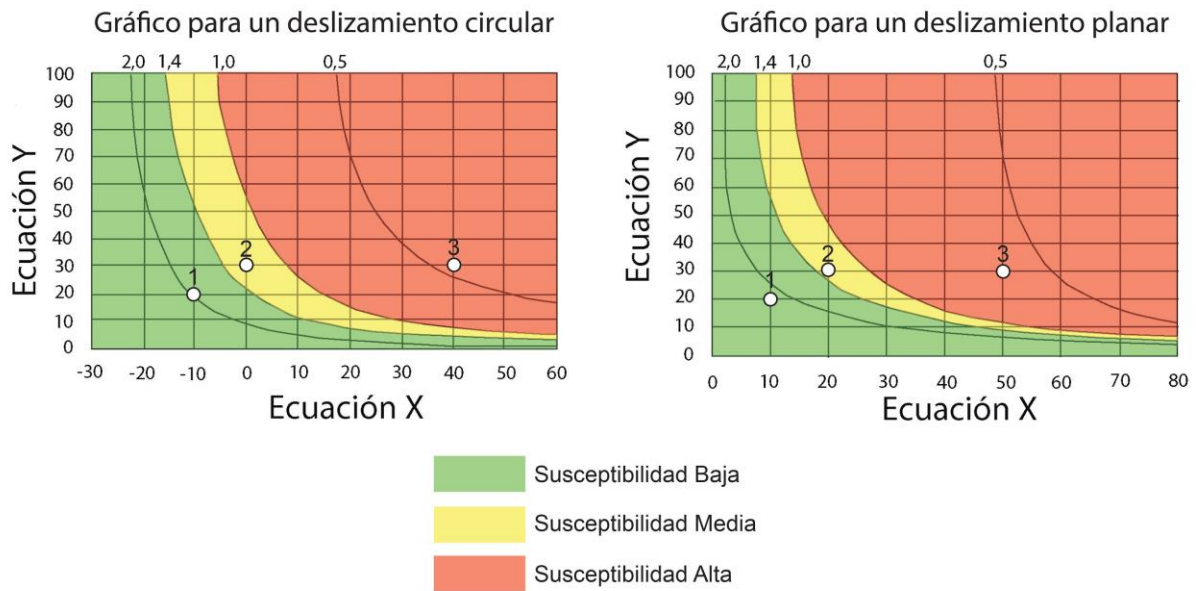


Figura 2.6: Visualización de la susceptibilidad a deslizamiento de acuerdo a la ubicación de la coordenada en los gráficos. Los puntos “1” se encuentran después de la curva de 1,4, por lo que son considerados de baja susceptibilidad. Los puntos “2” están en el intervalo entre 1,0 y 1,4 por lo que se les asigna una susceptibilidad media. Por último los puntos “3” al encontrarse por debajo de la curva de 1,0 son considerados como de mayor susceptibilidad.

Cabe aclarar que las ecuaciones usadas por el HSQI fueron obtenidas de Sánchez (1989), sin embargo, este no es el autor original. Las ecuaciones son originarias de la Escuela Nacional Superior de Ingeniería de Nancy, el artículo donde fueron planteadas o propuestas por primera vez se extravió, por lo que no se cuenta con el autor o documento original. Sin embargo, es una metodología que se ha utilizado en diferentes trabajos de investigación, tal es el caso de Moreno-Ceballos (2015) y Ocampo (2016), con el fin de probar su efectividad en diferentes ambientes y tipos de materiales.

2.9 Receiver Operating Characteristics (Característica Operativa del Receptor, ROC)

El ROC es el análisis con el cual se realizará la determinación de la exactitud del método HSQI, a continuación se explica la teoría del análisis. Su implementación para el presente estudio se explicará en el apartado de metodología.

Un análisis ROC es un método para visualizar y seleccionar clasificadores en base a su desempeño (Fawcett, 2006). Un grafico ROC permite observar el porcentaje de clasificaciones exitosas realizadas por una metodología o proceso particular contra aquellas que fallaron, es decir “*hit rate* vs falsa alarma” (Fawcett, 2006). En la visualización de un determinado clasificador, una instancia (aquel objeto, diagnóstico, número, etc que se esté clasificando) es asignada a una de dos clases: una positiva (P) y una negativa (n). El criterio para asignar cada instancia a P o N varía según el contexto de cada estudio. Esta instancia puede ser o no ser realmente P o N, sin embargo el método al que se le este aplicando un ROC no conoce esta realidad, solo hace una suposición en base a los datos de entrada del método. Para determinar si la asignación fue correcta se introducen otras dos clases, una clase real y una clase hipotética(Y y N). Estas cuatro clases son introducidas en una matriz que genera cuatro casos: PY, PN, nY, nN (Fawcett, 2006), esta matriz se reproduce en la tabla 2.8.

Tabla 2.8.

Combinación de las clases de una análisis ROC en donde una clase verdadero positivo corresponde con casos positivos clasificados como positivos, una clase falso negativo corresponde con casos positivos clasificados como negativos, una clase verdadero negativo corresponde con casos negativos clasificados como negativos y una clase falso positivo corresponde con casos negativos clasificados como positivos.

	Clase Real		
		P	n
Clase Hipotética	Y	Verdadero Positivo	Falso Positivo
	N	Falso Negativo	Verdadero Negativo

Una clase PY y nN representan una clasificación exitosa, mientras que PN y nY son errores en las clasificaciones de P y n. De esta combinación de clases se calculan dos factores, el factor TPR (true positive rate) y el factor FPR (false positive rate) usando las ecuación 18 y 19, respectivamente.

$$TPR = \frac{\text{Verdaderos Positivos}}{\text{Verdadero Positivo} + \text{Falso Negativo}},$$

Ecuación 18

$$FPR = \frac{\text{Falso Positivo}}{\text{Falso Positivo} + \text{Verdadero Negativo}},$$

Ecuación 19

El valor TPR es plotado en una gráfica bi-axial (ver Figura 2.7) en el que se visualiza el desempeño del clasificador en estudio.

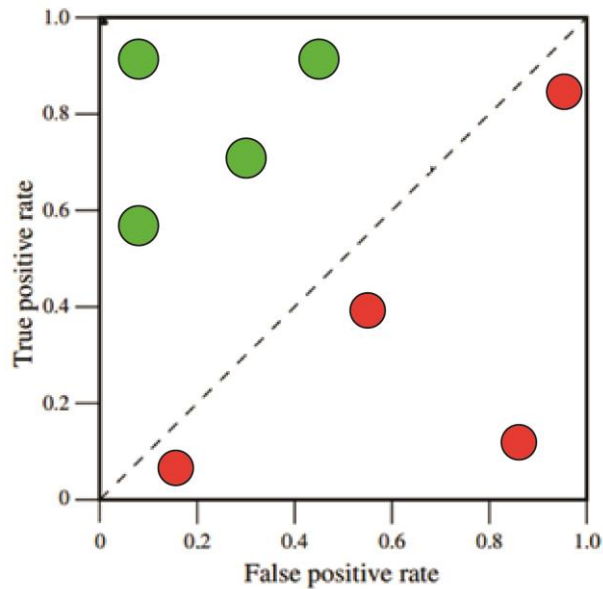


Figura 2.7: Una gráfica ROC mostrando cinco clasificadores. Modificado de (Fawcett, 2006).

El punto (0,1) en el gráfico ROC, representa una clasificación perfecta pues representa una totalidad de casos positivos clasificados correctamente con ningún caso positivo clasificado incorrectamente, por lo que a manera generalizada se puede decir que los mejores resultados serán cercanos a el punto (0,1) (Fawcett, 2006).

Capítulo 3: Metodología

Los insumos que se utilizan en la aplicación del método HSQI deben obtenerse de distintos tipos de análisis: geomorfológicos para obtener la geometría de un talud, geológicos para conocer las distintas litologías aflorantes, geotécnicos para calcular las propiedades mecánicas de los suelos y finalmente estadísticos para medir el desempeño del método. En este capítulo se hace una explicación de los distintos procedimientos y etapas llevadas a cabo durante la ejecución de este proyecto. En la Figura 3.1 se puede visualizar un diagrama de flujo de las diferentes actividades que conformaron este trabajo.

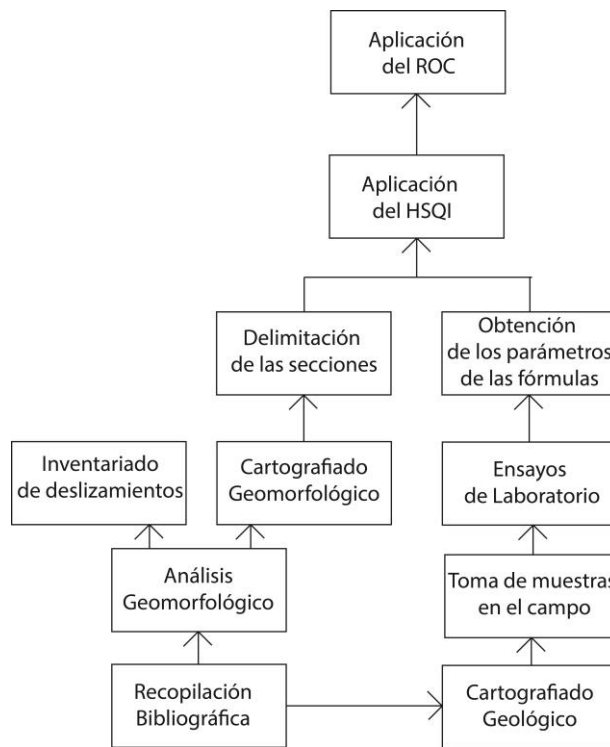


Figura 3.1: Diagrama de flujo del proceso por el cual se llevó a cabo este trabajo.

3.1 Recopilación bibliográfica

La recopilación bibliográfica se llevó a cabo con la revisión de distintos artículos científicos, artículos de prensa, libros e informes técnicos. La información recolectada correspondió a la geomorfología y geología regionales, fechas y duración de algunos cierres en la carretera producto de deslizamientos,

metodologías usadas por la geotecnia y geología para la estimación de la estabilidad de una ladera y costos de mantenimiento en el tramo estudiado.

3.2 Análisis geomorfológico de las secciones a trabajar

Para la correcta aplicación del método se determinó las unidades geomorfológicas de la zona de estudio, las cuales se usaron para dividir la carretera en diferentes secciones a las cuales se les calculó un valor HSQI. El análisis geomorfológico se concentró en el área que cuenta con información Lidar, puesto que un análisis más extenso no afecta o beneficia al HSQI.

Con el fin de crear de un mapa geomorfológico este análisis clasificó el área de estudio en diferentes unidades geomorfológicas al analizar la pendiente, patrón de drenaje y topografía existentes. El análisis se realizó únicamente con el empleo de fotografías aéreas, imágenes satelitales y modelos de elevación digital realizados con topografía Lidar, se puede ver un ejemplo de estos en la Figura 3.2.

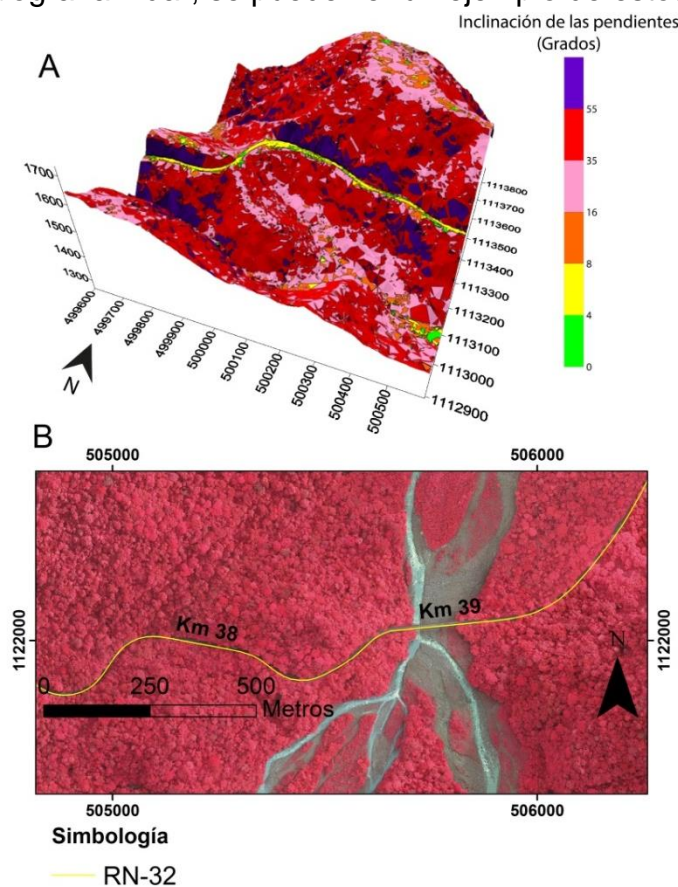


Figura 3.2: (A): Ejemplo de los modelos de elevación digital que se usaron para obtener la geometría de los taludes, en este caso, un modelo de las pendientes del estacionamiento No.21 de la ruta. (B) Fotografía aérea en color falso que ayudó a la búsqueda de deslizamientos e identificación de unidades geomorfológicas.

3.3 Identificación de deslizamientos con imágenes Lidar

Con el uso de imágenes Lidar y ortofotografías se logró visualizar las distintas zonas en las cuales se ha presentado un deslizamiento o un desprendimiento de material. Para identificar estas zonas se observaron las distintas evidencias que deja un evento de remoción de masa, en este caso lo más evidente es una disminución en la densidad y tupidez de la vegetación ó una completa ausencia de esta (ver Figura 3.3). Esto se debe a que una vez que el suelo sobre el cual la vegetación se erguía es deslizado, se requiere de tiempo para que una nueva capa vegetal cubra la zona afectada. Este proceso, el cual puede durar años, crea un contraste entre las zonas que han o no han presentado un deslizamiento.

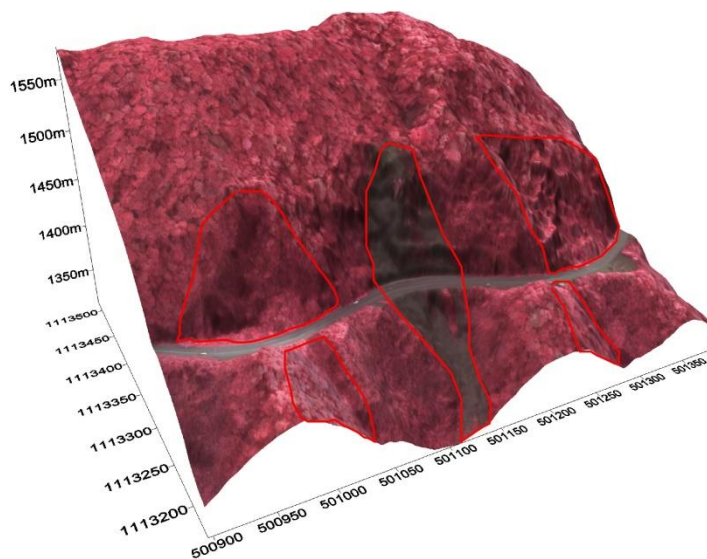


Figura 3.3: Modelo tridimensional de un talud en el estacionamiento 22 de la RN-32. Este estacionamiento experimentó un deslizamiento reciente (en relación a la fecha de toma de las fotografías, la cual fue anterior al 2014). La vegetación es mostrada en color rojo para visualizar de mejor manera zonas con nula o poca capa vegetal. El polígono rojo demarca la zona sin vegetación y por ende, un deslizamiento.

De no apreciarse un cambio en la cubierta vegetal se puede visualizar la topografía del suelo mediante tecnología Lidar, esta permite remover digitalmente la capa vegetal en favor de visualizar la superficie del talud o ladera. El proceso hace posible observar las distintas coronas o depresiones remanentes de un deslizamiento o caída de material, lo cual indica que en el pasado hubo un movimiento de masa (ver Figura 3.4).

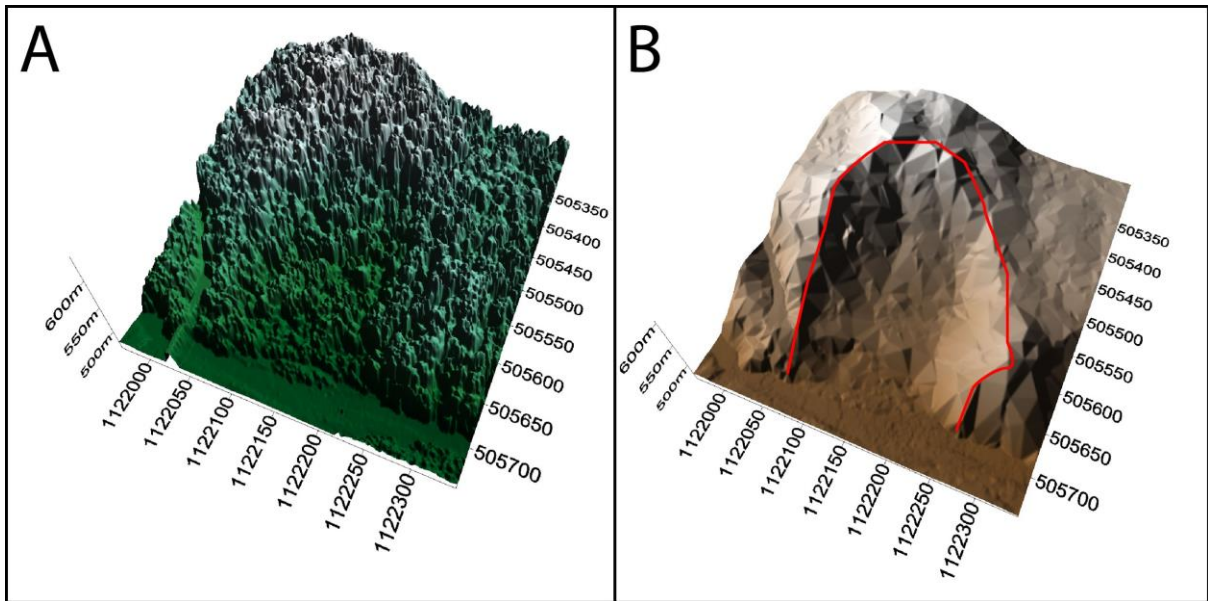


Figura 3.4: Comparación de una ladera cerca del puente sobre el río Sucio. (A): Ladera vista con los datos Lidar que incluyen la vegetación de la zona. (B): Misma zona visualizada con un Lidar sin vegetación, en esta es posible ver la depresión remanente de un deslizamiento y su respectiva corona (señalada con rojo).

Este proceso se empleó en los 34 km lineales que conforman la sección a estudiar y en las zonas alejadas de la carretera, pues deslizamientos en estas zonas podrían afectar de manera directa o indirecta a la carretera.

3.4 Cartografiado geológico

El conocimiento de las litologías que afloran en el área de estudio y como tal, su cartografiado, permitió la determinación de la longitud de las secciones en las que se dividió la carretera y ofreció un guía para el muestro de materiales. Fue necesario realizar trabajo de campo que consistió en cartografiar a escala 1:2000 los taludes del tramo montañoso. Como se mencionó anteriormente debido a la verticalidad de los taludes y a la densa vegetación (ver Figura 3.5) no fue posible describir o muestrear la totalidad de estos, por lo que el cartografiado se hizo considerando la o las litologías observables y posibles de muestrear como las presentes en la totalidad del talud.



Figura 3.5: Ejemplo de los deslizamientos y afloramientos encontrados en la zona. En la foto se puede apreciar la gran cantidad de vegetación presente en los taludes. Por ser un parque nacional la única forma de acceder a la roca y/o suelo es que estos sean expuestos naturalmente mediante un deslizamiento u otro evento de remoción de masa. En rojo el material expuesto.

3.5 Obtención de muestras de suelo y roca

Como se ha mencionado anteriormente el método HSQI divide una carretera en secciones según sus características. Para cada una de estas secciones se calcula un índice HSQI, por consiguiente, sería ideal contar con una muestra de suelo por cada sección, no obstante, la gran cantidad de secciones (y por lo tanto de muestras) incrementarían en gran medida el tiempo de ejecución de este proyecto. Sumado a lo anterior está la naturaleza de los taludes, los cuales, con su verticalidad y vegetación reducen los lugares de los que se pueden obtener muestras. Con la finalidad de tener parámetros representativos de los materiales generados por cada unidad se obtuvieron muestras por unidad geológica y no por sección. En cada punto de muestreo se obtuvo, de ser posible, una muestra de suelo inalterado y una de suelo alterado para ensayos triaxiales (o corte directo) y clasificación en el sistema unificado de clasificación de suelos (SUCS) respectivamente.

Hay ciertos lugares en la ruta donde el material expuesto no es suelo (o regolito) sino roca con muy poco o nada de material sobreyaciendola. El problema de estos macizos consiste en que al no haber material granular moldeable, los ensayos triaxiales y de corte directo no se pueden realizar, sin embargo, esto se remedió ajustando mediante los criterios Mohr-Coulomb un valor teórico para estos dos parámetros. Estos valores teóricos fueron usados en las secciones con macizos.

3.6 Definición de las secciones de estudio

Para realizar el análisis HSQI es necesario dividir la carretera en secciones que cuenten con un ancho (perpendicular a la carretera) y una longitud (paralelo a la carretera) determinados. El ancho de las secciones se verá definido como la sumatoria de las distancias D_u , B y D_d (ver Figura 3.6).

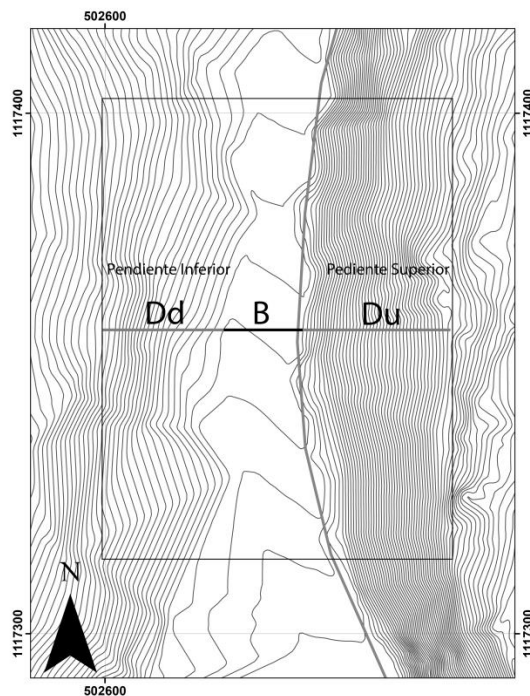


Figura 3.6: Vista en planta de las distancias a ser consideradas para definir una zona de estudio, cuyo ancho está definido por la sumatoria de las distancias D_u , B y D_d (Modificado de Moreno-Ceballos (2015)).

Según Moreno-Ceballos (2015) la longitud de cada una de estas 3 distancias está dada por la topografía de las laderas, donde D_u es la distancia pendiente arriba hasta un cambio topográfico significativo, B es la distancia de la carretera propuesta junto con sus taludes y D_d es la distancia pendiente abajo hasta un cambio topográfico significativo (ver Figura 3.7).

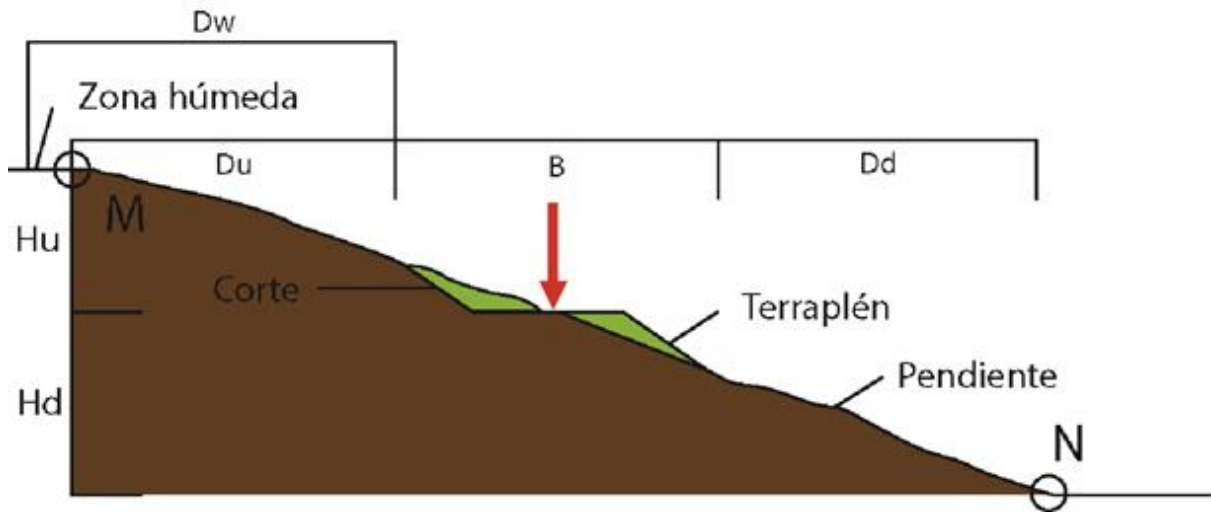


Figura 3.7: Vista en perfil de las distancias a ser consideradas al definir el ancho de una sección de estudio, la flecha roja indica la posición de la carretera (Modificado de Moreno-Ceballos, 2015).

Para determinar la longitud de las secciones se requiere conocer de la geología, geomorfología y drenaje a lo largo de la carretera, ya que una sección solo puede contener una sola unidad de cada una.

Para definir el drenaje se estudia la relación de las curvas de nivel con respecto a la carretera, de ser las curvas convexas hacia la carretera se definirá un flujo divergente de agua, al ser cóncavas hacia la carretera un flujo convergente debe ser definido y de ser las curvas paralelas en relación con el eje de la carretera se asumirá un flujo paralelo (Moreno-Ceballos, 2015). No puede existir una sección que contenga dentro de sí misma dos tipos de flujos distintos, por ejemplo, una sección debe presentar flujo paralelo, flujo divergente o flujo convergente pero no puede presentar flujo paralelo y convergente al mismo tiempo o alguna otra combinación de estos (Moreno-Ceballos, 2015) (ver Figura 3.8).

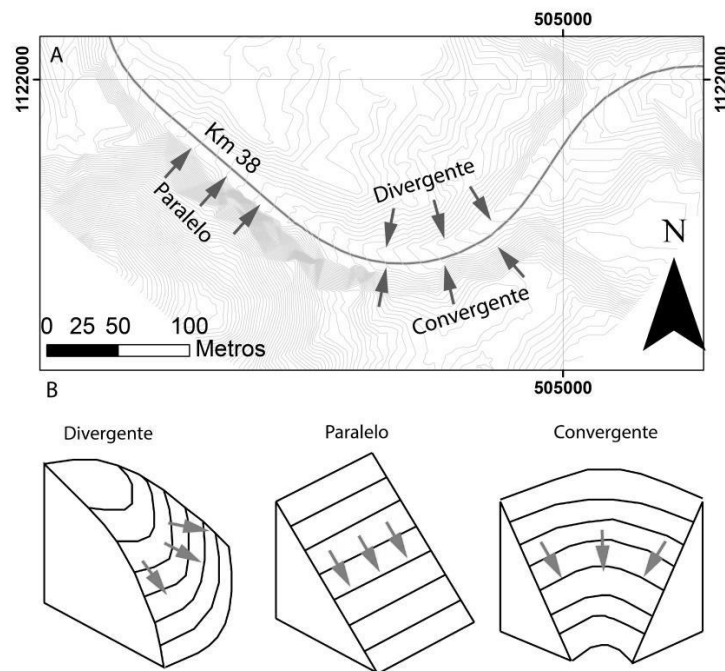


Figura 3.8: Definición de las condiciones de flujo superficiales según su relación con la carretera. (A) muestra cómo se vería cada condición en una vista de planta y en relación a la carretera. (B) ilustra cada una de las condiciones en un bloque de diagrama, esta imagen fue modificada de Sidle y Ochiai (2006).

La razón de esta división en base al drenaje la explican Sidle y Ochiai (2006) en su libro “Landslides: Processes, Prediction and Land Use” en el cual mencionan cómo las diferentes topografías tienen una influencia en la distribución o concentración del agua superficial y subterránea. Sidle y Ochiai (2006) mencionan que una pendiente clasificada como divergente tenderá a dispersar el agua disminuyendo así la presión de poro en el suelo y, por lo tanto, la susceptibilidad a deslizamiento. Una pendiente convergente, al contrario, concentrará los flujos de agua por lo que la presión de poro será mayor que en otros tipos de pendientes y en caso de una precipitación el aumento de este parámetro será de mayor velocidad. Por último la pendiente paralela será de una susceptibilidad intermedia.

Cada litología puede generar materiales o suelos residuales con distintas características mecánicas, por consiguiente, una sección solo debe contener una litología, de lo contrario, se puede incurrir en cálculos erróneos del valor HSQI en una sección en específico. En la Figura 3.9 se observa cómo se definieron las secciones en distintos tipos de escenarios.

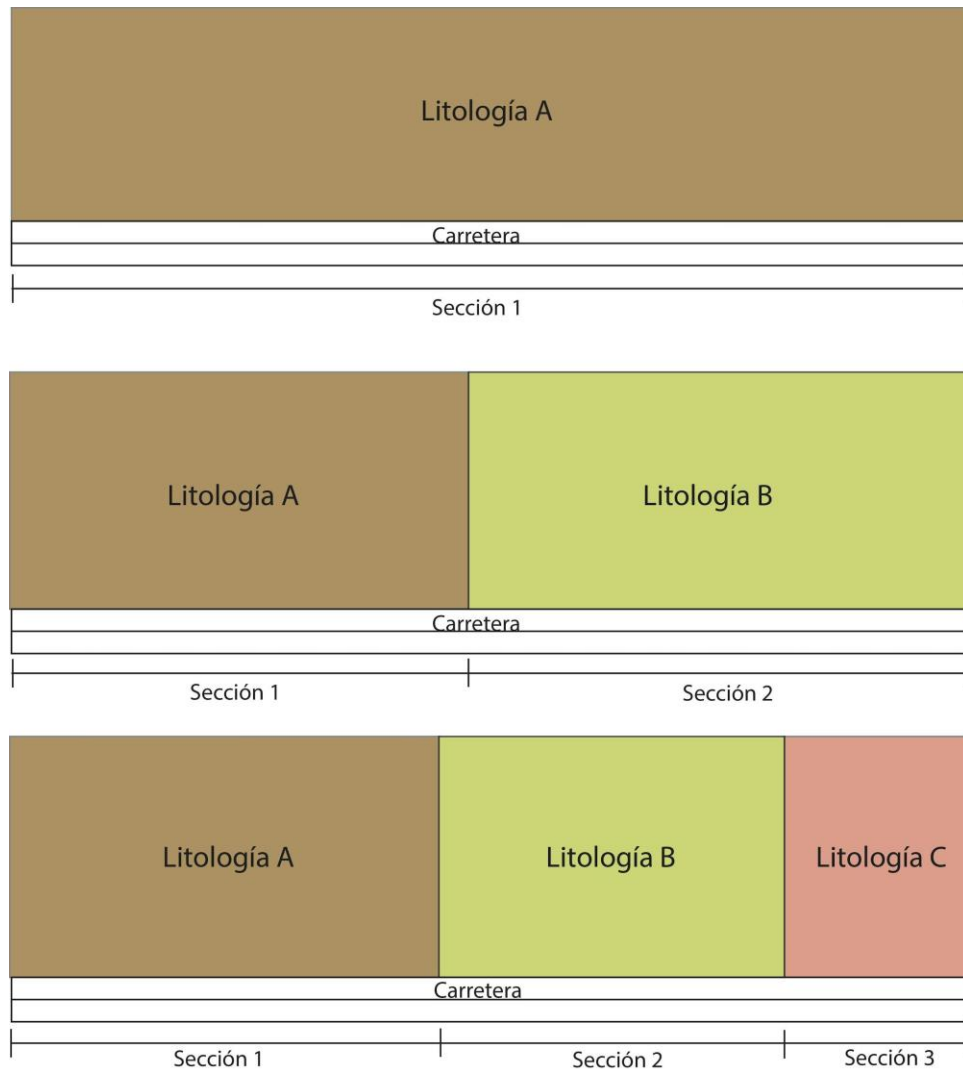


Figura 3.9: Definición de la longitud de las secciones en base a la litología, como se puede apreciar no hay una longitud estándar si no que esta está sujeta a la longitud que presenta cada litología a lo largo de la carretera.

La definición de las secciones en base a las unidades geomorfológicas se hará de la misma manera que las unidades geológicas, donde cada sección debe contener no más de una unidad geomorfológica. Una vez integrando los criterios geológicos, geomorfológicos y el drenaje se podrá realizar una definición de secciones integrada como se aprecia en la Figura 3.10.

El tramo de estudio comienza aproximadamente en el estacionamiento 14+000 de la RN-32 y finaliza cerca del estacionamiento 49+000, por lo que el área de estudio cuenta con una longitud aproximada de 35 km. Con la limitación máxima de 250 m y los criterios geológicos, geomorfológicos y el drenaje se analizaron un total de 212 secciones.

3.7 Ensayos de laboratorio

Como se explicó anteriormente, la metodología Hill-Slope Quality Index requiere conocer los parámetros de peso unitario, cohesión y ángulo de fricción de un material. Es por esto que a las muestras de suelo obtenidas se les realizó los ensayos de clasificación de suelos según el SUCS y ensayos triaxiales o de corte directo. A los núcleos de roca obtenidos de los macizos rocosos se les hizo pruebas de planicidad, perpendicularidad y paralelismo con el fin de fallarlos en una máquina de compresión inconfiada y obtener así el valor de resistencia a la compresión uniaxial.

El laboratorio de geotecnia del LanammeUCR usa para sus ensayos los procedimientos establecidos por la American Society for Testing and Materials (ASTM). Los ensayos usados en el proyecto se indican en la tabla 3.1.

Tabla 3.1
 Procedimientos usados para el ensayo de los materiales.

Código del ensayo	Descripción
ASTM D 422	Análisis de tamaño de partículas de suelo (vía húmeda).
ASTM D 2216	Determinación del contenido de humedad de suelos y rocas.
ASTM D 854	Determinación de la gravedad específica del suelo mediante un picnómetro con agua
ASTM D 4318	Determinación del límite líquido, límite plástico e índice de plasticidad de un suelo.
ASTM D 6913	Análisis de tamaño de partículas de suelo (utilizando tamices).
ASTM D 1140	Determinación de la cantidad de material más fino que el tamiz N° 200 en suelos mediante lavado.
ASTM D 2487	Clasificación de suelos (Sistema Unificado de Clasificación de Suelos).
ASTM D 3080	Procedimiento para la prueba de corte directo bajo condiciones drenadas y consolidadas
ASTM D 2216	Procedimiento para determinar el contenido de humedad de suelos y rocas
ASTM D 4543	Prácticas normalizadas para la preparación de núcleos de roca y determinación de las tolerancias dimensionales y formas
ASTM D 7012	Método de ensayo normalizado para la resistencia de compresión y modulo de elasticidad de especímenes de núcleos de roca intactos bajo estados de esfuerzo y temperatura variables (método C)
ASTM D 4767	Método estándar para la prueba consolidada no drenada de compresión triaxial para suelos cohesivos. (Ensayo CU) Multietapas.

3.8 Aplicación del método HSQI

En el Marco Teórico se explicó la teoría detrás del método HSQI, en este apartado se explicará cómo se procedió a aplicar el método y si se tuvieron que hacer salvedades en la metodología que no hayan sido ya explicadas.

La topografía de la zona es altamente heterogénea y puede cambiar abruptamente en cuestión de pocos metros, esto conllevó a un problema a la hora de definir parámetros geométricos para las ecuaciones pues una sola sección puede presentar variaciones de hasta 30° en los ángulos de las pendientes o decenas de metros en las alturas de estas. Una opción fue dividir la sección hasta que la variación de estos parámetros fuera insignificante, sin embargo, la cantidad de secciones resultantes volvía extremadamente laborioso el cálculo de los índices HSQI. Para solventar el problema en cada sección se realizaron varias mediciones de ángulos y alturas (según la longitud y heterogeneidad de la sección) para obtener un valor promedio y así realizar los cálculos (ver Figura 3.12).

Sección No.21

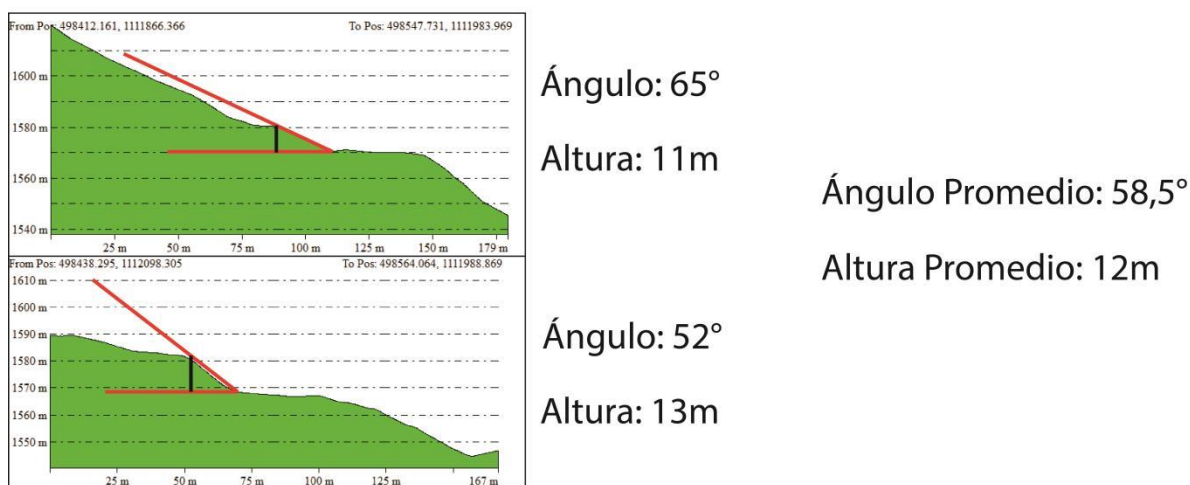


Figura 3.12. Promedio de ángulos y alturas de la sección No.21 del estudio. Vemos como en esta sección la variación no es muy grande, aún así hay secciones donde la diferencia de medidas a lo largo de la sección pueden variar en el orden de decenas de grados y metros.

El parámetro del nivel freático (H_w) resultó ser el de mayor debate pues ya que una medición en campo es extremadamente difícil de obtener por las altas pendientes y alturas de las laderas y el amplio tráfico que transita por la carretera. Esto llevó a la necesidad de asumir un valor H_w para introducir a las ecuaciones. El método HSQI define un valor de 0,6 (60% de la altura de la pendiente) como un valor estimado para este parámetro, sin embargo, dadas las condiciones de la

zona (alta precipitación) y el conocimiento de la variabilidad de un nivel freático por factores climáticos (temporada seca y lluviosa) usar un solo valor de 0,6 no representa de mejor manera la realidad.

Ocampo (2016) al aplicar el método HSQI estimó un valor h ($\frac{H_w}{H}$) para diversas zonas basadas en sus niveles de precipitación (desde zonas secas hasta zonas tropicales). Para esto consultó el método Mora-Vahrson (1993) y más específicamente su factor Sh (humedad del suelo) el cual analiza los niveles de precipitación de una zona en particular durante todo un año y asigna una categoría (1-5) en base a estos. Después de un análisis matemático Ocampo (2016) produjo un gráfico que permite relacionar el valor Sh de Mora-Vahrson (1993) con el valor h (ver Figura 3.12).

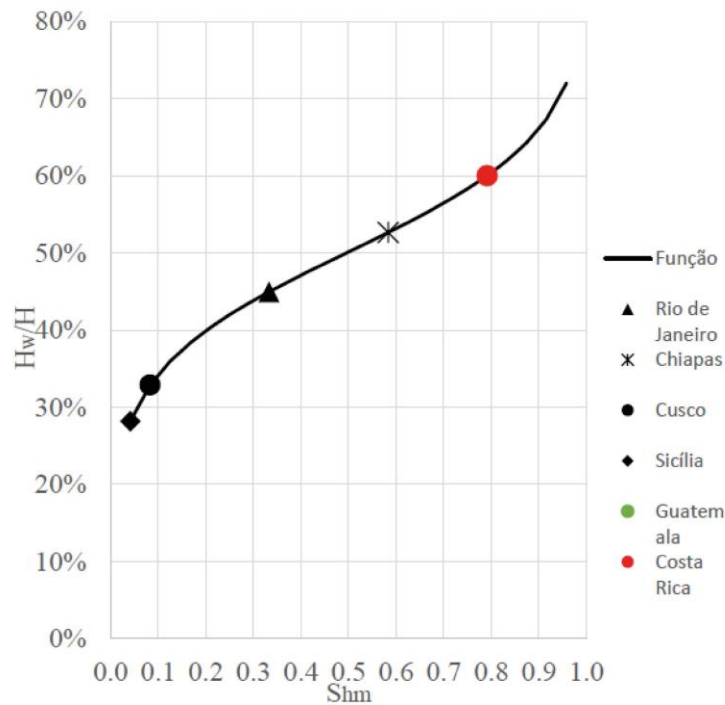


Figura 312: Gráfico que muestra la relación h con el parámetro Sh_m ($\frac{Sh}{24}$) para varias zonas de distinta precipitación. El caso de Costa Rica muestra un valor recomendado de 0,6, obtenido de Ocampo (2016).

Ocampo (2016) también tabuló una serie de valores sugeridos para h en relación a la sumatoria del parámetro Sh de Mora-Vahrson (1993) (ver tabla 3.2).

Tabla 3.2

Variación del valor h en relación a la precipitación media mensual obtenida de la metodología Mora-Vahrson (1993). Modificado de Ocampo (2016).

Sumatoria de precipitación media mensual	Sh	Shm	h	h promedio
1	1	0,042	28%	34,00%
2		0,083	33%	
3		0,125	36%	
4		0,167	38%	
5	2	0,208	40%	43,00%
6		0,25	42%	
7		0,292	44%	
8		0,333	45%	
9		0,375	46%	
10	3	0,417	48%	50,00%
11		0,458	49%	
12		0,5	50%	
13		0,542	51%	
14		0,583	53%	
15	4	0,625	54%	57,00%
16		0,667	55%	
17		0,708	57%	
18		0,75	58%	
19		0,792	60%	
20	5	0,833	62%	66,00%
21		0,875	64%	
22		0,917	67%	
23		0,958	72%	
24		1	100%	

Cómo Ocampo (2016) demostró con esta relación es posible estimar un valor de h midiendo la precipitación mensual de un área. Con esta información se contemplaron dos caminos a seguir: medir la precipitación mensual del área de este trabajo y usar el valor h correspondiente o variar el valor Hw (entre los valores h dados en la tabla 3.2) y hacer un cálculo HSQI con cada valor. Considerando que un nivel freático varía según la época del año, la geología de la zona, la extracción de aguas subterráneas que se de en los alrededores, etc, se tomó la decisión de calcular un valor HSQI para valores de Hw de 0,30 a 0,70 (cada 0,10) debido a la variación de h que da Ocampo de 0,34 a 0,66, además, esto permitió visualizar completamente la afectación del nivel freático en las fórmulas y lograr estimar un peor caso posible. Otras técnicas indirectas para medir o estimar el nivel freático como geofísica o información de pozos no se usaron.

3.9 Cálculo de la exactitud del método mediante un análisis Receiver Operating Characteristics (ROC)

En el capítulo del marco teórico se explicó la teoría detrás de un análisis ROC, aquí se explica cómo se aplicó este tipo de análisis (en cada una de las diferentes secciones de estudio) para determinar la exactitud del método HSQI.

Primeramente se definió que es lo que las distintas clases (verdadero, falso, positivo, negativo) representan. Debido a que las clases positivas y negativas representan según el método ROC la realidad se les asignó la evidencia de inestabilidad en los taludes visibles en el campo. Por consiguiente, las clases verdaderas y falsas son clases hipotéticas, estas representan la susceptibilidad obtenida por el método HSQI, las clases resultantes y lo que representan se listan en la tabla 3.3.

Tabla 3.3

Clases ROC y los criterios asignados a estas.

Clase	Criterio
Verdadero	Clasificación de susceptibilidad alta dada por el método HSQI.
Falso	Clasificación de susceptibilidad baja dada por el método HSQI.
Positivo	Identificación de evidencias de inestabilidad.
Negativo	Ninguna evidencia de inestabilidad identificada.

Este análisis por sección se hizo comparando las clases reales con las hipotéticas, por ejemplo, si una sección fue clasificada como de alta susceptibilidad (verdadera) y en el campo o en el inventario de deslizamientos se evidencia inestabilidad (positivo), se denomina a la sección como un verdadero positivo, lo cual se traduce como que el método logró medir con buena exactitud la susceptibilidad de la sección. Es por esta filosofía que se escogió un análisis ROC, puesto que, se podrá ver la relación que tuvo la clasificación con el método (clase hipotética) con la realidad en el campo (clase real). En la tabla 3.4 podemos ver como quedarían las clases resultantes adaptadas a la realidad de este trabajo.

Tabla 3.4

Combinación de las clases del análisis ROC adaptadas a la determinación de la eficiencia del método HSQI.

	Clase Real		
Clase Hipotética		P(evidencia de inestabilidad)	N(no hay evidencia de inestabilidad)
	V(Susceptibilidad alta según HSQI)	Verdadero Positivo	Falso Positivo
	F(Susceptibilidad baja según HSQI)	Falso Negativo	Verdadero Negativo

Como se mencionó en el marco teórico una vez obtenidas las razones TPR y FPR (ecuaciones 18 y 19) se procedió a plotearlas en un gráfico ROC. Este análisis se realizó al final del trabajo cuando todas las secciones fueron clasificadas por el método HSQI.

Capítulo 4: Geomorfología

El colocar una carretera en un medio geológico siempre cambiante como lo son los cerros del Zurquí, conlleva, una necesidad de conocer las geoformas generadas tanto por la meteorización como por la erosión, y como estas pueden afectar el funcionamiento de una vía. En esta tarea es donde el uso de las imágenes Lidar mejoró el detalle con el que las distintas morfologías pudieron ser identificadas, además, aumentó la precisión con las que estas mismas fueron cartografiadas. Algunas de estas morfologías fueron los deslizamientos a lo largo de la RN-32, su tamaño variable hizo necesario el empleo del Lidar, puesto que, con otras resoluciones habría sido imposible visualizar deslizamientos de tamaño métrico. El uso de ortofotografías permitió observar zonas con vegetación joven, lo cual, indica una previa remoción de la cubierta vegetal por causa de una caída de material.

Para este análisis geomorfológico se realizó un análisis de las pendientes de la zona, un cartografiado de las unidades geomorfológicas y un inventario de deslizamientos. A continuación se detalla cada insumo generado.

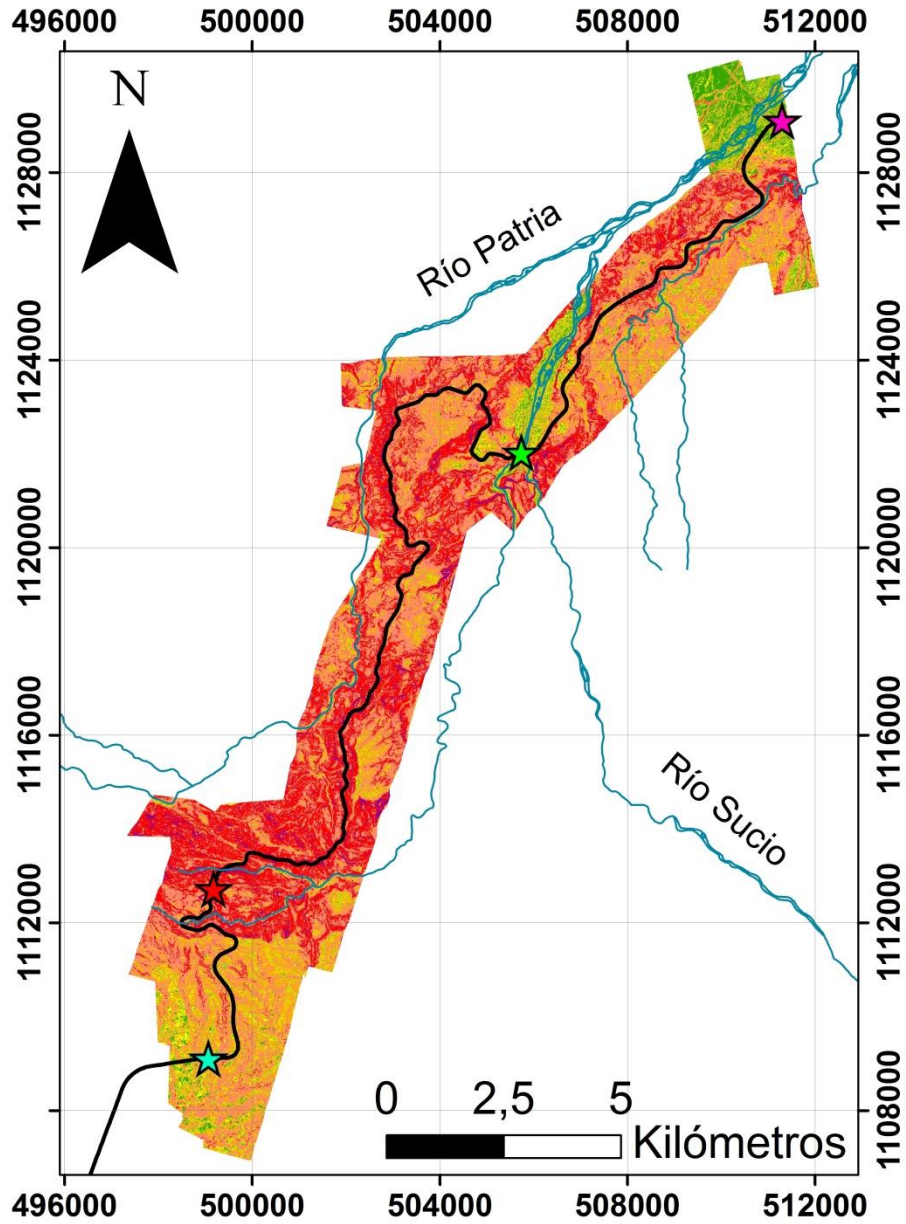
4.1 Análisis de pendientes

El motivo de este análisis de pendientes es determinar el grado de inclinación de las distintas laderas de la zona y usar este dato para analizar los diferentes procesos geológicos y meteorológicos que han moldeado el área. Los ángulos de las pendientes (0° - 90°) fueron clasificadas usando los rangos planteados en la metodología Mora-Vahrson-Mora (1992) los cuales se resumen en la tabla 4.1.

Tabla 4.1
Intervalos para clasificación de pendientes según Mora et al. (1992).

Pendiente($^{\circ}$)	Clasificación
0-4	Pendiente muy baja
4-8	Pendiente baja
8-16	Pendiente moderada
16-35	Pendiente fuerte
35-55	Pendiente muy fuerte
>55	Pendiente Extremadamente fuerte

El área está cubierta mayoritariamente por pendientes superiores a 16° (ver Figura 4.1) y como es de esperarse en una zona tan montañosa las pendientes son muy fuertes, pues, gran parte de esta supera los 35° de inclinación. Esta inclinación tan fuerte se da principalmente en las inmediaciones del túnel Zurquí donde coincide con las elevaciones más altas del área, con una disectación importante y con la zona de mayor densidad de deslizamientos del tramo estudiado.



Simbología

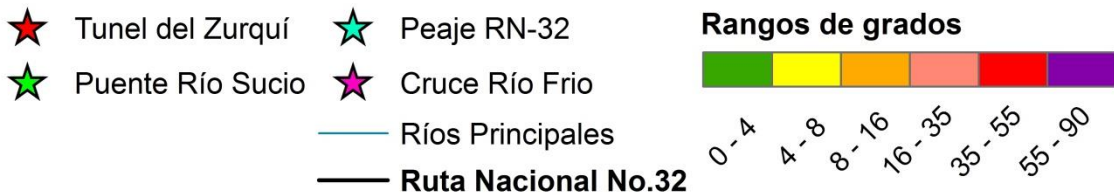


Figura 4.1: Mapa de pendientes generado para la zona de estudio. La zona cercana al túnel del Zurquí es la de mayor altitud del área de estudio y a la vez una de las dominadas por pendientes de clasificación muy fuerte. Se puede observar como justo antes de que el área montañosa empiece (inmediaciones del peaje) y después de que esta termine (cruce de Río Frio) las pendientes medias y bajas predominan.

Las zonas de pendientes medias y bajas son pocas, estas se encuentran principalmente en los extremos del área, en el extremo sur aparecen antes del comienzo de la zona montañosa, aunque, también son acompañadas por un pequeño porcentaje de pendientes fuertes. El río Sucio y el extremo norte del área que corresponde con un abanico aluvial son las zonas de pendientes baja más uniformes de toda la región, dentro de estas la mayoría del área está asociadas con pendientes bajas y muy bajas.

Para poder comprender mejor el comportamiento de las pendientes en el área se hizo un análisis de extensión superficial de las distintas clasificaciones de pendientes. Para simplificar esto se agruparon los rangos de pendientes dados por el método Mora-Vahrson-Mora (1992) en tres intervalos: pendientes bajas y moderadas (4° - 16°), pendientes altas (16° - 35°) y pendientes muy altas ($>35^{\circ}$). En la tabla 4.2 se observan los resultados de este análisis.

Tabla 4.2

Categoría	Extensión Superficial (km²)	Porcentaje del área total (%)
Bajas y moderadas pendientes	13,41	17,72
Pendientes altas	31,36	41,48
Pendientes muy altas	30,85	40,80

Según los resultados las pendientes bajas y moderadas representan la minoría del área, estas están formadas por las unidades geomorfológicas fluviales y las montañas y colinas de baja y moderada pendiente. Las pendientes altas y muy altas formadas por las unidades denudacionales “montañas y colinas” se encuentran muy parecidas en su extensión superficial, la única diferencia corresponde a 0,7% en favor de las pendientes altas.

4.2 Geomorfología regional

La geomorfología depende de la escala a la que se esté trabajando, en escalas pequeñas se puede describir terrazas aluviales, barras laterales, levees en coladas de lava, etc; sin embargo, a escalas más grandes estas formas se vuelven difíciles de visualizar y son las formas más grandes las que se vuelven descriptibles (por ejemplo: volcanes, cuencas, valles, sistemas montañosos). A continuación se describen las formas regionales que tienen una influencia directa sobre el área de estudio, su ubicación en relación a esta se puede ver en la Figura 4.2.

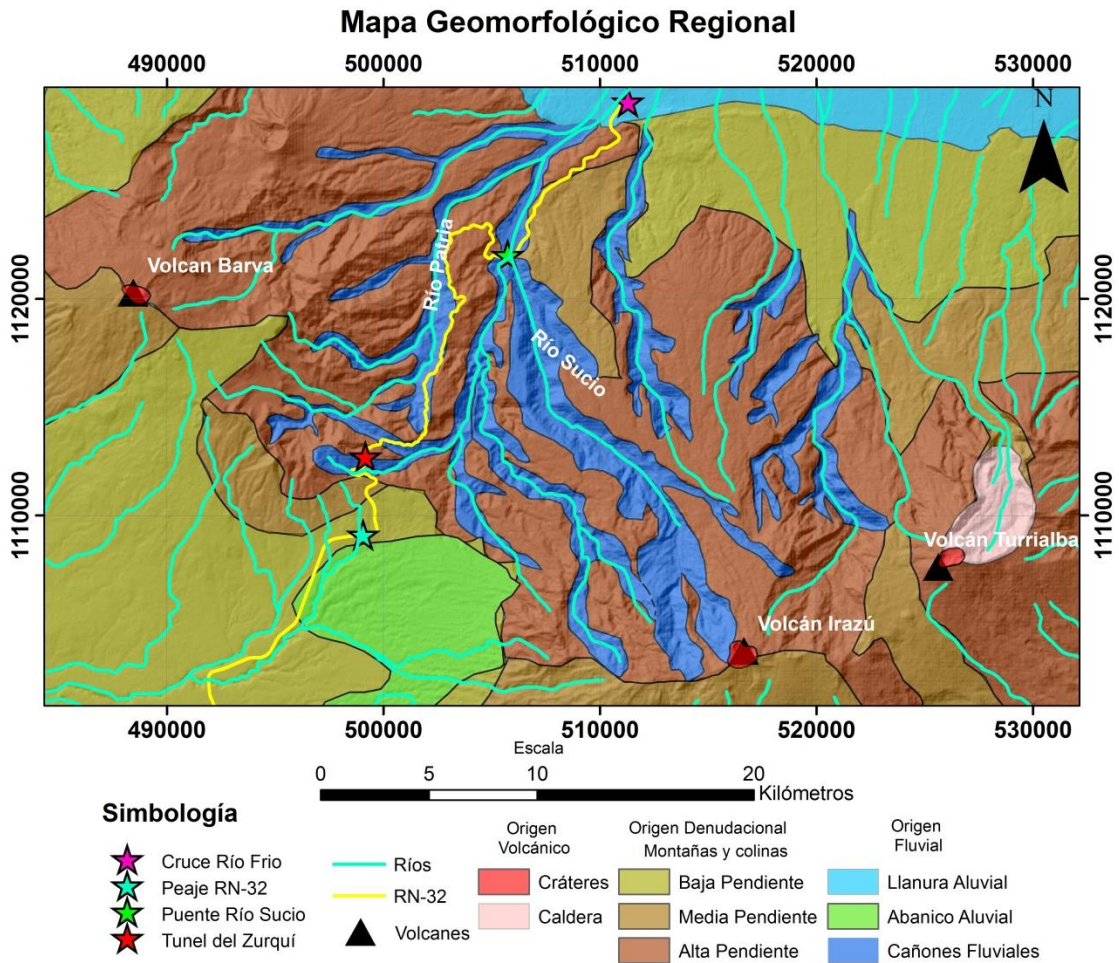


Figura 4.2: Ubicación del volcán Barva e Irazú con respecto al área de estudio, se puede observar como los ríos provenientes de estos edificios volcánicos afectan directamente el zona.

4.2.1 Volcán Irazú

Alvarado (1989) en su libro “Los volcanes de Costa Rica” detalla al Volcán Irazú como un volcán con una altura de 3432 m.s.n.m, lo denomina como un escudo complejo con 500 a 778 km² de extensión y un volumen de 242 a 300 km³.

El cráter principal del volcán tiene una forma casi circular, posee 1000 m de diámetro y 250 m de profundidad, este se encontró activo entre 1962 y 1965 (Alvarado, 1989). La laguna del cráter ha experimentado cambios en su nivel a través de los años, fomentados por cambios en la actividad del volcán, aumentos y disminución de precipitación. El color de la laguna ha variado de rojo sanguíneo a

blancuzco, pasando por verdes y amarillos e inclusive ha llegado a secarse en ciertas ocasiones (Alvarado, 1989).

Al este del cráter principal se encuentra el cráter inactivo Diego de la Haya, este tiene una forma irregular con casi 80 m de profundidad y plano en su fondo. En el cráter se observan alternancias de estratos de piroclastos y niveles de coladas de lava mayoritariamente basáltica (Alvarado, 1989).

Uno de los principales flujos del volcán es la colada de Cervantes, esta se localiza en la falda sur del volcán. Su espesor varía de 7 a 25m. La colada cubre un total de 42 km² y tiene un volumen aproximado de 1 km³. La edad de esta colada se calculó mediante varios métodos como C14 en unas muestras de madera encontradas bajo la colada y 40AR/39AR en las coladas occidental y oriental. Las edades reportadas varían desde 57000 a 20000 años para el método 40AR/39AR y 13800 años para el C14 (Alvarado, 1989).

La actividad volcánica se ha podido datar hasta 640 años a.C (Clark, 1993). Desde la conquista el macizo ha presentado una relativa constancia en su actividad fumarólica, con importantes eventos eruptivos en los años 1723 y en 1963. Siendo esta última de gran importancia por las grandes pérdidas económicas (más de 6 millones de dólares a inicios de 1964) que tuvo el país en su sector agropecuario. Después de 1965 la actividad bajó con pequeñas reactivaciones de baja intensidad en los años 1977, 1978 y actividad fumarólica desde 1994 (Alvarado, 1989).

4.2.2 Volcán Barva

El volcán Barva se clasifica como un escudo andesítico complejo que se encuentra 22 km al norte de San José. Su extensión varía de 1120 a 1500 km² y su volumen de 197 a 255 km³, su extensión lo torna el volcán más grande de América Central. El volcán está plagado de conos menores en su cima, de los cuales se conocen algunos como "Las Tres Marías". El cono del Barva se encuentra alterado hidrotermalmente, lo cual ha producido una arcillitización y sulfurización de los minerales (Alvarado, 1989).

En las cimas central y noroeste se hayan cuatro conos residuales de los Cerros Las Tres Marías, la cima suroeste presenta al menos cuatro conos volcánicos, de los cuales uno presenta una laguna (Laguna del Barva) con 70 m de diámetro y 8 m de profundidad. Al este se encuentra un antiguo borde caldérico de aproximadamente 1250 m de diámetro el cual tiene en su interior al menos

cuatro cráteres. Al oeste de la laguna Barva (o a 2,8 km del cerro María más cercano) se encuentra el cerro Guararí (o Concordia) el cual ha sido confundido con el volcán Poás o con la cima del Barva (Alvarado ,1989).

Este volcán es el único que desde la colonia que no ha presentado actividad eruptiva. En San Bartolomé de Barva en el año 1772 se dio un fuerte temblor (Peraldo y Montero, 1994) cuyos daños corresponden más con un terremoto que con una erupción. Arredondo y Soto (2006) mencionan los mayores eventos eruptivos del Barva se dieron hace más de 13000 años.

Las unidades denudacionales de alta, media y baja pendiente, las cuales pertenecen a los edificios volcanicos de estos dos volcanes, son descritas en el apartado 4.3 geomorfología local.

4.2.3 Cuencas hidrográficas

La división de la geomorfología del área de estudio se puede hacer de muchas maneras, una de ellas es dividirla según las cuencas hidrográficas que existan dentro de ella. Los principales ríos o quebradas en la zona son el río Sucio, río Patria y la quebrada Molinete (en este caso se considera al río Hondura como un afluente del río Sucio). Estos ríos son los principales recolectores de agua (sin afluir a ningún otro río) dentro del área con información Lidar. A continuación se presentan las principales características de las cuencas de estos cuerpos de agua (ver Figura 4.6).

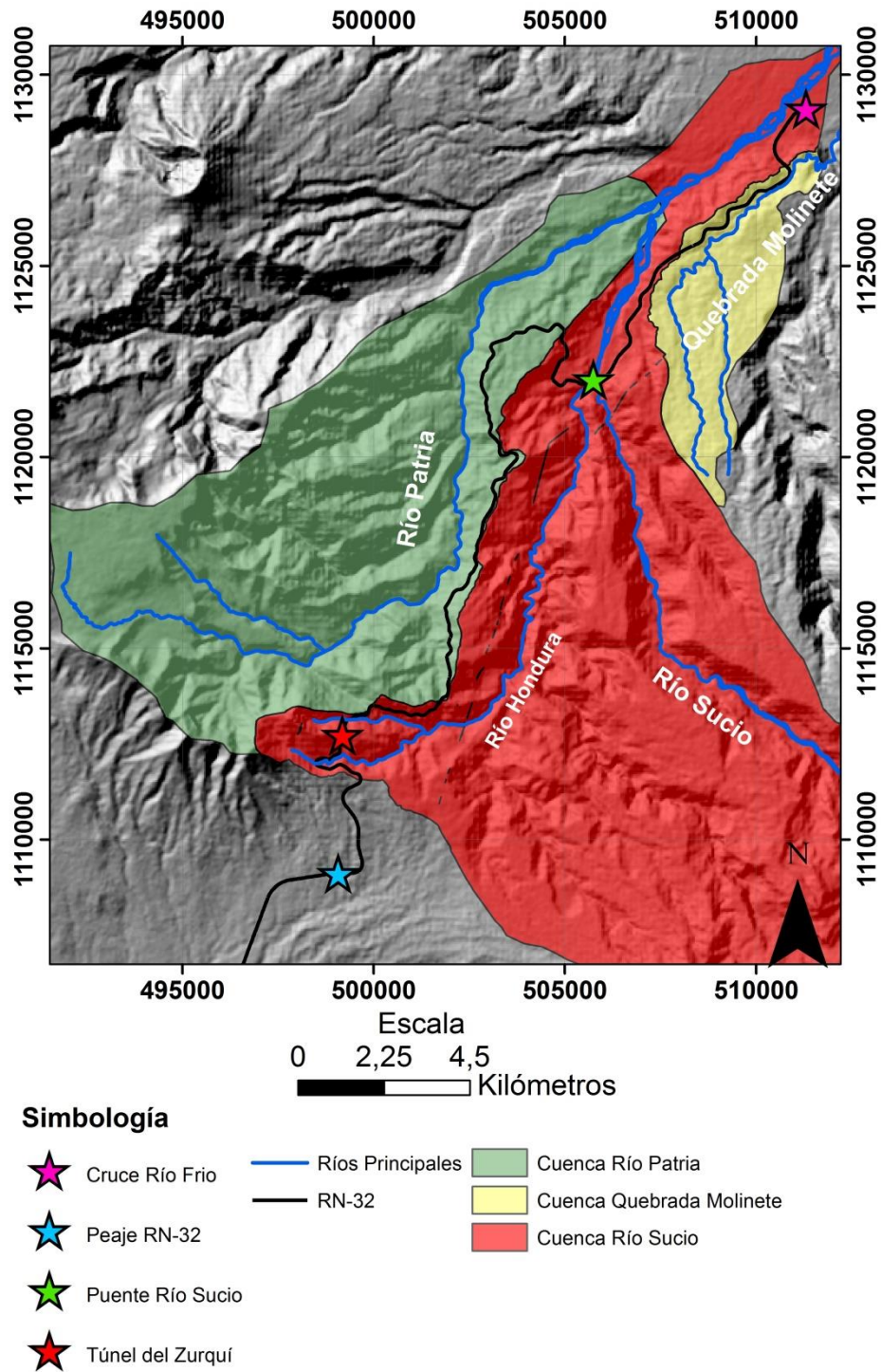


Figura 4.6: Ubicación de las principales cuencas y ríos dentro del área de estudio, las zonas en gris corresponden a cuencas cuyos recolectores principales no atraviesan la zona.

4.2.3.1 Cuenca del río Sucio

La cuenca del Río Sucio es la más grande dentro del área de estudio. Cuenta con un total de 33,3 km², su altura máxima se encuentra cerca del Túnel del Zurquí con 1970 m.s.n.m y la mínima cerca del cruce de Río Frío con 232 m.s.n.m. Las pendientes dominantes en la parte alta y media de la cuenca se clasifican como muy altas y altas respectivamente, mientras que en la parte baja las pendientes son bajas y pertenecen a la unidad Abanico Aluvial (detallada más adelante). Otros ríos importantes dentro de la cuenca son el río Zurquí (cerca al cerro y túnel del mismo nombre) y el río Hondura (el cual nace en el cerro Hondura). Las geofomas dentro de esta cuenca corresponden a Montañas y Colinas de muy alta y alta pendiente, Montañas y colinas de baja y moderada pendiente, así como todas las formas de origen fluvial descritas en este apartado.

El Río Sucio nace en las faldas noroccidentales del volcán Irazú donde inicia su recorrido hacia el área de estudio e interseca a la RN-32 en el estacionamiento 39, en este punto el río posee aproximadamente 115 m de ancho pero este aumenta rápidamente llegando casi a triplicarse a no más de 1 km de distancia (aguas abajo). Este río representa un riesgo potencial para el puente sobre este y, por consiguiente, para la RN-32, pues, al nacer en las faldas del volcán Irazú es propenso a canalizar flujos laháricos, *debris avalanches* o cualquier otro evento de acumulación de material en la cuenca. Esto se ha visto magnificado por el deslizamiento “Las Torres” el cual se ubica a pocos kilómetros de la cuenca de este río, dentro del edificio del volcán Irazú. En el caso hipotético en el que una elevada cantidad de material proveniente del deslizamiento ingrese a la cuenca, podría llegar al puente sobre el río Sucio al ser transportado río abajo y, por lo tanto, causar daños materiales en la estructura.

4.2.3.2 Cuenca del río Patria

Con 17,7 km² esta cuenca representa la zona oeste de la zona de estudio, su altura máxima de 1730 m.s.n.m se halla a 1,2 km al NE del túnel del Zurquí, su altura mínima se encuentra a 3,5 km al NO del puente sobre el río Sucio y es de 510 m.s.n.m. En esta cuenca se encuentran las unidades Montañas y colinas denudacionales de muy alta y alta pendiente. Las zonas de baja pendiente de la cuenca no están contenidas en este estudio, debido, a los límites del área con información Lidar. Esta cuenca finaliza al unirse el río Patria con el río Sucio.

Como tal el Río Patria se encuentra durante todo su recorrido al Oeste de la carretera, cuenta con aproximadamente 26,4 km de longitud desde su nacimiento en el Volcán Barva a 2230 m.s.n.m hasta su afluencia con el río Sucio a 330 m.s.n.m. Si bien este río se mueve de forma paralela a la RN-32, en ningún punto llega a intersectar a la carretera. De haber una crecida en el río la carretera más vulnerable sería la Ruta Nacional No.4 la cual es atravesada por el río Sucio después de que el río Patria lo afluye. Sin embargo, una vez que afluye, el ancho del cauce aumenta de tal manera que puede que la energía se pierda muy rápido o se distribuya por todo el cauce, aminorando así el efecto de la crecida.

4.2.3.3 Cuenca de la Quebrada Molinete

La cuenca más pequeña dentro del área de estudio, cuenta con 8 km² (dentro de la zona con información Lidar), su elevación máxima es de 754 m.s.n.m a 2 km al E del puente sobre el río Sucio, su punto más bajo se encuentra a 280 m.s.n.m a 1,5 km al SE del cruce de Río Frío. Dentro de esta cuenca se encuentran las unidades Montañas y colinas denudacionales de muy alta y alta pendiente, sin embargo, la gran mayoría del área pertenece a altas pendientes. La cuenca finaliza al afluir la quebrada Molinete al río Corinto.

Esta quebrada mide 13,07 km de longitud y acompaña paralelamente a la RN-32 a través de sus estacionamientos 42 a 47, la quebrada presenta unos 20 metros de ancho promedio en este trayecto, con una leve cantidad de aluvión. Los cañones de esta quebrada llegan a medir hasta 100 m de profundidad.

4.2.3.4 Ríos y Drenajes

Junto a los principales ríos ya descritos existen otros ríos que si bien son importantes se vuelven afluentes de estos. El más grande entre estos es el río Hondura el cual es afluente del río Sucio. Este río nace en el cerro Hondura a 1830 m.s.n.m y después de recorrer aproximadamente 16 km finaliza su trayecto afluyendo al río Sucio en 478 m.s.n.m. La principal sedimentación del material acarreado se da en los kilómetros anteriores a su final, en donde las barras laterales y de punta pueden tener hasta 30 m de ancho.

Otro río importante es el caso del río Zurquí, el cual atraviesa la RN-32 cerca de su estacionamiento 18+800, este se encuentra en la subunidad de montañas y colinas de muy fuerte pendiente, su cauce corta el terreno a una profundidad de 300 m a través de los 4 km de recorrido que tiene. Este río finaliza al afluir al río Hondura.

4.3 Unidades Geomorfológicas Locales

Los procesos de meteorización y erosión presentes en el área han esculpido el terreno, formando diversos patrones que pueden ser reconocidos y clasificados según su proceso erosivo predominante. El área de estudio está dominada por montañas y colinas de origen denudacional las cuales geológicamente provienen de los eventos del Pre y Paleo-Barva. En las cercanías de los ríos aparecen barras laterales y terrazas producto de la acción del agua y formadas por el material acarreado por los diferentes ríos. Al norte del área las montañas y colinas le abren paso a un abanico aluvial de pendiente muy baja ($>5^\circ$). A continuación en las Figuras 4.3, 4.4 y 4.5 se puede observar el cartografiado geomorfológico realizado con la información Lidar.

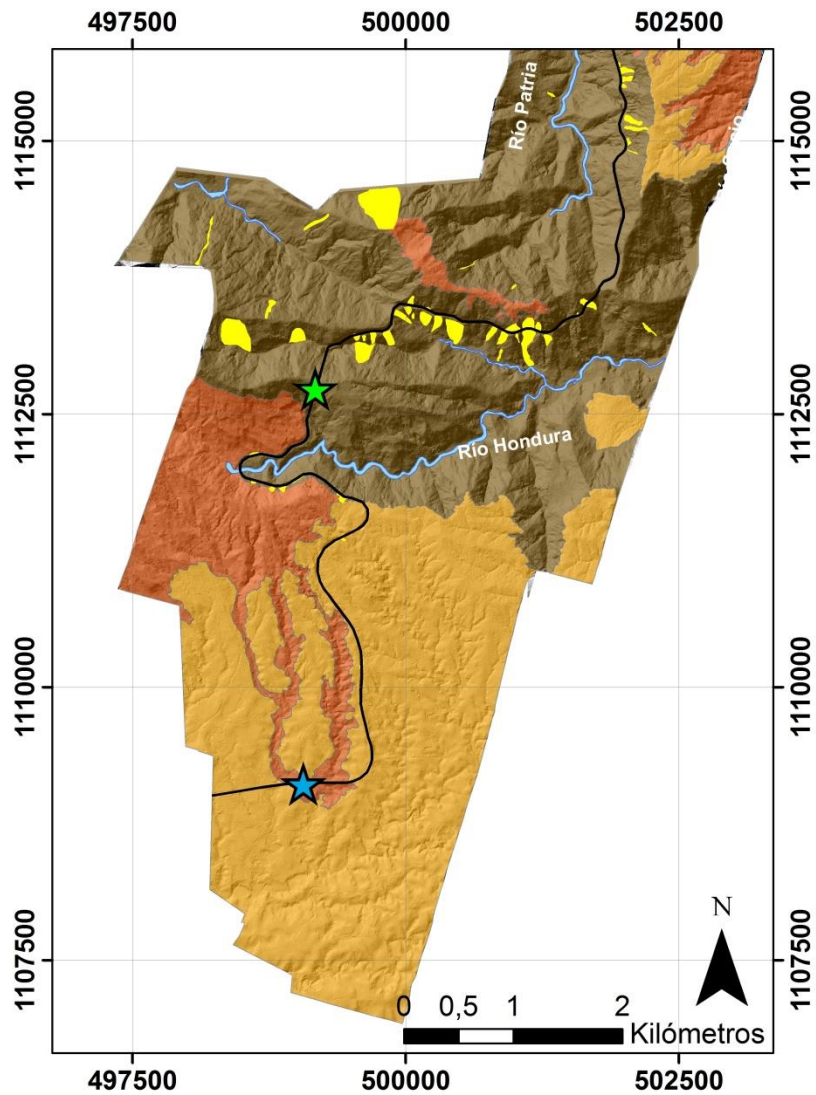


Figura 4.3: Mapa geomorfológico de la zona más al sur del área de estudio, la cual se encuentra dominada por formas denudacionales de alta a muy alta pendiente.

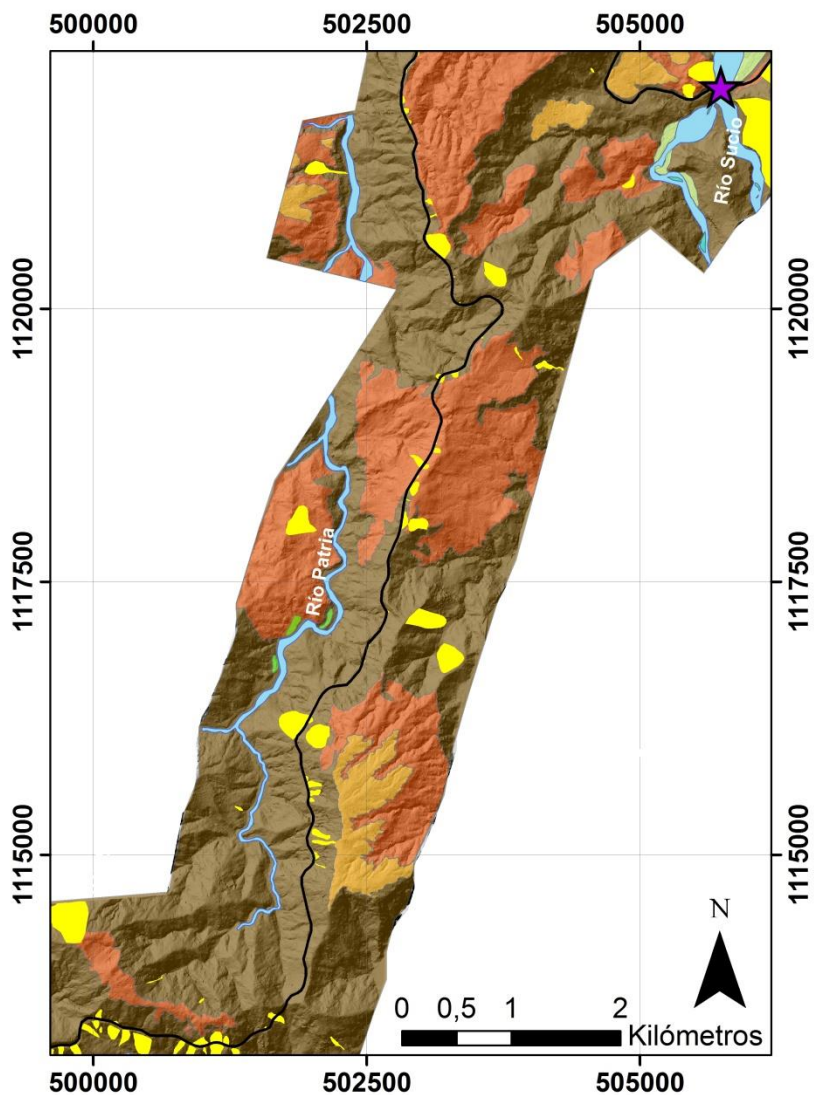


Figura 4.4: Mapa geomorfológico de la zona media del área de estudio. Las formas denudacionales de muy alta pendiente dominan por sobre las demás.

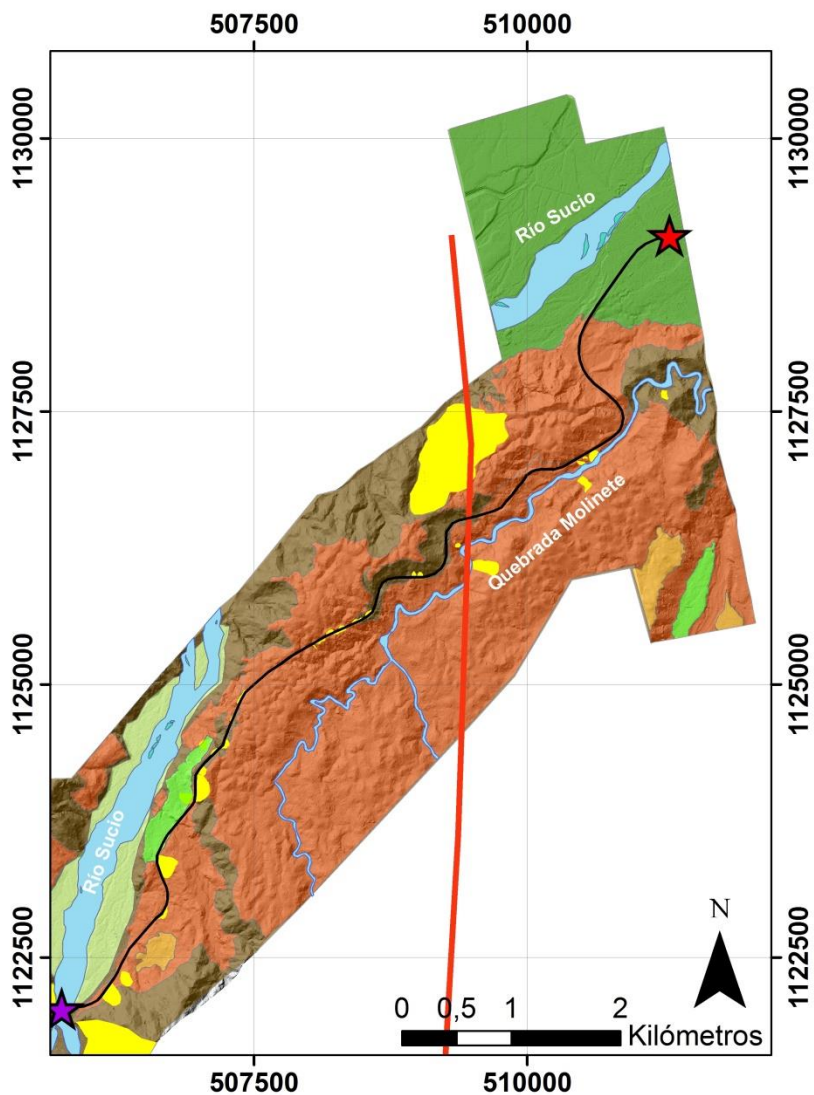


Figura 4.5: Mapa geomorfológico de la zona más al norte del área de estudio. Las montañas de pendiente altas dominan hasta el sector más norte donde la zona montañosa termina para darle paso al abanico aluvial del río Sucio.

A continuación se detallan las diversas unidades geomorfológicas que se reconocieron dentro de los anteriores mapas geomorfológicos.

4.3.1 Formas de origen denudacional

4.3.1.1 Montañas y colinas

Conformando la gran mayoría del área cartografiada, esta morfología es resultante de la meteorización de las rocas de los cerros del Zurquí o rocas del Paleo-Barva. Su erosión, a causa de, agentes fluviales y eólicos dio paso a una topografía muy irregular, generando montañas y colinas de unos pocos a varios cientos de metros de altura. El drenaje en esta zona es predominantemente dendrítico, con ciertas áreas presentando un híbrido entre dendrítico y paralelo.

Debido a su gran extensión y diferencia de altura esta morfología presenta variaciones en la inclinación de sus pendientes por lo que esta fue subdividida en tres subunidades. Su litología corresponde con los depósitos del Paleo-Barva, estos son una mezcla de brechas, flujos piroclásticos y lavas andesíticas. La edad de estas morfologías debe ser pleistocena pues correspondería con estos depósitos, a los cuales se les atribuyen edades en la misma época pleistocena.

Montañas y colinas de muy alta pendiente:

Esta subunidad está definida por todas las cimas y pendientes de origen denudacional que presentan inclinaciones de más de 35°. Abarca un aproximado de 30,8 km², de los cuales la mayoría se encuentra en la parte central del área de estudio, su elevación máxima de 1971 m.s.n.m se encuentra a aproximadamente a 1 km al Oeste del túnel del Zurquí. La elevación mínima se encuentra en la zona más al Norte donde alcanza los 280 m.s.n.m. La pendiente promedio de la unidad es de 35,8° aunque esta puede llegar hasta los 60°.

Montañas y colinas de alta pendiente:

Está definida por las pendientes y cimas con inclinaciones de 16° a 35°. Estas representan un aproximado de 31 km², sus principales extensiones superficiales se encuentran al Noreste y Suroeste del área de estudio, donde abarcan el terreno previo al comienzo del área montañosa y el terreno posterior a esta, también, aparece en la forma de “islas” dentro de la subunidad de muy altas y extremadamente altas pendientes. Su máxima elevación de 1924 m.s.n.m se encuentra cercana al túnel de Zurquí, aproximadamente 1 km al Oeste. La

elevación mínima de 253 m.s.n.m aparece cerca de la llanura aluvial al Norte del área de estudio. Su pendiente promedio es de 22° llegando a un máximo de 27° en diversas zonas.

Montañas y colinas de baja y moderada pendiente

Con una extensión territorial mucho menor que las dos anteriores esta subunidad está definida por las geoformas denudacionales de pendientes menores a 16°. La mayoría de esta se encuentra en la parte Suroeste del área de estudio, con unas pequeñas zonas en la parte Norte de esta. La subunidad tiene un aproximado de 6,8 km², su elevación máxima es de 1638 m.s.n.m y la mínima es de 333 m.s.n.m, estas se encuentran al Suroeste y al Norte del área de estudio respectivamente. La pendiente promedio de la subunidad es de 10° con un máximo de 14°.

4.3.2 Formas de origen fluvial

Además de los principales recolectores detallados en el apartado 4.2.3, existen un gran número de ríos y quebradas que disectan en gran medida el paisaje de la zona. Las profundidades a las que cavan en la topografía puede variar de 5 m a cientos de metros. Como se mencionó anteriormente el drenaje es dendrítico a paralelo, dominando el drenaje paralelo en las zonas más altas del área de estudio donde las pendientes son más fuertes y más largas. El drenaje dendrítico predomina en las cumbres de las montañas y en las pendientes no tan fuertes.

Gracias al detalle de la información Lidar fue posible crear una red de drenaje de toda el área, y con esta se calculó la densidad de drenaje de la misma. En el cálculo se usaron píxeles de 1 km², sin embargo, como el drenaje fue dibujado en base a la zona de con información Lidar hubieron algunos píxeles los cuales solo tuvieron la mitad o menos del área cubierta por drenajes, estos píxeles creaban errores en el rango total de densidad por lo que se decidió eliminarlos. Otra aclaración con respecto a este mapa es que al incluir la información Lidar a la carretera, el dibujo del drenaje (el cual fue automático) la incluyó y la uso para trazar ciertas líneas de drenaje paralelas a esta. Se decidió dejar estos drenajes ya que, si bien, son “antrópicos” sí afectan realmente al drenaje de la zona. Durante una precipitación la carretera si va a afectar al drenaje del agua precipitada, por lo tanto, sí debería considerarse el efecto de la vía. El mapa resultante se puede apreciar en la Figura 4.7.

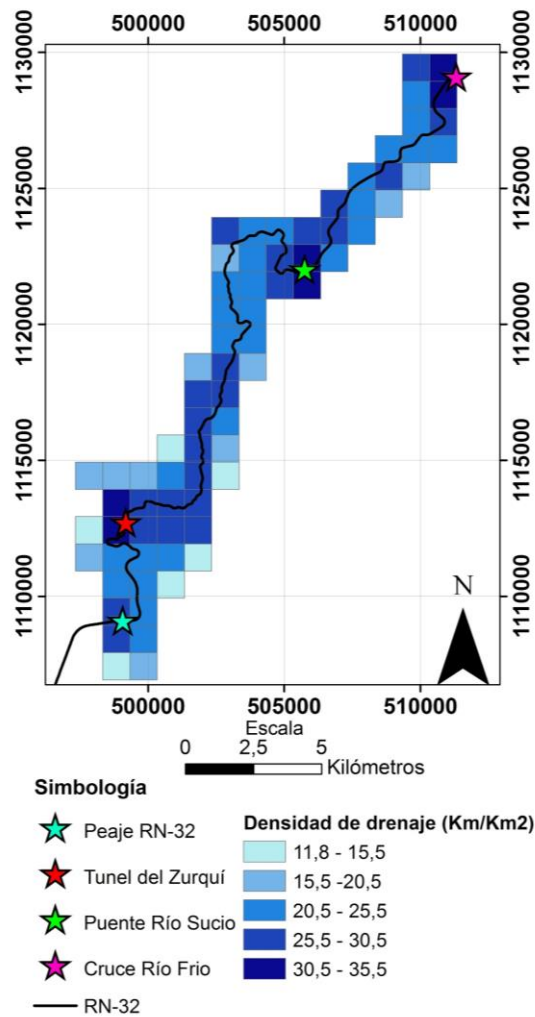


Figura 4.7: Mapa de densidad de drenaje del área de estudio. Pixeles equivalentes a 1 km². Se puede apreciar como los pixeles cercanos a la carretera presentan una mayor densidad. Esto puede estar relacionado a que la carretera genere pendientes más fuertes y la misma se tome en ciertos sectores como drenaje.

Barras laterales

Esta morfología está presente principalmente en los cauces de los ríos Hondura y Sucio donde la gran cantidad de material acarreado se ha acumulado en los cauces formando las barras laterales. Estas presentan extensiones variables que pueden ir desde los 200 hasta más de 1000 m². La naturaleza momentánea de las barras hace que su cartografiado deba ser constante, ya que, estas cambiarán con el tiempo y su crecimiento se verá altamente influenciado por la cantidad de agua y material de las que el río tenga disposición. Estas están formadas por la acumulación de bloques y sedimento que ha sido arrastrado río

abajo, por lo que la composición de estas barras es similar a la de la zona montañosa, por lo tanto lavas, brechas y flujos piroclásticos. La edad de esta morfología es holocena.

Depósitos aluviales

Similar a las barras laterales, estos depósitos se presentan en los cauces de los ríos Sucio y Hondura, estos se forman en las zonas donde la velocidad del agua es menor (interior de los meandros) y por lo tanto su energía disminuye, permitiendo así que los sedimentos y bloques que son arrastrados se depositen. En términos de área estos depósitos son considerablemente más grandes que las barras laterales ya que varían de 5000 a 30000 m². Evidentemente por la naturaleza de las mismas estas son siempre cambiantes y obedecen a la dinámica del río. Igual a las barras laterales esta morfología está formado por el material acarreado por el los ríos lo cual hace que los bloques que la componen sean de naturaleza volcánica (lavas, flujos piroclásticos, brechas). La edad es holocena.

Terrazas aluviales

Formadas por los ríos más caudalosos de la zona, estas terrazas son producto y evidencia de la evolución de los ríos y de su continua erosión a través de las montañas. La altura típica de estas formas es de 10 m, con una excepción de una terraza en la margen derecha del río Sucio la cual tiene en promedio 50 m de altura. Los ángulos de la pendiente entre la terraza y los ríos suelen ser muy empinadas, con un promedio de 40°. En cuanto al área de estas, a excepción de la terraza perteneciente al río Sucio (la cual tiene un área aproximada de 0,22 km²) las terrazas en promedio tienen 100 m² de extensión. Se cartografiaron un total de 5 de estas formas, las cuales 3 pertenecen al río Patria, una al río Sucio y una al río Corinto.

Abanico aluvial

En la zona Norte del área de estudio, una vez finalizada la zona montañosa y como producto de los sedimentos acarreados por el río Sucio y Patria, da comienzo, un abanico aluvial. Madrigal y Rojas (1990) realizan una descripción del abanico, en la cual mencionan que este cuenta con 14 km de largo y 16 km de ancho, calculan una pendiente para este de 1° a 2° y le asignan una edad Pleistocena.

Dentro del área con información Lidar esta morfología cuenta con 3,7 km², en los cuales se puede observar una pendiente de entre 1° a 2°, lo cual se muestra acorde con lo planteado por Madrigal y Rojas(1990).

4.3.3 Fallamiento en el área de estudio

El área de estudio es atravesada por diversas fallas, la cuales, representan un peligro para la RN-32 por la posibilidad de generación de sismos con epicentros muy cercanos a esta. Dentro del área con información Lidar se pueden apreciar la falla Guápiles en la parte Norte de esta y la falla Río Sucio, nombrada por el río que la acompaña (ver Figura 4.8). Estas fallas fueron obtenidas del catálogo de la Red Sismológica Nacional de Costa Rica pues no fue posible identificar geformas características de fallas en las ortofotografías o en el campo. A continuación, una explicación más detallada de cada falla.

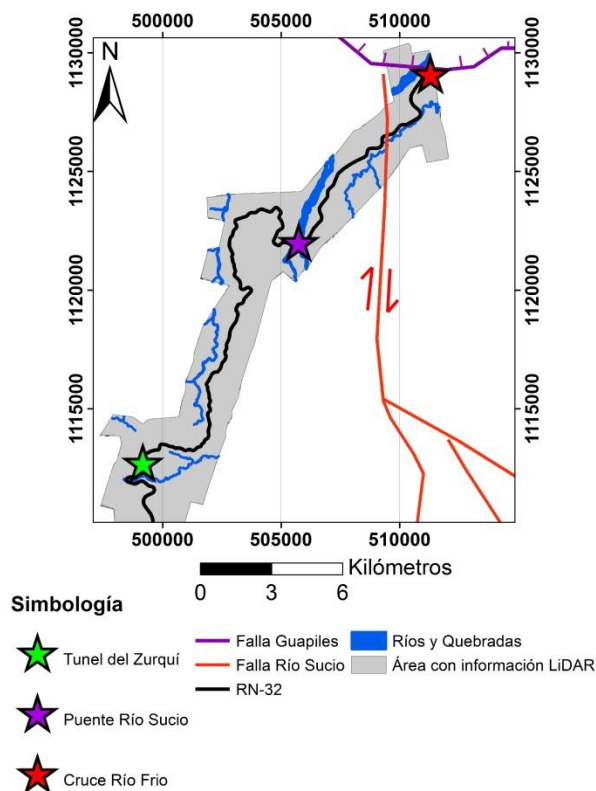


Figura 4.8: Área de estudio y RN-32 y su relación espacial con las principales fallas que atraviesan la zona. Las fallas Río Sucio y Guápiles fueron digitalizadas por la Red Sismológica Nacional según el Atlas Tectónico de Costa Rica (Denyer et al, 2003), la falla Río Patria se dibujó según Denyer et al (1993).

Falla Río Sucio

La falla río Sucio nace en la cuenca del río del mismo nombre, la cual está ubicada en el flanco noroeste del volcán Irazú. Según Montero et al. (1998) y Linkimer (2003) esta presenta una extensión de 17 km.

Montero et al (1998) la describe como una falla de tipo desplazamiento de rumbo de componente dextral, la cual se orienta al N43°W. Montero (2003) y Montero et al (2013a) mencionan que esta posee tres ramificaciones en la parte alta del macizo del volcán Irazú. Montero & Alvarado (1995) la consideran como una falla activa pues logra atravesar depósitos del cuaternario.

Falla Guápiles

Montero et al (1998) indica que esta falla se encuentra en la ladera norte del volcán Irazú. Esta pertenece al Cinturón Deformado del Centro de Costa Rica (Montero, 2001), se extiende desde el poblado de Guápiles hasta el río Chirripó para un total de 13 km (Montero et al, 1998) aunque otros autores como Boschini (1989) indican una longitud de 7 km.

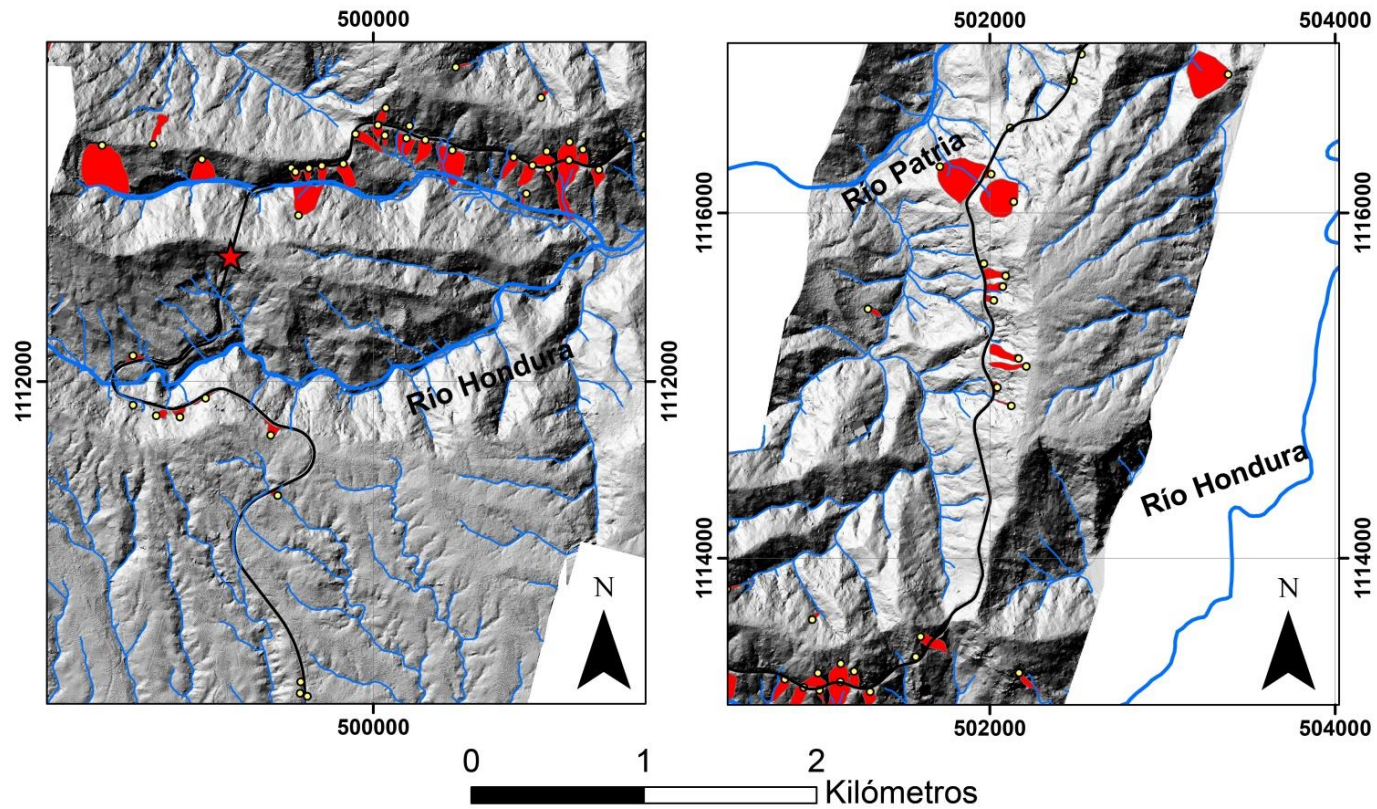
Esta falla es de tipo inverso y presenta una orientación este-oeste según Borgia et al (1990). Boschini (1989) menciona una posible componente dextral por la existencia de fracturas con orientación noroeste-sureste.

4.4 Inventario de deslizamientos

La construcción de la RN-32 a través de los distintos cerros y montañas que conforman el área de estudio en conjunto con las características geomecánicas de los materiales que conforman los taludes creó una condición de inestabilidad a lo largo de la carretera, lo cual, con el tiempo, llevó al deslizamiento o caída de material sobre la vía. Estos deslizamientos presentan una gran heterogeneidad en su tamaño, forma y geometría, por lo cual, clasificarlos en un tipo de deslizamiento se torna complicado.

Para la ejecución del presente estudio se realizó un inventario de deslizamientos, se recopiló un total de 144 eventos de los cuales 116 están en los taludes de la carretera o en las laderas de estos. Ahora bien, en el mes de Julio del año 2018, una tormenta tropical golpeó a Costa Rica, generando una gran cantidad de lluvias en el país. Esto ocasionó que en la ruta se presentaran deslizamientos producto de la saturación de los suelos, sumaron hasta 20 nuevos

deslizamientos al inventario previamente hecho. De estos 7 fueron incluidos al inventario previo, los restantes 13 deslizamientos se encuentran sobre deslizamientos previamente identificados (es decir falló la misma zona) o tuvieron problemas con su ubicación GPS. En los anexos a este trabajo se adjunta información de cada uno de los deslizamientos inventariados (con el uso de datos Lidar y ortofotografías) en este trabajo. A continuación en las Figuras 4.9, 4.10 y 4.11 se presenta la ubicación de cada evento y su relación con la carretera.

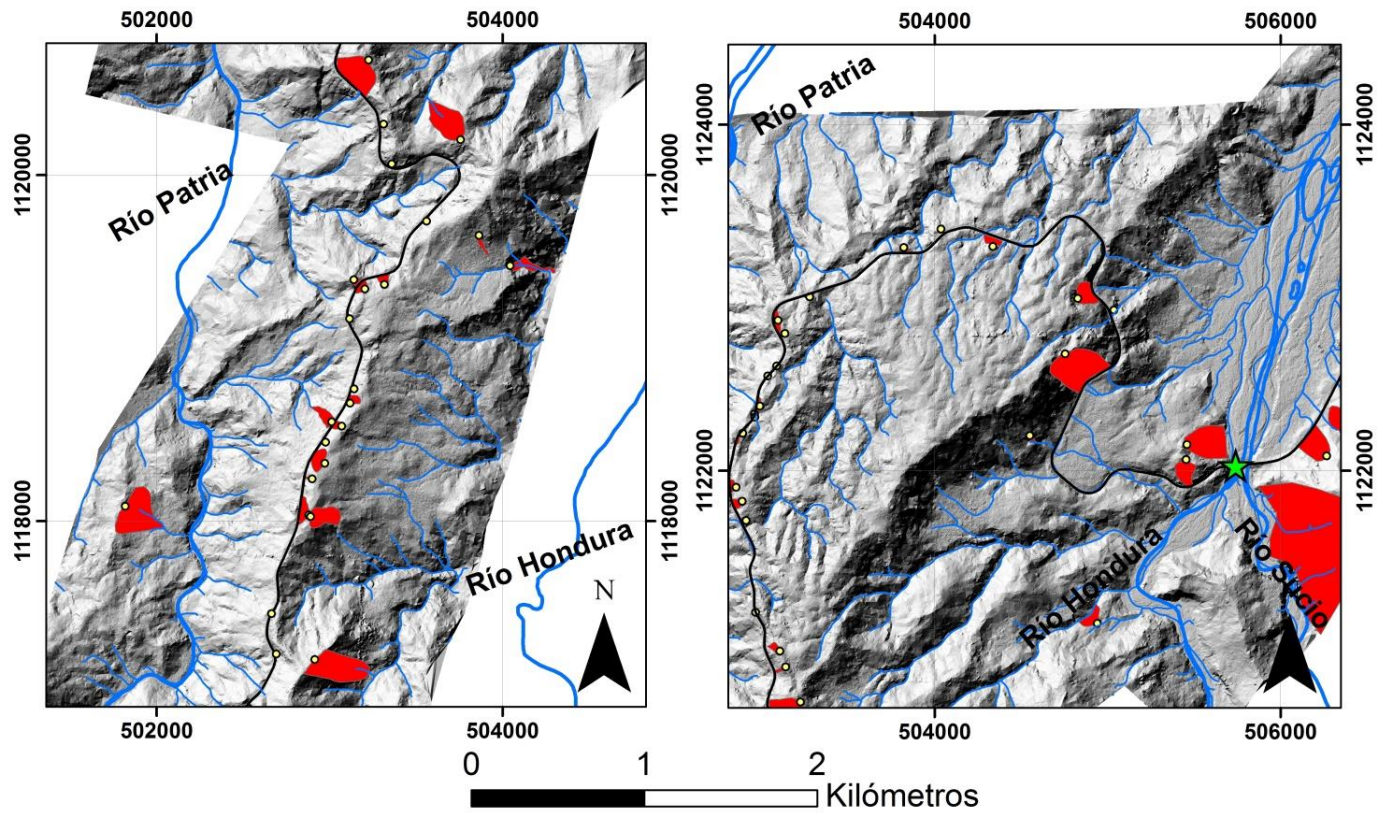


Mapa de deslizamientos A
Estacionamientos aproximados (15+500 a 26+800)

Simbología

- | | | | | | | | |
|-----------|------------------|-----------------|----------------|-----------|---------|------------|----------------------------|
| ★ (Green) | Puente Río Sucio | ★ (Light Green) | Peaje RN-32 | — (Black) | RN-32 | ○ (Yellow) | Ubicación de deslizamiento |
| ★ (Red) | Túnel del Zurquí | ★ (Purple) | Cruce Río Frio | — (Blue) | Drenaje | ■ (Red) | Deslizamientos |

Figura 4.9: Mapa mostrando la ubicación de los deslizamientos en las cercanías del túnel Zurquí y hasta el estacionamiento 26+800 (aproximadamente), los puntos de color amarillo representan las coronas de los deslizamientos. Algunas coronas no tienen deslizamiento dibujado debajo de ellas pues solo se cuenta con la ubicación más no con la geometría del evento.

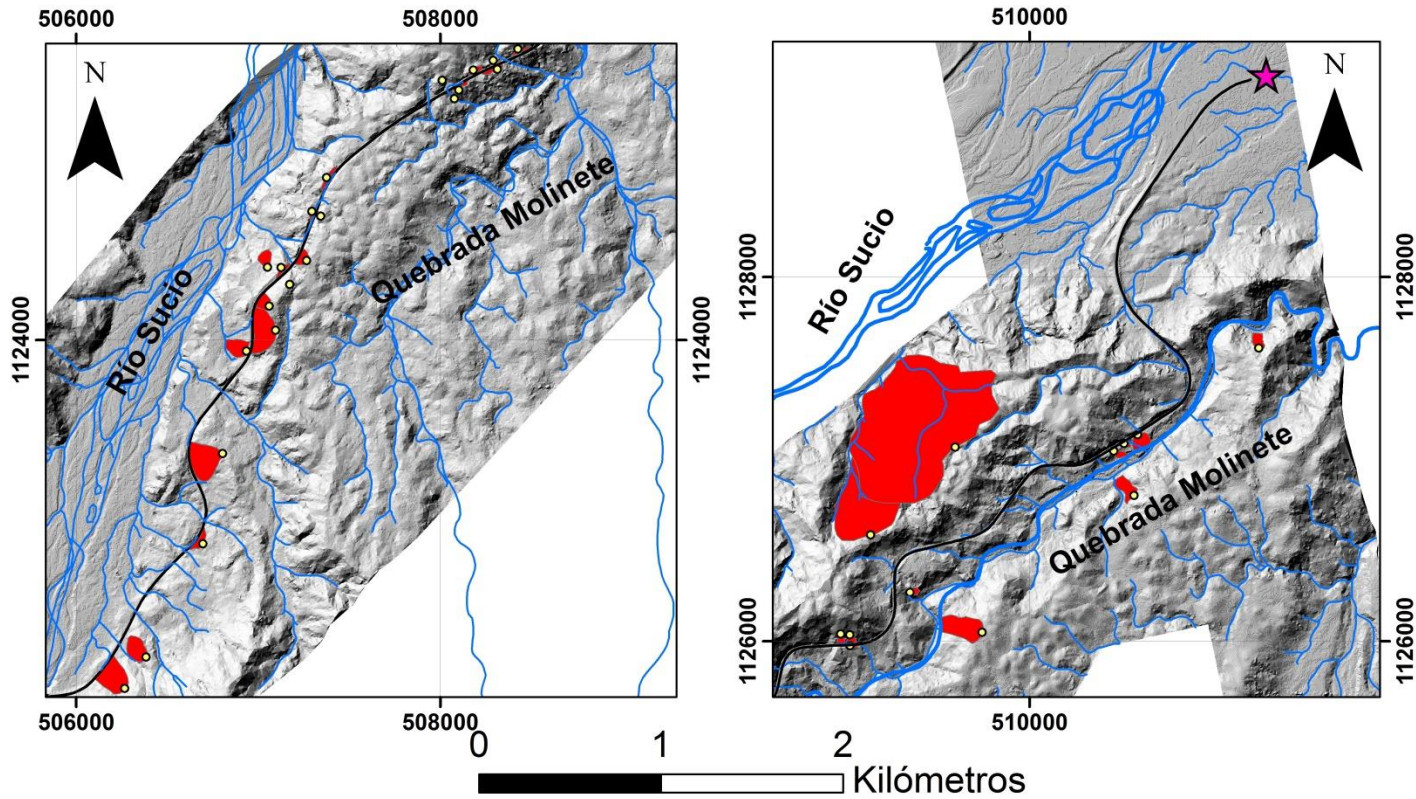


Mapa de deslizamientos B
Estacionamientos aproximados (27+200 a 40+000)

Simbología

- | | | | |
|--------------------|------------------|-----------|------------------------------|
| ★ Puente Río Sucio | ★ Peaje RN-32 | — RN-32 | ○ Ubicación de deslizamiento |
| ★ Túnel del Zurquí | ★ Cruce Río Frio | — Drenaje | ■ Deslizamientos |

Figura 4.10: Mapa mostrando la ubicación de los deslizamientos posteriores al túnel de Zurquí y hasta el puente sobre el río Sucio. Los puntos de color amarillo representan las coronas de los deslizamientos. Algunas coronas no tienen deslizamiento dibujado debajo de ellas pues solo se cuenta con la ubicación más no con la geometría del evento.



Mapa de deslizamientos C
Estacionamientos aproximados (39+200 a 49+500)

Simbología

- | | | | |
|--------------------|------------------|-----------|------------------------------|
| ★ Puente Río Sucio | ★ Peaje RN-32 | — RN-32 | ○ Ubicación de deslizamiento |
| ★ Túnel del Zurquí | ★ Cruce Río Frio | — Drenaje | ■ Deslizamientos |

Figura 4.11: Mapa mostrando la ubicación de los deslizamientos en el último sector del tramo estudiado (del puente sobre el río Sucio hasta el cruce de Río Frio los puntos de color amarillo representan las coronas de los deslizamientos. Algunas coronas no tienen deslizamiento dibujado debajo de ellas pues solo se cuenta con la ubicación más no con la geometría del evento.

Estos deslizamientos cartografiados no están distribuidos uniformemente a través de la sección de estudio, en cambio, se aglomeran en distintas zonas, creando así, focos de alta y baja densidad de eventos. Para visualizar esta situación se creó un mapa de densidad de deslizamientos, en el cual, se usan píxeles de 1 km², ubicados a lo largo de la carretera, para representar la cantidad de deslizamientos que hay dentro de ellos. Este mapa permitió observar que la zona con mayor densidad se encuentra a 1 km de la salida del túnel del Zurquí, en esta área dos píxeles contiguos alcanzan el valor máximo de 12 y 11 deslizamientos por kilómetro cuadrado (ver Figura 4.12).

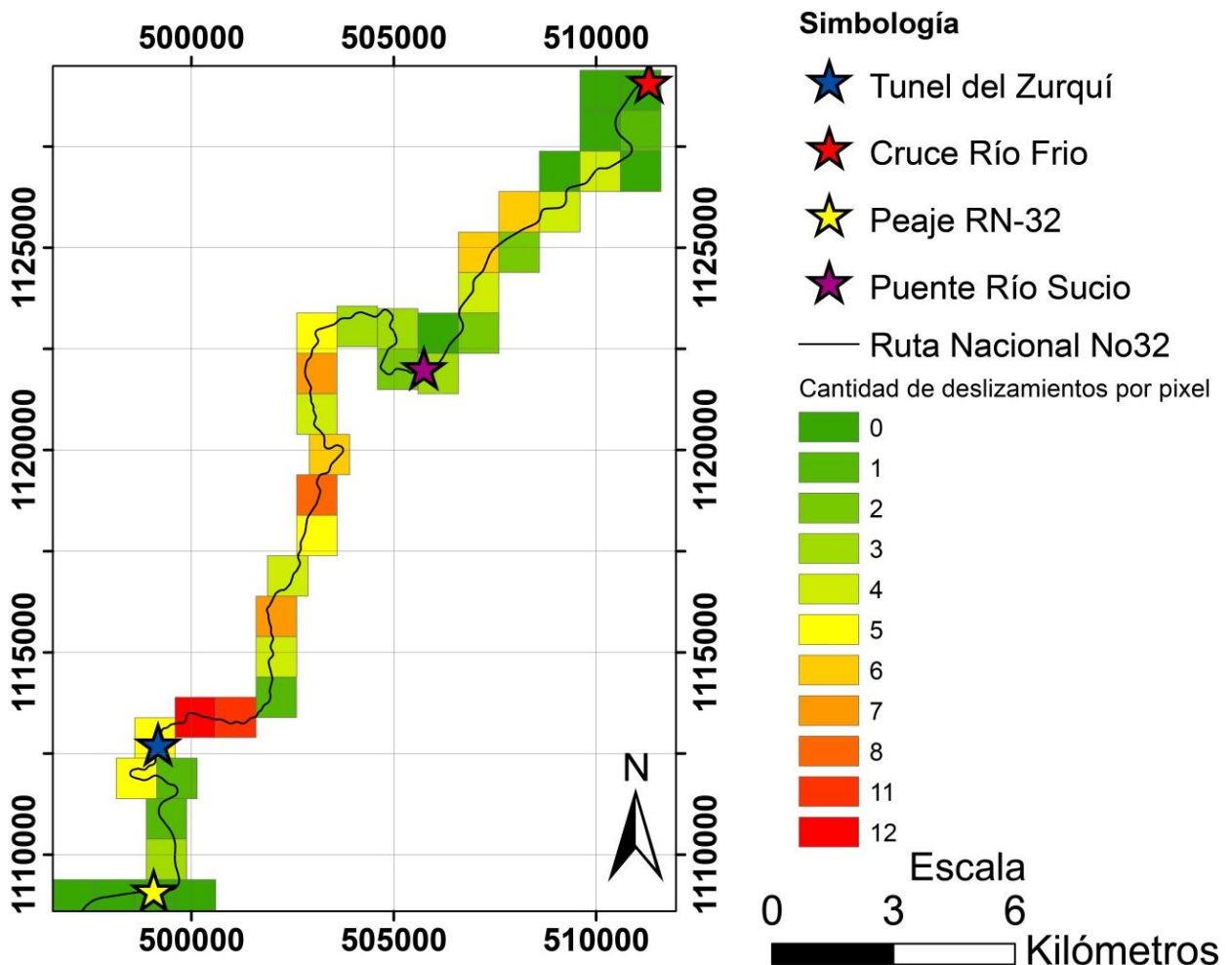


Figura 4.12: Mapa de densidad de los deslizamientos en el tramo montañoso de la RN-32. Cada pixel encierra un área total de 1km² y dentro de cada uno se cuantificaron el total de deslizamientos existentes. La escala de color muestra cuantos eventos hay en cada pixel. La zona mas critica son los 4 kilómetros posteriores al túnel del Zurquí.

Como se mencionó anteriormente, posterior al mes de Julio, la distribución de los deslizamientos cambió por lo que se hizo una comparación de los pixeles para observar las zonas en las que se dieron nuevos eventos. Los 7 nuevos eventos añadidos al inventario se concentraron en la zona media de la carretera (aproximadamente de los estacionamientos 25+000 a 35+000) por lo que el cambio en el inventario se dio en esta zona. Si bien el cambio debido a un solo evento no es muy grande la sumatoria de varios eventos en un plazo de unos pocos años puede generar cambios mas notables y hasta generar nuevas zonas criticas. En la Figura 4.13 se puede apreciar el cambio que se dio.

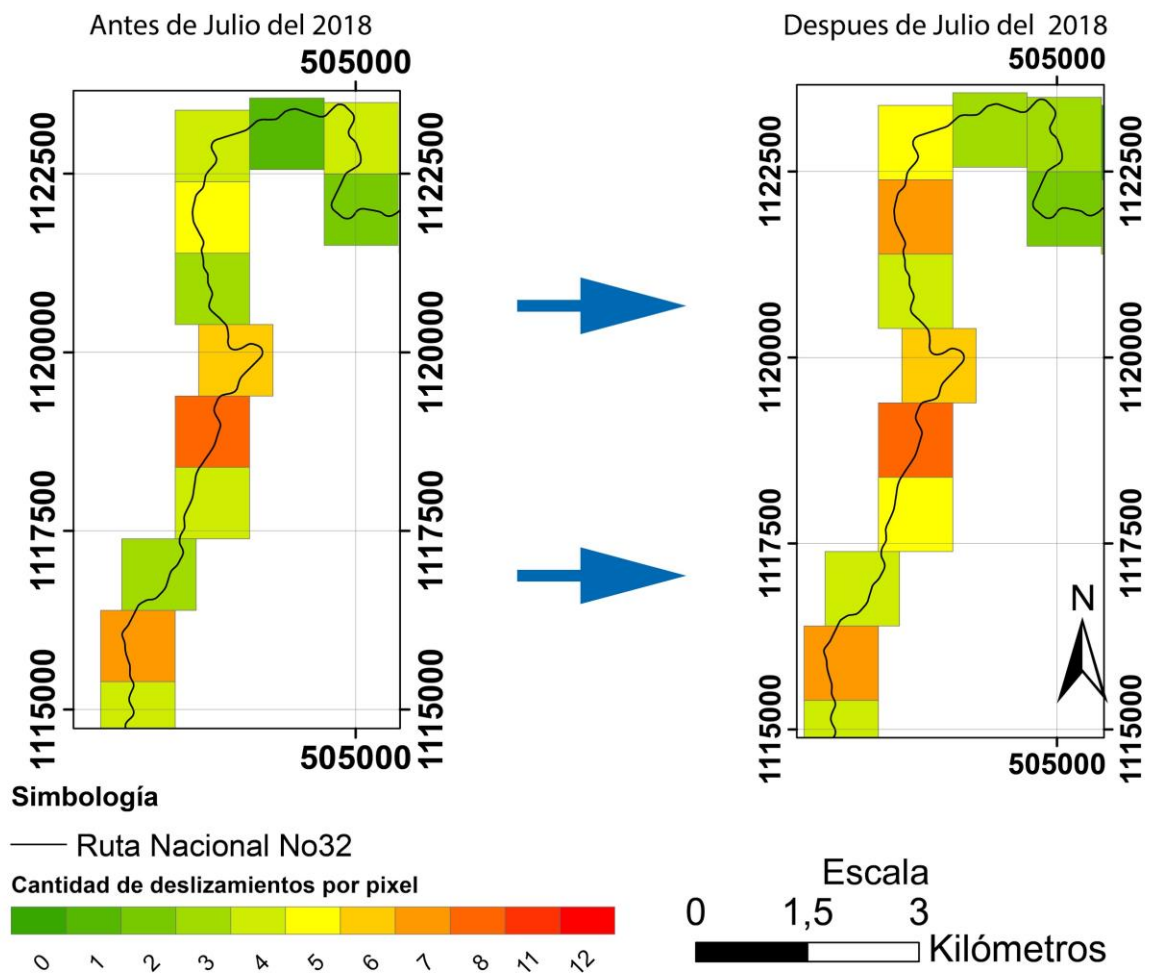


Figura 4.13: Comparación de la cantidad de deslizamientos por perfil antes y después del mes de julio del año 2018. Se puede ver como con un solo evento hubo un cambio significativo en la distribución, especialmente en la zona más al norte de la coordenada 1120000.

4.4.1 Área y volúmen de los deslizamientos

Además de la cantidad y distribución espacial de los deslizamientos es deseable obtener otros parámetros como el área y volúmen de cada evento, esto para realizar una valoración más precisa del área de estudio. El uso de las imágenes Lidar hizo posible la digitalización de los deslizamientos y por lo tanto se pudo calcular los datos geométricos de cada evento: su altura, ancho, perímetro y área. Usando esta información fue posible agrupar los distintos deslizamientos en base a su tamaño, para esto, se crearon rangos de área en los que se clasificó los deslizamientos. Un histograma de estos datos se puede observar en la Figura 4.14 mientras que los datos tabulados junto a sus porcentajes correspondientes se muestran en la Tabla 4.3.

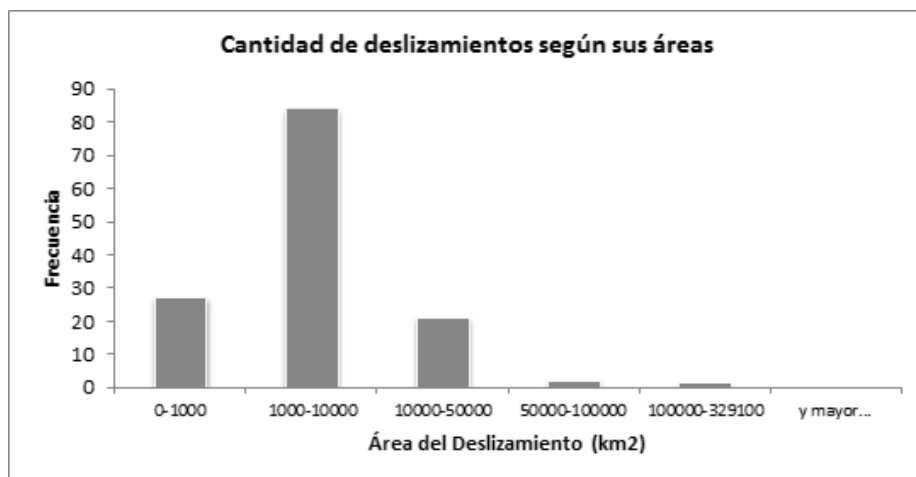


Figura 4.14. Histograma mostrando la cantidad de deslizamientos según los distintos intervalos de área. Es fácil observar la gran cantidad de deslizamientos no mayores a 10000 m², y el bajo porcentaje de mayores a este.

Tabla 4.3

Rangos de área en los que se dividieron los deslizamientos, la cantidad de deslizamientos que clasificaron en cada rango y su porcentaje en relación al total. Se vuelve a evidenciar la dominancia de eventos con una extensión superficial entre 1001 y 10000 m².

Rango de área (m ²)	Cantidad de deslizamientos	Porcentaje (%)
0-1000	27	19,85
1001-10000	84	61,76
10001-50000	21	15,44
50001-100000	2	1,47
+100000	2	1,47

Con este análisis del área de los eventos es posible observar el comportamiento, ubicación y patrones de los distintos deslizamientos. Con solo un 3% del total, los deslizamientos mayores de 50000 m² representan una minoría en la zona y puesto que, estos se encuentran alejados de la carretera, su potencial de peligro directo a esta es leve. El deslizamiento en el río Sucio, por ejemplo, puede afectar indirectamente a la RN-32 mediante una crecida del río. En el extremo contrario se encuentra los deslizamientos menores de 10000 m², estos representan aproximadamente un 80% del total y su gran mayoría se encuentra en los taludes de la RN-32. Estas dos categorías (0-1000 m² y 1001-10000 m²) si bien no son especialmente grandes son las que representan más peligro a la carretera y a los distintos vehículos que transitan en esta, dado que, son los que constantemente depositan material sobre la vía y fuerzan los cierres de esta.

Al poder determinar un kilometraje exacto para cada deslizamiento se graficó el área de cada uno contra su ubicación en la carretera, esto se hizo para buscar tendencias o patrones en el tamaño que pudieran ser estudiadas a fondo. Si bien es posible ver ciertos patrones en cuanto a su agrupamiento, en cuanto al área de estos no se observan tendencias importantes. En la Figura 4.15 se presenta este gráfico.

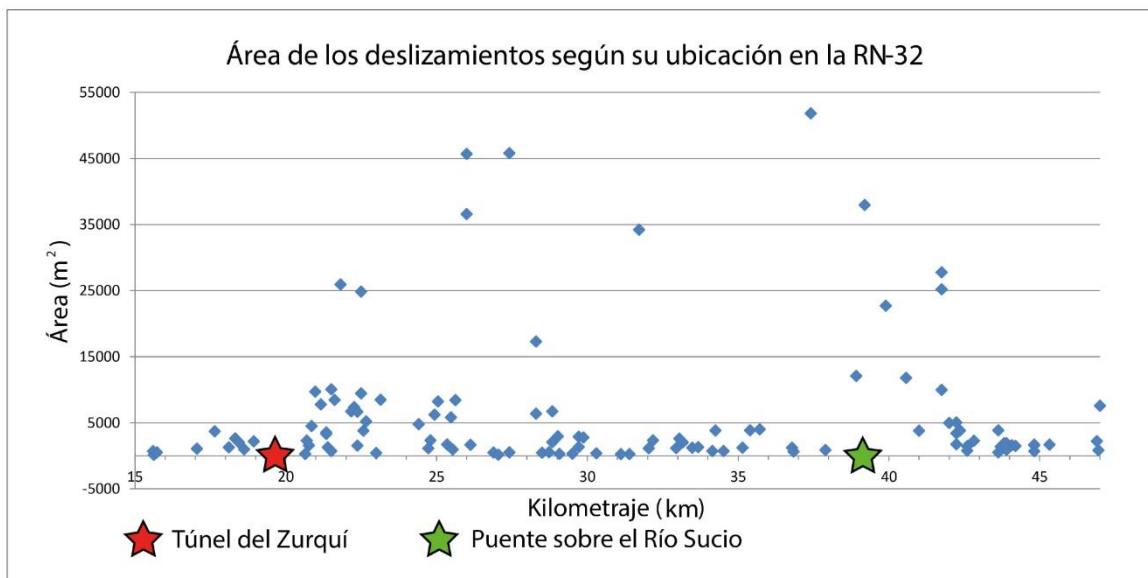


Figura 4.15: Gráfico del área de los deslizamientos (y) contra su kilometraje en la carretera (x). Es posible ver como en los extremos no hay deslizamientos de más de 15000 m², esto es explicable al considerar las pendientes muy bajas o nulas en estas zonas. También es posible ver la dominancia de eventos menores a 5000 m² a lo largo de todo el tramo de estudio. Los eventos mayores a 100000 m² no fueron incluidos ya que alteraban significativamente la escala del eje y.

Posterior al túnel del Zurquí (entre los estacionamientos 20+000 a 26+000) hay una agrupación de deslizamientos de entre 5000 y 10000 m², esta agrupación concuerda con los pixeles más críticos de la Figura 4.14. Los deslizamientos en esta zona son de mayor tamaño pues tienden a originarse en la parte más alta del talud, generando un deslizamiento que acarrea no solo el material en la corona sino también todo aquel que se encuentre hasta el nivel de la carretera. Otro pequeño grupo de deslizamientos se ubica en el estacionamiento 42+000 a 43+000, no es tan grande o extenso como el cercano al túnel, aun así, es un grupo numeroso en una longitud relativamente corta.

Haciendo un análisis del derecho de vía de la carretera en el tramo estudiado (25m a cada lado desde la línea central) se encontró que un 6,7% (0,12 km²) del área total (1,78 km²) se ha deslizado a la fecha de la toma de las ortofotografías y Lidar. El área total de los deslizamientos sin embargo, es bastante mayor, de un total de 1,46 km² (para un promedio de 0,011 km²), aunque es este caso los mayores deslizamientos no se encuentran dirigidos hacia la carretera, si no que se encuentran en otras cuencas.

El volúmen de los deslizamientos por otro lado resulta mucho más difícil de calcular, la información Lidar, si bien da al usuario datos topográficos, solo solo se puede obtener para aquellos grabados al momento en el que se hizo el sobrevuelo (en el caso de Lidar aéreo como lo es este), no brindando un antes y un después de la superficie de interés. Es por esta razón que realizar un cálculo exacto de la diferencia topográfica (y por ende volumétrica) del terreno resulta casi imposible. Para resolver este problema se hizo un cálculo teórico del volumen de cada deslizamiento inventariado usando como base las ecuaciones 20 y 21 dadas por Simonett (1967) y Hovius et al (1997) respectivamente, estas aproximan un valor volumétrico tomando como base el área de cada deslizamiento.

$$V = 0.024 * A^{1,368},$$

Ecuación 20

$$V = 0,05 * A^{1,50}.$$

Ecuación 21

Algo importante de notar de estas ecuaciones es que solo dependen del área del deslizamiento, esto genera una relación directamente proporcional entre ambas. Es importante saber que un área puede acomodar de diversas maneras distintas cantidades de material por lo que esto es solo una aproximación y pueden divergir de la realidad. En la Figura 4.16 podemos observar la relación entre el área y el volumen.

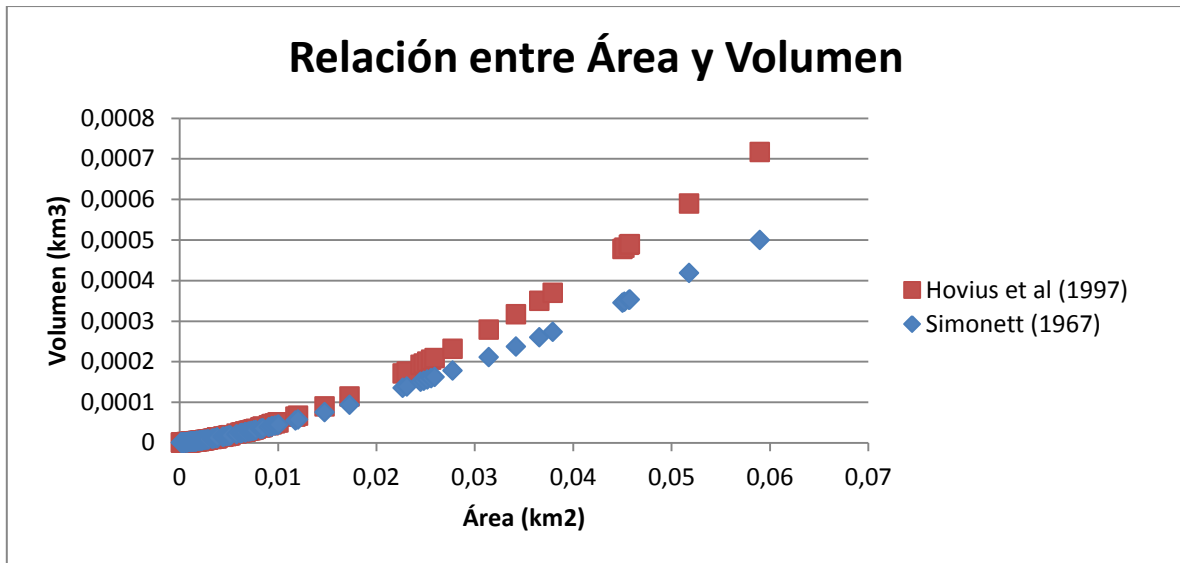


Figura 4.16: Relación entre el área y el volúmen según ambas fórmulas. Las curvas tienen una forma exponencial acorde a su función, sin embargo, la ecuación de Hovius et al (1997) tiende a estimar volúmenes mayores para una misma área.

De igual manera que con el área de los deslizamientos, se procedió a representar en un histograma el total de volúmenes estimados separándolos en distintos rangos de valor. En la Figura 4.17 se compara los mismos rangos para cada ecuación. La diferencia entre ambas ecuaciones es mínima.

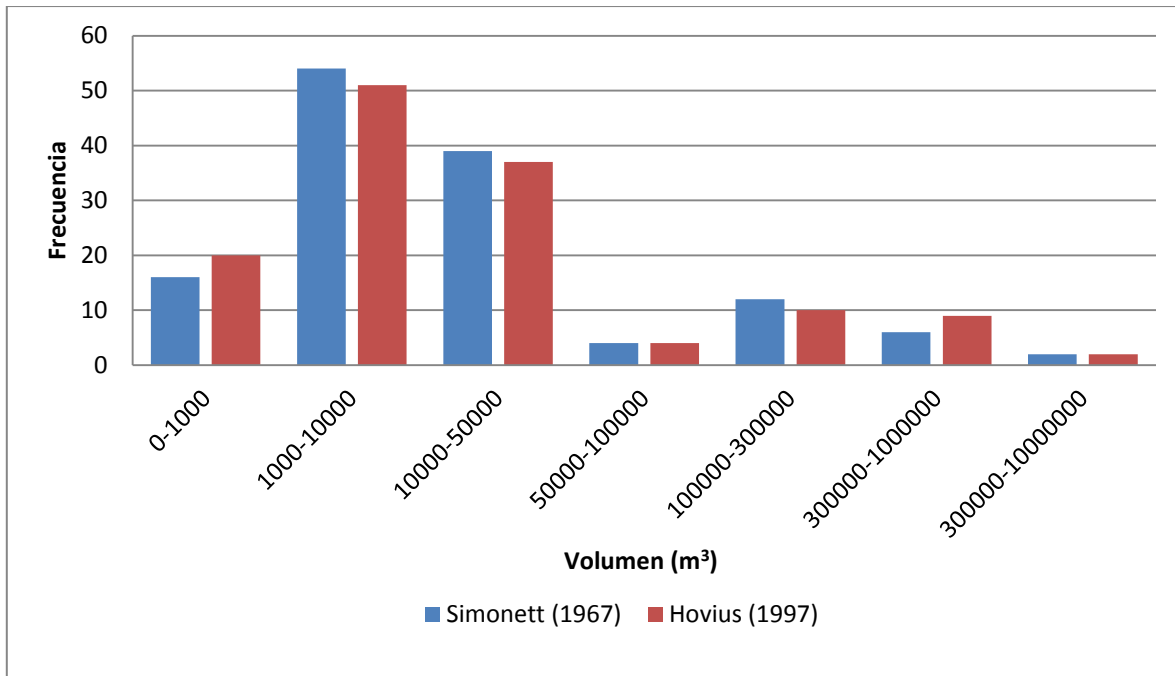


Figura 4.17 Volúmen de los deslizamientos según su frecuencia. Histograma de la cantidad de deslizamientos por rango de volúmen. Como se vé al igual que con el área los volúmenes intermedios son los dominantes, probablemente por la relación entre los parámetros y por la cantidad de deslizamientos cuya área se encuentra en estos mismos rangos.

Si relacionamos la posición de los deslizamientos con sus volúmenes se esperaría un comportamiento similar al de las áreas, para comprobar esto se graficó esta relación y efectivamente se obtuvo el mismo comportamiento (ver Figura 4.18).

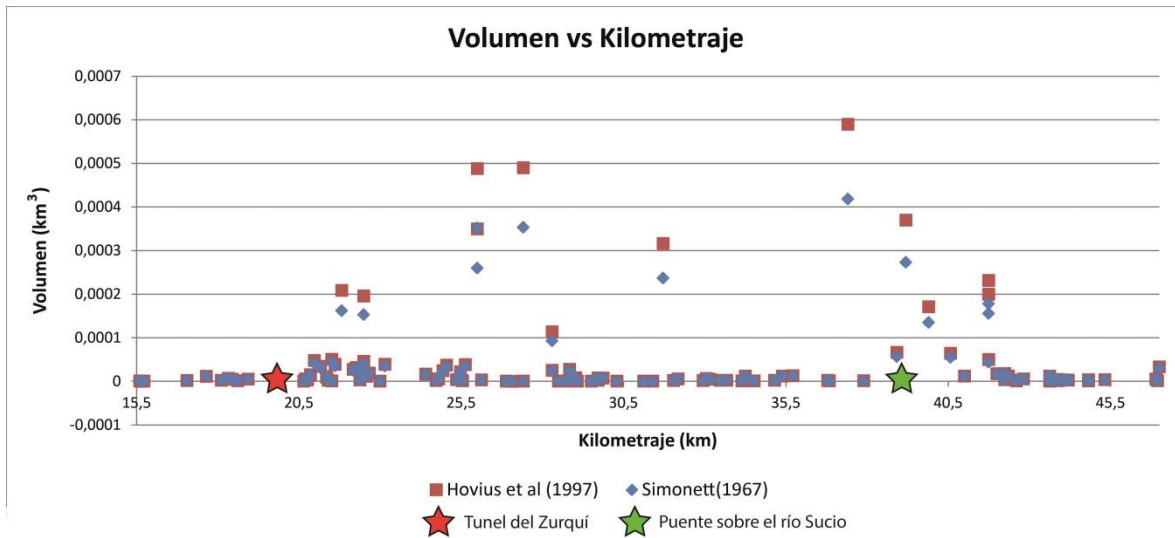


Figura 4.18: Relación entre la posición y volúmen de los deslizamientos, comparando ambas ecuaciones. La ubicación de cada punto de volúmen con respecto a los demás es similar al de las áreas, la razón de esto es la ya demostrada relación exponencial dada por las fórmulas entre ambos parámetros.

Como se mencionó anteriormente 116 de los 144 deslizamientos cartografiados (81%) se encuentran en los cortes de la carretera. Esto evidencia que el principal factor que habilita la ocurrencia de un deslizamiento es el alto ángulo de corte en los taludes, el cual en combinación con la meteorización de los materiales y el grado de saturación de los mismos dispara los distintos deslizamientos.

Como objetivo final este inventario ayudará a evaluar el desempeño del método HSQI, su función será la de comparar la existencia o inexistencia de deslizamientos con la clasificación (susceptibilidad alta, media o baja) dada por el método a una sección dada, de existir deslizamientos en una zona clasificada con susceptibilidad baja se podrá decir que el método erró, de la misma manera si no existen deslizamientos en una zona de susceptibilidad alta el método habrá errado de igual manera.

4.4.1 Clasificación de deslizamientos

Como se ha mencionado (y se mencionará) reiteradamente a lo largo de este trabajo, la información Lidar ha permitido una visualización y análisis de la topografía muy detallado de los taludes, pendientes y deslizamientos de la zona de estudio. Es por esto que se logró clasificar cada uno de los deslizamientos según Hungr (2014).

Es muy difícil hablar del material que se desliza en términos de suelo o roca ya que en realidad este es una combinación de suelo (limos), bloques de suelo, grava y roca. Esto hace que la naturaleza del material desprendido sea heterogénea, por lo tanto, según Hungr (2014) se le da a estos eventos el nombre de “Deslizamiento de escombros con limo”.

La velocidad con la que el material en el sector montañoso de la RN-32 se desliza se catalogaría según WP/WLI (1995) y Cruden & Varnes (1996) como “extremadamente rápida”, pues la velocidad a la que estos caen a la carretera no le da oportunidad a las personas cercanas de reaccionar o mucho menos evacuar. La velocidad como tal no se ha podido medir por la naturaleza casi instantánea y aleatoria de estos deslizamientos, sin embargo, WP/WLI (1995) y Cruden & Varnes (1996) indican una velocidad aproximada para estos eventos de 5 m/s o lo que sería lo mismo 5×10^3 mm/s. En los anexos se adjunta una tabla con los datos técnicos de cada deslizamiento inventariado, así como su clasificación según Hungr (2014).

Capítulo 5: Geología

5.1 Geología regional

La geología del área en estudio está indudablemente dominada por las rocas volcánicas, dado que la ruta RN-32 se encuentra desarrollada sobre la Cordillera Volcánica Central, con una fuerte influencia de la actividad eruptiva que el volcán Barva ha presentado a través de su evolución en el último millón de años (aproximadamente). Este volcán presenta una extensión de 1120-1500 km² y un volumen de 197-255 km³, lo cual lo convierte en el volcán más grande de Centroamérica en cuanto a su extensión (Alvarado, 1990). El área en la cual se realiza el trabajo se denominaba como Cerros Zurquí, su origen se le asigna a focos de emisión antigua (Dengo, 1962b), y aunque actualmente están identificados como vestigios de antigua actividad relacionada al volcán Barva no siempre fue así.

Alvarado (1984) los agrupa como “Conjunto Cerros Zurquí” y menciona que forman parte de la cordillera central y funcionan como la pared norte del Valle Central, también indica que el conjunto está conformado por los cerros Chompipe, Delicias, Tibás, Turu, Caricias, Zurquí, Hondura, Tres Marías y Achiotal. En cuanto a la litología Alvarado (1984) indica que en los cortes de la carretera a Guápiles se pueden observar coladas de lava andesítica, andesita basáltica y basaltos con textura porfírica de espesor regular (2 a 12m), menciona que en ciertos lugares se pueden notar hasta cinco flujos de lava los cuales se encuentran superpuestos entre sí y separados por piroclastos o auto-brechas.

El túnel del cerro Zurquí se construyó en una brecha volcánica compuesta por bloques decimétricos hasta métricos, la matriz está formada por clastos centimétricos y finos. El túnel corta dos diques de aproximadamente 5 m de grosor y alrededor de este se observan otros dos diques (Alvarado, 1984).

En el camino entre el río Hondura y el sitio Ventana, Alvarado(1986) indica la presencia de una inter-estratificación de lavas, tobas brechosas e ignimbritas, estas ignimbritas son primariamente flujos de pómez negra con clastos de lava y cenizas, los fiammes son abundantes, de un tamaño centimétrico a decimétrico.

Williams (1952) menciona que poco o nada es lo que queda de los cráteres originales y sugiere que la erosión pudo llegar al grado de exponer el relleno de las chimeneas centrales. También indica la presencia de andesitas piroxénicas observadas en los cortes de la carretera.

Denyer & Kussmaul (1994) nombran a este conjunto de cerros como Paleo-cordillera y la describen como basaltos olivínicos, andesitas basálticas, brechas, aglomerados volcánicos, ignimbritas, tobas, lahares, los cuales se encuentran cortados por numerosos diques basálticos. Posteriormente indican que estos depósitos volcánicos están sobreyacidos por coluvios, cenizas y depósitos fluvio-volcánicos. Una muestra de esta paleo-cordillera se dató en 0,5 Ma (Denyer & Kussmaul, 1994) lo cual concordaría con la propuesta de Gans et al (2003) de que la paleo-cordillera se originó entre 0,63 y 0,40 Ma.

Alvarado y Gans (2012) clasifican la historia eruptiva del volcán Barva en cuatro periodos basados en dataciones geoquímicas propias y una recopilación de dataciones de Carr et al (2007), Bellon & Tournon (1978) y Pérez et al(2006) (Tabla 5.1). El primer periodo Proto-Barva (de 1,2 a 0,89 Ma) que también fue propuesto por Gans et al(2003) en una edad de 0,98 y 0,85 Ma, el segundo periodo fue el crecimiento de nuevos focos efusivos denominados Paleo-Barva (0,57-0,40 Ma) al cual Gans et al (2003) data en 0,63 a 0,40 Ma , varios flujos ignimbríticos (0,50-0,49 Ma) y por último el Neo-Barva (0,26 – 0 Ma) que corresponde al edificio volcánico actual.

Tabla 5.1

Resumen de las dataciones usadas por Alvarado y Gans (2012) para definir las etapas evolutivas del Volcán Barva

Ubicación	Edad (Ma)	Referencia
Proto-Barva		
Finca La Selva 1152957.348-499416.011	1,2 ± 0,1	Alvarado (1990)
RN-32 1117905.946-503353.868	0,889 ± 0,012	Alvarado y Gans (2012)
Paleo-Barva		
RN-32 1115757.568-230400	0,570 ± 0,020	Alvarado y Gans (2012)
Ignimbritas del Bajo La Hondura y de Puente de Mulás		
La Reforma 1100725.302-475688.765	0,505 ± 0,010 0,480 ± 0,020	Alvarado y Gans (2012)
Cerca del Túnel Zurquí 1113357.986-501824.226	0,501 ± 0,010 0,501 ± 0,024	Alvarado y Gans (2012)
Tajo Pedregal 1102293.121-480604.857	0,496 ± 0,016	Alvarado y Gans (2012)
Tajo La Pista 1107650.797-460672.148	0,490 ± 0,015	Alvarado y Gans (2012)
Cerca del Túnel Zurquí 1113458.018-501774.329	0,439 ± 0,025	Alvarado y Gans (2012)
Lavas Cerros Zurquí (Paleo-Barva, Post Ignimbritas)		
Cantón de Tibás 1112767.200-493074.433	0,5 ± 0,075	Bellon & Tournon (1978)
Río Lajas 1111164.689-495621.795	0,427 ± 0,008	Alvarado y Gans (2012)
Río Lajas 1110464.765-495622.055	0,427 ± 0,006	Alvarado y Gans (2012)
Río Lajas 1110714.736-495622.055	0,426 ± 0,014	Alvarado y Gans (2012)
Río Lajas 1110714.736-495622.055	0,405 ± 0,020	Alvarado y Gans (2012)
Cerro Zurquí 1111164.689-495621.795	0,400 ± 0,040	Alvarado y Gans (2012)
Neo-Barva		
Cerca del puente sobre el Río Volcán 1141601.719-481692.378	0,262 ± 0,010	Carr et al (2007)

Continuación tabla 5.1

Ubicación	Edad (Ma)	Referencia
Bijagual 1149951.194-491185.450	0,259 ± 0,009	Carr et al (2007)
3km de Magsasay 1150783.552-491740.279	0,246 ± 0,017	Carr et al (2007)
Quebrada Lajas 1140901.683-483677.511	0,201 ± 0,020	Carr et al (2007)
Lavás post-Ignimbritas (Barva)		
Bajo puente del ferrocarril, cerca del Tajo Pedregal 1103133.281-478415.934	0,270 ± 0,006	Pérez et al (2006)
Autopista cerca del Aeropuerto Juan Santa María 1105685.110-476368.746	0,258 ± 0,005	Pérez et al (2006)

Las rocas correspondientes al Proto-Barva son descritas por Alvarado (1990) cerca de la confluencia de los ríos Sarapiquí y Puerto Viejo (unos 32 km al norte del Volcán Barva), las describe como una colada de lava andesíticas de coloración gris oscuro a negra, con poca presencia de fenocristales y una textura fluidal, de estar meteorizadas presentan un gris claro a café lo cual hace confundirse con tobas, su edad datada con K/Ar se proyecta en 1,2 ma y se le considera como la colada más antigua del volcán (Alvarado y Gans, 2012). Esto coincide con la propuesta de una Proto-Cordillera Central expuesta por Gans et al (2003).

Alvarado y Gans (2012) datan una muestra (CR-233) proveniente de la RN-32 mediante el uso de $^{40}\text{Ar}/^{39}\text{Ar}$, los resultados presentan una edad de 0,9 Ma por lo que la asocian con la etapa Proto-Barva.

5.2 Geología local

A lo largo del tramo en estudio las litologías observadas en el campo corresponden a basaltos, brechas y flujos piroclásticos. Las litologías aparecen en varias zonas a lo largo del área de estudio, sin embargo, los flujos de lavas basálticas conforman la mayor parte de la ruta. Los taludes de este tramo, como fue indicado en el capítulo de geomorfología (capítulo 5), presentan ángulos y pendientes altas, además, altos niveles de cobertura vegetal, aspectos que dificultaron el cartografiado geológico de la sección de estudio, por consiguiente, a cada sección de estudio (ver capítulo 3) se le asignó la litología observada al nivel de la calle, los afloramientos visitados se muestran en la Figura 5.1.

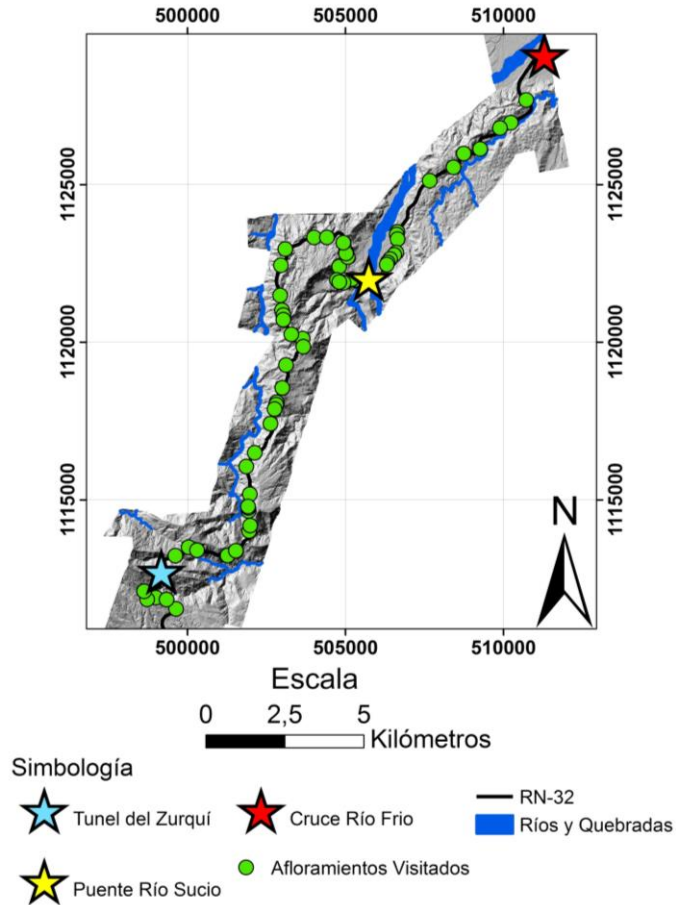
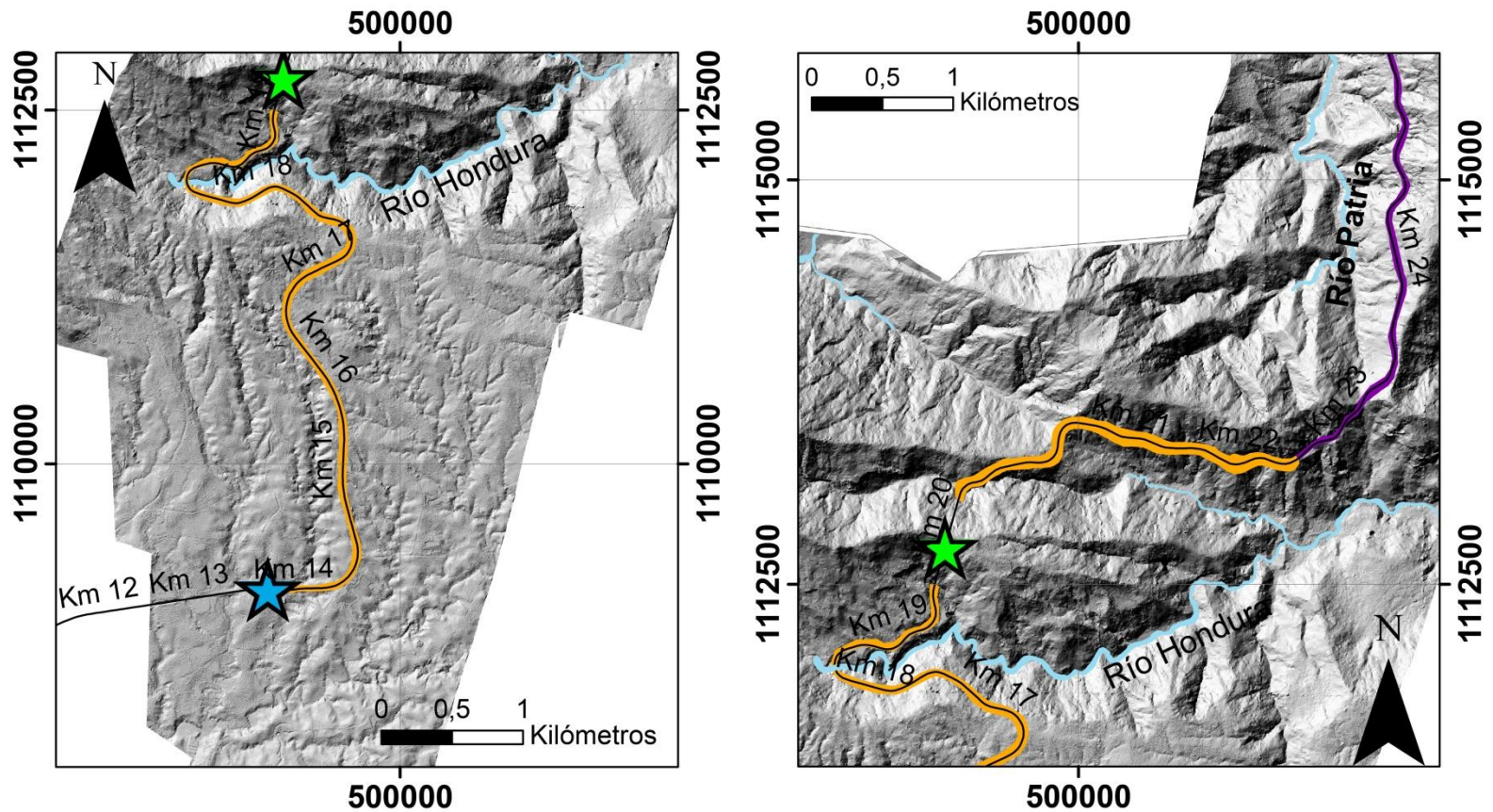


Figura 5.1: Ubicación de los afloramientos visitados para la confección del cartografiado geológico.

Como se mencionó anteriormente en la zona de estudio afloran lavas, brechas y flujos piroclásticos (tobas cristalinas), estas fueron tomadas como las unidades principales del área, cualquier otro cambio composicional dentro de estas unidades se clasificó como una subunidad de las mismas. En las Figuras 5.2, 5.3 y 5.4 se presenta el cartografiado geológico resultado del trabajo de campo. Es importante recordar que el cartografiado se limitó a los taludes del corredor vial en estudio debido a la gran altura y cantidad de vegetación de los mismos, los cuales imposibilitaron una investigación más allá de la carretera.



Simbología

-  Peaje RN-32
-  Tunel del Zurquí
-  Puente Río Sucio
-  Cruce Río Frio

- Unidad Lavas**
-  Subunidad Lavas Olivínicas
 -  Subunidad Lavas Molinete
 -  Subunidad Lavas río Sucio

Mapa Geológico A

Estacionamientos Aproximados (13+000 a 26+000)





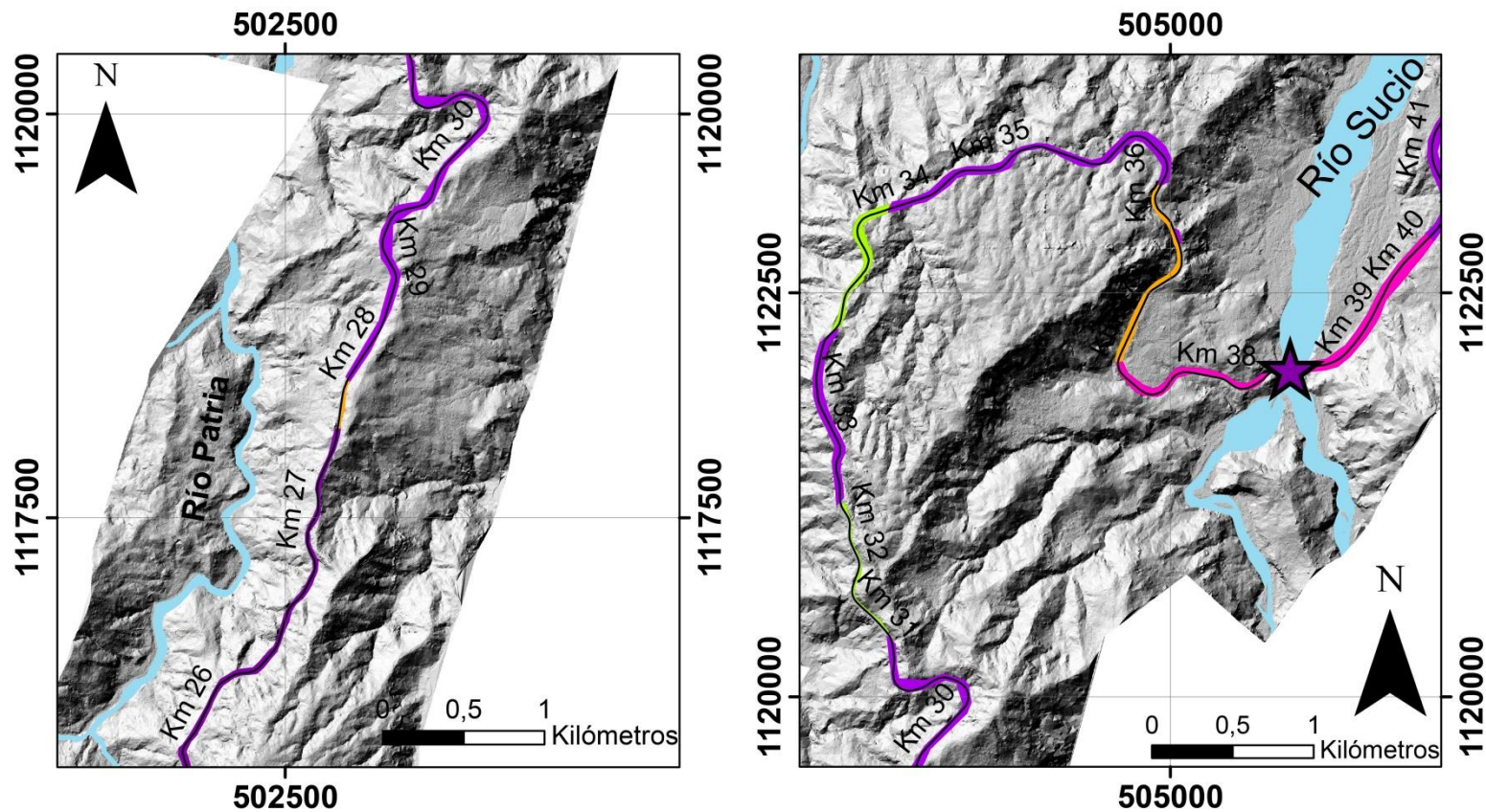
-  Unidad Brecha
-  Unidad Flujos
-  Ríos y quebradas
-  Área con información LIDAR

Figura 5.2: Mapa geológico de la zona mas al sur del área de estudio, la cual es dominada por brechas. Esta zona a su vez es la de mayor altitud en todo el tramo estudiado.



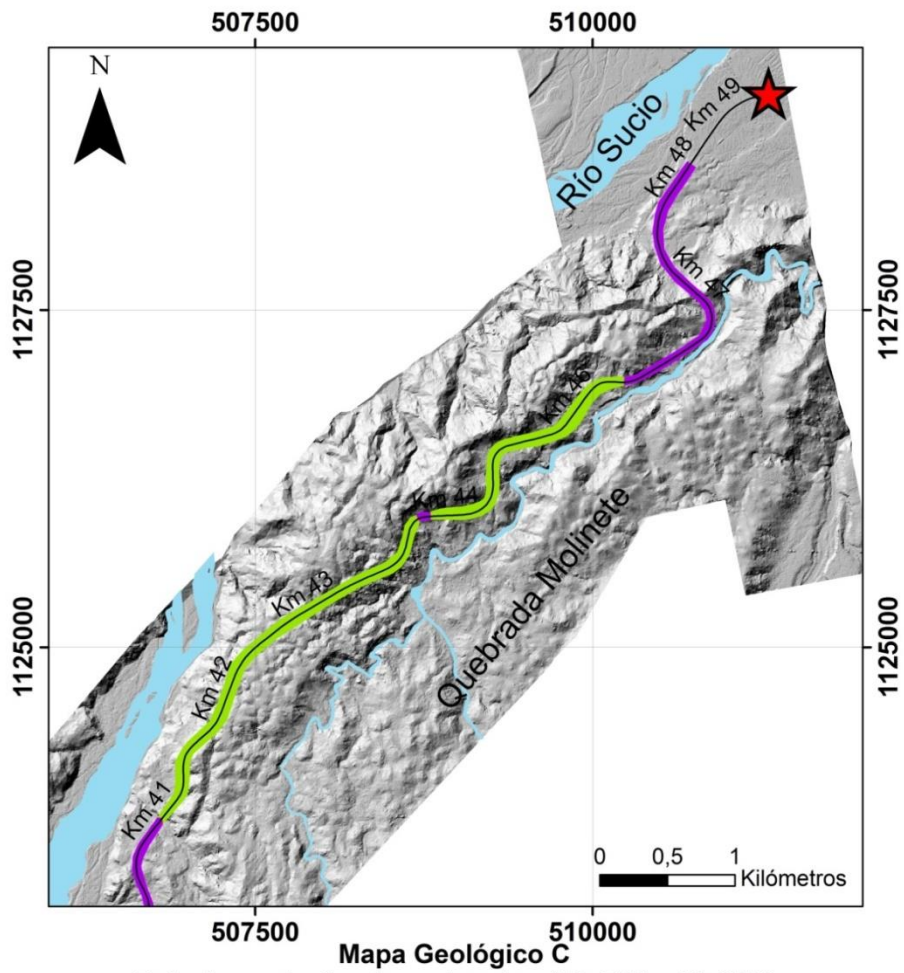
Simbología

-  Peaje RN-32
-  Tunnel del Zurquí
-  Puente Río Sucio
-  Cruce Río Frio

Mapa Geológico B Estacionamientos Aproximados (25+100 a 41+500)

- | | |
|---|--|
|  Subunidad Lavas Olivínicas |  Unidad Brecha |
|  Subunidad Lavas Molinete |  Unidad Flujos |
|  Subunidad Lavas río Sucio |  Ríos y quebradas |
| |  Área con información LIDAR |

Figura 5.3: Zona media del área de estudio. La geología en esta parte de la carretera es una sucesión de lavas (las cuales dominan en este sector), flujos piroclásticos y brechas.



Mapa Geológico C
Estacionamientos Aproximados (40+500 a 50+000)

Simbología

- | | | | | | |
|--|------------------|--|----------------------------|--|----------------------------|
| | Peaje RN-32 | | Unidad Lavas | | Unidad Brecha |
| | Tunel del Zurquí | | Subunidad Lavas Olivínicas | | Unidad Flujos |
| | Puente Río Sucio | | Subunidad Lavas Molinete | | Ríos y quebradas |
| | Cruce Río Frio | | Subunidad Lavas río Sucio | | Área con información LIDAR |

Figura 5.4: Zona norte del área de estudio. A diferencia de las zonas anteriores, son los flujos piroclásticos los que dominan en este sector.

En los siguientes apartados se profundiza en la extensión, macroscopía y microscopía (de las lavas y flujos piroclásticos) de las unidades.

5.2.1 Unidad brechas

La unidad de brechas aflora en varios sectores de la carretera, en total la unidad presenta 9,4 Km de extensión a lo largo de esta, sin embargo, su afloramiento más importante se encuentra del estacionamiento 17+400 al estacionamiento 22+700, esto incluye el tramo del túnel del Zurquí (el cual se encuentra en el estacionamiento 19+400), ver Figura 5.2.

Esta unidad es muy heterogénea en cuanto a la composición de sus clastos, sin embargo, todos son volcánicos, lo cual es indicativo que durante el proceso de depositación su ambiente dominante fue ígneo. Los tipos de clastos varían de lavas afíricas y lavas porfíricas a escorias con tamaños vesiculares milimétricos a centimétricos (no más de 2 cm).

En general los clastos como se mencionó anteriormente son muy heterogéneos, sus tamaños pueden variar de centimétricos a decimétricos. Los porcentajes de clastos dentro de la matriz son más homogéneos, estos no llegan a superar el 20% a excepción de casos muy puntuales como lo es el estacionamiento 19+000 donde a aproximadamente 4m de altura aparece un lente con un porcentaje de clastos mayor (aproximadamente 30%), ver Figura 5.5. La angularidad de estos clastos es muy alta y su redondez muy leve, por lo que se presume que su depositación fue muy rápida. En el estacionamiento 18+250 es posible observar una gradación inversa en las brechas.



Figura 5.5: Estacionamiento 19+000, a aproximadamente 4 m de altura se observa un paquete de brechas con una mayor densidad de bloques que las unidades que lo rodean.

La meteorización de esta unidad varía según su ubicación, las zonas más centrales del área de estudio tienden a presentar estados más sanos mientras que en los extremos, la meteorización es mayor. A manera de ejemplo, en el estacionamiento 17+200 (Figura 5.6) presenta pátinas, oxidación y en general meteorizaciones muy altas, es tal el caso que en estos lugares la única evidencia de la presencia de clastos es un cambio de coloración en la matriz puesto que su dureza es similar o igual a la de un suelo.

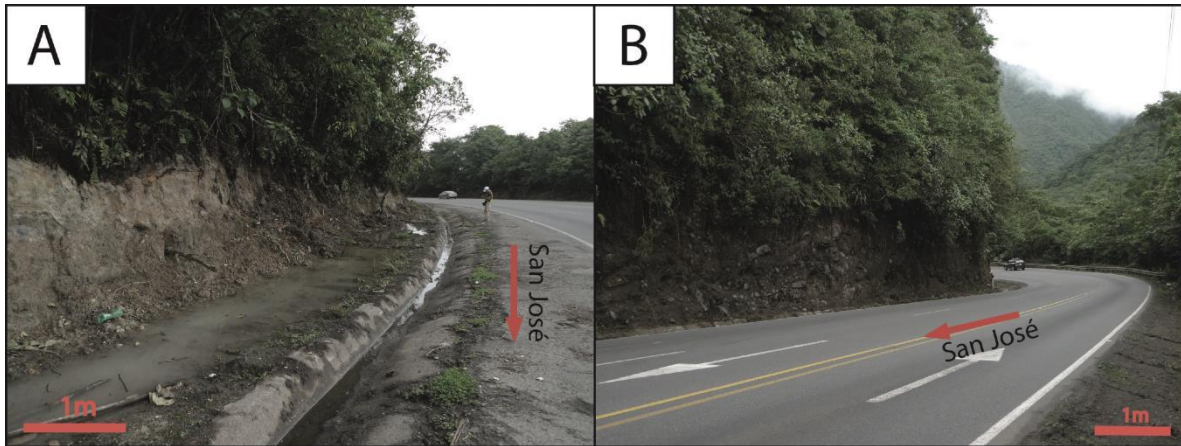


Figura 5.6: Comparación entre dos afloramientos de brechas. A) muestra una brecha completamente meteorizada, con características más cercanas a un suelo que a una roca, estas se ubican en el estacionamiento 17 de la ruta. B) muestra otro afloramiento de brechas, sin embargo, estas están más sanas, la matriz está más consolidada y los clastos presentan una dureza propia de una roca. Entre ambos puntos hay una distancia de aproximadamente 900m.

5.2.2 Unidad flujos piroclásticos

Los flujos piroclásticos que afloran a lo largo de la carretera se extienden por 7,2 Km, su principal concentración se encuentra en la zona posterior al puente sobre el río Sucio, específicamente en los estacionamientos 41 a 46 de la carretera, sin embargo, también hay afloramientos en los estacionamientos 31 a 34.

En macroscopía los flujos presentan una significativa heterogeneidad en cuanto a su composición, la matriz de estos es de ceniza y su porcentaje de bloques es variable. El flujo observado más común presenta bloques decimétricos escoriáceos de una tonalidad muy oscura cuando están sanos y marrones cuando se meteorizan (ver Figura 5.7).

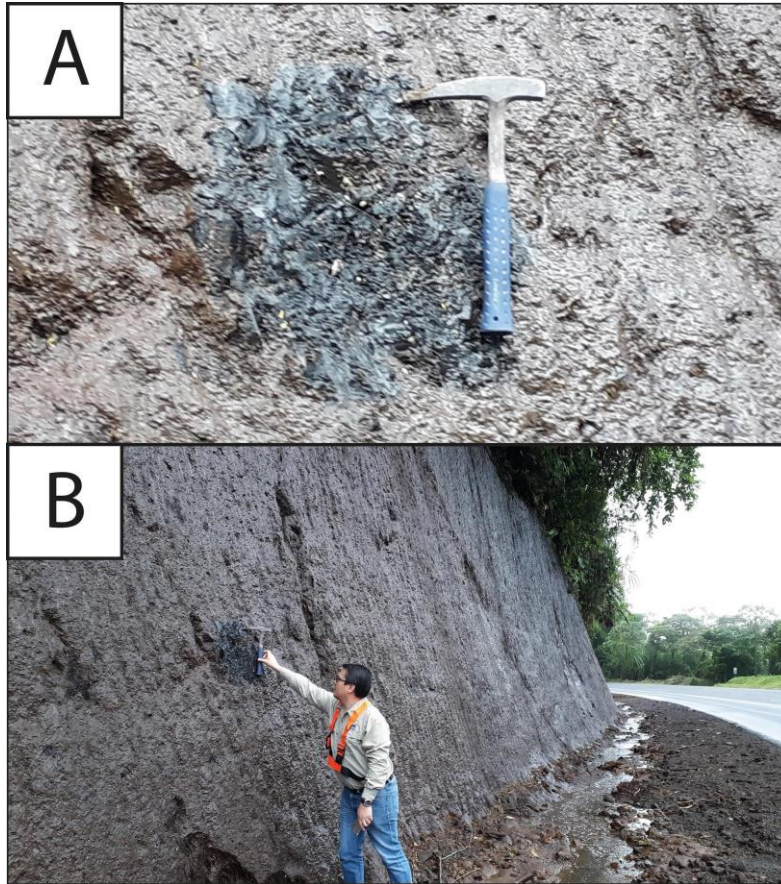


Figura 5.7: Uno de los flujos piroclásticos observados en la carretera. Este afloramiento presenta una meteorización leve, los bloques de escorias poseen un tamaño decimétrico con una redondez y esfericidad buena. Esta subunidad con escorias negras aparece recurrentemente a lo largo del tramo en estudio, sin embargo, presenta diferentes niveles de meteorización. El porcentaje de estos bloques en la matriz se aproxima al 7 u 8%.

Los distintos flujos aparecen de manera sucesiva a lo largo de los estacionamientos 41 a 46. La transición entre los distintos flujos varía entre contactos netos y transicionales, cortes diagonales. Los grados de meteorización de la misma manera son heterogéneos, flujos con una dureza muy alta pueden estar a la par de otros flujos más meteorizados y cercanos a un suelo (ver Figura 5.8).

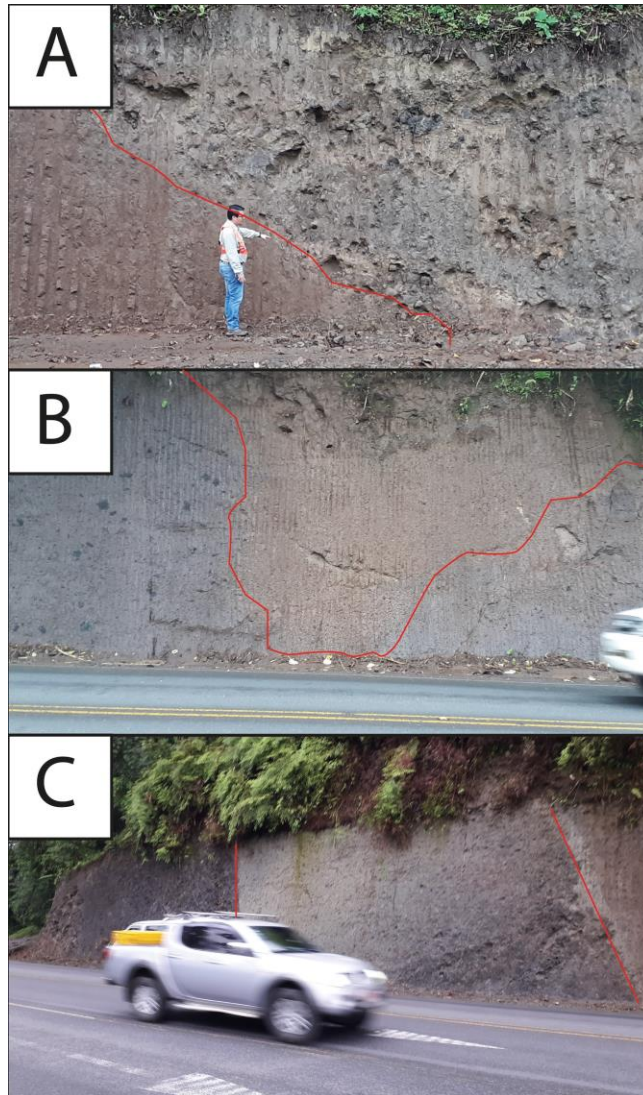


Figura 5.8: A) muestra la rápida transición entre un flujo homogéneo de coloración marrón (izquierda) y uno de aspecto más blocoso y grisáceo (derecha). B) evidencia una transición difusa entre el flujo grisáceo con bloques escoriáceos y el flujo homogéneo marrón. C) muestra contactos netos entre diversos flujos, estos contactos son fallas normales posiblemente asociadas a la falla Guápiles o Río Sucio.

Fue posible realizar un análisis microscópico a uno de los flujos ubicados en la zona anterior al puente sobre el río Sucio, la muestra se obtuvo del estacionamiento 31+900 donde los flujos tienen un nivel de meteorización bajo. El flujo muestra una matriz de ceniza (52,9%) con un 28,5% de fiames (en su gran mayoría recristalizados), una leve presencia de vesículas (10,2%) y un porcentaje bajo de clastos (Litoclasto 3,1%, Cristaloclasto 3,3%, Vitroclasto 0,1%). Bajo estos componentes se nombró al flujo como una toba cristalina. En la Figura 5.9 se puede apreciar una fotografía tomada a la sección delgada de la muestra de toba.

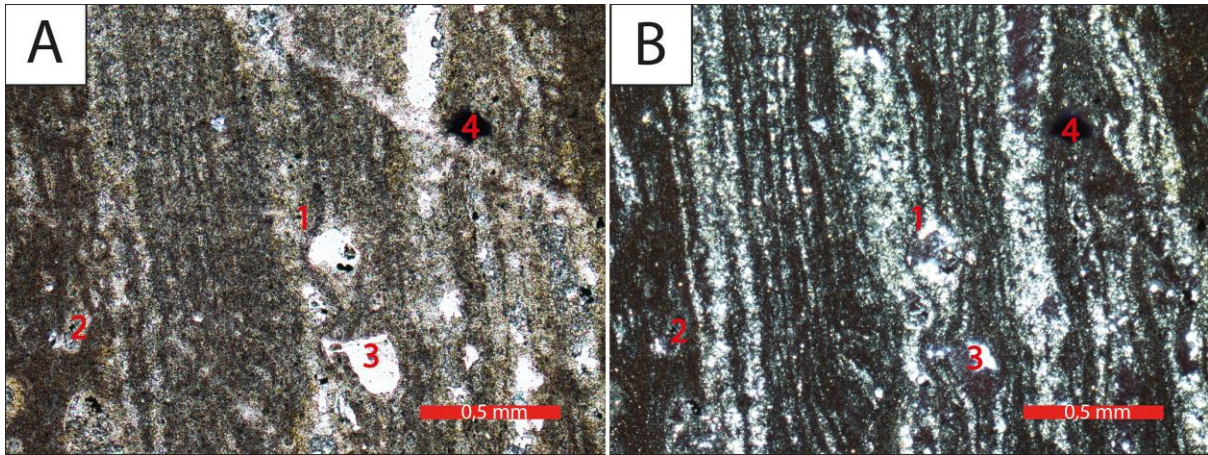


Figura 5.9: A) muestra una fotografía a nicoles paralelos de la sección analizada, B) muestra la misma sección, pero a nicoles cruzados. El punto uno marca el típico flames recristalizado encontrado a través de toda la sección. El punto dos muestra un litoclasto ya meteorizado, tres marca una vesícula posiblemente producto del corte de la roca. El número cuatro muestra un mineral opaco.

Debido a la heterogeneidad en composición y en meteorización es posible deducir que la zona en las que estos flujos afloran se formó por la sucesión de distintos eventos piroclásticos, los cuales fueron posteriormente afectados por tectonismo debido a su cercanía con la falla Guápiles o la Río Sucio. Lastimosamente de las dataciones que brindan Alvarado y Gans (2012) no hay ninguna que se acerque a esta unidad por lo que darle una edad y asociarlos a las formaciones Proto, Paleo o Neo Barva sería muy difícil y de baja exactitud.

5.2.3 Unidad lavas

El área de estudio está conformada en su mayoría por esta unidad, la cual representa un aproximado de 17,3 kilómetros de la totalidad de la zona. Su principal exposición se presenta en el tramo entre el túnel del Zurquí y el puente sobre el río Sucio, en los estacionamientos 23 a 27 específicamente.

La principal estructura que presentan estos afloramientos es el diaclasamiento (ver Figura 5.10). A lo largo del tramo de estudio el diaclasamiento varía en cantidad de familias, buzamiento y orientación de planos. Ahora bien, en varias zonas es posible identificar una familia de diaclasas que buzan hacia la carretera (desfavorable a la estabilidad del talud), donde el rumbo general de la carretera N-S (0° - 180°) hace que los planos que afecten negativamente la estabilidad de los taludes deban estar buzando en direcciones cercanas a E-W (90° - 270°).

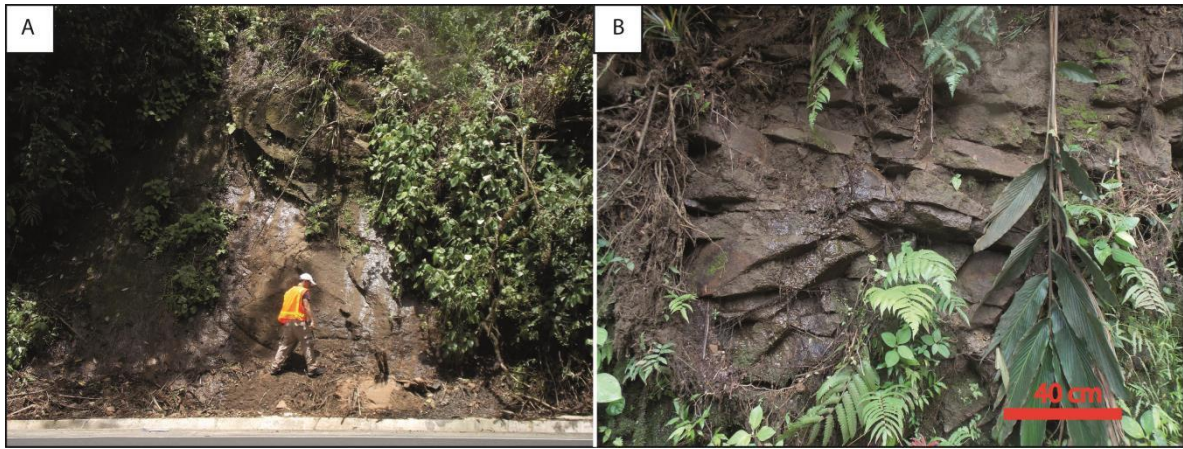


Figura 5.10: Afloramientos de lavas expuestos por un deslizamiento en el tramo montañoso de la RN-32. Tanto A como B presentan lavas diaclasadas. Como se ha mencionado anteriormente estas lavas juegan un papel de plano de debilidad por sobre el cual se desliza el material más meteorizado.

Similar a los flujos piroclásticos estas lavas presentan diferencias en su composición mineralógica. A lo largo del trayecto se pueden observar lavas afíricas, lavas con fenocristales de plagioclasa y piroxeno, lavas cuyos únicos fenocristales son plagioclasas de tamaño centimétrico y lavas escoriáceas. Los contactos entre cada uno de estos tipos son difíciles de observar, puesto que, la mayor parte de los taludes está cubierta por vegetación. A pesar de ello, es posible definir áreas aproximadas en las cuales cada litología aflora. En la Figura 5.10 se observan rocas extraídas de afloramientos en las tres distintas subunidades definidas para esta litología.

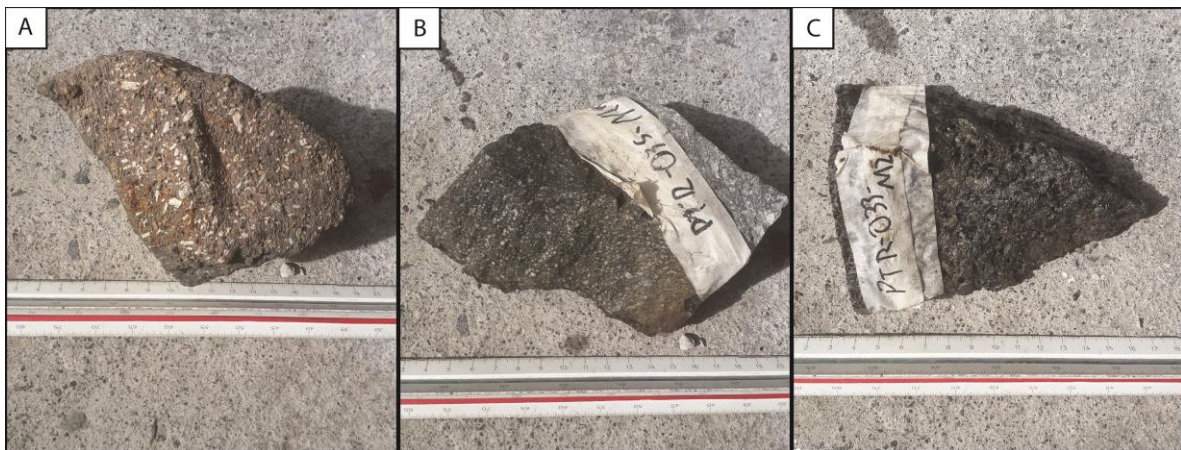


Figura 5.10: Muestras macroscópicas representativas de las tres subunidades descritas para la unidad de Lavas. A) Subunidad Lavas río Sucio. B) Subunidad Lavas Olivínicas. C) Subunidad Lavas Molinete

5.2.3.1 Subunidad lavas río Sucio

Esta subunidad se encuentra en los kilómetros cercanos al puente sobre el río Sucio (a ambos lados), entre los estacionamientos 38+000 y 40+000. Su principal característica es la presencia (en macroscopía) de plagioclasas de tamaño centimétrico (1-2 cm) y pocos o ningún piroxeno u otros minerales. Estas plagioclasas, si bien son de gran tamaño, muestran una forma tabular por lo que asume que no es una hidratación de estas las que las hace ser de estas dimensiones. Las rocas de esta subunidad son de coloración gris marrón con una patina superficial de coloración café.

El análisis microscópico (ver Figura 5.11) resultó en un basalto vesicular con porcentajes de plagioclasa (33%), vesículas (25%), piroxenos (6%), biotita (5%), opacos (1,8%) y cuarzo (1,5%). La matriz es vitrofírica con plagioclasa (8,2%) y biotita (<1%), el vidrio presenta una tonalidad negra. Los minerales se encuentran en un estado hipidiomórfico con pocas excepciones ideomórficas.

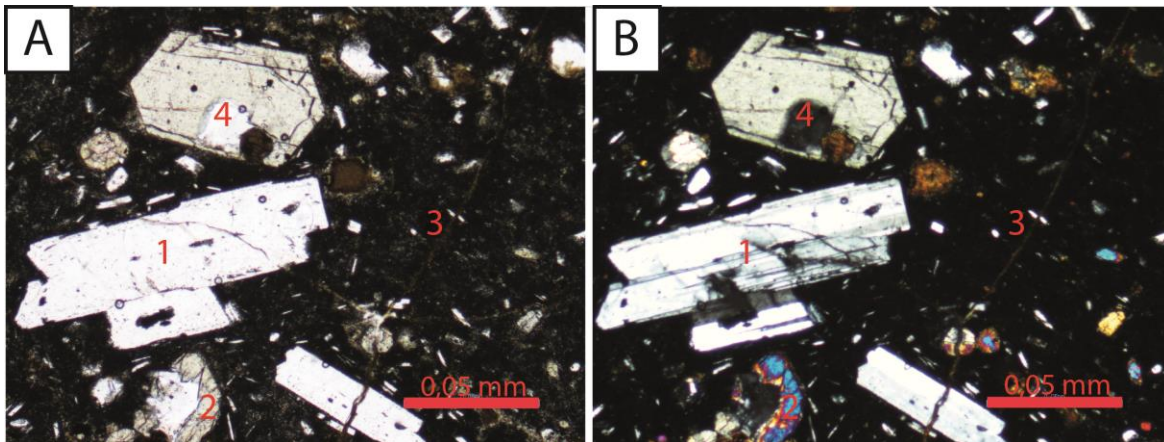


Figura 5.11: A y B muestran fotografías en nícoles paralelos y cruzados (respectivamente) de la roca presente en el estacionamiento 39+100. En las fotografías se aprecia una plagioclasa (1), un piroxeno (2), vidrio (3) y una vesícula (4).

5.2.3.2 Subunidad lavas olivínicas

Presente en los estacionamientos 23+000 a 28+000 de la carretera. De tonalidad grisácea con fenocristales en macroscopía no mayores a 2mm, la roca se encuentra sana a ligeramente meteorizada (a excepción de los estacionamientos 28+100 y 29+600 donde está es elevada). El diaclasamiento es variado, sin embargo, una buena parte de esta subunidad presenta una familia de

diaclasas que buzan desfavorable a la estabilidad (dirección aproximada de 260°), lo cual la hace más susceptibles a deslizamientos o caída de material en general.

Esta unidad a diferencia de Lavas río Sucio no presenta una característica especial en macroscopía, si no que se definió por la leve presencia de olivino en su composición. Este olivino varía su porcentaje en la roca de un máximo de 14% a un mínimo de 1%. Los demás minerales (plagioclasa, piroxenos, biotita) varían su porcentaje, sin embargo, la plagioclasa es siempre dominante con un máximo de 80% y un mínimo de 10%. Las texturas son holocristalina, hipocristalina, seriadas, algunas presentan glomeroporfirismo o vesículas. Las muestras hipocristalinas presentan una matriz compuesta en un gran porcentaje (90%-30%) de plagioclasa, con menos de 10% de otros minerales como piroxenos y biotitas (ver Figura 5.12).

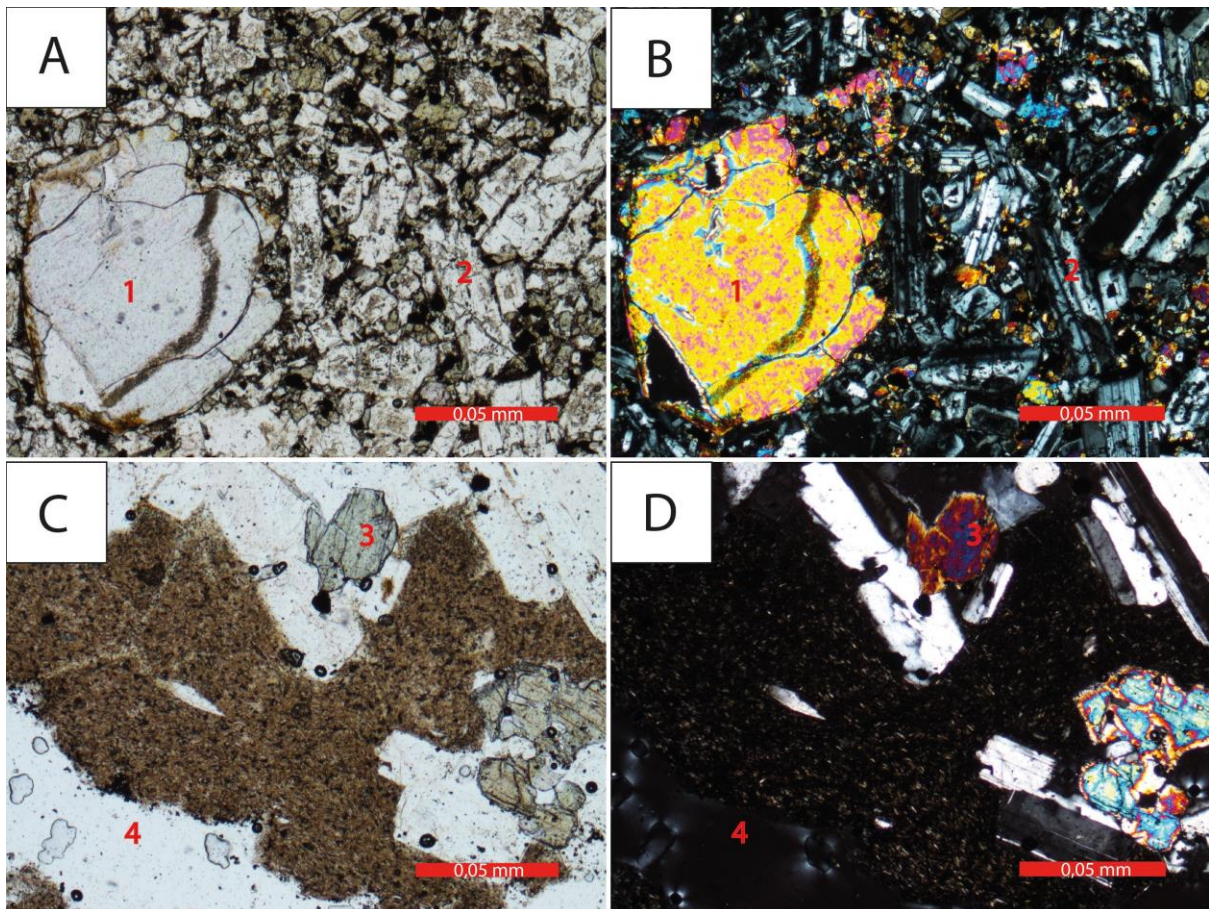


Figura 5.12: A y B muestran fotografías en nícoles paralelos y cruzados (respectivamente) de la roca presente en el estacionamiento 28+825. El punto uno marca un olivino hipidiomórfico con presencia de iddingsita, el número dos muestra una plagioclasa. En C y D se muestra una roca hipocristalina del estacionamiento 28+100. El punto tres muestra un piroxeno y el cuatro una vesícula.

5.2.3.3 Subunidad lavas molinete

El resto de la unidad lavas se clasificó por ser basaltos con presencia de piroxenos pero sin olivinos. A diferencia de las anteriores dos unidades estas no se encuentran concentradas en una sola zona de la carretera, sino que se distribuyen en el área entre las otras dos subunidades que no están ocupadas por las unidades Flujos piroclásticos o Brechas (ver Figura 5.12).

Estas lavas presentan un porcentaje de plagioclasa entre 30%-15%, los piroxenos no superan el 10% de la roca, el porcentaje más alto de estos en la roca es de un 10% en las cercanías del estacionamiento 41+100, los minerales opacos no sobrepasan el 3% y la biotita se presenta como un mineral accesorio en la mayoría de las secciones delgadas analizadas. La matriz en esta subunidad es mayoritariamente vitrofírica, los porcentajes de vidrio en esta varían de 80% a 10%, en los casos en que el vidrio no predomina en la matriz, es cuando la plagioclasa es mayoría. En la Figura 5.13 se observa ejemplos de secciones delgadas de afloramientos dentro de esta subunidad.

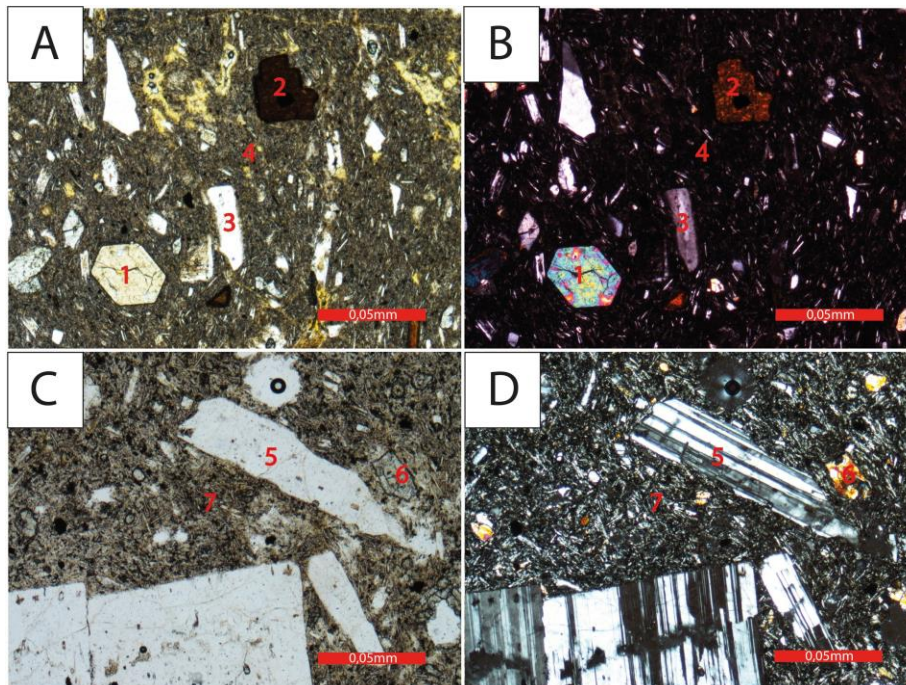


Figura 5.13: A y B muestran la roca presente en el estacionamiento 41+200. El punto uno señala un piroxeno idiomórfico, dos muestra una biotita, tres marca una plagioclasa y cuatro se encuentra en una matriz vitrofírica. Las rocas de C y D se extrajeron del estacionamiento 41+100, el punto cinco muestra una plagioclasa mientras que seis un piroxeno. El número siete marca una matriz conformada por cristallitos de plagioclasa, esta matriz a diferencia de A y B es mayoritariamente plagioclasa.

Capítulo 6: Aplicación de la metodología Hill Slope Quality Index

El procedimiento para la aplicación del método HSQI fue desglosado en los capítulos de Marco Teórico (capítulo 2) y Metodología (capítulo 3). El primer paso para aplicar el método HSQI es estudiar y analizar las características intrínsecas de la zona, estas corresponden a la geología, la geomorfología, el drenaje y los parámetros geomecánicos de los materiales que afloran en las distintas secciones. La geología, geomorfología y el drenaje ya fueron analizadas en sus capítulos respectivos por lo que este capítulo se centrará en los estudios geomecánicos y en la ejecución del método como tal.

6.1 Delimitación de las secciones

Del cartografiado geológico se obtuvo un total de 3 unidades geológicas principales: Lavas basálticas, Flujos Piroclásticos y Brechas. Estas 3 unidades constituyen la primera base con la cual se definirán las secciones. La segunda base son las unidades geomorfológicas que envuelven la carretera, en este caso las Montañas y Colinas de muy alta, alta, moderada y baja pendiente, y el abanico aluvial en los últimos kilómetros del tramo en estudio. Cabe destacar que las secciones sobre el abanico aluvial fueron descartadas ya que estas no presentan taludes o pendientes, tornando el análisis de susceptibilidad a deslizamiento innecesario. El último aspecto para la delimitación de las secciones es el drenaje, ya sea paralelo, convergente o convexo.

Como se mencionó anteriormente una sección requiere tener una sola unidad geológica, geomorfológica y un solo tipo de drenaje para que pueda ser definida. En la Figura 6.1 se muestra un ejemplo de un sector de la carretera con las distintas unidades usadas para definir las secciones.

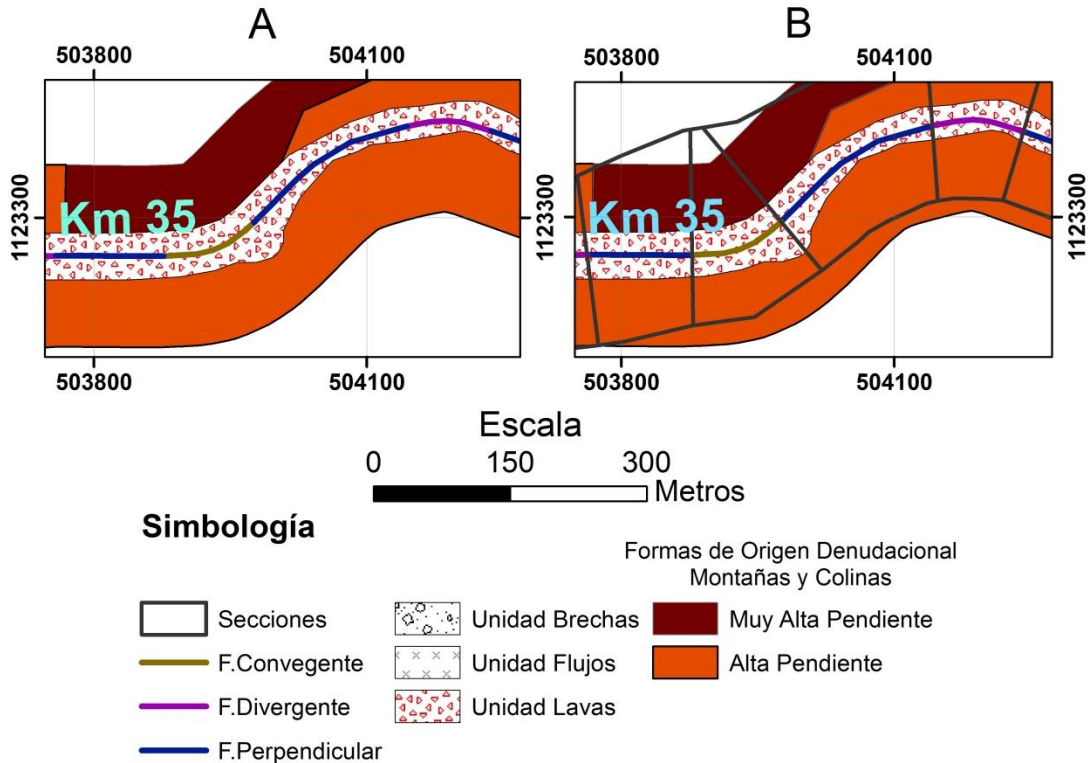


Figura 6.1: Estacionamiento 35 de la carretera (vista de planta). A) muestra las diferentes capas que se usaron para delimitar las secciones. B) muestra las mismas capas con las secciones ya establecidas. Nótese que las secciones están divididas de acuerdo al método. En el caso de la geomorfología se estableció la unidad de altas pendiente como la base ya que es la que se presenta en la mayoría de este tramo.

El total de secciones resultantes al analizar los distintos criterios de división fue de 212, las cuales en general no tienen una longitud mayor de 250 m. Algunas secciones presentan una longitud levemente mayor, puesto que, la distancia entre el límite de los 250 m y el inicio de una nueva sección según los parámetros, ya antes mencionados era muy corta (ej: 10 m), esto resultaba en dos opciones a considerar: hacer una sección de tan solo 10 m de longitud o expandir la sección anterior a 260 m. La última opción fue la elegida ya que hacer secciones tan cortas no tiene mucho sentido al momento de evaluar un tramo tan largo y al mismo tiempo se evita el aumento innecesario de secciones. En la Figura 6.2 se puede apreciar la carretera con el total de secciones definidas.

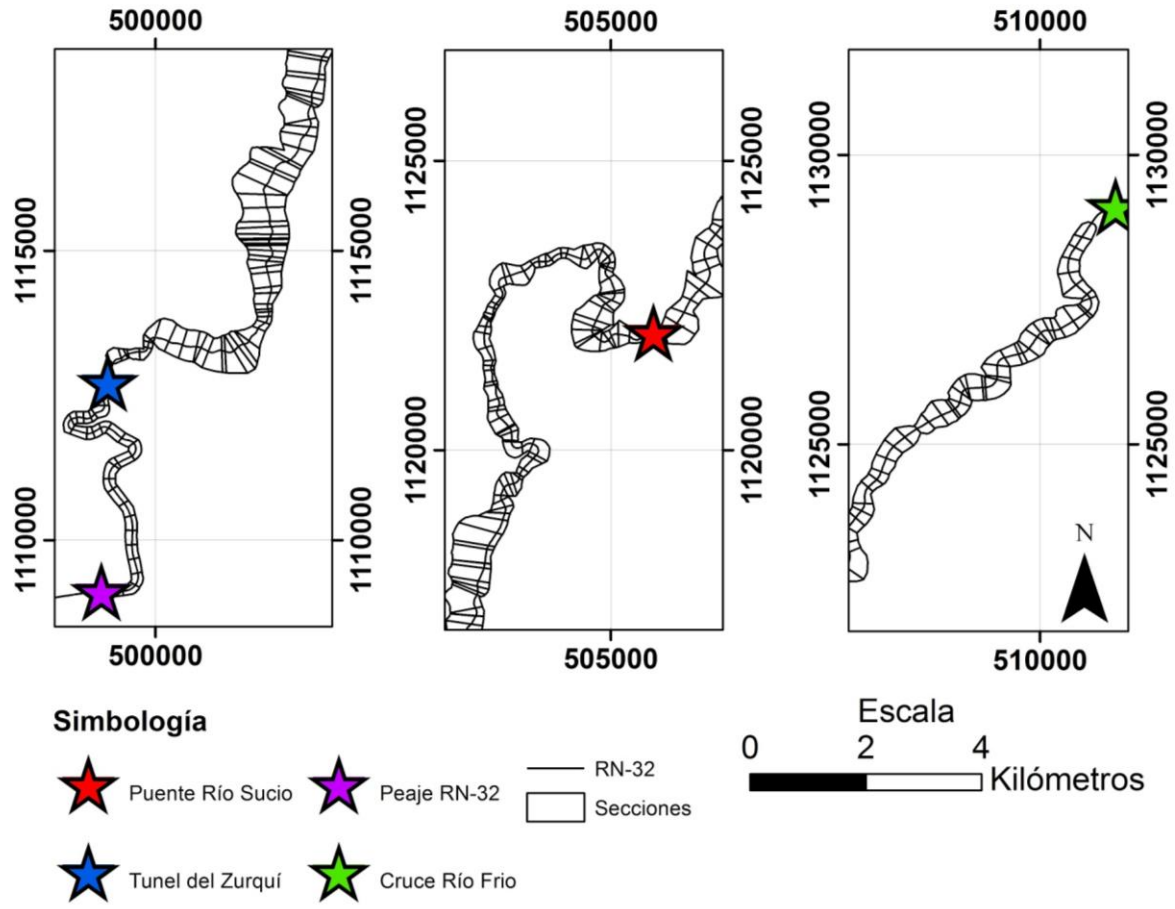


Figura 6.2: Totalidad de secciones definidas. La geometría de las secciones es muy heterogénea, esto refleja los cambios en las longitudes de las laderas y en los parámetros geológicos, geomorfológicos y de drenaje.

Como se mencionó anteriormente en el capítulo 3, el ancho de las secciones (perpendicular a la carretera) está sujeto a la topografía. Los límites en este eje se sitúan en donde haya un cambio de pendiente significativo (en muchos casos se usa la divisoria de aguas), por ende, entre el túnel de Zurquí y el puente sobre el río Sucio hay secciones muy anchas, las cuales son producto de la ladera producida por el río Patria (el cual funciona como límite inferior).

A cada una de las secciones se le calculó la altura y el ángulo de la pendiente, como se mencionó en el capítulo de metodología. El ángulo y la altura que se van a usar en las secciones debe primero medirse en las pendientes superior e inferior de la carretera, cabe resaltar que, cada sección puede presentar grandes heterogeneidades en cuanto a su topografía, esto hace que en una sola sección los ángulos varíen en rangos de hasta 50° y la altura varíe en decenas de metros, debido a esto, se decidió promediar los parámetros en cada sección según se explicó en el capítulo de Metodología.

6.2 Muestreo y ensayos de laboratorio

El muestreo de los suelos se hizo con base a las unidades geológicas cartografiados a lo largo del tramo de la carretera en análisis. Primeramente, se plantearon dos puntos de muestreo por unidad, si la unidad presentaba una gran extensión longitudinal o su afloración fue intermitente se consideró otro punto a adicional, bajo este precepto se plantearon ocho puntos de muestreo. Sin embargo, la realidad de los suelos complicó la toma de las muestras. De los ocho lugares de muestreo solo se pudo obtener una muestra inalterada en cinco de estos sitios elegidos (ver Figura 6.3).

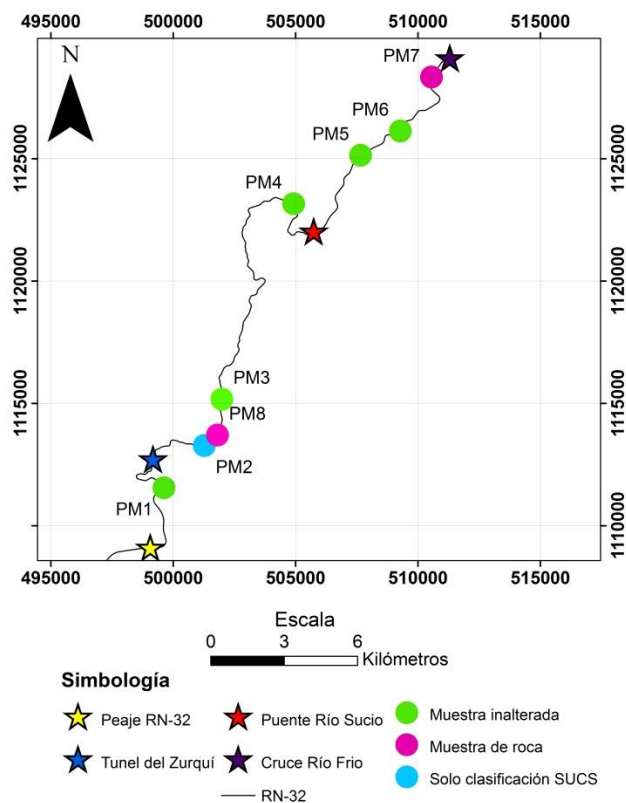


Figura 6.3: Ubicación de los puntos de muestreo de suelos. Los puntos verdes muestran los lugares donde se extrajo una muestra inalterada de material. En rosado los lugares donde no hubo material suelto muestreable. En estos puntos se extrajo un núcleo de roca para fallarse en una máquina de compresión uniaxial. En el punto celeste solo se hizo clasificación SUCS, debido a que el gran contenido de arena del material no permitió su moldeo.

El proceso para extraer las muestras inalteradas consistió en la extracción de un cubo de suelo a partir de un talud expuesto en la carretera (ver Figura 6.4). Este cubo fue moldeado con la precaución de no causar impactos muy fuertes que lo pudieran deformar o generar planos de falla dentro de él. Una vez que el cubo tuvo dimensiones admisibles para ser transportado fue envuelto en plástico y cinta adhesiva para protegerlo durante el viaje de regreso al laboratorio.



Figura 6.4: Proceso para extraer una muestra inalterada de suelo de uno de los taludes visitados. El proceso de extracción fue realizado por los técnicos del Laboratorio de Geotecnia del LanammeUCR. El objetivo de la muestra es poder obtener suelo que no haya sido sometido a la fuerzas de fricción, compresión, tensión, etc a causa del transporte o moldeado del bloque.

A partir del cubo traído del campo se remueve material usando un tubo metálico hueco que sirve de molde para formar el cilindro (ver Figura 6.5), una vez finalizada las dimensiones deseadas, se extrae el espécimen y se coloca en la máquina triaxial. En ciertos casos el cilindro se fractura durante el proceso de moldeo, esto debido a la composición del material, particularmente de granulometría gruesa (grava), en la Figura 6.5 se visualiza esto.

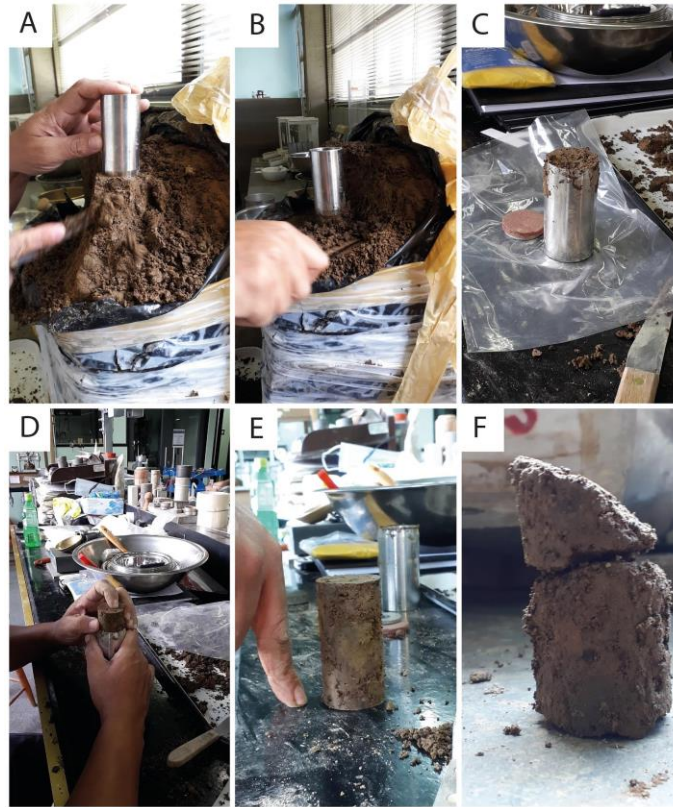


Figura 6.5: Proceso de moldeo de un espécimen para un ensayo triaxial. A,B,C,D y E muestran el proceso de moldeo descrito anteriormente, F pertenece a la muestra que se le tuvo que hacer corte directo. Se pueden ver como el espécimen se fracturó debido a la poca cohesión del material.

En el sitio de muestreo PM3 (Figura 6.3) se intentó extraer una muestra inalterada mediante un proceso diferente al anterior. Este proceso consiste en introducir tubos metálicos dentro del suelo y usarlos como contenedores para el suelo que queda en su interior. Una vez introducidos estos tubos se procede a extraerlos retirando el material alrededor de ellos (ver Figura 6.6). Se lograron sacar varios tubos con material intacto, sin embargo, solo uno se mantuvo intacto al ser retirado del tubo, para posteriormente fracturarse en el proceso de moldeo.



Figura 6.6: Proceso para extraer una muestra inalterada con poco espesor de suelo o en un suelo muy deleznable. A) se martilla el tubo dentro del suelo para crear un espécimen inalterado en el interior de este. B) muestra el proceso para extraer el tubo, el cual consiste en remover el suelo alrededor de este y así extraerlo sin mayor dificultad.

De las cuatro muestras inalteradas extraídas, tres se lograron ensayar triaxialmente y tres se ensayaron con corte directo, pues al intentar moldear el cilindro este se fracturaba. De los sitios PM2, PM7 y PM8 no se pudo obtener una muestra inalterada debido a que el suelo no permitió el moldeo de un cubo o no resistió la extracción de los tubos. Debido a la falta de suelo moldeable en los puntos PM7 y PM8 se optó por extraer núcleos de roca de los taludes y obtener de estos un valor de compresión uniaxial. Este parámetro es luego usado junto a la clasificación GSI del macizo para obtener teóricamente los valores de cohesión y ángulo de fricción. Estos valores teóricos son los que fueron usados en las respectivas secciones con macizos rocosos.

La extracción de los núcleos se realizó usando una perforadora que se ancló a la roca mediante pines (ver Figura 6.7). De PM7 solo se pudo extraer un núcleo de roca, ya que el macizo estaba sumamente fracturado y los núcleos extraídos no cumplían con las dimensiones necesarias establecidas por el ASTM. El punto PM8 no presentaba tanta fracturación por lo que se pudo extraer 3 núcleos enteros (hubo un núcleo fallido).

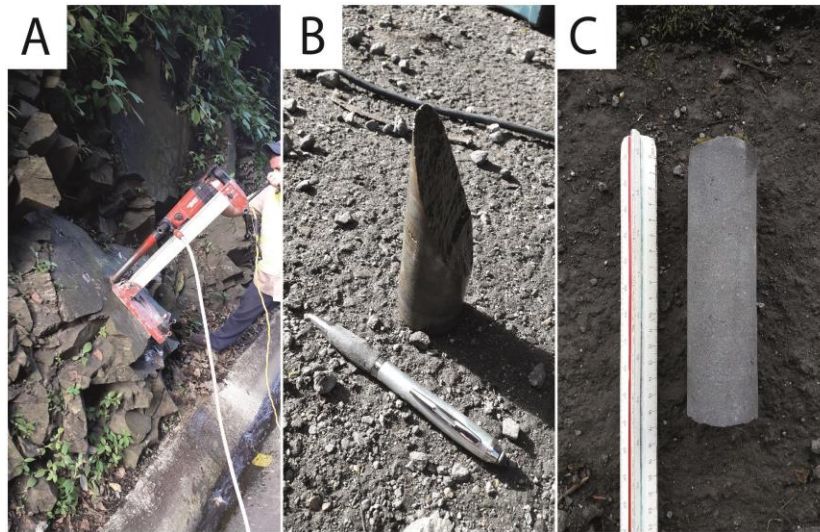


Figura 6.7: A) La perforadora ya posicionada y en uso sobre la roca del punto PM7 (también se puede ver el nivel de fracturamiento que presenta esta). B) Fractura producto de la extracción de un núcleo. C) Se observa un núcleo extraído exitosamente con el tamaño necesario para trabajar en el laboratorio.

Posteriormente a la extracción de los núcleos se procedió a pulir los mismos para cumplir con la geometría necesaria para el ensayo de laboratorio (según la norma ASTM D4543). Finalizado el pulido, se realizaron las pruebas para medir la planicidad, paralelismo y la perpendicularidad de los especímenes. Una vez que los especímenes cumplieron con los criterios anteriores se ensayaron en la máquina de compresión inconfiada (ver Figura 6.8).

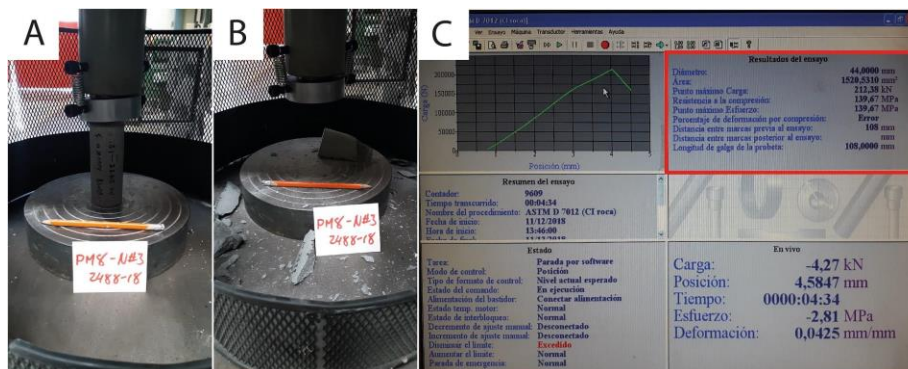


Figura 6.8: Fallamiento de uno de los núcleos del punto PM8. El recuadro "A" muestra el núcleo intacto antes de ejercerle presión. B es el resultado de la compresión del núcleo, se puede observar la gran cantidad de astillas que resultaron de la falla. C muestra la pantalla con los resultados finales, en este caso con una resistencia a la compresión de 139,67 MPa y una máxima carga de 212,38 kN.

6.3 Resultados de los ensayos

A diferencia del ensayo triaxial la clasificación SUCS si fue posible hacerla en todos los puntos. La clasificación se realizó siguiendo las normas mencionadas anteriormente en el capítulo 3. El resultado de cada clasificación se presenta en la tabla 6.1.

Tabla 6.1.
Tabulación de los resultados de la clasificación SUCS.

Código	Limite Líquido	Limite Plástico	Índice de Plasticidad	% pasando malla No.200	Clasificación SUCS
PM1	177	87	90	36,7	Arena Limosa (SM)
PM2	0	0	0	9,46	Arena bien gradada con limo (SW-SM)
PM3	43	37	6	27,3	Arena Limosa (SM)
PM4	48	43	5	9,6	Arena bien gradada con limo (SW-SM)
PM5	53	46	7	28	Arena Limosa (SM)
PM6	51	50	1	36,6	Arena Limosa (SM)
PM7	30	26	4	14,9	Arena Limosa (SM)

Los resultados de los ensayos de resistencia se tabulan a continuación en la Tabla 6.2.

Tabla 6.2
Resumen de los parámetros usados en el cálculo del HSQI de las secciones. El signo * significa que en estos casos los valores son teóricos y por ende se promediaron.

Muestra	Corte Directo		Triaxial	
	Cohesión (kPa)	Ángulo de Fricción	Cohesión (kPa)	Ángulo de Fricción
PM1	-	-	69	33
PM3	52,2	40,6	-	-
PM4	-	-	0	48
PM5	37,46	52,3	57,2	39
PM6	52,10	33,25	-	-
PM7 y PM8*	9,7	36,9	-	-

Cabe destacar que en los casos de PM4 y PM5 los resultados de las triaxiales no dieron un valor único sino que ambas dieron de 2 a 3 pares de datos los cuales cambiaron en función de los esfuerzos (Esfuerzo desviador último y máximo) usados para generar los gráficos de Mohr-Coulomb. Los pares descartados mostraron cohesiones de más de 100 kPa, las cuales considerando los tipos de materiales deslizantes (arenas limosas no cementadas) fueron descartados.

Sin embargo, siguiendo la teoría de Lade (2010) a estos resultados de laboratorio se les realizó el ajuste propuesto por el autor (explicado en el capítulo de marco teórico), en donde se obtuvo una envolvente potencial. El proceso para determinar un valor de σ en el cual trazar la tangente es simple, se determina una profundidad de ruptura y esta es multiplicada por el peso unitario del material. Los valores obtenidos por este método son generalmente menores a los resultados de los ensayos debido a la gran pendiente de la curva en estos (ver Figura 6.9).

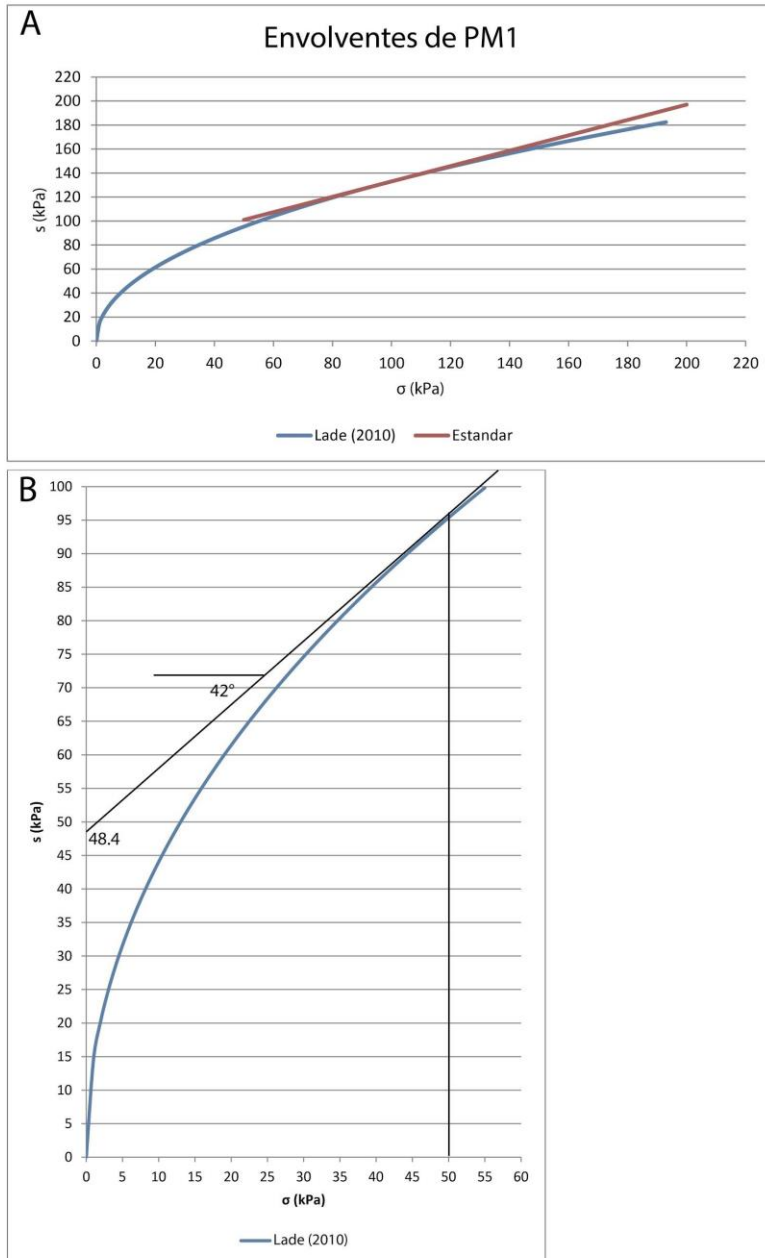


Figura 6.9: A) Comparación entre las envoltentes de Lade (2010) y la usada normalmente. La envoltente de Lade inicia siempre en 0,0 y va aumentando sus valores de manera parabólica. B) La misma envoltente de Lade del gráfico anterior pero limitada a los valores más bajos. Debido al peso unitario del material de $12,5 \text{ kN/m}^3$ y a una profundidad elegida de 4 m se obtiene un valor σ de 50 kPa para trazar la tangente a la curva. Esta nueva tangente da como resultado un valor cohesión de 48,4 kPa y un ángulo de fricción de 42° .

Este proceso se aplicó para cada uno de los ensayos de laboratorio y para los valores teóricos de resistencia obtenidos de las pruebas de compresión inconfinada. Los resultados obtenidos se presentan en la Tabla 6.3. Los resultados para PM5, PM6 y PM7,PM8 se promediaron respectivamente. La razón para esto

fue la cercanía de los puntos de muestreo de PM5 y PM6 y la naturaleza teórica de los valores de PM7 y PM8.

Tabla 6.3

Parámetros de resistencia de los distintos puntos de muestreo con el ajuste Lade (2010)

Muestra	Cohesión (kPa)	Ángulo de Fricción (°)
PM1	48,4	42
PM3	33,7	49
PM4	0	44
PM5 y PM6	37,4	36
PM7 y PM8	8,8	40

Con estos nuevos valores de resistencia, los cuales según Lade (2010) se aproximan mejor a la realidad de un deslizamiento superficial, se ejecutó otra iteración del método HSQI bajo la hipótesis de obtener una mejor representación de las condiciones de los taludes en la carretera RN-32.

Una última variación de los parámetros de resistencia se llevó a cabo mediante un retroanálisis de las secciones que presentaron deslizamientos. Este retroanálisis consistió en asignar un valor HSQI cercano a 1,1 para las secciones con evidencia de inestabilidad y calcular cuáles valores de cohesión y ángulo de fricción generan este valor. La razón de asumir un valor HSQI igual o cercano a 1,1 es la comparación realizada por Ocampo (2016), en donde se demuestra que la diferencia entre un factor de seguridad y un HSQI es de 0,1, osea, para un FS de 1,0 el HSQI equivalente será de 1,1 y como se mencionó en el capítulo 2 en una pendiente deslizada se puede asumir un FS de 1,0.

Como los valores HSQI se definen según curvas hay una infinidad de puntos que pueden resultar en este valor y por lo tanto una infinidad de valores de resistencia. Sin embargo, se intentó seguir los valores reportados en Rigo et al (2011) como guía para realizar la aproximación, estos se tabulan a continuación en la Tabla 6.4.

Tabla 6.4

Valores reportados en Rigo et al (2011) de valores de resistencia en suelos de origen similar a los de la RN-32

Referencia	Descripción del suelo	Localidad	Cohesión (kPa)	Ángulo de Fricción (°)
Lacerda y Silveria (1992)	Saprolito de cuarzo-dolerita	Rio de Janeiro	0	16
Chammas (1976)	Saprolito rojo de migmatita	Rio de Janeiro	0	25
Chammas (1976)	Saprolito jaspeado de migmatita	Rio de Janeiro	0	17
Chammas (1976)	Saprolito gris oscuro de migmatita	Rio de Janeiro	0	27
Seraphim (1974)	Saprolito gris claro de migmatita	Rio de Janeiro	0	33,5
Seraphim (1974)	Saprolito gris oscuro de migmatita	Rio de Janeiro	0	27
Tanaka (1976)	Suelo residual café rojizo de basalto denso	Sao Simao, Goiás	5	28,5
Tanaka (1976)	Suelo residual rojo de basalto vesicular	Sao Simao, Goiás	4	22,7
Kanji (1974)	Suelo residual de basalto	Ilha Solteira, Sao Paulo	0	10
Sousa Pinto et al (1994)	Suelo residual de basalto	Sao Paulo	0	19
Sousa Pinto et al (1994)	Suelo residual de basalto	Sao Paulo	0	10,5
Sousa Pinto et al (1994)	Suelo residual de basalto	Sao Paulo	0	9
Sousa Pinto and Nader (1991)	Suelo residual de migmatita	Sao Paulo	0	17
Sousa Pinto and Nader (1991)	Suelo residual de migmatita	Sao Paulo	0	22
Sousa Pinto and Nader (1991)	Suelo residual de migmatita	Sao Paulo	0	21
Sousa Pinto and Nader (1991)	Suelo residual de gneiss	Paraibua, Sao Paulo	0	28
Sousa Pinto and Nader (1991)	Suelo residual de gneiss	Paraitinga, Sao Paulo	0	30

Aunque los valores de cohesión reportados son en su mayoría 0, este valor fue imposible de alcanzar en la práctica del retroanálisis, puesto que, esto implicaría asignar valores muy irreales tanto a la cohesión como al ángulo de fricción. Cada una de las 119 secciones con un deslizamiento fueron sometidas a este análisis y por lo tanto, se les calculó un valor de cohesión y ángulo de fricción propios. Estos cálculos fueron realizados usando la topografía del corte (talud antrópico) y un Hw igual a 0,7, ya que, la base de este análisis fueron las secciones deslizadas. Aquellas secciones que no presentaron un deslizamiento se les asignó valores promedios según la litología a la que pertenecen (ver Tabla 6.5).

Tabla 6.5

Resultados del retroanálisis según cada litología.

	Brechas		Lavas		Flujos Piroclásticos	
	Cohesión (kPa)	Ángulo de fricción (°)	Cohesión (kPa)	Ángulo de fricción (°)	Cohesión (kPa)	Ángulo de fricción (°)
Promedio	31	36	21	38	19	37
Desviación Estándar	18	7	16	10	11	6

6.4 Selección de las ecuaciones a usar

Como se mencionó anteriormente el método HSQI propone un total de 12 ecuaciones que deben ser usadas a la hora de determinar los valores X y Y. Estas ecuaciones son elegidas con base al tipo de deslizamiento, a la característica del nivel freático y a la presencia de fracturas u otras señales de inestabilidad en la sección (ver Tabla 6.6).

Tabla 6.6

Ecuaciones a usar para el cálculo de los factores X y Y según el tipo de deslizamiento y las características que se deben presentar en la sección de estudio para la selección de una determinada ecuación.

Ecuaciones para un deslizamiento planar o controlado estructuralmente	
A) Talud sin nivel freático $x = 2\sqrt{(i - B)(B - \theta)}$	B) Talud sin fracturas $y = \frac{yH}{c}$
C) Talud con nivel freático no aflorante $x = 2\sqrt{(i - B)(B - \theta(1 - 0,1(\frac{Hw}{h})^2))}$	D) Talud con fracturas $y = (\frac{1 + Zo}{H}) \frac{yH}{c}$
E) Talud con nivel freático aflorante $x = 2\sqrt{(i - B)(B - \theta(1 - 0,5(\frac{Hw}{h})^2))}$	F) Talud con fracturas saturadas $y = (\frac{1 + 3Zo}{H}) \frac{yH}{c}$
Ecuaciones para un deslizamiento circular	
A) Talud sin nivel freático $x = i - 1,2\theta$	B) Talud sin fracturas $y = \frac{yH}{c}$
C) Talud con nivel freático no aflorante $x = i - (1,2 - 0,3 \frac{Hw}{H})\theta$	D) Talud con fracturas $y = \frac{yH}{c} (1 + (\frac{i + 25}{100}) \frac{Zo}{H})$
E) Talud con nivel freático aflorante $x = i - (1,2 - 0,5 \frac{Hw}{H})\theta$	F) Talud con fracturas saturadas $y = \frac{yH}{c} (1 + (\frac{i + 10}{100}) \frac{Zo}{H})$

Si bien al analizar la naturaleza de los deslizamientos, fue posible llegar a la conclusión de que estos ocurren por el deslizamiento del suelo, material meteorizado o bloques sobre una superficie de roca o suelo de menor meteorización y que esta superficie funciona como una discontinuidad que condiciona el movimiento del material deslizado (lo cual corresponde a un deslizamiento planar), se eligió usar las ecuaciones correspondientes a un deslizamiento rotacional. Esta decisión se tomó ya que el método HSQI es por concepción un método pre-constructivo, esto significa que el método no contempla los taludes sino las pendientes naturales por lo que una aplicación pre-constructiva del método en la zona de la RN-32 no tomaría en cuenta estos deslizamientos en los taludes ya que estos últimos no existirían y por ende los deslizamientos tampoco. Además en las pendientes naturales se observó como los

deslizamientos son de naturaleza rotacional, pues fue posible observar la forma concava de la ladera en estos eventos.

La ecuación que dará el valor X es seleccionada según el nivel freático en la sección, sea este inexistente, no aflorante o aflorante. En casos donde no se tenga registros de la geometría del nivel freático (como es el caso de los taludes del tramo en estudio) se puede usar la forma de la pendiente para elegir cuál ecuación usar. De esta manera una sección con drenaje divergente se le asignará la ecuación A (pendiente drenada), una sección de drenaje paralelo usará la ecuación C y un drenaje convergente la ecuación E. En este trabajo se aplicó el método asignando las ecuaciones de dos maneras: La primera de la manera anterior y otra omitiendo la ecuación A y en su lugar asignando la ecuación C a las secciones con drenajes divergentes y la E al resto. Esto se hizo para observar la variación entre los casos y bajo la asunción de que con el gran nivel de precipitación de la zona una sección drenada es muy rara o inexistente. Como se ha mencionado anteriormente el nivel freático se varió de 0,3 a 0,7 de la altura total de la pendiente.

Seleccionar la ecuación para el valor Y es complicado debido a la gran cantidad de vegetación de la zona, la cual puede cubrir y esconder cualquier fractura presente. Por esto la ecuación que se eligió para este valor fue la B (sección sin fracturas). En los estacionamientos 44 a 46 los taludes presentan fracturas producto del fallamiento local, por lo que en esta zona se usó la ecuación D.

6.5 Susceptibilidad a deslizamiento de las secciones

El último paso en la metodología HSQI consiste en resolver las ecuaciones escogidas para cada sección usando los parámetros de suelo antes dados. Esto significa calcular un valor HSQI para cada una de las 212 secciones definidas.

En este trabajo se realizaron distintas iteraciones de los cálculos las cuales aumentaron el total de versiones de la susceptibilidad de la ruta. Cada una de estas versiones se consideró necesaria pues exploran distintos criterios que deben de escogerse de una manera adecuada para asegurar un buen resultado final. Con el total de aplicaciones se observó y analizó cómo el HSQI varía en cada caso y cuál refleja mejor la realidad de la ruta. En la Tabla 6.7 se muestra el total de aplicaciones realizadas.

Tabla 6.7

Criterios para aplicar el HSQI que fueron evaluados en este trabajo y cómo éstos afectaron el total de aplicaciones.

Criterio de la iteración	Iteraciones realizadas por criterio
Fórmulas para el valor X	2
Parámetros geométricos de la pendiente	x2
Ajuste de Lade (2010)	x2
Variación de Hw de 0,3 a 0,7	x5
Retroanálisis	+1
Total	41

Si tomamos el total de secciones que se definieron para la ruta y lo multiplicamos por el total de aplicaciones nos da un total de 8692 secciones y por consiguiente valores HSQI calculados en este trabajo. Para cada sección se calcularon dos HSQI (pendiente superior e inferior) para un total de 17384 valores calculados. De estos casos se tuvo que elegir el peor valor entre la geometría de la pendiente superior y la de la pendiente inferior (ver tabla 6.8).

Tabla 6.8

Tres secciones elegidas aleatoriamente para ejemplificar el proceso de descarte del mejor valor según los parámetros geométricos naturales con un Hw de 0,7. En rojo el valor escogido como final.

Sección	Pendiente (HD)	Altura del talud(HD)	Pendiente (HU)	Altura del talud (HU)	HSQI (HD)	HSQI (HU)
52	37	56	41	25	0,75	0,9
164	18	8	20	26	1,2	3,0
201	19	15	26	31	1,35	1,7

Como vemos la sección 52 tanto en su valor HSQI HD como HU cae en valores de susceptibilidad alta por lo que para efectos prácticos no hay diferencia entre ambos valores. Tanto en la sección 164 como la 201 tienen valores HD clasificados como de susceptibilidad media mientras que los valores HU se clasifican como de baja susceptibilidad. En estos casos es donde se hace la elección del “peor caso posible” y se selecciona el menor valor (en este caso 1,2 para la sección 164 y 1,35 para la sección 201) como el valor final de la sección.

6.5.1 Comportamiento de la clasificación según los parámetros Hw , c y ϕ

Una parte importante de discriminar los valores que se incluirán en las fórmulas es entender cómo cada uno de estos valores afecta el resultado final o lo que es lo mismo la posición de un punto HSQI dentro del gráfico y su relación con las curvas que limitan cada zona de susceptibilidad (curvas de 1,0 y 1,4).

Al observar más detenidamente las ecuaciones podemos observar que el valor de Hw solo es usado por las ecuaciones correspondientes al valor X por lo que la variación de este parámetro solo va a afectar la posición en el eje x de una sección. De la misma manera si observamos los gráficos nos damos cuenta que el valor X influencia en menor medida la clasificación final de la sección en los valores bajos de Y donde las curvas se vuelven asíntotas al eje x y por lo tanto generan una gran área horizontal en donde el valor HSQI de una sección puede moverse horizontalmente sin cambiar su respectiva clasificación (ver Figura 6.10).

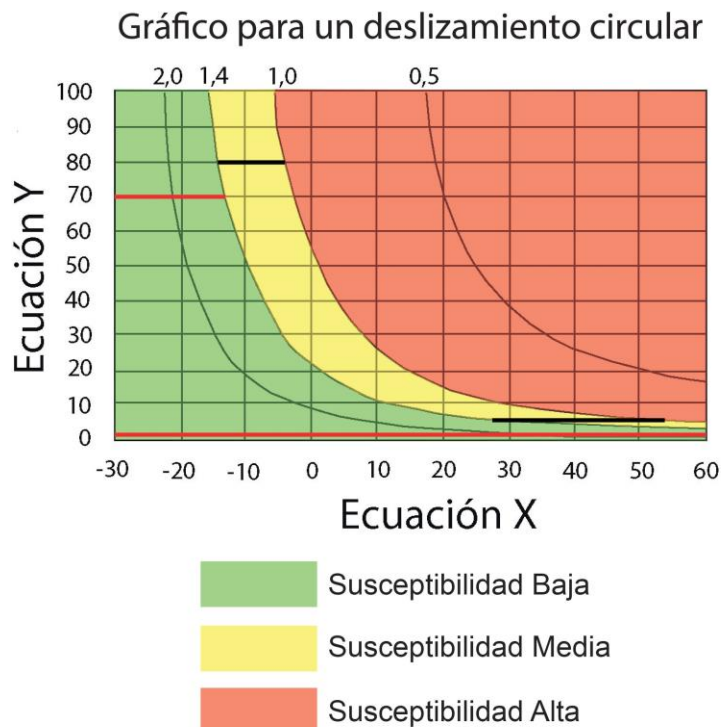


Figura 6.10: Relación del valor X con su clasificación en susceptibilidad. Como se puede ver las líneas rojas (Susceptibilidad baja) y negra (susceptibilidad media) reflejan el rango de movimiento en el eje x que puede tener una sección sin modificar su clasificación y cómo este varía en relación a su valor Y .

Un aumento en H_w hará que un punto HSQI se mueva hacia la derecha en donde el área de susceptibilidad alta es mayor. De manera contraria un aumento en ϕ (ángulo de fricción) moverá el mismo punto hacia la izquierda a valores correspondientes a una susceptibilidad baja.

Un comportamiento similar ocurre con la cohesión, la cual solo es usada en las ecuaciones Y. En este caso la variación de este parámetro sólo afecta la posición en el eje "y" de un HSQI. Si hacemos el mismo análisis de los gráficos pero esta vez centrándonos en el eje "y" vemos que a menor valor Y mayor es su papel en la clasificación. En la Figura 6.11 vemos esto ejemplificado, en valores medios de X (10 a 30) una variación de 20 en el valor Y puede hacer que la sección pase de ser clasificada como de susceptibilidad baja a alta, mientras que, en valores altos de X (>40) solo toma un cambio de 5 para que se dé el mismo cambio de clasificación.

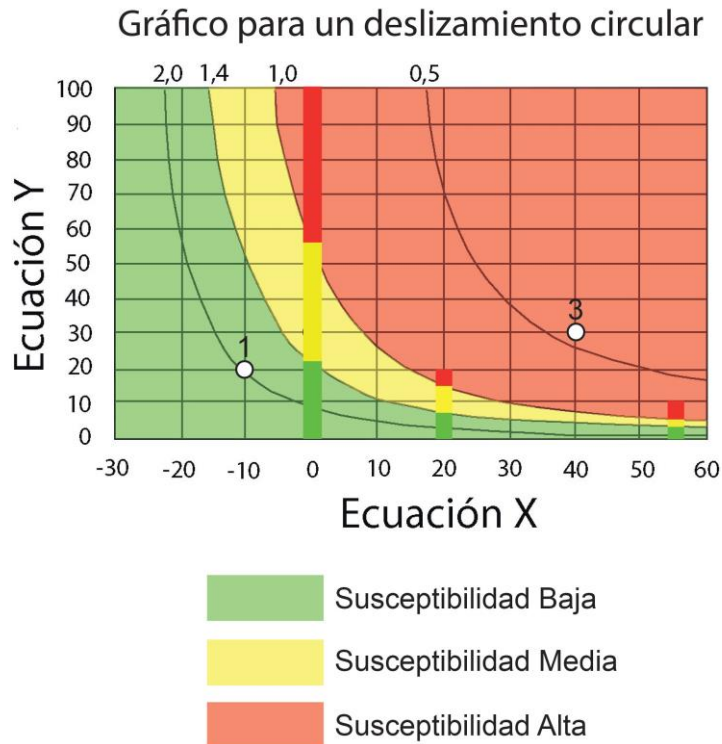


Figura 6.11: Variación en la clasificación del HSQI según su valor Y en diferentes posiciones X. Se evidencia como un cambio de 20 a 5 unidades en el eje "y" puede afectar significativamente la susceptibilidad asignada a una sección.

En general se puede resumir el movimiento de un punto HSQI en base a cada parámetro siguiendo la Figura 6.12.

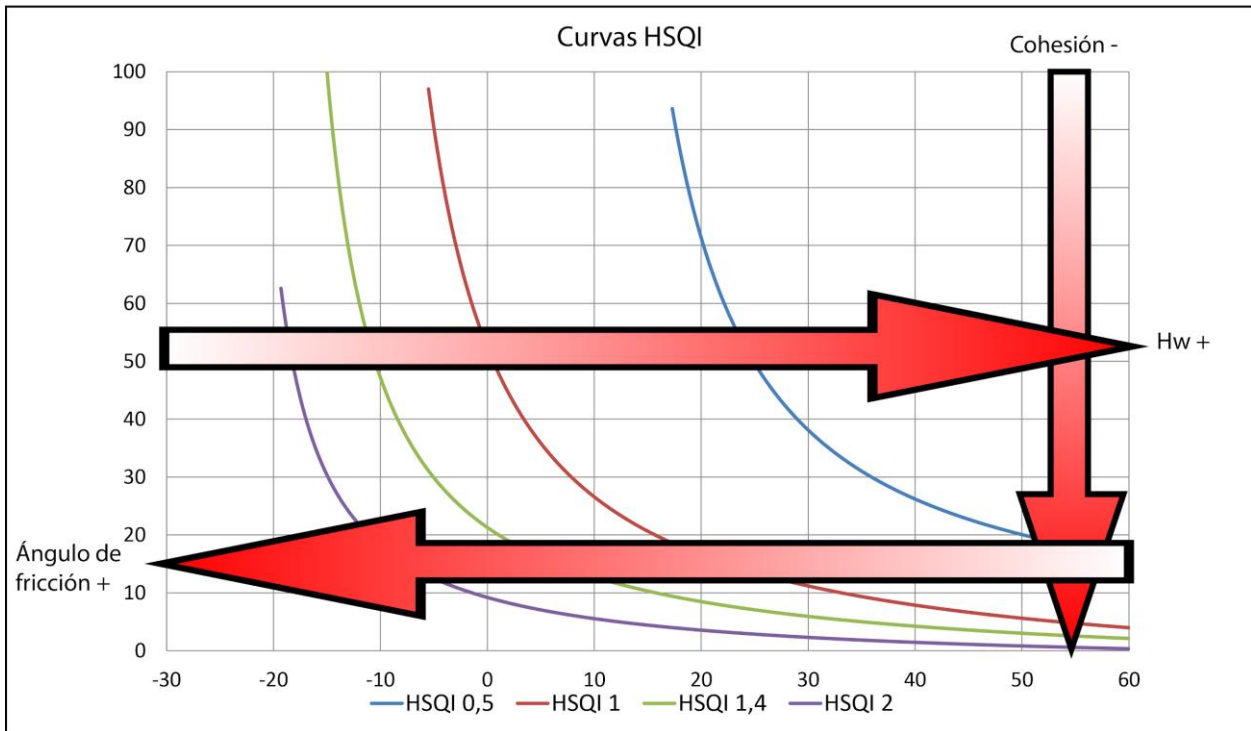


Figura 6.12: Posición de un determinado valor HSQI en relación al aumento de los parámetros H_w , ángulo de fricción y cohesión. A mayor H_w el punto se moverá hacia la derecha, volviéndolo más susceptible a un deslizamiento. A mayor ángulo de fricción el punto se moverá hacia la izquierda, colocándolo cada vez más cerca de la susceptibilidad baja. Entre más baja sea la cohesión más arriba en el eje y estará el punto, en casos muy cercanos a 100 la clasificación de este punto es dependiente de la posición en el eje x.

Los comportamientos de estos parámetros (H_w y c) se hicieron evidentes en las distintas aplicaciones del HSQI antes mencionadas. Cuando la cohesión asignada a una sección fue de entre 1 y 0 los valores de Y aumentaron a más de 1000, en estas zonas las curvas se vuelven prácticamente verticales debido a su comportamiento asintótico al eje “ y ”, por lo que, en valores tan altos de Y este valor pierde importancia y la clasificación de la sección se vuelve completamente dependiente del valor X . Esto se reflejó en las secciones con los parámetros de la muestra PM4, donde, la cohesión fue 0 (en las ecuaciones se usó un valor de 0,1 ya que al estar este valor dividiendo se vuelve imposible asignarle 0). En secciones con valores de cohesión muy altos (más de 60) el valor Y se vuelve menor de 5 en estos casos la clasificación se vuelve nuevamente independiente de Y y si el valor es todavía más bajo (1-3) se vuelve también independiente de X

pues todo el eje X se encuentra debajo de la curva de 1,4 (comienzo de la susceptibilidad baja). En la Figura 6.13 se ilustra esto.

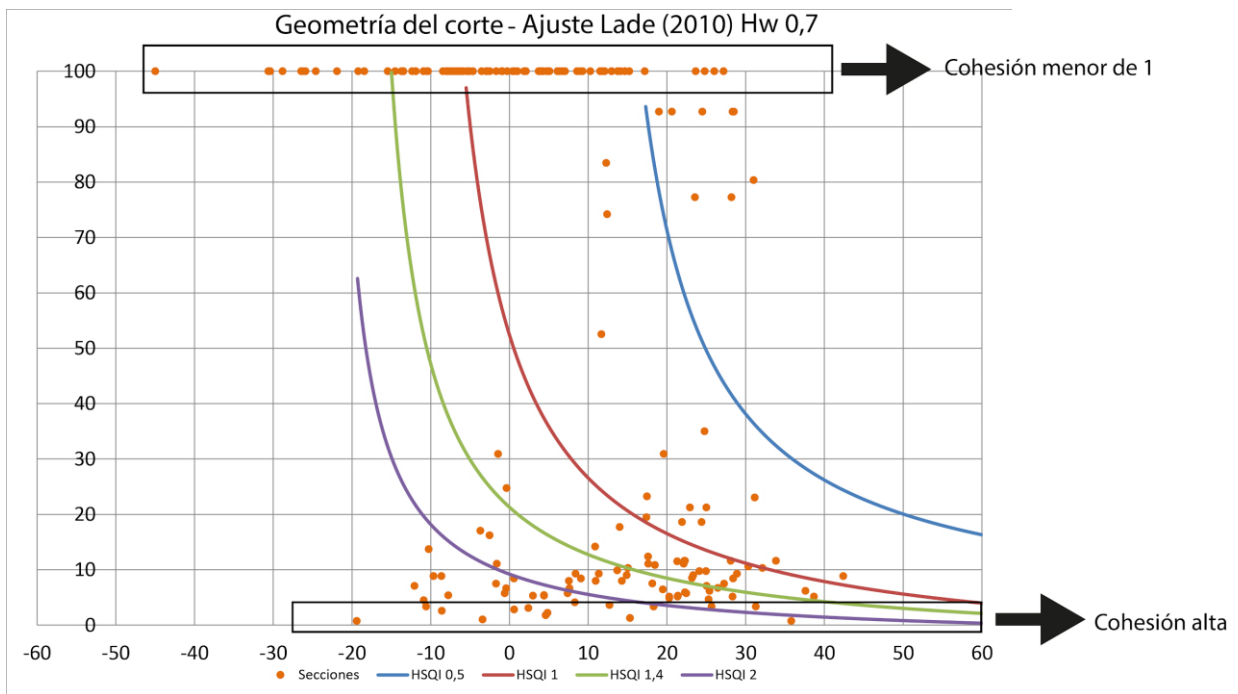


Figura 6.13: Las secciones con valores de cohesión menores de uno presentaron valores Y mayores a 100, en esta zona las curvas se vuelven prácticamente verticales por lo que se les asignó un valor de 100 para poder visualizarlas más fácil. Este comportamiento se debe a que la cohesión es un divisor en las ecuaciones Y por lo que al tener un valor entre cero y uno hace que el resultado de la ecuación se eleve de manera importante. En la parte opuesta del gráfico, en valores Y cercanos a cero, tenemos valores que serán siempre de susceptibilidad baja, estos valores de Y tan bajos se deben de igual manera a la naturaleza divisoria de la cohesión, donde un valor alto se comportara de manera inversamente proporcional al resultado final.

6.5.2 Susceptibilidad según la pendiente natural

Como se mencionó anteriormente el método se aplicó usando para el valor X las ecuaciones A, C y E y solo la C y E. El primer caso mostró un desempeño deficiente (como se explicará en el siguiente capítulo) por lo que los siguientes resultados pertenecen solo a la aplicación con C y E.

Una vez obtenidos todos los parámetros necesarios se procedió a correr las fórmulas en las secciones de la carretera, si bien se delimitaron un total de 212 secciones a la hora de aplicar el método solo se utilizaron 205 secciones, esto debido a que algunas no presentan la geometría necesaria para hacer el cálculo, en este caso una pendiente natural.

Las 205 secciones fueron clasificadas en susceptibilidad baja, media o alta según su valor HSQI. El número de secciones en cada clase de susceptibilidad varió considerablemente según los distintos niveles freáticos utilizados para el cálculo (Hw de 0,3 a 0,7), la tendencia fue un aumento en la cantidad de secciones clasificadas como de susceptibilidad alta mientras las susceptibilidades medias y bajas disminuían. Esta tendencia queda reflejada en la Figura 6.14 donde se puede ver la totalidad de las secciones y los distintos porcentajes que cada clase representa.

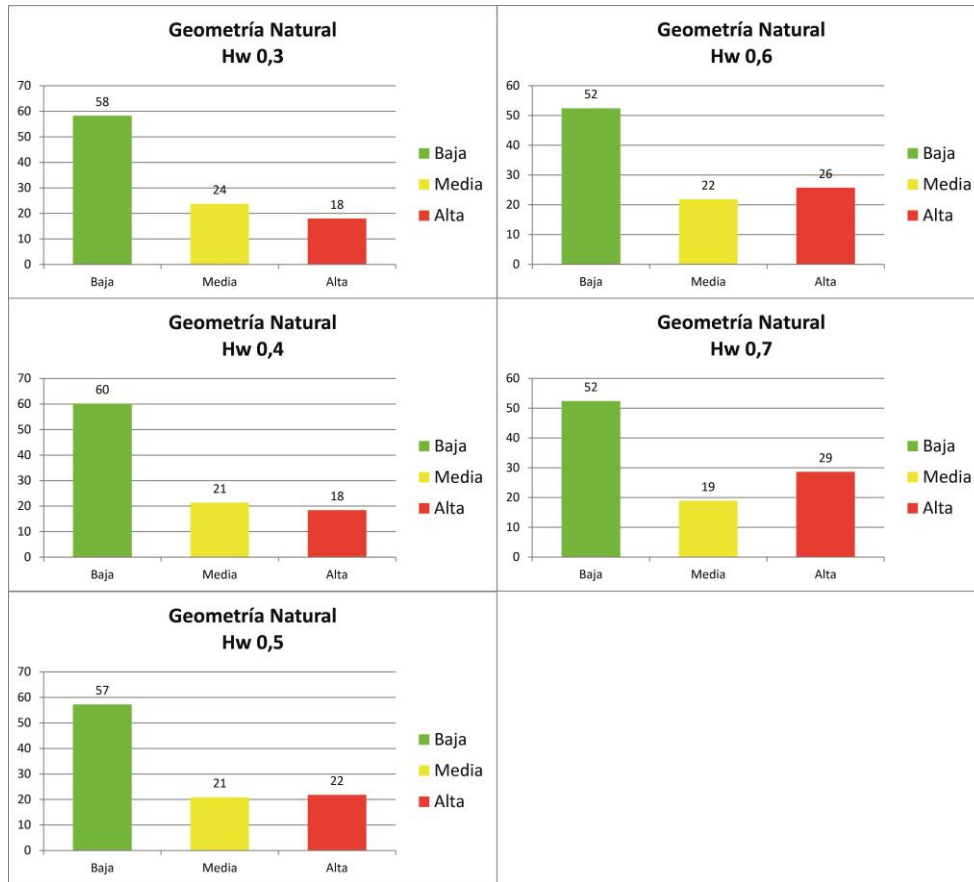


Figura 6.14: Variación de la cantidad de secciones según cada clase de susceptibilidad en porcentajes. La diferencia entre Hw 0,3 y 0,7 es substancial, la susceptibilidad alta duplica su porcentaje mientras que la media y baja pierden aproximadamente dos quintos y un cuarto respectivamente.

Este comportamiento refleja la importancia de asignar un valor de nivel freático que refleje de la manera más aproximada las condiciones reales en el sitio, pues asignar un valor erróneo o tomar al parámetro Hw como una constante, como lo sugirió Moreno-Ceballos (2015) con un valor de 0,6, puede predisponer el método a sobreestimar o subestimar la susceptibilidad del corredor en estudio.

Posterior a este análisis se reprodujo el cálculo usando los valores ajustados con la envolvente potencial de Lade (2010), el comportamiento fue similar para las susceptibilidades altas y bajas, sin embargo, la susceptibilidad media se comportó prácticamente inamovible. Los resultados se presentan en la Figura 6.15.

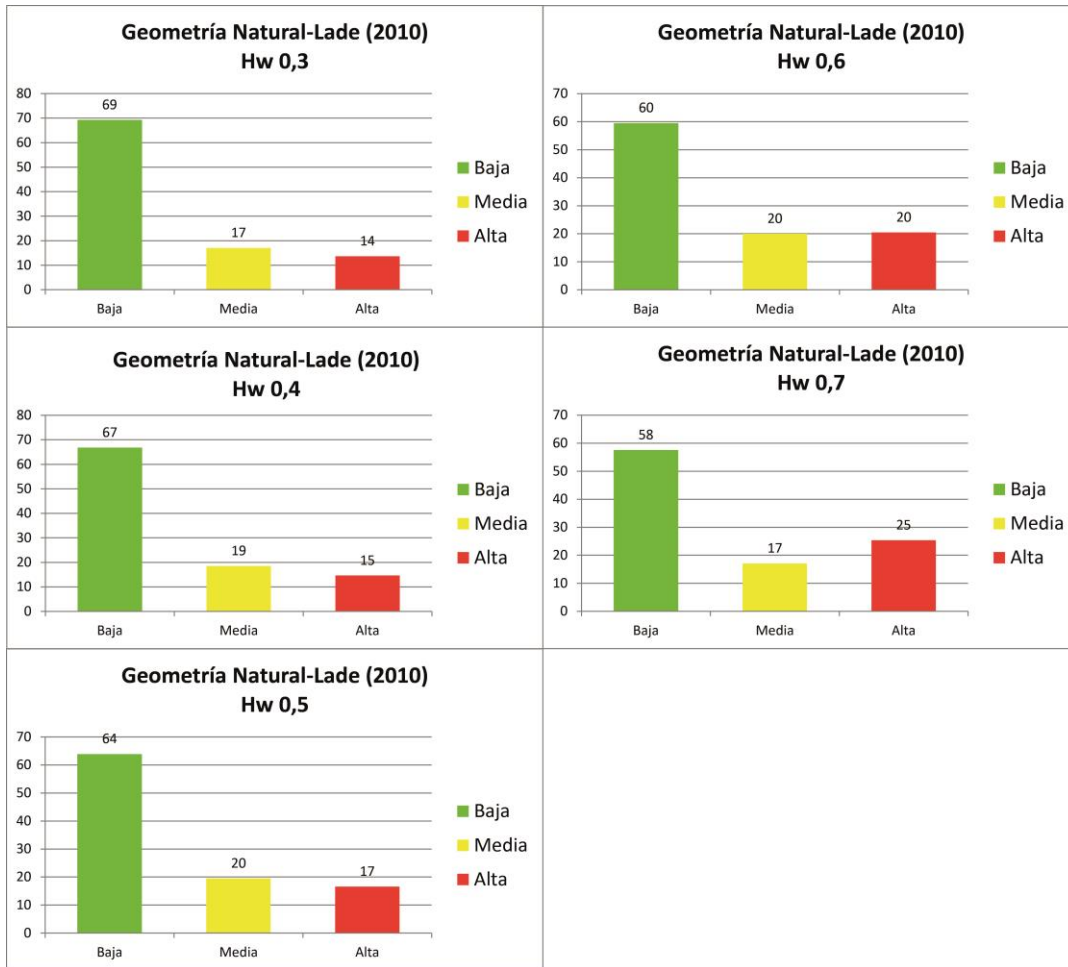


Figura 6.15: Variación de la cantidad de secciones según cada clase de susceptibilidad en porcentajes usando los valores ajustados de Lade (2010). Similar al comportamiento anterior la susceptibilidad alta se duplica y la susceptibilidad baja pierde aproximadamente un tercio de su valor. Sin embargo, es interesante como la susceptibilidad media no varía en gran medida sino que permanece entre 21 a 24% a través de los valores Hw evaluados.

El comportamiento de la susceptibilidad media en este caso puede deberse a la ubicación de los valores HSQI que se ubican los suficientemente a la izquierda del área entre las curvas 1 y 1,4 como para que el aumento del parámetro Hw no las haga salir de esta área y entren al dominio de otra susceptibilidad.

6.5.3 Susceptibilidad según el corte del talud

Similar a la geometría natural de las pendientes en este caso se aplicó el método usando la geometría de los cortes de los taludes, estos cortes tienden a ser (como se vio en el capítulo de geomorfología) de mayor inclinación y por lo tanto se esperó un mayor número de secciones clasificadas como de alta susceptibilidad.

Procesando los resultados se comprobó esta hipótesis, como se puede ver la Figura 6.16 desde un 41% y hasta un 50% de las secciones fueron clasificadas en el rango de susceptibilidad alta.

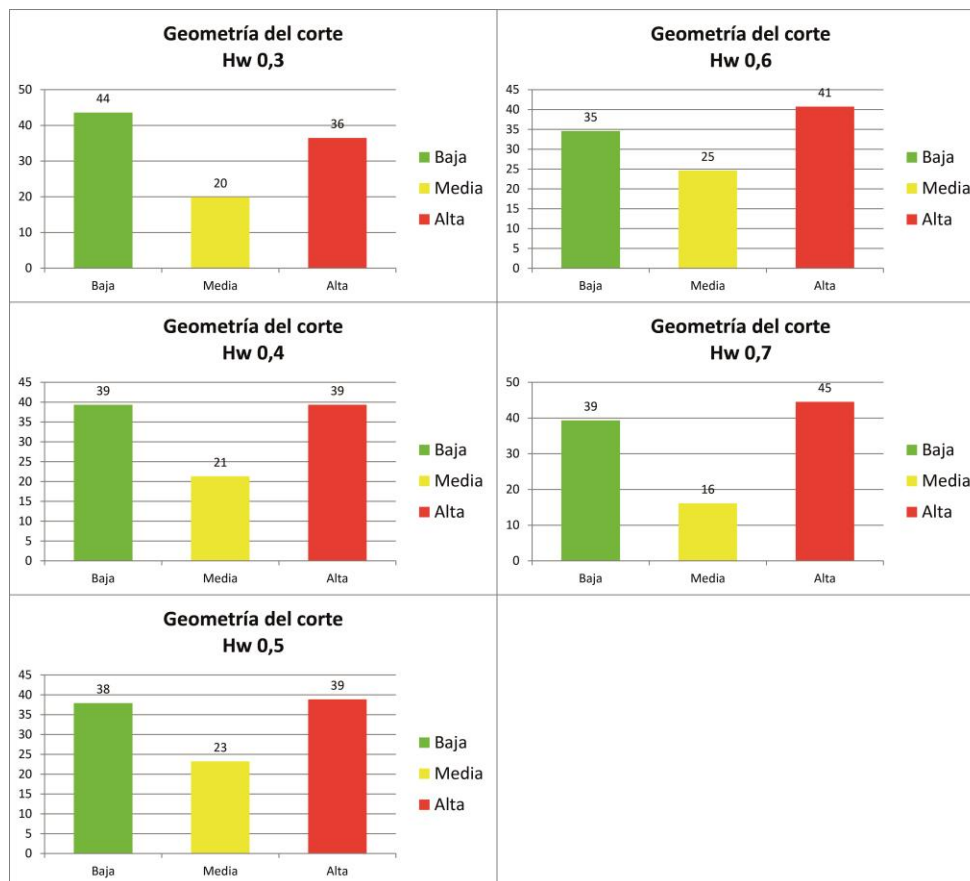


Figura 6.16: Variación de la cantidad de secciones según cada clase de susceptibilidad en porcentajes. En este caso la susceptibilidad alta no varía mucho (solo en un 9%) sin embargo, el total representa el 41% de las secciones en Hw 0,3 y el 50% en Hw 0,7, la susceptibilidad media de nuevo no presenta un cambio significativo, pues sólo aumenta en un 5%, la susceptibilidad baja en cambio baja de casi la mitad de las secciones (46%) en Hw 0,3 a tan solo un tercio de estas en Hw 0,7.

La geometría más empinada en estos cálculos propició que los valores de la fórmula X usada para cada sección respectiva se desplazarán más hacia la derecha de los gráficos, aumentando así la probabilidad de los puntos HSQI de situarse dentro del área de susceptibilidad alta.

Con los parámetros de resistencia ajustados se esperaba todavía mayor cantidad de secciones rojas, esto debido a que los parámetros de cohesión son menores a los valores de los ensayos. El resultado (en cual se presenta en la Figura 6.17) dice lo contrario.

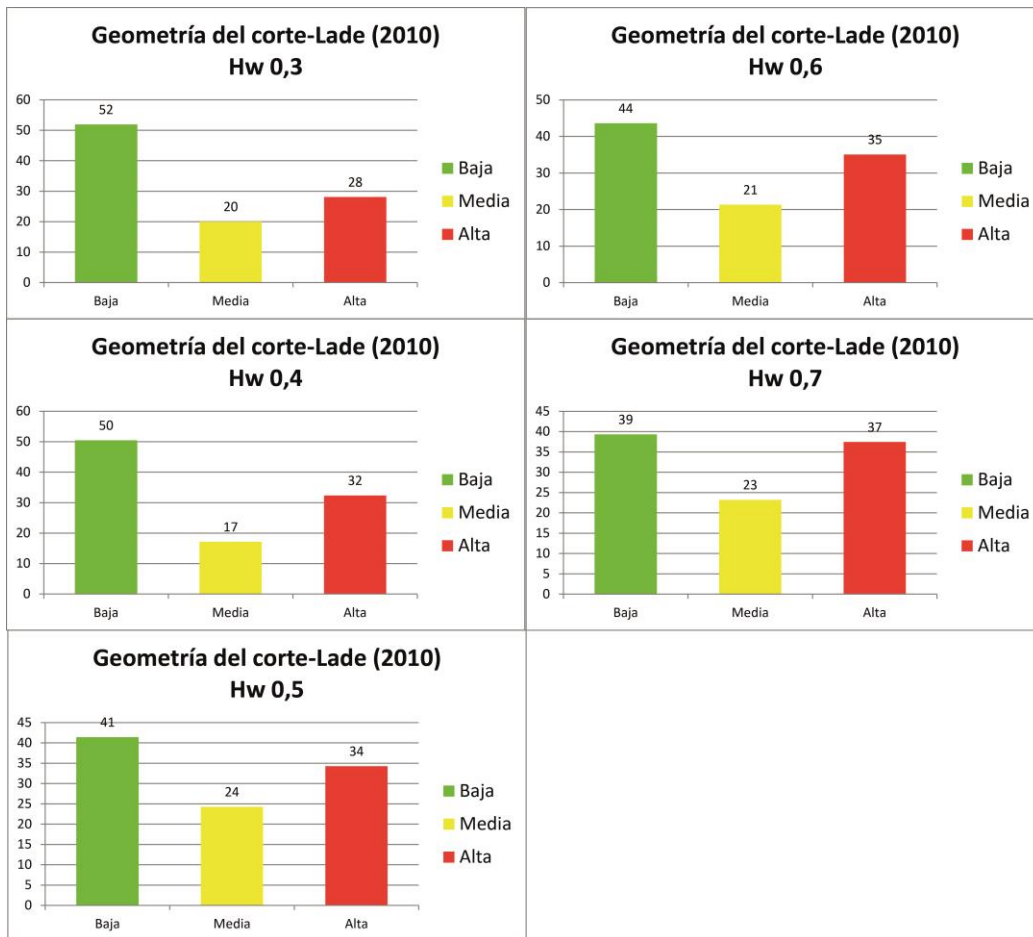


Figura 6.17: Variación de la cantidad de secciones según cada clase de susceptibilidad en porcentajes usando el ajuste de Lade (2010). Las secciones con susceptibilidad alta representan un 33% en Hw 0,3 mientras que en Hw 0,7 el resultado de 37% es similar a la aplicación anterior. La susceptibilidad media no varía mucho (6%) y la baja disminuye en un 20% del total.

Este comportamiento se debe a que, si bien la cohesión disminuye al aplicar el ajuste, el ángulo de fricción aumentó como resultado de la curvatura tan empinada de la envolvente potencial. Este valor más alto hizo que los puntos HSQI se movieran a la izquierda del gráfico, donde el área clasificada como de susceptibilidad baja es mayor. Esto en general compensó los valores de cohesión evitando un aumento en secciones rojas. Pero al observar el comportamiento de las secciones de susceptibilidad media se ve que estas sí tuvieron un cambio significativo de entre 7% y 10%. Las secciones de susceptibilidad baja mantuvieron porcentajes similares en ambas aplicaciones, lo que tiene sentido si entendemos el papel que jugó el ángulo de fricción como “estabilizador” de las secciones.

Con una cantidad de secciones verdes prácticamente constante en ambos casos se puede decir que fueron más los casos de secciones de susceptibilidad alta pasando a la media que los de susceptibilidad baja pasando media.

Este mismo comportamiento es evidente en las aplicaciones con la geometría natural donde se redujo el total de secciones de susceptibilidad alta, mientras que la media aumentó y la baja se mantuvo constante.

6.5.4 Comportamiento del Retroanálisis

El último caso a analizar es el correspondiente al retroanálisis, este caso varió de los pasados al mostrar una mayoría de secciones de susceptibilidad media, seguido de las secciones de susceptibilidad alta y como minoría la susceptibilidad baja. A diferencia de otros casos que usan la geometría del corte y un Hw de 0,7 la susceptibilidad alta no domina, esto se debe a que los valores de cohesión son en promedio más altos (en este caso no se aplicó una cohesión de 0 para ciertas secciones) y a que el ángulo de fricción bajó en relación a los demás casos. En la Figura 6.18 se muestran los porcentajes para este caso.

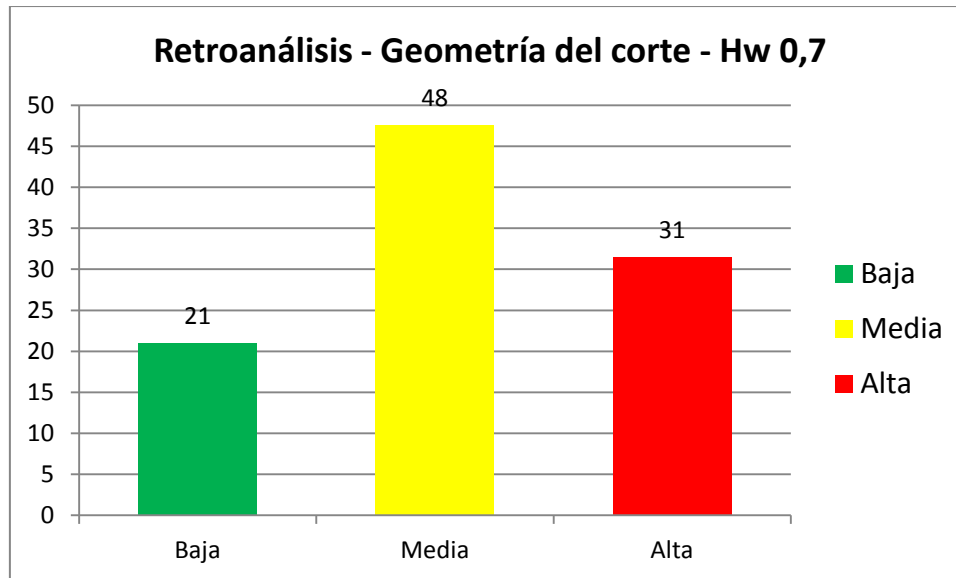


Figura 6.18: Porcentajes de secciones según su susceptibilidad asignada. La susceptibilidad media domina con un 48%, la alta presenta un 31% y la baja solo un 21%.

6.6 Visualización de la susceptibilidad

De los 41 casos evaluados anteriormente es posible generar una visualización de las secciones según su susceptibilidad asociada. Esto permite analizar espacialmente los resultados y ver la relación de una determinada sección con sus inmediaciones (un puente, complejo urbano, una quebrada, etc). Se decidió presentar visualmente solo el caso que uso el retroanálisis, puesto que, este fue el caso que (según lo que se verá en el siguiente capítulo) devolvió el mejor resultado ROC. En la Figura 6.19 y 6.20 se puede visualizar las clasificaciones a lo largo de la carretera.

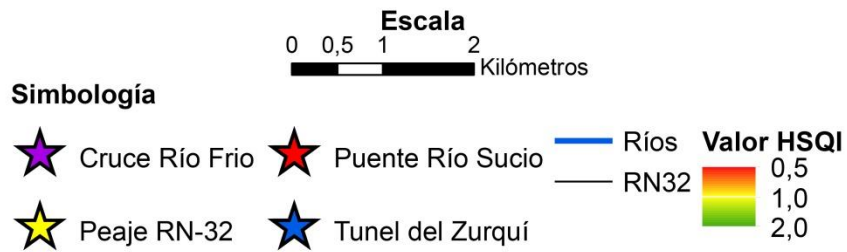
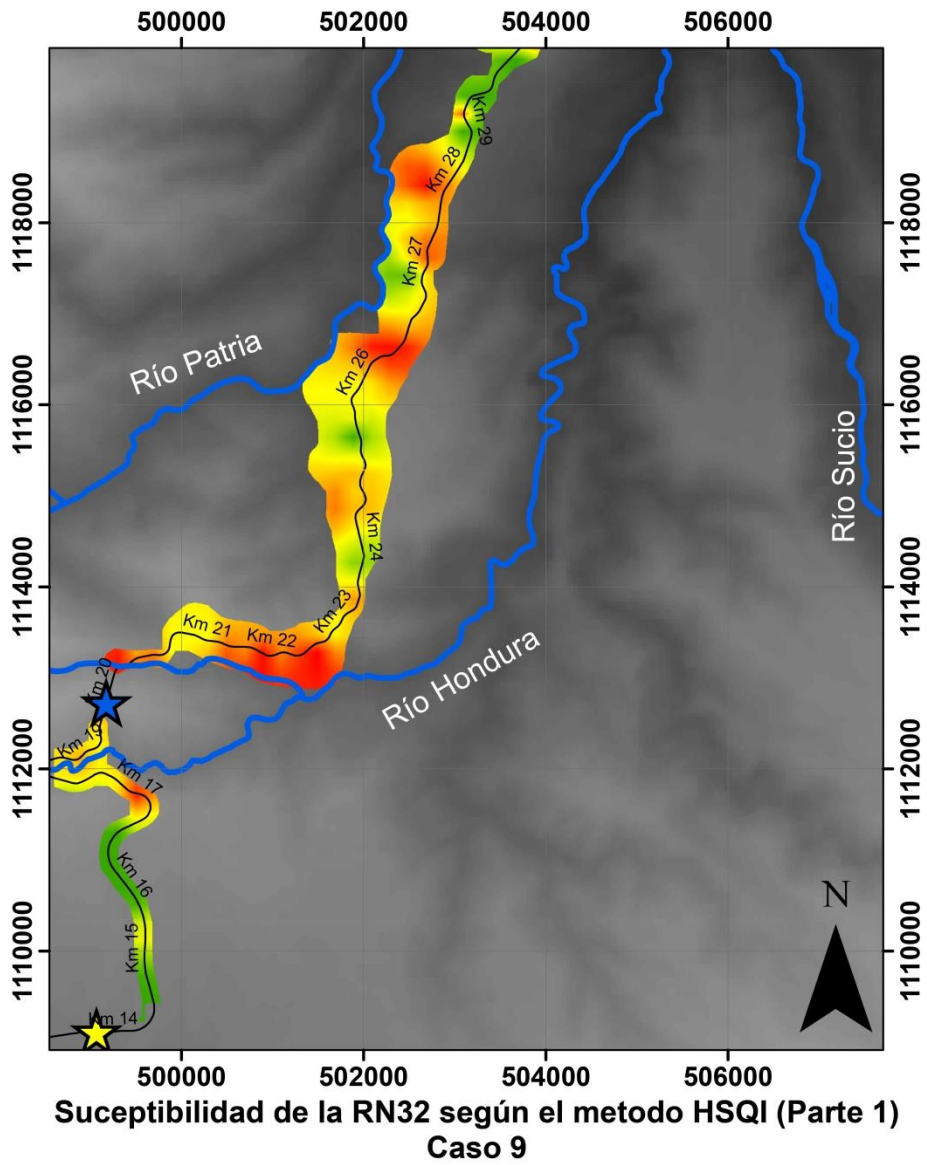
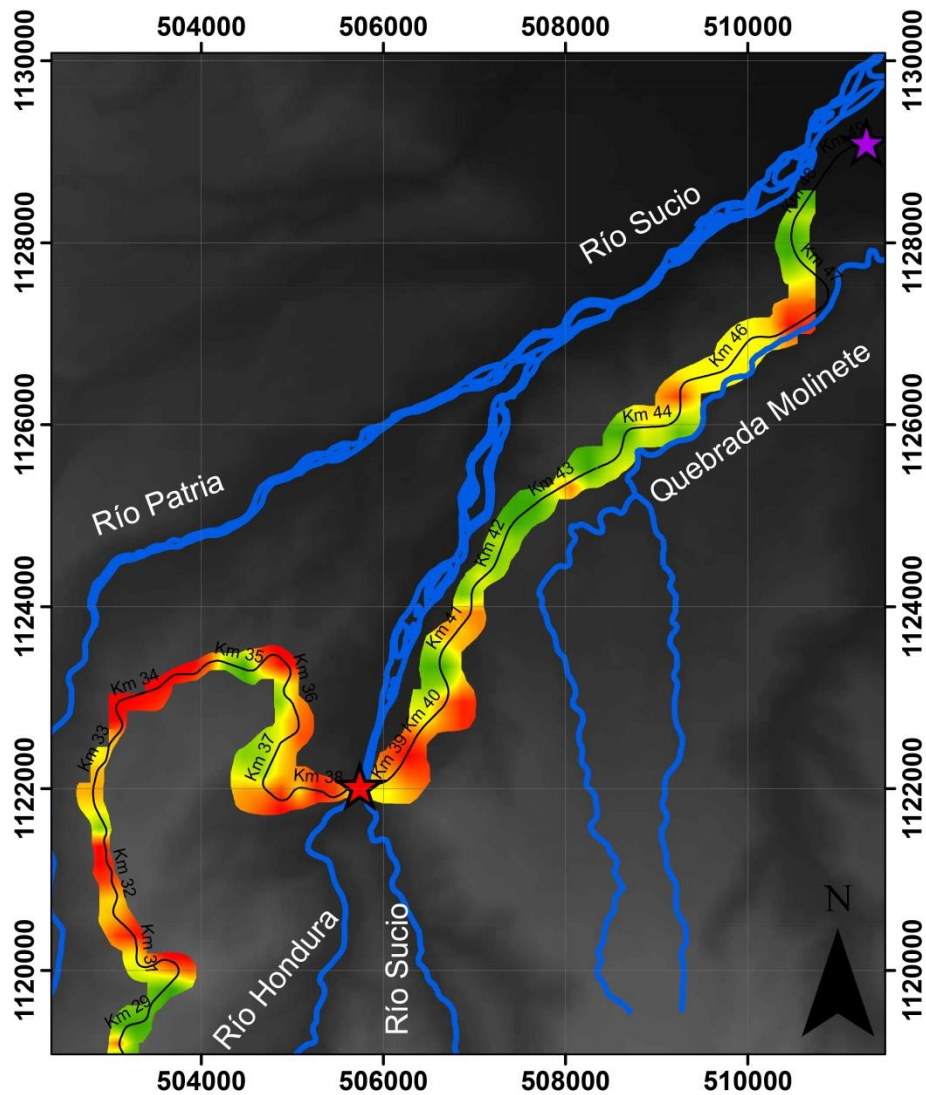


Figura 6.19. Mapa de susceptibilidad del tramo montañoso de la RN-32 según el caso que usa el retroanálisis, geometría del corte y un $H_w=0,7$, en el sector del peaje al estacionamiento 30+000.



Susceptibilidad de la RN32 según el metodo HSQI (Parte 2)
Caso 9

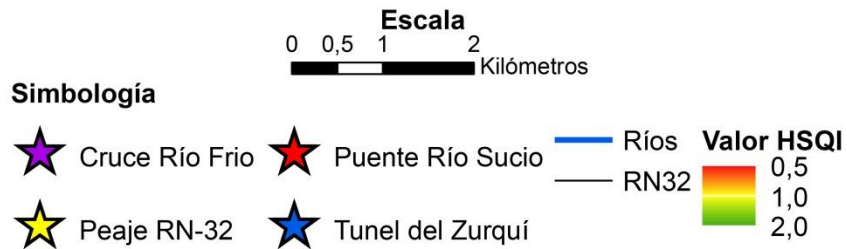


Figura 6.20. Mapa de susceptibilidad del tramo montañoso de la RN-32 según el caso que usa el retroanálisis, geometría del corte y un $H_w=0,7$, desde el estacionamiento 30+000 hasta el cruce de Río Frio.

Capítulo 7: Análisis Receiver Operating Characteristics

Con la totalidad de las secciones clasificadas con el método HSQI se procedió a realizar el análisis de clasificadores ROC. Con este análisis se evaluó la exactitud que tuvo el método HSQI para clasificar las diferentes secciones de la carretera en las tres susceptibilidades que propone el método (alta, media y baja). Para hacer el análisis, las aplicaciones se dividieron según los parámetros usados (ensayos de laboratorio o el ajuste de Lade), la geometría evaluada (la geometría natural o la geometría del corte) y las ecuaciones usadas. Esta división resultó en nueve casos dentro de los cuales se analizó el efecto que tuvo la variación del parámetro H_w en la clasificación. Estos casos fueron enumerados de uno a nueve para simplificar su mención. En la tabla 7.1 se detalla cual caso representa un determinado par de parámetros y geometría.

Tabla 7.1
Casos usados para evaluar el desempeño del método HSQI mediante el análisis ROC.

Numero de caso	Ecuaciones X	Parámetros Geométricos	Parámetros de resistencia
Caso 1	A,C,E	Geometría natural	Parámetros de laboratorio
Caso 2	A,C,E	Geometría del corte	Parámetros de laboratorio
Caso 3	A,C,E	Geometría natural	Ajuste Lade (2010)
Caso 4	A,C,E	Geometría del corte	Ajuste Lade (2010)
Caso 5	C,E	Geometría natural	Parámetros de laboratorio
Caso 6	C,E	Geometría del corte	Parámetros de laboratorio
Caso 7	C,E	Geometría natural	Ajuste Lade (2010)
Caso 8	C,E	Geometría del corte	Ajuste Lade (2010)
Caso 9	A,C,E	Geometría del corte	Retroanálisis

Los primeros ocho casos contienen variaciones de H_w de 0,3 a 0,7, esto genera 40 iteraciones del cálculo, el caso nueve solo contempla un H_w de 0,7 por lo que, la cantidad total de iteraciones es de 41.

La manera en que tanto el FPR como el TPR ubican los distintos puntos dentro del gráfico ROC y como estos se mueven según el aumento H_w nos indica cómo este parámetro afecta y cambia la clasificación brindada por el HSQI. Como ya se explicó en el capítulo dos, un punto “a”, dentro del gráfico ROC, que se encuentre hacia arriba a la izquierda de un punto “b” presenta una mejor exactitud

en su clasificación, dado que, esto representa una mayor cantidad de clasificaciones acertadas. Si la variación de Hw afecta positivamente la clasificación se esperaría un movimiento relativo hacia la coordenada (0,1) cada vez que se incrementa el Hw.

Los primeros 4 casos mostraron un desempeño muy bajo, pues en general se ubicaron cerca 0,0 o debajo de la línea diagonal del gráfico ROC. En la tabla 7.2 se presentan los valores TPR y FPR de estos cuatro primeros casos.

Tabla 7.2

Valores FPR y TPR para cada uno de los casos de aplicación del HSQI y sus variantes según el nivel freático. Casos 1-4

Caso	Nivel Freático (Hw)	FPR	TPR
Caso 1	0,3	0,25	0,23
	0,4	0,21	0,27
	0,5	0,24	0,29
	0,6	0,32	0,34
	0,7	0,33	0,37
Caso 2	0,3	0,38	0,55
	0,4	0,43	0,56
	0,5	0,44	0,56
	0,6	0,45	0,61
	0,7	0,46	0,58
Caso 3	0,3	0,18	0,15
	0,4	0,19	0,18
	0,5	0,21	0,27
	0,6	0,25	0,26
	0,7	0,33	0,29
Caso 4	0,3	0,28	0,42
	0,4	0,32	0,45
	0,5	0,36	0,50
	0,6	0,38	0,53
	0,7	0,40	0,57

El caso 1 presenta un desempeño muy pobre en Hw 0,3, este primer punto se encuentra por debajo de la línea diagonal (ver Figura 7.1), lo cual indica, mas clasificaciones erroneas que acertadas. Los puntos Hw 0,4 a 0,7 se ubicaron por encima de la diagonal, sin embargo, están muy cerca de esta como para llamarlos un buen resultado y su tendencia de movimiento hacia el par (1,1) indica que por cada clasificación correcta hubo una clasificación incorrecta. Este movimiento se define como aleatorio y refleja que con los parámetros usados el HSQI es inexacto.

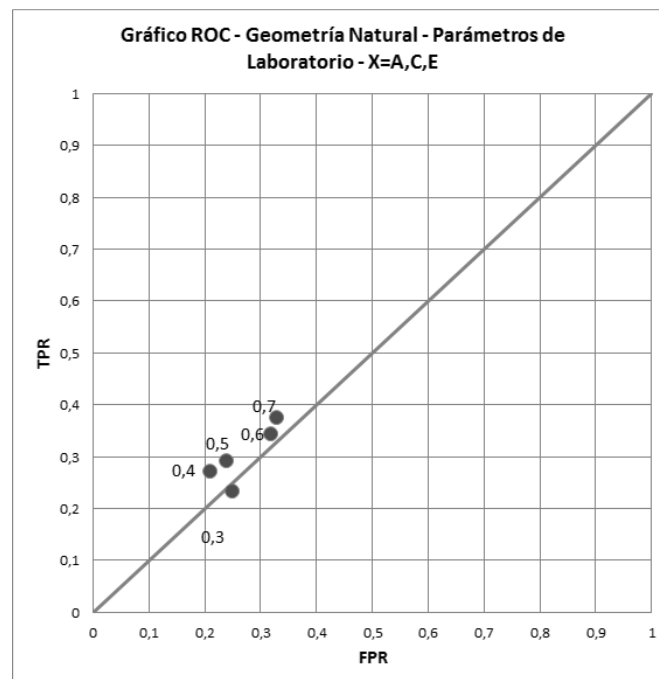


Figura 7.1: Caso 1. Un pobre desempeño por parte del método HSQI llevó al ROC a valores muy cercanos a la diagonal o inclusive abajo de esta.

Un alto número de clasificaciones positivas (susceptibilidad alta) hará que un punto se ubique cada vez más lejos del (0,0), sean estas verdaderos positivos (clasificaciones exitosas) o falsos positivos (clasificaciones erróneas), dado que, a medida que aumentan estas clasificaciones, también los hacen los valores TPR y FPR. Si observamos la Figura 7.1 vemos como las 5 iteraciones se encuentran cerca de (0,0), esto refleja una clasificación conservadora (pocas clasificaciones positivas/altas) producto de la geometría natural (menos empinada) y el uso de la ecuación A (talud drenado). Bajo estos factores el método requiere de parámetros de menor calidad para asignar a una sección una clasificación positiva (susceptibilidad alta).

El caso 2 presenta un desempeño mejor que el caso 1, todos sus puntos se encuentran sobre la diagonal (más clasificaciones exitosas que erróneas), no obstante, todas las iteraciones se encuentran agrupadas (ver Figura 7.2). Esto se debe a que el uso de las pendientes tan inclinadas de la geometría del corte vuelve insignificante el aporte del Hw, por ende, la clasificación no varía de manera importante. Los puntos correspondientes a Hw 0,3 como a Hw 0,6 presentan una mejor posición que el resto (movimiento hacia $x=0$, $y=1$), esto denota que en estas dos iteraciones hubo una mayor cantidad de clasificaciones correctas que incorrectas. En relación al caso 1 estas cinco iteraciones se encuentran más elevadas en los ejes “x” y “y”, esto muestra que al usar la geometría de corte (a diferencia de la geometría natural del caso 1) el metodo clasifica mas facilmente susceptibilidades altas, sin embargo, al aumentar tambien el valor FPR se nos indica que la tendencia aleatoria permanece.

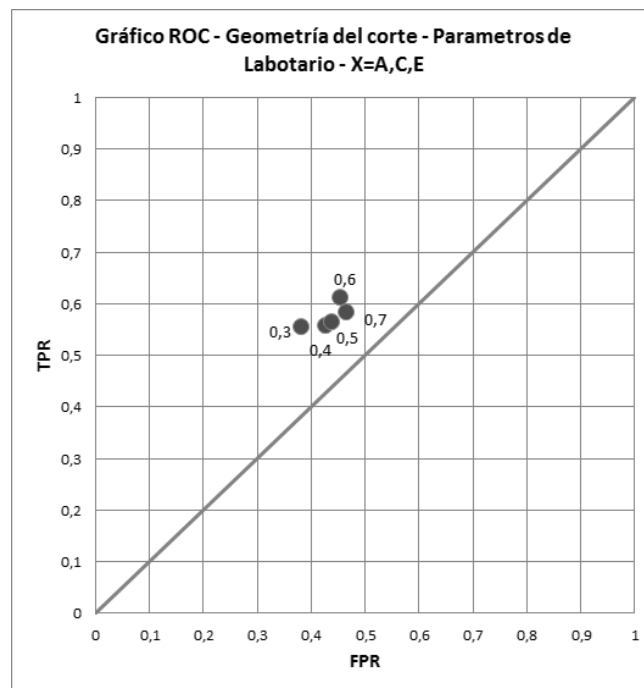


Figura 7.2: Caso 2, Un mejor desempeño en comparación al caso 1. Hw 0,3 y 0,6 muestran el mejor desempeño de los 5 casos.

El caso 3 de la misma manera que el 1 presenta un pobre desempeño, solo los casos correspondientes a Hw 0,5 y 0,6 se ubican arriba de la diagonal, pero lo suficientemente cerca como para no tomarlos como resultados positivos. Nuevamente se evidencia como la combinación de la geometría natural y el uso de la ecuación A fuerzan al método a un comportamiento conservador (ver Figura 7.3).

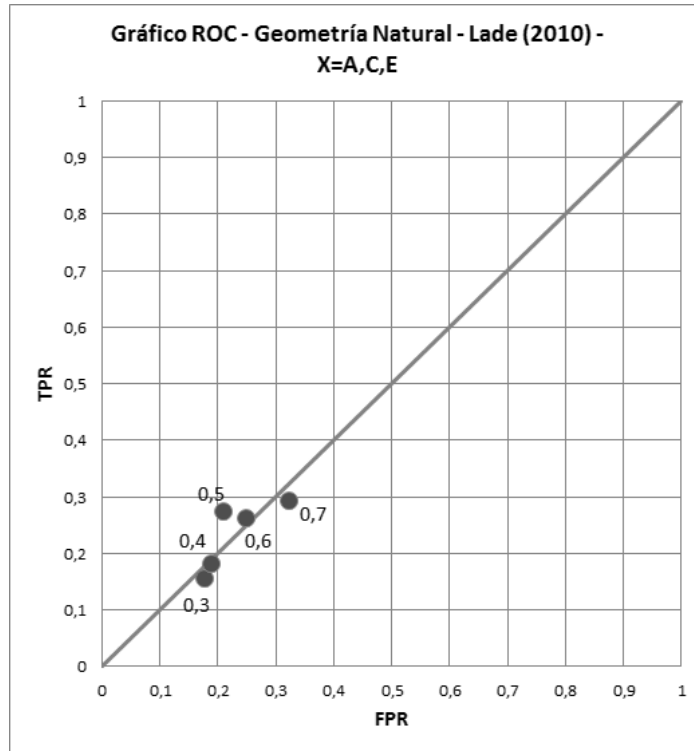


Figura 7.3: Caso 3, Un desempeño conservador y deficiente. En este caso el método solo asigna una clase positiva bajo parámetros de muy baja calidad.

El caso 4 (ver Figura 7.4), a diferencia de los tres casos anteriores, muestra que sus cinco iteraciones se encuentran mas elevadas en el eje “y” de que lo que estan en el eje “x”, es decir, hubo mas clasificaciones exitosas que erróneas, debido a esto, si se aisla cada punto se puede hablar de un comportamiento levemente eficiente del método. Sin embargo, el comportamiento de los cinco puntos muestra nuevamente un movimiento aleatorio.

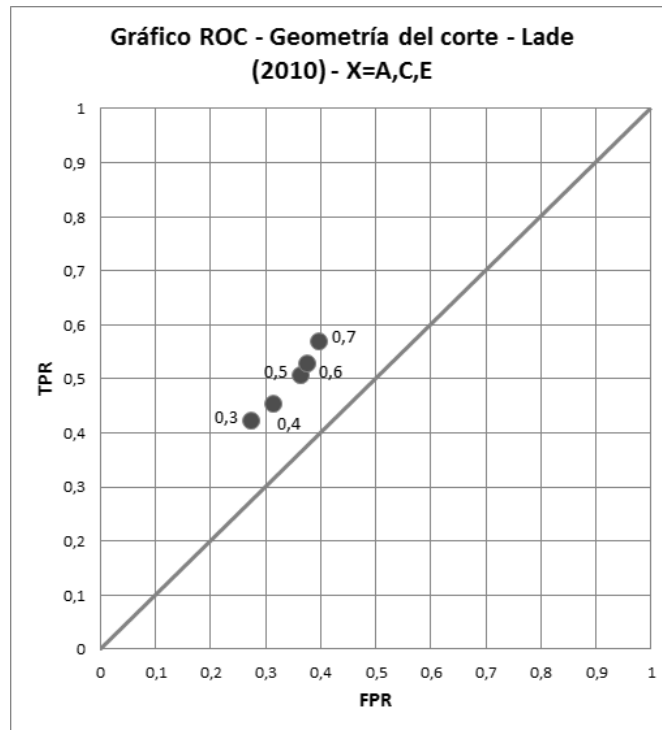


Figura 7.4: Caso 4. Un comportamiento aleatorio en el lado positivo del gráfico. Esto muestra que, si bien, existió un comportamiento aleatorio, hubo una tendencia a clasificar más secciones de manera correctamente que erróneamente.

Estos primeros cuatro casos muestran un comportamiento fluctuante (entre conservador y no conservador) al usar la geometría natural o la del corte del talud. Si bien el caso 4 presenta en relación a los tres primeros casos una clasificación mucho mejor, a ninguno de los cuatro casos se les puede llamar una aplicación exitosa. El factor común en estas aplicaciones es el uso de la ecuación A, la cual asume un talud drenado en presencia de un drenaje divergente, esta asunción es (en una zona con tan alta precipitación) errónea. Este factor fue el causante de la alta tasa de falsos positivos (clasificaciones erróneas). Los puntos a salvar dentro de estos primeros casos son el de Hw 0,3 y 0,6 del caso dos y el Hw 0,7 del caso cuatro pues estos mostraron una tendencia mayor hacia (0,1) que el resto.

Los siguientes casos fueron aplicados usando sólo las ecuaciones C y E correspondientes al valor X del método HSQI. En la Tabla 7.3 se puede observar los valores FPR y TPR de cada punto de estos cuatro casos.

Tabla 7.3

Valores FPR y TPR para cada uno de los casos de aplicación del HSQI y sus variantes según el nivel freático

Caso	Nivel Freático (Hw)	FPR	TPR
Caso 5	0,3	0,3	0,25
	0,4	0,27	0,35
	0,5	0,40	0,44
	0,6	0,40	0,52
	0,7	0,44	0,55
Caso 6	0,3	0,48	0,60
	0,4	0,55	0,63
	0,5	0,57	0,63
	0,6	0,61	0,68
	0,7	0,53	0,65
Caso 7	0,3	0,20	0,16
	0,4	0,27	0,29
	0,5	0,33	0,31
	0,6	0,31	0,45
	0,7	0,44	0,55
Caso 8	0,3	0,31	0,46
	0,4	0,36	0,50
	0,5	0,55	0,63
	0,6	0,44	0,65
	0,7	0,54	0,70

El caso 5 presenta una distribución aleatoria a medida que el nivel freático aumenta (ver Figura 7.4). Lo primero a notar es que el punto 0,3 se encuentra debajo de la diagonal (mas clasificaciones erroneas que exitosas). Las otras iteraciones ,si bien se encuentra sobre la línea diagonal, siguen encontrandose muy cerca de esta. El movimiento relativo entre el punto Hw 0,5 y el 0,6 es peculiar, debido a que al aumentar el Hw el movimiento generado solo se manifiesta en el eje “y”. Este comportamiento es el esperado en una clasificación

exitosa, puesto que, las nuevas clasificaciones positivas (susceptibilidad alta) fueron exactas, es decir, correspondieron con secciones con evidencia de deslizamiento (clasificación verdadera). A diferencia del caso 1, cuya única variación fue el uso de la ecuación A, el caso 5 no presenta un comportamiento conservador (exceptuando el correspondiente a Hw 0,3 y 0,4), por consiguiente, la supresión de la ecuación A (condición de talud drenado) permitió al método una mayor libertad para clasificar positivamente y por ende clasificar de mejor manera que las secciones.

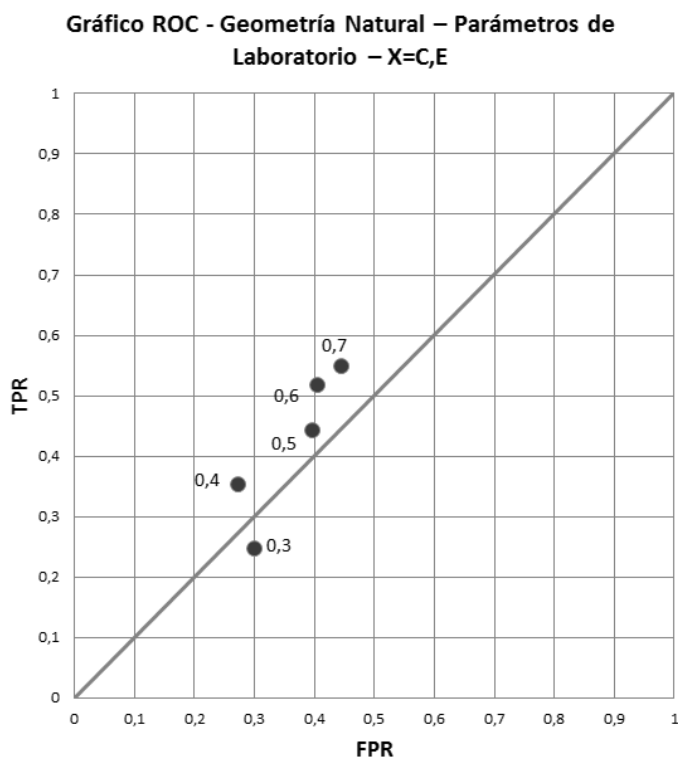


Figura 7.4: Ubicación final de los cinco puntos ROC del caso 5.

A diferencia de los comportamientos conservadores que se han visto hasta este momento, se puede obtener un comportamiento liberal, el cual se define como una sobreclasificación positiva (susceptibilidad alta) de las secciones. Este comportamiento se da cuando los parámetros introducidos en las ecuaciones son de muy mala calidad, los cuales, por consiguiente, vuelven muy fácil que una sección sea catalogada como de susceptibilidad alta, en el caso 6 (Figura 7.5) tenemos este comportamiento. Al usar la geometría del corte del talud (laderas muy empinadas) sin el uso de la ecuación A el método sobreestima el total de secciones de alta susceptibilidad, las cuales a su vez son clasificadas tanto exitosamente como erróneamente (comportamiento aleatorio). Esto genera el desplazamiento hacia el par (1,1) de las iteraciones en este caso.

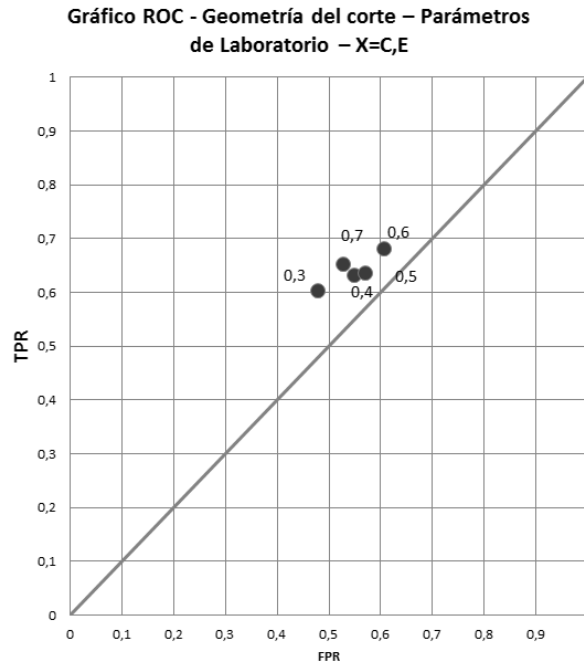


Figura 7.5: Ubicación de los puntos ROC para el caso 6. Los puntos se encuentran agrupados (similarmente al caso 2) debido al mayor efecto de los parámetros geométricos sobre el resultado final que el que tiene el parámetro Hw.

Estos dos casos muestran un comportamiento de la clasificación levemente positivo, sin embargo, el nivel de error (falsos positivos) tiene una relación con los verdaderos positivos muy cercana a 1:1, es decir, un comportamiento aleatorio. Los únicos puntos que se comportan levemente distinto a esta relación son el punto 0,6 del caso 5 y los puntos 0,3 y 0,7 del caso 6, los cuales muestran una mejor relación en favor a TPR.

Los casos 7 y 8 usan el ajuste de Lade (2010). El caso 7 presenta un desempeño relativamente aleatorio. La ubicación cercana a la esquina inferior izquierda de estos 3 puntos muestran un comportamiento conservador (baja cantidad de clasificaciones positivas) mientras que los puntos Hw 0,6 y 0,7 si mostraron una mejor clasificación de las secciones. En la Figura 7.6 se aprecia este comportamiento.

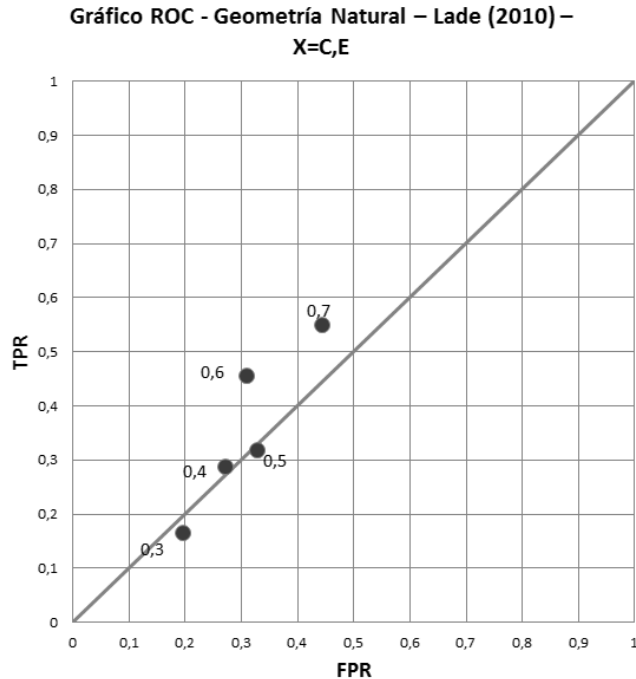


Figura 7.6: Movimiento de los puntos del caso 7 en a medida que cambio el parámetro Hw.

Observando más detalladamente el comportamiento del caso 7 llama la atención el cambio en la tendencia de movimiento entre los puntos Hw 0,5 y 0,6, el cual es similar al que se presentó en el caso 5. Desde el punto 0,3 a el 0,5 se mantiene la tendencia aleatoria, no obstante, en Hw 0,6 rompe con este movimiento y se eleva en el eje “y” e inclusive retrocede levemente en el eje “x”. Este tipo de comportamiento se debe a un mayor aumento en las clasificaciones verdaderas positivas que falsas positivas, es decir, el aumento en secciones de susceptibilidad alta tuvo una exactitud mucho mejor que los puntos restantes. Al llegar al punto 0,7 vemos un regreso a la tendencia pasada solo levemente mayor en TPR que en FPR.

El caso 8, presenta en general el mejor desempeño de los ocho primeros casos, puesto que, sus puntos están en comparación más alejados de la diagonal. Los puntos correspondientes a Hw 0,3, 0,4 y 0,5 siguen una tendencia lineal cada vez más cercana a la diagonal sin embargo, al llegar a 0,6 la tendencia se rompe nuevamente y el punto se mueve bruscamente en el eje “x” hacia la izquierda con un leve movimiento en el eje “y” (ver Figura 7.7). Esto nuevamente nos indica una mejoría significativa en la clasificación, en este caso el FPR disminuyó considerablemente.

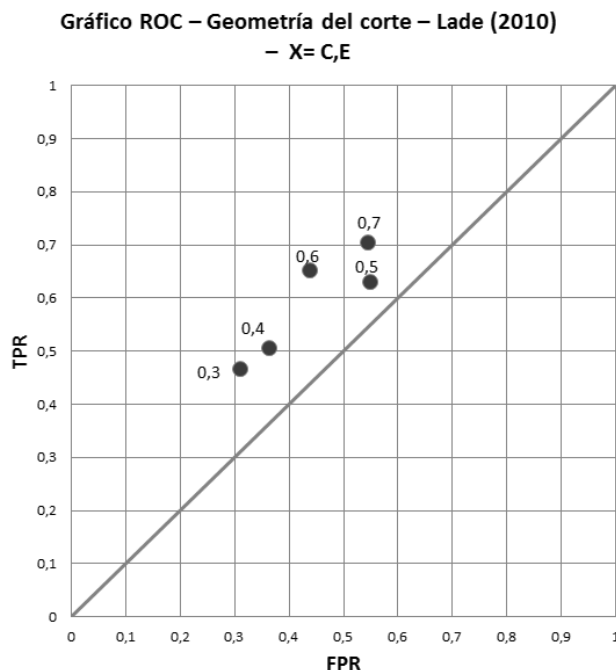


Figura 7.7: Movimiento de los puntos del caso 8. Es especialmente notable el movimiento de 0,6 lo cual indica una mejor clasificación que el resto de los puntos.

Los casos 5, 6, 7 y 8 se diferencian de los cuatro primeros en la supresión de la ecuación A, esto generó (en promedio) una mayor cantidad de verdaderos positivos que de falsos positivos, por ende, se confirma que el uso de la ecuación A no refleja los niveles freáticos presentes en el tramo de la carretera estudiado. Sin embargo, el comportamiento general está lejos de ser óptimo puesto que hay muchos puntos con un comportamiento aleatorio o con mayor cantidad de falsos positivos. Las mejores iteraciones de estos cuatro casos son puntos Hw 0,6 y 0,7 de los casos 5, 7 y 8, esta mejor clasificación a mayores niveles de Hw refleja la realidad de una zona de alta precipitación como lo es el sector montañoso de la RN-32.

El caso 9, el cual corresponde al retroanálisis, presenta el mejor resultado de todas las aplicaciones del método. Los valores TPR y FPR de este caso (0,34 y 0,98 respectivamente) son el resultado de una clasificación negativa (susceptibilidad baja) casi perfecta (un falso negativo contra 43 verdaderos negativos) y de una clasificación positiva (susceptibilidad alta) con un 62% de exactitud (41 verdaderos positivos contra 25 falsos positivos). Esto muestra que la susceptibilidad baja fue la mejor evaluada por el método en este caso y la alta, si bien tuvo un error, puede considerarse una clasificación buena.

La ubicación del punto para este caso (ver Figura 7.8) contrasta fuertemente con los restantes 40 puntos, pues si bien en los 40 puntos anteriores hay algunos que se ubican lo suficientemente lejos de la curva como para pensar en un desempeño levemente bueno, siguen estando fuera de una posición óptima.

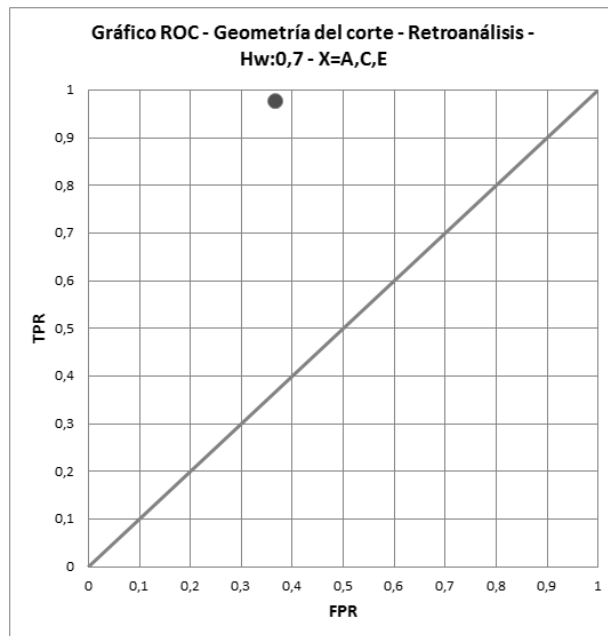


Figura 7.8: Posición dentro del gráfico ROC del caso 9. Con un valor TPR casi ideal el punto se ubica en una zona óptima, sin embargo, el valor FPR podría bajar todavía más con una mejor clasificación de positivos.

Este caso usó la geometría del corte pues es en la que se dan la mayor cantidad de los deslizamientos, un Hw igual a 0,7 para reflejar la alta precipitación de la zona y las tres ecuaciones escogibles para el valor X. Puesto que se está usando la geometría del corte de los taludes se decidió usar la ecuación A para disminuir los cambios realizados al método en comparación a lo propuesto por Moreno-Ceballos (2015).

Capítulo 8: Discusión de resultados

El propósito de este trabajo no fue solo el de aplicar el método HSQI en la RN-32, sino también, evaluar su eficiencia en la determinación de la susceptibilidad al deslizamiento en los taludes y laderas que conforman el sector de la RN-32 estudiado, bajo las características geológicas y climáticas propias de la zona.

El hecho de que un 81% de los deslizamientos dentro del área con información Lidar se encuentren en el corredor vial, evidencia, el papel protagónico que juega el ángulo de los cortes de taludes en la inestabilidad de los mismos, de los cuales, gracias al análisis de pendientes realizado, se sabe que son mayores a 35° y en muchos casos mayores a 55°.

Si bien se hizo un cartografiado geológico, la alta cantidad y densidad de vegetación evito que el cartografiado fuera de un detalle óptimo. Esta vegetación dificultó el abistamiento de los contactos entre las distintas unidades geológicas descritas en este trabajo, es por esta razón que los contactos entre las unidades son inferidos y es probable que los contactos reales en los cortes de los taludes sean desplazados con la introducción de nuevos afloramientos al catálogo.

No fue posible relacionar la geología en el área de estudio a la ocurrencia o no de deslizamientos, dado que, tanto la altura como los ángulos de inclinación de los taludes o laderas estudiados varía al mismo tiempo y en gran medida. Si bien en la zona de mayor densidad de deslizamientos (estacionamientos 20 a 23) la unidad geológica presente son brechas, no fue posible relacionar la misma con la ocurrencia de los deslizamientos, puesto que, en esta zona la geometría de las laderas es altamente desfavorable a la estabilidad de las mismas. De igual manera ni las lavas basálticas ni los flujos piroclásticos presentaron un patrón que los indique como un factor en la generación de los eventos de remoción de masa. La zona entre los estacionamientos 41 a 46 es dominada por flujos piroclásticos, la misma presenta una baja densidad en deslizamientos, sin embargo, tanto la altura como los ángulos de los cortes de taludes en esta zona son menores al resto del sector estudiado, por lo que no se puede atribuir a la litología la disminución de eventos.

En la aplicación del HSQI y en su subsecuente evaluación con el ROC se observó cuales fueron los parámetros que mejores resultados devolvieron. El uso de las tres ecuaciones del valor X (A, C Y E) generó resultados muy conservadores, asignando, por lo tanto, susceptibilidades bajas a secciones con

deslizamientos en el sector vial estudiado, esto es debido a la aplicación de la ecuación A, la cual representa una sección sin presencia de nivel freático. El asumir una zona sin un nivel freático existente en una región con tan alta precipitación a lo largo del año, basándose tan solo en la forma de la ladera (convexa/flujo divergente) es ignorar la realidad climática del área en estudio, y por ende, incurrir en errores en la clasificación de las diversas secciones. Al omitir esta ecuación se logró reflejar de mejor manera el nivel freático en la zona y, por lo tanto, se obtuvo una mejor eficiencia en la clasificación.

El valor H_w se varió de 0,3 a 0,7, con el fin de, observar las diferencias en la clasificación del HSQI a medida que el valor aumentaba. Los resultados son acordes a lo que mostró la omisión de la ecuación A, es decir, asumir valores bajos de nivel freático en este tipo de clima disminuye la eficiencia del método y subestima la susceptibilidad del corredor vial. Los mejores resultados fueron dados por H_w iguales a 0,6 y 0,7 estos son valores altos que reflejan de mejor manera la precipitación en la zona. Es muy probable que en regiones de menor precipitación sean valores bajos de H_w , como 0,3 o 0,4, los que muestren un mejor desempeño. Este resultado no hace más que reafirmar la necesidad de conocer de buena manera las condiciones hidrogeológicas de un área en estudio.

Es entendible el por que el HSQI propone el uso de la geometría natural de las laderas, al ser un método pre-constructivo la geometría disponible para la resolución de las ecuaciones es la generada por los procesos de meteorización y erosión, más no aquella que se realiza en un diseño de obra, no obstante, quedó claro que es la geometría de los cortes de los taludes la que genera los deslizamientos en este sector vial. Debido a que se quiere determinar si el HS QI se puede usar de manera forense sería sensato emplear la geometría de los taludes, sin embargo esto contradeciría lo que propone el método, debido a esto es que se emplearon ambos juegos de parámetros geométricos. El uso de la geometría natural, la cual presenta menores ángulos de inclinación, condujo al método a sobre-estimar la cantidad de secciones de susceptibilidad baja y, por lo tanto, generar una mala clasificación. Al contrario, la geometría de los cortes de taludes mostró un mejor desempeño en la clasificación al aumentar las secciones de susceptibilidad alta.

Los resultados de los ensayos de laboratorio mostraron un muy mal desempeño, el cual fue generado por los valores altos de cohesión y ángulos de fricción. Ahora bien, los ensayos fueron atípicos gracias a la cantidad de arena y grava de los materiales, los cuales permitieron a los núcleos de material fallar muy rápido una vez introducidos en las máquinas triaxiales y por ende, generar los resultados atípicos. Para solventar esto se realizó el ajuste de Lade (2010), el

cual, si bien redujo la cohesión a valores más propios de materiales arenosos, aumentó el ángulo de fricción a valores no propios de estos materiales, esto llevo a un aumento de la susceptibilidad baja y, por ende, una clasificación menos eficiente.

El uso de los parámetros de cohesión y ángulo de fricción obtenidos de los ensayos de laboratorio y del ajuste de Lade (2010) mostraron el efecto y peso que tienen estos valores en los resultados de las ecuaciones. Al comparar es evidente que si bien el ajuste de Lade (2010) presentó menores cohesiones, el aumento del ángulo de fricción dominó la clasificación al aumentar la cantidad de secciones de susceptibilidad baja. Debido a esto es posible afirmar que de los parámetros de resistencia es el ángulo de fricción el que mayor efecto tiene en el método HSQI.

Si se desea usar el HSQI de manera forense es importante comprender los factores que causaron un deslizamiento y usar este conocimiento para elegir los parámetros que realmente se ajusten a la realidad de la carretera. En este caso el uso de la ecuación A fue incorrecto pues esta no se acopla con la precipitación de la zona, de igual manera usar la geometría natural de las laderas ignora los problemas de estabilidad que se generaron con el corte de los taludes. Estas inconsistencias reflejan que el metodo HSQI realiza muchas asunciones en su aplicación, no obstante, el metodo tiene mérito, puesto que, al omitir la ecuación A, usar la geometría de los cortes de talud, emplear altos valores H_w y seleccionar valores de resistencia acordes a los materiales, el HSQI fue capaz de generar un buen resultado (como se observo en el caso 9)

El método HSQI, como muchos otros métodos, hace suposiciones en base al peso que las ecuaciones le asignen a cada parámetro y a los valores que estos presenten. Dos métodos distintos generarán resultados distintos aun cuando los parámetros de entrada que se apliquen sean iguales, estos resultados no se pueden catalogar como mejor o peor sin antes conocer el objetivo para el cual se están aplicando. El método HSQI no es una herramienta que se deba aplicar a análisis regionales, pues como se vió, los parámetros geométricos pueden variar en gran medida y ,dificultar así, la delimitación de las secciones. Es mejor aplicar el HSQI en laderas homogeneas donde los cambios en ángulos y alturas se den en distancias largas.

De manera similar, el HSQI no es un método que suplante análisis in situ enfocados en un talud en especifico, es mejor usar el HSQI es análisis de áreas de tamaño intermedio, donde sea necesario sectorizar el terreno para facilitar la

intervención geotécnica o determinar las zonas que requieren un análisis más detallado.

No se aconseja usar el HSQI en taludes conformados por macizos rocosos, puesto que los parámetros de resistencia en estos casos son difíciles de obtener y se debe recurrir a aproximaciones teóricas. Es mejor usar el HSQI en taludes o laderas conformadas por material granular, en los cuales el moldeo y ensayo de los materiales sea más sencillo de hacer.

Capítulo 9: Conclusiones y recomendaciones

Gracias al uso de información Lidar y ortofotos en este trabajo, el análisis de la geomorfología obtuvo una calidad y detalle muy altos. Las unidades geomorfológicas han evolucionado debido al efecto constante de la erosión. Las geoformas generadas son mayoritariamente denudacionales, las cuales incluyen montañas, colinas y movimientos de masa (deslizamientos). Estas geoformas presentan diferentes grados de inclinación en sus laderas, desde pendientes de muy alta inclinación (de 55° a 90°) en los cortes de la carretera, hasta pendientes de alta inclinación (de 35° a 55°) en las laderas más alejadas, tanto horizontal como verticalmente, de la vía. Una minoría de pendientes de baja inclinación existe en algunas cimas de las montañas o en los valles entre estas, sin embargo, estas pendientes son más típicas de las unidades fluviales como los ríos y quebradas o en el abanico aluvial al norte de la zona. Otro factor importante que se observó en el análisis geomorfológico es el que la altura de los taludes es, en algunos sectores, extremadamente alta (>100 m), lo cual incrementa la susceptibilidad al deslizamiento.

El patrón de drenaje en la zona es paralelo a dendrítico, lo cual, en relación a la carretera genera drenajes divergentes, paralelos y convergentes. De estos tres tipos de drenaje, el paralelo es el dominante, al estar presente en la mitad del tramo estudiado. Este tipo de drenaje representa un punto medio (en cuanto a la severidad de la saturación de los taludes) en las fórmulas del HSQI, pues no toma a la sección como completamente drenada o saturada. El efecto de los drenajes paralelo y convergente amplifica moderadamente el papel que juega el nivel freático en la susceptibilidad de los taludes, pues, promueve la acumulación de agua subterránea en estos aumentando así la probabilidad del disparo de un deslizamiento

El detalle de la topografía obtenida mediante la técnica Lidar fue vital para reconocer los deslizamientos que se encuentran cubiertos por vegetación o los que son muy pequeños para ser distinguidos por topografías de menor detalle. Los deslizamientos de menos de 1000 m² ocurren principalmente en los cortes de la carretera, indicando la afectación que tiene el ángulo de estos en la estabilidad de la zona.

A través del tramo estudiado se identifican ciertas agrupaciones de deslizamientos. Estas se ubican en los estacionamientos 20 a 25 (posterior al túnel del Zurquí) donde los deslizamientos son de un tamaño de hasta 10000 m² y

entre los estacionamientos 42 y 43 donde si bien no son mayores de 5000 m² se genera una agrupación importante. Es importante mencionar que dentro del área con información Lidar el 81% de los deslizamientos ocurren en el corredor vial, esto refleja que el ángulo elevado de los cortes es el principal responsable en la inestabilidad de la zona.

El mapa de densidad de deslizamientos deviene en uno de los resultados más interesantes del inventario recabado, puesto que permite visualizar en términos espaciales (km²) cuáles son las áreas que históricamente han presentado una mayor cantidad de eventos. En las zonas posteriores al túnel del Zurquí (estacionamientos 20+000 a 22+000) y en los estacionamientos 25+000, 29+000 y 33+000 hay una especial acumulación de deslizamientos, de entre 6 a 12 deslizamientos por km², estas zonas son las que históricamente han presentado una mayor cantidad de eventos. La geología en estas áreas corresponde con brechas y basaltos respectivamente, cuyas pendientes son extremadamente fuertes y altas, lo cual favorece la inestabilidad del terreno.

La geología en la zona es de origen ígneo, con una edad estimada en un máximo de 1,2 millones de años, proveniente de los volcanes Barva, Irazú y los cerros del Zurquí. La misma esta compuesta por brechas, lavas basálticas y flujos piroclásticos (principalmente tobas cristalinas). Estas rocas al estar expuestas a los agentes erosivos como agua, viento y meteorización, han creado un paisaje montañoso sumamente empinado y disectado. Los contactos entre las distintas unidades geológicas fueron, sin embargo, difíciles de observar directamente, debido a la gran cantidad de vegetación que presenta la carretera y a la aleatoriedad de los deslizamientos, la cual evita una observación sistemática de las rocas y, por ende, el seguimiento constante de una litología .

Las lavas representan un 50% de la longitud del sector en estudio, estas están a su vez divididas en tres subunidades: Subunidad Lavas Río Sucio, Lavas Olivínicas y Lavas Molinete. No se observó ninguna relación entre los deslizamientos y las subunidades por lo que se puede decir que la composición de las lavas no afecta la estabilidad de un determinado talud (en el caso del área de estudio). Las brechas se extienden por 9,4 kilómetros, dominando el sector próximo al túnel del Zurquí. Es en esta litología donde aparece uno de los cúmulos más importantes de deslizamientos, sin embargo, es más probable que esta agrupación de eventos esté controlada por la altura y ángulo de los taludes más que por las características de la litología. Por último los flujos aparecen solamente a través de 7,2 kilómetros del tramo montañoso. Esta litología domina el sector posterior al puente sobre el río Sucio, en donde se encuentra sumamente meteorizada y fallada. El origen del fallamiento no es seguro, aunque es posible

que este relacionado a la falla Guápiles o la falla Río Sucio, las cuales se ubican en las cercanías de la zona.

Los deslizamientos más frecuentes en la zona de estudio ocurren por el alto grado de meteorización de las capas superficiales, las cuales descansan sobre una capa de roca o algún horizonte de suelo sano o levemente meteorizado, lo cual produce el desprendimiento de la capa meteorizada. Esta capa de suelo meteorizado se torna inestable durante periodos de alta precipitación (o en algunos casos sin esta), por consiguiente, al alcanzar una cantidad crítica de agua se desliza de manera extremadamente rápida (segundos de duración). Entre más elevada esté la corona del deslizamiento más tiende este a ser de tipo rotacional (por ejemplo los deslizamientos posteriores al túnel del Zurquí), sin embargo, en las paredes de corte (ángulos de $>55^\circ$) los deslizamientos son planares y acarrear el material más superficial. Por el tipo de material que se desliza (arcillas, limos, arenas, gravas, bloques) es difícil catalogar a los movimientos de masa como de suelo o de roca, por esto se decidió catalogarlos como ambos: Deslizamientos de escombros con limo.

El total de 212 secciones en las que se dividió la carretera para la aplicación del HSQI se debe primariamente a la variación entre los tipos de drenajes y al límite impuesto de 250 m, sin embargo, esto lejos de ser un contratiempo ayudó a una mejor visualización de cómo el método varía debido a condiciones locales de cada sección.

La aplicación del HSQI al inicio del proyecto se planteaba como un solo resultado, con las variables obtenidas de los ensayos de laboratorio, de la geometría natural de las zona y con un Hw de 0,6. Al avanzar el proyecto se notó que estos parámetros no necesariamente son los más adecuados para una representación exacta de la zona del Braulio Carrillo, en cambio, una aplicación con varias iteraciones del método permitió determinar cuáles son los casos y parámetros que más se acercan a las condiciones de estabilidad real de la zona y por ende, cuales son los que hay que usar para una aplicación del método en esta zona. El parámetro Hw se varió de 0,3 a 0,7 para mostrar un nivel freático variable a través del año. Para la geometría se obtuvieron datos de los cortes antrópicos y del terreno que no ha experimentado intervención humana. Esta variación en la geometría permitió observar el antes y después de la susceptibilidad de la zona a la construcción de la carretera y cuál de estas dos domina la generación de deslizamientos. Finalmente los parámetros de resistencia de los materiales se obtuvieron en un inicio con ensayos de corte directo y triaxiales, sin embargo, estos resultados no dieron una buena clasificación por lo que fue necesario modificarlos en base al ajuste de Lade (2010) y al mismo tiempo, generar otro

juego de datos en base a un retroanálisis. Estas variaciones a los parámetros que se deben introducir en las formulas generó un total de 41 iteraciones del HSQI las cuales se agruparon en 9 casos según la geometría, parámetros de resistencia y ecuaciones usadas.

De los 9 casos evaluados los que presentaron un comportamiento más deficiente y conservativo fueron aquellos en los que se aplicaron las ecuaciones A,C y E. El hecho de suponer pendientes drenadas en una zona con una precipitación tal alta hizo que el método solo clasificara una sección como de susceptibilidad alta bajo parámetros sumamente malos, lo cual aumentó en gran medida la cantidad de falsos negativos y moviera los puntos ROC hacia el (0,0). Al aplicar sólo las ecuaciones C y E los resultados mejoraron y hubo una mayor cantidad de puntos que se situaron lo suficientemente arriba de la diagonal como para ser considerados satisfactorios.

El comportamiento de la clasificación del HSQI tendió en todas las aplicaciones a aumentar la susceptibilidad alta a medida que aumentaba el valor Hw, sin embargo, este aumento de susceptibilidad alta fue aleatorio pues no coincidió completamente con las secciones con evidencia de deslizamiento. Aun así, los puntos ROC con una mejor ubicación dentro del grafico fueron (generalmente) aquellos correspondientes a Hw de 0,6 y 0,7. Esto nos indica que para una zona de alta precipitación, como lo es el sector del Braulio Carrillo, es mejor usar valores de Hw altos, puesto que, estos se acercan más a la realidad de la zona.

El cambio de los parámetros geométricos mostró que, al usar la geometría natural de las pendientes, se subestimó la susceptibilidad real de los taludes carretera en el sector estudiado. Esto es interesante, puesto que, al ser el HSQI un método pre-constructivo el uso de esta geometría es necesario, pues, no se cuenta con la geometría de diseño. Contrariamente, el uso de la geometría de los cortes de los taludes reflejó de mejor manera las condiciones de inestabilidad y por ende, la susceptibilidad del sector.

La variación de los parámetros de resistencia tuvo un comportamiento inesperado. En general la eficacia del método en los niveles bajos de Hw se redujo al usar el ajuste de Lade (2010), esto se debe a que este ajuste aumentó el ángulo de fricción, generando así, una mayor cantidad de secciones de baja susceptibilidad con un comportamiento aleatorio. La cohesión por otro lado aumentó la clasificación de susceptibilidad alta, sin embargo, el efecto de un ángulo de fricción mayor dominó la clasificación. Es notable, aun así, el resultado del retroanálisis el cual genero el mejor desempeño de los nueve casos. Con

cohesiones en el rango de 19 a 31 kPa y ángulos de fricción entre 36° a 38° hubo una clasificación de susceptibilidades baja casi perfecta mientras que las susceptibilidades altas tuvieron una eficacia del 62%. Es todavía más notable al saber que este retroanálisis se hizo con la geometría del corte y un Hw de 0,7, lo cual debería hacer que las secciones de susceptibilidad baja tuvieran un error considerable como en casos anteriores.

El propósito de aplicar el HSQI de forma intensiva se hizo con el propósito analizar cómo cada parámetro afectaba el resultado final y cuál de todas las 41 aplicaciones mostraba un mejor desempeño. Observando cada iteración vemos como niveles bajos de Hw (0,3-0,5) en combinación con la geometría natural de las pendientes generaron un HSQI conservador con una alta cantidad de falsos negativos. Por otro lado para los Hw 0,6 y 0,7 el resultado ROC fue mucho mejor e inclusive más cuando estos se combinaron con la geometría de los cortes de los taludes. Por lo que es seguro decir que para efectos de la carretera, en este sector montañoso, las mejores determinaciones de la susceptibilidad se dan con un alto Hw y las pendientes de los cortes de los taludes. Los parámetros de resistencia, por aparte, mostraron que cohesiones altas ($40 >$ kPa) no reflejan de una buena manera al material deslizante y que los ángulos de fricción altos pueden subestimar la susceptibilidad. Es difícil decir cuál de los parámetros de resistencia evaluados (de laboratorio o el ajuste de Lade) mostraron un mejor desempeño, si bien, el caso 8 es el mejor de todos los ocho primeros casos, el promedio de los resultados de los casos que usaron los parámetros de laboratorio es mejor que los de Lade (2010).

El retroanálisis mostró que el HSQI puede brindar resultados muy positivos con una elección cuidadosa de los parámetros. Es por esto que la elección de estos parámetros es muy importante en el momento de aplicar el método, especialmente la cohesión y el ángulo de fricción pues estos pueden variar en gran medida el resultado de una determinada sección.

El estudio muestra que el HSQI es aplicable en suelos como los que han sido analizados en el presente caso, siempre y cuando se cuente con valores de resistencia confiables y obtenidos de un buen análisis de laboratorio. Para una carretera ya en operación y con taludes tan empinados, es mejor usar la geometría del corte que la natural pues esta es la que condiciona la generación de deslizamientos. El nivel freático de una zona es muy importante y no debería ser tomado como una constante (ej: Hw 0,6) o en base a la morfología de una pendiente, de la misma manera, para zonas de alta precipitación es mejor descartar la ecuación A pues no refleja la realidad del disparo de deslizamientos.

El método HSQI clasifica las secciones en susceptibilidades y no en estabildades. La diferencia entre estos dos conceptos es que una estabilidad es “absoluta”, si una pendiente es estable no va a fallar mientras que una inestable si lo va a hacer, en cambio una susceptibilidad por más baja que sea indica implícitamente de una leve probabilidad de que la pendiente o en este caso la sección falle. Si este trabajo se repite con un inventario de deslizamientos actualizado, es muy probable que la cantidad de falsos positivos disminuya pues más secciones tendrán deslizamientos. Si las secciones clasificadas como de susceptibilidad baja por lo casos que presentaron un mejor desempeño prevalecen libres de deslizamiento mientras que aquellas con susceptibilidad alta generan uno, el método podrá definirse como exitoso.

En este trabajo se planteó evaluar la exactitud del HSQI como una herramienta forense en el entorno geomorfológico, geológico y climático de la RN-32 en su sector montañoso. Es correcto afirmar que de las 41 aplicaciones realizadas en este proyecto la mayoría son deficientes, no obstante, estas son en realidad aplicaciones erróneas del HSQI y no aplicaciones de un metodo erróneo. Las iteraciones que se posicionaron mejor dentro del gráfico ROC reflejan que, con una selección de parámetros que reflejen las características del entorno geológico y climático en el que se contruyo una carretera (en este caso un ambiente igneo, altamente meteorizado, con altas precipitaciones), el HSQI cumple su función de clasificar la susceptibilidad de una carretera. La validez de esta clasificación es a su vez independiente del momento (en relación al estado de la vía) en que esta se realice, por lo tanto, el método puede usarse de manera forense.

Como todo método el HSQI no puede ser usado indiscriminadamente en cualquier escenario geológico o climático. El HSQI se ajusta mejor a trabajos donde se deba sectorizar un corredor vial y no debe usarse para análisis regionales o detallados de una talud en específico. Debido a la manera en la que se delimitan las secciones de trabajo se desaconseja su uso en laderas heterogeneas que presenten cambios significativos de altura e inclinación en distancias de unas pocas decenas de metros.

8.1 Recomendaciones

El inventario de deslizamientos está sujeto a la información presente en las imágenes Lidar, ortofotos y a las visitas que hicieron al campo. Dado que la zona genera deslizamientos nuevos cada año es recomendable actualizar esta base de datos cada año y de ser posible visitar los deslizamientos a pocos días de haber sucedido para obtener una vista fresca de los materiales debajo del horizonte meteorizado.

El uso de datos topográficos Lidar aumentó en gran medida el detalle del análisis geomorfológico, por lo tanto, se recomienda trabajar con este tipo de información o con bases de datos topográficos que se acerquen al nivel de detalle métrico que brinda el Lidar.

La cartografía geológica de este trabajo estuvo sujeto a la roca y suelo expuestos por los deslizamientos, por ende, la distribución de afloramientos no es la ideal y el seguimiento que se le puede dar a una litología es deficiente. Es recomendable actualizar la base de datos geológicos cada cierto tiempo visitando deslizamientos nuevos o antiguos que hayan vuelto a fallar para así poder mejorar los contactos y la densidad de afloramientos.

El método HSQI es un método pre-constructivo por esto propone usar la geometría natural de la zona. Como ya hemos visto esto puede subestimar la susceptibilidad al deslizamiento de los taludes de un corredor vial, pues la inclinación de estos será mayor a la natural. Es por esto que se recomienda aplicar el HSQI inicialmente con las pendientes naturales y una vez haya un diseño de los taludes re-aplicar el método con esta nueva geometría y analizar si este cambio aumentó la susceptibilidad de las secciones, para así, tras un proceso de prueba y error, llegar a un diseño que reduzca al mínimo el peligro para las personas que transiten la carretera.

Debido a la susceptibilidad del método entorno a los parámetros de resistencia obtenidos de ensayos de laboratorio, se debe determinar si los resultados de los ensayos son realmente característicos de los suelos estudiados y, en base a esto, optar por otros métodos para obtener estos parámetros (ajustes, retroanálisis, teóricos, etc), una vez obtenidos estos valores aplicar el método nuevamente y evaluar cual se comportó de la manera más exacta.

El Hw puede incrementar en gran medida la cantidad de secciones de susceptibilidad alta por lo que no se recomienda, según los trabajos de Moreno-

Ceballos (2015) y Ocampo (2016), tomar este valor como una constante, sino, analizar la precipitación e hidrogeología a la cual una sección esta expuesta y como esta varía a lo largo del año. De ser posible realizar estudios que obtengan el valor real del nivel freático (piezómetro, geofísica, etc), de no ser posible esto entonces tomar en cuenta la precipitación de la zona y cuál es el mecanismo de disparo de deslizamientos predominante y así elegir un Hw más acorde a la región. Se recomienda usar el método propuesto por Ocampo (2016) para el valor Hw de no poderse realizar estudios directos.

Referencias

Alvarado, G. E. (1984). Aspectos petrológicos-geológicos de los volcanes y unidades lávicas del Cenozoico Superior de Costa Rica. *Revista Geológica de América Central*, (02).

Alvarado, G. E. (1986). Hallazgos de megamamíferos fósiles en Costa Rica. *Revista Geológica de América Central*, (04).

Alvarado, G. E. (1990). Características geológicas de la estación biológica La Selva, Costa Rica. *Tecnología en Marcha*, 10(3), 11-22.

Alvarado, G. E. (2009). *Los Volcanes de Costa Rica: Geología. Historia, Riqueza Natural y su Gente*, 3rd ed., Editorial Universidad Estatal a Distancia, San José, Costa Rica.

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).

Bellon, H., & Tournon, J. (1978). Contribution de la géochronometrie K-Ar a l'etude du magmatisme du Costa Rica, Amérique Centrale. *Bulletin de la Société Géologique de France*, 7(6), 955-959.

Bieniawski, Z. T., & Bieniawski, Z. T. (1989). *Engineering rock mass classifications: a complete manual for engineers and geologists in mining, civil, and petroleum engineering*. John Wiley & Sons.

Borgia, A., Burr, J., Montero, W., Morales, L. & Alvarado, G., (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*, 95: 14357-14382.

Boschini, I. M., 1989: Incidencia de las fuentes sísmicas en la región Caribe de Costa Rica. – 97 págs. Univ. Costa Rica, San José [Tesis de Lic.].

Carr, M. J., Saginor, I., Alvarado, G. E., Bolge, L. L., Lindsay, F. N., Milidakis, K., ... & Swisher III, C. C. (2007). Element fluxes from the volcanic front of Nicaragua and Costa Rica. *Geochemistry, Geophysics, Geosystems*, 8(6).

Cordero, A., Sanabria, J., Garro, J., Vargas, W., Barrantes, R., 2009: Evaluación de la vulnerabilidad ante amenazas naturales, Ruta Nacional 32, tramo San José – Río Sucio.- LanammeUCR, San José.

Instituto Meteorológico Nacional. (2019). Boletín Meteorológico Mensual Julio 2018. San Jose, Costa Rica, 43 pags.

Coulomb, C. A. (1776). An attempt to apply the rules of maxima and minima to several problems of stability related to architecture. Mémoires de l'Académie Royale des Sciences, 7, 343-382.

Cruden, D. M., Varnes, D. J., Turner, A. K., & Schuster, R. L. (1996). Landslides, investigation and mitigation: special report 247. Transportation Research Board, Us National Research Council, chap Landslides Types and Processes, 36-75.

Dengo, G. (1962). Tectonic-igneous sequence in Costa Rica. Petrologic Studies: A Volume to Honor AF Buddington, 133-161..

Denyer, P., Arias, O., Soto, G., Obando, L., Salazar, G., 1993: Mapa Geológico de la Gran Área Metropolitana. Universidad de Costa Rica.

Denyer, P., & Kussmaul, S. (1994). Atlas Geológico de la Gran Área Metropolitana, Costa Rica. Cartago, Costa Rica: Editorial Tecnológica de Costa Rica. Cartago.

Denyer, P., Montero, W., & Induni, G. E. A. (2003). Atlas tectónico de Costa Rica. Editorial de la Universidad de Costa Rica.

Díaz, J. S. (1998). Deslizamientos y estabilidad de taludes en zonas tropicales. Instituto de Investigaciones sobre Erosión y Deslizamientos, Ingeniería de Suelos.

Fawcett, T. (2006). An introduction to ROC analysis. Pattern recognition letters, 27(8), 861-874.

Gans, P. B., Alvarado-Induni, G., Perez, W., MacMillan, I., & Calvert, A. (2003, April). Neogene evolution of the Costa Rican arc and development of the Cordillera Central. In Geol Soc Amer Abstr Progr (Vol. 31, p. A479).

Hoek, E., & Brown, E. T. (1980). *Underground excavations in rock*. CRC Press.

Hoek, E. (1990, June). Estimating Mohr-Coulomb friction and cohesion values from the Hoek-Brown failure criterion. In *International Journal of Rock Mechanics and Mining Sciences & Geomechanics Abstracts* (Vol. 27, No. 3, pp. 227-229). Pergamon.

Hoek, E., & Brown, E. T. (1997). Practical estimates of rock mass strength. *International journal of rock mechanics and mining sciences*, 34(8), 1165-1186.

Hoek, E., Carranza-Torres, C., & Corkum, B. (2002). Hoek-Brown failure criterion-2002 edition. *Proceedings of NARMS-Tac*, 1, 267-273.

Hovius, N., Stark, C. P., & Allen, P. A. (1997). Sediment flux from a mountain belt derived by landslide mapping. *Geology*, 25(3), 231-234.

Hungr, O., Leroueil, S., & Picarelli, L. (2014). The Varnes classification of landslide types, an update. *Landslides*, 11(2), 167-194.

Jaeger, J. C., & GoW, N. (1979). *Cook. NGW Fundamentals of Rock Mechanics 3rd edn* London: Chapman and Hall.

LanammeUCR ., 2017: Evaluación del Estado del Túnel Zurquí en RN-32 Braulio Carrillo Año 2017, Costa Rica. San Pedro, San José, Costa Rica: Universidad de Costa Rica

Linkimer, L., Arroyo, I. G., Soto, G. J., Porras, J. L., Araya, M. C., Mora, M. M., & Taylor, M. (2018). El sismo de Capellades del 2016 y su secuencia sísmica: Manifestación de fallamiento de rumbo en el arco volcánico de Costa Rica. *Boletín de Geología*, 40(2), 35-53.

Linkimer, L., 2003: Neotectónica del extremo oriental del Cinturón Deformado del Centro de Costa Rica.- 96 págs. Univ. de Costa Rica, San José [Tesis de Lic.].

Linkimer, L., 2008. Relationship between peak ground acceleration and Modified Mercalli Intensity in Costa Rica. *Rev Geol. Amer. Central*, 38, 81-94.

Naranjo-Ureña, R., Sanabria-Sandino, J., Barrantes-Jiménez, R., & Loría-Salazar, L. G. (2017). Informe de evaluación de la red vial nacional pavimentada

de Costa Rica 2016-2017. Programa Infraestructura del Transporte (PITRA), LanammeUCR.

Madrigal, R., Rojas, E., 1980: Manual descriptivo del mapa geomorfológico de Costa Rica 1:200000.-147 págs.

Ministerio de Obras Públicas y Transportes.(2011). Plan Nacional de Transportes de Costa Rica 2011-2035. Volumen 3

Mohr, O. (1900). Welche Umstände bedingen die Elastizitätsgrenze und den Bruch eines Materials. Zeitschrift des Vereins Deutscher Ingenieure, 46(1524-1530), 1572-1577.

Montero, W., Alvarado, G., 1995: El terremoto de patillos del 30 de diciembre de 1952 ($M_s=5,9$) y el contexto neotectónico del volcán Irazú, Costa Rica. Rev Geol. Amer. Central, 18, 25-42.

Montero, W., 2001: Neotectónica de la región central de Costa Rica: frontera oeste de la Microplaca de Panamá. - Rev. Geol. Amér. Central, 24:29-56.

Montero, W., 2003: El sistema de falla Atirro-Río Sucio y la cuenca de tracción de Turrialba-Irazú: indentación tectónica relacionada con la colisión del levantamiento del Coco. – Rev. Geol. Amér. Central, 28:05-29.

Montero, W., Denyer, P., Barquero, R., Alvarado, G., Cowan, H., Machette, M., Hallerm K & Dart, R., 1998: Map an database of Quaternary faults and folds in Costa Rica and its offshore regions. – Reporte preliminar de USGS.

Montero, W., Lewis, J., Marschall, J., Kruse, S. & Wetmore, P., 2013a: Neotectonic faulting and forearc silver motion along the Atirro-Río Sucio fault system, Costa Rica, Central America. – Geological Society of America Bulletin. doi:10.1130/B30471.1

Mora, S., & Vahrson, W. G. (1994). Macrozonation methodology for landslide hazard determination. Bulletin of the Association of Engineering Geologists, 31(1), 49-58.

Mora, R., Vahrson, W., Mora, S.(1992). Mapa de Amenaza de Deslizamientos, Valle Central, Costa Rica, Centro de Coordinación para Prevención de Desastres Naturales (CEPREDENAC).

Pérez, W., Alvarado, G. E., & Gans, P. B. (2006). The 322 ka Tiribí Tuff: stratigraphy, geochronology and mechanisms of deposition of the largest and most recent ignimbrite in the Valle Central, Costa Rica. *Bulletin of volcanology*, 69(1), 25-40.

RSN., 1991: La crisis sísmica del golfo de Nicoya y eventos sísmicos relacionados, Costa Rica, 1990

Rojas,W.,Redondo,C.,2002: El temblor de quepos del 20 de agosto de 1999(6.9 M_w): Fuente sísmica y evolución de la sismicidad.-Revista Geologica de America Central, 26: 65-70, 2002

Romana, M. R. (1995). A geomechanical classification for slopes: slope mass rating. In *Rock Testing and Site Characterization* (pp. 575-600).

RSN.,2004: Terremoto de Damas(Quepos) del 20 de Noviembre del 2004.

RSN.,2009: El terremoto de Cinchona del 8 de enero de 2009.-138 pags.

RSN.,2012: El terremoto de Sámara del 5 de septiembre del 2012.-136 pags.

RSN. (2017). The Costa Rica National Seismological Network Catalog during 1975-2017. DOI: <https://doi.org/10.15517/TC>

Sanabria-Sandino, J., Barrantes-Jiménez, R., & Loría-Salazar, L. G. (2015). Informe de evaluación de la red vial nacional pavimentada de Costa Rica años 2012-2013. Programa Infraestructura del Transporte (PITRA), LanammeUCR.

Sanabria-Sandino, J., Barrantes-Jiménez, R., & Loría-Salazar, L. G. (2015). Informe de la evaluación de la red vial nacional pavimentada de Costa Rica, años 2014-2015. Programa Infraestructura del Transporte (PITRA), LanammeUCR.

Sidle, R. C., & Ochiai, H. (2006). Landslides: processes, prediction, and land use. *Water resources monograph series*.

Simonett, D. S. (1967). Landslide distribution and earthquakes in the Bavani and Torricelli Mountains, New Guinea. *Landform studies from Australia and New Guinea*, 64-84.

Skempton, A. W., & Hutchinson, J. (1969). Stability of natural slopes and embankment foundations. In Soil Mech & Fdn Eng Conf Proc/Mexico/.

Trifunac, M. D., & Brady, A. G. (1975). On the correlation of seismic intensity scales with the peaks of recorded strong ground motion. Bulletin of the Seismological Society of America, 65(1), 139-162.

Varnes, D. J. (1978). Slope movement types and processes. Special report, 176, 11-33.

Williams, H. (1952). Volcanic History of the Meseta Central Occidental de Costa Rica. Univ. California. Public. Geol. Sci., 29, (4), Berkeley y Los Angeles: 145-180.

WP/WLI (International Geotechnical Societies' UNESCO Working Party on World Landslide Inventory). (1993). A suggested method for describing the activity of a landslide. Bulletin of the International Association of Engineering Geology, 47, 53-57.

Zuidam, R. V. (1986). Aerial photo-interpretation in terrain analysis and geomorphologic mapping (No. C 25102). Smits Publishers.

Referencias Hemerográficas

Altamirano, P. (2012). Derrumbe impide paso de vehículos por ruta 32. Recuperado de http://www.nacion.com/archivo/Derrumbe-impide-paso-vehiculos-ruta_0_1268673138.html

Cerdas, D. (2014). Derrumbe cerca del túnel Zurquí provocó cierre total de la ruta 32. Recuperado de http://www.nacion.com/nacional/transportes/Derrumbe-Zurqui-provoco-cierre-total_0_1460653977.html

Fernandez, E. (2010). Carretera a Limón sigue cerrada por deslizamiento. Recuperado de http://www.aldia.cr/ad_ee/2010/abril/29/nacionales2352612.html

Guerrero, E. (2012). Cierran ruta 32 por derrumbe en las cercanías del túnel Zurquí. Recuperado de <http://www.crhoy.com/archivo/cierran-ruta-32-por-derrumbe-en-las-cercanias-del-tunel-zurqui/>

Lopez, A. (2010). Otro derrumbe en ruta 32. Recuperado de http://www.aldia.cr/ad_ee/2010/abril/29/nacionales2354888.html

Recio, P. (2010). Derrumbe provoca nuevo cierre en la ruta 32. Recuperado de http://www.aldia.cr/ad_ee/2010/junio/22/nacionales2419244.html

Repretel. (2018). Personas atrapadas en Ruta 32 relatan cómo pasaron la noche. Recuperado de <http://www.repretel.com/actualidad/personas-atrapadas-en-ruta-32-relatan-como-pasaron-la-noche-121191>

Anexos

Inventario de deslizamientos

Codigo	Kilometraje aproximado	X (Crtm05)	Y (Crtm05)	Alto (m)	Ancho (m)	Longitud (m)	Perímetro (m)	Área (m2)	Unidad Geológica	Unidad Geomorfológica	Clasificación (Hungr, 2014)
1	15+600	499585,754	1110183,694	17	77	14,7	165,17	689	Brechas	Laderas denudacionales de Alta pendiente	Deslizamiento de escombros con limo
2	15+630	499612,993	1110175,31	10	24,7	9,7	55,31	126,5	Brechas	Laderas denudacionales de Alta pendiente	Deslizamiento de escombros con limo
3	15+730	498871,1	1111908,325	54	79,9	42.658	351,67	1279	Brechas	Laderas denudacionales de Alta pendiente	Deslizamiento de escombros con limo
4	17+055	499422,06	1111353,773	12	30,2	35,2	132,09	1061	Brechas	Laderas denudacionales de Alta pendiente	Deslizamiento de escombros con limo
5	17+650	499404	1111693	40	25	57	389	3700	Brechas	Laderas denudacionales de Alta pendiente	Deslizamiento de escombros con limo
6	18+115	499030,829	1111908,325	18	166,5	10,4	351,67	1279	Brechas	Laderas denudacionales de Alta pendiente	Deslizamiento de escombros con limo
7	18+330	498871,1	1111820,734	54	79,9	42.658	223,73	2438	Brechas	Laderas denudacionales de Alta pendiente	Deslizamiento de escombros con limo
8	18+450	499771,636	1111831,632	44	146,8	49.408	335,41	4803	Brechas	Laderas denudacionales de Alta pendiente	Deslizamiento de escombros con limo
9	18+620	498634,234	1111869,243	21	50,6	13,3	112,19	472	Brechas	Laderas denudacionales de Alta pendiente	Deslizamiento de escombros con limo
10	18+940	498871,1	1111820,734	25	135	20	290	2160	Brechas	Laderas denudacionales de muy alta pendiente	Deslizamiento de escombros con limo
11	20+650	499526,984	1113231,796	7	62,1	6	127,46	272,9	Brechas	Laderas denudacionales de muy alta pendiente	Deslizamiento de escombros con limo
12	20+700	499551,287	1113206,193	80	76.014	42,5	284,05	3330	Brechas	Laderas denudacionales de muy alta pendiente	Deslizamiento de escombros con limo
13	20+770	499633,828	1113230,824	86	39,7	77	216,91	2645	Brechas	Laderas denudacionales de muy alta pendiente	Deslizamiento de escombros con limo
14	20+860	499703,259	1113241,134	107	47,3	103,16	288,32	4495	Brechas	Laderas denudacionales de muy alta pendiente	Deslizamiento de escombros con limo
15	20+980	499862,011	1113197,754	130	46,9	142,93	396,38	6840	Brechas	Laderas denudacionales de muy alta pendiente	Deslizamiento de escombros con limo
16	21+170	499972,83	1113390,314	109	47.125	194	441,27	7760	Brechas	Laderas denudacionales de muy alta pendiente	Deslizamiento de escombros con limo
17	21+350	500027,113	1113444,624	54	55,6	79	237,34	3534	Brechas	Laderas denudacionales de muy alta pendiente	Deslizamiento de escombros con limo
18	21+350	500068,937	1113575,669	91	43,8	81,5	242,6	3280	Brechas	Laderas denudacionales de Alta pendiente	Deslizamiento de escombros con limo
19	21+400	500072,566	1113421,498	65	22	62	149,73	1252	Brechas	Laderas denudacionales de muy alta pendiente	Deslizamiento de escombros con limo
20	21+515	500185,506	1113399,595	92	98	107,7	385,9	8580	Brechas	Laderas denudacionales de muy alta pendiente	Deslizamiento de escombros con limo
21	21+515	500212,264	1113464,44	30	61,3	20	138,76	702	Brechas	Laderas denudacionales de muy alta pendiente	Deslizamiento de escombros con limo

Codigo	Kilometraje aproximado	X (Crtm05)	Y (Crtm05)	Alto (m)	Ancho (m)	Longitud (m)	Perímetro (m)	Área (m2)	Unidad Geológica	Unidad Geomorfológica	Clasificación (Hungr, 2014)
22	21+620	500313,38	1113384,64	126	61,5	170	416,46	8450	Brechas	Laderas denudacionales de muy alta pendiente	Deslizamiento de escombros con limo
23	21+820	500454,705	1113329,033	92	98	107,7	657,34	25920	Brechas	Laderas denudacionales de muy alta pendiente	Deslizamiento de escombros con limo
24	22+175	500811,018	1113285,832	131	47,6	158,3	424,28	7030	Brechas	Laderas denudacionales de muy alta pendiente	Deslizamiento de escombros con limo
25	22+270	500913,908	1113241,583	117	57,13	145	401,25	6780	Brechas	Laderas denudacionales de muy alta pendiente	Deslizamiento de escombros con limo
26	22+380	500998,647	1113307,312	93	110,1	58,3	331,86	5270	Brechas	Laderas denudacionales de muy alta pendiente	Deslizamiento de escombros con limo
27	22+380	501018,945	1113222,251	67	18,5	87	205,17	1433	Brechas	Laderas denudacionales de muy alta pendiente	Deslizamiento de escombros con limo
28	22+500	501135	11132801	220	124	364	884	28420	Brechas	Laderas denudacionales de muy alta pendiente	Deslizamiento de escombros con limo
29	22+500	501137,623	1113375,94	88	118,7	86,5	400	9008	Brechas	Laderas denudacionales de muy alta pendiente	Deslizamiento de escombros con limo
30	22+580	501217,792	1113334,358	73	65	60,8	231,8	3183	Brechas	Laderas denudacionales de muy alta pendiente	Deslizamiento de escombros con limo
31	22+670	501301,621	1113214,662	78	23	108	304	5180	Brechas	Laderas denudacionales de muy alta pendiente	Deslizamiento de escombros con limo
32	23+000	501584,743	1113436,701	17	23	19	85,97	426	Basaltos Olivínicos	Laderas denudacionales de muy alta pendiente	Deslizamiento de escombros con limo
33	23+150	501614,258	1113536,109	173	98,127	173,18	438,09	10050	Basaltos Olivínicos	Laderas denudacionales de muy alta pendiente	Deslizamiento de escombros con limo
34	24+730	502118,024	1114882,154	125	10	113	250	1121	Basaltos Olivínicos	Laderas denudacionales de muy alta pendiente	Deslizamiento de escombros con limo
35	24+800	502033,054	1114983,747	24	44,3	25	81	459	Basaltos Olivínicos	Laderas denudacionales de muy alta pendiente	Deslizamiento de escombros con limo
36	24+940	502207,256	1115109,221	160	37,7	227	483,99	6200	Basaltos Olivínicos	Laderas denudacionales de muy alta pendiente	Deslizamiento de escombros con limo
37	25+050	502147,799	1115160,183	140	46,5	178	438,09	8200	Basaltos Olivínicos	Laderas denudacionales de muy alta pendiente	Deslizamiento de escombros con limo
38	25+355	502014	1115495,405	57	39,12	54,7	167,56	1696	Basaltos Olivínicos	Laderas denudacionales de muy alta pendiente	Deslizamiento de escombros con limo
39	25+410	502014	1115495,405	57	39,12	54,7	167,56	1696	Basaltos Olivínicos	Laderas denudacionales de muy alta pendiente	Deslizamiento de escombros con limo
40	25+480	502080	1115639,61	100	47	129	342,3	5800	Basaltos Olivínicos	Laderas denudacionales de muy alta pendiente	Deslizamiento de escombros con limo
41	25+540	501953,888	1115698,25	45	44,3	25	133	944	Basaltos Olivínicos	Laderas denudacionales de muy alta pendiente	Deslizamiento de escombros con limo
42	26+000	501885,206	1116166,756	162	270	226	839	45670	Basaltos Olivínicos	Laderas denudacionales de muy alta pendiente	Deslizamiento de escombros con limo

Codigo	Kilometraje aproximado	X (Crtm05)	Y (Crtm05)	Alto (m)	Ancho (m)	Longitud (m)	Perímetro (m)	Área (m2)	Unidad Geológica	Unidad Geomorfológica	Clasificación (Hungr, 2014)
43	26+000	502052,054	1116085,542	114	219	181,8	712,6	36570	Basaltos Olivínicos	Laderas denudacionales de muy alta pendiente	Deslizamiento de escombros con limo
44	26+130	501992,879	1116233,41	60	62,6	34	167,34	1637	Basaltos Olivínicos	Laderas denudacionales de muy alta pendiente	Deslizamiento de escombros con limo
45	26+890	502478,678	1116766,336	40	50	13	112,81	486	Basaltos Olivínicos	Laderas denudacionales de muy alta pendiente	Deslizamiento de escombros con limo
46	27+055	502524,583	1116922,14	22	12,4	15,8	47,6	158	Basaltos Olivínicos	Laderas denudacionales de muy alta pendiente	Deslizamiento de escombros con limo
47	27+415	502687,21	1117229,566	12	20,1	9,5	47,6	124	Basaltos Olivínicos	Laderas denudacionales de muy alta pendiente	Deslizamiento de escombros con limo
48	27+415	503185,463	1117129,668	261	156,5	339	899,92	45770	Basaltos Olivínicos	Laderas denudacionales de muy alta pendiente	Deslizamiento de escombros con limo
49	28+300	502855,757	1118027,195	36	95	41	227,76	2392	Brechas	Laderas denudacionales de muy alta pendiente	Deslizamiento de escombros con limo
50	28+300	503052,167	1118021,822	62	86,3	188	536	17280	Brechas	Laderas denudacionales de muy alta pendiente	Deslizamiento de escombros con limo
51	28+500	502879,944	1118245,988	42	10,2	39	88,8	305	Brechas	Laderas denudacionales de muy alta pendiente	Deslizamiento de escombros con limo
52	28+630	502969,568	1118340,706	40	130	71,5	352,15	8020	Brechas	Laderas denudacionales de Alta pendiente	Deslizamiento de escombros con limo
53	28+730	502969,104	1118462,555	22	43,4	17,9	102,12	532	Lavas Q.Molinete	Laderas denudacionales de Alta pendiente	Deslizamiento de escombros con limo
54	28+840	503060,85	1118545,606	45	49	46	185	205	Lavas Q.Molinete	Laderas denudacionales de Alta pendiente	Deslizamiento de escombros con limo
55	28+840	502913,404	1118650,425	75	67,6	142,5	384	6710	Lavas Q.Molinete	Laderas denudacionales de Alta pendiente	Deslizamiento de escombros con limo
56	29+030	503110,103	1118691,351	15	16	21	66.132	284	Lavas Q.Molinete	Laderas denudacionales de Alta pendiente	Deslizamiento de escombros con limo
57	29+080	503131,968	1118766,694	15	16	19	63.163	244	Lavas Q.Molinete	Laderas denudacionales de Alta pendiente	Deslizamiento de escombros con limo
58	29+510	503110,074	1119167,39	12	15,3	11	50	146	Lavas Q.Molinete	Laderas denudacionales de Alta pendiente	Deslizamiento de escombros con limo
59	29+720	503195,451	1119353,391	44	88,6	36,9	228	2399	Lavas Q.Molinete	Laderas denudacionales de Alta pendiente	Deslizamiento de escombros con limo
60	29+860	503310	1119394	50	76	50	185	2050	Lavas Q.Molinete	Laderas denudacionales de muy alta pendiente	Deslizamiento de escombros con limo
61	29+870	503309,188	1119396,316	45	60	50	221,8	2767	Lavas Q.Molinete	Laderas denudacionales de muy alta pendiente	Deslizamiento de escombros con limo
62	30+300	503555,563	1119739,77	18	14,7	20	62	229	Lavas Q.Molinete	Laderas denudacionales de muy alta pendiente	Deslizamiento de escombros con limo
63	31+120	503372,226	1120045,257	20	12,5	20,1	69	242	Lavas Q.Molinete	Laderas denudacionales de muy alta pendiente	Deslizamiento de escombros con limo

Codigo	Kilometraje aproximado	X (Crtm05)	Y (Crtm05)	Alto (m)	Ancho (m)	Longitud (m)	Perímetro (m)	Área (m2)	Unidad Geológica	Unidad Geomorfológica	Clasificación (Hungr, 2014)
64	31+400	503297,262	1120296,611	150	160	290	67,2	235	Lavas Q.Molinete	Laderas denudacionales de muy alta pendiente	Deslizamiento de escombros con limo
65	31+720	503226,666	1120630,856	90	20	70	740	34200	Flujos Piroclasticos	Laderas denudacionales de muy alta pendiente	Deslizamiento de escombros con limo
66	32+040	503115,422	1120852,172	85	16,7	69	167	1111	Flujos Piroclasticos	Laderas denudacionales de muy alta pendiente	Deslizamiento de escombros con limo
67	32+180	503071,781	1120977,993	40	51,8	71,2	203	2310	Flujos Piroclasticos	Laderas denudacionales de muy alta pendiente	Deslizamiento de escombros con limo
68	32+950	502895,389	1121705,766	20	48,3	32,2	136	1156	Lavas Q.Molinete	Laderas denudacionales de Alta pendiente	Deslizamiento de escombros con limo
69	33+050	502883,916	1121814,203	48	60	57	197	2579	Lavas Q.Molinete	Laderas denudacionales de Alta pendiente	Deslizamiento de escombros con limo
70	33+170	502832,48	11221913	36	70	32	187,79	2039	Lavas Q.Molinete	Laderas denudacionales de Alta pendiente	Deslizamiento de escombros con limo
71	33+480	502870,661	1122180,436	28	136,11	12	280,03	1194	Lavas Q.Molinete	Laderas denudacionales de Alta pendiente	Deslizamiento de escombros con limo
72	33+680	502981,404	1122369,521	11	116	12	242	1293	Flujos Piroclasticos	Laderas denudacionales de Alta pendiente	Deslizamiento de escombros con limo
73	34+150	503123,727	1122762,614	27	32,4	29	103	716	Flujos Piroclasticos	Laderas denudacionales de Alta pendiente	Deslizamiento de escombros con limo
74	34+250	503079,527	1122877,616	24	139,71	29,6	328,6	3256	Flujos Piroclasticos	Laderas denudacionales de Alta pendiente	Deslizamiento de escombros con limo
75	34+520	503277,784	1123013,2	18	70,4	12	159,91	720	Lavas Q.Molinete	Laderas denudacionales de Alta pendiente	Deslizamiento de escombros con limo
76	35+150	503552,325	1123149,4	8	80	22	176	1205	Lavas Q.Molinete	Laderas denudacionales de Alta pendiente	Deslizamiento de escombros con limo
77	35+400	503552,325	1123149,4	10	30	17	90	380	Lavas Q.Molinete	Laderas denudacionales de Alta pendiente	Deslizamiento de escombros con limo
78	35+720	504339,689	1123328,315	30	111,4	51	306	3984	Lavas Q.Molinete	Laderas denudacionales de Alta pendiente	Deslizamiento de escombros con limo
79	36+790	504847,361	1123018,3	76	131,3	96,9	436,8	12030	Brechas	Laderas denudacionales de muy alta pendiente	Deslizamiento de escombros con limo
80	36+940	505027,521	1122925,327	9	24,6	15	68	177	Brechas	Laderas denudacionales de muy alta pendiente	Deslizamiento de escombros con limo
81	37+410	504519,839	1123420,691	5	77	129	400	8510	Brechas	Laderas denudacionales de muy alta pendiente	Deslizamiento de escombros con limo
82	37+900	504564,024	1122182,109	38	24,47	54,22	122,93	847	Lavas Río Frío	Laderas denudacionales de muy alta pendiente	Deslizamiento de escombros con limo
83	38+920	505337,825	1121996,706	83	88	143	443	12060	Lavas Río Frío	Laderas denudacionales de Alta pendiente	Deslizamiento de escombros con limo
84	39+200	505487,979	1122151,922	93	162	217	749	37900	Lavas Río Frío	Laderas denudacionales de Alta pendiente	Deslizamiento de escombros con limo

Codigo	Kilometraje aproximado	X (Crtm05)	Y (Crtm05)	Alto (m)	Ancho (m)	Longitud (m)	Perímetro (m)	Área (m2)	Unidad Geológica	Unidad Geomorfológica	Clasificación (Hungr, 2014)
85	39+690	506504,064	1121665,966	418	734	702	2.592	329100	Lavas Río Frío	Laderas denudacionales de Alta pendiente	Deslizamiento de escombros con limo
86	39+900	506257,1	1122084,015	123	150,2	176,4	590	22680	Lavas Q.Molinete	Laderas denudacionales de Alta pendiente	Deslizamiento de escombros con limo
87	40+570	506368,451	1122251,603	47	97	154,75	407,64	11780	Lavas Q.Molinete	Laderas denudacionales de Alta pendiente	Deslizamiento de escombros con limo
88	41+000	506687,296	1122909,522	18	147,22	36,3	335	3795	Lavas Q.Molinete	Laderas denudacionales de Alta pendiente	Deslizamiento de escombros con limo
89	41+750	506687,296	1122909,522	18	147,22	36,3	335	3795	Lavas Q.Molinete	Laderas denudacionales de Alta pendiente	Deslizamiento de escombros con limo
90	41+750	506999,735	1123961,336	76	85.215	195,14	560,88	14710	Flujo Piroclastico	Laderas denudacionales de Alta pendiente	Deslizamiento de escombros con limo
91	41+750	507080,721	1124074,129	26	83	90	484	15200	Flujo Piroclastico	Laderas denudacionales de muy alta pendiente	Deslizamiento de escombros con limo
92	42+000	506991,39	1124190,262	47	100	28,3	273	495	Flujo Piroclastico	Laderas denudacionales de Alta pendiente	Deslizamiento de escombros con limo
93	42+240	507136,686	1124339,219	54	89	47,2	259	3391	Flujo Piroclastico	Laderas denudacionales de Alta pendiente	Deslizamiento de escombros con limo
94	42+240	507128,392	1124381,647	76	85.215	195,14	240	1737	Flujo Piroclastico	Laderas denudacionales de Alta pendiente	Deslizamiento de escombros con limo
95	42+240	507044,875	1124413,341	26	83	90	268,45	5050	Flujo Piroclastico	Laderas denudacionales de Alta pendiente	Deslizamiento de escombros con limo
96	42+360	507246,8	1124454,947	50	82	50	258,96	3827	Flujo Piroclastico	Laderas denudacionales de Alta pendiente	Deslizamiento de escombros con limo
97	42+600	507321,77	1124690,877	35	46	31	151	1438	Flujo Piroclastico	Laderas denudacionales de Alta pendiente	Deslizamiento de escombros con limo
98	42+600	507280,294	1124706,289	15	80	44	169	780	Flujo Piroclastico	Laderas denudacionales de Alta pendiente	Deslizamiento de escombros con limo
99	42+820	507369,441	1124903,544	14	49,4	79,91	353	2309	Flujo Piroclastico	Laderas denudacionales de Alta pendiente	Deslizamiento de escombros con limo
100	43+630	508024	1125397,453	15	48,8	51,6	243	3838	Flujo Piroclastico	Laderas denudacionales de Alta pendiente	Deslizamiento de escombros con limo
101	43+630	507802,767	1125329,677	25	12,2	52	121,1	503	Flujo Piroclastico	Laderas denudacionales de Alta pendiente	Deslizamiento de escombros con limo
102	43+715	507494,6	1125023,516	44	95,5	110,26	164	1401	Flujo Piroclastico	Laderas denudacionales de Alta pendiente	Deslizamiento de escombros con limo
103	43+820	508181,83	1125468,697	30	19,8	79,91	163,75	1105	Flujo Piroclastico	Laderas denudacionales de Alta pendiente	Deslizamiento de escombros con limo
104	43+900	508316,627	1125494,262	10	79	15,2	180	1141	Flujo Piroclastico	Laderas denudacionales de Alta pendiente	Deslizamiento de escombros con limo
105	43+900	508289,099	1125519,256	13	66,1	18,7	149	789	Flujo Piroclastico	Laderas denudacionales de Alta pendiente	Deslizamiento de escombros con limo

Codigo	Kilometraje aproximado	X (Crtm05)	Y (Crtm05)	Alto (m)	Ancho (m)	Longitud (m)	Perímetro (m)	Área (m2)	Unidad Geológica	Unidad Geomorfológica	Clasificación (Hungr, 2014)
106	44+080	508440,052	1125581,97	21	123	22	260	1590	Flujo Piroclastico	Laderas denudacionales de Alta pendiente	Deslizamiento de escombros con limo
107	44+200	508546,916	1125656,663	35	90,5	23,3	195,56	1460	Lavas Q.Molinete	Laderas denudacionales de Alta pendiente	Deslizamiento de escombros con limo
108	44+820	508963,779	1126012,413	46	42,7	51,5	160	1595	Lavas Q.Molinete	Laderas denudacionales de muy alta pendiente	Deslizamiento de escombros con limo
109	44+825	509020,615	1126012,2	36	57,5	43	164	1673	Lavas Q.Molinete	Laderas denudacionales de muy alta pendiente	Deslizamiento de escombros con limo
110	*	509007,673	112955,807	6	63,67	31,5	182,3	1695	**	Laderas denudacionales de Alta pendiente	Deslizamiento de escombros con limo
111	*	509366,611	1126273,265	35	44,7	50,8	156,04	1668	**	Laderas denudacionales de Alta pendiente	Deslizamiento de escombros con limo
112	*	510498,215	1127025,82	26	52,1	66,6	198	2189	**	Laderas denudacionales de Alta pendiente	Deslizamiento de escombros con limo
113	*	510531,136	1127077,155	12	15,5	38,4	125	833	**	Laderas denudacionales de Alta pendiente	Deslizamiento de escombros con limo
114	*	498418,215	1113327,329	188	284,65	230,6	975,96	59000	**	Laderas denudacionales de muy alta pendiente	Deslizamiento de escombros con limo
115	*	499585,754	1110183,694	17	77	14,7	165,17	689	**	Laderas denudacionales de muy alta pendiente	Deslizamiento de escombros con limo
116	*	498097	1113878,749	462	20	480	1031	8320	**	Laderas denudacionales de muy alta pendiente	Deslizamiento de escombros con limo
117	*	498725,404	1113379,402	169	64	184,2	471	7010	**	Laderas denudacionales de muy alta pendiente	Deslizamiento de escombros con limo
118	*	499016,125	1113271,871	169	44,3	184,2	485,57	14760	**	Laderas denudacionales de muy alta pendiente	Deslizamiento de escombros con limo
119	*	499288,795	1114314,426	216	30,9	277	587,09	7520	**	Laderas denudacionales de muy alta pendiente	Deslizamiento de escombros con limo
120	*	499812,452	1114221,519	260	384	373	1287	108500	**	Laderas denudacionales de muy alta pendiente	Deslizamiento de escombros con limo
121	*	500501,609	1113826,093	181	11	169,4	397,74	1721	**	Laderas denudacionales de muy alta pendiente	Deslizamiento de escombros con limo
122	*	500989,741	1113665,216	60	22	58,6	145,22	1100	**	Laderas denudacionales de muy alta pendiente	Deslizamiento de escombros con limo
123	*	502178,62	1113321,633	130	33	177,33	385,77	3815	**	Laderas denudacionales de muy alta pendiente	Deslizamiento de escombros con limo
124	*	499812,452	1114221,519	260	384	373	1287	108500	**	Laderas denudacionales de muy alta pendiente	Deslizamiento de escombros con limo
125	*	503224,746	1116714,322	170	219	242	796,99	45020	**	Laderas denudacionales de muy alta pendiente	Deslizamiento de escombros con limo
126	*	501907	1118142,827	10	130	240,66	899,33	45210	**	Laderas denudacionales de Alta pendiente	Deslizamiento de escombros con limo



Codigo	Kilometraje aproximado	X (Crtm05)	Y (Crtm05)	Alto (m)	Ancho (m)	Longitud (m)	Perímetro (m)	Área (m2)	Unidad Geológica	Unidad Geomorfológica	Clasificación (Hungr, 2014)
127	*	503866,048	1119634,913	52	22	138	300	2423	**	Laderas denudacionales de Alta pendiente	Deslizamiento de escombros con limo
128	*	504065,18	1119473,72	173	46,1	262	630,9	9070	**	Laderas denudacionales de muy alta pendiente	Deslizamiento de escombros con limo
129	*	503728,507	1120216,784	150	160	290	708	31420	**	Laderas denudacionales de muy alta pendiente	Deslizamiento de escombros con limo
130	*	501981,7	1121231,873	85	16,7	69	902	23090	**	Laderas denudacionales de Alta pendiente	Deslizamiento de escombros con limo
131	*	501981,7	1121231,873	85	16,7	69	902	23090	**	Laderas denudacionales de muy alta pendiente	Deslizamiento de escombros con limo
132	*	509718,603	1126043,268	115	75	252	662,83	25570	**	Laderas denudacionales de Alta pendiente	Deslizamiento de escombros con limo
133	*	510539,545	1126832,166	31	35	133,42	440,63	9330	**	Laderas denudacionales de Alta pendiente	Deslizamiento de escombros con limo
134	*	511253,705	1127649,755	67	49	83	268,28	4389	**	Laderas denudacionales de Alta pendiente	Deslizamiento de escombros con limo
135	*	499591,615	1112985,669	181	142	197	661	24520	**	Laderas denudacionales de muy alta pendiente	Deslizamiento de escombros con limo
136	26+415	502120	1116491	***	***	***	***	***	Basaltos Olivínicos	Laderas denudacionales de Alta pendiente	Deslizamiento de escombros con limo
137	27+650	502660	1117474	***	***	***	***	***	Basaltos Olivínicos	Laderas denudacionales de Alta pendiente	Deslizamiento de escombros con limo
138	34+000	503090	1122613	***	***	***	***	***	Flujo Piroclástico	Laderas denudacionales de Alta pendiente	Deslizamiento de escombros con limo
139	33+950	503034	1122550	***	***	***	***	***	Flujo Piroclástico	Laderas denudacionales de Alta pendiente	Deslizamiento de escombros con limo
140	33+660	502955	1122333	***	***	***	***	***	Flujo Piroclástico	Laderas denudacionales de Alta pendiente	Deslizamiento de escombros con limo
141	33+660	502960	1122311	***	***	***	***	***	Flujo Piroclástico	Laderas denudacionales de Alta pendiente	Deslizamiento de escombros con limo
142	32+450	502965	1121184	***	***	***	***	***	Lavas Q.Molinete	Laderas denudacionales de Alta pendiente	Deslizamiento de escombros con limo
143	*	502965	1121184	200	850	530	2700	43850	**	Laderas denudacionales de Alta pendiente	Deslizamiento de escombros con limo
144	*	502965	1121184	230	350	370	1368	7830	**	Laderas denudacionales de Alta pendiente	Deslizamiento de escombros con limo



* Estos deslizamientos no se encuentran dentro del corredor vial, por ende, no se les asignó un estacionamiento


** Estos deslizamientos no se encuentran dentro del corredor vial, por ende, no se pudo observar que litología aflora en ellos




*** Estos deslizamientos ocurrieron durante el viento de Julio del 2017, por ende, no se cuenta con Lidar para obtener la geometría de los mismos




Fichas de los afloramientos visitados




Código	PTR-001	Kilometraje	Coordenadas (crtm05) <th colspan="2">Dimensiones (m)</th>		Dimensiones (m)	
		41+195	X	Y	Alto	Ancho
			506648	1123494	7	3
Litología	Lava basáltica		Elevación			
Meteorización	Moderada		468			
Condición del agua	Flujo superficial					
Descripción						
<p>Roca volcanica, lava, color gris de textura afanítica-porfirítica, con cristales de piroxeno de 2mm en un 5%, horblendas de menos de un 1mm en un 1% de la roca, el afloramiento se encuentra cerca de Quebrada Gonzalez y presenta rompimiento de nivel freático.</p>						
Código	PTR-002	Kilometraje	Coordenadas (crtm05) <th colspan="2">Dimensiones (m)</th>		Dimensiones (m)	
		41+105	X	Y	Alto	Ancho
			506662	1123410	5	3
Litología	Lava basáltica		Elevación			
Meteorización	Ligera		470			
Condición del agua	Húmedo					
Descripción						
<p>Roca volcánica, lava, de color gris, de textura afanítica-porfirítica, con cristales de plagioclasa levemente alterados (hinchados) de 5mm de diametro en un 25%, piroxenos de 1mm en un 1%, la roca presenta una patina superficial de color café</p>						
Código	PTR-003	Kilometraje	Coordenadas (crtm05) <th colspan="2">Dimensiones (m)</th>		Dimensiones (m)	
		40+950	X	Y	Alto	Ancho
			506649	1123267	2	6
Litología	Lava basáltica		Elevación			
Meteorización	Extrema		478			
Condición del agua	Húmedo					
Descripción						
<p>Roca volcánica, color gris, de textura afanítica porfirítica, con plagioclasas de menos de 1mm de tamaño en un 1% , la meteorización es moderada y presenta una patina superficial de color negro</p>						
						




Código	PTR-004	Kilometraje	Coordenadas (crtm05) <th colspan="2">Dimensiones (m)</th>		Dimensiones (m)	
		40+505	X	Y	Alto	Ancho
			506610	1122840	3	2
Litología	Lavas basálticas		Elevación			
Meteorización	Extrema		469			
Condición del agua	Húmedo					
Descripción						
Roca volcánica de color café, con piroxenos de 1cm de diámetro en un 2% de la roca, la meteorización es extrema al punto que la roca es deleznable con las manos.						
Código	PTR-005	Kilometraje	Coordenadas (crtm05) <th colspan="2">Dimensiones (m)</th>		Dimensiones (m)	
		40+395	X	Y	Alto	Ancho
			506543	1122771	4	2
Litología	-		Elevación			
Meteorización	-		469			
Condición del agua	-					
Descripción						
Afloramiento visto a la distancia						
						
Código	PTR-006	Kilometraje	Coordenadas (crtm05) <th colspan="2">Dimensiones (m)</th>		Dimensiones (m)	
		40+210	X	Y	Alto	Ancho
			506416	1122637	-	-
Litología	-		Elevación			
Meteorización	-		465			
Condición del agua	-					
Descripción						
Deslizamiento a 50m de la carretera, río arriba de una quebrada. De ocurrir otro deslizamiento que logre bajar hasta la carretera, podría rebalsar la alcantarilla. La alcantarilla no esta protegida por concreto y se encuentra 50% llena. En el deslizamiento se pueden ver bloques metricos						
						




Código	PTR-007	Kilometraje	Coordenadas (crtm05)		Dimensiones (m)	
		40+075	X	Y	Alto	Ancho
			506338	1122530	6	15
Litología	Lavas basálticas		Elevación			
Meteorización	Ligera	462				
Condición del agua	Húmedo					
Descripción						
<p>Roca volcánica color gris de textura afanítica porfirítica, con plagioclasas relaivamente grandes (1cm-2cm) en un 40%. La meteorización es ligera con una pátina superficial de color café</p>						
Código	PTR-008	Kilometraje	Coordenadas (crtm05)		Dimensiones (m)	
		40+000	X	Y	Alto	Ancho
			506306	1122456	-	-
Litología	Lavas basálticas		Elevación			
Meteorización	-	483				
Condición del agua	Húmedo					
Descripción						
Idem PTR-007						
Código	PTR-009	Kilometraje	Coordenadas (crtm05)		Dimensiones (m)	
		39+095	X	Y	Alto	Ancho
			505627	1121993	35	4
Litología	Lavas basálticas		Elevación			
Meteorización	Ligera	512				
Condición del agua	Húmedo					
Descripción						
<p>Roca volcánica, lava, de textura afanítica-porfirítica color café oscuro, con cristales de plagioclasa de 2cm de tamaño en un 5% de la roca y piroxenos de 2cm en un 7%, presenta una meteorización ligera con una patina superficial color café. La roca en mejores condiciones quedo expuesta luego que se diera el deslizamiento del regolito sobre esta.</p>						

Código	PTR-010	Kilometraje	Coordenadas (crtm05)		Dimensiones (m)	
		39+065	X	Y	Alto	Ancho
			505603	1121968	30	15
Litología	Lavas basálticas		Elevación			
Meteorización	Ligera		494			
Condición del agua	Húmedo					
Descripción						
Idem PTR-009						
Código	PTR-011	Kilometraje	Coordenadas (crtm05)		Dimensiones (m)	
		39+000	X	Y	Alto	Ancho
			505540	1121946	5	3
Litología	Lavas basálticas		Elevación			
Meteorización	Ligera		500			
Condición del agua	Húmedo					
Descripción						
Idem PTR-009, fracturas orientadas 85°/60°						
Código	PTR-012	Kilometraje	Coordenadas (crtm05)		Dimensiones (m)	
		38+800	X	Y	Alto	Ancho
			505368	1121945	10	3
Litología	-		Elevación			
Meteorización	-		518			
Condición del agua	Húmedo					
Descripción						
Dos zonas deslizadas muy cerca la una de la otra (<10m), la masa entre ambos deslizamientos podría deslizarse en el futuro.						

Código	PTR-013	Kilometraje	38+745		Coordenadas (crtm05)		Dimensiones (m)	
			X	Y	Alto	Ancho		
			505320	1121945	30	20		
Litología	-		Elevación					
Meteorización	Extrema	518						
Condición del agua	Húmedo							
Descripción								
Deslizamiento planar con material residual sobre la roca								
Código	PTR-014	Kilometraje	38+630		Coordenadas (crtm05)		Dimensiones (m)	
			X	Y	Alto	Ancho		
			505208	1122001	30	15		
Litología	-		Elevación					
Meteorización	Extrema	534						
Condición del agua	Húmedo							
Descripción								
Deslizamiento con deposito cercano a la carretera, presencia de un arbol de tamaño considerable dentro del deposito con probabilidad de caerse.								
Código	PTR-015	Kilometraje	38+315		Coordenadas (crtm05)		Dimensiones (m)	
			X	Y	Alto	Ancho		
			504940	1121884	10	2		
Litología	Lava basáltica		Elevación					
Meteorización	Moderada	566						
Condición del agua	Húmedo							
Descripción								
Idem PTR-009, con mayor alteración y una cantidad de suelo residual significativa								



Código	PTR-016	Kilometraje	38+165		Coordenadas (crtm05)		Dimensiones (m)	
			X	Y	Alto	Ancho		
			504804	1121907	30	10		
Litología	-		Elevación					
Meteorización	-	579						
Condición del agua	-							
Descripción								
Deslizamiento visto sobre la carretera del lado izquierdo de esta								
Código	PTR-017	Kilometraje	38+065		Coordenadas (crtm05)		Dimensiones (m)	
			X	Y	Alto	Ancho		
			504729	1121970	4	7		
Litología	Lava basáltica		Elevación					
Meteorización	Alta	602						
Condición del agua	Flujo superficial							
Descripción								
Roca volcánica color gris, afanítica-potfírica con cristales de plagioclasa de 1 a 2mm, en un 20%, meteorización alta con una patina superficial color café. En la parte superior del afloramiento se puede apreciar un lajamiento importante de la roca el cual se diferencia del macizo rocoso que lo subyace, es posible que sea por efecto de la vegetación.								
Código	PTR-018	Kilometraje	37+600		Coordenadas (crtm05)		Dimensiones (m)	
			X	Y	Alto	Ancho		
			504818	1122388	10	15		
Litología	Brecha Polimíctica		Elevación					
Meteorización	Leve	615						
Condición del agua	Flujo superficial							
Descripción								
Depósito de deslizamiento, por la composición polimíctica de los clastos (andesita, andesita vesicular y escoria) y la subangularidad de estos se asume una litología brechosa.								

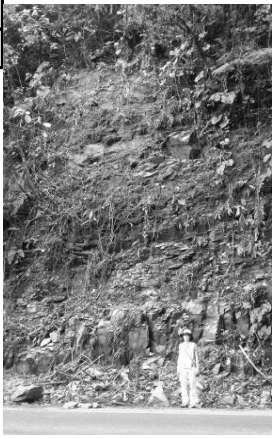
Código	PTR-019	Kilometraje	37+187		Coordenadas (crtm05)		Dimensiones (m)	
			X	Y	Alto	Ancho		
			505076	1122694	15	10		
Litología	Brecha Polimíctica		Elevación					
Meteorización	Moderada		637					
Condición del agua	Flujo superficial							
Descripción								
Brecha volcániclaística aflorante en una cascada, presenta liticos de 1 a 5cm, esta litología es observada 150m hacia Guapiles								
								
Código	PTR-020	Kilometraje	37+050		Coordenadas (crtm05)		Dimensiones (m)	
			X	Y	Alto	Ancho		
			505076	1122694	15	3		
Litología	Lava basáltica		Elevación					
Meteorización	Leve		687					
Condición del agua	Seco							
Descripción								
Roca volcánica de color gris, textura afanítica-porfirítica, con cristales de plagioclasa de 1 a 2mm en un 5%, de meteorización leve con una patina superficial café. Contacto entre brechas y lavas, lavas sumamente fracturadas, diaclasas de aproximadamente 1m de alto. Planos de orientación 165°/63° y 199°/75°								
								
Código	PTR-021	Kilometraje	36+990		Coordenadas (crtm05)		Dimensiones (m)	
			X	Y	Alto	Ancho		
			505020	1122880	-	-		
Litología	-		Elevación					
Meteorización	-		681					
Condición del agua	-							
Descripción								
Deslizamiento grande en la montaña, no fue posible acercarse a este. Es posible que sea de lavas.								
								

Código	PTR-022	Kilometraje	36+670		Coordenadas (crtm05)		Dimensiones (m)	
			X	Y	Alto	Ancho		
			504933	1123153	25	30		
Litología	Brechas		Elevación					
Meteorización	Alta		678					
Condición del agua	Húmedo							
Descripción								
Brecha subyaciendo a lavas, las lavas se observan a la altura*Punto de muestro y caracterización de suelo. El afloramiento contiene 2 deslizamientos espaciados unos 30m IDEM PTR-019								
								
Código	PTR-023	Kilometraje	35+800		Coordenadas (crtm05)		Dimensiones (m)	
			X	Y	Alto	Ancho		
			504415	1123324	15	5		
Litología	Lava basáltica		Elevación					
Meteorización	Leve		737					
Condición del agua	Flujo Superficial							
Descripción								
Roca volcánica color gris, con cristales de plagioclasa de 1 a 3 mm en un 8%. Meteorización leve con una patina superficial color café. Catarata, se observan planos a la derecha de la catarata y en la parte superior de esta(bajo el flujo). 131m despues siguen las lavas								
								
Código	PTR-024	Kilometraje	35+340		Coordenadas (crtm05)		Dimensiones (m)	
			X	Y	Alto	Ancho		
			504005	1123320	25	20		
Litología	Lava basáltica		Elevación					
Meteorización	Leve		755					
Condición del agua	Húmedo							
Descripción								
Roca volcánica color gris , textura afanítica porfirítica con cristales de plagioclasa de 1 a 2mm en un 10%. Meteorización leve con una patina superficial color café. Talud presenta un parche de vegetación en su parte superior que evidencia un remanente "intacto" de antes del deslizamiento, hay presencia de agua saliendo de las discontinuidades y al pie del deslizamiento, se pueden apreciar 6 familias de discontinuidades de las cuales una se orienta hace la carretera, favoreciendo así la generacion de deslizamientos, a 25m del punto(hacia SJ) estas discontinuidades cambian de dirección hacia adentro del talud. Planos 342º/48º y 306º/63º.								
								

Código	PTR-025	Kilometraje	33+735		Coordenadas (crtm05)		Dimensiones (m)	
			X	Y	Alto	Ancho		
			502956	1122437	3	4		
Litología	Flujo Piroclástico		Elevación					
Meteorización	Extrema		882					
Condición del agua	Húmedo							
Descripción								
<p>Roca volcániclastica de color café, la textura y color hacen pensar en suelo, su cohesión todavía es alta pues no es fácil delezñar las muestras.</p>								
Código	PTR-026	Kilometraje	32+704		Coordenadas (crtm05)		Dimensiones (m)	
			X	Y	Alto	Ancho		
			502933	1121483	2	3		
Litología	Roca basáltica		Elevación					
Meteorización	Alta		923					
Condición del agua	Húmedo							
Descripción								
<p>Roca volcániclastica de color gris con cristales de plagioclasa de 1 a 2mm en un 20%, Meteorización muy alta con coloración café. En la parte inferior del afloramiento se encuentra una roca con meteorización esferoidal la cual parece ser un remanente de la roca original del sitio</p>								
Código	PTR-027	Kilometraje	32+235		Coordenadas (crtm05)		Dimensiones (m)	
			X	Y	Alto	Ancho		
			502989	1121014	3	5		
Litología	Flujo Piroclástico		Elevación					
Meteorización	Leve		949					
Condición del agua	Húmedo							
Descripción								
<p>Se logra observar una versión más sana de PTR-025, el afloramiento está extremadamente fracturado, al menos 5 familias de diaclasas de las cuales 1 es paralela a la calle y a favor de esta</p>								



Código	PTR-028	Kilometraje	32+065		Coordenadas (crtm05)		Dimensiones (m)	
			X	Y	Alto	Ancho		
			503034	1120855	6	10		
Litología	Flujo Piroclástico		Elevación					
Meteorización	Leve		957					
Condición del agua	Húmedo							
Descripción								
Idem PTR-027, El macizo se encuentra diaclasado uniformemente, presenta columnas formadas por estas diaclasas, de una altura igual al afloramiento.								
								
Código	PTR-029	Kilometraje	31+900		Coordenadas (crtm05)		Dimensiones (m)	
			X	Y	Alto	Ancho		
			503032	1120711	8	3		
Litología	Flujo piroclástico		Elevación					
Meteorización	Leve		966					
Condición del agua	Húmedo							
Descripción								
Macizo Rocoso, muy fracturado, similar a PTR-028. El flujo en este punto esta mas soldado								
Código	PTR-030	Kilometraje	31+345		Coordenadas (crtm05)		Dimensiones (m)	
			X	Y	Alto	Ancho		
			506287	1120246	25	15		
Litología	Lavas basálticas		Elevación					
Meteorización	Alta		980					
Condición del agua	Flujo superficial							
Descripción								
Roca volcánica color marron, de textura afanítica-porfirítica, con cristales de plagioclasa de 1mm en un 15%, la roca presenta una pátina de color café y una alta alteración, el talud presenta flujo de agua.								
								

Código	PTR-031	Kilometraje	31+245		Coordenadas (crtm05)		Dimensiones (m)	
			X	Y	Alto	Ancho		
			503284	1120146	-	-		
Litología	Lavas basálticas		Elevación					
Meteorización	Leve		981					
Condición del agua	Húmedo							
Descripción								
Punto a 100m de PTR-030, Idem PTR-030 pero mas sana que PTR-030. Matriz muy oscura y plagioclasa 30% de 2-3mm de tamaño								
Código	PTR-032	Kilometraje	30+463		Coordenadas (crtm05)		Dimensiones (m)	
			X	Y	Alto	Ancho		
			503603	1119859	30	15		
Litología	Lavas basálticas		Elevación					
Meteorización	Leve		995					
Condición del agua	Húmedo							
Descripción								
Roca volcánica color gris oscuro, textura afanítica-porfirítica, con cristales de plagioclasa de 1-2mm en un 30%, meteorización leve con una pátina superficial de color café, muy diaclasado en la parte inferior, la parte exterior no presenta tanta roca o al menos no esta expuesta, puede ser un contacto								
								
Código	PTR-033	Kilometraje	28+825		Coordenadas (crtm05)		Dimensiones (m)	
			X	Y	Alto	Ancho		
			503001	1118547	3	4		
Litología	Lavas basálticas		Elevación					
Meteorización	Leve		1040					
Condición del agua	Húmedo							
Descripción								
Roca volcánica de color gris, de textura afanítica porfirítica con cristales de plagioclasa de menos de 1mm de tamaño en un 40% de la roca. Macizo rocoso muy fracturado, posiblemente en la parte superior afloran las andesitas de plagioclasas 4-6mm de tamaño								

Código	PTR-034	Kilometraje	Coordenadas (crtm05) <th colspan="2">Dimensiones (m)</th>		Dimensiones (m)	
		28+369	X	Y	Alto	Ancho
			502822	1118097	25	20
Litología	Brecha polimíctica		Elevación			
Meteorización	Leve		1022			
Condición del agua	Húmedo					
Descripción						
Roca volcániclastica de color café, brecha con clastos andesíticos, hay dos familias de estas, una tiene un porcentaje de aproximadamente 10% de vesículas mientras que la otra tiene 25%. Foto 767-775						
Código	PTR-035	Kilometraje	Coordenadas (crtm05) <th colspan="2">Dimensiones (m)</th>		Dimensiones (m)	
		28+250	X	Y	Alto	Ancho
			502807	1118016	10	25
Litología	Lavas basálticas		Elevación			
Meteorización	Leve		1043			
Condición del agua	Húmedo					
Descripción						
Roca basáltica de color gris oscuro, de textura afanítica-porfirítica con cristales de 1 a 2mm en un 10%, presenta una pátina superficial de color café. 20m hacia San Jose se encuentra la misma litología pero mas sana.						
Código	PTR-036	Kilometraje	Coordenadas (crtm05) <th colspan="2">Dimensiones (m)</th>		Dimensiones (m)	
		28+100	X	Y	Alto	Ancho
			502769	1117869	10	7
Litología	Lavas basálticas		Elevación			
Meteorización	Alta		1064			
Condición del agua	Húmedo					
Descripción						
Lava escoriacea color gris oscuro con una pátina superficial de tonalidad café y una meteorización es alta.						


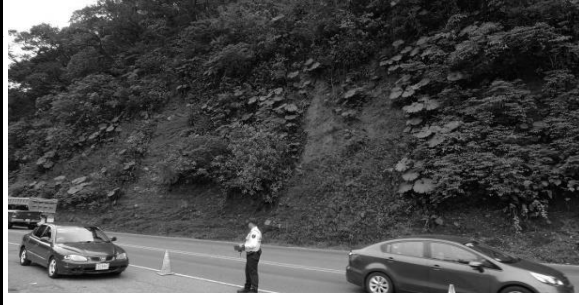
Código	PTR-037	Kilometraje	Coordenadas (crtm05) <th colspan="2">Dimensiones (m)</th>		Dimensiones (m)	
		27+600	X	Y	Alto	Ancho
			502624	1117417	10	7
Litología	Lavas basálticas		Elevación			
Meteorización	Leve		1083			
Condición del agua	Húmedo					
Descripción						
Roca volcánica, color gris claro, de textura afanítica porfirítica con cristales de plagioclasa de 1 a 2mm de tamaño en un 5%, la roca presenta una meteorización leve con una patina superficial de color gris-café, el macizo se encuentra diaclasado muy irregularmente						
Código	PTR-038	Kilometraje	Coordenadas (crtm05) <th colspan="2">Dimensiones (m)</th>		Dimensiones (m)	
		26+900	X	Y	Alto	Ancho
			502431	1116682	20	30
Litología	Lavas basálticas		Elevación			
Meteorización	Alta		1150			
Condición del agua	Flujo superficial					
Descripción						
Roca volcánica de color gris claro, de textura afanítica porfirítica con cristales de plagioclasa de 1 a 3mm de tamaño en un 10%, maficos de maximo 1mm en un 1%. Presenta una pátina de color café.						
Código	PTR-039	Kilometraje	Coordenadas (crtm05) <th colspan="2">Dimensiones (m)</th>		Dimensiones (m)	
		26+580	X	Y	Alto	Ancho
			502284	1116544	20	15
Litología	Volcánica		Elevación			
Meteorización	Moderada		1136			
Condición del agua	Flujo superficial					
Descripción						
Presencia de dos litologías distingibles, una toba de color marron con liticos de menos de 1mm en un 5%, la cual se encuentra subyaciendo una lavas fracturadas						




Código	PTR-040	Kilometraje	26+420		Coordenadas (crtm05)		Dimensiones (m)	
			X	Y	Alto	Ancho		
			502131	1116489	25	20		
Litología	Lava basáltica		Elevación					
Meteorización	Leve		1173					
Condición del agua	Flujo superficial							
Descripción								
Roca volcánica muy oscura, de textura casi afírica. Los cristales que se logran ver son plagioclasas de menos de 1mm de tamaño en un 5% de la roca.								
Código	PTR-041	Kilometraje	25+801		Coordenadas (crtm05)		Dimensiones (m)	
			X	Y	Alto	Ancho		
			501866	1116054	25	25		
Litología	Lavas basálticas		Elevación					
Meteorización	Leve		1210					
Condición del agua	Húmedo							
Descripción								
Roca volcánica de color gris claro, de textura afanítica porfirítica, con cristales de plagioclasa de 1 a 2mm en un 10% de la roca, piroxeno 1-3mm de 6% y hornblenda 5mm en un 1%. La roca presenta una pátina superficial de color café con con planos que buzcan hacia la carretera con orientaciones 292°/63° y 256°/73°.								
Código	PTR-042	Kilometraje	24+550		Coordenadas (crtm05)		Dimensiones (m)	
			X	Y	Alto	Ancho		
			501913	1114787	30	25		
Litología	Lavas basálticas		Elevación					
Meteorización	Leve		1303					
Condición del agua	Húmedo							
Descripción								
Afloramiento con dos tipos de lava. 1 lava afanítica porfirítica con cristales de plagioclasa de 3-4mm en un 70% de la roca. 2 Lava afanítica porfirítica con cristales de plagioclasa de <1mm de tamaño en un 5% junto a maficos de 1-2mm en un 20% y con presencia de vesículas.								


Código	PTR-043	Kilometraje	24+540		Coordenadas (crtm05)		Dimensiones (m)	
			X	Y	Alto	Ancho		
			501925	1114743	-	-		
Litología	Lavas basálticas		Elevación					
Meteorización	Leve		1321					
Condición del agua	Húmedo							
Descripción								
Idem PTR-042								
Código	PTR-044	Kilometraje			Coordenadas (crtm05)		Dimensiones (m)	
			X	Y	Alto	Ancho		
			501937	1114647				
Litología			Elevación					
Meteorización								
Condición del agua								
Descripción								
Código	PTR-045	Kilometraje	23+950		Coordenadas (crtm05)		Dimensiones (m)	
			X	Y	Alto	Ancho		
			501966	1114189	25	20		
Litología	Lava basáltica		Elevación					
Meteorización	Leve		1345					
Condición del agua	Húmedo							
Descripción								
<p>Roca volcánica color gris claro, de textura afanítica-porfirítica, plagioclasa de menosde 1mm en un 5% y máficos de entre 1 a 2mm en menos de 1% de la roca. La roca presenta una meteorización leve y una pátina superficial de color café. El talud esta muy diaclasado, con planos en orientaciones 269°/47°,75°/82°,6°/86°,218°/88° y 272°/21°</p>								


Código	PTR-046	Kilometraje	23+750		Coordenadas (crtm05)		Dimensiones (m)	
			X	Y	Alto	Ancho		
			501940	1114011	25	20		
Litología	Lava basáltica		Elevación					
Meteorización	Leve		1352					
Condición del agua	Húmedo							
Descripción								
Idem PTR-046 con una textura mas fina								
Código	PTR-047	Kilometraje	22+950		Coordenadas (crtm05)		Dimensiones (m)	
			X	Y	Alto	Ancho		
			501533	1113385	25	20		
Litología	Lava basáltica		Elevación					
Meteorización	Moderada		1370					
Condición del agua	Seco							
Descripción								
Contacto lateral entre dos lavas, de composición similar(plagioclasas de 1mm en un 20%) pero con distinto porcentaje de vesiculas. Las lavas presentan un 10% y 20% de vesiculas respectivamente. Las rocas estan meteorizadas moderadamente con una patina superficial de color café-morado.								
Código	PTR-048	Kilometraje	21+622		Coordenadas (crtm05)		Dimensiones (m)	
			X	Y	Alto	Ancho		
			500300	1113400	3	100		
Litología	Brechas		Elevación					
Meteorización	Alta		1455					
Condición del agua	Húmedo							
Descripción								
Roca volcaniclástica, brechas polimícticas de tonalidad marrón, bloques decimétricos (no mas de 50cm) los cuales conforman un 5%-10% de la roca, la meteorización de los clastos es leve, sin embargo la matriz se encuentra muy meteorizada, formando materiales muy arenosos								



Código	PTR-049	Kilometraje	Coordenadas (crtm05)		Dimensiones (m)	
			X	Y	Alto	Ancho
			500027	1113495		
Litología			Elevación			
Meteorización						
Condición del agua						
Descripción						
Código	PTR-050	Kilometraje	Coordenadas (crtm05)		Dimensiones (m)	
		20+877	X	Y	Alto	Ancho
			499606	1113229	4	100
Litología	Brecha		Elevación			
Meteorización	Moderada		1512			
Condición del agua	Húmedo					
Descripción						
<p>Similar a PTR-048 a excepcion de presencia de bloques muy afiricos(ademas de vesiculares), en las zonas altas las pendientes de los taludes se encuentran invertidas, el talud se encuentra humedo</p>						
						
Código	PTR-051	Kilometraje	Coordenadas (crtm05)		Dimensiones (m)	
		19+000	X	Y	Alto	Ancho
			498622	1112097	30	100
Litología	Brechas		Elevación			
Meteorización	Marrón		1595			
Condición del agua	Húmedo					
Descripción						
<p>Pixel rojo en mapa de densidad de deslizamientos, es apreciable un paquete mas denso de bloques en el talud, este no debe tener mas de 50m de ancho pues no aparece en un afloramiento(deslizamiento) cercano. Aunque se observaron humedos en otras visitas(temporada lluviosa) se ha visto flujos de agua descendiendo del talud. Los bloques son lavas basálticas y basálticas vesiculares, conformando un 10% de la</p>						
						

Código	PTR-052	Kilometraje	18+522		Coordenadas (crtm05)		Dimensiones (m)	
			X	Y	Alto	Ancho		
			498720	1111841	4	100		
Litologías	Brechas y lavas		Elevación					
Meteorización	Leve		1591					
Condición del agua	Húmedo							
Descripción								
<p>Zona de brechas, en estas se encuentran unos deslizamientos separados 50m, en este una coloración rojiza aparece en las brechas, se asume es debido a su oxidación. Una colada interdigitada con las brechas se muestra muy blocosa(fracturada?), esta colada tiene aprox 100 m de ancho y unos 2-3m de espesor. Posterior a esta colada reaparece la brecha. La composición de los bloques y la meteorización de los rocas es idem a PTR-051</p>								
								
Código	PTR-053	Kilometraje	18+235		Coordenadas (crtm05)		Dimensiones (m)	
			X	Y	Alto	Ancho		
			498997	1111897	4	600		
Litología	Brechas y lavas		Elevación					
Meteorización	Leve		1581					
Condición del agua	Húmedo							
Descripción								
<p>Brecha polimictica, los bloques (todos volcánicos) presentan una composición y texturas variadas (similar a puntos anteriores), algunos son basáltos, andesitas vesiculares, los bloques representa de un 5 a un 25% del afloramiento(varía en correspondencia con la altura). El dique (de rumbo N30W) pudo haber alterado las rocas que lo rodean. Los bloques parecen tener una gradación inversa. La matriz igual a puntos anteriores esta muy meteorizada.</p>								
								
Código	PTR-054	Kilometraje	17+360		Coordenadas (crtm05)		Dimensiones (m)	
			X	Y	Alto	Ancho		
			499637	1111540	4	500		
Litología	Brechas		Elevación					
Meteorización	Extrema		1629					
Condición del agua	Flujo superficial							
Descripción								
<p>Brecha extremadamente meteorizada, no tiene dureza, el afloramiento presenta flujo de agua con ciertas zonas solamente húmedas.</p>								
								

Código	PTR-055	Kilometraje	Coordenadas (crtm05) <th colspan="2">Dimensiones (m)</th>		Dimensiones (m)	
		44+610	X	Y	Alto	Ancho
			501970	1115180		
Litología			Elevación			
Meteorización						
Condición del agua						
Descripción						
Código	PTR-056	Kilometraje	Coordenadas (crtm05) <th colspan="2">Dimensiones (m)</th>		Dimensiones (m)	
		44+600	X	Y	Alto	Ancho
			508744	1125980	7	10
Litología	Lavas basálticas		Elevación			
Meteorización	Alta		550			
Condición del agua	Húmedo					
Descripción						
Lavas grisáceas muy meteorizadas, se reconocen plagioclasas pero se encuentran muy alteradas, estas lavas presentan una forma columnar similar a las vistas anteriormente						
Código	PTR-057	Kilometraje	Coordenadas (crtm05) <th colspan="2">Dimensiones (m)</th>		Dimensiones (m)	
		45+190	X	Y	Alto	Ancho
			509266	1126131	5	2000
Litología	Flujos Piroclásticos		Elevación			
Meteorización	Alta		522			
Condición del agua	Húmedo					
Descripción						
Sucesión de diversos flujos piroclásticos de composición variada, estos presentan contactos netos y levemente transicionales, este conjunto de flujos están fallados por una serie de fallas posiblemente normales con un rumbo Noroeste y un buzamiento entre 25 y 55 grados						
						

Código	PTR-058	Kilometraje	46+638		Coordenadas (crtm05)		Dimensiones (m)	
			X	Y	Alto	Ancho		
			510236	1126964	4	30		
Litología	Lava basáltica		Elevación					
Meteorización	Leve		430					
Condición del agua	Húmedo							
Descripción								
Colada de lava entre los flujos piroclásticos, esta colada es igual a las litologías de plagioclasas grandes que se ven antes y posterior al puente, se encuentra sumamente diaclasada, la principal discontinuidad tiene un rumbo de N75W/60								
Código	PTR-059	Kilometraje			Coordenadas (crtm05)		Dimensiones (m)	
			X	Y	Alto	Ancho		
			510735	1127567	4	50		
Litología	Lavas basálticas		Elevación					
Meteorización	Leve		270					
Condición del agua	Seco-Húmedo							
Descripción								
Lavas vesiculares con plagioclasas y piroxenos(1-2mm), estas se encuentran falladas con un plano de N40W/55(similar a los flujos)								
								
Código	PTR-060	Kilometraje	46+230		Coordenadas (crtm05)		Dimensiones (m)	
			X	Y	Alto	Ancho		
			509890	1126790	4	50		
Litología	Flujos Piroclásticos		Elevación					
Meteorización	Alta		500					
Condición del agua	Húmedo							
Descripción								
Flujo piroclásticos de escorias, se encuentra fallado N25W/25, el plano de falla a empezado a ser abierto por la escorrentía.								

Parámetros geométricos de las pendientes naturales

Sección	Hd		Hu		Sección	Hd		Hu		Sección	Hd		Hu		Sección	Hd		Hu	
	i(°)	H(m)	i(°)	H(m)		i(°)	H(m)	i(°)	H(m)		i(°)	H(m)	i(°)	H(m)		i(°)	H(m)	i(°)	H(m)
1	-	-	-	-	33	20	18	35	28	65	37	42	37	16	97	22	42	31	28
2	-	-	-	-	34	-	-	38	32	66	34	66	26	12	98	28	31	31	20
3	15	6	-	-	35	30	55	26	14	67	35	45	35	15	99	42	70	34	36
4	-	-	-	-	36	41	60	36	28	68	55	70	40	20	100	32	62	19	20
5	-	-	-	-	37	47	52	48	42	69	47	38	35	24	101	40	40	28	25
6	7	9	-	-	38	36	50	40	30	70	30	40	27	15	102	40	50	-	-
7	11	11	-	-	39	41	39	27	12	71	40	58	41	24	103	40	60	40	40
8	-	-	-	-	40	33	75	40	26	72	34	56	20	10	104	42	40	33	21
9	8	5	19	6	41	60	64	49	41	73	18	100	24	29	105	43	90	30	27
10	12	7	12	7	42	38	40	50	16	74	45	72	37	45	106	53	77	40	46
11	9	13	-	-	43	43	61	30	23	75	36	50	37	27	107	23	54	50	33
12	11	31	-	-	44	50	72	47	33	76	42	60	21	28	108	27	65	46	40
13	-	-	13	7	45	9	34	37	24	77	44	50	41	30	109	56	61	-	-
14	5	11	-	-	46	43	55	36	22	78	40	65	42	26	110	45	37	38	17
15	20	18	53	20	47	50	33	48	22	79	-	-	39	38	111	52	59	43	37
16	24	45	27	26	48	37	60	37	33	80	-	-	38	22	112	58	51	40	23
17	31	42	29	21	49	47	50	28	10	81	-	-	36	31	113	43	30	43	33
18	35	42	24	25	50	27	42	32	15	82	31	20	30	23	114	40	26	41	21
19	30	50	-	-	51	37	50	33	16	83	28	60	43	55	115	38	22	22	10
20	27	34	-	-	52	37	56	41	25	84	33	60	33	25	116	26	30	-	-
21	14	18	-	-	53	34	38	35	18	85	20	56	34	20	117	29	35	55	24
22	32	47	-	-	54	36	45	29	20	86	35	42	34	15	118	64	20	34	18
23	24	25	47	32	55	40	45	32	17	87	17	45	25	17	119	75	27	32	15
24	18	24	42	15	56	38	70	37	27	88	30	40	32	16	120	32	26	36	17
25	9	45	41	24	57	40	43	41	25	89	33	30	31	23	121	25	22	48	44
26	30	47	22	11	58	38	80	46	28	90	28	33	32	27	122	41	21	39	18
27	29	52	30	16	59	37	62	38	48	91	47	30	32	20	123	41	17	20	8
28	37	80	48	20	60	30	25	34	20	92	48	45	49	34	124	42	15	37	18
29	40	84	70	80	61	40	35	43	28	93	45	20	-	-	125	47	27	41	26
30	55	80	55	39	62	22	25	47	43	94	32	33	42	20	126	26	25	34	15
31	48	50	52	40	63	12	11	17	13	95	36	30	30	23	127	21	28	21	30
32	29	37	49	32	64	20	15	25	11	96	46	44	-	-	128	15	16	27	18

Sección	Hd		Hu		Sección	Hd		Hu		Sección	Hd		Hu	
	i(°)	H(m)	i(°)	H(m)		i(°)	H(m)	i(°)	H(m)		i(°)	H(m)	i(°)	H(m)
129	16	19	32	20	161	-	-	30	15	193	30	15	-	-
130	25	14	35	17	162	40	15	27	15	194	11	10	22	32
131	38	22	45	30	163	17	27	27	17	195	15	23	20	21
132	10	8	18	7	164	20	26	18	8	196	24	25	-	-
133	52	20	25	11	165	18	22	21	11	197	16	15	31	16
134	47	14	28	15	166	34	10	18	13	198	23	18	-	-
135	21	34	17	8	167	16	13	24	11	199	-	-	27	14
136	-	-	-	-	168	37	11	-	-	200	16	22	14	13
137	19	16	35	15	169	11	25	12	8	201	26	31	19	15
138	18	19	14	4	170	25	20	26	13	202	43	50	24	29
139	24	18	17	2	171	19	25	4	3	203	47	20	30	14
140	15	21	41	40	172	20	13	38	38	204	10	10	25	12
141	62	50	40	30	173	37	50	27	15	205	15	17	27	16
142	63	64	26	17	174	44	52	35	20	206	22	32	-	-
143	50	53	35	30	175	43	50	-	-	207	24	40	-	-
144	55	90	46	31	176	27	30	-	-	208	-	-	36	15
145	36	98	50	53	177	12	25	-	-	209	-	-	35	20
146	27	52	24	26	178	18	6	-	-	210	-	-	30	22
147	50	40	20	24	179	17	11	20	5	211	-	-	30	10
148	8	15	52	65	180	31	25	23	11	212	-	-	-	-
149	51	60	21	6	181	34	23	38	21					
150	36	68	32	10	182	33	26	31	30					
151	22	28	8	4	183	26	33	33	16					
152	9	24	-	-	184	37	37	21	12					
153	6	9	-	-	185	32	39	33	30					
154	41	24	-	-	186	39	34	4	4					
155	32	15	-	-	187	30	61	32	22					
156	12	20	-	-	188	34	64	28	21					
157	19	40	-	-	189	36	52	-	-					
158	22	42	16	10	190	24	41	17	11					
159	33	30	23	15	191	30	44	-	-					
160	41	31	-	-	192	30	18	30	24					

Parámetros geométricos de los cortes de los taludes

Sección	Hd		Hu		Sección	Hd		Hu		Sección	Hd		Hu		Sección	Hd		Hu	
	i(°)	H(m)	i(°)	H(m)		i(°)	H(m)	i(°)	H(m)		i(°)	H(m)	i(°)	H(m)		i(°)	H(m)	i(°)	H(m)
1	-	-	31	17	33	-	-	32	22	65	57	22	42	20	97	48	20	23	11
2	51	11	-	-	34	-	-	41	27	66	53	50	39	23	98	48	42	28	10
3	51	5	-	-	35	45	36	41	46	67	57	40	43	20	99	50	76	32	35
4	31	3	32	5	36	60	20	34	31	68	55	50	34	23	100	51	54	15	8
5	55	7	34	5	37	58	35	48	40	69	47	70	34	22	101	44	35	27	18
6	54	13	-	-	38	60	33	35	28	70	63	44	26	18	102	59	43	42	31
7	67	13	-	-	39	56	19	23	19	71	56	44	41	37	103	60	50	40	25
8	47	4	-	-	40	62	45	39	56	72	53	45	30	12	104	57	43	35	12
9	47	3	21	13	41	57	90	48	43	73	54	100	25	25	105	58	47	29	22
10	33	10	-	-	42	65	26	45	16	74	67	53	35	20	106	60	79	35	21
11	44	16	-	-	43	59	31	33	9	75	61	31	37	24	107	50	28	45	20
12	34	29	-	-	44	64	71	47	47	76	60	47	33	35	108	59	42	42	26
13	32	66	-	-	45	45	27	37	32	77	67	45	22	10	109	73	20	-	-
14	31	13	-	-	46	48	52	7	2	78	67	48	33	12	110	61	21	47	16
15	48	14	49	34	47	53	30	50	30	79	-	-	38	53	111	66	52	38	17
16	65	29	43	21	48	60	40	35	17	80	-	-	34	28	112	61	48	18	7
17	63	25	41	14	49	67	30	25	10	81	-	-	34	25	113	62	37	27	14
18	60	20	32	12	50	74	40	28	11	82	41	13	27	10	114	40	31	-	-
19	58	45	-	-	51	62	30	33	15	83	63	37	29	17	115	45	17	45	32
20	61	18	-	-	52	56	36	37	28	84	56	34	39	15	116	47	14	-	-
21	45	21	20	7	53	58	25	33	40	85	48	35	36	18	117	53	35	69	64
22	58	23	-	-	54	48	100	30	33	86	48	20	38	12	118	52	23	33	12
23	56	20	-	-	55	54	43	30	30	87	47	40	28	14	119	68	30	27	13
24	61	42	55	33	56	64	42	32	22	88	50	30	27	8	120	65	22	30	10
25	57	40	20	6	57	64	25	41	20	89	32	23	23	12	121	35	12	-	-
26	60	35	26	7	58	53	30	42	37	90	35	29	35	15	122	56	14	28	14
27	74	20	47	21	59	59	30	40	45	91	48	30	35	18	123	43	19	22	9
28	66	40	68	50	60	39	37	42	32	92	48	46	50	39	124	42	15	27	6
29	66	40	68	50	61	45	55	45	37	93	45	52	-	-	125	56	25	37	12
30	72	45	56	30	62	39	36	49	40	94	48	52	51	39	126	52	17	43	25
31	68	41	52	30	63	34	12	16	13	95	39	48	38	14	127	23	31	19	18
32	53	13	47	55	64	29	10	25	13	96	45	42	24	16	128	19	38	36	24

Sección	Hd		Hu		Sección	Hd		Hu		Sección	Hd		Hu	
	i(°)	H(m)	i(°)	H(m)		i(°)	H(m)	i(°)	H(m)		i(°)	H(m)	i(°)	H(m)
129	40	18	37	19	161	-	-	25	8	193	33	7	-	-
130	40	19	40	19	162	23	14	25	9	194	32	12	25	15
131	51	17	35	24	163	24	21	31	15	195	15	16	26	25
132	48	12	-	-	164	31	11	12	6	196	27	20	-	-
133	53	20	28	15	165	38	20	24	6	197	58	16	38	10
134	48	17	21	11	166	26	13	26	4	198	31	25	33	17
135	47	17	45	4	167	20	14	26	7	199	-	-	29	26
136	36	12	20	3	168	43	11	-	-	200	42	5	10	3
137	51	15	24	10	169	43	18	-	-	201	53	17	22	10
138	11	9	33	5	170	45	26	-	-	202	57	41	46	16
139	45	13	-	-	171	52	12	-	-	203	65	26	-	-
140	44	16	9	4	172	70	14	21	10	204	55	10	19	8
141	60	48	-	-	173	52	40	28	15	205	39	10	25	8
142	64	64	19	11	174	58	48	33	14	206	59	43	-	-
143	66	40	35	17	175	52	25	29	10	207	35	33	-	-
144	56	51	55	33	176	55	42	-	-	208	-	-	30	12
145	43	61	51	42	177	38	13	-	-	209	-	-	36	15
146	56	34	53	30	178	30	13	-	-	210	-	-	38	11
147	39	45	19	19	179	39	21	-	-	211	-	-	33	4
148	51	61	-	-	180	57	22	29	17	212	-	-	-	-
149	35	43	-	-	181	55	22	36	21					
150	34	38	-	-	182	55	13	16	9					
151	35	18	-	-	183	37	15	29	8					
152	20	16	-	-	184	49	32	23	11					
153	43	13	-	-	185	49	26	32	38					
154	58	30	-	-	186	48	44	-	-					
155	38	16	-	-	187	57	33	34	21					
156	24	11	-	-	188	44	18	26	11					
157	34	19	-	-	189	59	19	-	-					
158	52	20	-	-	190	37	19	25	15					
159	52	24	-	-	191	26	20	-	-					
160	52	40	-	-	192	42	18	26	7					

Parámetros para el cálculo del índice HSQI según el caso No.9

Nº Sección	Pendiente (HD)	Altura del talud (HD)	Pendiente (Hu)	Altura del talud (Hu)	Altura del nivel freático (Hw)	Peso específico (γ)	Cohesión efectiva (c')	Ángulo de fricción efectivo (φ')	Formula X	Formula Y	X (HD)	Y (HD)	X (HW)	Y (HW)	Susceptibilidad
1	-	-	31	17	0	12,5	31	36	E	B			-12,2	6,9	Baja
2	51	11	-	-	0	12,5	31	36	E	B	7,8	4,4			Baja
3	51	5	-	-	2,5	12,5	31	36	E	B	16,8	2,0			Baja
4	31	3	32	5	0	12,5	31	36	E	B	-12,2	1,2	-11,2	2,0	Baja
5	55	7	34	5	0	12,5	31	36	E	B	11,8	2,8	-9,2	2,0	Baja
6	54	13	-	-	6,5	12,5	15	35	E	B	20,8	10,8			Media
7	67	13	-	-	6,5	12,5	25	35	E	B	33,8	6,5			Media
8	47	4	-	-	0	12,5	31	36	E	B	3,8	1,6			Baja
9	47	3	21	13	4	12,5	31	36	E	B	27,8	1,2	-16,7	5,2	Baja
10	33	10	-	-	5	12,5	31	36	C	B	-4,8	4,0			Baja
11	44	16	-	-	8	12,5	31	36	E	B	9,8	6,5			Baja
12	34	29	-	-	14,5	12,5	31	36	E	B	-0,2	11,7			Baja
13	32	66	-	-	33	12,5	69	14	E	B	18,7	12,0			Media
14	31	13	-	-	6,5	12,5	5	26	C	B	3,7	32,5			Media
15	48	14	49	34	12	12,5	8	34	C	B	15,9	21,9	11,8	53,1	Alta
16	65	29	43	21	12,5	12,5	45	33	E	B	32,5	8,1	13,2	5,8	Media
17	63	25	41	14	9,75	12,5	28	33	C	B	27,3	11,2	8,3	6,3	Media
18	60	20	32	12	8	12,5	30	33	E	B	27,0	8,3	3,4	5,0	Media
19	58	45	-	-	22,5	12,5	69	32	E	B	27,6	8,2			Media
20	61	18	-	-	9	12,5	27	35	E	B	27,8	8,3			Media
21	45	21	20	7	7	12,5	31	36	E	B	7,8	8,5	-5,2	2,8	Baja
22	58	23	-	-	11,5	12,5	33	33	E	B	26,7	8,7			Media
23	56	20	-	-	10	12,5	29	33	E	B	24,7	8,6			Media
24	61	42	55	33	18,75	12,5	31	36	C	B	22,6	16,9	17,9	13,3	Alta
25	57	40	20	6	11,5	12,5	31	36	E	B	19,0	16,1	11,3	2,4	Media
26	60	35	26	7	10,5	12,5	31	36	C	B	20,0	14,1	-1,0	2,8	Media
27	74	20	47	21	10,25	12,5	31	36	E	B	40,0	8,1	12,6	8,5	Media
28	62	45	40	20	16,25	12,5	31	36	E	B	25,3	18,1	11,4	8,1	Alta
29	66	40	68	50	22,5	12,5	31	37	E	B	32,0	16,1	31,9	20,2	Alta
30	72	45	56	30	18,75	12,5	69	45	E	B	27,4	8,2	16,1	5,4	Media
31	68	41	52	30	17,75	12,5	31	33	E	B	35,5	16,5	22,2	12,1	Alta

32	53	13	47	55	17	12,5	32	33	C	B	26,3	5,1	10,5	21,5	Media
33	-	-	32	22	11	12,5	11	33	E	B			0,7	25,0	Media
34	-	-	41	27	13,5	12,5	20	34	E	B			8,7	16,9	Media
35	45	36	41	46	20,5	12,5	32	34	E	B	13,9	14,1	7,8	18,0	Media
36	60	20	34	31	12,75	12,5	37	33	E	B	30,9	6,8	1,2	10,5	Media
37	58	35	48	40	18,75	12,5	34	33	E	B	27,2	12,9	16,1	14,7	Media
38	60	33	35	28	15,25	12,5	15	30	E	B	30,9	27,5	7,2	23,3	Alta
39	56	19	23	19	9,5	12,5	31	36	E	B	21,8	7,7	-11,2	7,7	Media
40	62	45	39	56	25,25	12,5	30	33	E	B	31,7	18,8	6,8	23,3	Alta
41	57	90	48	43	33,25	12,5	55	33	E	B	23,5	20,5	21,2	9,8	Alta
42	65	26	45	16	10,5	12,5	48	33	E	B	32,1	6,8	16,2	4,2	Media
43	59	31	33	9	10	12,5	3	29	C	B	27,0	129,2	7,9	37,5	Alta
44	64	71	47	47	29,5	27,2	21	38	E	B	26,3	92,0	13,3	60,9	Alta
45	45	27	37	32	14,75	27,2	9	20	E	B	26,5	81,6	17,6	96,7	Alta
46	48	52	7	2	13,5	27,2	30	43	C	B	-0,3	47,1	42,5	1,8	Media
47	53	30	50	30	15	27,2	30	50	E	B	5,5	27,2	2,5	27,2	Media
48	60	40	35	17	14,25	27,2	33	50	C	B	5,3	33,0	-12,4	14,0	Media
49	67	30	25	10	10	27,2	21	38	E	B	27,7	38,9	-1,6	13,0	Alta
50	74	40	28	11	12,75	27,2	21	38	E	B	34,5	51,8	4,4	14,2	Alta
51	62	30	33	15	11,25	27,2	21	38	E	B	23,5	38,9	1,7	19,4	Alta
52	56	36	37	28	16	27,2	30	46	C	B	6,9	32,6	-10,3	25,4	Media
53	58	25	33	40	16,25	27,2	37	50	E	B	14,3	18,4	-16,8	29,4	Media
54	48	100	30	33	33,25	27,2	21	38	C	D	6,2	129,5	-4,1	42,7	Media
55	54	43	30	30	18,25	27,2	21	38	E	D	16,5	55,7	-4,0	38,9	Alta
56	64	42	32	22	16	27,2	23	32	E	D	31,7	49,7	5,2	26,0	Alta
57	64	25	41	20	11,25	27,2	16	35	C	D	26,7	42,5	4,9	34,0	Alta
58	53	30	42	37	16,75	27,2	21	38	E	D	18,0	38,9	5,0	47,9	Alta
59	59	30	40	45	18,75	27,2	40	66	E	D	0,4	20,4	-25,5	30,6	Baja
60	39	37	42	32	17,25	27,2	35	37	E	D	3,2	28,8	7,6	24,9	Media
61	45	55	45	37	23	15,17	36	40	E	D	5,4	23,2	9,4	15,6	Media
62	39	36	49	40	19	15,17	40	40,6	E	D	1,0	13,7	9,9	15,2	Media
63	34	12	16	13	6,25	15,17	10	10	E	D	24,6	18,2	6,4	19,7	Alta
64	29	10	25	13	5,75	15,17	12	15	E	D	15,3	12,6	10,3	16,4	Media
65	57	22	42	20	10,5	15,17	21	38	E	D	20,5	15,9	6,4	14,4	Media

66	53	50	39	23	18,25	16,23	15	49	C	D	-0,4	54,1	-8,1	24,9	Media
67	57	40	43	20	15	16,23	36	45	E	D	11,4	18,0	5,9	9,0	Media
68	55	50	34	23	18,25	16,23	21	38	E	D	16,3	38,6	3,5	17,8	Alta
69	47	70	34	22	23	16,23	25	42	C	D	0,7	45,4	-3,2	14,3	Media
70	63	44	26	18	15,5	16,23	14	22	E	B	40,5	51,0	9,1	20,9	Alta
71	56	44	41	37	20,25	16,23	21	38	E	B	19,1	34,0	5,8	28,6	Alta
72	53	45	30	12	14,25	16,23	10	18	C	B	33,1	73,0	14,8	19,5	Alta
73	54	100	25	25	31,25	16,23	21	38	E	B	14,3	77,3	3,2	19,3	Alta
74	67	53	35	20	18,25	16,23	16	33	E	B	33,1	53,8	10,5	20,3	Alta
75	61	31	37	24	13,75	16,23	11	39	E	B	22,8	45,7	1,4	35,4	Alta
76	60	47	33	35	20,5	16,23	21	38	E	B	22,7	36,3	-1,5	27,1	Alta
77	67	45	22	10	13,75	16,23	9	48	E	B	16,7	81,2	-2,6	18,0	Alta
78	67	48	33	12	15	16,23	8	23	C	B	41,6	97,4	14,0	24,3	Alta
79	-	-	38	53	26,5	16,23	21	38	C	B			1,9	41,0	Media
80	-	-	34	28	14	16,23	21	38	E	B			-2,1	21,6	Baja
81	-	-	34	25	12,5	16,23	21	38	C	B			-2,1	19,3	Baja
82	41	13	27	10	5,75	16,23	7	22	E	B	19,5	30,1	6,9	23,2	Alta
83	63	37	29	17	13,5	16,23	7	36	E	B	26,4	85,8	0,1	39,4	Alta
84	56	34	39	15	12,25	16,23	12	36	E	B	19,3	46,0	10,5	20,3	Alta
85	48	35	36	18	13,25	16,23	11	36	E	B	11,6	51,6	6,1	26,6	Alta
86	48	20	38	12	8	16,23	7	38	E	B	10,0	46,4	5,1	27,8	Alta
87	47	40	28	14	13,5	16,23	8	32	E	B	14,0	81,2	5,0	28,4	Alta
88	50	30	27	8	9,5	16,23	21	38	E	B	10,4	23,2	4,0	6,2	Media
89	32	23	23	12	8,75	16,23	21	38	E	B	-6,4	17,8	-8,7	9,3	Media
90	35	29	35	15	11	16,23	21	38	E	B	-3,4	22,4	3,3	11,6	Baja
91	48	30	35	18	12	16,23	8	30	C	B	15,6	60,9	5,0	36,5	Alta
92	48	46	50	39	21,25	16,23	35	40	E	B	9,2	21,3	12,9	18,1	Media
93	45	52	-	-	26	16,23	15	42	C	B	0,9	56,3			Alta
94	48	52	51	39	22,75	16,23	35	42	E	B	6,8	24,1	12,9	18,1	Media
95	39	48	38	14	15,5	16,23	10	48	E	B	-10,9	77,9	7,0	22,7	Media
96	45	42	24	16	14,5	16,23	21	38	E	B	6,0	32,5	-4,4	12,4	Media
97	48	20	23	11	7,75	16,23	21	38	C	B	6,8	15,5	-14,6	8,5	Baja
98	48	42	28	10	13	16,23	20	45	E	B	1,0	34,1	3,3	8,1	Media
99	50	76	32	35	27,75	16,23	18	36	E	B	13,4	68,5	3,1	31,6	Alta

100	51	54	15	8	15,5	16,23	6	46	E	B	2,4	146,1	4,4	21,6	Media
101	44	35	27	18	13,25	16,23	6	46	E	B	-2,5	94,7	-11,3	48,7	Alta
102	59	43	42	31	18,5	16,23	11	38	C	B	18,3	63,4	3,2	45,7	Alta
103	60	50	40	25	18,75	16,23	21	38	C	B	18,7	38,6	3,0	19,3	Alta
104	57	43	35	12	13,75	16,23	30	48	E	D	7,1	23,3	4,9	6,5	Media
105	58	47	29	22	17,25	16,23	21	38	E	D	19,4	36,3	-1,7	17,0	Alta
106	60	79	35	21	25	16,57	19	37	E	D	21,5	68,9	12,6	18,3	Alta
107	50	28	45	20	12	16,57	25	43	E	D	7,6	18,6	6,3	13,3	Media
108	59	42	42	26	17	16,57	21	29	C	D	27,7	33,1	12,9	20,5	Alta
109	73	20	-	-	10	16,57	37	45	E	D	30,3	9,0			Media
110	61	21	47	16	9,25	16,57	32	42,77	E	D	19,1	10,9	8,0	8,3	Media
111	66	52	38	17	17,25	16,57	18	30	E	D	35,0	47,9	17,2	15,6	Alta
112	61	48	18	7	13,75	16,57	19	37	E	B	21,9	41,9	9,9	6,1	Alta
113	62	37	27	14	12,75	27,2	21	38	E	B	22,9	47,9	-1,3	18,1	Alta
114	40	31	-	-	15,5	27,2	21	38	C	B	0,1	40,2			Media
115	45	17	45	32	12,25	27,2	32	40	E	B	11,4	14,5	4,7	27,2	Media
116	47	14	-	-	7	27,2	25	33	E	B	15,7	15,2			Media
117	53	35	69	64	24,75	27,2	65	40	E	B	19,1	14,6	28,7	26,8	Alta
118	52	23	33	12	8,75	27,2	21	38	E	B	13,6	29,8	1,3	15,5	Alta
119	68	30	27	13	10,75	27,2	60	42	C	B	22,1	13,6	-13,0	5,9	Media
120	65	22	30	10	8	27,2	50	43	E	B	21,2	12,0	-4,4	5,4	Media
121	35	12	-	-	6	16,57	10	32	E	B	4,6	19,9			Media
122	56	14	28	14	7	16,57	20	40	E	B	18,0	11,6	-10,0	11,6	Media
123	43	19	22	9	7	16,57	19	37	E	B	5,4	16,6	-8,0	7,8	Media
124	42	15	27	6	5,25	16,57	19	37	E	B	4,1	13,1	-1,2	5,2	Baja
125	56	25	37	12	9,25	16,57	30	42,7	E	B	12,7	13,8	2,2	6,6	Media
126	52	17	43	25	10,5	16,57	16	34	C	B	17,5	17,6	6,5	25,9	Media
127	23	31	19	18	12,25	16,57	10	30	E	B	-7,1	51,4	-6,8	29,8	Media
128	19	38	36	24	15,5	16,23	10	25	E	B	-5,9	61,7	14,1	39,0	Alta
129	40	18	37	19	9,25	16,23	21	38	E	B	4,2	13,9	0,7	14,7	Baja
130	40	19	40	19	9,5	16,23	21	38	C	B	0,1	14,7	0,1	14,7	Baja
131	51	17	35	24	10,25	16,23	5	43	E	B	12,4	55,2	-7,4	77,9	Alta
132	48	12	-	-	6	16,23	21	38	E	B	11,9	9,3			Media
133	53	20	28	15	8,75	16,23	5	34	E	B	19,6	64,9	-2,9	48,7	Alta

134	48	17	21	11	7	16,23	21	38	C	B	7,1	13,1	-17,3	8,5	Baja
135	47	17	45	4	5,25	16,23	8	45	E	B	-0,1	34,5	20,5	8,1	Media
136	36	12	20	3	0	16,23	21	38	E	B	-9,6	9,3	-25,6	2,3	Baja
137	51	15	24	10	6,25	16,23	21	38	E	B	13,3	11,6	-9,7	7,7	Media
138	11	9	33	5	3,5	16,23	21	38	C	B	-30,2	7,0	0,7	3,9	Baja
139	45	13	-	-	6,5	16,23	21	38	E	B	8,9	10,0			Baja
140	44	16	9	4	5	16,23	21	38	C	B	2,0	12,4	-22,4	3,1	Baja
141	60	48	-	-	24	16,23	21	38	E	B	23,9	37,1			Alta
142	64	64	19	11	18,75	16,23	60	48	E	B	13,4	17,3	2,3	3,0	Media
143	66	40	35	17	14,25	16,23	50	49	E	B	15,9	13,0	-3,3	5,5	Media
144	56	51	55	33	21	16,23	35	48	E	B	8,3	23,6	12,7	15,3	Media
145	43	61	51	42	25,75	16,23	31	36	E	B	7,4	31,9	18,8	22,0	Alta
146	56	34	53	30	16	16,23	25	41	C	B	12,6	22,1	10,4	19,5	Media
147	39	45	19	19	16	16,23	12	44	E	B	-6,0	60,9	-15,3	25,7	Media
148	51	61	-	-	30,5	16,23	50	48	E	B	5,4	19,8			Media
149	35	43	-	-	21,5	16,23	15	39	E	B	-2,1	46,5			Media
150	34	38	-	-	19	16,23	31	36	E	B	-0,2	19,9			Baja
151	35	18	-	-	9	16,23	8	43	E	B	-5,9	36,5			Media
152	20	16	-	-	8	16,23	21	38	E	B	-16,1	12,4			Baja
153	43	13	-	-	6,5	16,23	21	38	E	B	6,9	10,0			Baja
154	58	30	-	-	15	16,23	35	41	E	B	19,1	13,9			Media
155	38	16	-	-	8	16,23	7	47	E	B	-6,7	37,1			Media
156	24	11	-	-	5,5	16,23	21	38	E	B	-12,1	8,5			Baja
157	34	19	-	-	9,5	16,23	21	38	E	B	-2,1	14,7			Baja
158	52	20	-	-	10	16,23	17	43	E	B	11,2	19,1			Media
159	52	24	-	-	12	27,2	35	35	C	B	15,3	18,7			Media
160	52	40	-	-	20	27,2	60	40	E	B	14,0	18,1			Media
161	-	-	25	8	4	16,23	21	43	E	B			-15,9	6,2	Baja
162	23	14	25	9	5,75	16,23	3	35	E	B	-11,8	75,7	-5,8	48,7	Media
163	24	21	31	15	9	16,23	6	30	E	B	-5,6	56,8	4,0	40,6	Alta
164	31	11	12	6	4,25	16,23	5	30	E	B	0,8	35,7	-13,4	19,5	Media
165	38	20	24	6	6,5	16,23	7	40	E	B	-3,5	46,4	-2,3	13,9	Media
166	26	13	26	4	4,25	16,23	3	31	E	B	-6,1	70,3	5,3	21,6	Media
167	20	14	26	7	5,25	16,23	3	31	E	B	-11,4	75,7	0,4	37,9	Media

168	43	11	-	-	5,5	16,23	6	41	E	B	4,1	29,8					Media
169	43	18	-	-	9	16,23	7	38	C	B	3,1	41,7					Media
170	45	26	-	-	13	16,23	21	38	E	B	8,9	20,1					Media
171	52	12	-	-	6	16,57	19	37	E	B	16,9	10,5					Media
172	70	14	21	10	6	16,57	5	27	E	B	43,4	46,4	-3,3	33,1			Alta
173	52	40	28	15	13,75	16,57	5	28	C	B	21,3	132,6	2,1	49,7			Alta
174	58	48	33	14	15,5	16,57	13	30	E	B	26,8	61,2	13,6	17,8			Alta
175	52	25	29	10	8,75	16,57	23	42,7	E	B	8,2	18,0					Media
176	55	42	-	-	21	16,57	44,78	47	E	B	10,4	15,5					Media
177	38	13	-	-	6,5	16,57	10	38	E	B	1,9	21,5					Media
178	30	13	-	-	6,5	16,57	19	37	E	B	-5,2	11,3					Baja
179	39	21	-	-	10,5	16,57	19	37	E	B	3,9	18,3					Media
180	57	22	29	17	9,75	16,57	10	35	E	B	22,8	36,5	-3,0	28,2			Alta
181	55	22	36	21	10,75	16,57	15	37	E	B	19,6	24,3	1,1	23,2			Alta
182	55	13	16	9	5,5	16,57	15	42,7	E	B	12,8	14,4	-22,2	9,9			Media
183	37	15	29	8	5,75	16,57	10	27	C	B	7,7	24,9	2,4	13,3			Media
184	49	32	23	11	10,75	16,57	20	38	C	B	7,2	26,5	-11,5	9,1			Media
185	49	26	32	38	16	16,57	19	37	E	B	16,0	22,7	-4,6	33,1			Alta
186	48	44	-	-	22	16,57	19	37	E	B	12,9	38,4					Alta
187	57	33	34	21	13,5	27,2	75	40	E	B	17,2	12,0	-1,1	7,6			Media
188	44	18	26	11	7,25	16,57	12	42,77	E	B	1,3	24,9	-11,2	15,2			Media
189	59	19	-	-	9,5	16,57	28	42,7	E	B	18,4	11,2					Media
190	37	19	25	15	8,5	16,57	19	37	C	B	-2,4	16,6	-13,1	13,1			Baja
191	26	20	-	-	10	16,57	19	37	C	B	-12,9	17,4					Baja
192	42	18	26	7	6,25	16,57	5	36	E	B	5,1	59,7	-1,1	23,2			Alta
193	33	7	-	-	3,5	16,57	19	37	E	B	-2,2	6,1					Baja
194	32	12	25	15	6,75	16,57	19	37	E	B	-2,0	10,5	-11,1	13,1			Baja
195	15	16	26	25	10,25	16,57	19	37	E	B	-17,5	14,0	-10,8	21,8			Baja
196	27	20	-	-	10	16,57	19	37	C	B	-11,9	17,4					Baja
197	58	16	38	10	6,5	16,57	19	37	E	B	21,1	14,0	5,6	8,7			Media
198	31	25	33	17	10,5	16,57	19	37	E	B	-5,6	21,8					Baja
199	-	-	29	26	13	16,57	19	37	E	B			-6,2	22,7			Baja
200	42	5	10	3	2	16,57	19	37	C	B	2,0	4,4	-27,0	2,6			Baja
201	53	17	22	10	6,75	27,2	21	38	C	B	11,9	22,0	-15,9	13,0			Media

202	57	41	46	16	14,25	27,2	25	40	E	B	16,0	44,6	15,8	17,4	Alta
203	65	26	-	-	13	27,2	21	38	E	B	28,9	33,7			Alta
204	55	10	19	8	4,5	27,2	21	38	E	B	18,0	13,0	-15,9	10,4	Media
205	39	10	25	8	4,5	27,2	21	38	C	B	-1,5	13,0	-14,2	10,4	Baja
206	59	43	-	-	21,5	27,2	21	38	C	B	19,1	55,7			Alta
207	35	33	-	-	16,5	27,2	21	38	E	B	-1,1	42,7			Media
208	-	-	30	12	6	27,2	21	38	E	B			-6,1	15,5	Baja
209	-	-	36	15	7,5	27,2	21	38	E	B			-0,1	19,4	Baja
210	-	-	38	11	5,5	27,2	21	38	E	B			1,9	14,2	Media
211	-	-	33	4	2	27,2	21	38	E	B			-3,1	5,2	Baja
212	-	-	-	-	0	27,2	21	38	E	B					

Mediciones de las secciones delgadas

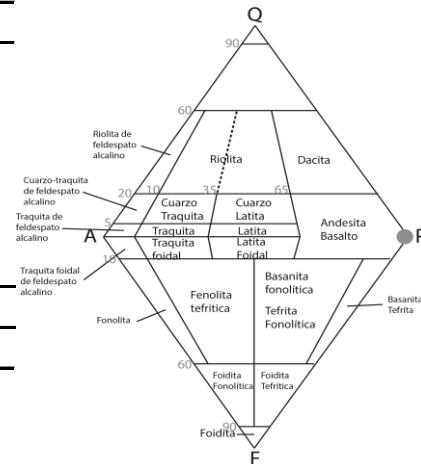
Codigo de sección	PTR-001-M1
Nombre de la roca	Basalto
Kilómetro (RN-32)	41+195

Textura	
Hipocristalina-Porfirítica-Seriada	

Composición Mineralógica

Fenocristales											
Mineral	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	Promedio
Plagioclasa	5	2	20	20	45	20	10	7	10	5	14,4
Piroxeno	2	2	10	5	5	10	5	10	3	5	5,7
Biotita	0	2	2	1	1	1	1	2	1	2	1,3
Opacos	2	1	2	1	1	1	3	1	3	3	1,8
Matriz	91	93	66	73	48	68	81	80	83	85	76,8

Matriz											
Mineral	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	Promedio
Plagioclasa	50	30	40	30	20	10	15	15	25	10	24,5
Vidrio	50	70	60	70	80	90	85	85	75	90	75,5



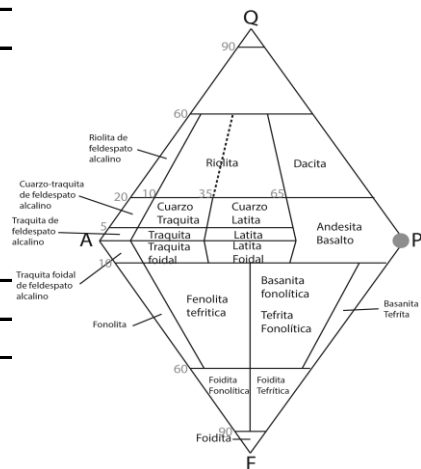
Codigo de sección	PTR-002-M1
Nombre de la roca	Basalto
Kilómetro (RN-32)	41+100

Textura	
Hipocristalina-Porfirítica-Glomeroporfirítica	

Composición Mineralógica

Fenocristales											
Mineral	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	Promedio
Plagioclasa	30	25	20	10	40	20	40	30	25	10	25
Piroxeno	5	10	15	10	5	20	5	5	10	15	10
Biotita	0	1	0	0	1	0	0	1	0	0	0,3
Opacos	2	1	5	3	1	5	1	1	3	1	2,3
Matriz	63	63	60	77	53	55	54	63	62	74	62,4

Matriz											
Mineral	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	Promedio
Plagioclasa	40	50	50	70	40	50	60	55	34	80	52,9
Vidrio	59	44	45	25	55	43	37	43	60	13	42,4
Opacos	1	6	5	5	5	7	3	3	6	7	4,8

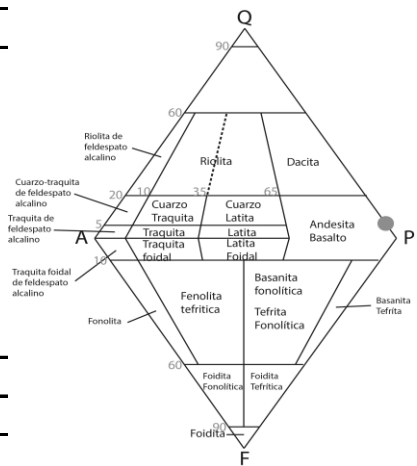


Codigo de sección	PTR-009-M1
Nombre de la roca	Basalto
Kilómetro(RN-32)	39+100

Textura	
Hipocristalina-Porfirítica-Vitrofirica-Seriada	

Composición Mineralógica	
---------------------------------	--

Fenocristales											
Mineral	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	Promedio
Plagioclasa	25	40	50	55	25	65	10	5	45	14	33,4
Piroxeno	6	1	1	15	5	2	20	1	3	3	5,7
Biotita	3	13	2	3	5	1	7	7	6	4	5,1
Opacos	4	1	1	2	2	1	1	2	2	2	1,8
Matriz	62	45	46	25	63	31	62	75	44	72	52,5
Vesicula	25	25	25	25	25	25	25	25	25	25	25
Cuarzo	0	0	0	0	0	0	0	10	0	5	1,5



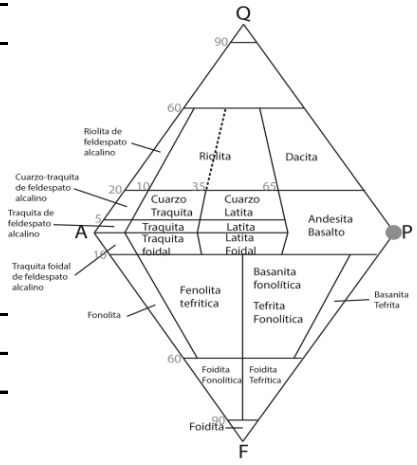
Matriz											
Mineral	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	Promedio
Plagioclasa	5	40	1	2	4	15	3	5	4	3	8,2
Piroxenos	1	0	2	5	5	3	0	0	0	4	2
Opacos	3	1	3	2	1	2	3	1	3	1	2
Biotita	0	1	0	1	1	3	0	2	1	0	0,9
Vidrio	91	58	94	90	89	77	94	92	92	92	86,9

Codigo de sección	PTR-020-M1
Nombre de la roca	Basalto
Kilómetro(RN-32)	

Textura	
Hipocristalina-Porfirítica-Glomeroporfirítica	

Composición Mineralógica	
---------------------------------	--

Fenocristales											
Mineral	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	Promedio
Plagioclasa	20	25	25	30	50	20	20	15	30	10	24,5
Piroxeno	0	4	1	2	5	3	1	0	1	1	1,8
Biotita	0	0	1	0	0	0	0	0	0	0	0,1
Opacos	2	1	3	3	1	3	2	3	2	5	2,5
Cuarzo	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0
Matriz	78	70	70	65	44	74	77	82	67	84	71,1



Matriz											
Mineral	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	Promedio
Plagioclasa	70	60	65	60	60	80	60	70	60	50	63,5
Opacos	5	3	3	3	5	5	5	5	5	2	4,1
Vidrio	25	37	32	37	35	15	35	25	35	48	32,4

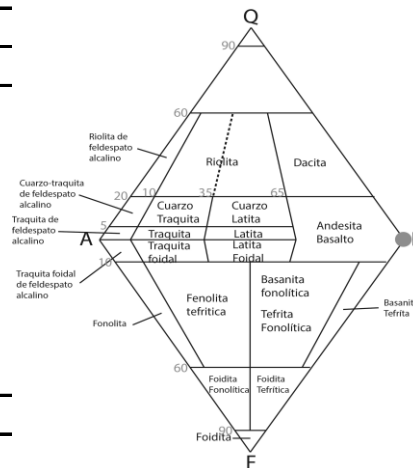
Codigo de sección	PTR-023-M1
Nombre de la roca	Basalto
Kilómetro(RN-32)	35+800

Textura

Hipocristalina-Porfirítica Esta sección presenta una gran cantidad(la gran mayoría) de fantasmas,

Composición Mineralógica

Fenocristales											
Mineral	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	Promedio
Plagioclasa	10	20	20	15	7	30	30	5	7	5	14,9
Piroxeno	1	0	10	5	5	3	2	5	3	2	3,6
Biotita	1	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0,1
Opacos	3	2	5	1	3	1	2	5	3	2	2,7
Vesicula	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0
Cuarzo	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0
Matriz	85	78	65	79	85	66	66	85	87	91	78,7



Matriz											
Mineral	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	Promedio
Plagioclasa	97	95	96	97	97	97	96	97	96	95	96,3
Piroxenos	1	3	1	1	1	1	2	1	3	2	1,6
Opacos	2	2	3	2	2	2	2	2	1	1	1,9
Vidrio	0	0	0	0	0	0	0	0	0	2	0,2

Codigo de sección	PTR-029-M1
Nombre de la roca	Toba Cristalina
Kilómetro(RN-32)	31+900

Textura

Textura piroclástica(sin shards), eutaxítica

Composición Mineralógica

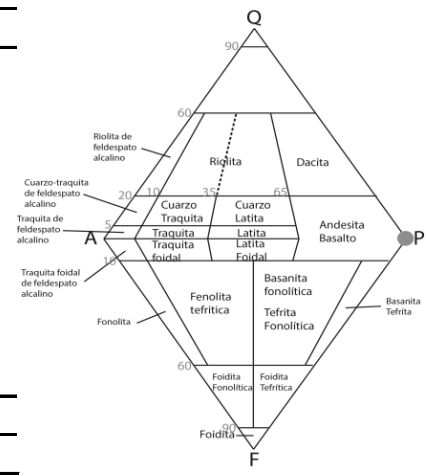
Componentes											
	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	Promedio
Cristaloclasto	4	3	3	2	3	4	5	6	2	1	3,3
Litoclasto	0	0	10	2	5	3	3	5	3	0	3,1
Vitroclasto	0	0	0	0	0	0	0	1	0	0	0,1
Opacos	1	3	2	1	2	3	1	3	2	1	1,9
Vesicula	6	6	7	25	20	5	2	5	20	6	10,2
Fiamez	35	30	25	15	20	30	30	15	35	50	28,5
Matriz	54	58	53	55	50	55	59	65	38	42	52,9

Codigo de sección	PTR-033-M1
Nombre de la roca	Basalto
Kilómetro(RN-32)	28+870

Textura
Hipocristalina-Porfirítica-Seriada

Composición Mineralógica

Fenocristales											
Mineral	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	Promedio
Plagioclasa	25	15	20	30	13	15	20	15	20	25	19,8
Piroxeno	15	6	10	5	3	5	10	7	5	7	7,3
Biotita	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0
Olivino	0	0	0	0	5	0	0	0	0	0	0,5
Opacos	2	5	2	1	2	2	2	1	2	2	2,1
Vesícula	5	7	5	7	2	1	1	1	0	0	2,9
Cuarzo	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0
Matriz	53	67	63	57	75	77	67	76	73	66	67,4



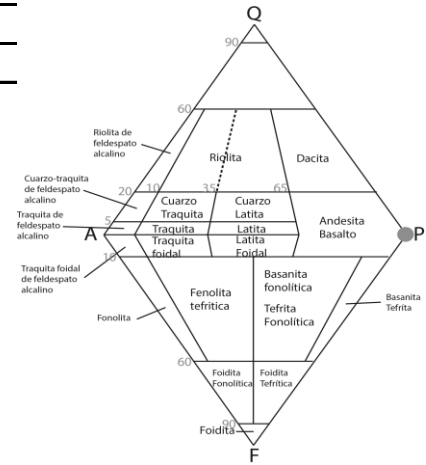
Matriz											
Mineral	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	Promedio
Plagioclasa	95	94	95	94	93	94	92	97	94	91	93,9
Piroxenos	1	1	2	3	3	3	6	2	3	5	2,9
Opacos	2	3	3	2	4	3	2	1	3	4	2,7
Vidrio	2	2	0	1	0	0	0	0	0	0	0,5

Codigo de sección	PTR-033-M2
Nombre de la roca	Basalto
Kilómetro(RN-32)	28+870

Textura
Holocristalina-Porfirítica-Seriada

Composición Mineralógica

Fenocristales											
Mineral	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	Promedio
Plagioclasa	58	74	59	61	54	52	50	70	54	61	59,3
Piroxeno	10	0	0	20	0	30	2	20	0	25	10,7
Biotita	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0
Olivino	0	20	20	3	15	7	30	3	40	3	14,1
Opacos	2	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1,1
Vesícula	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0
Cuarzo	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0
Fantasmas	30	5	20	15	30	10	17	6	5	10	14,8
Matriz	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0

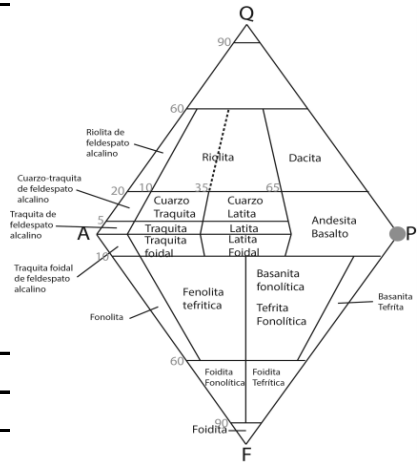


Codigo de sección	PTR-035-M2
Nombre de la roca	Basalto
Kilómetro(RN-32)	28+250

Textura
Holocristalina-Porfirítica-Seriada

Composición Mineralógica

Fenocristales											
Mineral	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	Promedio
Plagioclasa	25	20	15	20	13	15	17	25	13	30	19,3
Piroxeno	0	0	0	0	1	0	0	0	1	1	0,3
Biotita	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0
Olivino	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0
Opacos	1	2	2	1	2	1	2	1	3	1	1,6
Vesícula	0	0	0	0	1	0	0	3	0	0	0,4
Cuarzo	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0
Matriz	74	78	83	79	83	84	81	71	83	68	78,4



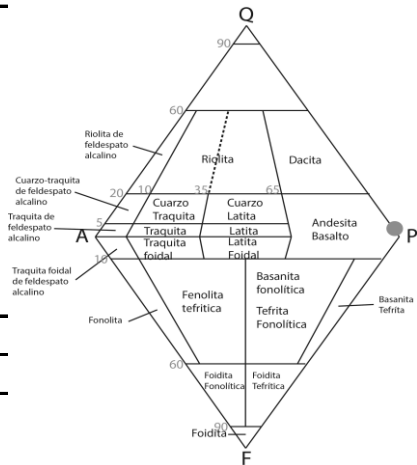
Matriz											
Mineral	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	Promedio
Plagioclasa	78	83	77	80	97	80	90	89	81	60	81,5
Piroxenos	15	13	16	15	10	14	8	8	15	7	12,1
Opacos	7	4	7	5	3	6	2	3	4	3	4,4
Vidrio	0	0	0	0	10	0	0	0	0	30	4

Codigo de sección	PTR-036-M1
Nombre de la roca	Basalto
Kilómetro (RN-32)	28+100

Textura
Hipocristalina-Porfirítica-Glomeroporfirítica-Vesicular

Composición Mineralógica

Fenocristales											
Mineral	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	Promedio
Plagioclasa	10	5	18	7	15	10	25	20	20	3	13,3
Piroxeno	1	2	1	3	12	5	2	5	0	1	3,2
Biotita	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0
Olivino	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0
Opacos	1	5	4	2	3	2	1	2	1	1	2,2
Vesícula	25	50	20	45	30	15	40	40	30	55	35
Cuarzo	1	2	0	0	0	0	0	0	0	1	0,4
Matriz	62	36	57	43	40	68	32	33	49	39	45,9



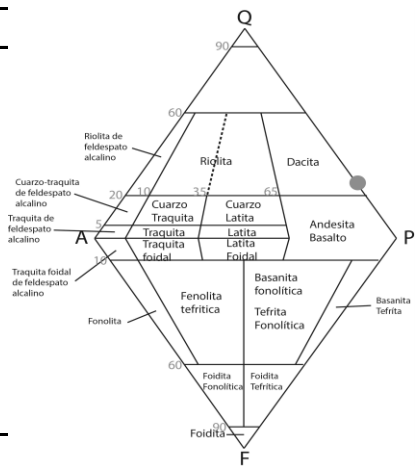
Matriz											
Mineral	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	Promedio
Plagioclasa	95	97	95	98	97	95	96	98	98	95	96,4
Piroxenos	1	0	2	0	1	2	0	0	0	0	0,6
Opacos	2	3	1	2	2	3	2	2	2	3	2,2
Vidrio	2	0	2	0	0	0	2	0	0	2	0,8

Codigo de sección	PTR-037-M1
Nombre de la roca	Dacita
Kilómetro(RN-32)	27+650

Textura
Hipocristalina-Porfirítica-Glomeroporfirítica-Vitrofirica

Composición Mineralógica

Fenocristales											
Mineral	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	Promedio
Plagioclasa	7	7	12	6	5	4	3	10	5	15	7,4
Piroxeno	3	1	3	4	3	1	4	3	2	1	2,5
Biotita	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0
Olivino	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0
Opacos	5	1	2	2	3	3	2	3	1	1	2,3
Vesicula	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0
Cuarzo	4	3	1	3	3	2	3	8	5	0	3,2
Fantasmas	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0
Matriz	81	88	82	85	86	90	88	76	87	83	84,6



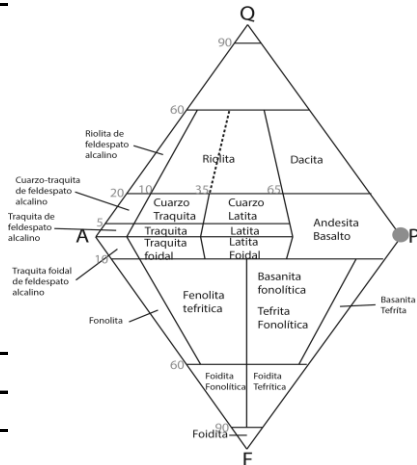
Matriz											
Mineral	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	Promedio
Plagioclasa	40	25	30	30	20	30	20	20	40	35	29
Opacos	1	4	6	6	6	5	3	3	2	6	4,2
Vidrio	59	71	64	64	74	65	77	77	58	59	66,8

Codigo de sección	PTR-040-M1
Nombre de la roca	Basalto
Kilómetro(RN-32)	26+440

Textura
Hipocristalina-Vitrofirica-Glomeroporfirítica-Vesicular

Composición Mineralógica

Fenocristales											
Mineral	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	Promedio
Plagioclasa	10	15	15	7	8	10	10	10	5	8	9,8
Piroxeno	2	3	1	3	2	5	6	3	4	1	3
Biotita	0	0	0	0	0	0	0	0	0	1	0,1
Olivino	0	0	0	0	0	0	0	0	3	0	0,3
Opacos	1	3	2	1	1	2	2	2	3	3	2
Vesicula	20	15	5	5	7	20	7	10	25	20	13,4
Cuarzo	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0
Matriz	67	64	77	84	82	63	75	75	60	67	71,4



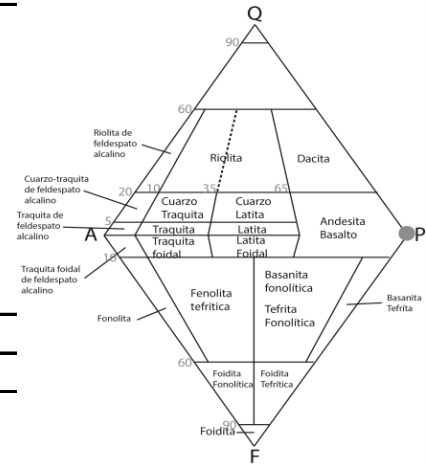
Matriz											
Mineral	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	Promedio
Plagioclasa	40	30	40	50	45	60	40	50	30	70	45,5
Vidrio	60	70	60	50	55	40	60	50	70	30	54,5

Código de sección	PTR-041-M1
Nombre de la roca	Basalto
Kilómetro(RN-32)	25+900

Textura
Hipocristalina-Porfirítica

Composición Mineralógica

Fenocristales											
Mineral	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	Promedio
Plagioclasa	25	20	40	20	25	35	40	25	20	50	30
Piroxeno	12	3	5	25	5	5	3	10	4	3	7,5
Biotita	1	1	0	0	0	1	0	0	0	0	0,3
Olivino	4	20	7	4	3	5	8	8	5	5	6,9
Opacos	1	2	1	1	3	3	2	2	3	3	2,1
Cuarzo	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0
Matriz	57	54	47	50	64	51	47	55	68	39	53,2



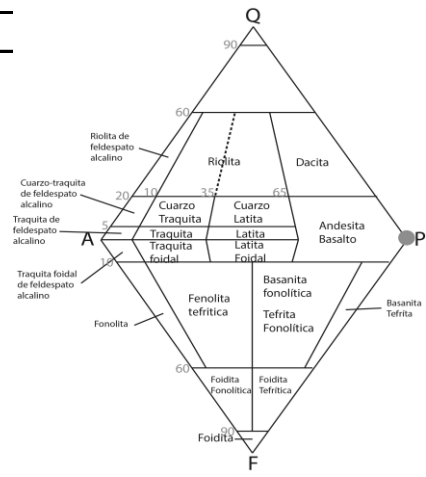
Matriz											
Mineral	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	Promedio
Plagioclasa	90	95	91	92	89	90	89	93	92	95	91,6
Piroxenos	5	0	4	3	4	6	4	3	4	2	3,5
Opacos	3	5	5	4	6	4	5	3	3	3	4,1
Biotita	0	0	0	0	0	0	1	0	0	0	0,1
Vidrio	2	0	0	1	1	0	1	1	1	0	0,7

Código de sección	PTR-045-M1
Nombre de la roca	Basalto
Kilómetro(RN-32)	23+950

Textura
Holocristalina-Porfirítica-Seriada

Composición Mineralógica

Fenocristales									
Mineral	1	2	3	4	5	6	7	8	Promedio
Plagioclasa	82	83	80	84	74	73	81	82	79,875
Piroxeno	10	12	15	10	15	20	12	10	13
Biotita	0	0	0	0	0	0	0	0	0
Olivino	6	3	3	4	8	3	5	5	4,625
Opacos	2	2	2	2	3	4	2	3	2,5



Codigo de sección	PTR-047-M1
Nombre de la roca	Basalto
Kilómetro (RN-32)	22+950

Textura

Holocristalina-Porfirítica-Seriada

Composición Mineralógica

Fenocristales

Mineral	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	Promedio
Plagioclasa	63	65	54	79	78	77	78	40	80	63	67,7
Piroxeno	12	5	12	3	4	5	5	10	4	4	6,4
Biotita	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0
Olivino	25	20	4	7	12	6	7	20	5	28	13,4
Opacos	0	0	0	1	1	0	0	0	1	0	0,3
Vesicula	0	10	30	10	5	12	10	30	10	5	12,2

