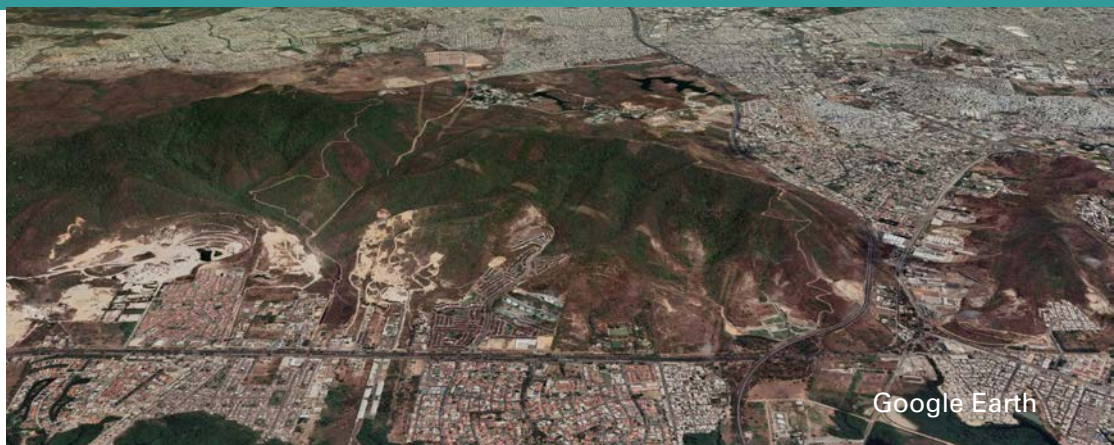




Cartógrafo.CL/03-2022



(*) Ingeniero Geólogo

Ecuador



abixavierespinoza@gmail.com

Análisis de susceptibilidad por movimientos en masas de los taludes del Km 28 Vía Perimetral a Km 11 Vía a la Costa, Guayaquil (Ecuador)

Abi Xavier Espinoza Ramírez (*)

RESUMEN

El presente estudio tuvo como objetivo el análisis de susceptibilidad por movimientos de masas de los taludes entre el Km 28 Vía Perimetral a Km 11 Vía a la Costa, ciudad de Guayaquil, provincia del Guayas. Mediante la recopilación de trabajos realizados en la zona y la interpretación de imágenes satelitales, se realizó la selección de lugares para el trabajo de campo, con los que se definen las características geológicas, estructurales y geomecánicas del área de estudio. Luego con la información obtenida, se calcula en gabinete la valoración Rock Mass Rating (RMR) de Bieniawski (1989) de los taludes, y se determina su tipo de rotura mediante análisis cinemático en el software DIPS; además se confecciona una serie de mapas temáticos en el SIG ArcGIS referente a pendientes, tipos de cobertura, geología, valoración geomecánica y precipitación; cuyos rangos y ponderaciones están acorde a la modificación realizada del método Mora-Vahrson (1993). Al finalizar se obtiene como resultado un mapa de susceptibilidad de movimientos en masa que permitió clasificar la zona de estudio en cinco clases: Muy alta, Alta, Media, Baja y Muy Baja. Se manifestó la predominancia de la susceptibilidad Alta en más de un 33 % del área estudiada, seguida de un 30.4 % y 16 % correspondientes a rangos de susceptibilidad Muy Baja y Media.

INTRODUCCIÓN

Los movimientos en masas son fenómenos modeladores del relieve, en los cuales un volumen de material conformado por suelo, rocas, escombros o combinaciones de estas se desplazan por acciones gravitatorias a lo largo de una ladera o talud (CORCUENCAS, 2019), lo que se considera como un peligro, ya que potencialmente pueden afectar infraestructuras, vías y poblaciones, que según su grado de vulnerabilidad pueden ser impactadas de manera negativa en el desarrollo normal de sus actividades económicas y sociales.

Por lo tanto, es de gran importancia el conocimiento de los factores que provocan dichos fenómenos, así como su distribución espacial y temporal, la efectividad de las distintas metodologías de estudio y sus ensayos en campo para lograr la correcta evaluación y determinación del grado de susceptibilidad, amenaza, vulnerabilidad y riesgos de una localidad.

Este trabajo tuvo por objeto el análisis de susceptibilidad a movimientos en masa a través de las características que presenta el área de estudio comprendida desde el Km 28 de Vía Perimetral al Km 11 de Vía a la Costa, sector oeste de la cordillera Chongón Colonche, y que durante los últimos años ha presentado una alta tendencia hacia la urbanización, con lo que se busca conocer las condiciones predominantes que generan tal fenómeno y clasificar el terreno acorde a niveles de nula a alta susceptibilidad.

PLANTEAMIENTO DEL PROBLEMA

Acorde con los censos del Instituto Nacional de Estadística y Censo, INEC, del 2010 y sus proyecciones hasta el 2020, existe un crecimiento demográfico importante en Guayaquil (15.8 %), donde la parroquia Tarqui se constituye como la más densamente poblada, y que por su falta de planificación urbana se vuelve vulnerable ante los impactos de deslizamientos (I Care Environment, 2018).

Estudios de CLIRSEN & SIGAGRO (2011) establecen áreas de amenaza por movimientos en masa en todo el territorio; sin embargo, debido a su falta de actualización periódica, los proyectos urbanísticos del oeste de Guayaquil podrían desarrollarse sin considerar factores de estabilidad o susceptibilidad ante estos fenómenos, lo cual demanda la pronta realización de estudio en dicha zona.

La zona de estudio ha sido elegida de acuerdo con la tendencia de urbanización presente en el oeste de la ciudad durante la última década (vía Perimetral y vía a la Costa), en la cual se selecciona parte de la Cordillera Chongón Colonche (al costado de la ciudadela Los Ceibos), con el fin de definir su estabilidad como macizo rocoso y la susceptibilidad que presentan sus cerros frente a la presencia de movimientos en masa que puedan desarrollarse en términos de corto a largo plazo. Información que será de utilidad para proyectos por realizarse en el lugar considerando la consecuente expansión poblacional de la urbe.

Objetivos

- **Objetivo general**

Realizar un análisis de susceptibilidad a los movimientos en masa de los taludes ubicados en el sector oeste de Guayaquil, entre el Km 28 de la Vía Perimetral hasta el Km 11 de Vía a la Costa.

Objetivos específicos

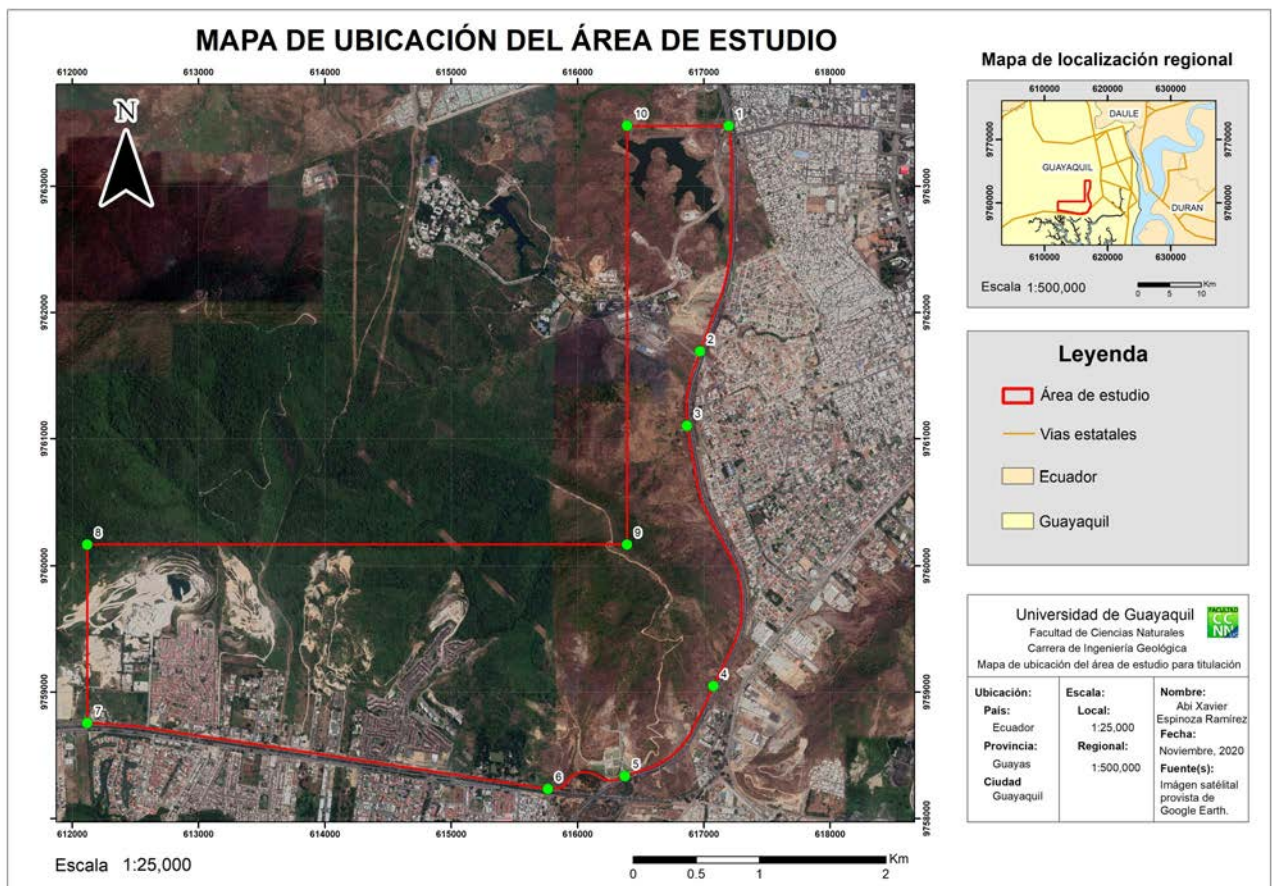
- Identificar lugares susceptibles mediante la revisión de estudios geológicos y estructurales realizados previamente en el sector.
- Caracterizar los afloramientos mediante la aplicación del método geomecánico RMR de Bieniawski (1989).
- Diseñar mapas temáticos referentes a parámetros de relieve, tipo de cobertura, geología, valoración geomecánica y precipitación del área de estudio.
- Determinar la susceptibilidad de movimientos de masas en el área de estudio según el método Mora-Vahrson (modificado).

Ubicación

El área de estudio se ubica en el Cantón Guayaquil, Guayas, correspondiente a los taludes del Km 28 Vía Perimetral, que comprende desde el intercambiador de La Prosperina hasta el Km 11 de Vía a la Costa, o también conocida como la Vía Guayaquil-Progreso, abarcando unos 10.7 km² aproximadamente (Figura 1).

Comprende taludes a pie de la Vía Perimetral, áreas mineras con actividades extractivas a cielo abierto, la Universidad ESPOL (Escuela Superior Politécnica del Litoral), el colegio Cruz del Sur, la ciudadela Bosques de los Ceibos, el Panteón Metropolitano y ciudadelas de Vía a la Costa tales como la Urbanización Casa Club, Torres del Salado, Portal al Sol y Bosques de la Costa.

Figura 1. Mapa de ubicación del área de estudio (Elaboración propia).



Entorno geográfico

El cantón de Guayaquil, al igual que la provincia del Guayas a la que pertenece, se asienta sobre el denominado relieve costanero, que comprende planicies y topografías altas a moderadas situadas sobre el complejo volcánico cretácico denominado como Fm. Piñón (basaltos, diabasas y andesitas).

Su hidrografía corresponde a un ambiente estuarino conformado por dos afluentes: estero Salado y el río Guayas. Este último es el afluente principal cuyo cauce depende de las mareas y la unión de los ríos Babahoyo y Daule, con los que engloba una cuenca de 34.500 km² de extensión y que descarga anualmente unos 30.000.000 m³, lo que la convierte en el sistema fluvial más importante de la vertiente occidental de la cordillera de los Andes (GeoEstudios & Consulsua, 2012).

En cuanto a su clima, corresponde a una zona intertropical, la que presenta dos tipos de estaciones climáticas: verano e invierno. Estas se manifiestan primordialmente a través de precipitaciones y variaciones de temperatura, que están influenciadas por corrientes climáticas y marinas como el Fenómeno del Niño, la corriente Humboldt y el Fenómeno de La Niña.

El tipo de vegetación en la región varía en dependencia de la topografía y las actividades antrópicas, donde es más frecuente una cobertura vegetal densa correspondiente a bosques húmedos y secos en relieves altos y zonas protegidas, mientras que bosques secos son más predominantes en relieves bajos y laderas (Castro, 2020).

MARCO CONCEPTUAL

A continuación, se presentan breves conceptos temáticos en los que se basa la resolución del estudio de susceptibilidad.

Macizo rocoso

El macizo rocoso se define como el medio natural en que se presentan las rocas, caracterizado por su litología y discontinuidades, las cuales son planos de estratificación, fallas, juntas, pliegues y otros caracteres estructurales. En consecuencia, los macizos rocosos son discontinuos y pueden presentar propiedades heterogéneas y/o anisótropas (Ramírez & Alejano, 2008), es decir, características y orientaciones estructurales variables.

Discontinuidades

Las discontinuidades o fracturas son planos de debilidad de un macizo rocoso o de una masa de suelo que separa bloques de material casi intacto. Estos planos pueden originarse de manera mecánica o sedimentaria y se caracterizan por su baja o casi nula resistencia a la tracción, entre los que se cuenta a los planos de estratificación, las diaclasas o juntas, las grietas, las microfallas, los planos de esquistosidad y las superficies de falla; todas las que con su presencia implican un comportamiento no continuo del macizo (Proyecto Multinacional Andino, 2007).

Clasificación geomecánica

El sistema de clasificación geomecánica denominado como Rock Mass Rating (RMR), fue inicialmente desarrollado en el Consejo Sudafricano de Investigación Científica e Industrial (CSIR por sus siglas en inglés) por Bieniawski el año 1973, y

con el paso de los años ha evolucionado en cuanto a sus parámetros, ajustes y límites.

Su método de clasificación es de tipo cuantitativo, es decir, designa valores numéricos a características intrínsecas del macizo rocoso y sus estructuras con el fin de cuantificar dichos parámetros y establecer las condiciones de estabilidad de un macizo.

Susceptibilidad

El término susceptibilidad, según Ayala-Carcedo & Olcina (2002), es la tendencia o propensión de un lugar a ser afectado físicamente por un peligro, determinada a través de un análisis comparativo de factores condicionantes y/o desencadenantes, cualitativo o cuantitativo, con las áreas que han sido afectadas en el pasado y que generalmente se plasma de manera cartográfica en un mapa de susceptibilidad.

Movimientos en masas

También conocidos como fenómenos de remoción en masa, deslizamientos, derrumbes o falla de talud son procesos mediante los cuales un volumen de material conformado por suelo, rocas, escombros, o combinaciones de estos se desplazan a través de una ladera o talud por acciones gravitatorias, debido a la acción combinada de factores condicionantes y desencadenantes (CORCUENCAS, 2019).

Son parte de los procesos modeladores del relieve que se originan a partir de diversos procesos geológicos, hidrometeorológicos, químicos y mecánicos que se dan en la superficie terrestre y que constituyen un riesgo geológico a tenerse en cuenta en la planificación del territorio.

Entre los tipos de movimientos en masas más conocidos están la caída o desprendimiento, el volcamiento, el deslizamiento, la propagación, el flujo y la reptación. Todas las cuales podrían presentarse de manera compuesta, denominando un tipo de movimiento complejo (Varnes, 1978).

Factores condicionantes

Son aquellos que condicionan las diferentes tipologías de deslizamiento, mecanismos y modelos de rotura, dentro de lo que se encuentran las características intrínsecas relacionadas a las propiedades del material, su resistencia y a las características extrínsecas no relacionadas con él, tanto como la morfología de la ladera y sus condiciones ambientales (Santacana, 2001).

Factores desencadenantes

Se establece como factores externos a aquellos que actúan sobre el material y modifican sus condiciones iniciales, generando o desencadenando las roturas o movimientos debido a las variaciones que ejercen sobre el equilibrio del terreno, tales como la infiltración de agua en el terreno, las vibraciones y las actividades antrópicas (Figura 2).



Factores causantes de los movimientos en masas	Factores condicionantes	Pendiente y geomorfología Geología Estructuras Tipo de coberturas	Condiciones del terreno Alta pendiente del terreno Materiales débiles o sensibles Presencia de fallas geológicas Falta de cobertura vegetal	
	Factores detonantes	Precipitación Vibraciones Erosión	Procesos Naturales Lluvias intensas Lluvias prolongadas Ocurrencia de sismos Erosión o degradación del suelo Erosión por acción del agua	
		Actividades antrópicas	Procesos Artificiales Cortes y excavaciones en las laderas Sobrecarga y rellenos en las laderas Modificación del drenaje natural Falta de drenaje urbano Actividad minera	

Figura 2. Factores causantes los Movimientos en Masa, Adaptado de IDIGER (2018).

Mapa de susceptibilidad

Es la representación de las zonas o lugares de un territorio que se encuentran o podrían encontrarse bajo la acción de un proceso o fenómeno específico, es decir, es una cartografía de procesos activos (Carrasco *et al.*, 2003).

Según Fidel *et al.* (2012), se debe considerar que los límites de susceptibilidad impuestos por el modelo o mapa son referenciales y no pueden tomarse como valores absolutos, ya que posterior a la confección de este, es posible la identificación de lugares que requieran una serie de estudios más detallados, los cuales son denominados como «áreas críticas».

METODOLOGÍA

La metodología aplicada durante el estudio consistió en tres fases, las cuales brindan el soporte a la aplicación del método Mora-Vahrson (1993) para la determinación del grado de susceptibilidad ante los movimientos en masas.

Durante una fase preliminar se realizó la recopilación de estudios previos, la obtención de datos espaciales referentes a relieve, geología, tipo de cobertura y precipitación, así como el diseño del mapa base con información topográfica del terreno sobre el cual se establecen las rutas óptimas para el levantamiento en campo y con que se identifican probables áreas susceptibles ante tal fenómeno.

Luego, durante la fase de campo se realizó un levantamiento geológico mediante el método de mapeo de contactos y afloramientos, que es usualmente utilizado a escalas detalladas, es decir, mayores a 1:20.000 (Echeveste, 2018) con el objetivo de determinar las formaciones geológicas del área de estudio. De manera paralela se efectuó un levantamiento geomecánico con el fin de determinar los parámetros del macizo rocoso según la clasificación geomecánica RMR de Bieniawski (1989), el cual brinda ponderaciones numéricas elevadas a condiciones que representan mayor estabilidad dentro del talud estudiado.



Clase	Calidad	Valoración RMR	Cohesión	Ángulo de rozamiento
I	Muy buena	100-81	$> 4 \text{ kg/cm}^2$	$> 45^\circ$
II	Buena	80-61	$3 - 4 \text{ kg/cm}^2$	$35^\circ - 45^\circ$
III	Media	60-41	$2 - 3 \text{ kg/cm}^2$	$25^\circ - 35^\circ$
IV	Mala	40-21	$1 - 2 \text{ kg/cm}^2$	$15^\circ - 25^\circ$
V	Muy mala	< 20	$< 1 \text{ kg/cm}^2$	$< 15^\circ$

Tabla 1. Clasificación geomecánica RMR de Bieniawski (1989).

Posteriormente, se procedió a la clasificación geomecánica de taludes, en la cual se realizó el cálculo de RMR por discontinuidad y un ajuste estructural mediante el uso de proyecciones estereográficas en el software DIPS 7.0, con el que se identificó si una determinada discontinuidad da soporte o reduce la calidad geomecánica de un macizo, para luego continuar con el cálculo y ponderación de RMR por estación, por talud y formación geológica, obteniendo valoraciones numéricas entre 0 a 100, a la cual se categoriza en cinco tipos de calidad, de Muy Mala a Muy Buena (Tabla 1).

Adicionalmente, se realizó un análisis estructural por tipo de rotura mediante las proyecciones estereográficas de los datos estructurales de las estaciones geomecánicas, con el objetivo de identificar los tipos de rotura o movimiento más probable a desarrollarse en los taludes de la zona (Figura 3).

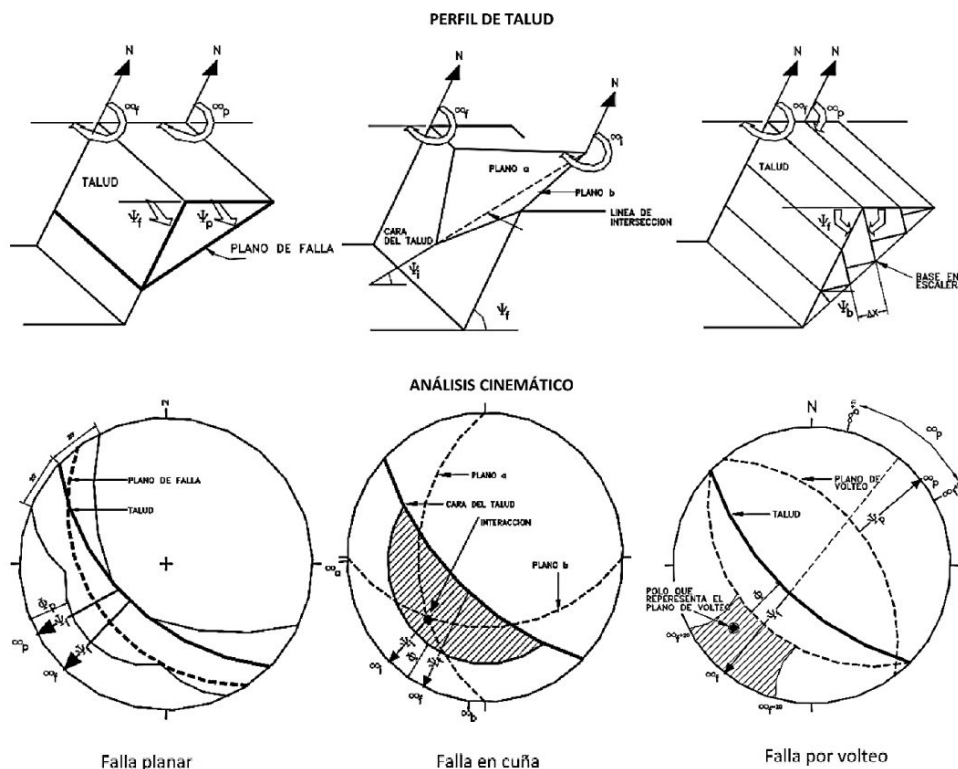


Figura 3. Tipos de rotura en taludes, Curipoma (2017).

Una vez obtenidos y procesados los datos de campo, se elaboró una serie de mapas temáticos mediante sistemas de información geográfica (SIG) en el software ArcGIS 10.5, obteniendo mapas de pendientes, de tipo de cobertura, de geología, de valoración geomecánica y de precipitación por lluvias, cuyos datos de tipo vectorial y ráster se utilizaron para el diseño del modelo de susceptibilidad a movimientos en masa, a través del análisis multicriterio aplicando una modificación de la fórmula de Mora-Vahrson (1993), a la cual se adicionó el factor geomecánico para dar mayor fundamento geológico al desarrollo de este tipo de fenómenos, y que clasifica al terreno en términos de Muy Baja a Muy Alta susceptibilidad (Tablas 2 a 6).

$$H = (S_m * S_c * S_l * S_g) * (T_p)$$

Donde sus variables son:

H = Grado de amenaza en la zona de estudio.

S_m = Factor morfométrico

S_c = Factor cobertura vegetal.

S_l = Factor litológico.

S_g = Factor geomecánico.

T_p = Factor de disparo por lluvias.

Rango (%)	Descripción	Valoración del parámetro S _m
0 – 12	Correspondiente a relieves completamente planos y ligeramente ondulados. Además de todas las áreas que no son suelo como: centros poblados, ríos dobles o similares a estas al representar o cartografiarlas.	1
12 – 25	Correspondiente a relieves medianamente ondulados a moderadamente disectados.	2
25 – 40	Corresponde principalmente a relieves mediana a fuertemente disectados.	3
40 – 70	Corresponde principalmente a relieves fuertemente disectados.	4
70 – 100	Corresponden principalmente a relieves muy fuertemente disectados.	5
100 – 150	Corresponden principalmente a relieves escarpados.	6
150 – 200	Corresponden principalmente a relieves muy escarpados.	7
> 200	Corresponden a zonas reconocidas como mayores a 200% en el mapa de pendientes.	8

Tabla 2. Categorización del factor morfométrico de pendiente, CLIRSEN & SIGAGRO, 2011.



Categoría	Descripción	Calificación	Valoración del parámetro S_c
Cuerpos de agua	Cuerpos de Agua: Áreas que presenten masas de agua, de origen artificial o natural	Cobertura exenta	0
Bosques Cultivos permanentes	Bosque: Ecosistema arbóreo, primario o secundario, regenerado por sucesión natural, con presencia de árboles de distintas especies nativas, edades y portes. Cultivos: Comprenden tierras dedicadas a cultivos con ciclo vegetativo mayor a tres años y ofrece varias cosechas	Alta cobertura	1
Infraestructuras	Establecimiento de un grupo de personas en un área determinada, incluyendo la infraestructura civil que lo complementa.	Mediana cobertura	2
Vegetación arbustiva. Vegetación herbácea. Cultivos semipermanentes. Cultivos anuales reforestación.	Vegetación arbustiva: Áreas con una componente substancial de especies leñosas sin estructura de bosque. Vegetación herbácea: Constituida por especies nativas con crecimiento espontáneo, sin cuidado espacial, con fines de pastoreo, vida silvestre o protección. Cultivos: Tierras dedicadas a cultivos agrícolas con ciclos estacionales de cosecha de uno o más veces al año o semipermanente con ciclos vegetativo de uno a tres años. Reforestación: Áreas con vegetación producto de reforestación de operaciones mineras.	Baja cobertura	3
Sin cobertura. Zonas erosionadas. Procesos de erosión.	Áreas con poca o ninguna cobertura vegetal. Incluye desiertos, gravas, afloramientos rocosos y áreas erosionadas por procesos naturales o antrópicos.	Sin cobertura	4

Tabla 3. Categorización del factor cobertura vegetal, adaptado de CLIRSEN & SIGAGRO (2011).



Litologías	Símbolo	Valoración del parámetro S_i
Aluviones: gruesos, permeable, compacto, con nivel freático bajo. Calizas: duras, permeables. Intrusivos: poco fisurados, bajo nivel freático. Basaltos, andesita, ignimbritas y similares: sanas, permeables y poco fisuradas. Rocas metamórficas: sanas, poco fisuradas, nivel freático bajo.	E_{Se}	1
Rocas sedimentarias: poco alteradas, estratificación maciza (decamétrica o métrica), poco fisuradas, nivel freático bajo. Rocas intrusivas, calizas duras, lava, ignimbritas o metamórficas: medianamente fisuradas o alteradas, nivel freático o profundidades intermedias.	K_{Cy}	2
Rocas sedimentarias, rocas intrusivas, calizas duras, lava ignimbritas, tobas poco soldadas o metamórficas: medianamente alteradas. Coluvios, lahares, arenas, suelos regolíticos levemente compactados: drenaje poco desarrollado, niveles freáticos relativamente altos.	KPc_{Gy}	3
Aluviones fluvio-lacustres, suelos piroclásticos poco compactados, sectores de alteración hidrotermal, rocas fuertemente alteradas y fracturadas con estratificaciones y foliaciones a favor de la pendiente, con rellenos arcillosos, niveles freáticos someros	-	4
Materiales aluviales, coluviales y regolíticos de muy baja calidad mecánica: con estado de alteración avanzado, drenaje pobre, incluidas categorías 3 y 4 con niveles freáticos muy someros, sometidos a gradientes hidrodinámicos muy elevados	Q_a	5

Tabla 4. Categorización del factor litológico, de Mora & Vahrson, 1993.

Valoración RMR Bieniawski (1989)	Calificación	Valoración del parámetro S_g
100 – 81	Muy buena	1
80 – 61	Buena	2
60 – 41	Media	3
40 – 21	Mala	4
< 20	Muy mala	5

Tabla 5. Categorización del factor geomecánico (Elaboración propia).

Precipitaciones medias mensual anual (mm)	Calificación	Valoración del parámetro T_p
< 20	Muy bajo	0
20 – 50	Bajo	1
50 – 70	Mediano	2
> 70	Alto	3

Tabla 6. Categorización del disparo por lluvias, de CLIRSEN & SIGAGRO, 2011.

RESULTADOS

Levantamiento geológico

Fm. Cayo (Kcy) [Coniciano – Campaniano]: Se ubica entre el Km 28.5 al Km 31 de la Vía Perimetral considera a los taludes 01, 02, 03, 04, 05 y 10 que se encuentran en el Conector Ceibos/ESPOL y la Vía Perimetral desde 800 m al sur de la estación de buses de la ESPOL hasta 700 m al norte de la estación de la urbanización Ceibos del Norte, los cuales tienen taludes de hasta 15 m de altura y presentan una alteración moderada a muy alta a través de las tonalidades grises y café oscuro producto de la meteorización sobre el talud, que también presenta capas de suelo de hasta 2 m con una amplia cobertura vegetal.

Las litologías comprenden areniscas de grano medio con tonalidades verde grisáceas en la que se observan feldespato, cuarzos y fragmentos líticos y que conforman capas de entre 30 cm a 3 m, areniscas de grano fino en capas de 60 a 90 cm de espesor y que localmente tienen meteorización esferoidal (Talud #04 y #05), lutitas silíceas masivas de colores grises y café en capas de hasta 20 cm y que presentan nódulos grisáceos, lutitas laminares dispuestas en espesores de hasta 10 cm en forma intercalada y arcillolitas de tonalidades café en capas de 30 a 50 cm de espesor, que en conjunto tienen una orientación de estratificación $195^{\circ}/13^{\circ}$.

Es posible el constatar una serie de zonas donde se efectúan roturas de tipo cuña, en el que el material desprendido del macizo se desliza con respecto a los planos de discontinuidad de las familias de diaclasas J1 y J2, y posteriormente se sitúan hacia el exterior del talud, depositándose en la cuneta de la Vía Perimetral (Figura 4).

Figura 4. Rotura en cuña y material desprendido de Talud #10 (EGM02) (Elaboración propia).



Fm. Guayaquil (KPcgy) [Maastrichtiano - Paleoceno Tardío]: Ocurren en los taludes 06, 07 y 09, ubicados en el sector central de la Vía Perimetral, entre el km 31.5 y 32.7, a 800 y 1800 m en dirección norte desde la estación de buses interprovinciales; taludes que tienen una altura superior a los 15 m y presentan una alteración moderada a muy alta visible a través de las tonalidades grises y marrones que toman las capas debido a la acción de la meteorización.

Sus litologías están conformadas por arcillolitas de tonalidad gris a café en capas de entre 10 a 15 cm de espesor, lutitas masivas de tonalidad café a verdosas en capas de hasta 20 cm, laminaciones de lutitas fisiles con tonalidades marrón de hasta 10 cm de espesor y areniscas de grano fino en capas de entre 50 cm hasta 2 m, que en conjunto tienen una orientación de estratificación principal de $190^{\circ}/14^{\circ}$.

La estabilidad de los taludes de esta formación es baja, lo cual se constata mediante la observación de las fuertes orientaciones e interacciones estructurales de sus discontinuidades, la presencia de bloques colgantes de considerable tamaño (más de 50 cm), además del desprendimiento de material proveniente del talud, conformado por detritos, rocas y suelo debido a la acción erosiva de la precipitación de la actual estación lluviosa (Figura 5).

Figura 5. Desprendimiento de material rocoso en Talud 07 (EGM03-05) (Elaboración propia).



Fm. San Eduardo (Ese) [Paleoceno Tardío – Eoceno Temprano]: Compreendida entre el Km 33 de Vía Perimetral hasta Vía a la Costa, presenta los taludes 08, 11, 12, 13, 14, 15, 16 y 17 ubicados en sectores de la Vía Perimetral, el Panteón Metropolitano y canteras de Vía a la Costa, los cuales presentan una alteración ligera a moderada visible en las tonalidades grisáceas a ocre que tienen debido a la acción de la meteorización, siendo una parte por acción biológica dada por el crecimiento de árboles sobre la capa vegetal ubicada en la cima de los taludes y a través del plano de estratificación de las capas, cuya orientación estructural es de $210^{\circ}/21^{\circ}$, las cuales están conformadas por variaciones de calizas blancas a azul grisáceas de entre 5 a 15 cm de espesor que presentan nódulos de sílice en su interior que de manera ocasional se disponen en capas de hasta 10 cm, con finas intercalaciones de lutitas calcáreas de hasta 5 cm (Figura 6).



Figura 6. Afloramiento del Talud #14 (EGM02) cuyas litologías son calizas y lutitas calcáreas (Elaboración propia).

Depósitos aluviales – coluviales (Qa-c) [Cuaternario]: Comprenden los depósitos de origen mayormente aluvial que se observan en los canales de Vía a la Costa, cuyo material consta de arenas, arcillas y con conglomerados depositados a modo de terrazas aluviales que presentan una resistencia muy baja y tienen una alta cobertura vegetal. Se pueden observar dos niveles en las terrazas aluviales, las cuales presentan similar composición, pero difieren en sus características físicas, presentando formas angulares en el primer nivel y formas sub redondeadas en el segundo nivel (Figura 7).



Figura 7. Terrazas aluviales constituidas por arenas y arcillas en canal de Urbanización Bosque Azul (Elaboración propia).

Posterior al levantamiento se realizó una tabla donde se describen las formaciones geológicas acorde a sus litologías (Tabla 7).

Formación geológica	Símbolo	Descripción litológica
Formación San Eduardo	E _{Se}	Calizas blancas a azul grisáceas, nódulos de sílice
Formación Guayaquil	KP _{C_{Gy}}	Arcillolitas grises a café, lutitas masivas verdosas, lutitas fisiles marrón, areniscas de grano fino
Formación Cayo	K _{Cy}	Areniscas verdosas de grano medio, areniscas café grano fino, lutitas silíceas masivas, lutitas laminares, arcillolitas café
Depósitos Cuaternarios	Q _a	Arenas, arcillas y conglomerados.

Tabla 7. Litologías por formación geológica del área de estudio (Elaboración propia).

Levantamiento geomecánico

Se realizaron un total de 35 estaciones geomecánicas distribuidas en los 17 afloramientos y taludes presentes en el sector, los cuales clasifican a los macizos rocosos en dependencia de su litología y estructuras particulares.

Por ejemplo, en el Talud 02 correspondiente a la Fm. Cayo, se observan litologías de areniscas de grano grueso con tonalidad gris verdosas, cuyo talud presenta 3 m de altura con longitud de 70 m, donde se distribuyen 4 estaciones geomecánicas (Figura 8).

Entre los parámetros levantados se tuvo la resistencia medida por golpes mediante el martillo de Schmidt, lo que arroja un resultado de Muy Dura (100-250 Mpa) con valoración de 15. Índice de RQD medido con cinta métrica de manera vertical, horizontal y diagonal en la superficie del talud en cuatro perfiles, lo que arroja un promedio de 94.5 %, con valoración de 20. El espaciado se mantiene, como separado en cuanto a las diaclasas (60-200 cm), mientras que el plano de estratificación tiene un espaciado moderadamente junto (20-60 cm), obteniendo valoraciones de 15 y 10.

En cuanto a su apertura, en su mayoría son inexistentes, pero de manera puntual se evidencian aperturas cerradas a muy cerradas entre las diaclasas J1 y J2, por lo cual, sus valoraciones van de 6 a 3. Su persistencia va entre media en las diaclasas a alta en la estratificación, obteniendo valoraciones de 2 a 1. La superficie de las discontinuidades es rugosa, con valoración 5. No presentan relleno, su valoración es de 6. No presenta agua o humedad entre sus estructuras, su valoración es 12 y su alteración es moderada por las tonalidades café, producto de la meteorización en las partes superiores del



Figura 8. Talud 2, Estación T02_EGM01. Se observan 3 familias de diaclasas (J1, J2 y J3) y el plano de estratificación (E1) (Elaboración propia).

talud, por ende, su valoración es 3. La suma de valoraciones para cada discontinuidad dará resultados entre 74 a 88 que, tras su respectivo ajuste estructural que determina que la J3 disminuye la calidad geomecánica del macizo, se obtendrá una valoración de 54.56 para este talud, lo que significa una calidad de tipo media.

Luego, los resultados obtenidos de cada talud se promedian para obtener una clasificación geomecánica para cada formación del área de estudio (Tabla 8).

Tabla 8. Valoración RMR resultante por talud y formación geológica.

Valoración RMR resultante por talud					
Formación Geológica	Talud	Valoración RMR	Descripción EGM	Valoración RMR por Fm.	Descripción Geomecánica por Fm.
Fm. Cayo	Talud 01	38.5	Mala	44.51	Media
	Talud 02	54.56	Media		
	Talud 03	41.93	Media		
	Talud 04	47.67	Media		
	Talud 05	48.53	Media		
	Talud 10	35.84	Mala		
Fm. Guayaquil	Talud 06	32.17	Mala	37.82	Mala
	Talud 07	41.07	Media		
	Talud 09	40.21	Mala		
Fm. San Eduardo	Talud 08	48	Media	46.60	Media
	Talud 11	61	Buena		
	Talud 12	44.12	Media		
	Talud 13	39	Mala		
	Talud 14	46	Media		
	Talud 15	38	Mala		
	Talud 16	53.67	Media		
	Talud 17	43	Media		



Análisis estructural por tipo de rotura

Mediante los datos estructurales de cada discontinuidad presente en los taludes del área de estudio, se realizan los gráficos de proyecciones estereográficas en el software DIPS 7.0, en el cual se representan dichos datos a través de polos, que se agrupan como familias de discontinuidades y permiten analizar la probabilidad a que se efectúe un tipo de rotura en caso de que toda o parte de una familia se encuentre en una zona crítica, la cual está remarcada en tonalidad rojiza y es diferente para cada clase de gráfico de rotura.

Por ejemplo, en el Talud 07, que pertenece a la Fm. Guayaquil, se observan tres familias de discontinuidades, las que en el primer gráfico correspondiente al tipo de rotura planar, se visualiza que parte de la discontinuidad J1 se encuentra dentro de la zona crítica, donde de un total de 70 polos, 17 se encuentran en la zona crítica, obteniendo una probabilidad de 24.29 % a que se efectúe una rotura de tipo planar (Figura 9a).

En el gráfico correspondiente al tipo de rotura en cuña, se observa que 835 interacciones de un total de 2397 se encuentran en la zona crítica, lo que propicia en un 34.84 % la posibilidad a este tipo de rotura, y que está fundamentado por la interacción que existe entre los planos de discontinuidades J1 y J2 dentro del talud (Figura 9b).

Posteriormente, en el gráfico de rotura por volcamiento, se observa que ningún polo de las discontinuidades recae en la zona crítica, por lo tanto, la probabilidad de que exista un volcamiento en el talud es de un 0 % (Figura 9c).

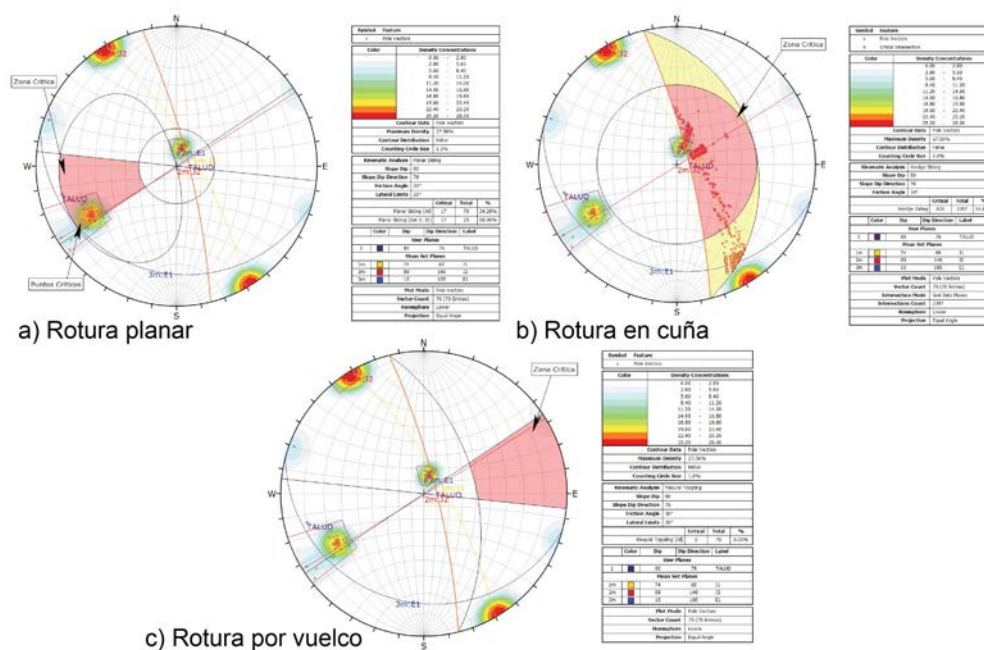


Figura 9. Gráficos de a) rotura planar, b) en cuña y c) por vuelco del Talud 07 (Elaboración propia).

Luego de calculados la probabilidad a los tres tipos de rotura, se genera una tabla que agrupa sus porcentajes por talud y por formación geológica, en la que se visualiza que el tipo de movimiento más probable a efectuarse será de rotura en cuña, con mayor probabilidad a darse en los afloramientos de la Fm. San Eduardo lo cual es debido a que su desarrollo es más probable en rocas de alta resistencia y asociadas a actividades mineras como las ejecutadas en las canteras en Vía a la Costa (Tabla 9).



RESULTADOS DE ANÁLISIS CINEMÁTICO DE TALUDES			
TALUD	PROBABILIDAD A LA ROTURA		
	ROTURA PLANAR (en %)	ROTURA EN CUÑA (en %)	ROTURA POR VUELCO (en %)
Fm. Cayo			
Talud 01	0	0	0
Talud 02	0	3.60	0
Talud 03	5.88	26.44	0
Talud 04	21.43	30.77	0
Talud 05	15.15	31.25	0
Talud 10	0	1.33	0
Fm. Guayaquil			
Talud 06	0	3.99	0
Talud 07	24.29	34.84	0
Talud 09	0	15.21	0
Fm. San Eduardo			
Talud 08	0	22.50	0
Talud 11	0	1.68	0
Talud 12	15.63	73.94	0
Talud 13	25	69.17	0
Talud 14	0	1.41	0
Talud 15	7.14	49.45	0
Talud 16	0	49.45	0
Talud 17	35.71	50.56	0
RESULTADOS POR FORMACIÓN GEOLÓGICA			
FORMACIÓN	ROTURA PLANAR (en %)	ROTURA EN CUÑA (en %)	ROTURA POR VUELCO (en %)
Fm. Cayo	7.07	15.55	0
Fm. Guayaquil	8.09	18.01	0
Fm. San Eduardo	10.43	39.77	0

Tabla 9. Resultados de análisis estructural por tipo de rotura en taludes y por formación geológica.

Modelo de susceptibilidad

Mapa de pendientes: Representa el relieve de la zona en términos de pendiente, donde más de 70% (40°) indica una mayor propensión al desarrollo de movimientos en masa, el cual se focaliza en la zona central del área de estudio (Figura 10).

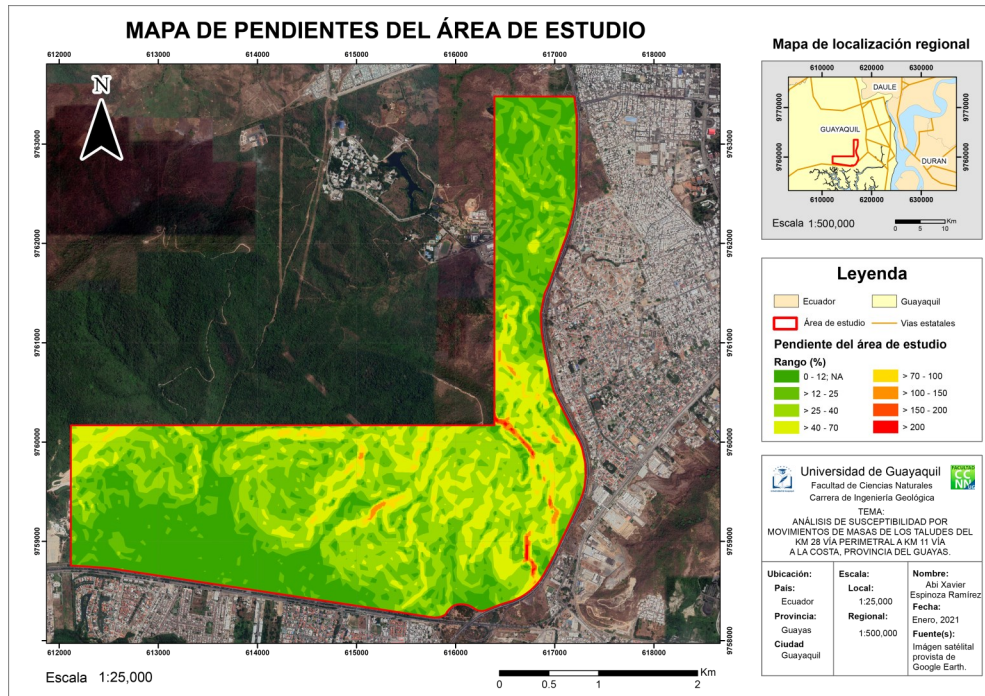


Figura 10. Mapa de pendientes del área de estudio (Elaboración propia).

Mapa de coberturas: Representa las coberturas o tipos de uso de suelo en el terreno y su relación al desarrollo de movimientos en masas, el cual es proporcional a la estabilidad que brinda cada clase de cobertura vegetal o sostenimiento civil de infraestructura antrópica, siendo más probable su focalización en sectores con terrenos designados a actividades extractivas y sin cobertura (Figura 11).

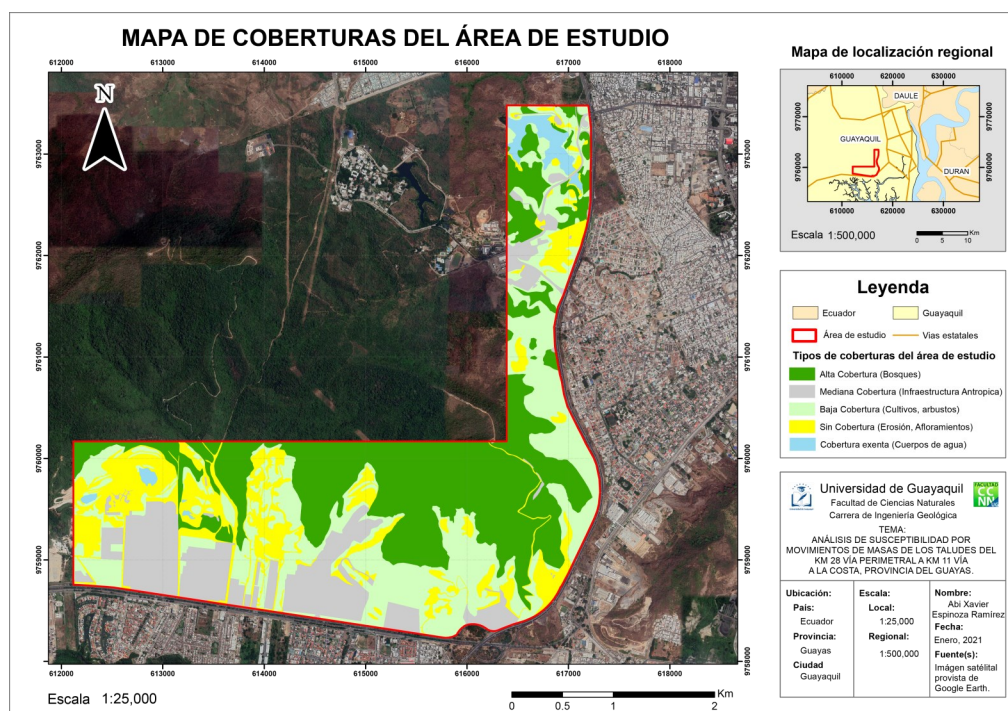


Figura 11. Mapa de coberturas del área de estudio (Elaboración propia).

Mapa geológico: Muestra la disposición de las tres formaciones geológicas y los depósitos cuaternarios en el área de estudio, cuyos contactos aparentes se establecen mediante la información litológica - estructural levantada en campo, y criterio geológico de acuerdo con el relieve que representa el terreno (Figura 12).

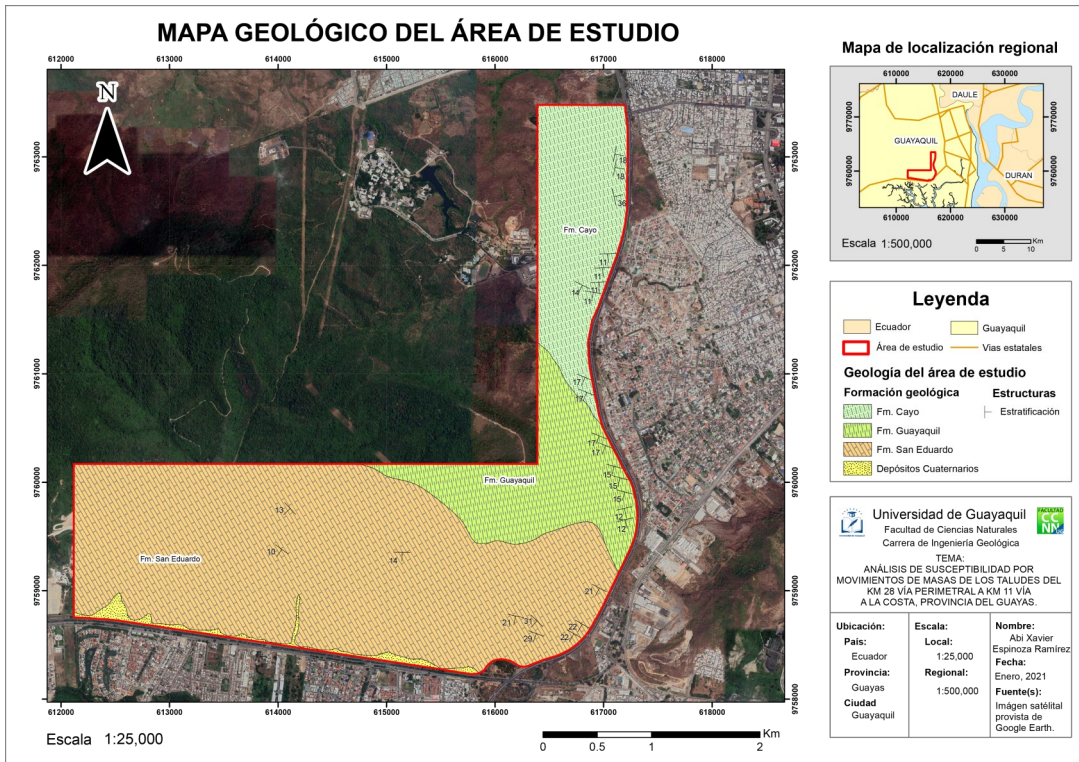


Figura 12. Mapa geológico del área de estudio (Elaboración propia).

Mapa geomecánico: Designa las valoraciones de estabilidad obtenidas de las 37 estaciones geomecánicas levantadas en campo, las cuales al ser agrupadas en dependencia de su geología se logra la obtención del valor RMR promedio de cada formación geológica presente en la zona (Figura 13).

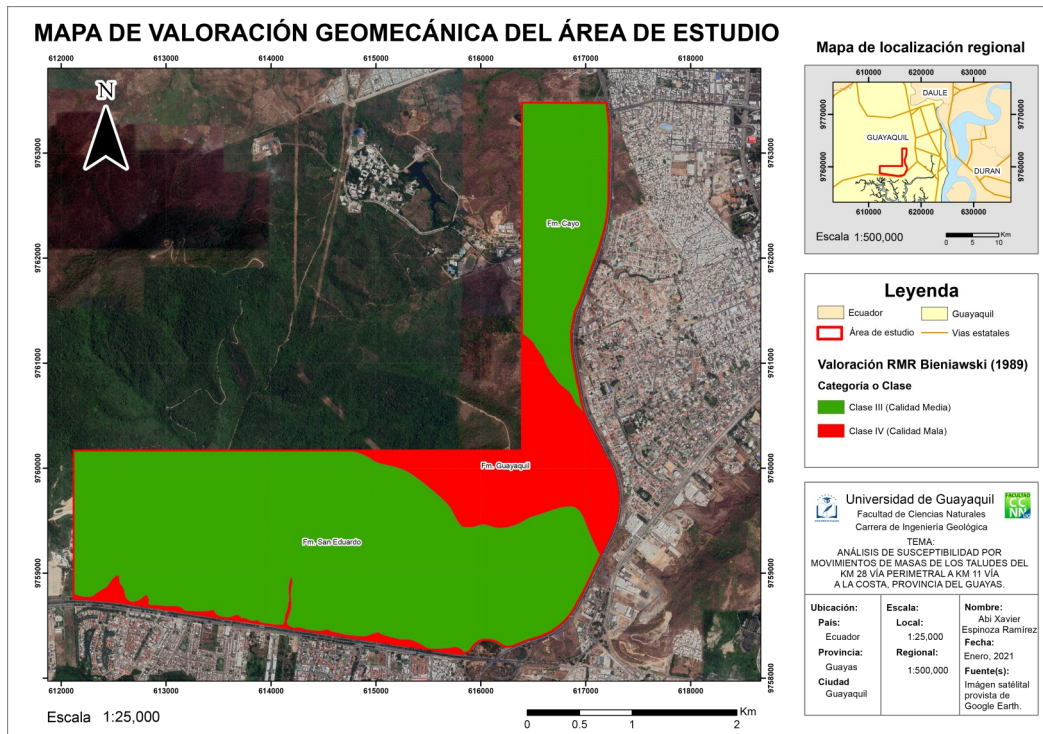


Figura 13. Mapa de valoración geomecánica del área de estudio (Elaboración propia).

Mapa de precipitaciones: Determinado mediante isoyetas de precipitación de las estaciones convencionales del cantón Guayaquil durante el período 1981 - 2010, el cual indica entre 45 y 109 mm/mes como rango de precipitaciones y con una precipitación alta de más de 70 mm/mes en la zona de estudio (Figura 14).

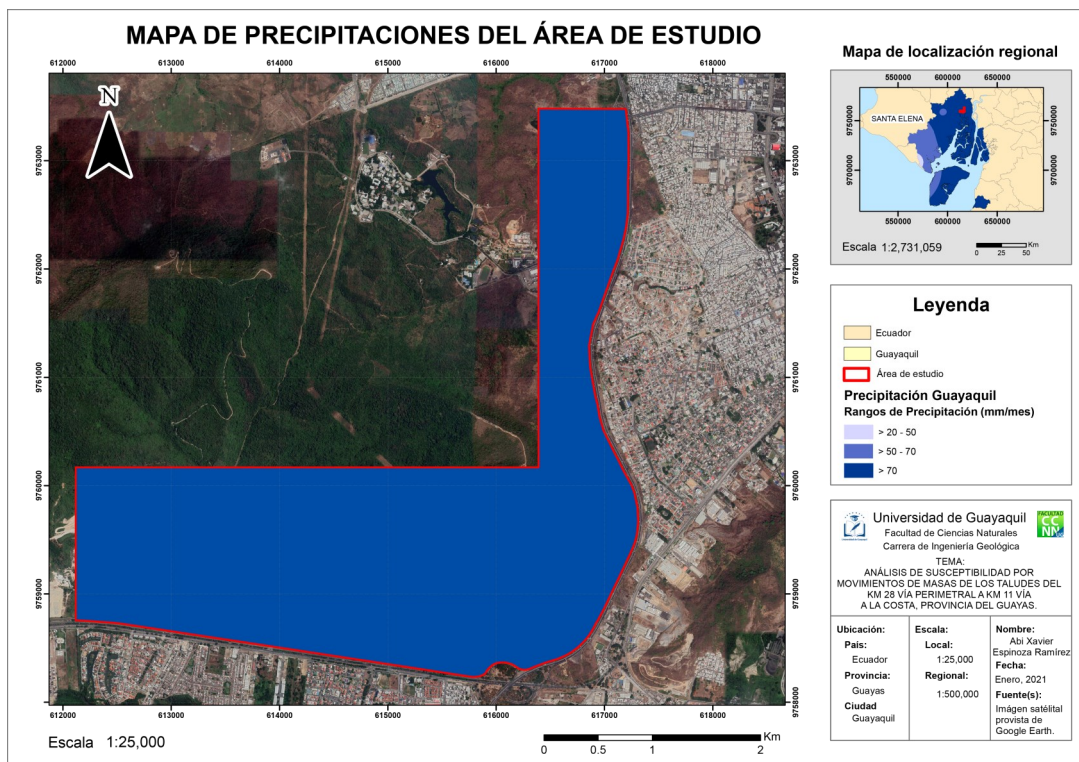


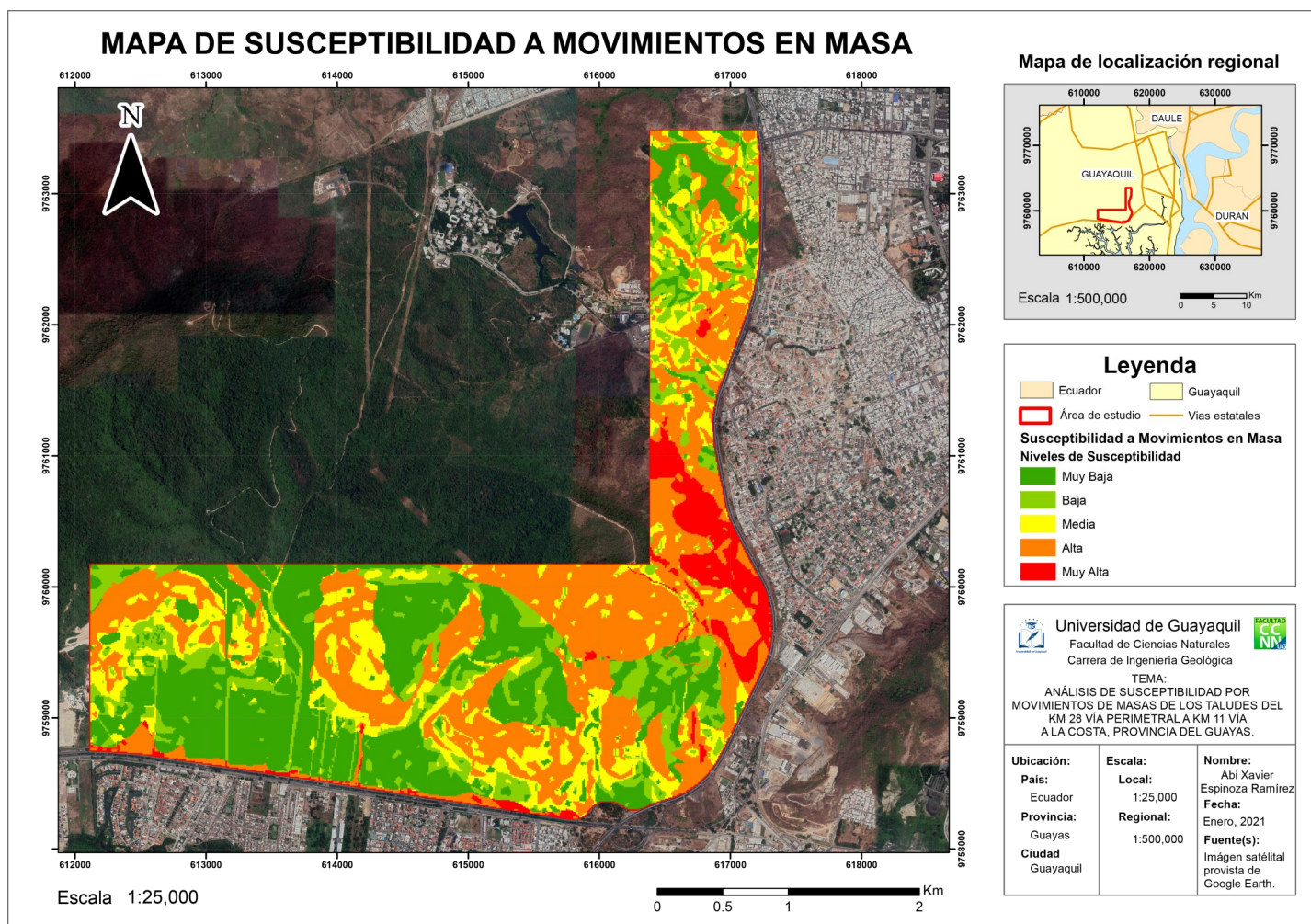
Figura 14. Mapa de precipitaciones del área de estudio (Elaboración propia).

Mapa de susceptibilidad a movimientos en masas: El mapa de susceptibilidad, diseñado en base a la fórmula modificada del método Mora-Vahrson, clasifica al terreno en cinco categorías: Muy Baja, Baja, Media, Alta y Muy Alta. En la zona de estudio, se visualiza que la categoría que mayor área cubre es la de susceptibilidad Alta con 33.8 %, seguida por la de susceptibilidad Muy Baja con un 30.4 %, susceptibilidad Media con 16 %, susceptibilidad Baja con 14.6 % y finalmente susceptibilidad Muy Alta con un 5.2 % (Figura 15).

ANÁLISIS DE RESULTADOS

El área de estudio comprendida entre el Km 28 de la Vía Perimetral al Km 11 de la Vía a la Costa es una zona que presenta susceptibilidades a los movimientos en masa de rangos Muy Bajos a Muy Altos, comprobado mediante la inspección realizada en campo tras la acción de intensas lluvias sobre el material del talud durante la temporada invernal, donde se observaban desprendimientos de rocas, suelos y detritos, así como su depósito en las cunetas de la Vía Perimetral, además de superficies en el talud donde se han efectuado roturas planares y cuneiformes como parte de los movimientos en masa estudiados.

Zonas clasificadas con Alta y Muy Alta susceptibilidad se presentan en su mayoría en Fm. Guayaquil, donde aun teniendo altas coberturas de bosques y vegetación arbustivas, sus pendientes medias a altas con litologías correspondientes a areniscas y lutitas muy alteradas y de mala valoración geomecánica representan los factores condicionantes decisivos en el desarrollo de movimientos de masas.



Corresponden también a zonas de Alta y Muy Alta susceptibilidad los lugares que presentan taludes expuestos de gran potencia y las canteras de extracción de material pétreo, donde las exposiciones de suelo sin cobertura y bajas coberturas arbustivas o reforestadas con pendientes medias a altas representan áreas susceptibles, a pesar de las características litológicas estables y valoración geomecánica media del macizo rocoso de las Fm. Cayo y San Eduardo.

En cuanto a las zonas de Media a Muy Baja susceptibilidad se engloba a las urbanizaciones de Vía a la Costa, Panteón Metropolitano y bosques ubicados en los alrededores del campus Prosperina de la ESPOL, donde las características geológicas y geomecánicas, en conjunto con las pendientes bajas a medias con altas y medianas coberturas, suponen zonas estables donde el desarrollo del fenómeno estudiado es menos probable, exceptuando a la urbanización Bosques de la Costa, que se encuentra en los alrededores de una zona de alta susceptibilidad.

Figura 15. Mapa de susceptibilidad a movimientos en masas del terreno (Elaboración propia).

CONCLUSIONES

- Se caracterizaron los afloramientos y taludes del área de estudio mediante el método geomecánico RMR de Bieniawski (1989), dando como resultado que los taludes de Fm. Cayo y Fm. San Eduardo presentan una valoración media de 44.51 y 46.60, respectivamente, que clasifican sus calidades como tipo III, mientras que los afloramientos Fm. Guayaquil tienen una valoración de 37.82 que clasifica como calidad tipo IV.
- El análisis cinemático de taludes, realizado con los datos estructurales tomados del levantamiento geomecánico, revela que el movimiento más probable a desarrollarse en la zona de estudio es de tipo cuneiforme, los cuales se dan de manera más frecuente en afloramientos de la Fm. San Eduardo (39.77 %), pero no son descartables en los taludes de Fm. Cayo (15.55 %) y Fm. Guayaquil (18.01 %), mientras que el tipo deslizamiento planar se da en menores proporciones en las tres formaciones (aproximadamente, 7 % - 10 %), lo que es comprobado en labores de campo.
- Según el análisis cinemático, es descartable el tipo de movimiento en masa denominado como «volcamiento», debido a que su probabilidad de desarrollo se mantiene en 0 % en todos los taludes estudiados.
- El mapa de susceptibilidad a movimientos en masas clasifica al área de estudio en cinco categorías que van desde «Muy Baja» a «Muy Alta susceptibilidad», donde la categoría de susceptibilidad Alta predomina en un 33.8 % del lugar, seguida por zonas con susceptibilidad Muy Baja con un 30.4 %, susceptibilidad Media con 16 %, susceptibilidad Baja con 14.6 % y finalmente susceptibilidad Muy Alta con un 5.2 %.
- Se establecen como áreas críticas a los lugares que presentan susceptibilidad Alta a Muy Alta a los movimientos en masas, tales como las canteras ubicadas en el Km 29.6 y 33 de la Vía Perimetral y las del Km 10 -11 de Vía a la Costa, además de donde se sitúa la Fm. Guayaquil comprendida entre los taludes del Km 31.5 a 32.7 de la Vía Perimetral, que en conjunto representan un riesgo a las actividades económicas y sociales que allí se desarrollan, derivados del transporte vehicular de la zona y la extracción de material pétreo de las canteras.
- Infraestructuras antrópicas como la ciudadela Bosques de La Costa, el panteón Metropolitano, Bosques de los Ceibos, el colegio Cruz del Sur, y edificaciones de la universidad ESPOL, a pesar de ser clasificadas como zonas de susceptibilidad Baja a Media, no se encuentran exentas de riesgo debido a su cercanía a taludes de gran magnitud y áreas mineras que presentan susceptibilidad Alta a Muy Alta, lo cual es un riesgo al bienestar de la comunidad que allí labora y reside.

Agradecimientos especiales a mi familia y a mi novia por su apoyo constante durante mi carrera; a mi hermana por incentivar me en la investigación de la geología y sus campos de aplicación, a mis compañeros que me brindaron su mano amiga; a mi *alma mater* por permitirme adquirir los conocimientos base sobre la carrera; a mis profesores por impartir sus saberes; a mi tutor César Fuentes y a mi revisora Tania Guevara, por sus consejos y opiniones en cuanto a la resolución de este trabajo.

BIBLIOGRAFÍA

- Ayala-Carcedo, F., & J. Olcina (2002). Riesgos naturales. Conceptos fundamentales y clasificación. Barcelona, Ariel S.A.
- Carrasco, R., J. Pedraza, J. Martín-Duque, M. Mattera, M. Sanz, J. Bodoque, & A. Díez-Herrero (2003). Cartografía de zonas de susceptibilidad o propensión a los movimientos en masa en el Valle del Jerte (Sistema Central Español). Madrid.
- Castro, V. (2020). Evaluación de susceptibilidad por movimiento de masas en el Cerro del Carmen de la ciudad de Guayaquil. Guayaquil.
- CLIRSEN & SIGAGRO. (2011). Análisis de amenaza por tipo de movimiento en masa del cantón Guayaquil. Guayaquil.
- CORCUENCAS (2019). Formulación POMCA, Río Luisa y Otros Directos al Magdalena, Plan de Ordenación y Manejo de la Cuenca Hidrográfica: Amenazas y Susceptibilidad. Colombia.
- Curipoma, A. (2017). Análisis comparativo de las metodologías de cálculo de estabilidad de taludes. Loja, Perú.
- Echeveste, H. (2018). Manual de Levantamiento geológico, Una introducción a la geología de campo. La Plata, Argentina: Universidad de La Plata.
- Fidel, L., S. Villacorta, & B. Zavala (2012). Mapa de susceptibilidad por movimientos en masa del Perú. Perú: Revista de la Asociación Geológica Argentina.
- GeoEstudios & Consulsua. (2012). Estudios de Prefactibilidad, Factibilidad y de Diseño del Canal Actual y Alternativo de Acceso a los Muelles de la Terminal Marítima Simón Bolívar, para Determinar el Dragado a la Profundidad de 11m. con respecto al MLWS. Guayaquil, Ecuador.
- I Care Environment. (2018). Vulnerabilidad y adaptación al cambio climático en Guayaquil. Caracas, Venezuela. Obtenido de <http://scioteca.caf.com/handle/123456789/1276>
- Instituto Distrital de Gestión de Riesgos y Cambio Climático (IDIGER, 2018). Riesgo por Movimientos en Masa, Caracterización General del Escenario de Riesgo por Movimientos en Masa en Bogotá. Bogotá, Colombia. Obtenido de <https://www.idiger.gov.co/rmovmasa>
- Mora, S., & W. Vahrson (1993). Manual for Zonation on Seismic Geotechnical Hazard. Tokyo, Japón.
- Proyecto Multinacional Andino. (2007). Movimientos en Masa en la Región Andina: Una guía para la evaluación de Amenazas.
- Ramírez, P., & L. Alejano (2008). Mecánica de Rocas: Fundamentos e Ingeniería de Taludes. Vigo, España.
- Santacana, N. (2001). Análisis de la susceptibilidad del terreno a la formación de deslizamientos superficiales y grandes deslizamientos mediante el uso de sistemas de información geográfica. Aplicación a la cuenca alta del río Llobregat. Catalunya, España: Universitat Politècnica de Catalunya.
- Varnes, D. (1978). Slope movement types and processes. Washington D.C., Estados Unidos.

Abi Xavier Espinoza Ramírez

Ingeniero Geólogo de la Universidad de Guayaquil, Ecuador. Síntesis de su trabajo de titulación presentado en marzo de 2021.

Se sugiere citar:

Espinoza, A. (2022). Análisis de susceptibilidad por movimientos en masas de los taludes del Km 28 Vía Perimetral a Km 11 Vía a la Costa, Guayaquil (Ecuador). *Revista Cartógrafo.CL* 3(1), pp. 5-27.



Bajo Licencia Creative Commons
Atribución 4.0 Internacional.