

CONVENIO INTERADMINISTRATIVO N° 0205 DE 2017
CVC – UNIVALLE
MUNICIPIOS DE BOLÍVAR, ROLDANILLO Y VERSALLES



Zonificación de la amenaza por Movimientos en Masa de la zona urbana del
Municipio de Versalles
INFORME TÉCNICO



Santiago de Cali, octubre de 2018



CONVENIO INTERADMINISTRATIVO N°0205
CVC – UNIVALLE
MUNICIPIOS DE BOLÍVAR, ROLDANILLO Y VERSALLES



PRESENTACIÓN

Para la Corporación Autónoma Regional del Valle del Cauca, CVC, es una gran satisfacción aportar a los municipios de Bolívar, Roldanillo y Versalles, la evaluación de la amenaza, vulnerabilidad y escenarios de afectación o daño en el componente urbano municipal, en cumplimiento de la función dada por la Ley 1523 de 2012 sobre el apoyo a los municipios en el conocimiento del riesgo.

Conocedores de la importancia y responsabilidad que reviste abordar el tema del conocimiento de las amenazas y los riesgos, la CVC llevó a cabo una alianza con el Observatorio Sismológico y Geofísico del Suroccidente, OSSO, adscrito a la Universidad del Valle, con el fin de obtener los mejores resultados en estas evaluaciones. De igual forma, es necesario reconocer el aporte, contribución y compromiso de las administraciones municipales y sus propios habitantes, a lo largo de la ejecución de este estudio. Otro objetivo es fortalecer el conocimiento que tenemos de nuestro entorno para tener certeza y articular una adecuada planificación y ocupación de nuestros territorios.

Los estudios entregados son parte fundamental de la información que se requiere para que cada municipio formule su Ordenamiento Territorial de segunda generación y son evaluaciones que dan soporte para la reducción y la elaboración de planes de emergencia y contingencia.

La presente evaluación de las amenazas y riesgos deben estructuralmente permitirle al municipio reglamentar el uso del suelo en el componente urbano, de tal manera que, como lo define la política de gestión del riesgo y en esencia la constitución colombiana, se logre avanzar hacia un desarrollo sostenible, que ofrezca seguridad para la vida de los habitantes, sus bienes y medios de subsistencia, así como a toda la infraestructura del municipio.

Finalmente, la CVC con estas evaluaciones, a través de la Universidad, espera contribuir en la formación y fortalecimiento de la capacidad profesional de la región en este tipo de estudios.

Rubén Darío Materón Muñoz
Director General
CVC



AGRADECIMIENTOS

Agradecimiento a la Corporación Autónoma Regional del Valle del Cauca y la Dirección Ambiental Regional BRUT, a la Secretaria de Planeación y la Secretaria de Gobierno de la Administración Municipal por la información suministrada. De igual manera se agradece a cada una de las entidades que de una u otra manera puso a disposición la información necesaria para adelantar la evaluación de la susceptibilidad y zonificación de amenaza por movimientos en masa de la zona urbana del municipio de Versalles, en el marco del Convenio Interadministrativo N°0205 de 2017 entre la Corporación Autónoma Regional del Valle del Cauca -CVC y la Universidad de Valle, el cual tiene como objeto “Aunar esfuerzos técnicos y recursos económicos para la elaboración de los estudios de zonificación de amenaza y vulnerabilidad y escenarios de afectación para las áreas urbanas de los municipios de Bolívar, Versalles y Roldanillo en el Valle del Cauca”.

CORPORACIÓN AUTÓNOMA REGIONAL DEL VALLE DEL CAUCA – CVC

DIRECTIVOS

RUBÉN DARÍO MATERÓN MUÑOZ

Director General

MARÍA CRISTINA VALENCIA RODRÍGUEZ

Secretaria General (C)

HÉCTOR FABIO ARISTIZABAL RODRIGUEZ

Director Técnico Ambiental (C)

PAULA ANDREA SOTO QUINTERO

Directora Territorial – Dirección Ambiental Regional BRUT

SUPERVISIÓN

YUNCELY GIMENA BASTIDAS B

Ingeniería Civil

Especialista en Diseño Estructural

Líder del proyecto 5001

ARELIX ANDREA ORDOÑEZ FRANCO

Ingeniería Ambiental

Supervisora del Convenio Interadministrativo N° 0205 de 2017 CVC-Univalle

EQUIPO TÉCNICO

OMAR ALBERTO CHAVES M

Ingeniero Civil

ALEJANDRA MARÍA GÓMEZ

Ingeniera Civil

Doctora (Ph. D.) en Geotecnia

MARÍA VICTORIA CROSS GARCÉS

Ingeniera Agrónoma

Especialización en Educación Ambiental

UNIVERSIDAD DEL VALLE

DIRECTIVOS

EDAGAR VARELA BARRIOS

Rector

LILIANA ARIAS CASTILLO

Vicerrectora Académica

CLAUDIA SANTAMARÍA GAITÁN

Vicerrector de Bienestar Universitario

ANTONIO JOSÉ ECHEVERRY PÉREZ

Secretario General

INÉS MARÍA ULLOA VILLEGAS

Vicerrectora Administrativa

INÉS MARÍA ULLOA VILLEGAS

Vicerrectora Administrativa

GLADYS STELLA LÓPEZ JIMÉNEZ

Decana - Facultad de Humanidades

EQUIPO TÉCNICO

ELKIN DE JESÚS SALCEDO HURTADO

Director - Observatorio Sismológico y Geofísico del Sur Occidente Colombiano - OSSO
Doctor (Ph. D.) en Física-Matemáticas

GRUPO DE GEOTÉCNIA

Jhonalberth Palacios Sánchez

M.Sc en Geotecnia

Nisley Zúñiga Estacio

Geógrafa

María Rubio Simanca

Geógrafa.

Est. M.Sc en Desarrollo Sustentable

Iliana Hernández Meneses

Estadística

GRUPO DE CARTOGRAFÍA Y SIG

Jhon Jairo Barona

Doctor en Ing Geográfica

Coordinador

Danny Alexander Cocuñame Ricardo

Geógrafo

Vanessa García Cardona

Ing. Topográfica

María Camila Pomeo

Est. Ingeniería Topográfica

Carlos Mauricio Mosquera Pérez

Est. Ingeniería Topográfica

TABLA DE CONTENIDO

| | |
|---|----|
| INTRODUCCIÓN | 15 |
| 1. OBJETIVOS | 17 |
| 1.1. GENERAL | 17 |
| 1.2. ESPECÍFICOS | 17 |
| 1.3. ALCANCE | 17 |
| 2. CARACTERÍSTICAS DEL MUNICIPIO | 18 |
| 2.1 LOCALIZACIÓN ÁREA DE ESTUDIO | 18 |
| 2.2 ÁREA URBANA | 19 |
| 3. SUSCEPTIBILIDAD POR MOVIMIENTOS EN MASA (MM) | 21 |
| 3.1 IDENTIFICACIÓN Y CARACTERIZACIÓN DE LA SUSCEPTIBILIDAD | 22 |
| 3.2 CLASIFICACIÓN DE LOS PROCESOS DE MOVIMIENTOS EN MASA | 22 |
| 4. METODOLOGÍA EMPLEADA PARA EVALUAR LA SUSCEPTIBILIDAD POR MOVIMIENTOS EN MASA EN EL MUNICIPIO DE VERSALLES | 24 |
| 4.1 MODELO DIGITAL DE ELEVACIÓN (DEM) | 27 |
| 4.2 PENDIENTE | 28 |
| 4.3 ORIENTACIÓN DE LAS LADERAS | 28 |
| 4.4 GEOMORFOLOGÍA | 29 |
| 4.5 MOVIMIENTOS (MOV) | 29 |
| 4.6 UNIDADES GEOLÓGICAS SUPERFICIALES | 29 |
| 4.7 GEOLOGÍA | 30 |
| 4.8 TEXTURA | 30 |
| 4.9 TAXONOMÍA | 31 |
| 4.10 EROSIÓN | 32 |
| 4.11 COBERTURA DE LA TIERRA | 32 |
| 5. EVALUACIÓN DE LA SUSCEPTIBILIDAD POR MOVIMIENTOS EN MASA EN EL MUNICIPIO DE VERSALLES | 32 |
| 5.1 DESCRIPCIÓN DE LAS VARIABLES | 33 |
| 5.1.1 MODELO DIGITAL DE ELEVACIÓN (DEM) | 33 |
| 5.1.2 PENDIENTE | 35 |
| 5.1.3 ORIENTACIÓN DE LAS LADERAS | 37 |
| 5.1.4 GEOMORFOLOGÍA | 39 |
| 5.1.5 MOVIMIENTOS | 41 |
| 5.1.6 UNIDADES GEOLÓGICAS SUPERFICIALES | 43 |
| 5.1.7 GEOLOGÍA | 45 |
| 5.1.8 TEXTURA DEL SUELO | 48 |
| 5.1.9 TAXONOMÍA DEL SUELO | 50 |
| 5.1.10 EROSIÓN | 50 |
| 5.1.11 COBERTURA DE LA TIERRA | 54 |
| 5.2 PROCESAMIENTO DE LAS VARIABLES CON RESPECTO A LOS MOVIMIENTOS | 56 |
| 6. ZONIFICACIÓN DE LA SUSCEPTIBILIDAD POR MOVIMIENTOS EN MASA | 58 |
| 7. ZONIFICACIÓN DE LA AMENAZA POR MOVIMIENTOS EN MASA Y ANÁLISIS DE ESTABILIDAD DEL TERRENO | 64 |
| 7.1 ASPECTOS METODOLÓGICOS GENERALES | 65 |

| | | |
|--------|---|-----|
| 7.2 | INVESTIGACIÓN Y CARACTERIZACIÓN GEOTÉCNICA | 68 |
| 7.2.1 | METODOLOGÍA..... | 68 |
| 7.2.2 | EXPLORACIÓN DEL SUBSUELO..... | 69 |
| 7.2.3 | ENSAYOS DE LABORATORIO | 82 |
| 7.2.4 | ENSAYOS DE CORTE DIRECTO | 86 |
| 7.2.5 | ENSAYOS DE CONSOLIDACIÓN..... | 86 |
| 7.3 | PARÁMETROS GEOTÉCNICOS | 87 |
| 7.4 | MODELOS GEOLÓGICO-GEOTÉCNICOS | 88 |
| 7.5 | ANÁLISIS DE ESTABILIDAD | 91 |
| 7.6 | METODOLOGÍA | 91 |
| 7.7 | MÉTODOS NUMÉRICOS DE ANÁLISIS | 92 |
| 7.8 | PARÁMETROS DE RESISTENCIA | 93 |
| 7.9 | AGENTES DETONANTES | 93 |
| 7.9.1 | SISMO..... | 93 |
| 7.9.2 | AGUA SUBTERRÁNEA | 95 |
| 7.10 | ANÁLISIS PROBABILÍSTICOS DE ESTABILIDAD EN SUELOS ARCILLOSOS . | 100 |
| 7.11 | ANÁLISIS PROBABILÍSTICOS DE ESTABILIDAD EN MATERIAL SUPERFICIAL ALTERADO | 101 |
| 7.11.1 | Uso DEL MÉTODO MONTECARLO | 105 |
| 7.11.2 | CÓDIGO DESARROLLADO EN MATLAB..... | 105 |
| 7.11.3 | MODELACIÓN MECANISMOS DE FALLA TRASLACIONALES SUPERFICIALES | 106 |
| 8. | EVALUACIÓN DE AMENAZA POR MOVIMIENTOS EN MASA | 108 |
| 8.1 | MAGNITUD | 112 |
| 8.2 | DISTANCIA DE VIAJE | 112 |
| 8.3 | INTENSIDAD | 114 |
| 9. | CONCEPTO TÉCNICO DE LA PLANTA DE TRATAMIENTO DE AGUAS RESIDUALES (PTAR)..... | 116 |
| | CONCLUSIONES | 124 |
| | REFERENCIAS | 126 |
| | ANEXOS | 130 |

LISTA DE TABLAS

| | |
|--|-----|
| TABLA 5.1. CATEGORIZACIÓN DE LA VARIABLE PENDIENTE VERIFICAR..... | 35 |
| TABLA 5.2. DIRECCIÓN DE LA LADERA | 37 |
| TABLA 5.3. SIGLAS DE LAS UNIDADES GEOLÓGICAS SUPERFICIALES DEL MUNICIPIO DE VERSALLES | 43 |
| TABLA 5.4. CLASES TEXTURALES DEL SUELO | 48 |
| TABLA 5.5. TIPOS DE EROSIÓN Y EFECTOS | 50 |
| TABLA 5.6. RESULTADO DE LA SUMATORIA DE LOS FACTORES DETERMINANTES CON LA VARIABLE MOVIMIENTOS | 56 |
| TABLA 6.1. VARIABLES Y CÁLCULOS PARA EL ANÁLISIS DE FRECUENCIA | 60 |
| TABLA 6.2. RESULTADOS DEL ANÁLISIS DE FRECUENCIA..... | 60 |
| TABLA 6.3. CALIFICACIÓN DE SUSCEPTIBILIDAD POR MOVIMIENTOS EN MASA..... | 60 |
| TABLA 6.4. PORCENTAJE DE SUSCEPTIBILIDAD POR MOVIMIENTOS EN MASA EN EL MUNICIPIO DE VERSALLES | 64 |
| TABLA 7.1. RELACIÓN DE LAS PERFORACIONES REALIZADAS, COORDENADAS (PLANAS MAGNA-SIRGAS), ALCANCE EN PROFUNDIDAD Y CANTIDAD DE MUESTRAS TOMADAS EN EL MUNICIPIO DE VERSALLES..... | 69 |
| TABLA 7.2. RELACIÓN DE LOS APIQUES REALIZADOS, COORDENADAS (PLANAS MAGNA SIRGAS), ALCANCE EN PROFUNDIDAD EN EL MUNICIPIO DE VERSALLES | 73 |
| TABLA 7.3. UBICACIÓN DE LAS LÍNEAS DE REFRACCIÓN SÍSMICA REALIZADAS PARA EL PRESENTE ESTUDIO EN EL MUNICIPIO DE VERSALLES..... | 79 |
| TABLA 7.4. ESTRATOS, VELOCIDADES Y ESPESORES IDENTIFICADOS EN CADA UNA DE LAS LÍNEAS SÍSMICAS REALIZADAS EN EL ÁREA DE ESTUDIO. | 82 |
| TABLA 7.5. ENSAYOS DE LABORATORIO REALIZADOS PARA EL PRESENTE ESTUDIO..... | 83 |
| TABLA 7.6. RELACIÓN DE RESULTADOS DE ENSAYOS DE LABORATORIO REALIZADOS A LAS MUESTRAS RECUPERADAS EN LAS LABORES DE EXPLORACIÓN EN EL MUNICIPIO DE VERSALLES | 84 |
| TABLA 7.7. RESUMEN DE LOS PARÁMETROS GEOTÉCNICOS ESTABLECIDOS PARA LOS MATERIALES PRESENTES EN LA ZONA DE ESTUDIO..... | 87 |
| TABLA 7.8. PARÁMETROS DE RESISTENCIA PARA LOS DIFERENTES MATERIALES PRESENTES EN LA ZONA | 93 |
| TABLA 7.9. MEDICIÓN DE LOS NIVELES FREÁTICOS DURANTE LAS LABORES DE EXPLORACIÓN EN EL MUNICIPIO DE VERSALLES..... | 95 |
| TABLA 7.10. RESULTADOS DEL CÁLCULO DEL NIVEL FREÁTICO PARA DIFERENTES PERIODOS DE RETORNO SEGÚN LA UNIDAD GEOLÓGICA SUPERFICIAL | 99 |
| TABLA 7.11. PROBABILIDADES DE LOS AGENTES DETONANTES | 100 |
| TABLA 7.12. RESUMEN DE LOS FACTORES DE SEGURIDAD Y DE LA PROBABILIDAD DE FALLA SECCIÓN CC', CONDICIÓN SIN OBRAS..... | 101 |
| TABLA 7.13. PARÁMETROS GEOMECÁNICOS EMPLEADOS EN LA MODELACIÓN DE LA UGS RD EN EL MUNICIPIO DE VERSALLES | 106 |

| | |
|---|-----|
| TABLA 7.14. PARÁMETROS GEOMECÁNICOS EMPLEADOS EN LA MODELACIÓN DE LA UGS SA EN EL MUNICIPIO DE VERSALLES | 107 |
| TABLA 7.15. PARÁMETROS GEOMECÁNICOS EMPLEADOS EN LA MODELACIÓN DE LA UGS SALE EN EL MUNICIPIO DE VERSALLES | 107 |
| TABLA 7.16. PARÁMETROS GEOMECÁNICOS EMPLEADOS EN LA MODELACIÓN DE LA UGS STC EN EL MUNICIPIO DE VERSALLES | 107 |
| TABLA 7.17. PARÁMETROS GEOMECÁNICOS EMPLEADOS EN LA MODELACIÓN DE LA UGS STA EN EL MUNICIPIO DE VERSALLES | 107 |
| TABLA 7.18. VALORACIÓN INCERTIDUMBRE COEFICIENTES DE VARIACIÓN EN EL MUNICIPIO DE VERSALLES | 108 |
| TABLA 8.1. CATEGORIZACIÓN DE LA AMENAZA, RESOLUCIÓN 227 DE 2006 (ADOPTADO DE GONZÁLEZ Y MILLÁN, 2005) | 109 |
| TABLA 8.2. ÁREAS SEGÚN LOS NIVELES DE AMENAZA PARA LA CONDICIÓN FUTURA EN EL MUNICIPIO DE VERSALLES | 111 |
| TABLA 8.3. PORCENTAJE DE AMENAZA POR MOVIMIENTOS EN MASA EN EL SECTOR MÁS AFECTADOS | 112 |
| TABLA 8.4. ECUACIONES PARA DETERMINAR LA DISTANCIA DE VIAJE, OBTENIDAS EN HONG KONG | 113 |
| TABLA 8.5. ECUACIONES DE REGRESIÓN PARA $\text{LOG}(H/L) = A + B * \text{LOG} V$ | 113 |
| TABLA 8.6. CARACTERIZACIÓN DE LA AMENAZA PARA EL MUNICIPIO DE VERSALLES | 116 |

LISTA DE FIGURAS

| | | |
|---------------------|--|----|
| FIGURA 2.1. | LOCALIZACIÓN DE LA ZONA DE URBANA DEL MUNICIPIO DE VERSALLES..... | 18 |
| FIGURA 2.2. | MAPA POLÍTICO ADMINISTRATIVO MUNICIPIO DE VERSALLES | 19 |
| FIGURA 2.3. | DIVISIÓN DEL PERÍMETRO URBANO DEL MUNICIPIO DE VERSALLES | 20 |
| FIGURA 3.1. | FLUJOGRAMA PARA CALCULAR LA SUSCEPTIBILIDAD POR MOVIMIENTOS EN MASA.... | 22 |
| FIGURA 4.1. | DIAGRAMA DE FLUJO SIMPLIFICADO DEL ANÁLISIS ESTADÍSTICO BIVARIADO | 25 |
| FIGURA 5.1. | MAPA MODELO DIGITAL DE ELEVACIÓN DEL MUNICIPIO DE VERSALLES | 34 |
| FIGURA 5.2. | MAPA DE PENDIENTES DEL MUNICIPIO DE VERSALLES..... | 36 |
| FIGURA 5.3. | MAPA ORIENTACIÓN DE LAS LADERAS DEL MUNICIPIO DE VERSALLES | 38 |
| FIGURA 5.4. | MAPA GEOMORFOLÓGICO DEL MUNICIPIO DE VERSALLES | 40 |
| FIGURA 5.5. | DESLIZAMIENTOS EN MASA EN EL MUNICIPIO DE VERSALLES | 42 |
| FIGURA 5.6. | MAPA UNIDADES GEOLÓGICAS SUPERFICIALES DEL MUNICIPIO DE VERSALLES | 44 |
| FIGURA 5.7. | MAPA GEOLÓGICO MUNICIPIO DE VERSALLES | 47 |
| FIGURA 5.8. | MAPA DE TEXTURA DEL SUELO MUNICIPIO DE VERSALLES | 49 |
| FIGURA 5.9. | MAPA TAXONOMÍA DEL SUELO MUNICIPIO DE VERSALLES | 52 |
| FIGURA 5.10. | MAPA DE EROSIÓN DEL MUNICIPIO DE VERSALLES | 53 |
| FIGURA 5.11. | MAPA DE COBERTURA DE LA TIERRA MUNICIPIO VERSALLES | 55 |
| FIGURA 5.12. | DISTRIBUCIÓN ESPACIAL DE PESOS CORRESPONDIENTES A LA VARIABLE PENDIENTES DEL MUNICIPIO DE VERSALLES..... | 57 |
| FIGURA 6.1. | MAPA DE SUSCEPTIBILIDAD POR MOVIMIENTOS EN MASA (LSI) SIN CLASIFICAR DEL MUNICIPIO DE VERSALLES..... | 59 |
| FIGURA 6.2. | CURVA ACUMULADA DE CATEGORIZACIÓN DE LSI..... | 61 |
| FIGURA 6.3. | MAPA SUSCEPTIBILIDAD TOTAL A MOVIMIENTOS EN MASA EN EL MUNICIPIO DE VERSALLES | 63 |
| FIGURA 6.4. | PORCENTAJE DE ÁREA DE SUSCEPTIBLE A MOVIMIENTOS EN MASA EN EL MUNICIPIO DE VERSALLES | 64 |
| FIGURA 7.1. | ZONIFICACIÓN DETALLADA DE AMENAZA POR MOVIMIENTOS EN MASA | 67 |
| FIGURA 7.2. | <i>UBICACIÓN DE LAS PERFORACIONES MECÁNICAS HECHAS PARA EL PRESENTE ESTUDIO EN EL MUNICIPIO DE VERSALLES</i> | 71 |
| FIGURA 7.3. | MÁQUINA (ACKER) USADA PARA LAS PERFORACIONES | 72 |
| FIGURA 7.4. | MÁQUINA (JOY) USADA PARA LAS PERFORACIONES | 72 |
| FIGURA 7.5. | APIQUE EXPLORATORIO EN EL MUNICIPIO DE VERSALLES..... | 74 |
| FIGURA 7.6. | UBICACIÓN EN PLANTA DE LOS APIQUES PARA EL PRESENTE ESTUDIO EN EL MUNICIPIO DE VERSALLES. | 75 |
| FIGURA 7.7. | PERFIL ESTRATIGRÁFICO ESTABLECIDO P-4. OBSÉRVENSE LOS VALORES ESTIMADOS DE RQD. | 76 |
| FIGURA 7.8. | LOCALIZACIÓN DE LAS LÍNEAS DE REFRACCIÓN SÍSMICA EN EL MUNICIPIO DE VERSALLES | 78 |
| FIGURA 7.9. | REALIZACIÓN EN CAMPO DE UNA LÍNEA SÍSMICA EN EL MUNICIPIO DE VERSALLES | 79 |

| | |
|--|-----|
| FIGURA 7.10. ILUSTRACIÓN TÍPICA DE LA CAPTURA DE DATOS EN CAMPO MEDIANTE EL SOFTWARE RAS-24 CORRESPONDIENTE A LA EJECUCIÓN DE LA LÍNEA DE REFRACCIÓN LS-1 PARA ONDAS S..... | 80 |
| FIGURA 7.11. ILUSTRACIÓN TÍPICA DEL PROCESAMIENTO DE DATOS MEDIANTE EL SOFTWARE SEISVIEW CORRESPONDIENTE A LA LÍNEA DE REFRACCIÓN PARA ONDAS S. | 81 |
| FIGURA 7.12. TOMOGRAFÍA DEL TERRENO, VELOCIDADES DE ONDA PLANA (V_s), LS-1. | 82 |
| FIGURA 7.13. GRÁFICAS ESFUERZO-DEFORMACIÓN PICO OBTENIDAS DEL ENSAYO DE CORTE DIRECTO SOBRE LA MUESTRA M7A DE LA PERFORACIÓN P-04. | 86 |
| FIGURA 7.14. UBICACIÓN SECCIONES DE ANÁLISIS EN EL MUNICIPIO DE VERSALLES | 88 |
| FIGURA 7.15. PERFIL AA' SECCIÓN DE ANÁLISIS | 89 |
| FIGURA 7.16. PERFIL BB' SECCIÓN DE ANÁLISIS | 89 |
| FIGURA 7.17. PERFIL DD' SECCIÓN DE ANÁLISIS | 89 |
| FIGURA 7.18. PERFIL EE' SECCIÓN DE ANÁLISIS | 90 |
| FIGURA 7.19. PERFIL FF' SECCIÓN DE ANÁLISIS..... | 90 |
| FIGURA 7.20. PERFIL SECCIÓN DE ANÁLISIS..... | 90 |
| FIGURA 7.21. DISTRIBUCIÓN ESPACIAL DE ESTACIONES HIDROCLIMATOLÓGICAS | 96 |
| FIGURA 7.22. CURVAS DE INTENSIDAD FRECUENCIA Y DURACIÓN CON DATOS DE LA SANTIAGO GUTIÉRREZ. | 97 |
| FIGURA 7.23. REPRESENTACIÓN GRÁFICA DE LA ECUACIÓN PARA MEDIR EL NIVEL FREÁTICO..... | 99 |
| FIGURA 7.24. ANÁLISIS DE ESTABILIDAD SECCIÓN CC', ESCENARIO FUTURO, CONDICIÓN SIN OBRAS | 101 |
| FIGURA 7.25. MAPA DE PENDIENTES DEL ÁREA DE ESTUDIO..... | 103 |
| FIGURA 7.26. MAPA MODELO DIGITAL DE ELEVACIONES MUNICIPIO DE VERSALLES | 104 |
| FIGURA 7.27. GRÁFICA DE PROBABILIDAD NORMAL | 106 |
| FIGURA 8.1. MAPA DE AMENAZA CATEGORIZADO CORRESPONDIENTE A LA CONDICIÓN FUTURA PARA EL MUNICIPIO DE VERSALLES | 110 |
| FIGURA 8.2. DISTRIBUCIÓN DE NIVELES DE AMENAZA PARA LA CONDICIÓN FUTURA EN EL MUNICIPIO DE VERSALLES | 111 |
| FIGURA 8.3. DETERMINACIÓN DEL VOLUMEN DE UN DESLIZAMIENTO | 112 |
| FIGURA 8.4. VARIABLES GEOMÉTRICAS PARA DEFINIR LA DISTANCIA DE VIAJE DE UN DESLIZAMIENTO | 113 |
| FIGURA 8.5. BLOQUE DESLIZANTE, CONSIDERACIONES DINÁMICAS. A) PERFIL DE LA TRAYECTORIA. B) GEOMETRÍA LOCAL DEL CONTACTO. C) DIAGRAMA DE FUERZAS. D) PLANTEAMIENTO DEL PROBLEMA | 114 |
| FIGURA 9.1. LOCALIZACIÓN PARCIAL DEL ÁREA AFECTADA EN LA PTAR..... | 117 |
| FIGURA 9.2. RUPTURA A TORSIÓN DEL MURO DE CONTENCIÓN EN GAVIONES NÚMERO 3 | 118 |
| FIGURA 9.3. LOCALIZACIÓN DE PERFORACIONES (CONSORCIO PTAR VERSALLES 2009 – 2010) .. | 119 |
| FIGURA 9.4. PERFIL ESTRATIGRÁFICO..... | 119 |
| FIGURA 9.5. LOCALIZACIÓN DE LAS ESTRUCTURAS DE PROTECCIÓN DE ORILLA (MUROS EN GAVIÓN Y MURO EN CONCRETO)..... | 120 |

| | |
|---|-----|
| FIGURA 9.6. DISEÑO DEL MURO DE CONTENCIÓN EN GAVIÓN | 120 |
| FIGURA 9.7. DISEÑO DEL MURO DE CONTENCIÓN EN VOLADIZO | 121 |
| FIGURA 9.8. MAPA DE AMENAZA CATEGORIZADO CORRESPONDIENTE A LA CONDICIÓN FUTURA PARA EL MUNICIPIO DE VERSALLES (PTAR) | 122 |

RESUMEN

La evaluación amenaza por movimientos en masa es una herramienta útil, que ayuda definir políticas regionales que contribuyan a la defensa del medio ambiente, conservación de los suelos, de los ecosistemas, planificación territorial y en general toma de decisiones concernientes a la población, la economía y desarrollo sostenible del municipio.

Para obtener la amenaza por movimientos en masa, se seleccionan una serie de variables propias del territorio que tienen influencia en la generación de deslizamientos aunado a investigaciones previas y salidas a campo. Se parte realizando la susceptibilidad a movimientos en masa del área urbana del municipio de Versalles, para lo cual se aplica el método Bivariado, este se basa principalmente en la relación del área con la cantidad (densidad) de eventos que han ocurrido. Dado que los movimientos en masa van en aumento debido a factores como; los cambios en el uso del suelo, construcciones en sectores de altas pendientes, socavación de las laderas, entre otros.

Posterior a la evaluación de la susceptibilidad se realiza la evaluación de la amenaza por movimientos en masa, donde se toma como insumo base la susceptibilidad, factores condicionantes (exploración detallada y ensayos de laboratorio) y detonantes (lluvias y sismos), además, de modelos matemáticos como Método de Montecarlo, talud infinito y de equilibrio límite, entre otros, para luego clasificar la zonificación en términos de probabilidad de falla en 3 categorías (alta, media y baja). Determinar la amenaza ayudará a establecer áreas de conservación y protección, identificar posibles zonas de expansión y áreas restringidas para el desarrollo urbano, para así poder brindar una mejor planificación del territorio acorde con sus verdaderos requerimientos y necesidades del municipio y de la población.

INTRODUCCIÓN

En el presente documento se muestran las evaluaciones de amenaza, vulnerabilidad y escenarios de afectación o daño (riesgo) realizadas en el área urbana de los municipios Bolívar, Roldanillo y Versalles. Dichos estudios se priorizan en el marco del Resultado 2 - Estudios de zonificación de amenazas y riesgos en áreas urbanas, cofinanciados; del proyecto 5001: Apoyo a la gestión del riesgo en el territorio del Plan de Acción 2016-2019 de la CVC.

Los estudios, que dan como resultado la zonificación de amenazas, vulnerabilidad y riesgos, se entregan con el fin de aportar a la disminución de la vulnerabilidad de cada una de las cabeceras frente a las amenazas naturales y socio naturales en concordancia con las limitaciones del territorio, es decir, se aborda el proceso de conocimiento del riesgo a partir del análisis de amenazas y riesgos a nivel de zonas urbanas, acorde con lo definido por el Decreto 1077 de 2015, lo cual permitirá abordar de manera adecuada los procesos de planificación ambiental y territorial, definiendo con mayor precisión las medidas prospectivas y correctivas que se deban implementar.

El presente informe sobre evaluación y zonificación de la amenaza por Movimientos en Masa en la zona urbana del municipio de Versalles, Valle del Cauca, se enmarca en el Convenio Interadministrativo N°0205 de 2017 entre la Corporación Autónoma Regional del Valle del Cauca -CVC y La Universidad del Valle, el cual tiene como objeto *“Aunar esfuerzos técnicos y recursos económicos para la elaboración de los estudios de zonificación de amenaza y vulnerabilidad y escenarios de afectación para las áreas urbanas de los municipios de Bolívar, Versalles y Roldanillo en el Valle del Cauca.”*

El municipio de Versalles posee una extensión de 352 km², representando el 1,6% del departamento del Valle del Cauca. Está constituido por ocho (8) barrios en la zona urbana, 4 centros poblados y 8 corregimientos en el área rural, su territorio posee una topografía montañosa donde las pendientes oscilan entre los 0° y 87,85°. Según la Alcaldía Municipal, el 100 % de los niños en edad escolar estudian, la tasa de analfabetismo es del 12% y la cobertura de servicios públicos en el casco urbano es 75%.

En términos socioeconómicos el nivel de pobreza es del 16%, mientras la tasa de desempleo se encuentra en el 18%, la base económica del municipio son actividades agropecuarias, líneas de confección, prestación de servicios y otras fuentes menores. De los 512.498 jornales/año, el 58% provienen del sector agropecuario y agroindustrial, siendo el cultivo de café con 441.825 jornales/año, seguido del cultivo de caña con 12.800 jornales/año los más representativos. El 86% de la producción agropecuaria del municipio se concentra en el corregimiento de La Florida (72%) y en la cabecera municipal (14%), entre los demás corregimientos producen el 14% restante (Alcaldía municipal de Versalles, s.f).

Las comunidades asentadas en zonas montañosas o aledañas a ellas, pueden estar en riesgo a causa de los movimientos en masa, pues éstos muchas veces son responsables de pérdidas de vidas humanas y daños a la infraestructura. Los movimientos en masa representan una amenaza para asentamientos humanos, zonas agrícolas, ganaderas y vías, entre otros tipos de infraestructuras localizadas sobre la montaña, cerca de lugares con pendientes pronunciadas o abanicos aluviales,

debido a las características de estas áreas pueden ser generadoras o receptoras del desenlace del fenómeno.

Por otra parte, Guzzetti et al. (1999), menciona que los movimientos en masa son eventos que han generado más daños en los países en vía de desarrollo, los cuales ocasionan más catástrofes que cualquier otro tipo de desastre natural.

Por lo anterior, este estudio busca evaluar y zonificar la amenaza por movimientos en masa en la zona urbana del municipio de Versalles, Valle del Cauca, para realizar dicho estudio se seleccionan y analizan las variables que causen mayor afectación, y se clasifican las áreas en tres grupos (amenaza alta, media y baja). Los métodos utilizados son cualitativos y cuantitativos, lo cual permite conocer la distribución de las áreas propensas a deslizarse.

Para determinar la amenaza por movimientos en masa, se realizó un amplio trabajo de campo, que permitió cartografiar y evaluar los principales parámetros que caracterizan el terreno, logrando con ellos determinar primero la Susceptibilidad a movimientos en masa que sirve como base para realizar la zonificación de la amenaza. La metodología empleada para la susceptibilidad fue la Bivariada (Método Bayesiano) y se generaron diferentes mapas temáticos que son el producto del cruce de dos o más capas de información base con los puntos de eventos, luego estos mapas temáticos se superponen para obtener el mapa. Teniendo como base la susceptibilidad del terreno, se procede a elaborar la modelación de la amenaza por medio del Método de Montecarlo, este consiste en una técnica numérica para calcular probabilidades y otras cantidades relacionadas, utilizando secuencias de números aleatorios, los datos se obtienen a partir de los estudios geotécnicos, las pruebas en campo y ensayos de laboratorio. La distribución espacial de la amenaza busca aportar conocimientos que permitan una planificación del territorio acorde con sus verdaderos requerimientos y necesidades, puesto que, la amenaza por movimientos en masa es una herramienta útil para definir políticas regionales que contribuyan a la defensa del medio ambiente, conservación y protección de los suelos, de los ecosistemas, planificación territorial y en general toma de decisiones concernientes a la población, la economía y desarrollo sostenible del municipio. Cabe mencionar que esta amenaza por movimientos en masa es un insumo para la valoración de la vulnerabilidad y riesgos, los cuales estarán contenidos en otro informe

Este documento está compuesto por diez (10) capítulos, organizados de la siguiente manera:

Capítulo 1. Objetivos y alcances del estudio

Capítulo 2. Generalidades del estudio

Capítulo 3. Se presenta la definición de susceptibilidad por movimientos en masa.

Capítulo 4. Expone la metodología utilizada para evaluar la susceptibilidad por movimientos en masa.

Capítulo 5. Plantea la evaluación de la susceptibilidad por movimientos en masa.

Capítulo 6. Presenta la zonificación de la susceptibilidad por movimientos en masa.

Capítulo 7. Desarrolla la zonificación de la amenaza por movimientos en masa y el análisis de la estabilidad del terreno.

Capítulo 8. En este capítulo se enseña la evaluación de la amenaza por movimientos en masa.

Finalmente, en el Capítulo 9, presenta las conclusiones y recomendaciones del estudio, mientras que en el Capítulo 10, se relacionan las referencias bibliográficas consultadas.

1. OBJETIVOS

1.1. GENERAL

- Evaluar y zonificar la amenaza por movimientos en masa en la zona urbana del municipio de Versalles Valle del Cauca.

1.2. ESPECÍFICOS

- Evaluar la susceptibilidad por movimientos en masa en la zona urbana del municipio de Versalles.
- Zonificar la susceptibilidad por movimientos en masa en la zona urbana del municipio de Versalles
- Analizar las precipitaciones y sismos ocurridos en la zona de estudio que puedan detonar movimientos en masa
- Calcular la magnitud y probabilidad de ocurrencia de movimientos en masa
- Evaluar la amenaza por movimientos en masa en la zona urbana del municipio de Versalles.
- Zonificar la amenaza por movimientos en masa en la zona urbana del municipio de Versalles
- Analizar la cartografía resultante de la zonificación y estimación de la susceptibilidad y de la amenaza por movimientos en masa.

1.3. ALCANCE

El presente estudio pretende identificar, evaluar y zonificar los grados de amenaza que presenta el área urbana del municipio de Versalles – Valle del Cauca, a través de métodos cuantitativos y probabilísticos, lo cual permite conocer la distribución de las áreas propensas a deslizarse. En cumplimiento del Decreto 1807 de 2015, el presente estudio se realiza a escala 1:2.000 con el fin que sea tomado como insumo para los futuros procesos de ordenación y planificación territorial en los límites del municipio de Versalles.

2. CARACTERÍSTICAS DEL MUNICIPIO

El municipio de Versalles está ubicado en el sector norte del departamento del Valle del Cauca, se divide en 4 centros poblados, 8 corregimientos (área rural) y 8 barrios (área urbana), conformado por siete afluentes que tributan sus aguas al río Garrapatas, topografía montañosa, temperatura promedio de 18° centígrados, régimen de lluvias bimodal en los meses abril - mayo y octubre – noviembre (Alcaldía municipal de Versalles, 2016).

2.1 LOCALIZACIÓN ÁREA DE ESTUDIO

El municipio de Versalles se ubica sobre la vertiente de la cordillera Occidental, al noreste del departamento del Valle del Cauca (Figura 2.1) a 205 km de la ciudad de Santiago de Cali, se localiza entre 4° 34' 43" latitud norte y 76° 12' 23" longitud oeste. Tiene una extensión total de 352 km² de los cuales 0,49 km² pertenecen al área urbana y 351,51 km² al área rural (Alcaldía Municipal de Versalles, 2016).

Limita al norte con los municipios del Cairo y Argelia; al sur con el municipio de El Dovio, al oriente con El Toro y La Unión, al occidente con la Serranía de los Paraguas y el municipio de Sipí en el departamento del Chocó. La cabecera municipal está a 1864 m.s.n.m., sus principales afluentes son el Río Garrapatas, Las Vueltas y Peñones (Alcaldía Municipal de Versalles, 2016). La actividad económica se basa principalmente en labores como la agricultura (maíz, café, plátano, caña panelera, frutales y legumbres), ganadería, minería y explotación forestal.



Figura 2.1. Localización de la zona de urbana del municipio de Versalles

Fuente: Elaboración propia.

2.2 ÁREA URBANA

El perímetro urbano del municipio de Versalles se determinó por medio de información suministrada por la Oficina de Planeación Municipal junto con el acuerdo 07 de febrero de 2013 por el cual se incorporó al perímetro urbano predios para la construcción de viviendas de interés social y prioritario (incorporación Ley Lleras) (Concejo Municipal de Versalles, 2013). En la actualidad se reconoce como perímetro urbano el establecido por el inventario predial del Catastro Nacional. La Figura 2.2 muestra la división político- administrativa del municipio y la Figura 2.3 enseña la división por barrios.

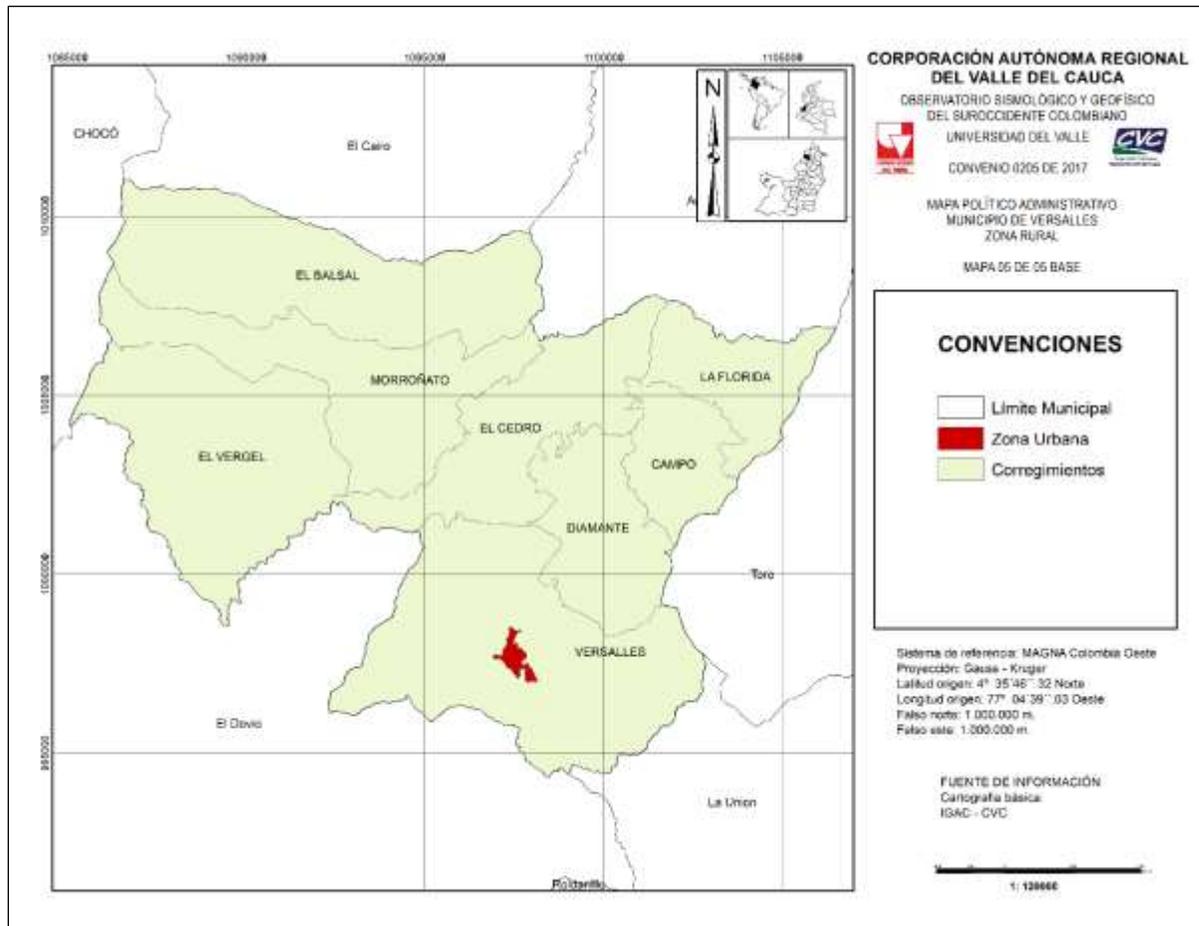


Figura 2.2. Mapa Político Administrativo Municipio de Versalles
Fuente: Elaboración propia.

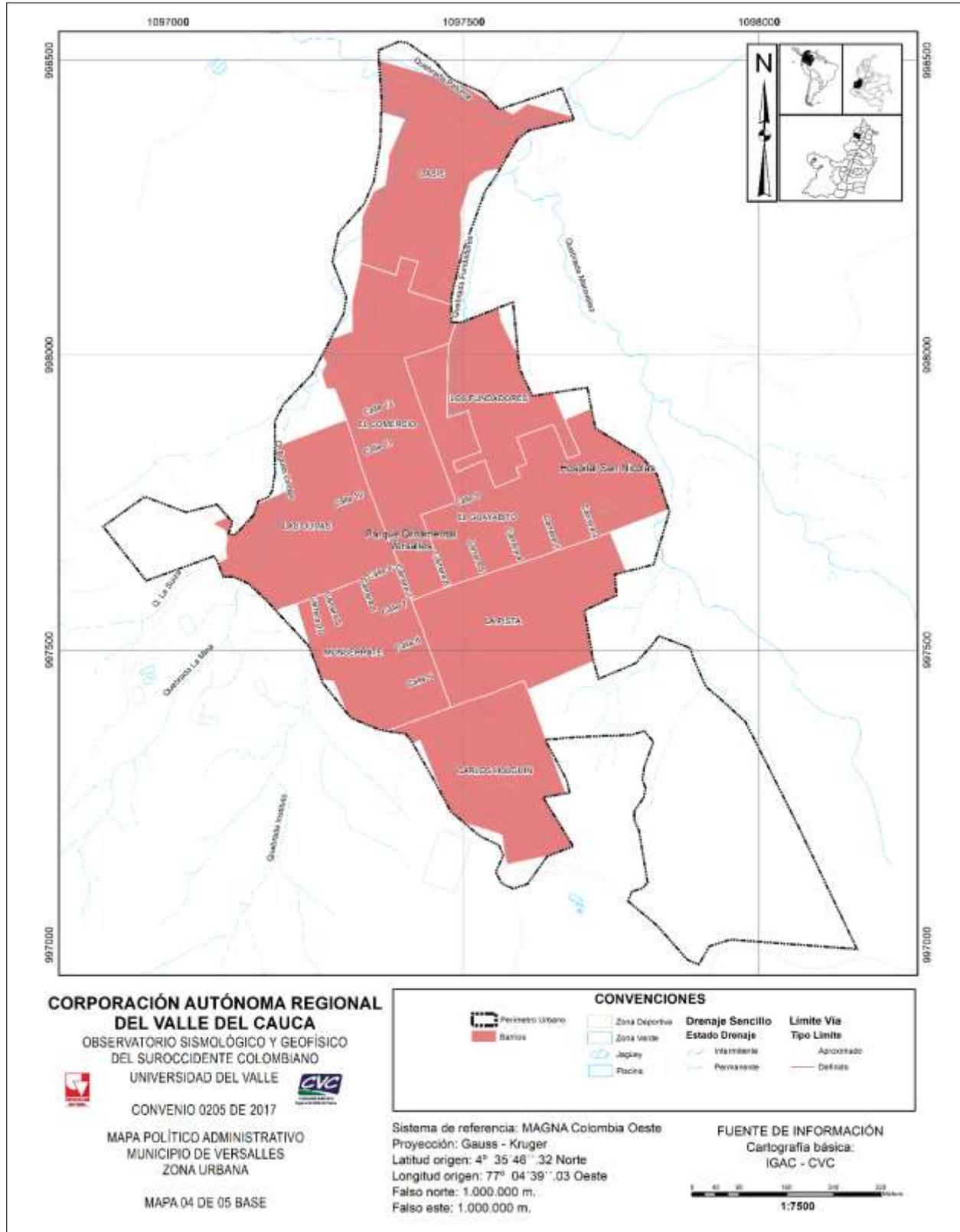


Figura 2.3. División del perímetro urbano del municipio de Versalles

Fuente: Elaboración propia.

3. SUSCEPTIBILIDAD POR MOVIMIENTOS EN MASA (MM)

La susceptibilidad por movimientos en masa se toma como el grado de propensión de un terreno a desarrollar un fenómeno natural potencialmente dañino, definido a partir de la interacción de las propiedades intrínsecas caracterizadas bajo unidades de parámetro y unidades de terreno (Servicio Geológico Colombiano (SGC, 2015). Es decir, la evaluación de la susceptibilidad expresa cuales son los sitios con mayor o menor ocurrencia de un evento en determinada área. La susceptibilidad posee gran importancia puesto que es el primer paso a tener en cuenta a la hora de realizar una evaluación de la amenaza, ya que ofrece la información necesaria para identificar las características que presenta la zona para luego ser analizadas.

Según González de Vallejo, et al. (2002), la susceptibilidad es la posibilidad de que una zona quede afectada por determinado proceso, expresada en términos cualitativos y relativos, que como se verá, es insuficiente y puede mejorarse. La probabilidad puede aplicarse tanto al problema de la desestabilización de un punto, al hecho posible de que resulte movido por un movimiento subyacente, en cuyo caso hablamos de susceptibilidad a la desestabilización, como a su posible alcance por una masa desestabilizada en un proceso de movimiento.

Para determinar la susceptibilidad por MM, se tienen en cuenta múltiples características del terreno; geomorfología, geología, coberturas de la tierra, pendientes, entre otros. La metodología empleada se basa en la generación de diferentes mapas temáticos que son el producto del cruce de dos o más capas de información base aunado a los deslizamientos previos en la zona, luego con métodos estadísticos estos mapas temáticos se superponen para obtener el mapa de susceptibilidad y por medio de los Sistema de Información Geográfica (SIG) se obtienen las salidas cartográficas. También se realizó trabajo de campo el cual es de gran utilidad para obtener resultados rápidos y confiables al igual que permite corroborar la información de fuentes secundarias. A continuación, se enseña proceso mediante la Figura 3.1

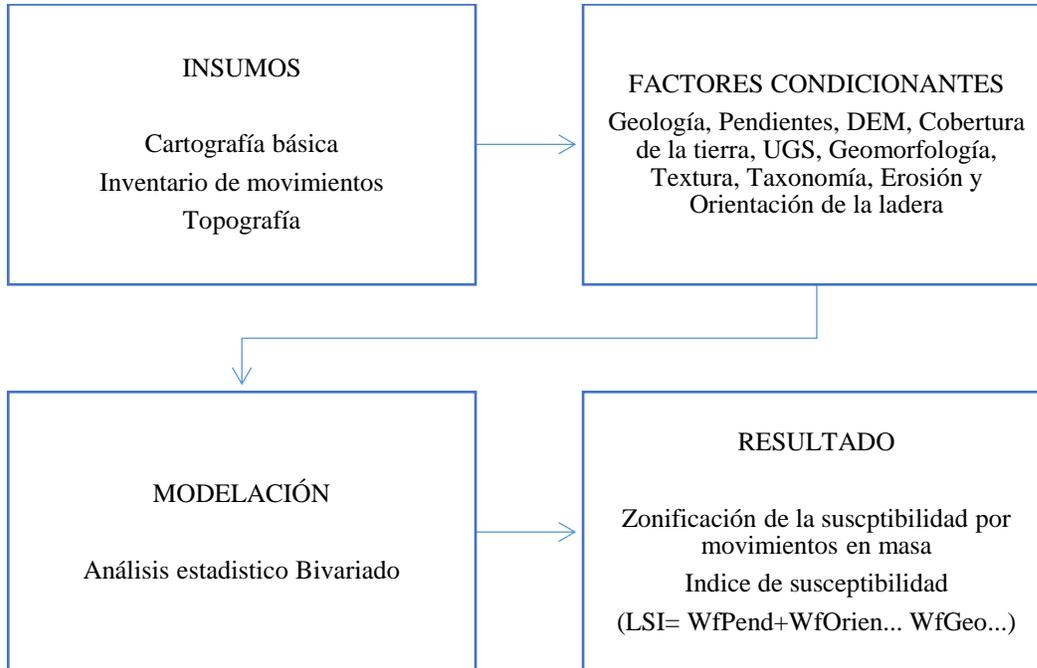


Figura 3.1. Flujograma para calcular la susceptibilidad por movimientos en masa
Fuente: Elaboración propia

3.1 IDENTIFICACIÓN Y CARACTERIZACIÓN DE LA SUSCEPTIBILIDAD

Para la zonificación de la susceptibilidad se tiene en cuenta las condiciones que intervienen en la generación de los movimientos en masa como los procesos morfodinámicos y características del suelo. La zonificación se obtiene a partir del procesamiento de las variables; pendientes, orientación de las laderas, movimientos (deslizamiento acontecidos en el área urbana del municipio), geomorfología, modelo digital de elevaciones (DEM, por sus siglas en inglés (Digital Elevación Model)), unidades geológicas superficiales, geología, textura, taxonomía, erosión actual y cobertura de la tierra y por medio del método Bivariado.

Los análisis estadísticos bivariados definen múltiples variables temáticas, una variable dependiente (deslizamientos previos) y diferentes variables independientes (características intrínsecas del terreno), cuya importancia relativa se analiza de forma separada para cada una. Para realizar la evaluación de la susceptibilidad se asignan tres rangos de intensidad (Alta, Media y Baja). Esta información es procesada mediante el SIG, arrojando varias capas temáticas correspondientes a cada variable, las cuales son sumadas dando como resultado un mapa que muestra cuales son los sectores del área de estudio susceptibles a sufrir movimientos en masa. Este estudio se hace a escala detalla y únicamente para el área urbana del municipio

3.2 CLASIFICACIÓN DE LOS PROCESOS DE MOVIMIENTOS EN MASA

Existen varias clasificaciones de movimientos en masa, las cuales se basan en el mecanismo de rotura y la naturaleza de los materiales involucrados. La clasificación presente en este documento, sigue la distribución hecha por Cruden y Varnes (1996), donde enfatiza en el material involucrado

y el tipo de deslizamiento, basados en la clasificación propuesta por Varnes (1978), adicionalmente los autores introducen una terminología que considera factores como actividad (estado, distribución, estilo), tasa de movimiento y contenido de agua; además, proponen la combinación de nombres según el orden en que se presentan los movimientos (caída de rocas-flujo de detritos).

Caída: Separación o desprendimiento de suelo o roca. desde una pendiente pronunciada a lo largo de una superficie en la que poco se produce desplazamiento de cizallamiento (desplazamiento). Una vez ocurrido el desprendimiento, el material desciende a través del aire, principalmente en caída libre, rebotando o rodando. El movimiento es muy rápido excepto cuando la masa desplazada ha sido socavada, la caída irá precedida de pequeños movimientos de deslizamiento o caída que separan el material desplazado de la masa no perturbada. (Cruden & Varnes 1996).

Volcamiento: Comprende la rotación hacia delante de una masa de roca o suelo en una ladera, alrededor de un pivote o eje, por debajo del centro de gravedad de la masa que se desplaza, se divide en tres tipos (Cruden & Varnes 1996).

- Volcamiento de bloques de roca
- Volcamientos de bloques aislados
- Volcamiento de detritos

Deslizamiento: Movimiento ladera abajo de una masa de suelo o roca, predominantemente a lo largo de una superficie de ruptura o de zonas relativamente delgadas sometidas a intensos esfuerzos de corte (ibíd.). Los autores plantean que la superficie de ruptura no se desarrolla de manera simultánea a lo largo de la masa que se desplazará, sino que se inicia por agrietamientos en el terreno en la parte superior de la ladera, donde más tarde se conforma la corona del deslizamiento. Este tipo de movimiento en masa se divide en tres tipos

- Rotacional,
- Traslacional
- Compuesto

Flujo: Se refiere a movimientos espacialmente continuos con superficies de corte efímeras y estrechamente espaciadas, las cuales por lo general no se preservan. La distribución de velocidades en la masa desplazada es similar a la de un líquido viscoso. Su límite inferior puede ser una superficie a lo largo de la cual se ha presentado un movimiento diferencial apreciable o una zona espesa de cizallamiento distribuido. En realidad, se da una transición de deslizamiento a flujo, dependiendo del contenido de agua, la movilidad y la evolución del movimiento.

Los flujos más rápidos corresponden a los flujos canalizados de detritos, en los cuales el material pierde bastante cohesión, admite bastante agua o encuentra laderas con alta pendientes (ibíd.).

Propagación lateral: Extensión o dilatación lateral de un suelo cohesivo o masa de roca blanda, combinada con subsidencia general del material fracturado suprayacente en ese material blando, sin que se forme una superficie de falla bien definida. La extensión se manifiesta como la extrusión de material propenso a licuación o flujo plástico. Se pueden presentar dos casos generales

- Propagación lateral en bloque
- Propagación lateral por licuación

Creep: “Deformación del terreno a esfuerzo constante” que involucra el material inconsolidado de la parte superior de las laderas.

Estos materiales se pueden relacionar con saprolitos y suelos residuales, suelos volcánicos, laderas de rocas lodosas hídricamente degradadas y, con más frecuencia, coluviones arcillosos asociados a rocas lodosas.

Para la evaluación de la susceptibilidad y amenaza por movimiento es masa, se hace necesario conocer el tipo de deslizamiento que se presenta en una zona, pues estos determinan la velocidad y la fuerza con que pueden impactar a la población cercana, también se tener en cuenta el tipo de movimiento en masa para la implementación de obras de mitigación adecuadas a la hora de intervenir la zona, la respuesta de la población ante estos y los entes territoriales, pues un deslizamiento traslacional, afecta diferente que un deslizamiento tipo flujo

4. METODOLOGÍA EMPLEADA PARA EVALUAR LA SUSCEPTIBILIDAD POR MOVIMIENTOS EN MASA EN EL MUNICIPIO DE VERSALLES

La susceptibilidad se abordó utilizando el modelamiento de pesos de las variables (resultado de la resta de los valores Wf^+ - Wf^-) que condicionan la ocurrencia de movimientos en masa, mediante un análisis estadístico bivariado (Figura 4.1). El método usa el modelo probabilístico Bayesiano, este permite evaluar la susceptibilidad a los movimientos en masa mediante la sumatoria de pesos calculados de forma cuantitativa, para cada una de las variables del territorio relacionadas con la ocurrencia del fenómeno en cuestión, es decir, “en el modelamiento de la susceptibilidad, el método calcula los pesos de cada variable o factor causante de movimientos basado en la presencia o ausencia de los movimientos dentro del área de estudio” (Alvarado et al, 2012), las variables fueron definidas según el análisis del grupo multidisciplinario (geólogos, ingenieros civiles, geógrafos, hidrólogos, geotecnista, entre otros).

Dentro de este grupo de variables, las correspondientes a características geométricas del relieve, son derivadas a partir del Modelo Digital de Elevación (MDE). Las variables temáticas como las unidades geológicas superficiales, geología y cobertura de la tierra, son obtenidas a partir de la cartografía elaborada en otros componentes del proyecto (Componente de historicidad, geología, geomorfología e hidrología).

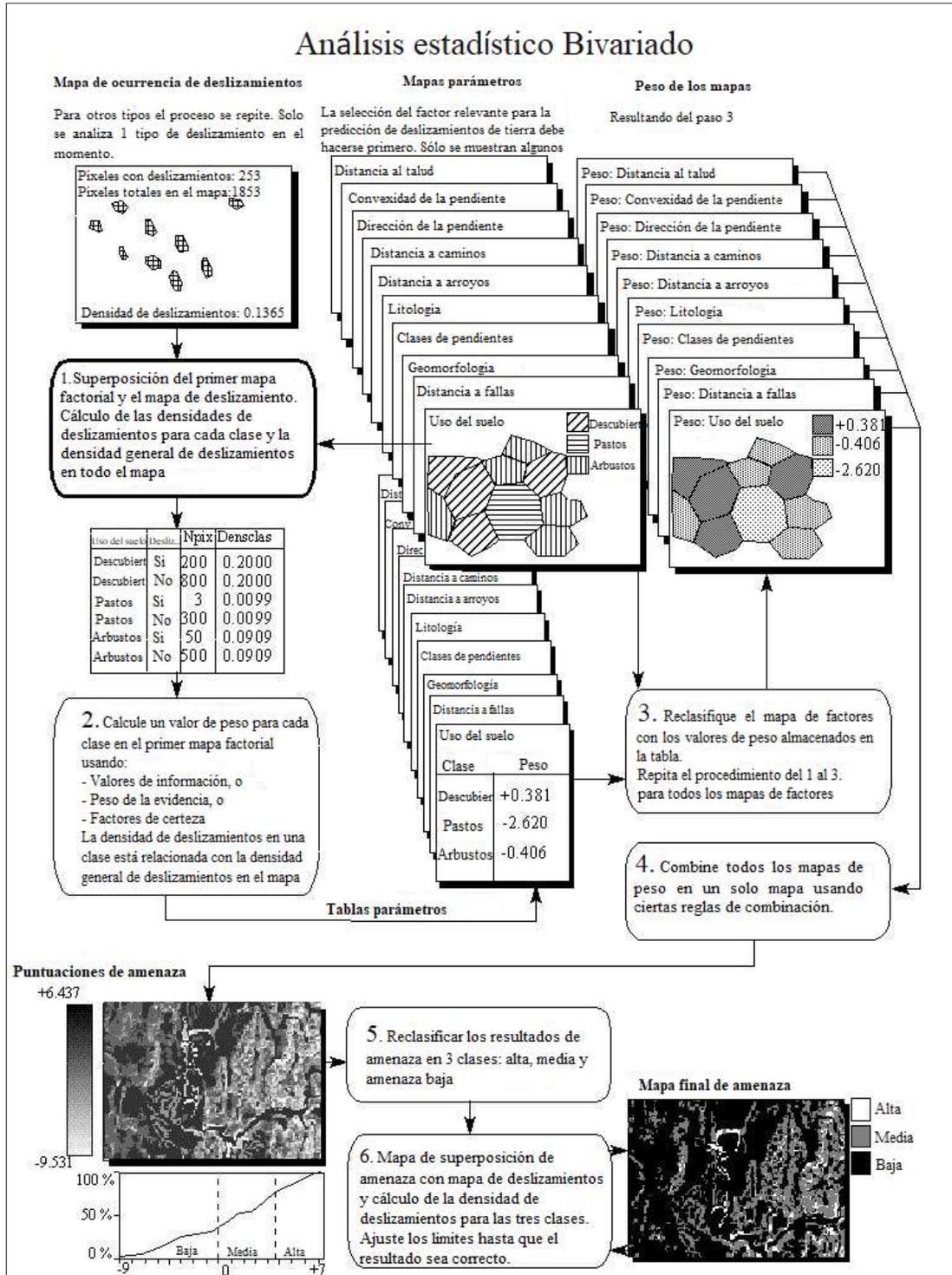


Figura 4.1. Diagrama de flujo simplificado del Análisis Estadístico Bivariado

Fuente: Van Western. (1996)

Para desarrollar los objetivos planteados (Evaluar la susceptibilidad por movimientos en masa en la zona urbana del municipio de Versalles y Zonificar la susceptibilidad por movimientos en masa en la zona urbana del municipio de Versalles) se ejecuta el estudio en tres fases que engloban el

proceso que se debe llevar a cabo para obtener un estudio confiable de la zonificación de áreas susceptibles a movimientos en masa. Se estructura una metodología basada en las variables a intervenir, las cuales dependerán de la disponibilidad de la información, la zona de estudio, los eventos de deslizamientos que se han presentado y las condiciones técnicas. Las fases son las siguientes:

1. Elección de las variables que influyen en la susceptibilidad por movimientos en masa.
2. Desarrollar el método para evaluar la susceptibilidad por movimientos en masa.
3. Zonificación de la susceptibilidad por movimientos en masa (sumatoria de mapas).

En el método Bivariado, la probabilidad P se determina con el conocimiento de la ocurrencia de un evento D en el pasado bajo condiciones similares, y es definida como la probabilidad a priori P (D). Esta probabilidad puede ser alterada con valores B que influyen el resultado y son obtenidos con estudios o análisis en campo, denominados factores causantes. Cuando se integran las causas a la evaluación, esta se define como una probabilidad condicional o posterior P (D/B). La probabilidad posterior expresa la probabilidad de que un evento D ocurra bajo la presencia de un factor causante B. Ambas probabilidades son integradas en el Teorema de Bayes, expresado en la fórmula 1.

$$P\left(\frac{D}{B} = + \frac{P(D)*P\left(\frac{B}{D}\right)}{P(B)}\right) \quad (1)$$

El traslape de los movimientos en masa con cada factor causante, permite calcular la relación estadística entre ellos, y evaluar la importancia de cada variable en la ocurrencia de deslizamientos antiguos, los pesos W^+ y W^- son calculados para cada variable (ver formula 2 y 3). “Este cálculo se realiza mediante la aplicación de cocientes de probabilidad, que describen como probablemente un movimiento ocurrirá en caso de presencia y ausencia de factores causantes de éstos” (CVC y Universidad del Valle, 2010).

$$Wj^+ = Ln \frac{P\left(\frac{D}{Bt}\right)}{P\left(\frac{D}{B}\right)} \quad (2)$$

$$Wj^- = Ln \frac{P\left(\frac{D}{Bt}\right)}{P\left(\frac{D}{Bj}\right)} \quad (3)$$

Donde W^+ es el cociente de probabilidad que expresa la relación en caso de presentarse los factores causantes B (de un número j de factores causantes) un movimiento puede o no ocurrir. W^- expresa la misma relación en caso de ausencia de estos factores. Es decir, los pesos dan información de la correlación positiva o negativa entre los factores causante y los lugares donde se han presentado movimientos.

Un par de pesos es calculado para cada factor causante. Las ponderaciones dependen de las relaciones espaciales entre los movimientos y los factores causantes:

Dahal et al., (2008), plantea que, para evaluar la combinación de los factores en el fenómeno estudiado, las ecuaciones 2 y 3 se reescriben en función del número de celdas del modelo digital de elevación (DEM) que se utilice.

$$Wi^+ = Ln \frac{\frac{Npix_1}{Npix_1+Npix_2}}{Npix_3 / Npix_3+Npix_4} \quad (4)$$

$$Wi^- = Ln \frac{\frac{Npix_2}{Npix_1+Npix_2}}{Npix_3 / Npix_3+Npix_4} \quad (5)$$

Donde:

Npix1: Número de celdas que representan la presencia al mismo tiempo de las variables y de movimientos.

Npix2: Número de celdas que representan la presencia de movimientos y la ausencia de las variables.

Npix3: Número de celdas que representan la presencia de las variables y la ausencia de movimientos.

Npix4: Número de celdas que representan la ausencia al mismo tiempo de las variables y de movimientos.

La diferencia entre los dos pesos se conoce como el contraste de peso, $Wf = (Wi^+ - Wi^-)$, el resultado, refleja la asociación espacial entre el factor causal y los deslizamientos de tierra. En el modelo de ponderación, “la combinación de factores causales asume que los factores son condicionalmente independientes entre sí con respecto a los derrumbes (Bonham-Carter, 2002; Lee y Choi, 2004). En esta investigación, utilizando estadísticas bivariadas, se asume que todos los deslizamientos de tierra en un área de estudio dada ocurren bajo la misma combinación de parámetros, y que todos los conjuntos de parámetros son independientes” (Dahal et al., 2008).

Finalmente, los pesos son asignados a las variables consideradas, cuya sobreposición georreferenciada produce el Índice de Susceptibilidad por Movimientos en Masa, LSI, así como un mapa de susceptibilidad que integra los aportes de cada uno de los parámetros de inestabilidad, el cual puede ser categorizado de acuerdo a la distribución estadística del LSI, expresada como:

$$LSI = \sum Wfi \quad (6)$$

Una vez se obtiene el resultado del LSI, se procede a realizar un análisis de frecuencia para determinar las categorías de susceptibilidad (alta, media y baja). A continuación, se presentan una breve descripción de las variables utilizadas en la zonificación de la susceptibilidad por movimientos en masa (MM) en el municipio de Versalles.

4.1 MODELO DIGITAL DE ELEVACIÓN (DEM)

Un modelo digital de elevaciones (DEM) se define como una estructura numérica de datos que representan la distribución espacial de la altitud de la superficie del terreno; una representación digital de información cartográfica en un formato raster, que consiste en una matriz que muestra las elevaciones para un número de posiciones de la tierra a intervalos regularmente espaciados.

El DEM es una representación espacial, que muestra de forma simplificada la geometría de la superficie del terreno. Indica únicamente la información de altura sin ninguna definición adicional sobre la superficie.

Resaltando la importancia de la cartografía convencional como herramienta para comprender y analizar la distribución espacial de los diferentes factores, los mapas base topográficos resultan útiles para construir los modelos o superficies temáticos, reflejando las características morfométricas del municipio.

- **Interés**

La altitud tiene una estrecha relación con la pluviometría como han encontrado algunos autores (Carrara, 1983). En eventos previos se ha observado que, a mayor altitud, mayor es la precipitación. Dependiendo de la zona de estudio y de la interpretación que se haga de esta variable, se puede utilizar o rechazar para el análisis. De ella deriva los modelos del terreno (variables) utilizado para el análisis (Santacana, 2001).

4.2 PENDIENTE

Variable geométrica obtenida a partir del MDE, es definida como el ángulo formado por la superficie del terreno y la horizontal. Se expresa en grados, en rango entre 0 y 90 o en porcentaje en rango de 0% a 100%.

- **Interés**

La pendiente está relacionada con la aparición de roturas dado que es el principal factor geométrico que aparece en los análisis de estabilidad. La variable se relaciona directamente con las tensiones de corte tangenciales y normales en la formación superficial, e influye también en la distribución de agua en la ladera (Santacana, 2001).

4.3 ORIENTACIÓN DE LAS LADERAS

Es importante determinar la orientación que presenta el relieve ya que su determinación se convierte en información útil para diferentes investigaciones, la orientación de las laderas ayuda por un lado a determinar el tiempo de exposición de la ladera a la radiación solar y, por otro lado, a establecer las corrientes fluviales, es decir, la orientación de la pendiente tiene una influencia indirecta en el contenido de humedad del suelo, que está relacionado a la reducción de las tensiones efectivas en la superficie de falla potencial (Neuland, 1976; Carrara, 1983). Para la elaboración de esta variable es necesario utilizar el modelo digital de elevación (MDE), a través de la herramienta SIG, ya que este software permite realizar el cálculo de la altitud y el azimut. Esta variable cuantitativa, con rango de 1 a 360 grados, se calcula a partir del ángulo existente entre el norte geográfico y la proyección sobre el plano horizontal del vector normal a la superficie en un punto dado.

- **Interés**

El cálculo de la orientación de las laderas brinda información acerca de la cantidad de lluvia que recibe, las áreas de donde hay mayor o menor insolación, indicando de esta manera zonas húmedas o secas y áreas con mayor presencia de vegetación.

4.4 GEOMORFOLOGÍA

El IGAC (2012) define la geomorfología como la “ciencia que estudia el relieve terrestre: su estructura, origen, historia y dinámica actual”, igualmente, “El estudio geomorfológico incluye la descripción de las formas (morfología), su origen (génesis), dinámica actual y su relación con la actividad humana” (Hubp, 2011).

- **Interés**

La variable indica cómo se forma el paisaje y los agentes internos y externos que ayudan a su formación, lo cual permite inferir la posible reacción o respuesta frente a las tensiones de corte y la resistencia, estas fuerzas no dependen únicamente de la geoforma, aquí actúan otros factores tales como el tipo de suelo, la geología del sitio y la actividad que se desarrolle en él (actividad antrópica), ejemplo de ellos es un paisaje denudativo, el cual dependiendo el agente que intervenga (agua o aire) presentará una mayor o menor propensión a deslizarse.

4.5 MOVIMIENTOS (MOV)

Representa la distribución espacial de los deslizamientos ocurridos en el municipio y se utiliza como variable de agrupamiento para el analizar la inestabilidad del área, de tal manera que se pueda establecer relación entre las características del terreno y su estabilidad. Es una variable en formato vectorial que utiliza un punto o un polígono para situar la zona de rotura de cada movimiento en masa.

- **Interés**

Indica la existencia o ausencia de deslizamientos previos, permitiendo establecer las relaciones estadísticas con las variables condicionantes. Muestra las evidencias de deslizamientos pasados, a partir de los cuales es posible establecer la predicción (Santacana, 2001).

4.6 UNIDADES GEOLÓGICAS SUPERFICIALES

Las Unidades Geológicas Superficiales se consideran como un conjunto de materiales que conforman la superficie del terreno hasta profundidades del orden de decenas de metros, e incluyen rocas con diferentes grados de meteorización y fracturamiento, así como suelos y depósitos inconsolidados (Ibañez et al, 2012).

Se definieron las Unidades geológicas superficiales, identificándolas inicialmente de acuerdo a su origen: Rocas (R) o Suelos (S), y posteriormente por sus características litoestratigráficas (composición y estructura) y relieve. La mayoría de unidades geológicas superficiales corresponden a suelos transportados (St) y antrópicos (Sa), también se encontraron áreas con afloramiento de roca dura (Rd).

- **Interés**

Esta variable refleja las características de los diferentes tipos de rocas (ígneas, metamórficas y sedimentarias) y depósitos que se agrupan teniendo en cuenta su origen, así como sus características texturales y propiedades geomecánicas (IDEAM, 2012).

Los depósitos en general son los que presentan menos resistencia y mayor susceptibilidad a los movimientos en masa. Para la ponderación de los depósitos se tiene en cuenta la resistencia y su comportamiento en taludes y laderas del país, a partir de la información existente en la “Clasificación regional de amenaza relativa de movimientos en masa en Colombia” (INGEOMINAS, 2002).

Suelos transportados (por ceniza o agua): Los aluviones son depósitos conformados por materiales gruesos y matriz de finos en los tramos de ambiente montañosos y por materiales finos en los valles amplios. La gradación está ligada a la velocidad de la corriente, por lo general baja en los valles amplios (Duque y Escobar, 2002).

Suelos colapsables: “Los limos venidos de cenizas volcánicas son colapsables, en especial cuando son remoldeados; el LL de las cenizas volcánicas es muy alto y los enlaces iónicos son débiles. Los suelos de origen eólico (y las cenizas tienen algo de eso) son susceptibles, el agua (pocas veces) y el sismo, en casos de licuación, hacen colapsar el suelo” (Ibid). Estos suelos retienen agua y presentan bajos niveles de resistencia

Suelo antrópicos y relleno de escombros: Como su nombre lo indica son producidos por el hombre, estos presentan una mayor inestabilidad, dado que son suelos sueltos, en los cuales no presentan un nivel de cohesión.

Roca dura: Materiales sólidos de la corteza terrestre que afloran en la superficie de la tierra. Según su origen se distinguen: rocas ígneas (intrusivas o plutónicas y efusivas o volcánicas), rocas sedimentarias y metamórficas que resultan de las variaciones por temperatura o presión de los primeros tipos de rocas mencionados. (SGC, s.f)

4.7 GEOLOGÍA

De acuerdo con Ingeominas (2009), esta capa refleja las características de los diferentes tipos de rocas y depósitos que se agrupan teniendo en cuenta el tipo de roca (ígneas, metamórfica y sedimentaria) así como sus características texturales y sus propiedades geomecánicas.

- **Interés**

Quizás es la base más importante para poder establecer las unidades a tener en cuenta en la distribución de los diferentes tipos de materiales a lo largo del territorio colombiano. Cada uno de estos materiales presenta propiedades intrínsecas y ofrece diferentes respuestas ante los agentes que actúan para su alteración y así determinar la susceptibilidad de cada uno de ellos a que se produzca un movimiento en masa (IGAC, 2012).

4.8 TEXTURA

La textura hace referencia al tamaño relativo de las diferentes partículas del suelo menor de 2 mm de diámetro (arenas, limos y arcillas). “Tiene que ver con la facilidad con que se puede trabajar el suelo, la cantidad de agua y aire que retiene y la velocidad con que el agua penetra el suelo” (FAO, s.f).

- **Interés**

Suárez (1998), menciona que el término textura, se refiere al arreglo físico de los granos o partículas. Este arreglo, junto con la mineralogía, el grado de meteorización, y la estructura de discontinuidades determina el comportamiento ingenieril de la mayoría de los suelos residuales. La microestructura incluye la microfábrica, la composición y la fuerza entre partículas. La cementación de grupo de partículas es responsable de altas relaciones de vacíos, bajas densidades, altas resistencias, baja compresibilidad y alta permeabilidad.

La textura, se encuentra relacionada con la velocidad de infiltración, retención y almacenamiento de humedad, aireación (difusión de gases), permeabilidad, intemperismo, volumen explorado por las raíces, manejo de suelos, fertilidad y nutrición mineral entre otras.

4.9 TAXONOMÍA

“Los suelos por su naturaleza contienen elementos químicos y simultáneamente se combinan entre fases sólidas, líquidas y gaseosas. Además, el número de características físicas, químicas y biológicas y sus combinaciones llegan a ser casi infinitas. Asimismo, no es de extrañar las varias propuestas y esquemas distintos para armonizar y correlacionar los tipos de suelo diferentes” (ONU, 2018).

La taxonomía es la clasificación y/o agrupación de los suelos, de manera jerárquica (Orden Suborden, Grupo, Subgrupo, familia, y serie) a partir de sus propiedades químicas, físicas y morfológicas. A la fecha internacionalmente se utiliza la clasificación empleada por el Departamento de Agricultura de los Estados Unidos (USDA), en la cual se manejan 12 Ordenes de suelos (Andisol, Alfisol, Inceptisol, Aridisol, Entisol, Gelisol; Histosol, Mollisol, Oxisol, Spodosol, Ultisol y Vertisol), estos se agrupan de acuerdo a las características y distribuciones de los horizontes del suelo (Epipedón y Endopedón).

El municipio de Versalles, presentan suelos pertenecientes al Orden de los Andisoles, los cuales son suelos oscuros y de origen volcánico, es decir, con propiedades ándicas, ricos en vidrio volcánico o minerales poco cristalinos (Departamento de Agricultura de los Estados Unidos USDA y Servicio de Conservación de Recursos Naturales NRCS, 2014).

- **Interés**

“Los Andisoles generalmente se consideran suelos altamente productivos. Sus componentes minerales únicos dan como resultado altas capacidades de retención de agua. Estos suelos son en su mayoría muy friables y tienen baja densidad aparente. En las áreas que experimentan erupciones volcánicas periódicas, las adiciones de tefra fresca pueden reabastecer los nutrientes y mantener una fertilidad favorable. Un aspecto negativo de la composición mineral única de Andisoles es la propensión a adsorber el fósforo, por lo que no está disponible para las plantas” (USDA y NRCS, 2014).

- **TYPIC FULVUDANDS:**

“Estos suelos tienen una capa superficial que cumple con los requisitos de profundidad, espesor y carbono orgánico para un epipedón melánico pero es más claro en color. Característicamente,

tienen un horizonte O delgado, un epipedón úmbrico (rico en humus con baja saturación de bases) y un horizonte del subsuelo cámbico (desarrollo mínimo del suelo)” (USDA y NRCS, 2014).

El interés de la taxonomía del suelo radica en la categoría que se encuentre, los criterios de diferenciación de las propiedades incluyen distribución de tamaños de las partículas, mineralogía propiedades químicas, físicas, morfológicas, régimen de temperatura y espesor de la zona de raíces, con lo cual se puede determinar el grado de resistencia.

4.10 EROSIÓN

La erosión del suelo es desprendimiento, transporte y deposición del material superficial por acción del agua, el viento, el hielo o el hombre. Generando posiblemente la pérdida del suelo cuando se presenta

- **Interés**

Es importante porque permite establecer la estabilidad del suelo, pues los agentes erosivos poco a poco transportan las partículas, provocando la pérdida del suelo, en terrenos que presenta niveles de erosión severos los suelos se degradan con mayor facilidad, como menciona Lal (2001).

“La erosión del suelo exagera la degradación del mismo, y viceversa. En algunos casos, la disminución de la calidad del suelo, especialmente el debilitamiento de las unidades estructurales, precede a la erosión. En otros, la erosión puede llevar a una disminución en la calidad del suelo y establecer la tendencia degradativa. De hecho, la erosión puede ser una manifestación de la degradación del suelo porque implica la eliminación física del suelo en una dirección vertical y / u horizontal y degrada la calidad del suelo. Es un proceso natural que ha dado forma al paisaje y llevado a la formación de suelos aluviales y loess fértiles. Sin embargo, la aceleración del proceso a través de perturbaciones antropogénicas puede tener graves impactos en el suelo y la calidad ambiental”.

4.11 COBERTURA DE LA TIERRA

Representa la vegetación o cobertura vegetal del área de estudio, y el uso actual del suelo. Esta variable es de tipo cualitativo y se deriva del mapa de cobertura del suelo, se obtiene a través de los sistemas de información geográfica mediante una cubierta vectorial de polígonos. La cobertura de la tierra, influye en la estabilidad de depósitos, suelos y macizos rocosos, núcleos urbanos, explotaciones a cielo abierto.

- **Interés**

El tipo de cobertura y su densidad influyen en la capacidad de infiltración, en la evapotranspiración, entre otras características que presente el suelo y su relación con lo hidrológico. En relación a lo mecánico, las raíces de los árboles ejercen una acción de amarre que brinda estabilidad a las laderas

5. EVALUACIÓN DE LA SUSCEPTIBILIDAD POR MOVIMIENTOS EN MASA EN EL MUNICIPIO DE VERSALLES

Hay diferentes factores que influyen en la ocurrencia de los movimientos en masa, pero las acciones antrópicas son las que más influyen, este tipo de fenómenos no son algo nuevo, pero se agudizan

con la presencia de las precipitaciones y sismos, por lo general los sitios más afectados resultan ser los que poseen una topografía con altas pendientes y modificaciones del terreno, afectando el desarrollo normal de las comunidades.

La ocurrencia de los movimientos en masa en relación con su magnitud, generan cierto atraso para la población, ya que se necesitan abundantes recursos económicos y humanos para la recuperación de las condiciones idóneas, el funcionamiento de las redes, instituciones, etc., recursos con los que en muchas ocasiones no se cuenta, superando la demanda local y nacional y por ende necesitando el apoyo externo.

Las características de las laderas como: los cortes abruptos e inclinados, los suelos desnudos, altas pendientes, las fuertes precipitaciones, entre otros, modifican la estabilidad de las mismas, produciendo susceptibilidad por movimientos en masa. A continuación, se realiza la ponderación y descripción de las variables tenidas en cuenta para la evaluación y análisis de la susceptibilidad por movimientos en masa, en el municipio de Versalles.

5.1 DESCRIPCIÓN DE LAS VARIABLES

Para la evaluación de la susceptibilidad y su análisis se toman en cuenta once (11) factores críticos que afectan de manera directa el municipio de Versalles: pendiente, orientación de las laderas, geomorfología, modelo digital de elevaciones, movimientos (deslizamientos ocurridos en el área de estudio), textura, taxonomía, cobertura de la tierra, unidades geológicas superficiales, geología y erosión, el análisis también se basa en el reconocimiento de campo y la caracterización de los riesgos derivados de terrenos inestables mediante el análisis geomorfológicos, a través del uso de fotografías aéreas, mapas y verificación en campo.

5.1.1 Modelo Digital de Elevación (DEM)

El Modelo Digital de Elevación (DEM) contiene información explícita acerca de la altitud y la distancia de un área específica, al igual que permite calcular diferentes variables. El DEM, se elaboró de con puntos tomados con LIDAR a resolución de 30cm. Esta variable se tomará como base para elaborar diferentes mapas o capas temáticas que posteriormente serán utilizadas para la evaluación de la susceptibilidad a los movimientos en masa (Figura 5.1).

En el DEM de la zona de estudio se reconocen desniveles con elevaciones máximas y mínimas de 2039 a 1736 m.s.n.m., respectivamente. Las mayores elevaciones se observan principalmente hacia el sur del municipio. Las áreas que presentan menor nivel son las correspondientes a geoformas de lomeríos con toques aplanados, drenajes espaciados con poca profundidad y depósitos y terrazas aluviales.

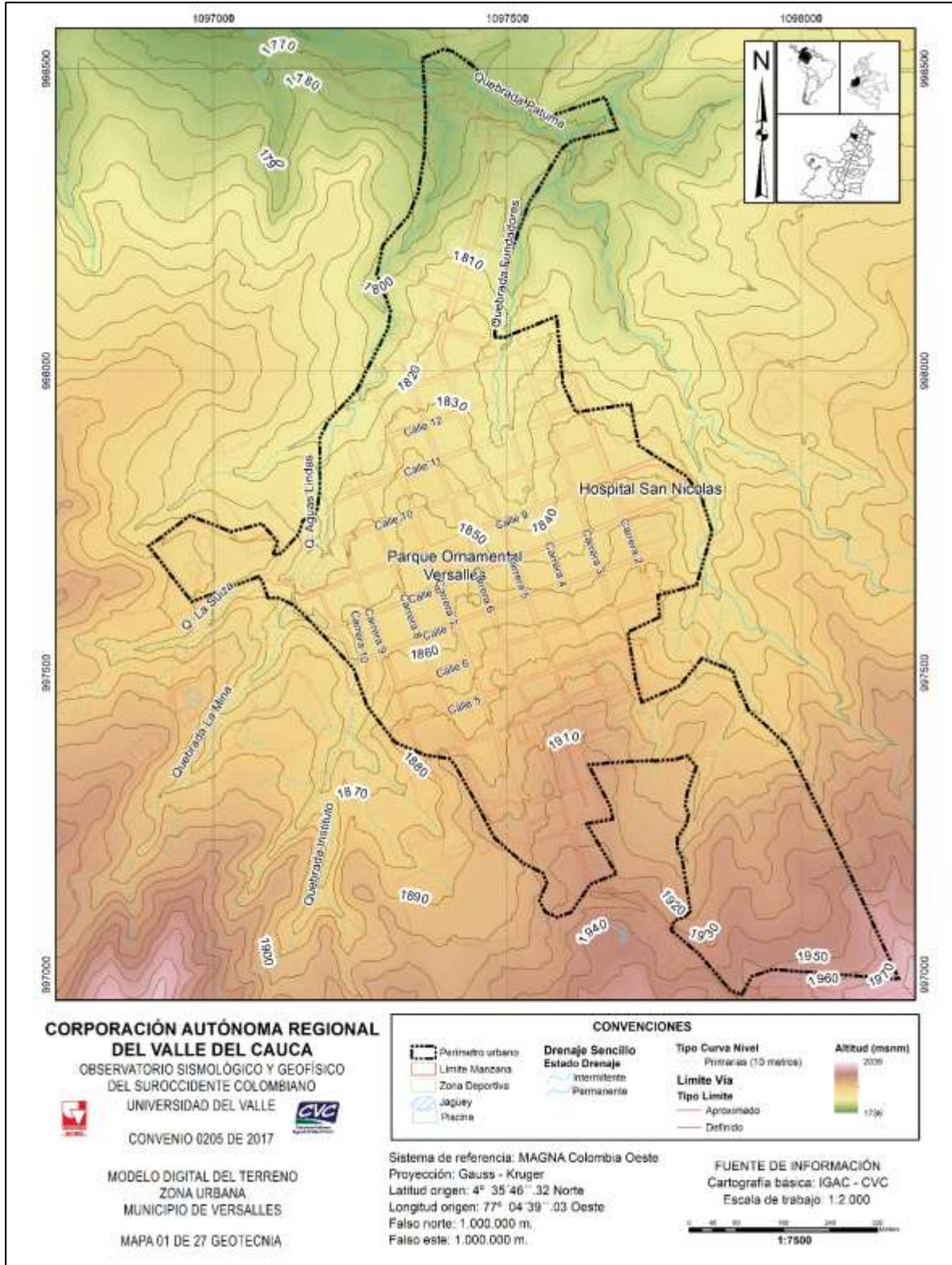


Figura 5.1. Mapa Modelo Digital de Elevación del municipio de Versalles
Fuente: Elaboración propia

5.1.2 Pendiente

El área de estudio corresponde a zonas montañosas con pendientes que van desde ligeramente suaves (planas) a fuertes (extremadamente abruptas), las cuales hacen parte de la cordillera Occidental. En la Tabla 5.1, se muestran los rangos de las pendientes utilizadas en el SGC, adaptado de Van Zuidam 1986.

El relieve de una determinada área juega un papel definitivo en la estabilidad de las laderas, puesto que es necesaria cierta pendiente para que se produzcan los movimientos gravitacionales de masas, en algunos casos aún con pendientes bajas se producen movimientos, de ahí que la cartografía y el análisis de este factor está dentro de las características fundamentales en un estudio que busque evaluar la susceptibilidad.

Tabla 5.1. Categorización de la variable pendiente verificar

| CLASES | RANGOS DE PENDIENTES (Grados) | CLASIFICACIÓN |
|--------|-------------------------------|------------------------|
| 1 | 0-2 | Plano |
| 2 | 2-4 | Suavemente inclinado |
| 3 | 4-8 | Inclinado |
| 4 | 8-16 | Moderadamente abrupto |
| 5 | 16-35 | Abrupto |
| 6 | 35-55 | Muy abrupto |
| 7 | >55 | Extremadamente abrupto |

Fuente: Tomado de Zuidam 1986

Las pendientes del terreno son determinantes en la estabilidad que tenga una determinada área, ya que en pendientes más suaves será menos probable que el terreno se deslice, mientras que en pendientes mayores la probabilidad de que se presenten procesos de movimientos en masa es más alta, cabe aclarar que el hecho de que la pendiente sea suave no lo exime de sufrir dichos procesos. Teniendo en cuenta lo anterior se puede decir que el mapa de pendientes es un elemento imprescindible para la evaluación.

El mapa de pendientes de la zona fue construido a partir de los valores de altura obtenidos del DEM. El cálculo se hace utilizando la función gradiente en dirección X y Y donde se obtienen las alturas y las distancias, resultando una capa raster expresada en grados.

Las pendientes del área de estudio oscilan entre $0^\circ \geq 60^\circ$, el rango más representativo está entre los 8° y 35° , tal como puede observarse en el mapa de pendientes (Figura 5.2), también se denota que existen pocas áreas planas, con esta variable, se puede intuir que la mayor parte del área presenta zonas propensas a sufrir movimientos en masa, dado que entre mayor sea el gradiente que presente una ladera mayor será la posibilidad de que ocurran este tipo de evento.

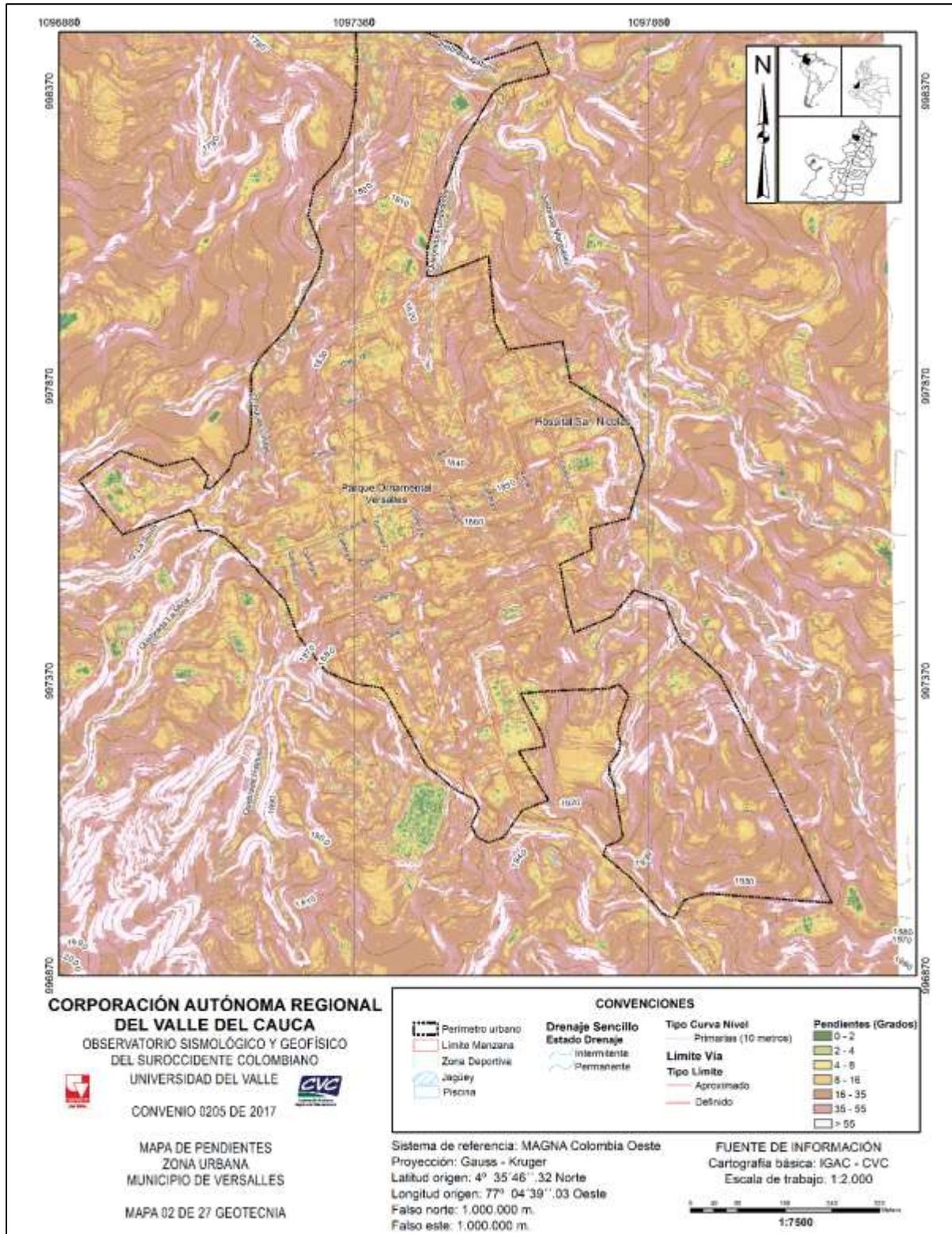


Figura 5.2. Mapa de pendientes del municipio de Versalles
Fuente: Elaboración propia

5.1.3 Orientación de las laderas

“Definida como la orientación de la ladera en un punto y que representa la dirección de máxima pendiente calculada para cada celda. Se calcula a partir del ángulo existente entre el norte geográfico y la proyección sobre el plano horizontal del vector normal a la superficie de un punto dado” (Santacana, 2001). Esta variable posee valores que van de 1° a 360° y valores de -1 que indican zonas planas (Tabla 5.2).

Según el ángulo de orientación de las laderas, se da el ángulo de incidencia de los rayos del sol, es decir en horas del mediodía los rayos del sol pueden tener una inclinación de aproximadamente 55°, lo que indica que la ladera recibe una radiación vertical, mientras que en el periodo de la umbría el ángulo de la pendiente es equivalente a 20°, siendo de esta manera más débil y escasa la cantidad de energía por unidad de superficie recibida, ya que la reflexión tiende a aumentar cuando el ángulo de incidencia disminuye.

Tabla 5.2. Dirección de la ladera

| Clase | Rango (grados) | Dirección |
|-------|----------------|--------------|
| 0 | -1 | Plano |
| 1 | 0 – 22,5 | Norte |
| 2 | 22,5 – 67,5 | Noreste |
| 3 | 67,5 – 112,5 | Este |
| 4 | 112,5 – 157,5 | Sureste |
| 5 | 157,5 – 202,5 | Sur |
| 6 | 202,5 – 247,5 | Suroccidente |
| 7 | 247,5 – 292,5 | Occidente |
| 8 | 292,5 – 337,5 | Noroccidente |
| 1 | 337,5 - 360 | Norte |

Fuente: ArcGIS

El mapa que representa la orientación de las laderas (Figura 5.3), ha sido generado a partir de los datos contenidos en el Modelo Digital de Elevación DEM, mediante la utilización del Sistema de Información Geográfica (SIG), el programa realiza los cálculos, permitiendo conocer la ubicación de las superficies. Los procesos de movimientos en masa son producidos por la inestabilidad del terreno que ocasiona el agua y el fracturamiento de la roca. El mapa se calculó utilizando los datos de elevación, definiendo la dirección mediante una capa raster, expresado en grados, en base a los puntos cardinales, presentando tendencias de orientación SE, N – S, NE - SW, SE – S y NW.

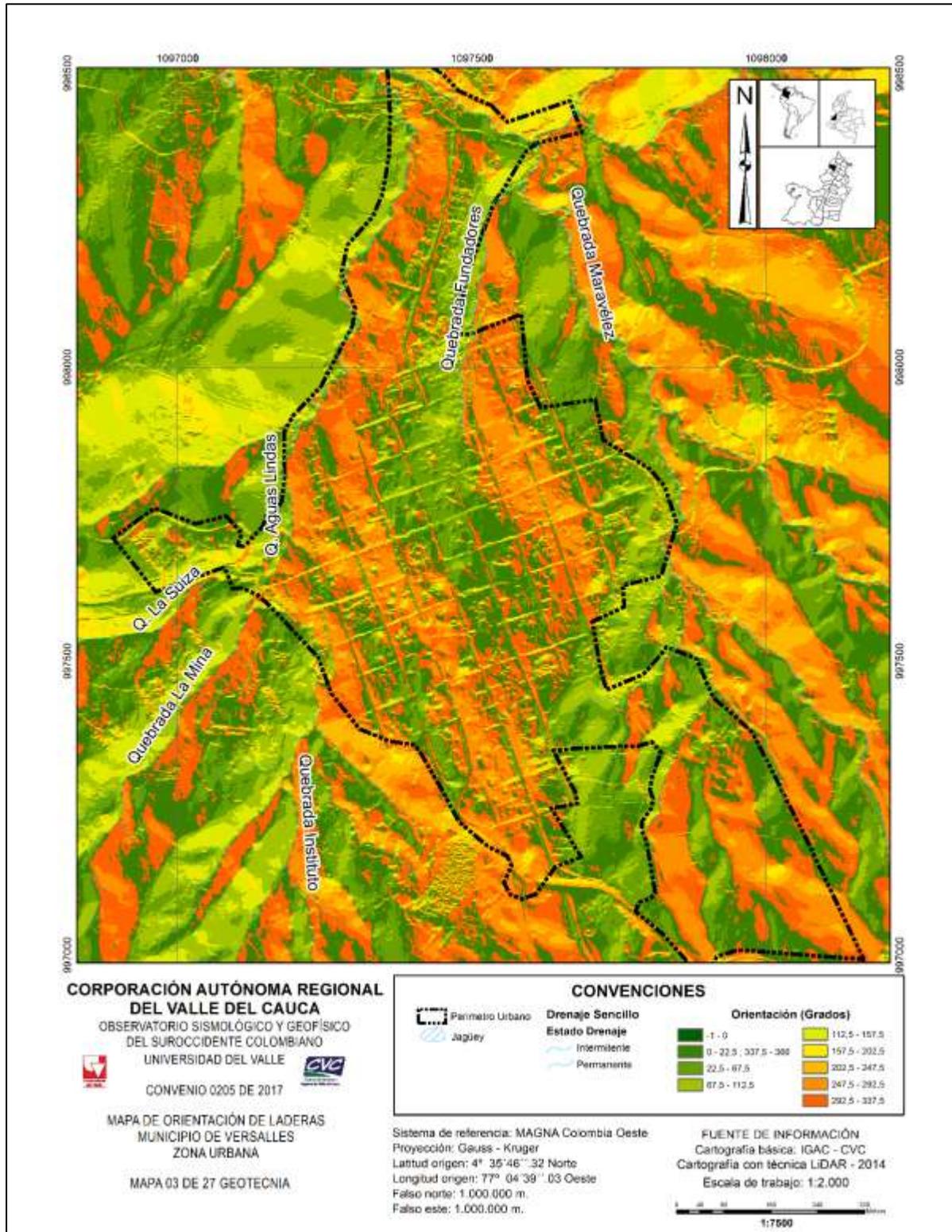


Figura 5.3. Mapa orientación de las laderas del municipio de Versalles
Fuente: Elaboración propia

5.1.4 Geomorfología

Para la clasificación geomorfológica se tuvo en cuenta las características genéticas, el tipo de paisaje y relieve, la expresión morfológica, la posición topográfica, el grado de disección, el patrón de drenaje, el patrón textural y la densidad de fracturamiento. Para la descripción y clasificación de las unidades geomorfológicas en el municipio de Versalles, se utilizó la categorización geomorfofogenética del Servicio Geológico Colombiano (Carvajal, 2012). También se tuvo en cuenta las unidades geológicas cartografiadas a la escala del proyecto, 1:2.000.

En el análisis geomorfológico se usaron los datos de teledetección y la cartografía regional o local. La caracterización geomorfológica comprendió el levantamiento de datos estratigráficos y datos que inciden en el comportamiento mecánico de los materiales, caracterización sobre litología y rasgos estructurales relacionados con diaclasas, fallas y otros atributos semejantes, así como la descripción de secuencias estratigráficas en afloramientos y definición de puntos de muestreo (Figura 5.4). El mapa de geomorfología se elaboró por medio de investigación, registro de fotografías aéreas, salidas a campo entre otros, para mayor detalle, consultar el *“informe técnico de geología y geomorfología para la zonificación de amenaza por movimientos en masa en la zona urbana del municipio de Versalles”*.

Regionalmente el municipio de Versalles se ubica sobre las estribaciones de la Cordillera Occidental, presentando un relieve irregular, montañoso, de origen estructural dominado principalmente por pendientes estructurales y fallas, cuya expresión está claramente definida por cambios altimétricos, silletas, hombreras, facetas trapezoidales, colinas y cauces deflectados.

En el periodo Cuaternario, este relieve irregular y montañoso fue cubierto por espesos depósitos de ceniza del complejo Ruiz-Tolima y Cerro Machín, que modificaron el paisaje, suavizando las crestas y generando nuevas geoformas de origen denudativo y agradacional, con depositación lenta o súbita, por la acción libre o conjunta de los agentes de transporte y la gravedad. En las quebradas que conforman el área urbana los procesos de erosión y depositación fluvial, dieron origen a geoformas que ocupan las zonas aledañas a las mismas.

De otra parte, la actividad antrópica, especialmente la urbanización espontánea, modificó en algunos sectores la morfología del paisaje natural, generando nuevas formas y nuevos procesos que modifican el terreno y que se convierten en amenazas para sus habitantes generando procesos erosivos y movimientos en masa. Esto se puede ver en la quebrada Fundadores donde se observa un fenómeno de remoción en masa de tipo hundimiento o socavamiento, el cual sigue avanzando en dirección sur. En campo esta área se identificó como un relleno antrópico sobre la cuenca de la misma quebrada.

En el área urbana de Versalles se destacan tres tipos de morfología:

1. Sectores montañosos conformados principalmente por rocas del Cretácico, Formación Volcánica (Kv); cubiertas por cenizas volcánicas de espesores métricos que han suavizado

- las crestas, pero aún con predominio de pendientes moderadas a altas, con presencia de laderas onduladas, localizadas en el 90% del casco urbano del municipio.
2. Zonas suavemente inclinadas a planas, donde se tienen básicamente depósitos Cuaternarios de distinto origen, pero especialmente de origen fluvial, asociados con la actividad de las quebradas La Suiza, Maravéz y Patuma; estas geformas se presentan en los límites del casco urbano.
 3. Zonas asociadas a actividad antrópica: sobre los anteriores paisajes, que han generado geformas recientes, especialmente relacionadas con rellenos realizados con fines de urbanización.

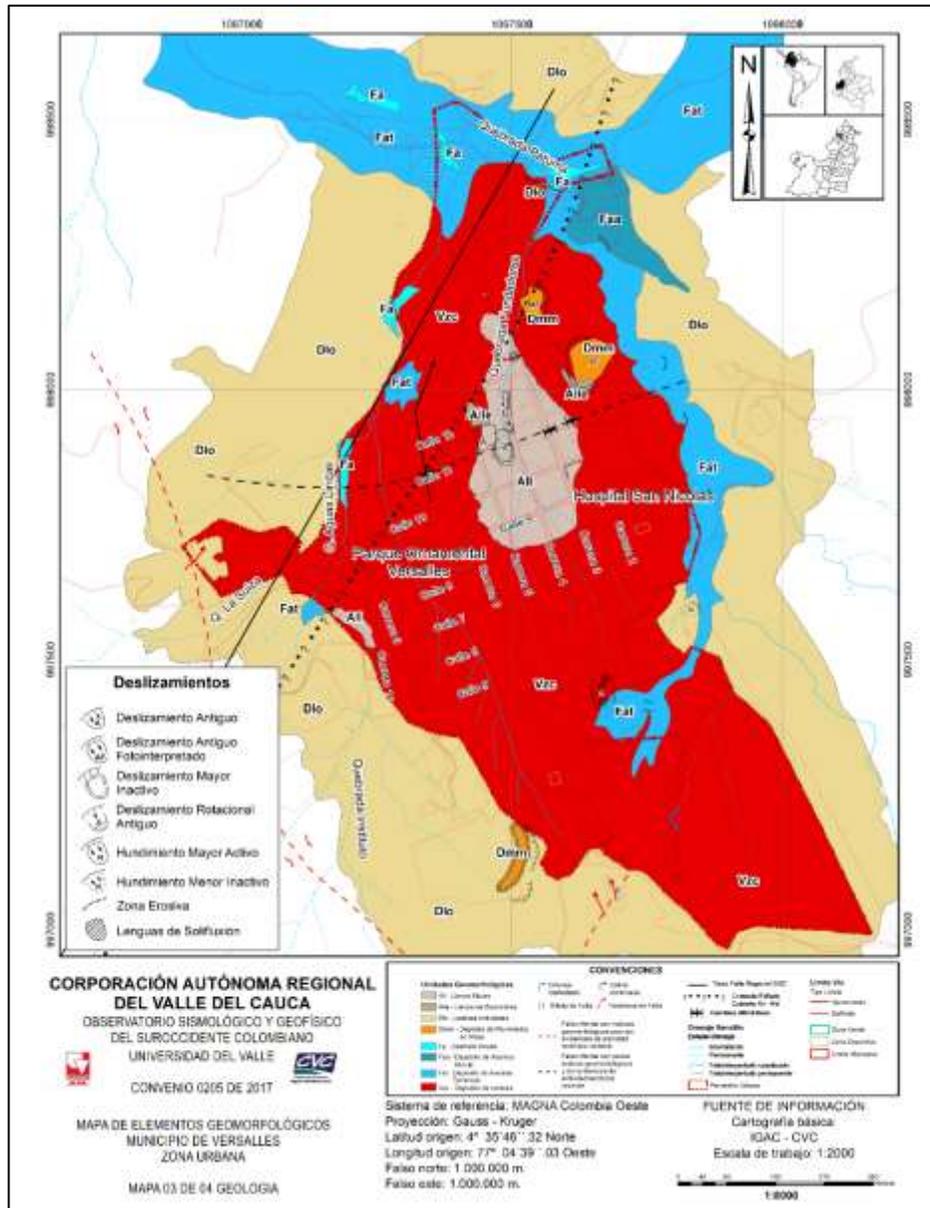


Figura 5.4. Mapa geomorfológico del municipio de Versalles
Fuente: Elaboración propia

5.1.5 Movimientos

Los procesos de remoción en masa tienen múltiples causas, tales como las condiciones geológicas, geomorfológicas, intervención antrópica y factores externos como las precipitaciones y los terremotos, los últimos, se consideran el estímulo que puede generar una respuesta casi inmediata de movilizar grandes volúmenes de material. Igualmente, la fecha y distribución de los deslizamientos permite analizar la propensión de la zona ante el fenómeno natural.

La urbanización modificó en algunos sectores la morfología del paisaje natural, generando nuevas formas y nuevos procesos que modifican el terreno y que se convierten en amenazas para sus habitantes generando procesos erosivos y movimientos en masa. Esto se puede observar en la quebrada Fundadores donde se diferencia el fenómeno de tubificación generado por el flujo y filtración de agua en el lugar. El cual se identificó en campo como un relleno antrópico sobre la cuenca de la misma quebrada. La Tubificación (piping) corresponde a la erosión gradual y socavación interna de una masa de suelo debido a la filtración de agua (PMA: GCA, 2007).

Según los registros de historicidad y la geomorfología, en la zona urbana del municipio de Versalles se han presentado 19 deslizamientos, de los cuales cinco (5) corresponden al fenómeno de tubificación. A continuación, en la Figura 5.5 se muestra la distribución de cada uno de los movimientos.

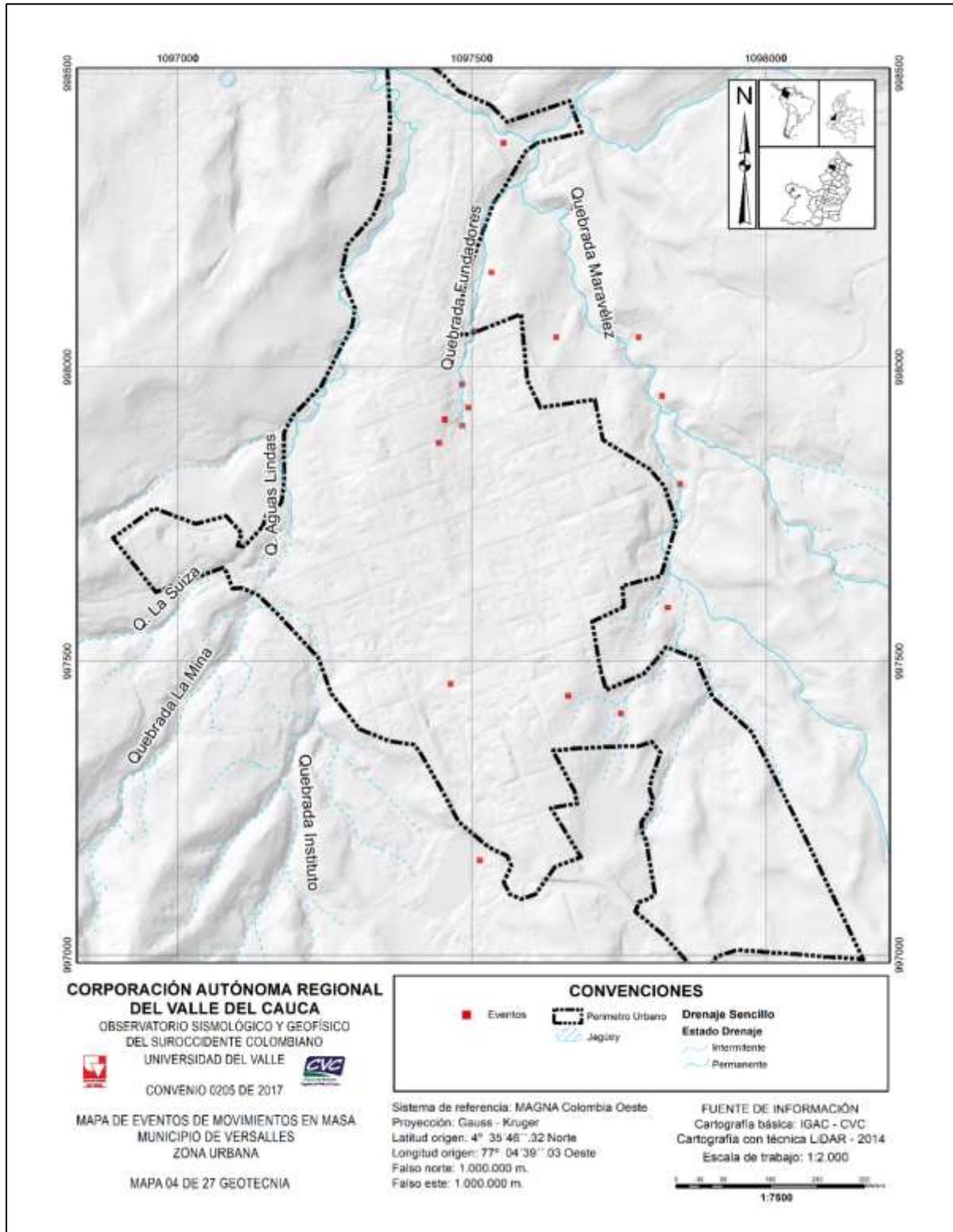


Figura 5.5. Deslizamientos en masa en el municipio de Versalles
Fuente: Elaboración propia

5.1.6 Unidades Geológicas Superficiales

Para la geología local y geología para ingeniería se hicieron visitas a campo y se verificó la información recopilada en oficina, estableciendo un levantamiento de datos estratigráficos, de comportamiento mecánico de los materiales, caracterización litología y rasgos estructurales relacionados con diaclasas, fallas y otros atributos.

Suelos transportados: Son materiales que han sufrido algún tipo de transporte, ya sea por medios naturales de tipo fluvial o aluvial, eólico, glacial, gravedad o por medios relacionados con las actividades del hombre (antrópicos). Están conformados por materiales heterogéneos, cuya composición depende de la fuente de origen, no están consolidados, son susceptibles a generar movimientos en masa y se distribuyen desde las zonas semiplanas hasta las zonas de alta pendiente. Dentro de las unidades de suelo transportado se tienen: Suelo transportado de ceniza, Suelo transportado aluvial, Suelo antrópico, Suelo antrópico de relleno de escombros. Adicional a los suelos transportados, en el municipio se identificaron áreas con afloramientos rocosos. La Tabla 5.3 exhibe las siglas con la cual se representa cada unidad

Tabla 5.3. Siglas de las Unidades geológicas superficiales del municipio de Versalles

| UNIDAD GEOLÓGICA SUPERFICIAL | SIGNIFICADO |
|------------------------------|---|
| Sa | Suelo antrópico |
| Stc | Suelo transportado de ceniza |
| Sale | Suelo antrópico de relleno de escombros |
| Rd | Roca dura |
| Sta | Suelo transportado aluvial |

Fuente: Elaboración propia

El mapa realizado en este estudio (Figura 5.6), presenta diferentes unidades geológicas donde se identifican suelos transportados por diferentes agentes y áreas de roca dura. Predominan los suelos transportados de ceniza volcánica, los cuales cubren aproximadamente el 90 por ciento del territorio, la parte restante se divide entre la roca dura; ubicada al occidente del casco urbano del municipio (en el sector de la cancha) y al norte (cerca de la quebrada Patuma), suelo antrópico (Rellenos y Relleno de escombros), situados en el centro del municipio y por último suelos aluviales, localizados primordialmente en la periferia, (áreas de ladera).

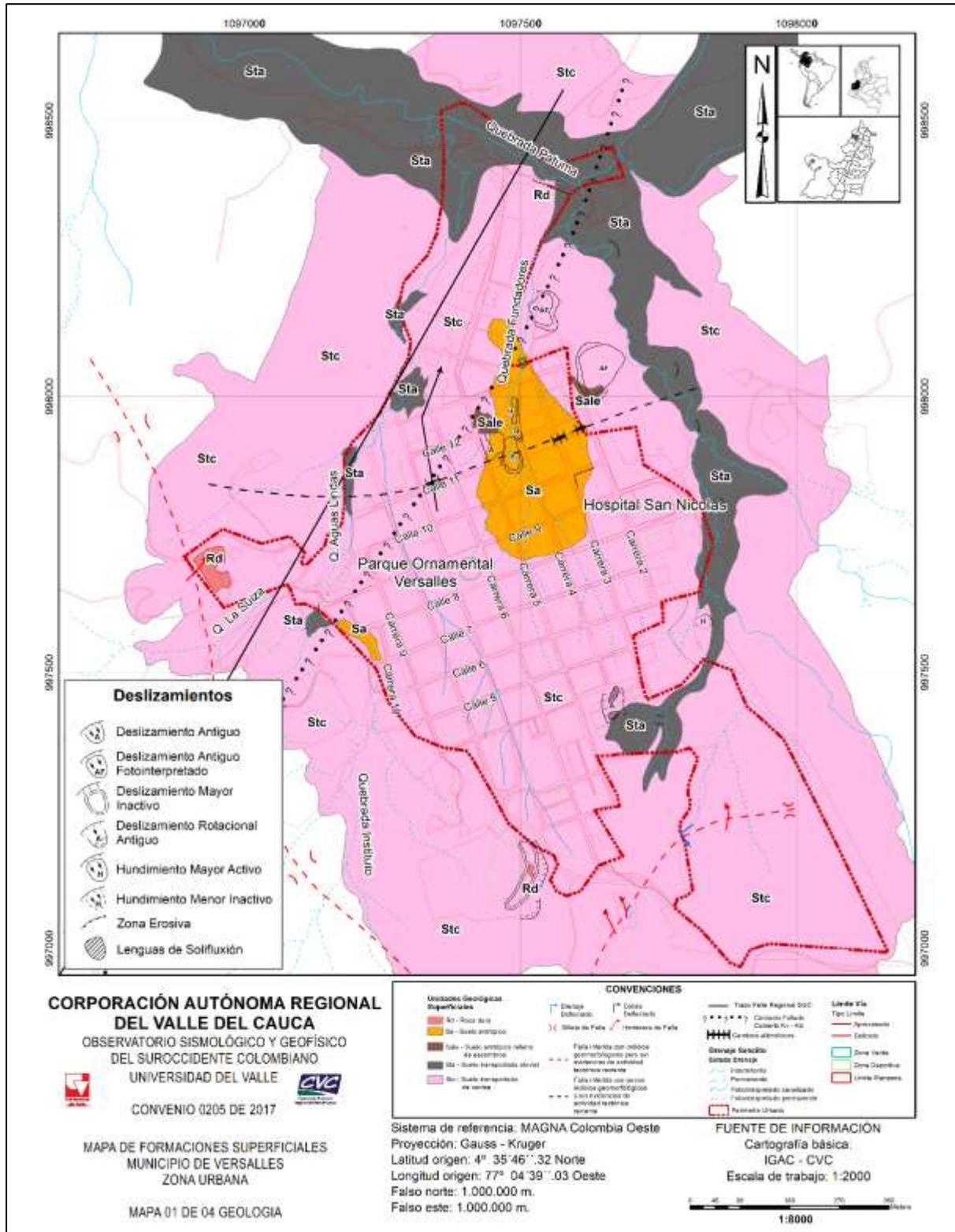


Figura 5.6. Mapa Unidades Geológicas Superficiales del municipio de Versalles
Fuente: Elaboración propia

5.1.7 Geología

La geología es uno de los factores más importantes en una evaluación de la susceptibilidad por fenómenos de movimientos en masa, este factor es uno de los condicionantes principales en la aparición del ya mencionado fenómeno. A continuación, se describe las características geológicas del casco urbano del municipio.

Dentro de los límites urbanos del municipio la geología detallada, está conformada de base a techo por rocas dioríticas de la Formación Volcánica (Kv), suprayacidas generalmente por dos secuencias de cenizas volcánicas de composición dacítica (QPcv) que alcanzan un espesor máximo de 6m y a su vez están separadas por un hiato o tiempo de no depositación. También se observaron depósitos aluviales como terrazas y flujos de escombros en las áreas de influencia de las quebradas La Suiza, La Mina, Maravélez y Patuma (Figura 5.7).

Formación Volcánica (Kv): está conformada en el área urbana por una roca fanerítica básica de color gris verdoso, con fenocristales de piroxenos; se encuentra altamente meteorizada y presenta venas de cuarzo y plagioclasa. Esta roca fue clasificada como una diorita (epidota 40%, piroxeno 10% y plagioclasas 50%) que afloran como roca únicamente en el sector de la cancha municipal ya que en el 99% del área urbana fue observada como un saprolito de color rojo con un espesor máximo de 4.5m. El comportamiento de este material cuando está expuesto a la humedad es muy plástico.

Complejo Estructural Dagua (Kd): Está representado en el municipio por rocas metasedimentarias, que afloran al norte del casco urbano sobre la vía que conduce al antiguo matadero. En este sitio se encontró un pequeño afloramiento de metarenitas silíceas diaclasadas, que aún conservan indicios de su estratificación; suprayacidas por depósitos de ceniza.

También afloran en la zona del Instituto de Promoción Social sobre la vía interna, como un basamento metasedimentario de color amarillo crema, que presenta foliación muy marcada. Se logró diferenciar que su protolito corresponde a una arenisca de grano fino a muy fino, estas rocas están suprayacidas por una capa de cenizas volcánicas de 1.5m.

Depósitos de Cenizas Volcánicas (QPcv): Esta unidad es la formación más importante encontrada en la zona de estudio. Está conformada por cenizas volcánicas de composición dacítica (cuarzo, plagioclasa, biotita, anfíbol y matriz vítrea). Estas cenizas están dispuestas de manera conforme sobre las rocas y saprolitos de la Formación Volcánica (Kv) y las rocas del Grupo Dagua (Kd).

Se reconocieron dos eventos deposicionales; uno inferior que corresponde a cenizas dacíticas de color amarillo ocre, separado por un nivel centimétrico de color naranja que corresponde con un periodo de no depositación o erosión (hiato). Suprayaciendo este se dispone otro evento de cenizas volcánicas dacíticas de color habano claro en muestra seca. El espesor promedio para cada uno de los eventos es de 2m; sin embargo, en algunos sectores la columna de cenizas llega a tener un espesor de 6m en la Estación E30 (carrera 6 entre calles 3 y 4).

Depósitos Aluviales (Qal): A esta formación corresponden los materiales depositados por las quebradas La Suiza, La Mina, Maravélez, Fundadores y Patuma.

La quebrada La Suiza se encuentra localizada en el extremo occidental del área urbana y está caracterizada por presentar depósitos o flujos de escombros producto de avenidas torrenciales. Esto se evidenció en el sector norte del barrio los Olivos, donde se observan este tipo de depósitos. Estos depósitos son clastosoportados, sin gradación, pobremente seleccionado, con presencia de bloques métricos (hasta 1,5m) redondeados a subredondeados de roca diorítica, también contiene bloques subangulares y aplanados de metarenita de color habano con foliación incipiente y chert con bandeamiento. La matriz es granular silíceo.

En el mismo barrio sobre la calle 9 en la intersección entre las quebradas La Suiza y la quebrada La Mina, se observó un depósito aluvial de flujo de escombros de 6m de altura matriz soportado de ceniza con bloques de rocas básicas de hasta 60 cm.

En el área urbana, la quebrada Fundadores se encuentra modificada y controlada por la urbanización del municipio; únicamente se observaron sus depósitos en el noreste, en el punto donde se une con la quebrada Maravélez. En dicho lugar donde se puede observar un depósito aluvial clastosoportado de 1,0m de espesor, con bloques de hasta 0,6m de bien a moderadamente seleccionados; de composición básica. También se observaron metarenitas blancas a habanas angulosas, chert y fragmentos de ladrillo. Este depósito suprayace un saprolito de color naranja muy húmedo que en ocasiones conserva la estructura interna de la roca y que al tocarla se deshace.

- Geología estructural

Dentro del área de estudio, se pudieron diferenciar algunos rasgos en superficie que permiten identificar la existencia de fallas geológicas, pero que no son contundentes para definir con certeza los trazos ni la actividad de las mismas. Se representaron los siguientes rasgos estructurales:

Falla inferida con indicios geomorfológicos, pero sin evidencias de actividad tectónica reciente: Corresponden a trazos marcados por la presencia de hombreras, silletas de falla, cambios de pendiente, colinas y cauces deflectados identificados en campo y fotografías aéreas. Al oeste del perímetro urbano se encuentra una de estas estructuras. Tiene una dirección NW-SE. De igual manera se identificó un trazo de falla del mismo tipo al sur con orientación NE-SW.

Trazo Falla Regional SGC: Corresponde a un trazo de falla reportado en la Plancha 242 – Zarzal (Nivia et al, 1995). Este trazo no se evidenció ni verificó en el trabajo de campo, pero existen evidencias regionales para ubicarlo en el mapa local.

Contacto Fallado Cubierto Kv – Kd: Esta estructura pone en contacto las rocas de la Formación Volcánica (Kv) con las rocas del grupo Dagua formando una cuña que involucra el trazo de falla regional SGC, y es cerrada al Sur por la falla inferida del Oeste de la zona urbana. Este contacto fallado se encuentra cubierto por las Cenizas Volcánicas de la Formación QPcv.

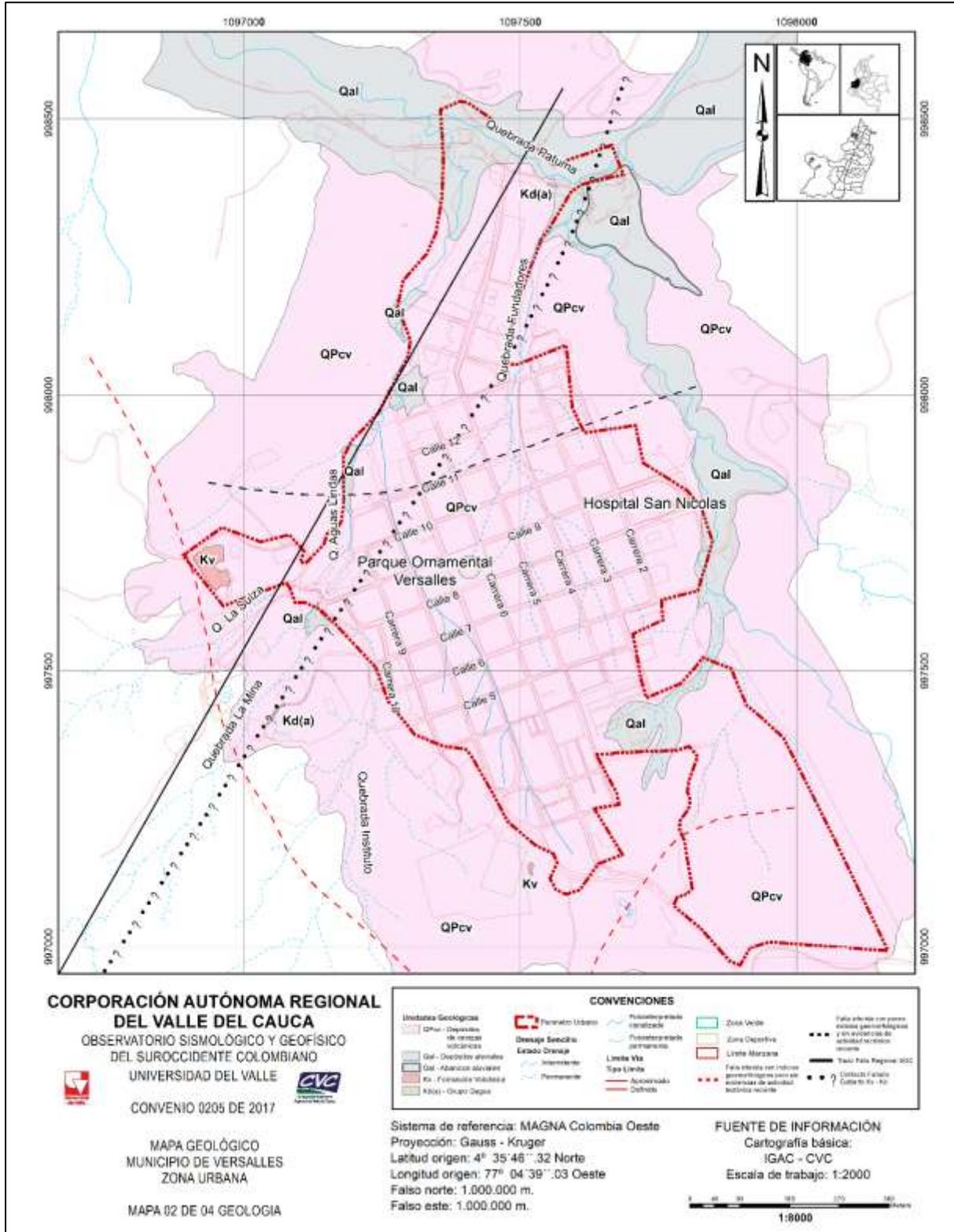


Figura 5.7. Mapa geológico municipio de Versalles
Fuente: Elaboración propia

5.1.8 Textura del suelo

Conocer esta granulometría es esencial para cualquier estudio del suelo (ya sea desde un punto de vista de su composición). Para clasificar a los constituyentes del suelo, según su tamaño de partícula se han establecido muchas clasificaciones granulométricas. Básicamente todas aceptan los términos de grava, arena, limo y arcilla, pero difieren en los valores de los límites establecidos para definir cada clase. De todas estas escalas granulométricas, son la de Atterberg o Internacional y el triángulo textural de la USDA las más usadas en este tipo de estudios.

Las fracciones usuales son:

- Gravias > 2 mm
- Arenas 2-0,02 mm; con 2-0,2 mm para las arenas gruesas y 0,2-0,02 mm para las arenas finas (a veces de 0,2-0,05)
- Limos 0,02 - 0,002 mm, es decir de 20-2 micras (y a veces 0,05 - 0,002)
- Arcillas <2 micras; con las arcillas gruesas de 2-0,2 micras y las arcillas finas menores de 0,2 micras

Adicional a la clasificación anterior la **Tabla 5.4**, enseña las clases de texturas clasificadas por la USDA y el porcentaje de cada componente. la Figura 5.8 muestra la distribución para el área de estudio, donde se aprecia que predominan texturas medias (cuya composición tiene un porcentaje de arcillas menos al 30 y arenas entre 20 y 50%), las cuales se localizan en la periferia del municipio mientras el centro se encuentra pavimentado. Desde el punto de vista agrícola, las texturas medias o francas pueden favorecer el desarrollo de la vegetación y de cultivos. En relación con los deslizamientos, si el sustrato es de tipo arcilloso, la parte superior puede meteorizarse, desarrollando fisuras por donde puede infiltrarse el agua y dar lugar a fallas del material.

Tabla 5.4. Clases texturales del suelo

| Textura general | Porcentaje | | | Clase de textura |
|---|------------|--------|---------|-------------------------|
| | Arena | Limo | Arcilla | |
| Textura gruesa (Suelos Arenosos) | 86-100 | 0-14 | 0-10 | Arenoso |
| | 70-86 | 0-30 | 0-15 | Franco arenoso |
| Textura moderadamente gruesa (Suelos Francos) | 50-70 | 0-50 | 0-20 | Franco arenoso |
| | 23-52 | 28-50 | 7-27 | Franco arenoso |
| Textura media (Suelos Francos) | 20-50 | 74-88 | 0-27 | Franco limoso |
| | 0-20 | 88-100 | 0-12 | Limoso |
| Textura moderadamente fina (Suelos Francos) | 20-45 | 15-52 | 27-40 | Franco arcilloso |
| | 45-80 | 0-28 | 20-35 | Franco areno arcilloso |
| | 0-20 | 40-73 | 27-40 | Franco limoso arcilloso |
| Textura fina (Suelos Arcillosos) | 45-65 | 0-20 | 35-55 | Arcilloso arenoso |
| | 0-20 | 40-60 | 40-60 | Arcilloso limoso |
| | 0-45 | 0-40 | 40-100 | Arcilloso |

Fuente: adaptado de la clasificación del Departamento de Agricultura de los Estados Unidos- USDA s.f (por sus siglas en inglés, United States Department of Agriculture)

http://www.fao.org/tempref/FI/CDrom/FAO_Training/FAO_Training/General/x6706s/x6706s06.htm#54a

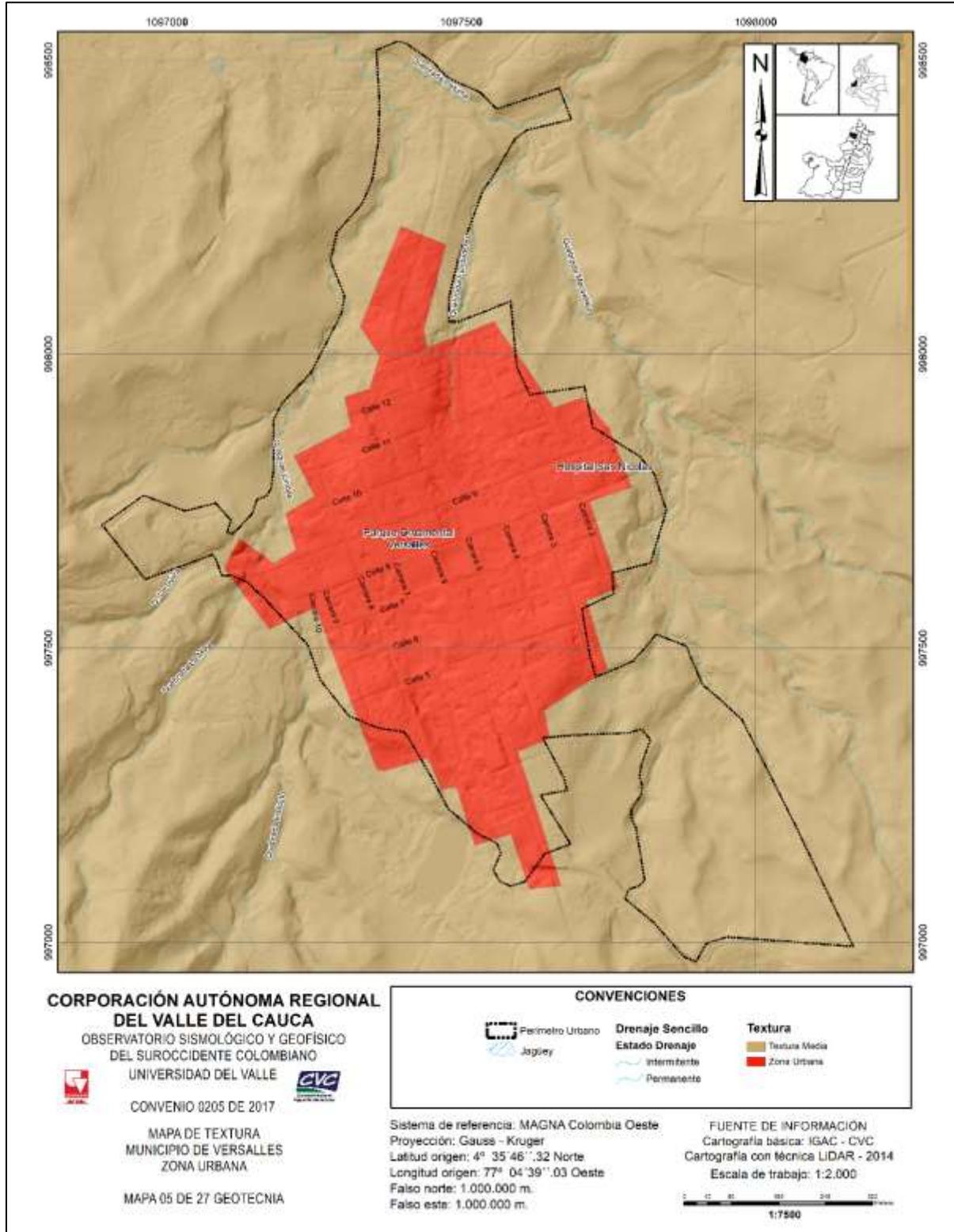


Figura 5.8. Mapa de textura del suelo municipio de Versalles
Fuente: Elaboración propia

5.1.9 Taxonomía del suelo

El mapa de taxonomía (Figura 5.9), muestra que toda la zona urbana del municipio de Versalles se encuentra abarcada por el componente Typic Fulvudands, los cuales están compuestos por depósitos superficiales clásticos y piroclásticos no consolidados (ceniza volcánica). El cual cubre principalmente los costados norte, sur, oriente y occidente, estos son. Esta taxonomía corresponde a suelos bien drenados que tienen fertilidad alta, son profundos, la textura varía entre moderadamente finas y finas.

5.1.10 Erosión

Desde la perspectiva geológica y de formación del paisaje, la erosión es entendida como parte del proceso de morfogénesis a través del cual se alteran y moldean las formas terrestres. Desde este punto de vista, la configuración que hoy se tiene de la superficie de la tierra, se debe a los procesos continuos de agradación y degradación que, en tiempo geológico han moldeado la superficie. Estos procesos geomorfológicos están relacionados con factores internos (litología, estructura, tectónica, volcanismo y topografía) y externos (clima: temperatura y precipitación; organismos; y acción antrópica).

En general, existen dos tipos de erosión: la hídrica y la eólica. La erosión hídrica es causada por la acción del agua (lluvia, ríos y mares), en las zonas de ladera, cuando el suelo está sin cobertura vegetal, las gotas de lluvia o el riego, ayudadas por la fuerza gravitacional, arrastran las partículas formando zanjas o cárcavas, e incluso causando movimientos en masa en los cuales se desplaza un gran volumen de suelo. Por otra parte, la erosión eólica es causada por el viento que levanta y transporta las partículas del suelo, produciendo acumulaciones (dunas o médanos) y torbellinos de polvo. En este sentido, no solamente se erosionan los suelos, con ellos se pierden los nutrientes, la materia orgánica, la retención de humedad, la profundidad de los suelos, se disminuye la productividad, lo cual conlleva a la pobreza y el desarraigo de la tierra (SIAC (Sistema de Información Ambiental en Colombia), s.f)

En la Tabla 5.5 se presenta algunos tipos de erosión hídrica, su acción y los efectos que puede llegar a causar. Por otro lado, en relación con la pérdida de suelo la erosión se clasifica en ligera, moderada y severa, según el IGAC cada se definen así:

Erosión ligera: Las pérdidas de suelo apenas son apreciables y de tipo laminar.

Erosión moderada: Las pérdidas de suelo están entre el 25% y el 75% de la capa superficial, es claramente apreciable y se observa erosión en surquillos.

Erosión severa: El suelo superficial ha sido removido prácticamente todo. Presenta cárcavas superficiales y algunas poco profundas

Tabla 5.5. Tipos de erosión y efectos

| TIPO | ACCIÓN | EFFECTOS |
|---|--|--|
| Erosión por lluvias: la acción de las aguas lluvias, con la contribución de otros agentes climáticos, sobre la superficie interfluvio. | Saltación Pluvial: Desalojo y dispersión por gotas de lluvia | Impacto de la gota de agua |
| | | Reducción de la capa de infiltración |
| | | Dstrucción de los poros y de las fisuras del suelo |

| TIPO | ACCIÓN | EFFECTOS |
|--|--|---|
| Nota: las crestas del interfluvio son laderas(naturales) y Taludes (construidos) | Escurecimiento superficial difuso | |
| | Erosión laminar: Arrastre uniforme de capas de suelo a muy corta distancia | Escurecimiento de suelos limosos y arenosos |
| | | Es fuente importante de sedimentos |
| | Escurecimiento superficial concentrado | |
| | Surcos de erosión: El escurecimiento concentrado forma pequeños canales paralelos. | Destrucción de taludes y laderas |
| | | Alto aporte de sedimentos |
| | | Los canales se borran con perfilado y labranza |
| | Cárcavas: Son zanjones profundos y de gran tamaño, por lo tanto son difíciles de controlar. | Acentuar el relieve promoviendo otras formas de inestabilidad |
| | | Fuente importante de sedimentos |
| | | Corrección de alto costo |
| Erosión interna: Por flujo subterráneo | Escurecimiento subsuperficial | |
| | Tubificación y cavernas: Debilitamiento interno | Puede originar manantiales, cárcavas y hundimiento |
| Erosión Fluvial | Socavación de fondo | Profundiza el fondo de los cauces naturales |
| | Socavación lateral | Elimina el soporte de las laderas |
| | Descarga torrencial | Efectos devastadores en las márgenes del cauce |

Fuente: Adaptado de Duque, G., & Escobar, C. E. (2002). 1. Mecánica de los suelos I

La Figura 5.10 muestra que en el municipio de Versalles la erosión ligera abarca el 98% del área urbana, la moderada se presenta en pequeñas franjas al costado occidental (borde del límite urbano), en el barrio Las Olivas, proveniente de los arrastres que genera la Quebrada la Suiza. Lo anterior indica que en el municipio la pérdida de suelos por la erosión es mínima, y su aporte a la generación de movimientos en masa es leve.

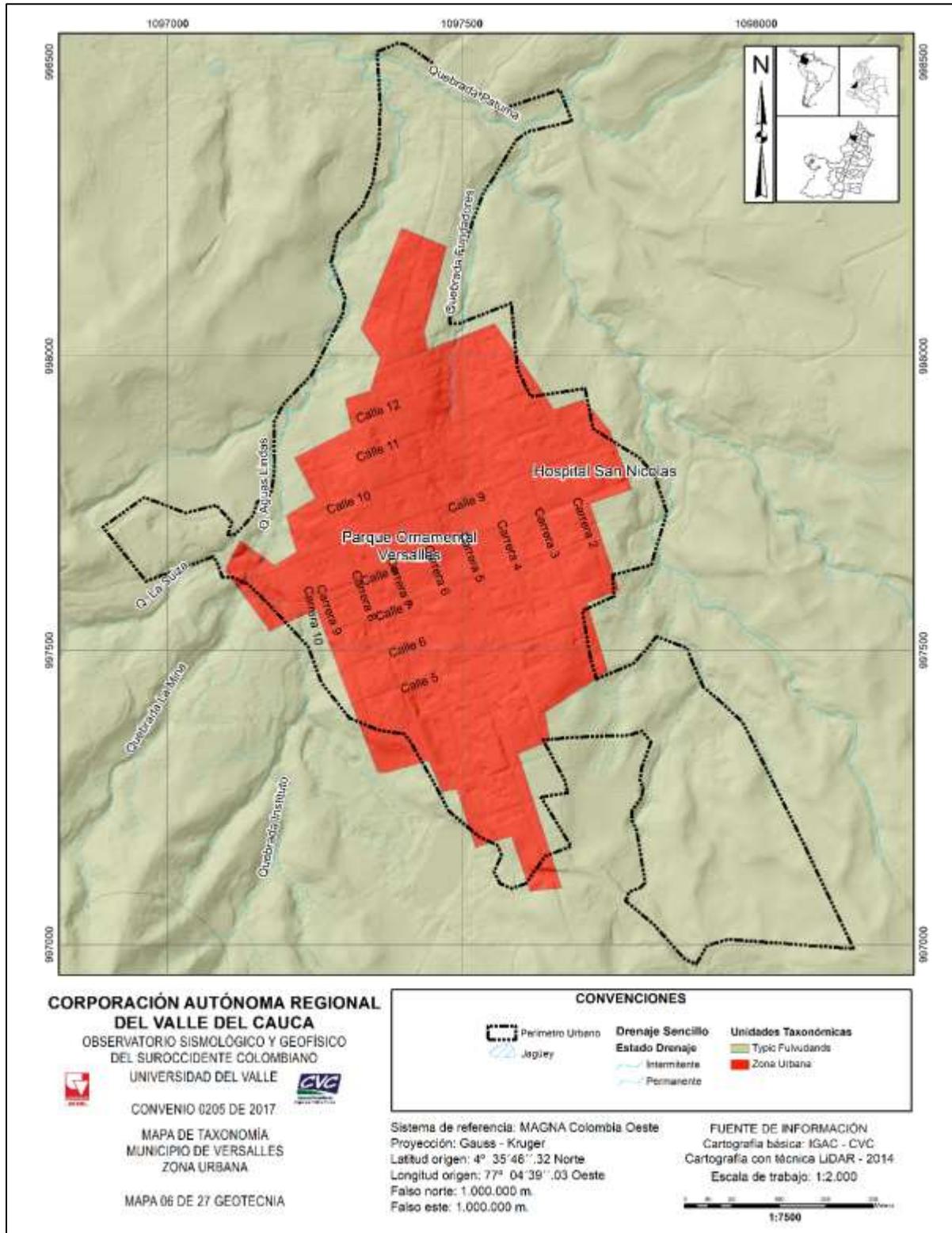


Figura 5.9. Mapa taxonomía del suelo municipio de Versalles
Fuente: Elaboración propia

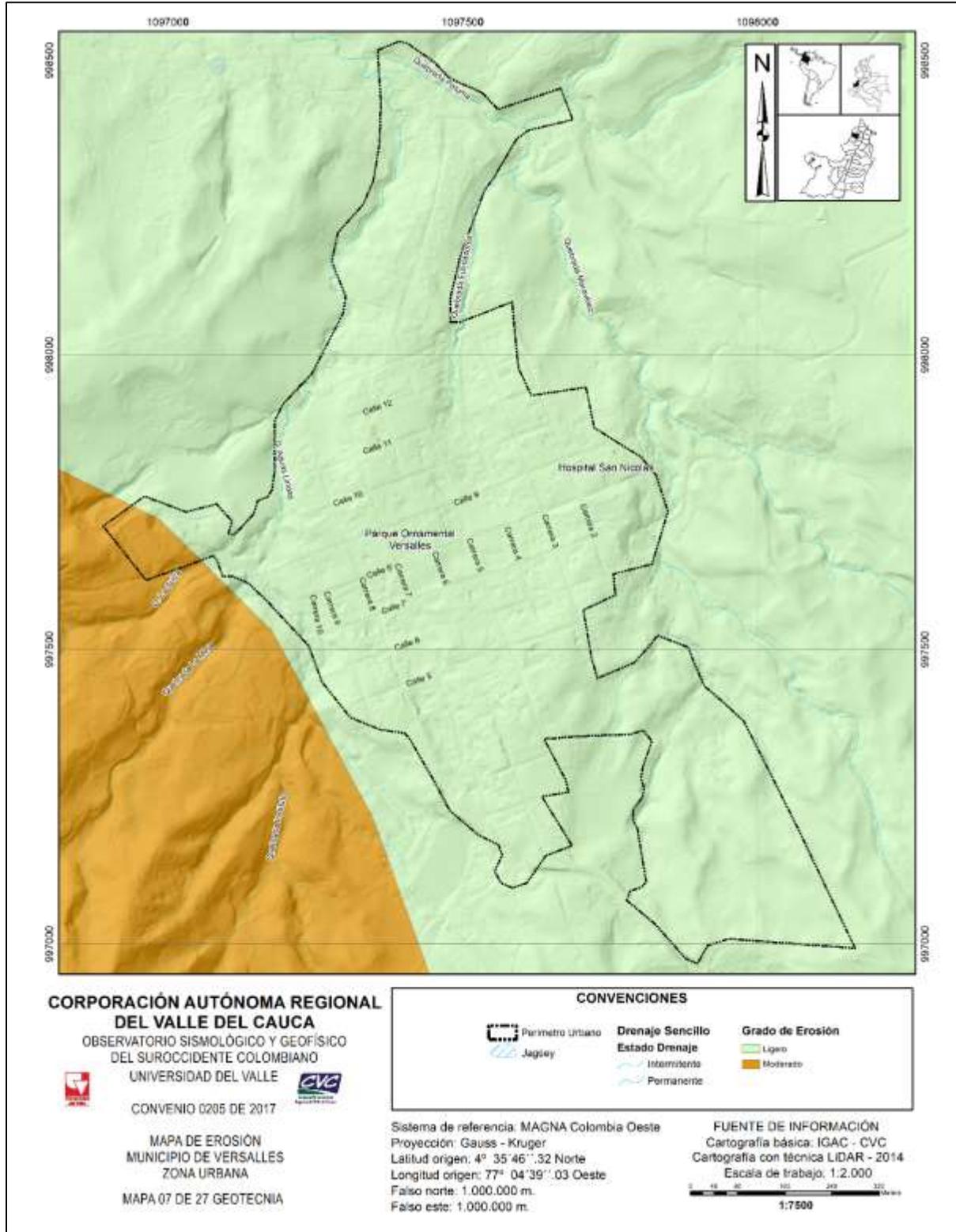


Figura 5.10. Mapa de erosión del municipio de Versalles
Fuente: Elaboración propia

5.1.11 Cobertura de la tierra

Conceptualmente se ha logrado la separación entre cobertura y uso de la tierra, que anteriormente se empleaban indistintamente; el término "Uso" implica la utilidad que presta un tipo de cobertura al ser humano. El IDEAM (2018) describe la cobertura como la unidad delimitable que surge a partir de un análisis de respuestas espectrales determinadas por sus características fisionómicas y ambientales, diferenciables con respecto a la unidad próxima.

A continuación, se describen los tipos de cobertura de la tierra más característicos del municipio de Versalles. El mapa de cobertura (Figura 5.11), es el resultado de observaciones en campo y análisis de imágenes aéreas, en este se puede encontrar las siguientes unidades:

Cultivos herbáceos plantados, se encuentran al norte, sur y occidente del municipio, dentro de este grupo en Versalles tenemos el maíz, la caña y algunas legumbres, los misceláneos plantados, que son la mezcla entre varios tipos de pastos y cultivos, se ubican al occidente, sur occidente y oriente del municipio.

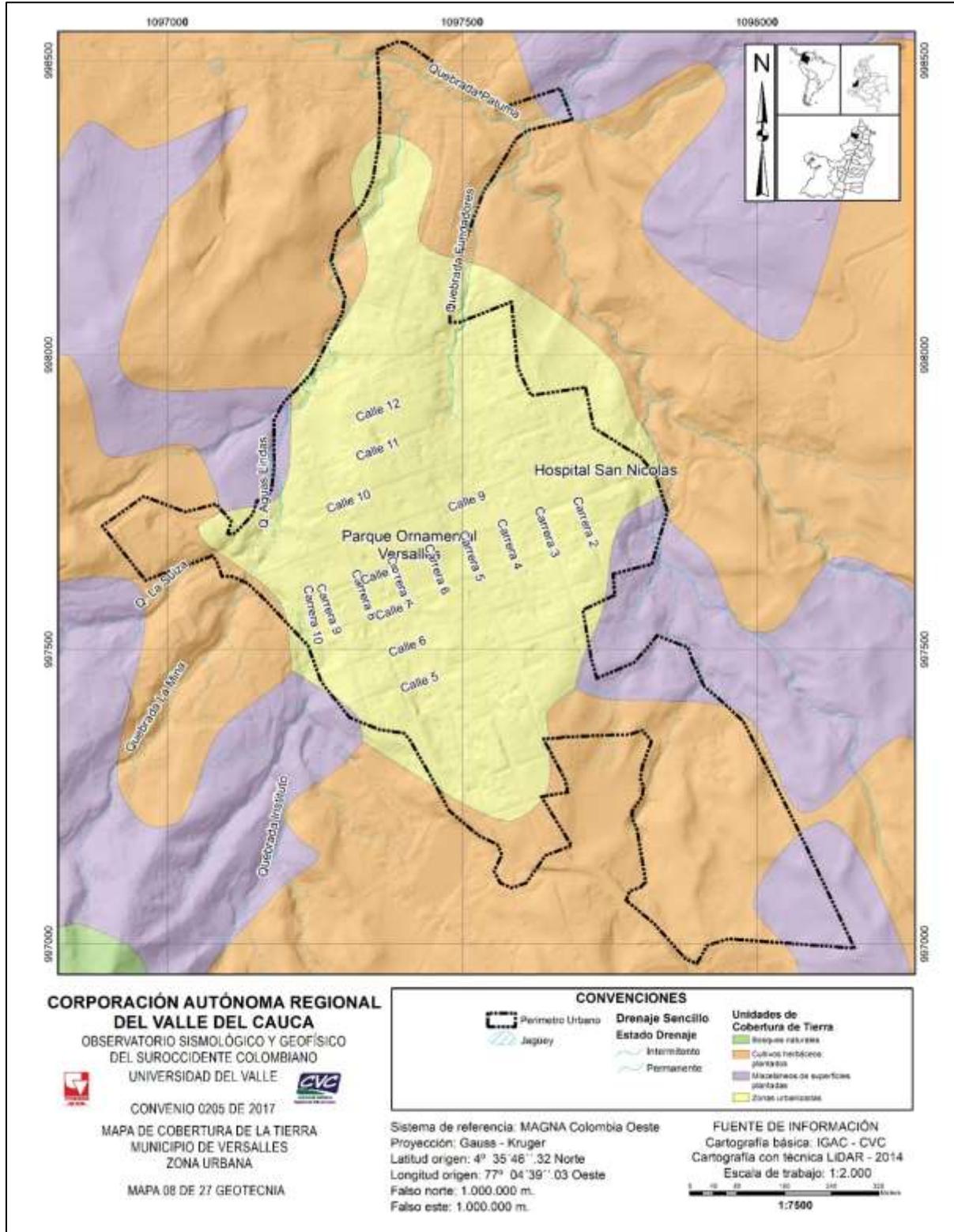


Figura 5.11. Mapa de cobertura de la tierra municipio Versalles
Fuente: Elaboración propia

5.2 PROCESAMIENTO DE LAS VARIABLES CON RESPECTO A LOS MOVIMIENTOS

A partir del método Bivariado, se establecen las áreas que podrían ser propensas a experimentar susceptibilidad frente a este fenómeno. La variable movimientos, se utiliza como variable de agrupamiento para el análisis estadístico e indica la presencia o ausencia de movimientos previos, permitiendo constituir las relaciones estadísticas con cada una de las variables condicionantes, es decir, muestra las evidencias de movimientos pasados a partir de los cuales es posible establecer la predicción de ocurrencia espacial del fenómeno. Los valores negativos indican lo poca o nula predisposición del factor a generar deslizamientos, y los valores positivos revelan la posibilidad que se dé este evento. Este proceso se hace para cada una de las diez variables que se tienen en cuenta como factor determinante para generar movimientos en masa. La Tabla 5.6, enseña los rangos obtenidos al cruzar la variable movimientos con cada una de las variables condicionantes.

Tabla 5.6. Resultado de la sumatoria de los factores determinantes con la variable movimientos

| VARIABLES | RANGO EN PESOS |
|-----------------------------------|----------------|
| Modelo digital de elevación (DEM) | -0,94 a 0,81 |
| Pendiente | -0,8 a 2,4 |
| Orientación de las laderas | -0,4 a 0,5 |
| Geomorfología | -1,4 a 3,4 |
| Unidades geológicas superficiales | -0,3 a 5,9 |
| Geología | -0,3 a 5,9 |
| Textura del suelo | -0,3 a 0,8 |
| Taxonomía | -0,3 a 0,8 |
| Erosión | -10,3 a 0,2 |
| Cobertura de la tierra | -0,5 a 0,89 |

Fuente: Elaboración propia

De acuerdo con la metodología usada, cada variable se cruzó por separado con los movimientos ocurridos en el área de estudio, estos cruces dan como resultado los mapas de pesos W_f . A cada conjunto de celdas que representa una variable determinada le corresponde el mismo número de celdas que representa el peso de esa categoría. En la Figura 5.12 se muestra el ejemplo del mapa w_f de la variable pendiente, en esta se denota que el color rojo enseña los valores positivos, lo que se refiere a que son áreas propensas a sufrir deslizamientos al haber una relación positiva entre los deslizamientos previos y la inclinación de la ladera, también se puede observar que estos pesos predominan en el sur del municipio fuera del casco urbano donde se presentan las mayores altitudes. En contraste, los valores negativos se concentran en el casco urbano.

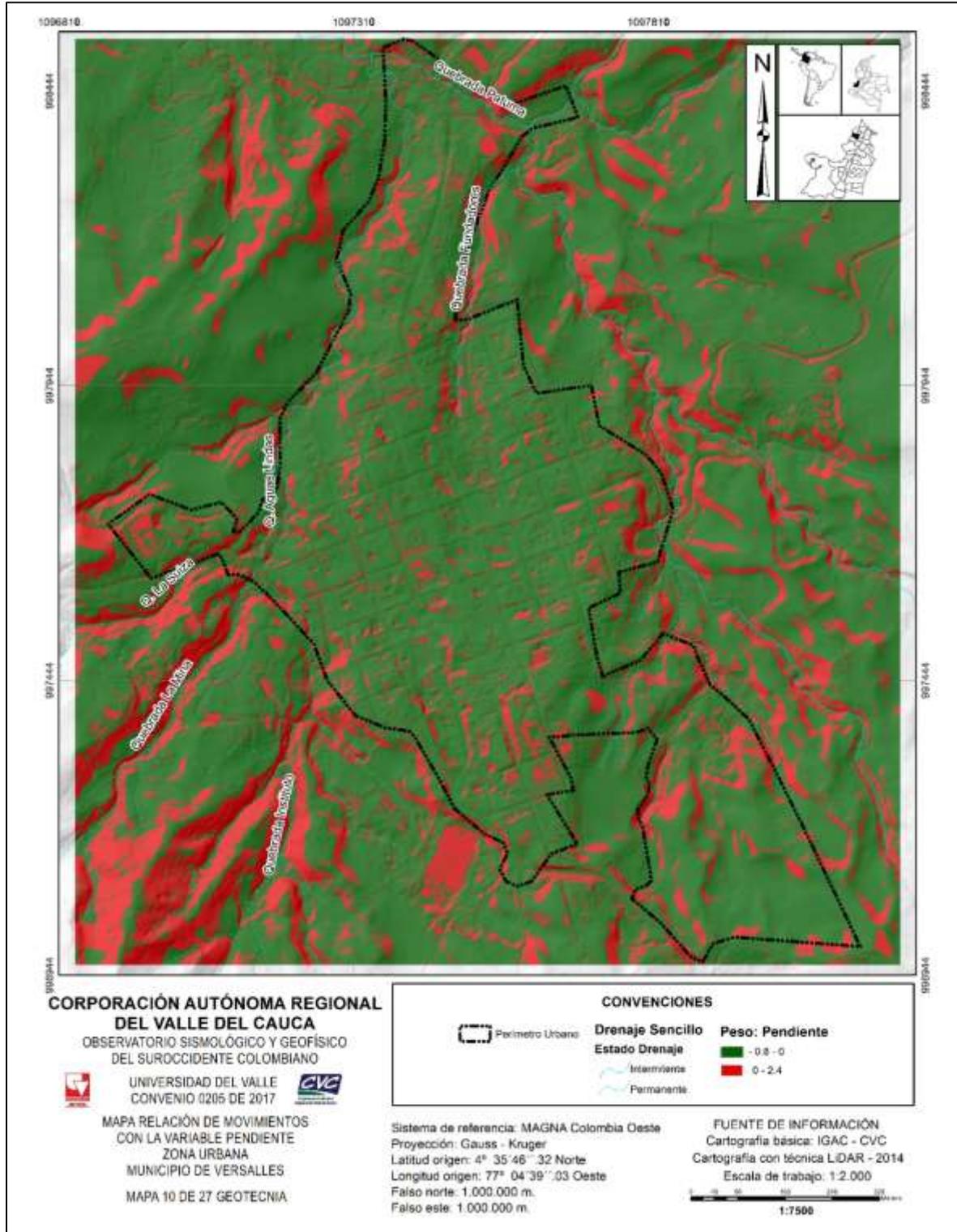


Figura 5.12. Distribución espacial de pesos correspondientes a la variable Pendientes del municipio de Versalles

Fuente: Elaboración propia

6. ZONIFICACIÓN DE LA SUSCEPTIBILIDAD POR MOVIMIENTOS EN MASA

Una vez obtenidos todos los factores W_f (a partir de la resta entre los W_f^+ y los W_f^-), se suman las variables para obtener el grado o Índice de Susceptibilidad por movimientos en masa o de la tierra (LSI por sus siglas en inglés (Land Susceptibility Index)), obteniendo así el Mapa de Susceptibilidad, el cual se presenta sin clasificar en la Figura 6.1, como se puede notar en esta, los valores altos se concentran en el centro del municipio, exactamente sobre el barrio los Fundadores, relacionado con el relleno de la quebrada Fundadores. Posterior a ello se presenta el proceso de socavación, el cual generó el hundimiento de algunas edificaciones en el sector. Después de las áreas con mayor propensión a deslizarse le siguen sectores donde la composición geomorfológica la componen depósitos de las diferentes quebradas presentes en el área de estudio. A continuación, se presenta la sumatoria o ecuación que se aplicará según la siguiente expresión.

$LSI = W_f \text{Pendiente} + W_f \text{Orientación de la ladera} + W_f \text{Geomorfología} + W_f \text{DEM} + W_f \text{Geología} + W_f \text{Unidades geológicas superficiales} + W_f \text{Textura} + W_f \text{Taxonomía} + W_f \text{Erosión} + W_f \text{Cobertura de la tierra}$

Una vez se tiene el resultado de la sumatoria, los índices calculados en todas las celdas se arreglan en orden descendente para definir las tres (3) categorías de susceptibilidad en función de los valores del LSI, como el método bivariado indica que todos los valores negativos se deben asociar con la categoría baja, para determinar las categorías media y alta se procede a elaborar un análisis de frecuencia mediante cuartiles. El cual consiste, en extraer la cantidad de datos (N), calcular los valores máximos (Max) y mínimos (Min) para conocer el rango, lo cual permite establecer los intervalos, una vez se han obtenido los once (11) intervalos, se procede a calcular la frecuencia de los datos en función de N y luego sacar la Mediana (Ver Tabla 6.1 y Tabla 6.2), el procedimiento anterior nos permite obtener los intervalos de la Tabla 6.3, donde se muestran las categorías de susceptibilidad.

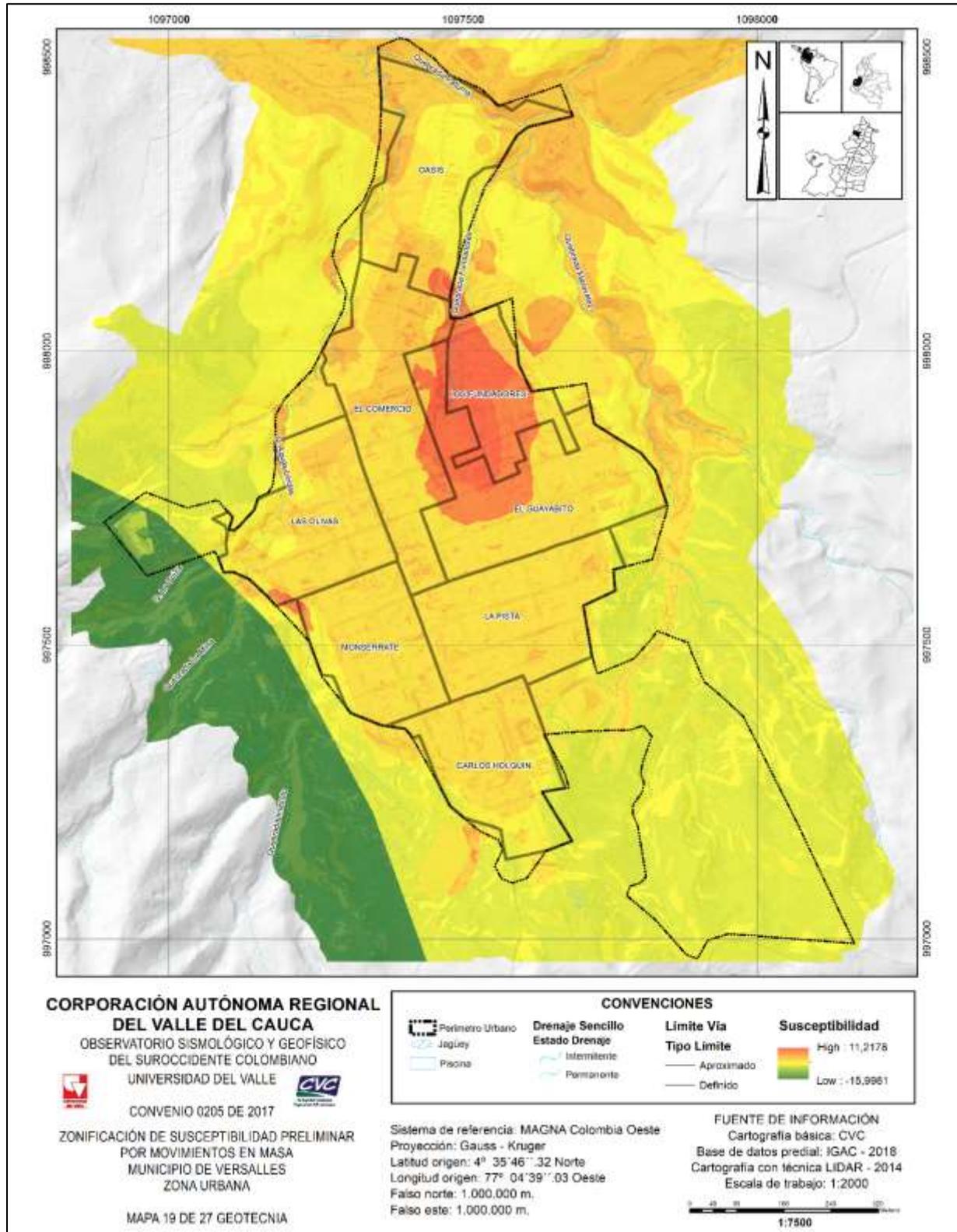


Figura 6.1. Mapa de Susceptibilidad por Movimientos en Masa (LSI) sin clasificar del municipio de Versalles

Fuente: Elaboración propia

Tabla 6.1. Variables y cálculos para el análisis de frecuencia

| VARIABLE | CÁLCULO | VARIABLE | CÁLCULO |
|----------|---------|----------|---------|
| N | 91 | ai | 1,3 |
| Max | 11,2 | A' | 8,0 |
| Min | 0,0 | A | -3,2 |
| Rango | 11,2 | L0 | 1,6 |
| K | 8,4 | L1 | 9,6 |

Tabla 6.2. Resultados del análisis de frecuencia

| N° Intervalos | Li-1 - Li | ni | fi | Ni acumulada | Fi Acumulada | |
|---------------|----------------|----|------|--------------|--------------|---------|
| 1 | (0 - 1,6] | 15 | 0,16 | 15 | 0,16 | MEDIANA |
| 2 | (1,6 - 2,6] | 10 | 0,11 | 25 | 0,27 | |
| 3 | (2,6 - 3,6] | 8 | 0,09 | 33 | 0,36 | |
| 4 | (3,6 - 4,6] | 9 | 0,10 | 42 | 0,46 | |
| 5 | (4,6 - 5,6] | 10 | 0,11 | 52 | 0,57 | |
| 6 | (5,6 - 6,6] | 9 | 0,10 | 61 | 0,67 | |
| 7 | (6,6 - 7,6] | 10 | 0,11 | 71 | 0,78 | |
| 8 | (7,6 - 8,6] | 8 | 0,09 | 79 | 0,87 | |
| 9 | (8,6 - 9,6] | 6 | 0,07 | 85 | 0,93 | |
| 10 | (9,6 - 10,6] | 4 | 0,04 | 89 | 0,98 | |
| 11 | (10,6 - 11,6] | 2 | 0,02 | 91 | 1,00 | |
| Total | | 91 | 1,00 | | | |

Fuente: Elaboración propia del método bivariado y el análisis de frecuencia

Establecidas las categorías se procede a graficar los rangos, donde el eje Y representa la frecuencia acumulada de cada valor y el eje X los valores de LSI, siendo los valores negativos los que dominan en la gráfica (ver Figura 6.2).

Tabla 6.3. Calificación de Susceptibilidad por movimientos en masa

| INTERVALO LSI | CATEGORÍA DE SUSCEPTIBILIDAD |
|-----------------|------------------------------|
| (-15.99 - 0.00) | Baja |
| (0.00 – 4,60) | Media |
| (4,60 - 11.22) | Alta |

Fuente: Elaboración propia a partir de la implementación del método Bivariado

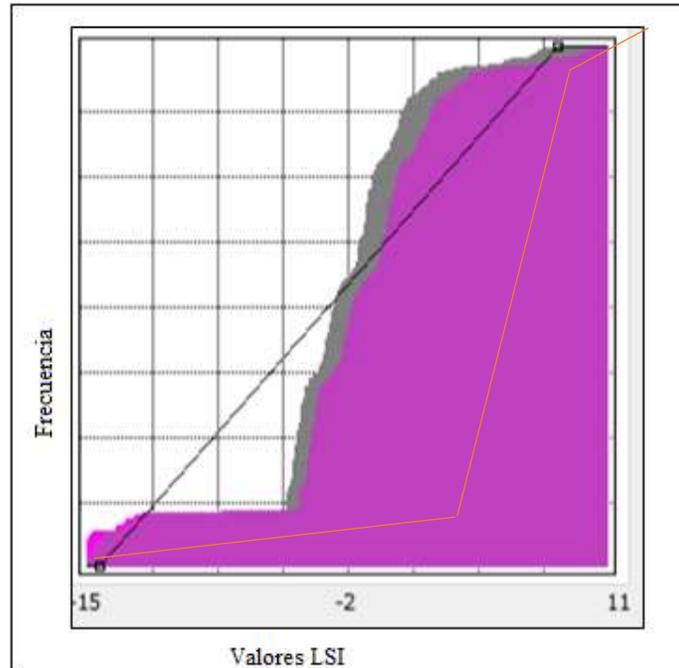


Figura 6.2. Curva acumulada de categorización de LSI
Fuente: Elaboración propia

En el mapa de susceptibilidad, se presentan las zonas propensas a movimientos en masa en las categorías alta, media y baja para el municipio de Versalles (Figura 6.3), las cuales son descritas a continuación:

- **Susceptibilidad alta:**

Para Alvarado et al. (2012), las caídas de suelos o detritos, flujos de detritos y deslizamientos rotacionales y traslacionales de suelos y detritos, o la combinación de estos (movimientos complejos), en conjunto con la frecuencia de los eventos pueden generar movimientos en masa de gran magnitud. En general, los efectos que se esperan en estas zonas (susceptibilidad alta) son los más catastróficos e implicarían una mayor intervención, control, mitigación y/o recuperación en caso que se presente el evento.

En susceptibilidad alta, se encuentran las zonas con condiciones favorables a la ocurrencia de procesos de inestabilidad relacionados con movimientos y zonas afectadas, aunado a las características litológicas en el área, geomorfología y las fuertes pendientes que caracterizan el municipio. En general, las zonas enmarcadas dentro de susceptibilidad alta, se localiza al costado nororiente y en el centro del municipio.

Este nivel se concentra en mayor proporción en los barrios El Guayabito y Los Fundadores, al noroccidente del barrio El Comercio, al Sur- occidente y oriente de Carlos Holguín, sur y oriente del barrio La Pista, también se da al costado nor oriental por fuera del perímetro urbano. Nótese que la susceptibilidad alta abarca una proporción pequeña dentro de la zona de estudio (12% Figura 6.3).

- **Susceptibilidad media:**

La susceptibilidad media se presenta en mayor proporción al norte, nor-oriente y otro foco en el centro (circundante al área de susceptibilidad alta) del municipio, en los barrios Oasis, El Comercio El Guayabito y Las Olivas, este nivel se dan en áreas de rellenos antrópicos y/o depósitos aluviales, en los cuales las pendientes oscilan entre el 30 y 50 por ciento.

Finalmente, este nivel de propensión a los deslizamientos, se localiza en menor proporción en los barrios Los Fundadores, Carlos Holguín La Pista y Monserrate.

En conclusión, esta categoría de susceptibilidad comprende aproximadamente una quinta parte del perímetro municipal (17%).

- **Susceptibilidad baja:**

Zonas con mínimas o ninguna condición favorable a la inestabilidad, en otras palabras, el potencial de ocurrencia de un deslizamiento es bajo. Algunas de estas pueden ser susceptibles a procesos de inundación localizadas al sur del perímetro municipal

Como se muestra en la Figura 6.4, la susceptibilidad baja por movimientos en masa se presenta en el 71 % del municipio, siendo las áreas localizadas al sur de este, las que poseen pocos indicios de susceptibilidad alta y/o media, de lo cual se tiene que el 29% de Versalles es propenso a sufrir este fenómeno natural.

Dentro de las áreas que presentan grado de susceptibilidad relevante (alta o media), el 94,93 del territorio del barrio Los Fundadores, se encuentra en estas categorías, lo anterior se relaciona a que este barrio se erigió sobre suelo antrópicos relleno con materiales de diversas procedencias. Para mayor detalle ver la sobre la distribución porcentual de los niveles de susceptibilidad que presenta cada barrio del municipio de Versalles se presenta la Tabla 6.4

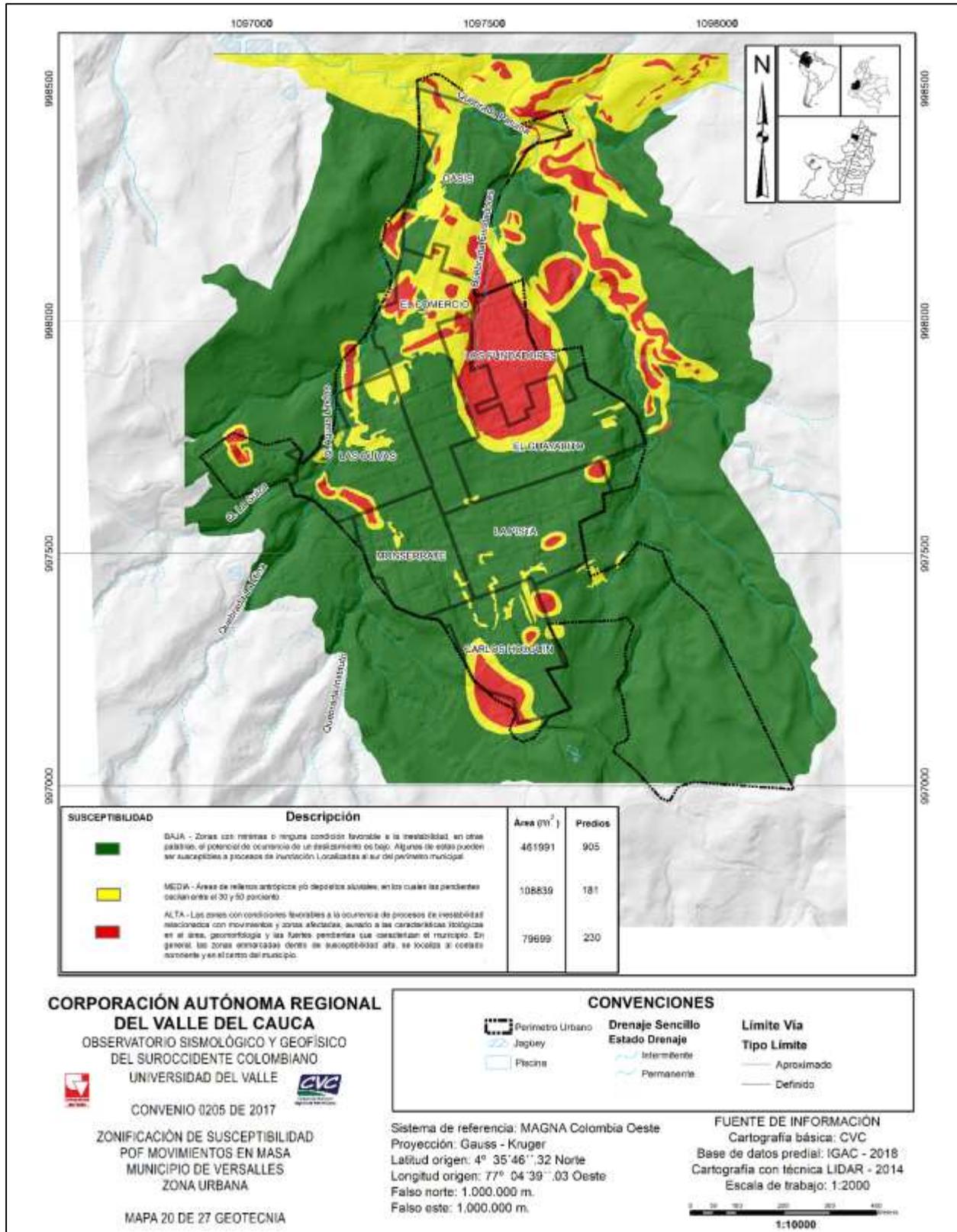


Figura 6.3. Mapa Susceptibilidad total a movimientos en masa en el municipio de Versalles
Fuente: Elaboración propia

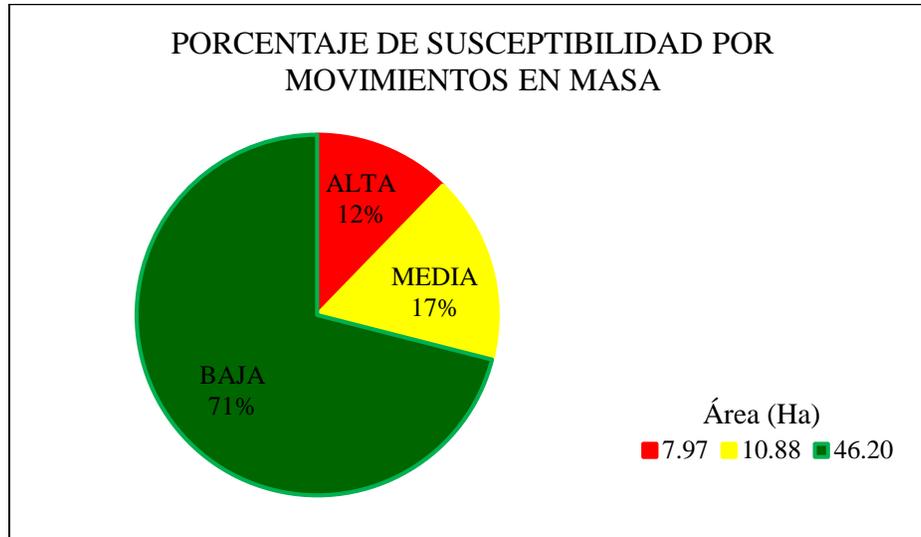


Figura 6.4. Porcentaje de área de susceptible a movimientos en masa en el municipio de Versalles

Fuente: Elaboración propia

Tabla 6.4. Porcentaje de susceptibilidad por movimientos en masa en el municipio de Versalles

| BARRIO | PORCENTAJE DE SUSCEPTIBILIDAD (MM) POR BARRIO | | |
|----------------|---|-------|-------|
| | ALTA | MEDIA | BAJA |
| LOS FUNDADORES | 46,28 | 48,65 | 5,07 |
| EL GUAYABITO | 10,32 | 16,19 | 73,49 |
| OASIS | 1,81 | 8,60 | 89,59 |
| LAS OLIVAS | 0,51 | 1,96 | 97,53 |
| EL COMERCIO | 0,14 | 5,01 | 94,85 |
| CARLOS HOLGUIN | 0,00 | 0,54 | 99,46 |
| MONSERRATE | 0,00 | 1,74 | 98,27 |
| LA PISTA | 0,00 | 0,38 | 99,62 |

Fuente: Elaboración propia

7. ZONIFICACIÓN DE LA AMENAZA POR MOVIMIENTOS EN MASA Y ANÁLISIS DE ESTABILIDAD DEL TERRENO

La zonificación de amenazas del territorio es una de las herramientas necesarias para la administración racional de la ocupación de áreas socio-económicamente aprovechables. Permite la toma de decisiones tendiente al mejoramiento de la calidad de vida de la comunidad, a cargo de entes territoriales ya que es un insumo para el ordenamiento, planeación territorial y la gestión de riesgos, entre otros. Es fundamental para determinar bien sea el emplazamiento de vivienda, usos comerciales, industriales, institucionales, recreación, infraestructura, conservación entre otros. Además, permitirá restringir y condicionar el uso del suelo, en zonas de amenaza alta, de manera que en el futuro se eviten eventuales demandas y problemas asociados a reubicación de viviendas.

La amenaza por movimientos en masa de una ladera, entendida como un evento natural, humano o combinado, potencialmente destructivo de vidas, bienes, economía y/o cultura de una comunidad (INGEOMINAS, 2006), involucra en su evaluación, el conocimiento claro del tipo de movimiento en masa amenazante activo o potencial, así como estimativos de su magnitud, recurrencia y localización geográfica. Esta es una actividad compleja que requiere gran cantidad de información de aspectos tales como: topografía, cobertura y usos del suelo, geología (geología para ingeniería, estratigrafía, geología estructural) geomorfología, clima, hidrología, hidráulica, hidrogeología (niveles piezométricos y su variación en el tiempo, régimen de flujo de aguas subterráneas), parámetros geomecánicos de materiales e intensidad y probabilidad de ocurrencia de factores detonantes tales como lluvias y sismos (CVC y Univalle, 2008).

7.1 ASPECTOS METODOLÓGICOS GENERALES

En este capítulo se describen los aspectos metodológicos propuestos para elaborar la zonificación de amenaza por movimientos en masa, según lo dispuesto en el Decreto 1807 de 2014. La zonificación de amenaza en estudios básicos se realiza a escala 1:5000 con base en análisis determinísticos, mientras que para los estudios a detalle se realiza a escala 1:2000, por medio del análisis probabilístico. Para efectuar los estudios de amenaza se requiere la cartografía básica del área de análisis a escala 1:2000 y a partir de ella se genera la cartografía temática, correspondiente a cartografía geológica en unidades de geología para ingeniería, la cartografía geomorfológica en cuanto a elementos geomorfológicos y la cartografía de cobertura. Además, se debe hacer un inventario de movimientos en masa y un registro histórico de estos (catálogo de eventos).

Tanto el catálogo como el inventario de movimientos en masa permiten identificar las características de los eventos, su distribución espacial, temporal y su relación con los factores detonantes.

A partir de los temas descritos se establece un modelo geológico - geotécnico en el que se requiere, como actividad adicional, efectuar una exploración geotécnica básica que permita caracterizar geomecánicamente los materiales del subsuelo y efectuar un análisis determinístico de estabilidad, que para el caso de taludes en suelos se hace por medio de un modelo de talud infinito y para el caso de taludes en roca, mediante modelos convencionales de estabilidad de macizos rocosos, según lo establezca el experto.

Para el primer caso se cuenta, entonces, con una distribución espacial de los espesores de suelo y de sus características mecánicas, además de una posición del nivel freático y de una aceleración sísmica, con lo cual se procede a calcular, por métodos de equilibrio límite, los factores de seguridad en diferentes celdas o “columnas” de suelo, para hallar así su distribución espacial. Con este procedimiento, el factor de seguridad es el dato discriminante para establecer las categorías de amenaza. Para taludes en roca, la zonificación de amenaza se basa en el método SMR (Romana, 1995), que tiene en cuenta las características geométricas del talud, las características estructurales del macizo y las propiedades mecánicas de las rocas.

Las áreas de amenaza alta definidas en los estudios básicos en los que se identifiquen elementos expuestos, áreas urbanizadas, ocupadas o edificadas, así como aquellas en las que se encuentren edificaciones indispensables y líneas vitales, se consideran áreas en condición de riesgo y se deben

priorizar para llevar a cabo estudios detallados. Por su parte, las zonas ocupadas categorizadas como de amenazas media y alta, y clasificadas como suelo urbano, de expansión urbana o centro poblado rural, se consideran zonas con condición de amenaza y también se deben evaluar en estudios detallados.

La cartografía relacionada con los temas de geología para ingeniería y elementos geomorfológicos en los estudios de zonificación de amenaza por movimientos en masa detallados es la misma que la generada en los estudios básicos, pero con un énfasis especial en la elaboración de columnas estratigráficas que permitan a partir de un modelo geológico - geotécnico y perfiles de análisis para unidades de ladera (definidos por el experto en aquellos sectores clasificados con condición de amenaza o riesgo), calcular la probabilidad de falla para deslizamientos superficiales, profundos o caídas de roca según corresponda. Este tipo de análisis permite considerar la incertidumbre en los parámetros de resistencia del terreno y la probabilidad de ocurrencia de los factores detonantes, es decir, la ejecución de análisis de estabilidad probabilísticos. La zonificación de la amenaza obtenida en los estudios de detalle debe contener, además de la probabilidad de falla de los taludes, la caracterización del proceso amenazante en materia de ubicación, clasificación del tipo de movimiento, material, magnitud, distancia de viaje, velocidad e intensidad, datos básicos para llevar a cabo los análisis cuantitativos de vulnerabilidad y riesgo (SGC, 2015).

En la (Figura 7.1), se ilustra el esquema metodológico general utilizado para evaluación de la amenaza por movimientos en masa. esta evaluación depende directamente de la evaluación de la susceptibilidad, a la cual se le han adicionado los factores detonantes (precipitación y sismos). En este orden de ideas se procede a continuación a detallar la obtención de dicha evaluación.

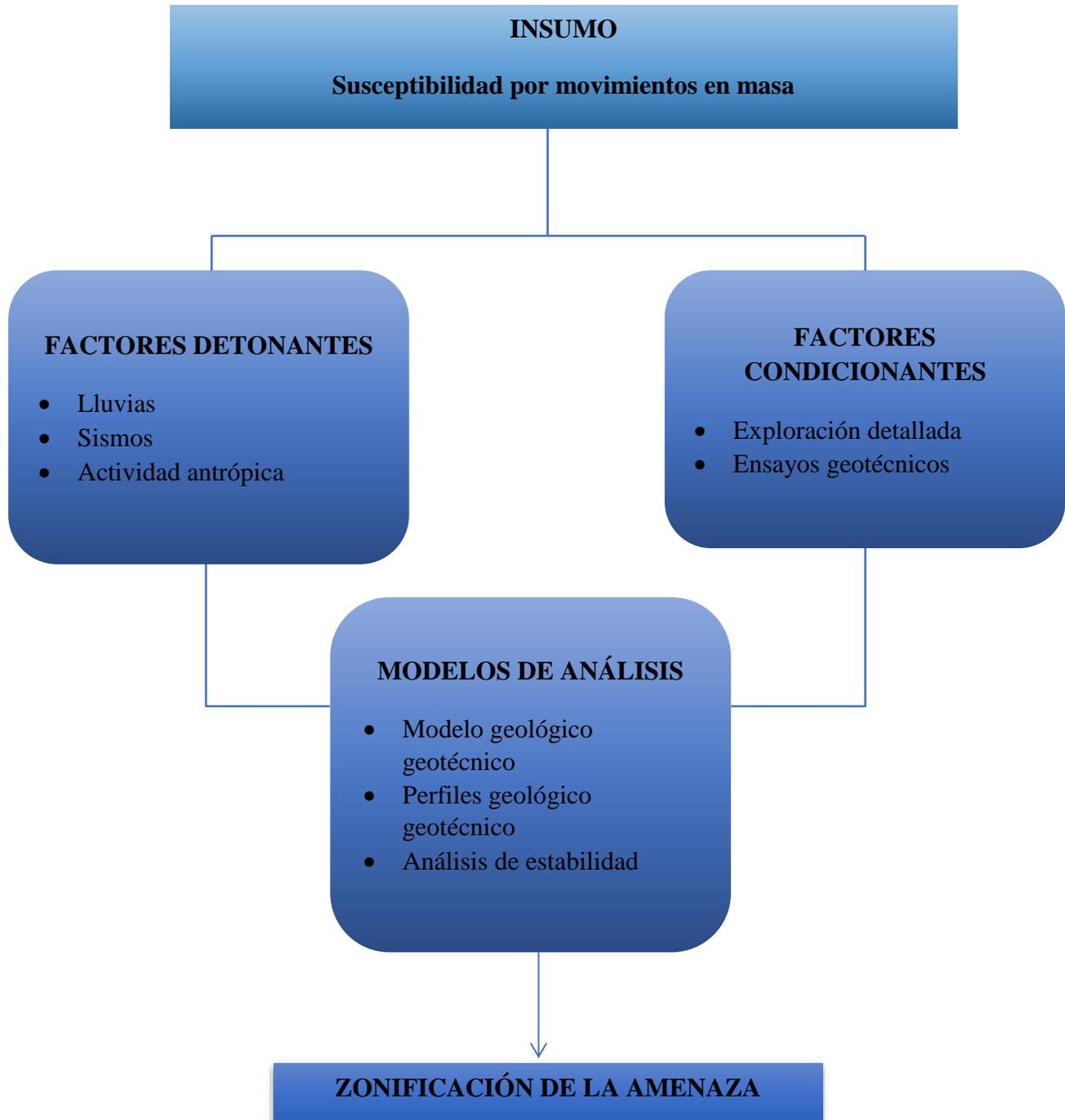


Figura 7.1. Zonificación detallada de amenaza por movimientos en masa
Fuente: Modificado del Servicio Geológico Colombiano 2015, (SGC, 2015)

7.2 INVESTIGACIÓN Y CARACTERIZACIÓN GEOTÉCNICA

En este apartado se presenta el desarrollo de las diferentes actividades llevadas a cabo durante el estudio geotécnico realizado para la caracterización de la zona del estudio, la cual servirá para la generación de los mapas de amenaza.

El objeto del estudio geotécnico está orientado a obtener los modelos geológico-geotécnicos del subsuelo representativos en las unidades geológicas superficiales identificadas, donde se pueda definir la disposición y distribución estratigráfica de los materiales, superficies de falla, profundidad del nivel freático y determinación de parámetros geotécnicos representativos de los materiales, insumos que son fundamentales para la etapa de análisis de estabilidad y evaluación de la amenaza.

Según Suriol Castellví, J., Josa García-Tornel, A., y Lloret Morancho, A., (2007) y Jimeno, C. L., (2013) el Ensayo de Penetración Estándar o (SPT por sus siglas en inglés), es una prueba de penetración dinámica, empleada para ensayar terrenos en los que es necesario realizar un estudio geotécnico. Este tipo de ensayo consiste en medir el número de golpes necesarios para que se introduzca a una determinada profundidad una cuchara (cilíndrica y hueca) muy robusta (diámetro exterior de 51 milímetros e interior de 35 milímetros, lo que supone una relación de áreas superior a 100), que le permite tomar una muestra en su interior, naturalmente alterada. El peso de la maza y la altura de la caída libre, están normalizados, siendo de 63'5 kilopondios (kilogramos-fuerza) y 76 centímetros respectivamente.

Contractualmente se planteó hacer los sondeos (perforaciones) con el método **SPT**, pero como se encontró rechazo a 1 metro de profundidad, debido a esto, se decide realizar las exploraciones por el método de perforaciones mecánicas por rotación en diámetro HQ

7.2.1 Metodología

Para realizar la caracterización geotécnica y lograr los objetivos anteriormente planteados, se definió un programa de exploración del subsuelo con base en el análisis de la cartografía de unidades geológicas superficiales, estableciendo los sitios de exploración, tipo y profundidad aproximada.

La fase de exploración geotécnica se enfocó hacia la definición de los espesores e identificación de los diferentes materiales del subsuelo en la zona del estudio, además de reportar los niveles freáticos en cada una de las perforaciones realizadas. Para ello se realizaron perforaciones profundas con muestreo continuo inalterado, apiques superficiales con toma de muestras en bloque, líneas de refracción sísmica.

En paralelo a la exploración del suelo y posterior a la finalización de la primera perforación, las muestras obtenidas, tanto de suelo como de roca, fueron llevadas y ensayadas en el laboratorio con el fin de estimar sus propiedades desde el punto de vista físico y mecánico. Los ensayos incluyeron clasificación, propiedades básicas y geomecánicas (resistencia).

Finalmente, la información geológica, geotécnica y geofísica obtenida fue integrada para definir los modelos geológicos-geotécnicos del subsuelo, sobre secciones previamente establecidas de comportamiento geotécnico similar con base en la unidad geológica superficial y el inventario de movimientos en masa.

7.2.2 Exploración del subsuelo

Con el fin de realizar la caracterización y estimar las propiedades geotécnicas de los materiales presentes en el subsuelo bajo el área de estudio, se llevó a cabo un plan de exploración de tipo directo e indirecto. La exploración directa consistió en la ejecución de una serie de perforaciones mecánicas y de apiques superficiales, con su respectiva descripción del perfil estratigráfico y toma de muestras inalteradas. Por otro lado, la exploración indirecta consistió en la ejecución de ensayos de campo a través de líneas geofísicas de refracción sísmica.

Para lo anterior, se tuvo en cuenta el levantamiento topográfico y la cartografía de unidades geológicas superficiales realizada para el presente estudio, con lo cual se estimaron, de forma a priori, los espesores y el tipo de material a explorar.

7.2.2.1 Perforaciones mecánicas

Se llevaron a cabo diez (10) perforaciones mecánicas por rotación en diámetro HQ, con profundidad de exploración a 10 m, durante las cuales se recuperaron muestras inalteradas de los materiales presentes en el sector, permitiendo su descripción, estimación de espesores y caracterización geomecánica. La distribución y resultados de dichas perforaciones permitieron identificar la secuencia estratigráfica de materiales y corroborar la información de geología regional y local.

En la Tabla 7.1 se relacionan las coordenadas de los sitios de perforación, profundidad de exploración, la cantidad de muestras tomadas y la posición del nivel freático medido después de las labores. En particular, se muestra la relación de profundidades alcanzadas en cada perforación, ejecutando un total de 100 m de perforación.

Tabla 7.1. Relación de las perforaciones realizadas, coordenadas (planas Magna-Sirgas), alcance en profundidad y cantidad de muestras tomadas en el municipio de Versalles.

| PERFORACIÓN CÓDIGO | LONGITUD | LATITUD | PROFUNDIDAD ALCANZADA (m) | NIVEL FREÁTICO (m) | NÚMERO DE MUESTRAS | UGS | |
|-----------------------|----------|---------|---------------------------------|--------------------------|--------------------------|-----|------------------------------|
| P1 | 1097586 | 997105 | 10 | 3,5 | 10 | Stc | Suelo transportado de ceniza |
| P2 | 1097376 | 998445 | 10 | 2,2 | 7 | Sta | Suelo transportado aluvial |
| P3 | 1097453 | 997904 | 10 | 5,5 | 7 | Sa | Suelo antrópico |
| P4 | 1097510 | 997904 | 10 | 3,1 | 8 | Sa | Suelo antrópico |

| PERFORACIÓN CÓDIGO | LONGITUD | LATITUD | PROFUNDIDAD ALCANZADA (m) | NIVEL FREÁTICO (m) | NÚMERO DE MUESTRAS | UGS | |
|-----------------------|----------|---------|---------------------------------|--------------------------|--------------------------|------|---|
| P5 | 1097416 | 998065 | 10 | 4,1 | 8 | Stc | Suelo transportado de ceniza |
| P6 | 1097476 | 998011 | 10 | 3,05 | 8 | Sa | Suelo antrópico |
| P7 | 1097441 | 997940 | 10 | 3,9 | 7 | Sale | Suelo antrópico de relleno de escombros |
| P8 | 1097650 | 998664 | 10 | 0,5 | 7 | Stc | Suelo transportado de ceniza |
| P9 | 1096958 | 997664 | 10 | No se encontró | 7 | Rd | Roca dura |
| P10 | 1097607 | 997874 | 10 | 1 | 7 | Sa | Suelo antrópico |

Fuente: Elaboración propia

La distribución espacial de las perforaciones mecánicas ejecutadas para el presente estudio se puede apreciar en la Figura 7.2. Para realizar las perforaciones se utilizaron una máquina ACKER; con sistema de perforación rotativo, movilidad por orugas, múltiples tipos de perforación, alzamiento [5.443 kilogramos] 8-Speed FWD revolución a 1.000 RPMs con la cabeza del taladro del estándar, esfuerzo de torsión del huso 8.000 pies libras. [10.846 nanómetro] con el taladro Hd del estándar. 13' movimiento [3.96 m] mástil de la descarga de 5 pies [1.52 m] La extensión del mástil para 20 ' [6.09 m]. Base dual de la diapositiva de la acción Agujero del ángulo capaz hasta un ángulo de 45 grados (Figura 7.3) y una maquina JOY; la cual está equipada con martillos perforadores, rotación de 360° en la parte superior de la torreta para una máxima cobertura del brazo, controles piloto hidráulicos, esta perforadora indicada para la realización de orificios verticales o inclinados. Permite colocar varios tipos de cabezales y, en consecuencia aplicar deferentes técnicas de perforación; rotación, rotopercusión, perforación con aire, con martillo de fondo, entre otros (Figura 7.4).

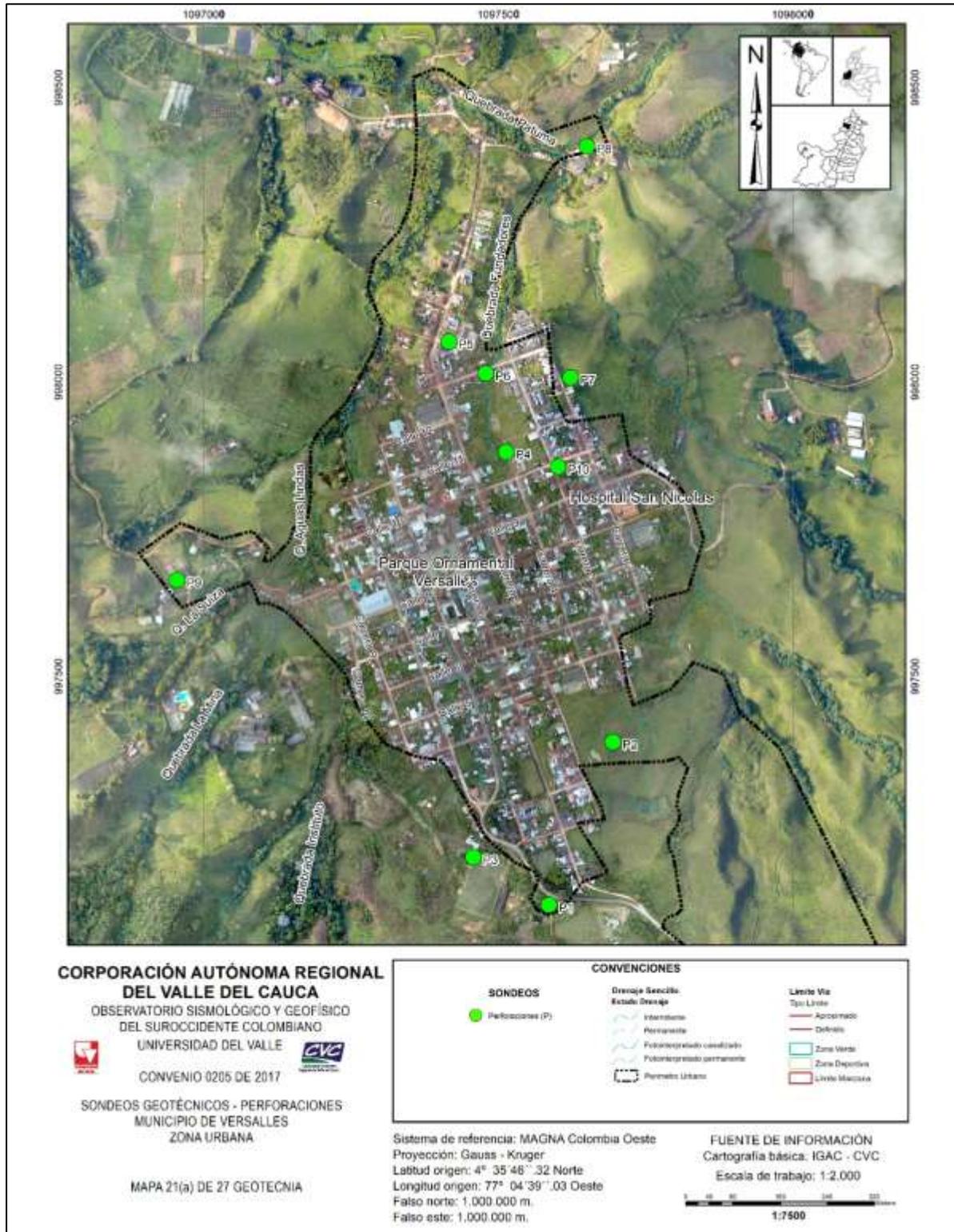


Figura 7.2. Ubicación de las perforaciones mecánicas hechas para el presente estudio en el municipio de Versalles

Fuente: Elaboración propia



Figura 7.3. Máquina (ACKER) usada para las perforaciones
Fuente: fotografía propia



Figura 7.4. Máquina (JOY) usada para las perforaciones
Fuente: fotografía propia

7.2.2.2 Apiques

Además de las perforaciones realizadas, se llevó a cabo la apertura de veintidós (22) apiques exploratorios en diferentes zonas del área de estudio, con el fin de conocer los estratos superficiales del suelo, los cuales tuvieron dimensiones de 2 m x 2 m x 2 m, la muestra se tomó en bloques de 25cm x 25cm x 25cm. Mediante este tipo de exploración se permitió describir y obtener muestras de los depósitos de suelo superficiales, hasta profundidades máximas de 2 m. Se recuperaron muestras inalteradas consideradas representativas de los materiales detectados, relleno y suelo arcilloso residual, fueron ensayados y caracterizados en el laboratorio.

En la Tabla 7.2 se relacionan el código, las coordenadas de los sitios de apiques y profundidad de la exploración. En particular se muestra la relación de profundidades alcanzadas en cada apique, ejecutando un total de 44 m de excavación.

Tabla 7.2. Relación de los apiques realizados, coordenadas (planas Magna Sirgas), alcance en profundidad en el municipio de Versalles

| APIQUE CÓDIGO | LONGITUD | LATITUD | PROFUNDIDAD |
|---------------|----------|---------|-------------|
| AP1 | 1097521 | 997118 | 2 |
| AP2 | 1097515 | 997166 | 2 |
| AP4 | 1097199 | 997578 | 2 |
| AP5 | 1097458 | 997089 | 2 |
| AP8 | 1097499 | 997990 | 2 |
| AP9 | 1097600 | 998030 | 2 |
| AP10 | 1097628 | 998347 | 2 |
| AP11 | 1097497 | 997857 | 2 |
| AP12 | 1097447 | 997956 | 2 |
| AP13 | 1097628 | 997922 | 2 |
| AP15 | 1097491 | 998089 | 2 |
| AP16 | 1097636 | 998049 | 2 |
| AP17 | 1097462 | 998128 | 2 |
| AP18 | 1097140 | 997613 | 2 |
| AP19 | 1096931 | 997714 | 2 |
| AP20 | 1097790 | 997450 | 2 |
| AP21 | 1097613 | 998151 | 2 |
| AP22 | 1097868 | 997804 | 2 |
| AP23 | 1097775 | 998052 | 2 |
| AP24 | 1097652 | 997466 | 2 |
| AP25 | 1097820 | 997958 | 2 |
| AP28 | 1097382 | 998433 | 2 |

Fuente: Elaboración propia

La Figura 7.5 enseña la excavación correspondiente a uno de los apiques realizados durante las labores geotécnicas de campo, en el cual se aprecia el tamaño de la muestra, y el nivel freático en

este punto, el cual está a 2m que es la profundidad del sondeo, mientras que la ubicación de los apiques exploratorios ejecutados para el presente estudio se puede apreciar en la Figura 7.6. donde se denota una la concentración en dos puntos claves, como lo son el sector de la cancha y el barrio Fundadores, ambos escogidos por sus unidades geológicas superficiales y por los procesos de inestabilidad que se han presentado en ellas.



Figura 7.5. Apique exploratorio en el municipio de Versalles
Fuente: fotografía propia

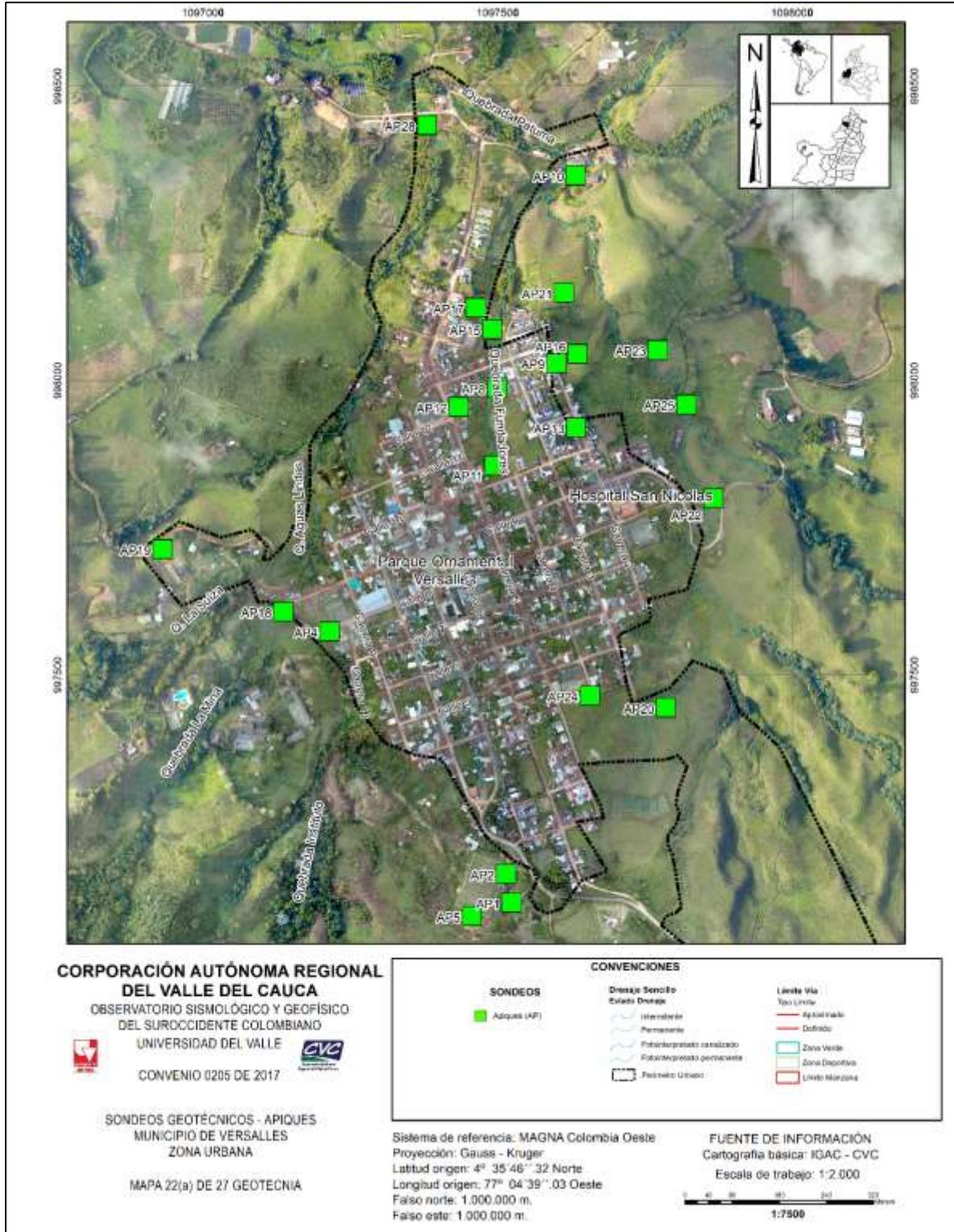


Figura 7.6. Ubicación en planta de los apiques para el presente estudio en el municipio de Versalles.

Fuente: Elaboración propia.

- **Perfiles estratigráficos en los sitios de perforación**

Aprovechando las descripciones de los materiales extraídos durante las perforaciones, la evaluación posterior de las muestras conservadas para ensayos in situ, y las características de los contactos geológicos presentes en la zona, fue posible generar perfiles estratigráficos en cada uno de los sitios de perforación.

Las descripciones de los estratos incluyen el tipo de material, litología, características físicas, espesor de cada estrato identificado y las condiciones de humedad. Para cada tipo de suelo se define también una representación gráfica consecuente con el tipo de material encontrado y la descripción del suelo, la cual se mantiene para materiales similares en los diferentes perfiles estratigráficos mostrados. A manera ilustrativa, en la Figura 7.7, se aprecia el perfil estratigráfico establecido en el sitio de perforación P-4, el cual se montó utilizando el software STRATER versión 5.



Figura 7.7. Perfil estratigráfico establecido P-4. Obsérvense los valores estimados de RQD.

Fuente: Elaboración propia

En la **Figura 7.7**, se puede apreciar la estratificación en el sitio P-4, hasta una profundidad de 10.0 m, identificando dos (2) estratos diferentes, así:

El primer estrato corresponde a una Arcilla orgánica que envuelve abundantes raicillas y algún fragmento de ladrillo. Está un poco húmeda, es plástica y su consistencia es media ($qu=0,50; 0,95$ (kg/cm²)). Su color es café amarillento oscuro (10YR 4/4).

El segundo estrato se extiende desde 1 m hasta los 10.0 m, corresponde a una arcilla de color café amarillento los primeros 0,20 m exhiben manchas oscuras, por cuenta de la arcilla orgánica descrita anteriormente, se percibe húmeda, muy plástica y su consistencia es media, a partir de los 2 m, el color de la arcilla cambia a rojo amarillento, de consistencia firme, humedad y plástica. De los 3 a los 10 metros se presentan variaciones en cuanto al color, plasticidad y consistencia del material, de los 3-4 m el material arcilloso varía su color a amarillo rojizo, con algunas manchas negras, la plasticidad y consistencia se reducen. Cerca a los 4,5 m se hayan algunas gravas gruesas de color gris oscuro con manchas blancuzcas, a partir de los 6,5 el color de la arcilla se torna más claramente como un rojo amarillento (5YR 6/6) con abundantes manchas amarillas y grises. En la muestra se evidencia algunos rastros de planos con rozamientos que oscilan aprox. Entre los 30° y los 40°, que pueden provenir de la roca originada. En la punta inferior se hallan algunos (pocos) fragmentos de tamaño arena media y grava fina de un lítico muy reforzado de color amarillo con manchas grises.

Las arcillas plásticas de color rojo reportadas en las perforaciones, corresponden al saprolito rojo de la formación volcánica descrito en el capítulo de geología, mientras que las arcillas color amarillo rojizo corresponden al complejo estructural Dagua y las arcillas amarillas corresponderían a los depósitos de cenizas volcánicas.

7.2.2.3 Líneas de refracción sísmica

Este método se basa en determinar los tiempos de recorrido de las ondas, tanto de compresión (ondas P) como de corte (ondas S), desde un punto conocido (fuente sísmica) hasta una serie de receptores (geófonos) situados a lo largo de una línea de adquisición. Conociendo el tiempo de recorrido que las ondas emplean en recorrer la distancia que separa la fuente y los receptores, se puede determinar la velocidad de propagación del medio. A partir de los valores de velocidad se puede obtener un modelo del subsuelo compuesto por capas de velocidad constante y espesor variable. Este método es muy útil para determinar, de manera indirecta, la estratigrafía del subsuelo. La conformación del subsuelo por este método se validó con las perforaciones realizadas en el sector, con el fin de obtener un modelo geológico-geotécnico ajustado a las condiciones de campo. Las líneas sísmicas permiten cubrir mayor área en comparación con las perforaciones, por lo tanto, su empleo resulta óptimo para interpolar lo identificado en sitios específicos.

En total se realizaron seis (6) líneas sísmicas de 60 m de longitud cada una, ubicadas de forma tal que cubrieran la mayor parte del área de interés y obteniendo alcances entre 5 a 30 m de profundidad, permitiendo así identificar características de los suelos aflorantes en el sector de estudio y aportar datos para la determinación de las propiedades geomecánicas de los materiales relevantes para los análisis y modelos de estabilidad. Estas se realizaron en zonas donde existía

espacio suficiente para su realización. En la Figura 7.8 . se presenta la ubicación de las líneas realizadas dentro del área de estudio

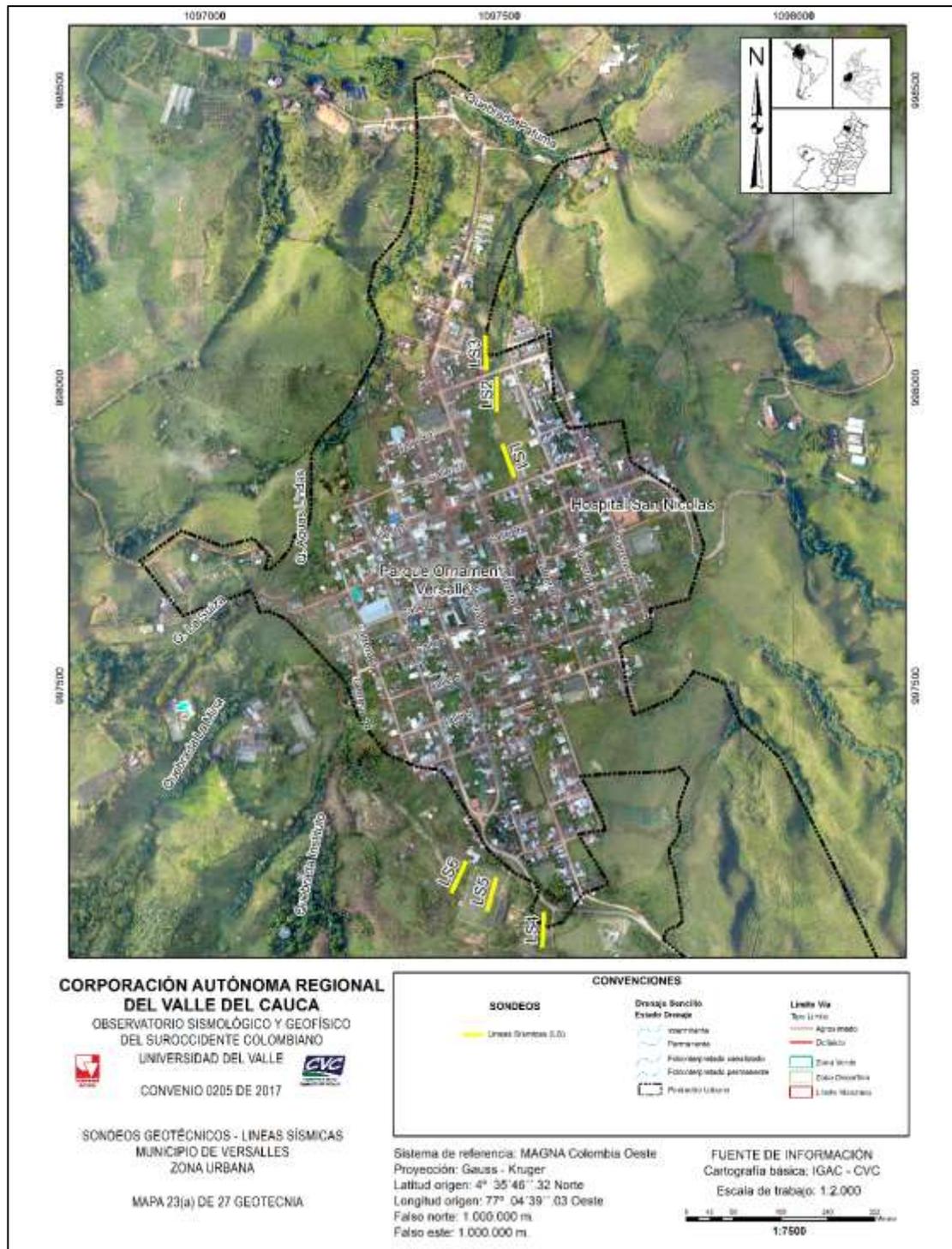


Figura 7.8. Localización de las líneas de refracción sísmica en el municipio de Versalles
Fuente: Elaboración propia.

La toma de datos en campo se realizó con el sismógrafo de 12 canales RAS-24 (Figura 7.9), con arreglos de 12 canales, los cuales se separaron cada 5.0 m, cubriendo en total una longitud de exploración de 60 m por línea. Para generar las ondas sísmicas sobre el suelo, en puntos específicos, se sitúa una platina metálica de 0.30 m x 0.30 m, que es golpeada con un martillo de 20 libras.



Figura 7.9. Realización en campo de una línea sísmica en el municipio de Versalles

Fuente: fotografías propias

La Tabla 7.3, muestra la ubicación de las líneas de refracción sísmicas hechas en el área de estudio para conocer los diferentes comportamientos del suelo, es decir, si el suelo es blando o duro a partir de la onda que emite, adicional a ello se presenta la longitud y la profundidad alcanzada con cada sondeo, siendo la LS3 la que alcanzo mayor profundidad, asociado con materiales de relleno no consolidados.

Tabla 7.3. Ubicación de las líneas de refracción sísmica realizadas para el presente estudio en el municipio de Versalles.

| COORDENADAS LÍNEAS SÍSMICAS MUNICIPIO DE VERSALLES | | | | | |
|--|-------------|----------|---------|--------------|-------------------------|
| CÓDIGO | VÉRTICE | LONGITUD | LATITUD | LONGITUD (m) | PROFUNDIDAD (m) |
| LS1 | LS1_Inicial | 1097505 | 997906 | 60 | >(4,70) (5,60) |
| LS1 | LS1_Final | 1097526 | 997850 | | |
| LS2 | LS2_Inicial | 1097495 | 998019 | 60 | >(4,30) (6,60) |
| LS2 | LS2_Final | 1097495 | 997959 | | |
| LS3 | LS3_Inicial | 1097478 | 998029 | 60 | >(2,00)(4,30) (6,60) |
| LS3 | LS3_Final | 1097476 | 998089 | | |
| LS4 | LS4_Inicial | 1097573 | 997060 | 60 | >(4,80) (5,70) |
| LS4 | LS4_Final | 1097576 | 997120 | | |
| LS5 | LS5_Inicial | 1097479 | 997121 | 60 | >(4,00) (5,00) |
| LS5 | LS5_Final | 1097496 | 997179 | | |
| LS6 | LS6_Inicial | 1097444 | 997206 | 60 | >(4,40) (6,40) |
| LS6 | LS6_Final | 1097418 | 997152 | | |

Fuente: Elaboración propia

El método de adquisición de datos depende de un impacto en superficie, realizado con un martillo de 20 lb, el cual es golpeado contra una placa de acero; seguidamente, mediante un sensor (Hammerswitch), manda un impulso electromagnético al equipo, el cual activa el registro de señales vibratorias de cada uno de los geófonos a profundidad durante un tiempo de lectura definido al inicio de las mediciones. El sistema cuenta con una unidad de control, geófonos verticales y horizontales (ondas P y ondas S respectivamente), un martillo, el Hammerswitch y algunos otros accesorios necesarios para el buen funcionamiento del sistema.

Para el almacenamiento de los datos, el equipo utiliza el software RAS-24 (propio del sismógrafo Seistronix RAS-24), donde los datos de entrada de configuración son el Sample Rate, el número de golpes, la ganancia, el tiempo de lectura y la sensibilidad del Trigger, además de las posiciones del primer geófono del arreglo y el punto de golpeo. En la (Figura 7.10), se presenta un mosaico de los datos registrados por medio del software RAS-24, durante la medición de las ondas S para la línea LS-1.

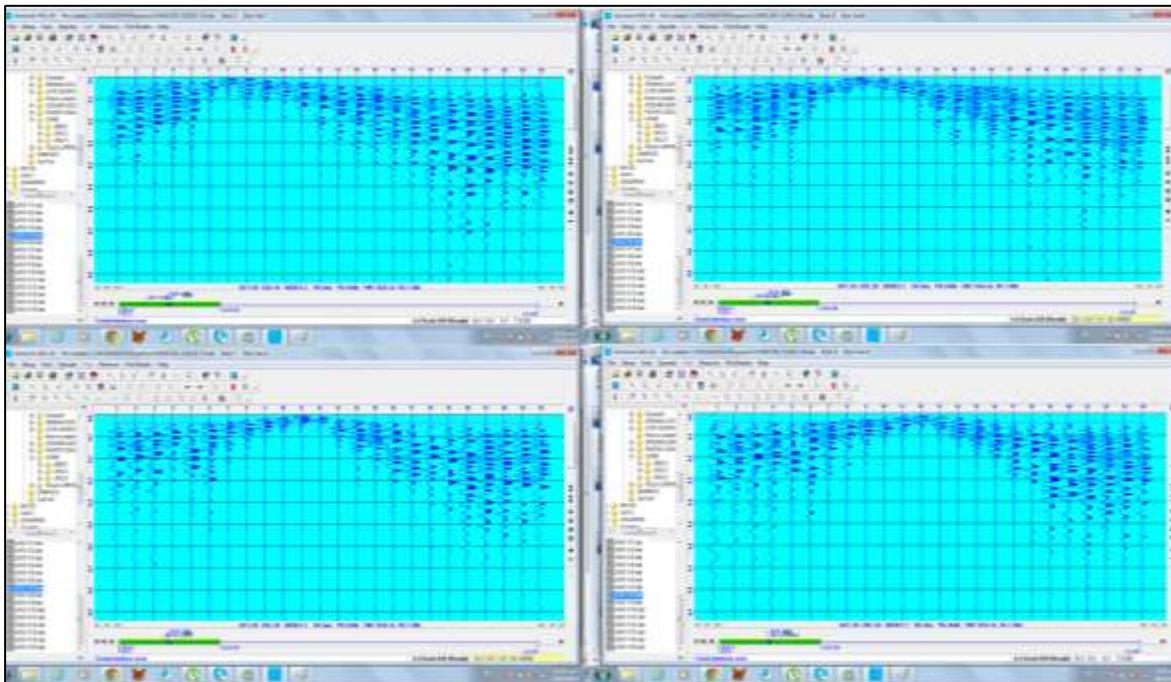


Figura 7.10. Ilustración típica de la captura de datos en campo mediante el software RAS-24 correspondiente a la ejecución de la línea de refracción LS-1 para ondas S

Fuente: Elaboración propia

Posterior a la adquisición de datos se hace uso del software Seisview, el cual toma los datos recolectados por el equipo RAS-24, identifica los timebreaks, es decir, el tiempo que toma la onda de impacto en llegar a cada uno de los geófonos del arreglo, y a partir de interpolaciones genera tomografías del suelo, con las que, posterior a un análisis de velocidades, facilitan la determinación de espesores de los diversos estratos del suelo.

Mediante el software Seisview, se identifican los primeros puntos de llegada de la onda a cada uno de los geófonos para cada golpe, dichos puntos de llegada son utilizados para un análisis

matemático de cada una de las líneas, mediante el uso de la metodología propuesta por el Explosive Excavation Research Laboratory Livermore de California, en el documento “Seismic Refraction Exploration for Engineering Site Investigations”. En la Figura 7.11 se presenta una imagen del análisis realizado mediante el software Seisview para la línea sísmica Ondas S.

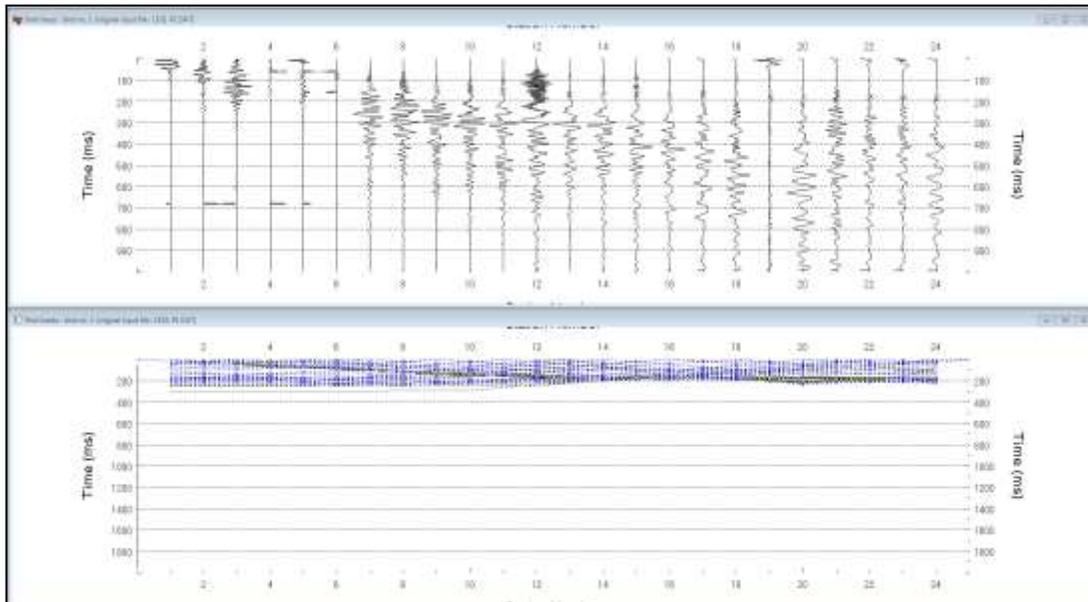


Figura 7.11. Ilustración típica del procesamiento de datos mediante el software Seisview correspondiente a la línea de refracción para ondas S.

Fuente: Elaboración propia

Se observa en las figuras anteriores como la onda de impacto en superficie, generada en diferentes puntos del arreglo, se dispersa a diferentes velocidades de onda a lo largo de los estratos del suelo, y cada uno de los geófonos recibe su señal entrando en resonancia con la amplitud y frecuencia de dichas ondas.

A partir del análisis de las dromócronas se determinan las diferentes pendientes que indican finalmente las velocidades características de cada uno de los estratos. Se observa en dichas dromócronas que a medida que se aumenta la distancia desde el punto de golpeo, se presentan cambios de pendientes menores, lo que se traduce en mayores velocidades a profundidad, ya que se debe recordar que a medida que la onda se aleja del punto de golpeo, los geófonos reciben la señal a mayor profundidad.

La Tabla 7.4, se enseñan las velocidades calculadas para cada uno de los puntos de golpeo. A partir de dichas velocidades y en comparación con las tomografías del terreno, se determinan los espesores de cada estrato, relacionados con sus velocidades de transmisión de Ondas S. lo cual ayuda a determinar si el horizonte está compuesto por suelo, roca meteorizada o basamento rocoso, para una mayor comprensión de lo dicho se presenta un ejemplo de la tomografía del terreno hecha en barrio Los Fundadores.

Tabla 7.4. Estratos, velocidades y espesores identificados en cada una de las líneas sísmicas realizadas en el área de estudio.

| LÍNEAS | ESTRATOS | VELOCIDADES [m/s] | PROFUNDIDAD [m] |
|--------|----------|-------------------|-----------------|
| | | Vs | |
| LS1 | 1 | 140 | 2,00 |
| | 2 | 500 | 5,60 |
| | 3 | 1460 | > 5,60 |
| LS2 | 1 | 160 | 2,20 |
| | 2 | 740 | 6,60 |
| | 3 | 1200 | > 6,60 |
| LS3 | 1 | 190 | 2,00 |
| | 2 | 710 | 6,00 |
| | 3 | 1700 | > 6,00 |
| LS-4 | 1 | 140 | 2,10 |
| | 2 | 310 | 5,70 |
| | 3 | 1000 | > 5,70 |
| LS5 | 1 | 260 | 1,90 |
| | 2 | 500 | 5,00 |
| | 3 | 1360 | > 5,00 |
| LS6 | 1 | 170 | 1,50 |
| | 2 | 400 | 6,40 |
| | 3 | 1380 | > 6,40 |

Fuente: Elaboración propia

En la Figura 7.12, se presenta la tomografía del terreno, de la línea sísmica LS-1 (ubicada en la carrera cuarta (4ª) iniciando desde la trece (13) en sentido noreste-suroccidente), donde se observan 3 horizontes de velocidad, las dos primeras superficies corresponden a suelos ricos en hierro (lateríticos) con velocidades de 140 m/s y 500 m/s de consistencia blanda a dura, el tercer estrato se relaciona con diabasas fracturadas de resistencia dura, pertenecientes a la Formación Volcánica (Kv).

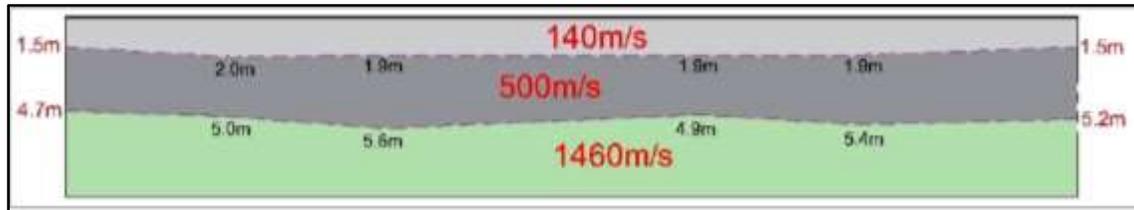


Figura 7.12. Tomografía del terreno, velocidades de onda plana (Vs), LS-1.

Fuente: Elaboración propia

7.2.3 Ensayos de laboratorio

El plan de ensayos de laboratorio tuvo por objeto la caracterización geomecánica de los materiales que componen el subsuelo bajo el área de estudio, para lo cual se llevaron a cabo ensayos de clasificación y de resistencia. Dentro de los ensayos de clasificación de suelos se realizaron humedad natural, límites de consistencia, granulometría, contenido de humedad, corte directo y peso unitario.

La Tabla 7.5, se presentan el tipo y número de ensayos realizados para la caracterización de los materiales recuperados en el proceso de exploración geotécnica en el municipio de Versalles. En complemento a la tabla anterior, en la Tabla 7.6 se reportan los resultados obtenidos en los ensayos de laboratorio realizados para cada muestra de suelo. Donde en la granulometría por tamizado se encontró que predominan los suelos finos, principalmente compuestos por arcillas y limos mezclados con un porcentaje mínimo de arenas.

Tabla 7.5. Ensayos de laboratorio realizados para el presente estudio.

| ENSAYO DE LABORATORIO | CANTIDAD |
|-----------------------------------|-----------------|
| Contenido de humedad | 25 |
| Límites de consistencia (LL y LP) | 25 |
| Peso unitario | 13 |
| Granulometría por tamizado | 14 |
| Consolidación | 7 |
| Corte directo | 9 |

Fuente: Elaboración propia

Tabla 7.6. Relación de resultados de ensayos de laboratorio realizados a las muestras recuperadas en las labores de exploración en el municipio de Versalles

| ID EXPLORACIÓN | ID MUESTRA | PROFUNDIDAD [m] | | PESO UNITARIO HÚMEDO (g/cm ³) | PESO UNITARIO SECO (g/cm ³) | HUMEDAD (%) | LÍMITE LÍQUIDO (%) | LÍMITE PLÁSTICO (%) | ÍNDICE DE PLASTICIDAD (%) | GRANULOMETRÍA | | | CLASIFICACIÓN USCS | CORTE DIRECTO | | CONSOLIDACIÓN | | | | | | DESCRIPCIÓN | |
|----------------|------------|-----------------|-------|---|---|-------------|--------------------|---------------------|---------------------------|---------------|-------------|------------|--------------------|-------------------------------|---------------|----------------|----------------|--|---|----------------|----------------|-------------|--|
| | | DESDE | HASTA | | | | | | | % DE GRAVAS | % DE ARENAS | % DE FINOS | | ÁNGULO DE FRICCIÓN PICO f (°) | COHESIÓN PICO | G _s | e ₀ | Esf. Efec. Inicial (Kg/cm ²) | Esf. Preconsolidado (Kg/cm ²) | C _c | C _r | | R S C |
| P-01 | M5 | 6 | 7,5 | 1,63 | 1,01 | 61,7 | 76,8 | 28,1 | 48,7 | 0,4 | 8,8 | 90,8 | CH | 19,5 | 25 | 2,7 | 1,569 | 0,775 | 1,7 | 0,371 | 0,035 | 2,193 | Arcilla color rojizo de consistencia blanda |
| P-02 | M5 | 6 | 7,5 | 1,91 | 1,46 | 30,7 | 43,7 | 25,4 | 18,3 | 0,9 | 11,5 | 87,6 | CL | | | 2,72 | 0,837 | 0,834 | 1,9 | 0,285 | 0,018 | 2,277 | Arcilla algo arenosa color café claro verdoso |
| P-03 | M6 | 4,5 | 6 | 1,8 | 1,3 | 38,7 | 55,8 | 28,7 | 27,1 | 1,8 | 11,5 | 86,7 | CH | 23,7 | 28 | 2,69 | 1,07 | 0,97 | 1,9 | 0,389 | 0,048 | 1,959 | Arcilla gris verdosa con algo de arena fina |
| P-04 | M2 | 1 | 2 | | | 54,5 | 56 | 25 | 31 | | | | CH | | | | | | | | | | Arcilla arenosa de grano fino color naranja con vetas negras |
| P-04 | M7A | 7,5 | 8,5 | 1,67 | 1,07 | 56,2 | 72,3 | 33,7 | 38,6 | 0 | 7,6 | 92,4 | CH | 20,5 | 30 | 2,7 | 1,515 | 0,846 | 1,2 | 0,42 | 0,018 | 1,418 | Arcilla rojiza de consistencia blanda |
| P-05 | M5 | 5,5 | 7 | 1,7 | 1,12 | 51,9 | 69,8 | 31,1 | 38,7 | 5,2 | 12,4 | 82,4 | CH | 19,1 | 29 | 2,7 | 1,398 | 0,848 | 1,1 | 0,303 | 0,037 | 1,298 | Arcilla arenosa habano claro con tonos rojizos |
| P-06 | M5 | 6 | 7 | | | 56,6 | 69,8 | 23,9 | 45,9 | | | | CH | | | | | | | | | | Arcilla rojizo amarillento |
| P-07 | M7 | 9 | 10 | 1,72 | 1,17 | 47,3 | 66,6 | 29 | 37,6 | 0 | 6,4 | 93,6 | CH | 22,1 | 29 | 2,69 | 1,286 | 1,074 | 1,4 | 0,292 | 0,037 | 1,304 | Arcilla color rojizo |
| P-08 | M3 | 3 | 4,5 | | | 45,9 | 57,7 | 39,3 | 18,4 | 1,2 | 12,1 | 86,6 | MH | | | | | | | | | | Limo arenoso café oscuro |
| P-09 | M4 | 4,5 | 6 | | | 56,6 | 77 | 26 | 51 | | | | CH | | | | | | | | | | Arcilla rojizo amarillento |
| P-10 | M3 | 3 | 4,5 | | | 79,2 | 93,9 | 34,6 | 59,3 | 1,4 | 11,7 | 86,9 | CH | | | | | | | | | | Arcilla arenosa rojizo amarillento |
| AP-1 | | 0 | 2 | | | 43 | 58,9 | 26,5 | 32,4 | 1 | 14,1 | 84,9 | CH | | | | | | | | | | Arcilla arenosa verde esmeralda |
| AP-2 | | 0 | 2 | | | 41,9 | 58,1 | 29,6 | 28,5 | | | | CH | | | | | | | | | | Arcilla café con algo de gravas |
| AP-4 | | 0 | 2 | | | 52,9 | 64,2 | 36,4 | 27,8 | | | | MH | | | | | | | | | | Limo carmelito claro |
| AP-9 | | 0 | 2 | | | 41,8 | 54,5 | 34,1 | 20,4 | 1,5 | 11,8 | 86,7 | MH | 20,1 | 23 | 2,68 | 1,253 | | | | | | Limo arenoso carmelito oscuro con raíces |

| ID EXPLORACIÓN | ID MUESTRA | PROFUNDIDAD [m] | | PESO UNITARIO HÚMEDO (g/cm ³) | PESO UNITARIO SECO (g/cm ³) | HUMEDAD (%) | LÍMITE LÍQUIDO (%) | LÍMITE PLÁSTICO (%) | ÍNDICE DE PLASTICIDAD (%) | GRANULOMETRÍA | | | CLASIFICACIÓN USCS | CORTE DIRECTO | | CONSOLIDACIÓN | | | | | | DESCRIPCIÓN | | | |
|----------------|------------|-----------------|-------|---|---|-------------|--------------------|---------------------|---------------------------|---------------|-------------|------------|--------------------|-------------------------------|---------------|----------------|----------------|--|---|----------------|----------------|-------------|------------------|---|--|
| | | DESDE | HASTA | | | | | | | % DE GRAVAS | % DE ARENAS | % DE FINOS | | ÁNGULO DE FRICCIÓN PICO f (°) | COHESIÓN PICO | G _s | e ₀ | Esf. Efec. Inicial (Kg/cm ²) | Esf. Preconsolidado (Kg/cm ²) | C _c | C _r | | R _S C | | |
| AP-10 | | 0 | 2 | | | 51,8 | 71,9 | 32,8 | 39,1 | 0,9 | 12,2 | 87 | CH | | | | | | | | | | | | Arcilla aronosa habano con oxidaciones |
| AP-11 | | 0 | 2 | | | 30,3 | 50,3 | 26,8 | 23,5 | | | | CH | | | | | | | | | | | | Arcilla gris con oxidaciones |
| AP-15 | | 0 | 2 | | | 68,1 | 77,2 | 48,8 | 28,4 | | | | MH | | | | | | | | | | | | Limo habano oscuro |
| AP-16 | | 0 | 2 | | | 41,7 | 52,2 | 33,1 | 19,1 | | | | MH | | | | | | | | | | | | Limo café claro con algunas raíces |
| AP-17 | | 0 | 2 | | | 80,8 | 99 | 43,9 | 55,1 | | | | MH | | | | | | | | | | | | Limo habano amarillento oscuro |
| AP-18 | | 0 | 2 | | | 74,4 | 88,1 | 32,7 | 55,4 | | | | CH | | | | | | | | | | | | Arcilla gris claro con oxidaciones |
| AP-19 | | 0 | 2 | | | 91,8 | 101,8 | 41,6 | 60,2 | 0,3 | 7,1 | 92,6 | CH | | | | | | | | | | | | Arcilla habano rojizo |
| AP-20 | | 0 | 2 | 1,33 | 0,83 | 59,5 | 68,5 | 46,2 | 22,3 | 0,3 | 10,7 | 89 | MH | 19,7 | 21 | 2,63 | 2,134 | 0,17 | 1,1 | 0,597 | 0,082 | 6,487 | | Limo café amarillento con raíces y tonos verdosos | |
| AP-23 | | 0 | 2 | | | 70,1 | 88,2 | 38,3 | 49,9 | | | | CH | | | | | | | | | | | | Arcilla habano oscuro |
| AP-24 | | 0 | 2 | 1,31 | 0,79 | 65,2 | 73,7 | 49,5 | 24,2 | 0,4 | 8,7 | 90,9 | MH | 28,5 | 12 | 2,69 | 2,389 | | | | | | | | Limo carmelito claro algo verdoso con raíces |

Fuente: Elaboración propia

7.2.4 Ensayos de corte directo

Con el ánimo de estimar los parámetros de resistencia al corte de los materiales, se realizaron ensayos de corte directo sobre muestras de suelo, recuperadas en las perforaciones y apiques realizados. Este ensayo se realizó para condiciones pico, lo que permitió obtener una envolvente residual para así estimar los parámetros de resistencia en estado crítico. Se realizaron sobre muestras de suelo a nivel superficial y profundo (2 a 10 metros de profundidad), incluyendo la estimación de los parámetros de resistencia del suelo (cohesión y ángulo de fricción interna). Este ensayo se realizó para tres niveles de esfuerzos, cada uno a través de tres etapas: saturación, consolidación y falla.

La Figura 7.13a, presenta el esfuerzo aplicado y la deformación que ha sufrido la muestra (representado por las 3 líneas), además se puede determinar el comportamiento de la misma (dúctil o frágil). En complemento la Figura 7.13b exhibe el esfuerzo normal y el esfuerzo cortante, mostrando el intercepto de la cohesión con su respectivo ángulo de fricción.

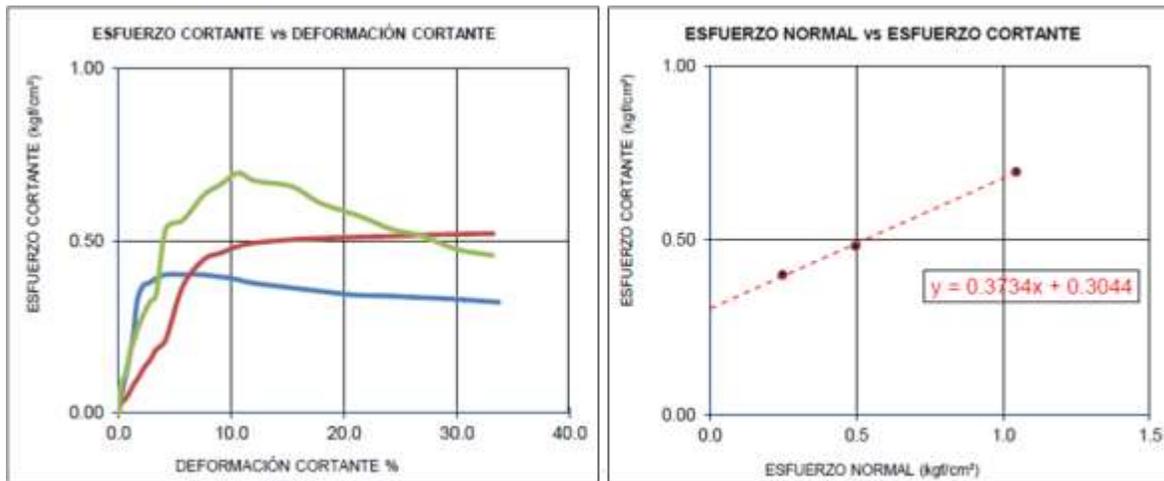


Figura 7.13. Gráficas esfuerzo-deformación pico obtenidas del ensayo de corte directo sobre la muestra M7A de la perforación P-04.

Fuente: Elaboración propia.

Los esfuerzos axiales aplicados en este ensayo se encuentran en el anexo 4 “Ensayos de Laboratorio”

7.2.5 Ensayos de consolidación

Para el ensayo de consolidación de suelos es necesario determinar no solo el tiempo en el cual se produce la consolidación si no también la magnitud del asentamiento que tendrá lugar debido a la deformación del suelo, para esto se realiza la prueba de consolidación, la cual consiste en someter a un esfuerzo de comprensión axial a una muestra inalterada del suelo en estudio. La muestra deberá ser inalterada, ya que la consolidación depende de la estructura del suelo (Becerra et al, 2015).

7.3 PARÁMETROS GEOTÉCNICOS

La γ Error! No se encuentra el origen de la referencia. resume las propiedades geotécnicas e establecidas para cada uno de los materiales identificados en la zona de estudio, apoyados en la cartografía de las unidades geológicas superficiales (UGS), los resultados de la exploración del subsuelo y de los ensayos de laboratorio practicados en el municipio, expuestos en los numerales previos. En ella se discretizan las propiedades en función de su profundidad y UGS, dando valores promedios en cuanto a su clasificación, características básicas y resistencia.

Tabla 7.7. Resumen de los parámetros geotécnicos establecidos para los materiales presentes en la zona de estudio

| MATERIAL | APIQUE PERF. | DESCRIPCIÓN | UGS | W | LL | LP | IP | USCS | %GRAVA | %ARENA | %FINOS | PESO UNITARIO (g/cm ³) | CONSOLIDACIÓN | | | | | CORTE PICO | |
|----------|-----------------|---|------|------|------|------|------|------|--------|--------|--------|------------------------------------|---------------|------|------|------|------|------------|--------|
| | | | | | | | | | | | | | e | GS | OCR | CC | CS | C (KPa) | FI (°) |
| 7A | P4 | Arcilla rojiza de consistencia blanda | Sa | 56,2 | 72,3 | 33,7 | 38,6 | CH | 0 | 7,6 | 92,4 | 1,67 | 1,52 | 2,7 | 1,4 | 0,42 | 0,02 | 30 | 20,5 |
| 5 | P5 | Arcilla limosa color habano claro con tonos rojizos | Stc | 51,9 | 69,8 | 31,1 | 38,7 | CH | 5,2 | 12,4 | 82,4 | 1,7 | 1,4 | 2,7 | 1,3 | 0,3 | 0,04 | 29 | 19,1 |
| 7 | P7 | Arcilla color rojizo | Sale | 47,3 | 66,6 | 29 | 37,6 | CH | 0 | 6,4 | 93,6 | 1,72 | 1,29 | 2,69 | 1,3 | 0,29 | 0,04 | 29 | 22,1 |
| - | Ap19 | Roca dura | Rd | - | - | - | - | - | - | - | - | - | - | - | - | - | - | - | - |
| - | Ap20 | Limo arcilloso café amarillento con raíces y tonos verdosos | Sta | 59,5 | 68,5 | 46,2 | 22,3 | MH | 0,3 | 10,7 | 89 | 1,33 | 2,13 | 2,63 | 6,49 | 0,6 | 0,08 | 19,7 | 21 |

Fuente: Elaboración propia, a partir de los ensayos de laboratorio

7.4 MODELOS GEOLÓGICO-GEOTÉCNICOS

Bajo los lineamientos anteriores y con el fin de realizar la evaluación de estabilidad, se establecieron seis (6) secciones o modelos geológico-geotécnicos de análisis, representativos de la condición actual del terreno y cuya localización se muestra sobre el mapa (Figura 7.14). Tales secciones fueron definidas de tal manera que atravesaran las unidades geológicas superficiales definidas previamente, y que adicionalmente atravesaran los cuerpos inestables, con el fin de modelar los mecanismos de falla presentes, así como calibrar los resultados de los análisis. Para la generación de estas secciones se tuvo en cuenta la información topográfica, la cartografía geológica, geomorfológica y los registros estratigráficos de las perforaciones, apiques, líneas de refracción sísmica y parámetros geotécnicos, entre otros.



Figura 7.14. Ubicación Secciones de análisis en el municipio de Versalles

Fuente: Elaboración propia

A manera de ilustración, se presentan los 6 perfiles geológico geotécnicos por separado (Figura 7.15 a Figura 7.20) realizados para el área de estudio, en las secciones se aprecian espesores de limos que van desde 0,98 hasta los 3 metros de profundidad, los cuales se unen a suelos arcillosos, a excepción del perfil AA' en el cual se observa una distribución textural inversa

(arcilla en la superficie, limos en profundidad) ello se puede relacionar con los deslizamientos y al manejo que se ha tenido el área.

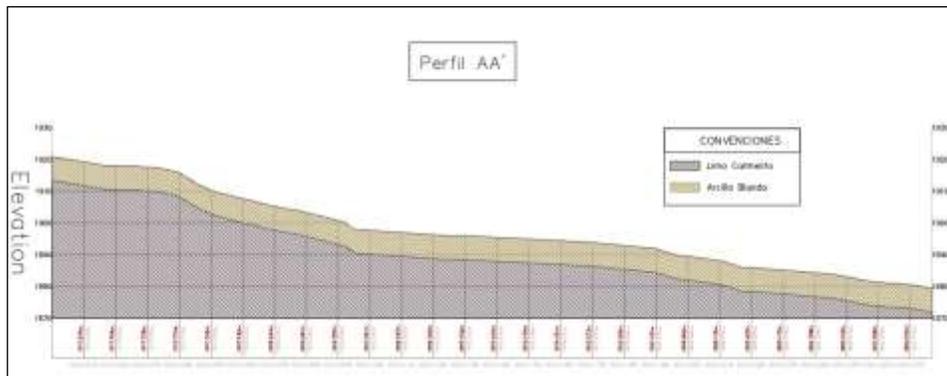


Figura 7.15. Perfil AA' sección de análisis
Fuente: Elaboración propia

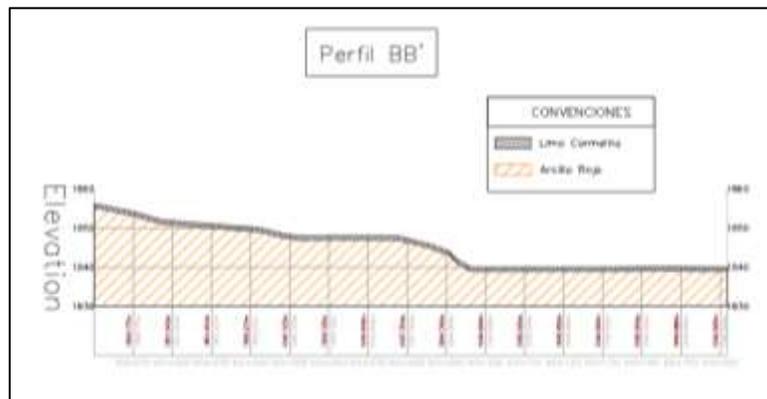


Figura 7.16. Perfil BB' sección de análisis
Fuente: Elaboración propia

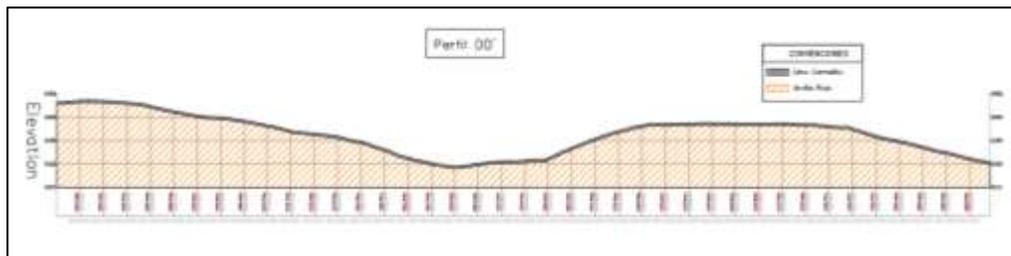


Figura 7.17. Perfil DD' sección de análisis
Fuente: Elaboración propia

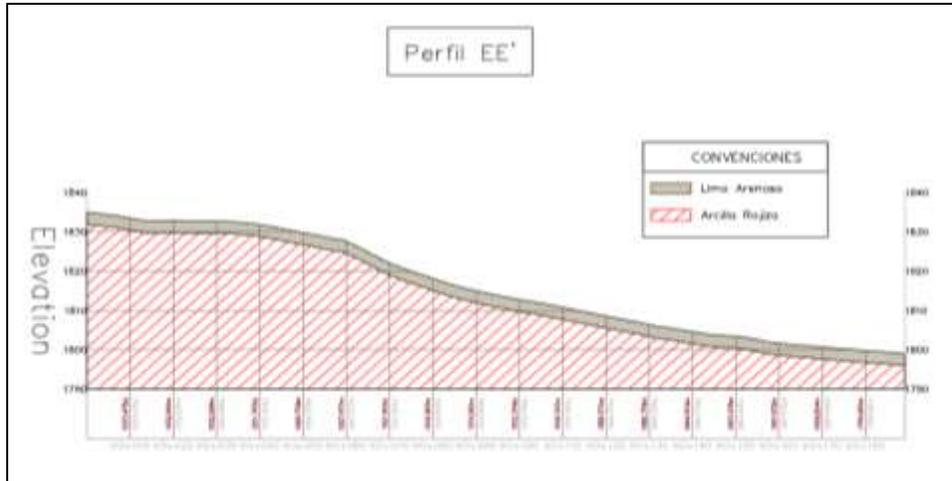


Figura 7.18. Perfil EE' sección de análisis
Fuente: Elaboración propia

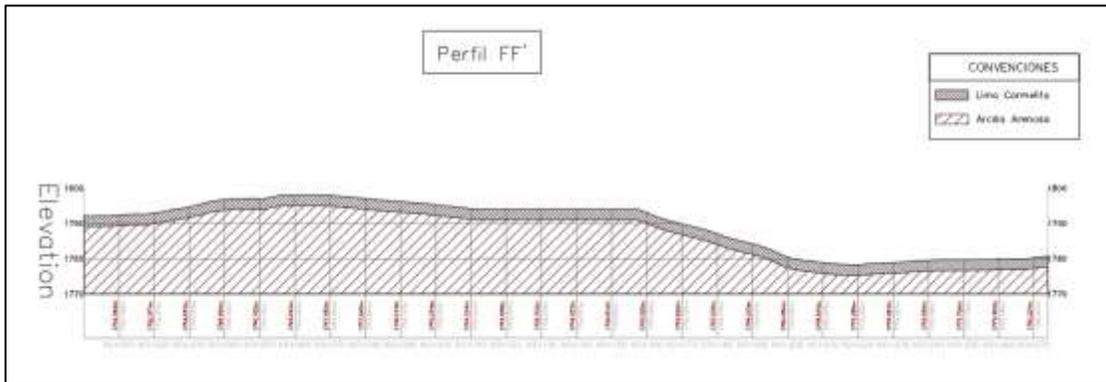


Figura 7.19. Perfil FF' sección de análisis
Fuente: Elaboración propia

Una vez se han diseñado los perfiles, se procede a distribuir las cargas, a manera de ilustración se muestra la sección CC' (Figura 7.20), localizada en la parte oriental del área de estudio sobre el área afectada por la socavación interna del suelo (fenómeno de tubificación), la sección se elaboró en sentido sur – norte, cubriendo desde la parte alta a la baja.

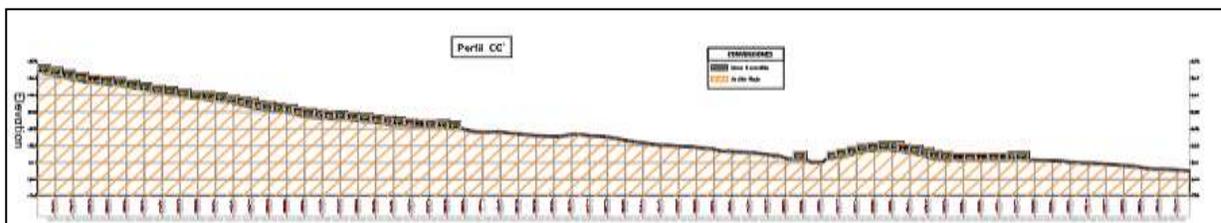


Figura 7.20. Perfil sección de análisis
Fuente: Elaboración propia

De esta manera, los modelos representan, en promedio las zonas homogéneas presentes en el área de estudio, de condiciones y comportamientos geológicos y geomecánicos similares, con dinámicas de movimientos característicos en cada uno de ellos. Por consiguiente, se asume que el grado de estabilidad de esta sección (o sus partes) es atribuible a la región geomorfológica a la que pertenece. Lo anterior, se constituye en la hipótesis de trabajo para los análisis de estabilidad que se presentan a continuación.

7.5 ANÁLISIS DE ESTABILIDAD

Los análisis de estabilidad se enfocan al estudio de los modos y posibilidades de movimientos a lo largo de los planos de debilidad estructural, en los sectores donde hay suelos transportados, lo que abarca la mayor parte de la zona de estudio, así como en los mecanismos de movilización de los depósitos cuaternarios recientes y suelos residuales arcillosos.

Posteriormente, se aborda el modelamiento de los mecanismos de falla, con ayuda de los métodos de equilibrio límite, de la respuesta estática y pseudoestática de los estados probables de movilización (según su geometría, el tipo de material, su disposición estratigráfica y condiciones de drenaje), tanto de los principales cuerpos del cuaternario como de los materiales rocosos, a través de deslizamientos rotacionales, traslacionales y planares infinitos, y a la deducción, a partir de los factores de seguridad y de la probabilidad condicional de falla, de los diferentes niveles de amenaza para los estados actual y futuro.

7.6 METODOLOGÍA

Una vez identificados los mecanismos de falla (traslacional, caída y rotacional), y realizada la respectiva caracterización geotécnica, se definieron y construyeron los perfiles geológico-geotécnicos, con el fin de realizar los respectivos análisis de estabilidad (modelación numérica). Para efectos de evaluar la estabilidad de los diferentes sectores se procedió a realizar los análisis de la siguiente manera, en función del factor de seguridad y la probabilidad de falla:

- Análisis de estabilidad en depósitos coluviales arcillosos sobre suelos residuales y transportados
- Análisis de estabilidad del material superficial alterado, suelto y fracturado (suelo residual y transportados)

Por lo anterior, se procedió a analizar el espectro de posibilidades que se pueden obtener variando los parámetros de resistencia de los materiales y el nivel de intensidad de los agentes detonantes considerados (lluvia y sismo). De esta manera, los análisis de estabilidad en términos de probabilidad de falla se tornan más representativos que el reporte de un factor de seguridad, el cual es el simbolismo numérico de uno de los múltiples eventos factibles.

Sin embargo, la deducción de la probabilidad de falla implica conocer la distribución estadística del factor de seguridad (González, 1999), específicamente la de sus dos primeros momentos: μ_{FS} y σ_{FS} , es decir, la media y la desviación estándar. La solución a la relación predictiva entre

estas dos variables (Pf y FS) y la obtención de ellas, se plantea aquí con el empleo de métodos aproximados, específicamente mediante el método de Montecarlo.

En este orden de ideas, la probabilidad de ocurrencia de un evento particular (MM) se evalúa en términos de sus eventos condicionantes, a través de la ley de probabilidades totales, de tal manera que la probabilidad de ocurrencia de un deslizamiento está definida por la siguiente ecuación:

$$p(D) = P(D/LS)p(LS) + P(D/L\bar{S})p(L\bar{S}) + P(D/\bar{L}S)p(\bar{L}S) + P\left(\frac{D}{\bar{L}\bar{S}}\right)p(\bar{L}\bar{S}) \quad (7)$$

Dicha probabilidad, como lo expresan sus términos, es función de las probabilidades condicionales de presentarse el deslizamiento para todas las posibles combinaciones de precipitación y sismo, así:

$p(D)$: Es la probabilidad de ocurrencia de un deslizamiento

$p(D/LS)$: Es la probabilidad condicional de que acaezca el deslizamiento dado que haya lluvia y sismo.

$p(LS)$: Es la probabilidad de que se presenten la lluvia y el sismo simultáneamente

$p(D/\bar{L}S)$: Es la probabilidad condicional de que ocurra el deslizamiento dado que se presente el sismo y que no tenga lugar la lluvia

$p(\bar{L}\bar{S})$: Es la probabilidad de que haya lluvia y no se produzca el sismo.

$p(D/\bar{L}\bar{S})$: Es la probabilidad condicional de que ocurra el deslizamiento dado que no haya lluvia ni sismo

$p(LS)$: Es la probabilidad de no tenga lugar ni el sismo ni la lluvia

Con el fin de evaluar la probabilidad de falla del talud, es necesario entrar a evaluar los agentes que pueden afectar la estabilidad de la ladera. Para el desarrollo de este tema se requiere el tratamiento previo de cuatro hipótesis:

- Parámetros de resistencia efectivos para cada material.
- Mecanismo de falla.
- Método de análisis.
- Agentes detonantes.

Es importante destacar que la segunda y tercera hipótesis se consideran unidades determinísticas, debido a que son invariables, mientras que la primera y la cuarta están regidas por los principios de la incertidumbre, bien sea por la variabilidad espacial de los parámetros de resistencia o bien por la variabilidad temporal de los agentes detonantes, por lo que se les asignan distribuciones de probabilidad, las cuales se explican a continuación.

7.7 MÉTODOS NUMÉRICOS DE ANÁLISIS

Los métodos de análisis utilizados están basados en la teoría de equilibrio límite. Adicionalmente se utilizó como modelo constitutivo el criterio de resistencia de Mohr – Coulomb para suelos. Para efectos de cálculo, se utilizó el programa SLIDE para modelar los

movimientos con mecanismo de falla rotacional – traslacional. Adicionalmente se utilizó una rutina sobre MATLAB para el análisis de talud infinito.

Bajo los lineamientos anteriores y con el fin de adelantar la tarea de evaluación de estabilidad para la condición actual y futura, se utilizaron las secciones o modelos geológicos-geotécnicos.

7.8 PARÁMETROS DE RESISTENCIA

Para la obtención de los parámetros geomecánicos que fueron asignados a los diferentes materiales, se utilizaron los resultados de los trabajos cartográficos de campo y del plan de ensayos de laboratorio (ver Tabla 7.5) realizados sobre muestras inalteradas, ejecutados en el área de estudio.

En particular, en lo que respecta a los parámetros de resistencia, los ensayos consistieron en pruebas cortes directos y estáticos consolidados no drenado midiendo presión de poros, las cuales son pruebas representativas para la obtención de los parámetros de resistencia en términos de esfuerzos efectivos.

El resumen de los parámetros de resistencia asignados a los diferentes materiales presentes en el subsuelo de la zona de estudio se ilustra en la (Tabla 7.8).

Tabla 7.8. Parámetros de resistencia para los diferentes materiales presentes en la zona

| UNIDAD | C (Kpa) | Φ (°) | γ (KN/m ³) |
|--------|---------|------------|-------------------------------|
| Rd | 19613 | 48 | 26,5 |
| Sa | 30 | 21 | 16,7 |
| Sale | 29 | 22 | 17,2 |
| Sta | 21 | 20 | 13,3 |
| Stc | 29 | 19 | 17,0 |

Fuente: Elaboración propia.

7.9 AGENTES DETONANTES

Dentro de los agentes detonantes que pueden afectar la estabilidad de las laderas en el área de estudio, se consideraron los eventos sísmicos y la presencia de agua en el subsuelo, se tienen en cuenta estos factores, porque son los que mayor incidencia tienen en la ocurrencia de movimientos en masa.

7.9.1 Sismo

La región andina colombiana se encuentra determinada por fallas geológicas y de sismos, por el proceso de convergencia de dos grandes placas tectónicas; la de Nazca (oceánica) y la de Suramérica. Entre estas dos, el llamado "Bloque Norandino" (entre la Zona de Subducción frente al Litoral Pacífico y el Piedemonte de la Cordillera Oriental), se ha desarrollado como una microplaca, con movimiento en dirección hacia el NNE. Dentro del esquema de esfuerzos regionales producidos por la fricción entre estas placas, se destacan tres tipos de fuentes sísmicas de importancia para la región del Valle del Cauca.

a) La "Zona de Subducción", cuya traza superficial corre a unos 150 - 200 km paralela a la Costa Pacífica. Es la más importante de las fuentes sísmicas en Colombia, en términos de las magnitudes máximas y recurrencias de sismos grandes, con magnitudes mayores de 8.0. Su sismicidad es superficial, hasta profundidades de 40 km aproximadamente.

b) Sismicidad de la "Zona de Wadati-Benioff", la parte profunda del plano de fricción entre las placas que convergen (o sea la continuación de la Zona de Subducción). La sismicidad de esta fuente es la más profunda de la región, hasta más de 100 km. Se concentra en la parte norte del Valle del Cauca.

c) Sismicidad tipo "intraplaca". A esta categoría pertenecen fallas como las del sistema Romeral, Cauca y la Falla Frontal del Borde Llanero (que separa la placa Suramérica del Bloque Norandino).

Las rocas en el municipio de Versalles, se encuentran afectadas por un complejo sistema de fallas regionales, donde predominan direcciones de fallamiento N20°-30°E, N60°-70°E y N40°-50°W, (Nivia et al., 1997).

Fallamiento N20°-30°E. Falla de Roldanillo (presenta una tendencia general de orientación Norte-Sur y rumbo de N17°E), con componente principalmente inversa, y es considerada potencialmente activa (Peña-Martínez y Mosquera- Antury, 2010). Para Barrero (1979), esta falla separa las rocas ultramáficas del cinturón de basaltos UP. Estos a su vez están limitados al occidente por la Falla Toro (Parra et al., 1984)-Andinapolis (Barrero 1979) que los pone en contacto con un cinturón de metapelitas QD. Este está limitado al Occidente por la Falla del Dovio que pone a su vez en contacto hacia el Occidente estas metapelitas con basaltos del cinturón VN (Nivia et al., 1997).

Fallamiento N40°-50°W. Se presentan en trazos segmentados dispuestos a manera de "Echelon" donde se producen movimientos sinestrales que algunas veces desplazan las fallas del Sistema N20°-30°E (Lozano, 1986). La falla Naranjal hace parte de este sistema y atraviesa la Cordillera Occidental. En el área de la Plancha 242 controla la depresión sobre la cual se formó el valle intramotano del Dovio y la Falla de las Cañas que desplaza el valle aluvial del río Cauca.

Fallamiento N60°-70°E. No tiene una relación temporal clara con el sistema de fallamiento N20-30E, pero se observan movimientos laterales derechos que desplazan cuñas de roca limitados por fallas orientadas N40-50W. McCourt et al (1984) postulan que el sistema de fallas N40-50E es más joven que el N60-70E porque a diferencia de este, el primero corta la superficie discordancia entre las unidades sedimentarias Paleógenas y Neógenas aflorantes en las estribaciones de la Cordillera Occidental (INGEOMINAS, 2005).

"Los sismos además del movimiento vibratorio característico, pueden producir una serie de efectos inducidos que dan lugar a grandes deformaciones y roturas en el terreno, entre estos encontramos deslizamientos y desprendimientos de rocas. Éstos se relacionan con el comportamiento geológico y geotécnico del terreno" (Villalta y González, 2011 p 7). Los movimientos de laderas no sólo dependen del sismo para su generación, sino que requieren que la intensidad sea alta para que los deslizamientos y desprendimientos tengan lugar.

Considerando los anteriores resultados, el Reglamento Colombiano de Construcción Sismo Resistente NSR-10, localiza a Versalles en zona de amenaza sísmica alta, asignándole un coeficiente de aceleración pico efectiva (Aa) de 0,30g a nivel de roca. Por otro lado, en el Título H de esta norma, establece el coeficiente sísmico pseudoestático (Kst), el cual específicamente para la zona de estudio es de 1,0.

Por lo tanto, la aceleración horizontal a involucrar en los análisis pseudo-estáticos de estabilidad se estima en 0,24 (80 % Aa), para el escenario futuro (periodo de retorno de 475 años que corresponde a condiciones extremas).

7.9.2 Agua subterránea

Debido a la dificultad en predecir el real efecto del agua sobre la inestabilidad del talud, se observaron los niveles freáticos, una vez realizadas las perforaciones. El tipo de material geológico y las características hidrogeológicas observadas en el área de estudio, indudablemente controlan la profundidad de la tabla de agua existente en el subsuelo; en la Tabla 7.9, se resumen los niveles freáticos medidos, notándose que por lo general los niveles de agua son relativamente profundos, exceptuando los registrados en el sector más suroriental del área, debido seguramente al tipo de material predominantemente fino en dicho sector.

Para determinar la posición del nivel freático, después de ocurrida una lluvia se utilizó la fórmula presentada en el numeral 7.9.2.2, que básicamente nos explica lo siguiente:

Se toma el valor de precipitación a partir de las curvas IDF con una duración de 24 horas. Adicional a ello se conoce la posición del nivel freático a partir de las exploraciones realizadas (perforaciones), para luego determinar por medio de la varianza qué tanto fluctúa el nivel freático.

Tabla 7.9. Medición de los niveles freáticos durante las labores de exploración en el municipio de Versalles

| PERFORACIÓN / APIQUE | UGS | FECHA DE MEDICIÓN | NIVEL FREÁTICO (m) | CÁLCULO NIVEL FREÁTICO CON LLUVIA |
|----------------------|------|-------------------|--------------------|-----------------------------------|
| P4 | Sa | Octubre 2018 | 3,1 | Superficie |
| P5 | Stc | Octubre 2018 | 2,2 | Superficie |
| P7 | Sale | Octubre 2018 | 3,9 | Superficie |
| AP19 | Rd | Octubre 2018 | - | Superficie |
| Ap20 | Sta | Octubre 2018 | - | Superficie |

Fuente: Elaboración propia

7.9.2.1 Hidrología

Para determinar los caudales máximos para periodos de retorno de 2, 5, 10, 25, 50 y 100 años de las unidades hidrológicas o fuentes hídricas que atraviesan el casco urbano y de expansión del Municipio de Versalles, se realizó una caracterización climática e hidrológica.

La caracterización climática se realizó con base en la información de las estaciones meteorológicas existentes en la zona del proyecto (Figura 7.21) donde se analizó el comportamiento de las precipitaciones considerando la temporalidad de los eventos de lluvia máximas y su distribución espacial.

La caracterización hídrica, se realizó mediante modelaciones hidrológicas utilizando el programa Hec – Hms, para la estimación de caudales máximos de los ríos analizados y para elaborar la modelación hidráulica de los ríos que atraviesan el área de estudio, dentro de los periodos de retorno de 2, 5, 10, 25, 50 y 100 años, dentro de las corrientes hídricas analizadas se destacan se destacan las Quebradas Patuma, Los Olivos y Maravélez.

Con las curvas IDF de la estación Santiago Gutiérrez se generaron hietogramas de precipitación para diferentes periodos de retorno empleando la metodología de bloque alterno (Chow; Maidment y Mays, 1994), la cual se basa en la intensidad de la precipitación para diferentes tiempos de duración. El hietograma es la representación de la distribución temporal de la intensidad de las precipitaciones, para el caso de estudio se supone una lluvia de 200 minutos de duración, para una intensidad asociado a un TR 2, 3, 5, 10, 25, 50 y 100 años.

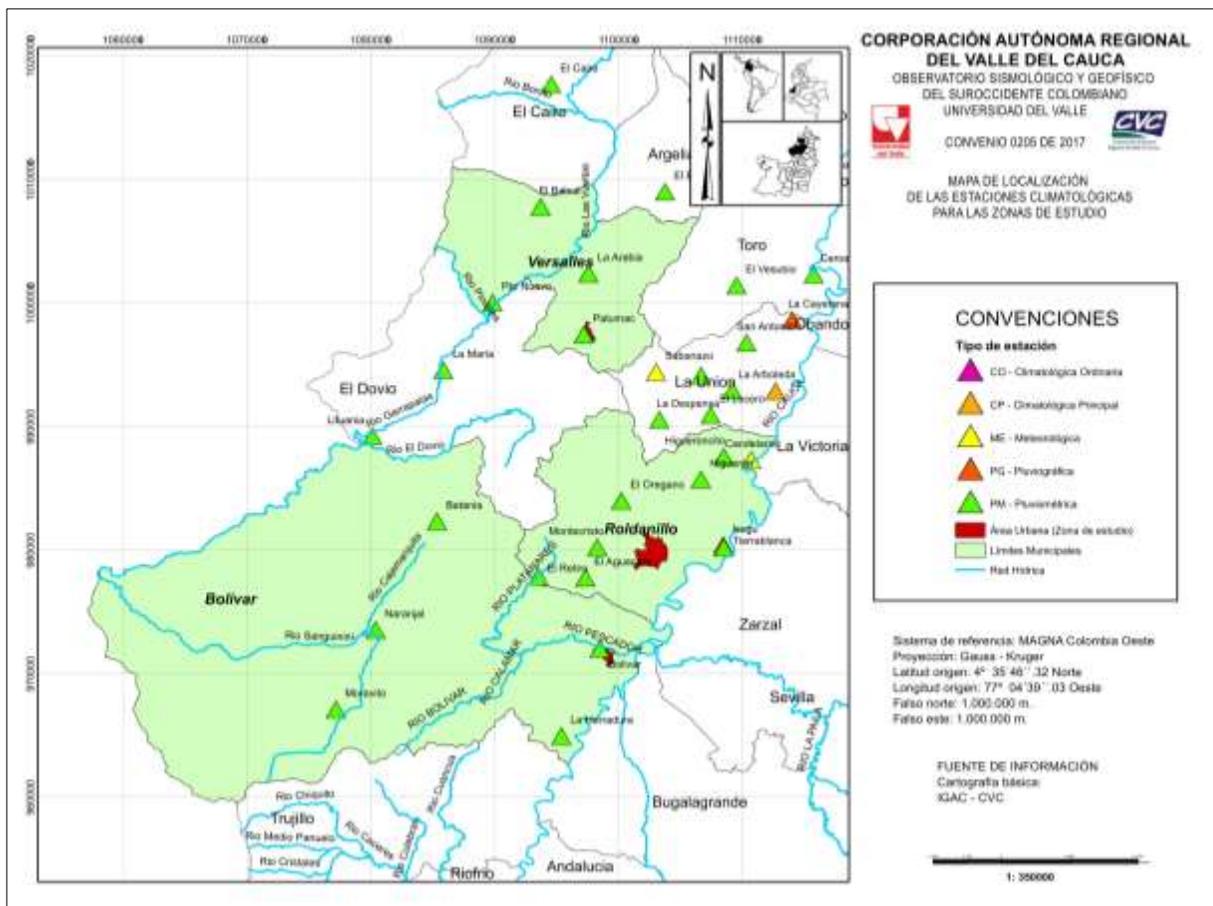


Figura 7.21. Distribución espacial de estaciones hidroclimatológicas
Fuente: Elaboración propia

La Figura 7.22 presenta el hietograma de diseño de precipitación para diferentes periodos de retorno para la estación Santiago Gutiérrez, donde se muestra la relación entre la cantidad de lluvia por minutos a partir de periodos de retorno, se denota que entre más largo sea el TR, la cantidad de lluvia aumenta, pero la intensidad disminuye cuando la precipitación es de larga duración, es decir, la intensidad de la lluvia es inversamente proporcional a la duración.

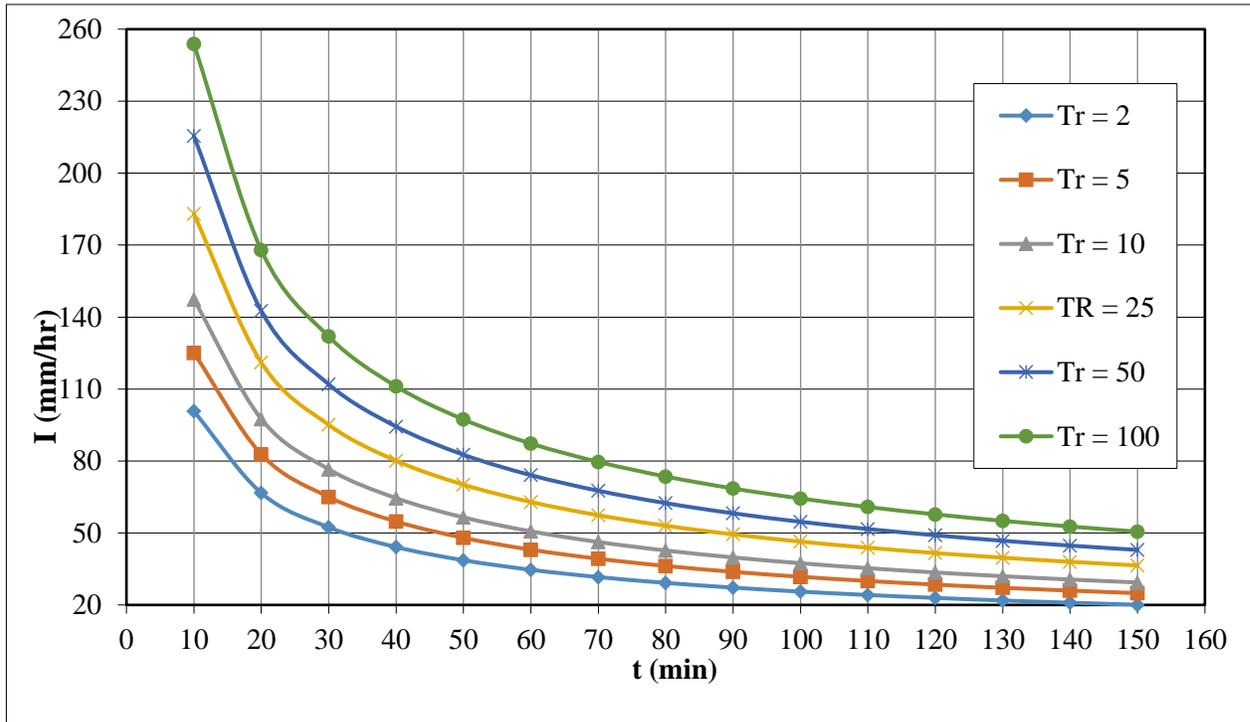


Figura 7.22. Curvas de intensidad frecuencia y duración con datos de la Santiago Gutiérrez.
Fuente: CVC-Univalle 2010

7.9.2.2 Lluvia

Una vez definidas las unidades geotécnicas para los análisis básicos, será necesario contar con cierta información de campo para evaluar la inestabilidad resultante de la acción hídrica relacionada con la fluctuación del nivel freático. A partir del muestreo de campo, realizado de acuerdo con lo estipulado en la exploración básica del subsuelo, se deberá obtener una profundidad de la tabla de agua, además de las propiedades del suelo que se indicaran en los siguientes párrafos.

En razón de que en los deslizamientos la posición del nivel freático es generalmente un condicionante de la inestabilidad, resulta clave calcular la profundidad de la tabla de agua, asociada a un cierto periodo de retorno, para el cual se considera que ocurrirá la falla. Se sugiere utilizar un periodo de retorno de 30 años, en virtud de que los deslizamientos profundos ocurren debido a un incremento en la presión de poros del suelo generado por el ascenso del nivel freático, y que estos procesos están asociados a largos periodos de lluvia, se requiere relacionar de alguna manera la variación del nivel freático con la variabilidad de la lluvia acumulada para largos periodos. Dicha estimación se ha de realizar en atención a que existe una relación directa

entre el volumen acumulado de agua caída en un periodo de lluvia y el ascenso del nivel freático, ya que por lo general en nuestro medio no se cuenta con registros de nivel freático levantados sistemáticamente (SGC, 2015). En razón de que para el análisis a detalle de la amenaza a escala 1:2000 según el SGC, (2015).

Se requiere asumir la profundidad del nivel freático correspondiente a una lluvia con periodo de retorno de 30 años y teniendo en cuenta que aquí no se exige realizar modelación hidrogeológica alguna, deberá tomarse dicho valor de precipitación a partir de las curvas, para un periodo de retorno de 30 años y una duración de 24 horas; calcular la precipitación infiltrable correspondiente, asumiendo una condición antecedente de humedad (II), deducir esa altura de precipitación a la profundidad del nivel freático supuesta como media y restar 1,65 veces la desviación estándar (σ) del análisis de acumulados anuales de precipitación infiltrable.

Este análisis se hace suponiendo una variación a largo plazo del nivel freático que sigue una distribución normal con un periodo de retorno de 30 años, así que la profundidad del nivel freático para dicho periodo se puede estimar con una ecuación (8), la cual se ilustra en la (Figura 7.23).

$$Pf_{30} = (Pf - 1,65 CV Pf) - (Ii_{30} * 24) \quad (8)$$

Donde:

Pf₃₀ corresponde a la profundidad del nivel freático asociado a una lluvia de 30 años de periodo de retorno, en milímetros (SGC, 2015).

Pf corresponde a la profundidad media del nivel freático, en milímetros.

CV Pf corresponde a la desviación estándar asignada a la variación del nivel freático, expresada en términos del coeficiente de variación de los acumulados anuales de precipitación infiltrada, en milímetros (SGC, 2015).

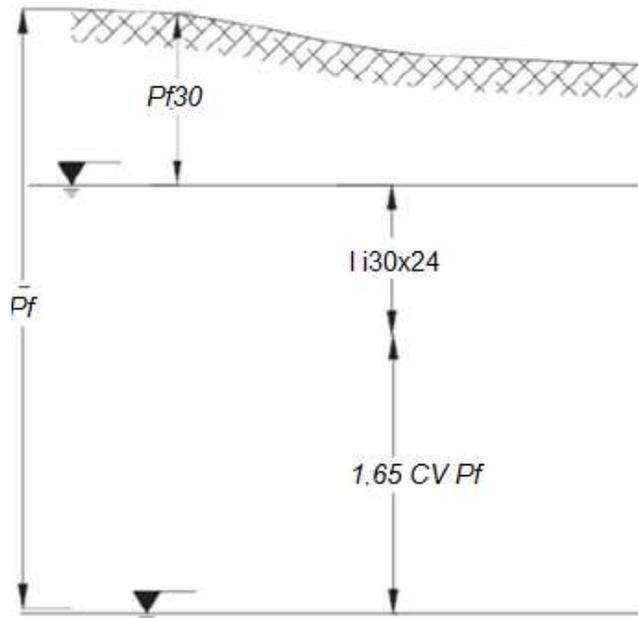


Figura 7.23. Representación gráfica de la ecuación para medir el nivel freático
Fuente: SGC (2015)

Una vez se aplicó la ecuación en el área de estudio se elabora la Tabla 7.10, la cual muestra el nivel freático de cada unidad geológica en un periodo de retorno dado, estimado para 5, 10, 25, 50 y 100 años. Los niveles freáticos son medidos desde la superficie hasta el nivel en donde se encuentre la columna de agua, a medida que aumenta el periodo de retorno, el nivel freático se acerca a la superficie. Los valores negativos expresan que el agua está por arriba de la superficie.

Tabla 7.10. Resultados del cálculo del nivel freático para diferentes periodos de retorno según la unidad geológica superficial

| UNIDAD GEOLÓGICA SUPERFICIAL | PROFUNDIDAD N.F. (m) | PROFUNDIDAD N.F. (mm) | Intensidad TR 5 AÑOS (mm/hr) | INTENSIDAD TR 10 AÑOS (mm/hr) | INTENSIDAD TR 25 AÑOS (mm/hr) | INTENSIDAD TR 50 AÑOS (mm/hr) | INTENSIDAD TR 100 AÑOS (mm/hr) | DESVIACIÓN ESTÁNDAR | CV Pf (mm) | P.N.F. ₅ (m) | P.N.F. ₁₀ (m) | P.N.F. ₂₅ (m) | P.N.F. ₅₀ (m) | P.N.F. ₁₀₀ (m) |
|------------------------------|----------------------|-----------------------|------------------------------|-------------------------------|-------------------------------|-------------------------------|--------------------------------|---------------------|------------|-------------------------|--------------------------|--------------------------|--------------------------|---------------------------|
| Rd | 5,00 | 5000 | 130 | 150 | 185 | 220 | 255 | 1581,14 | 31,62 | 1,83 | 1,35 | 0,51 | -0,33 | -1,12 |
| Sa | 3,10 | 3100 | | | | | | 1977,37 | 56,50 | -0,11 | -0,59 | -1,43 | -2,27 | -3,02 |
| Sale | 3,90 | 3900 | | | | | | 1772,00 | 45,44 | 0,71 | 0,23 | -0,61 | -1,45 | -2,22 |
| Sta | 2,20 | 2200 | | | | | | 2065,91 | 84,67 | -1,06 | -1,54 | -2,38 | -3,22 | -3,92 |
| Stc | 3,50 | 3500 | | | | | | 1964,69 | 56,13 | 0,29 | -0,19 | -1,03 | -1,87 | -2,62 |

Fuente: Elaboración propia

Finalmente, la probabilidad de ocurrencia y de no ocurrencia de todas las combinaciones de sismo y lluvia críticas se calculó con base en su periodo de retorno ($Tr=30$ años, para la lluvia), considerando el escenarios: futuro (50 años), según las expresiones que se presentan a continuación y cuyos resultados se relacionan en la Tabla 7.11.

$$P^+ = 1 - \left(1 - \frac{1}{T}\right)^\beta \quad (9)$$

$$P^- = 1 - P^+ \quad (10)$$

Dónde:

P^+ = Probabilidad de ocurrencia del evento crítico

T= Tiempo de exposición

β = Período de retorno

P^- = Probabilidad de no ocurrencia del evento crítico

Tabla 7.11. Probabilidades de los agentes detonantes

| PERIODO DE ANÁLISIS | LARGO PLAZO (50 Años) | |
|---------------------|-----------------------|---------------|
| | Ocurrencia | No ocurrencia |
| Agentes exógenos | | |
| Agua, T=30 años | 0,816 | 0,184 |
| Sismo, T=475 años | 0,100 | 0,900 |

Fuente: Elaboración propia.

7.10 ANÁLISIS PROBABILÍSTICOS DE ESTABILIDAD EN SUELOS ARCILLOSOS

Se utilizó el método de equilibrio límite para la estimación de los factores de seguridad, empleando como herramienta de cálculo de la probabilidad de falla el software SLIDE v6.0 de Rocscience, haciendo uso del Método Montecarlo. Lo anterior para simular el mecanismo de falla rotacional, modelado a través de la sección CC', que involucra el depósito de suelos transportados de ceniza.

De esta manera, se determinó el FS para múltiples casos (del orden de mil simulaciones) utilizando combinaciones aleatorias de parámetros que seguían distribuciones de probabilidad normal (parámetros de resistencia de los materiales) y exponencial (para el sismo y la lluvia). Todas estas modelaciones se efectúan para el escenario de exposición futura.

A manera ilustrativa, la Figura 7.24 presenta los resultados obtenidos en la Sección CC' para el escenario futuro. Dentro de la sección de análisis se han definido claramente los niveles de amenaza, los cuales aportan información parcial para la construcción de los mapas de amenaza correspondientes. El resumen de los factores de seguridad y las probabilidades de falla Fs-Pf estimadas se relacionan en la Tabla 7.12.

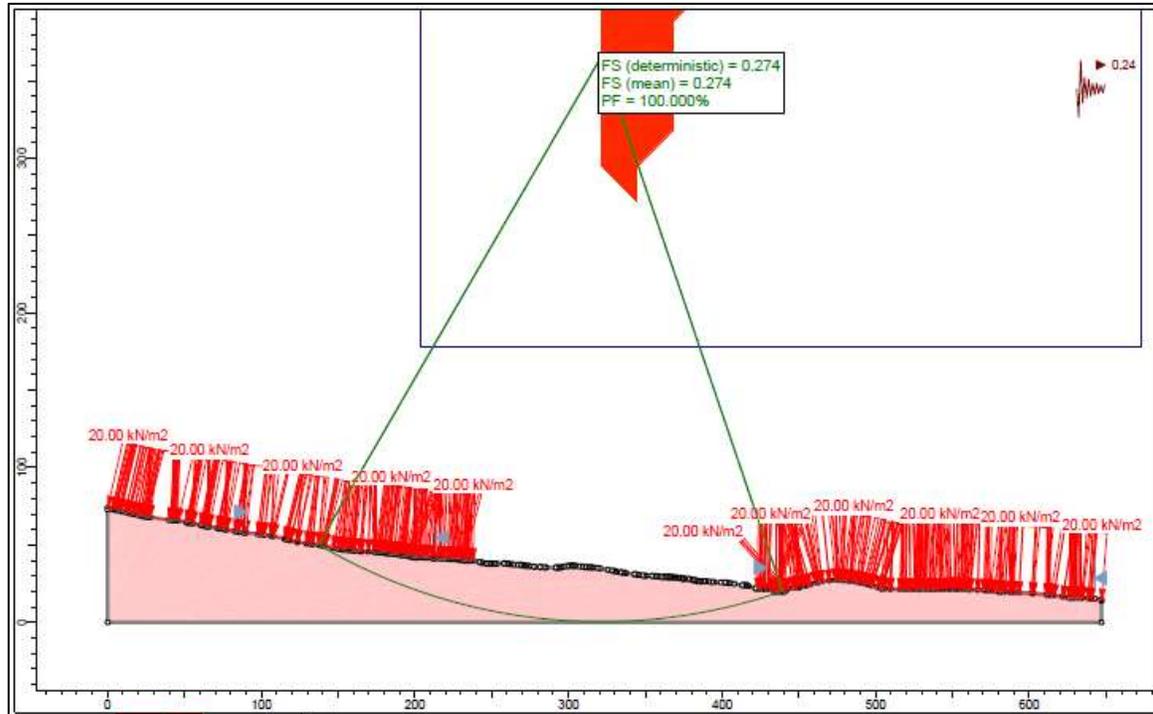


Figura 7.24. Análisis de estabilidad Sección CC', escenario futuro, condición sin obras
Fuente: Elaboración propia

Tabla 7.12. Resumen de los factores de seguridad y de la probabilidad de falla sección CC', condición sin obras.

| CONDICIÓN | TIPO DE OBRA | ESCENARIO | NIVEL DE AGUA | SISMO – a (g) | F.S | PF |
|-----------|--------------|-----------|-----------------------|---------------|-------|------|
| Sin obra | No Aplica | Futuro | Parcialmente saturado | 0.24 | 0.274 | 100% |

Fuente: Elaboración propia

7.11 ANÁLISIS PROBABILÍSTICOS DE ESTABILIDAD EN MATERIAL SUPERFICIAL ALTERADO

Esta unidad está constituida por suelos arcillosos producto de la meteorización de los niveles de rocas y la acumulación de la ceniza volcánica. Estos suelos alcanzan espesores del orden de 1.0 a 10,0 m. Al costado oriental se han ido acumulando en la parte baja suelos transportados recientes.

En este orden de ideas, el mecanismo de falla corresponde a una falla planar en talud infinito. Siendo el espesor de este material grueso, la alta vulnerabilidad de las estructuras, principalmente por exposición, hace que cualquier pequeño deslizamiento tenga un alto impacto sobre la población. Por lo anterior, se optó por utilizar el método del talud infinito, con celdas de tamaño 2 x 2 m, las cuales pueden representar de manera adecuada fenómenos locales de inestabilidad.

Adicionalmente, dada la alta variabilidad de los parámetros de resistencia, se realizó un análisis estadístico y probabilístico mediante simulaciones por el método de Monte Carlo. Para este análisis se evalúa el factor de seguridad en la ladera mediante la siguiente expresión:

$$FS = \frac{(c' b \sec \alpha + (\gamma b h \cos \alpha - k \gamma b h \sin \alpha - \gamma_w h_w \cos^2 \alpha) \tan \Phi')}{\gamma b h \sin \alpha + k \gamma b h \cos \alpha} \quad (11)$$

Donde:

| | |
|---|---|
| C' = Cohesión efectiva | k = Coeficiente de aceleración horizontal |
| Φ = Angulo efectivo de fricción | b = Espesor de estrato deslizante |
| h_w = altura de la lámina de agua para el periodo de retorno dado | h = Proporción del estrato deslizante que se encuentra saturado |
| γ = Peso unitario del suelo | α = Angulo de inclinación de la superficie de falla |
| γ_w = Peso unitario del agua | |

Para ello se necesita desarrollar las siguientes matrices, todas de igual tamaño (m x n): matriz de elevación (se obtiene de la topografía desarrollando un modelo digital de elevación), matriz de pendientes (se desarrolla haciendo uso de las herramientas de ArcGis) y matrices de valores de cohesión, ángulo de fricción y peso unitario del suelo, datos provenientes de la cartografía geológica y caracterización geotécnica realizada para el presente estudio. Para el tratamiento de los datos se creó un código desarrollado en Matlab donde se genera una matriz de tamaño (m x n) con los valores de factor de seguridad para cada pixel del mapa.

Un aspecto de suma importancia dentro del modelo corresponde a la inclinación del terreno. Para tener en cuenta esta variable se ha generado el respectivo mapa de pendientes el cual se ilustra en la (Figura 7.25). Nótese que las pendientes varían entre ligeramente suaves a fuertes con inclinaciones del orden de los 0° a $> = 55^\circ$, no obstante, predominan las pendientes entre los 8° y 35° a lo largo del área de estudio, la mayor parte del área presenta zonas propensas a sufrir movimientos en masa, dado que entre mayor sea el gradiente que presente una ladera mayor será la probabilidad de que ocurra deslizamientos, en relación con el tipo de suelo y la resistencia de estos.

En el mapa del Modelo Digital de Elevaciones del municipio de Versalles (Figura 7.26) se observan altitudes que van desde los 1736 a 2036 m.s.n.m., las mayores elevaciones se localizan principalmente hacia el sur del casco urbano. Las áreas que presentan menor nivel son las correspondientes a geoformas de lomeríos con topes aplanados y drenajes espaciados con poca profundidad, donde drenan los afluentes del municipio (depósitos aluviales).

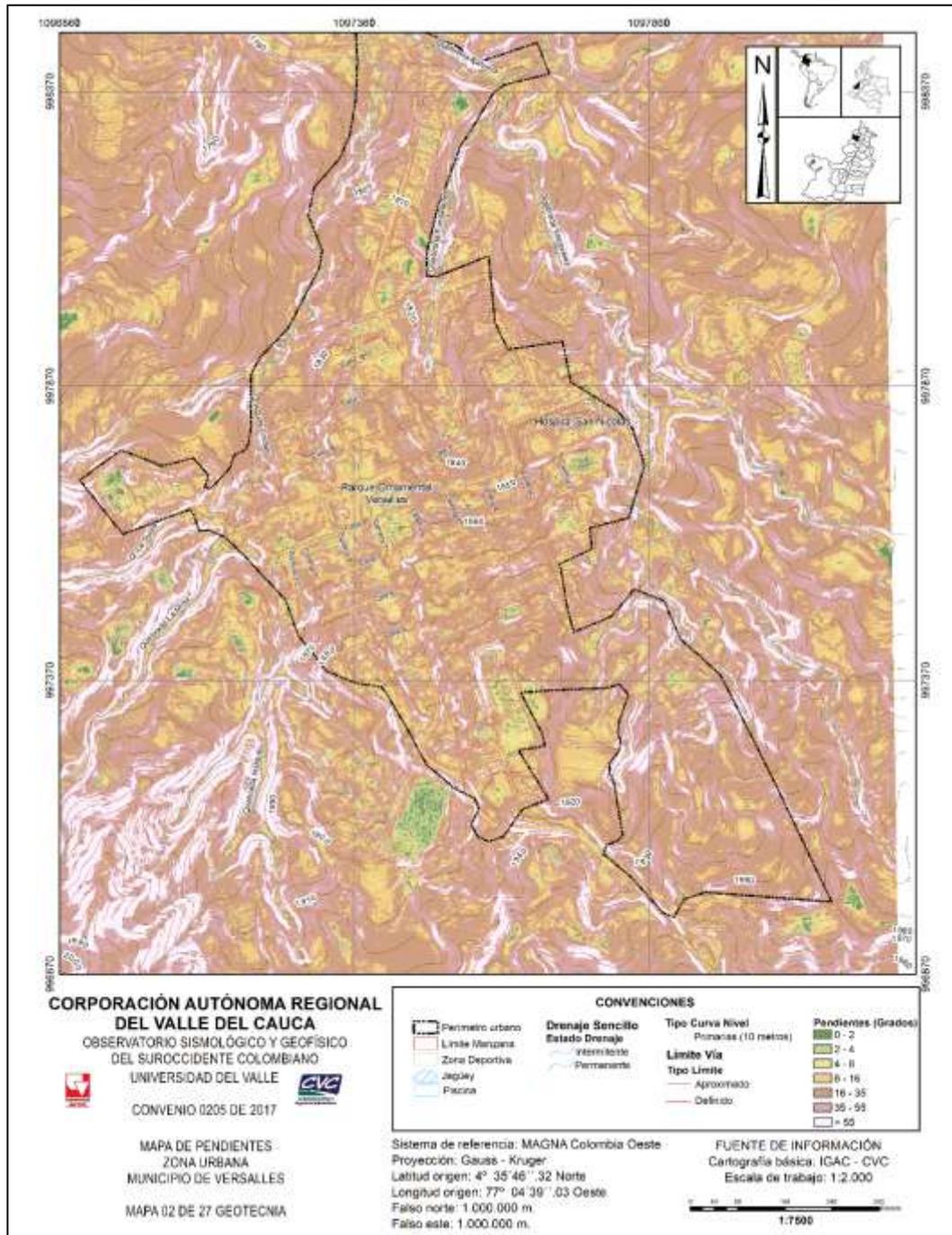


Figura 7.25. Mapa de pendientes del área de estudio
Fuente: Elaboración propia

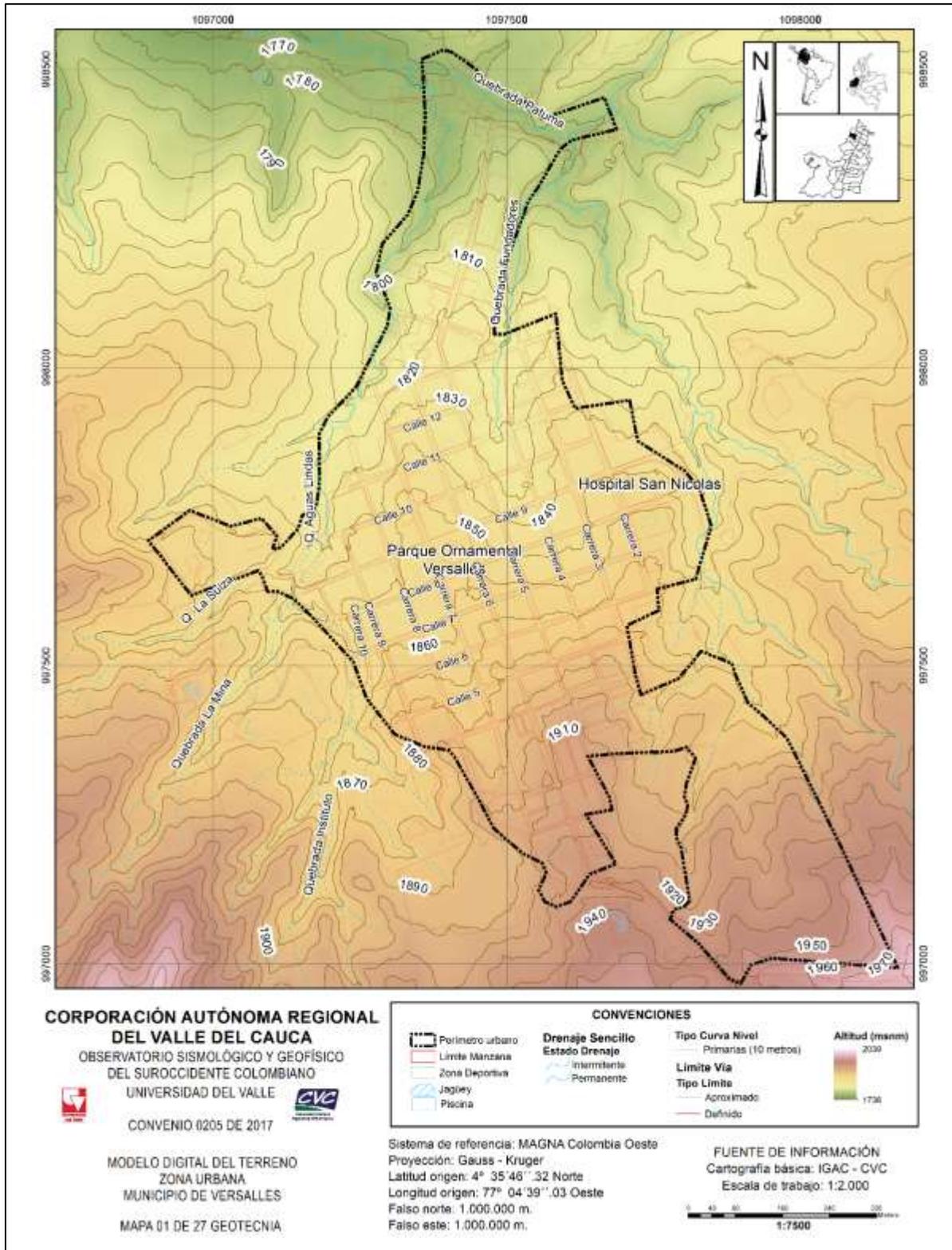


Figura 7.26. Mapa Modelo Digital de Elevaciones municipio de Versalles
Fuente: Elaboración propia

7.11.1 Uso del método Montecarlo

Como el objetivo es desarrollar un mapa probabilístico, la creación de las matrices de los parámetros del suelo, cohesión, ángulo de fricción y peso unitario, se han desarrollado haciendo uso del Método Montecarlo considerando una distribución normal para estos parámetros (los parámetros geotécnicos se comportan normalmente según varios autores). Para la variable del espesor del estrato deslizando, se ha tomado una distribución uniforme. Estas distribuciones se muestran a continuación en la ecuación:

Generación de una matriz (m x n) con m x n valores a partir de una distribución normal:

$$r = (\text{randn}(m,n) * sd) + mu \quad (12)$$

Donde:

Sd = Desviación estándar del parámetro geotécnico (ϕ , c o γ).

Mu = Media del parámetro geotécnico (ϕ , c o γ).

Randn = función que genera valores aleatorios de 0 a 1.

Generación de una matriz (m x n) con m x n valores a partir de una distribución uniforme:

$$r = a + \text{randn}(m,n) * (b - a) \quad (13)$$

Donde:

a = valor mínimo del parámetro geotécnico (ϕ (Φ), c o γ (γ))

b = valor máximo del parámetro geotécnico (ϕ (Φ), c o γ (γ))

Randn = función que genera valores aleatorios de 0 a 1

Haciendo uso de las anteriores expresiones en el código desarrollado en Matlab, se obtienen las matrices de los parámetros geotécnicos basados en el método de Monte Carlo.

7.11.2 Código desarrollado en Matlab

A partir del modelo de elevación digital se desarrolla una matriz o un raster de pendientes haciendo uso de las herramientas de ArcGis. Tanto la matriz de elevaciones como la matriz de pendientes se exportan a formato ASCII que puede ser leído por Matlab.

Con el fin de aplicar el método de Monte Carlo se debe crear un vector (m x n, 1) con el fin de evaluar la expresión de F.S en cada pixel del DEM, haciéndose necesario que el número de iteraciones esté dentro del rango de 2000 a 10000 (Heuvelink, 1996). Al concluir este último paso, obtenemos una matriz de tamaño (m x n, número de iteraciones). Seguidamente, se debe analizar los datos de cada fila buscando encontrar que tipo de comportamiento presentan los datos. Se encuentra que los datos se comportan normalmente (Figura 7.27).

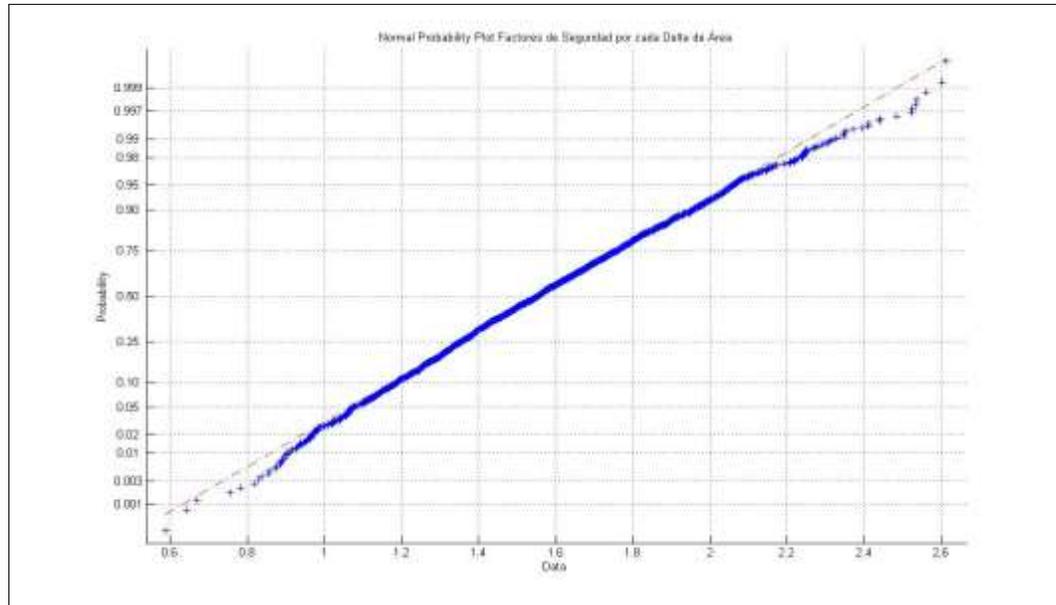


Figura 7.27. Gráfica de probabilidad normal
Fuente: Elaboración propia

Una vez determinado el comportamiento de los valores, se calculan los parámetros estadísticos para cada pixel (desviación estándar, media e intervalo de confianza) en una nueva matriz donde cada columna corresponde a cada parámetro estadístico y cada fila corresponde a un pixel. Con los parámetros estadísticos se calcula ahora la probabilidad de falla (Pf) por movimientos en masa para cada pixel.

Por último, con el fin de visualizar los valores de Pf en ArcGis, se escribe un archivo ASCII que luego se importa al Sistema de Información Geográfica.

7.11.3 Modelación mecanismos de falla traslacionales superficiales

Para la determinación de los parámetros geomecánicos empleados en la modelación de mecanismos de falla traslacional superficial (talud infinito), se utilizaron los ensayos de laboratorio y datos recopilados en la exploración de campo del presente estudio, diferenciándose por unidad geológica superficial-UGS (Tabla 7.13 a Tabla 7.17).

Tabla 7.13. Parámetros geomecánicos empleados en la modelación de la UGS Rd en el municipio de Versalles

| PARÁMETROS GEOMECAÑICOS Y DE MODELACIÓN | Rd | | |
|--|-------|------------------------|-------|
| | MEDIA | DESVIACIÓN ESTÁNDAR | VALOR |
| Angulo de Fricción (°) | 48 | 6,34 | - |
| Cohesión (kN/m ²) | 19613 | 6864,55 | - |
| Peso Unitario (kN/m ³) | 26,48 | 2,648 | - |
| Superficie de falla (m) | 2,6 | - | - |
| Tamaño de celda (m) | - | - | 2 x 2 |

Fuente: Elaboración propia

Tabla 7.14. Parámetros geomecánicos empleados en la modelación de la UGS Sa en el municipio de Versalles

| Sa | | | |
|---|-------|---------------------|-------|
| PARÁMETROS GEOMECAÑICOS Y DE MODELACIÓN | MEDIA | DESVIACIÓN ESTÁNDAR | VALOR |
| Angulo de Fricción (°) | 20,5 | 2,14 | - |
| Cohesión (kN/m ²) | 30 | 10,50 | - |
| Peso Unitario (kN/m ³) | 16,7 | 1,67 | - |
| Superficie de falla (m) | 2,46 | - | - |
| Tamaño de celda (m) | - | - | 2 x 2 |

Fuente: Elaboración propia

Tabla 7.15. Parámetros geomecánicos empleados en la modelación de la UGS Sale en el municipio de Versalles

| Sale | | | |
|---|-------|---------------------|-------|
| PARÁMETROS GEOMECAÑICOS Y DE MODELACIÓN | MEDIA | DESVIACIÓN ESTÁNDAR | VALOR |
| Angulo de Fricción (°) | 22,1 | 2,325 | - |
| Cohesión (kN/m ²) | 29 | 10,15 | - |
| Peso Unitario (kN/m ³) | 17,2 | 1,720 | - |
| Superficie de falla (m) | 2 | - | - |
| Tamaño de celda (m) | - | - | 2 x 2 |

Fuente: Elaboración propia

Tabla 7.16. Parámetros geomecánicos empleados en la modelación de la UGS Stc en el municipio de Versalles

| Stc | | | |
|---|-------|---------------------|-------|
| PARÁMETROS GEOMECAÑICOS Y DE MODELACIÓN | MEDIA | DESVIACIÓN ESTÁNDAR | VALOR |
| Angulo de Fricción (°) | 19,1 | 1,983 | - |
| Cohesión (kN/m ²) | 29 | 10,150 | - |
| Peso Unitario (kN/m ³) | 17 | 1,700 | - |
| Superficie de falla (m) | 3,55 | - | - |
| Tamaño de celda (m) | - | - | 2 x 2 |

Fuente: Elaboración propia

Tabla 7.17. Parámetros geomecánicos empleados en la modelación de la UGS Sta en el municipio de Versalles

| Sta | | | |
|--|-------|---------------------|-------|
| PARÁMETROS GEO MECÁNICOS Y DE MODELACIÓN | MEDIA | DESVIACIÓN ESTÁNDAR | VALOR |
| Angulo de Fricción (°) | 19,7 | 2,051 | - |
| Cohesión (kN/m ²) | 21 | 7,350 | - |
| Peso Unitario (kN/m ³) | 13,3 | 1,330 | - |
| Superficie de falla (m) | 1,81 | - | - |
| Tamaño de celda (m) | - | - | 2 x 2 |

Fuente: Elaboración propia

Debido a la variabilidad intrínseca de los parámetros de resistencia de los materiales detectados in situ, se tomaron valoraciones estadísticas tomando como base el Eurocode, el cual recomienda valores de coeficientes de variación que permiten modelar la incertidumbre asociada cuando no se cuenta con una nube de datos estadísticamente significativa de los parámetros de resistencia.

En el caso de estudio se tomaron los coeficientes de variación (COV) relacionados en la (Tabla 7.18).

Tabla 7.18. Valoración incertidumbre coeficientes de variación en el municipio de Versalles

| PARÁMETROS GEOMECÁNICOS DE MODELACIÓN | MEDIA | COV (%) | VALOR |
|---------------------------------------|-------|---------|-------|
| Angulo de fricción (°) | 31 | 10 | - |
| Cohesión (kN/m ²) | 8 | 35 | - |
| Peso unitario (kN/m ³) | 22 | 10 | - |
| Superficie de falla (m) | 1.5 | 0 | - |
| Tamaño de celda (m) | - | - | 2x 2 |

Fuente: Elaboración propia

Similar a los análisis de estabilidad anteriores, se consideró el escenario actual y cuyos resultados se expresan en función del F.S y de la Pf, así:

Escenario Futuro - Talud Saturado con Sismo correspondiente a tiempo de exposición de 50 años: Este escenario representa un periodo crítico de lluvias y adicionalmente se presenta un sismo de baja probabilidad de ocurrencia anual, pero de intensidad alta con $A_a = 0.24$.

8. EVALUACIÓN DE AMENAZA POR MOVIMIENTOS EN MASA

Este capítulo tiene por objeto determinar el nivel de amenaza por movimientos en masa, al que se encuentra expuesta la zona de estudio, integrando en un solo mapa los resultados obtenidos en los análisis de estabilidad realizados para cada uno de los mecanismos de falla identificados, en el escenario considerado. De esta manera se superponen los resultados de F.S y Pf, obteniendo la zonificación de amenaza para la condición futura que se presenta en la (Figura 8.1).

Los resultados así obtenidos fueron categorizados según la propuesta de González y Millán (2005), la cual la Secretaría Distrital de Bogotá 2006 adopta en la resolución 227 del mismo año (Tabla 8.1).

Tabla 8.1. Categorización de la Amenaza, Resolución 227 de 2006 (Adoptado de González y Millán, 2005)

| TIEMPO DE EXPOSICIÓN Te (años) | FACTOR DE SEGURIDAD | | k | PROBABILIDAD DE FALLA | | NIVEL DE AMENAZA | |
|-----------------------------------|---------------------|--------|--------|-----------------------|--------|------------------|---|
| | De | a | | De | a | | |
| CONDICIONES EXTREMAS | | | | | | | |
| 50 | 0,1954 | 1,0000 | 4,2040 | 0,9993 | 0,5000 | ALTA | A |
| | 1,0000 | 1,3000 | | 0,5000 | 0,1239 | MEDIA | M |
| | 1,3000 | 3,4000 | | 0,1239 | 0,0000 | BAJA | B |

Fuente: Resolución 227 de 2006

Teniendo en cuenta los resultados de la amenaza por movimientos en masa, se procede a destacar los principales aspectos de esta amenaza para la condición futura, así como su significado:

AMENAZA BAJA: Corresponde a los sectores donde en general el terreno es estable por movimientos en masa ante agentes externos. Estas áreas corresponden a zonas planas, de menor pendiente, urbanizadas y con una cobertura vegetal bastante importante. sin embargo, estas zonas, pueden ser propensas a fenómenos de inundación y flujos torrenciales.

AMENAZA MEDIA: Estos sectores se caracterizan por presentar pendientes intermedias, y se encuentran ubicadas en la generalidad de los casos en el sector montañoso, donde el mecanismo de falla es de tipo traslacional. Estos sectores se caracterizan adicionalmente, por presentar una buena cobertura vegetal.

AMENAZA ALTA: Corresponden a sectores de pendientes medias a fuertes, caracterizadas por presentar un espesor importante de la capa de suelo. El mecanismo de falla predominante es de tipo rotacional. Estas zonas se caracterizan por la falla del talud, por efecto de algunos de los agentes externos previamente descritos o por la combinación de ellos.

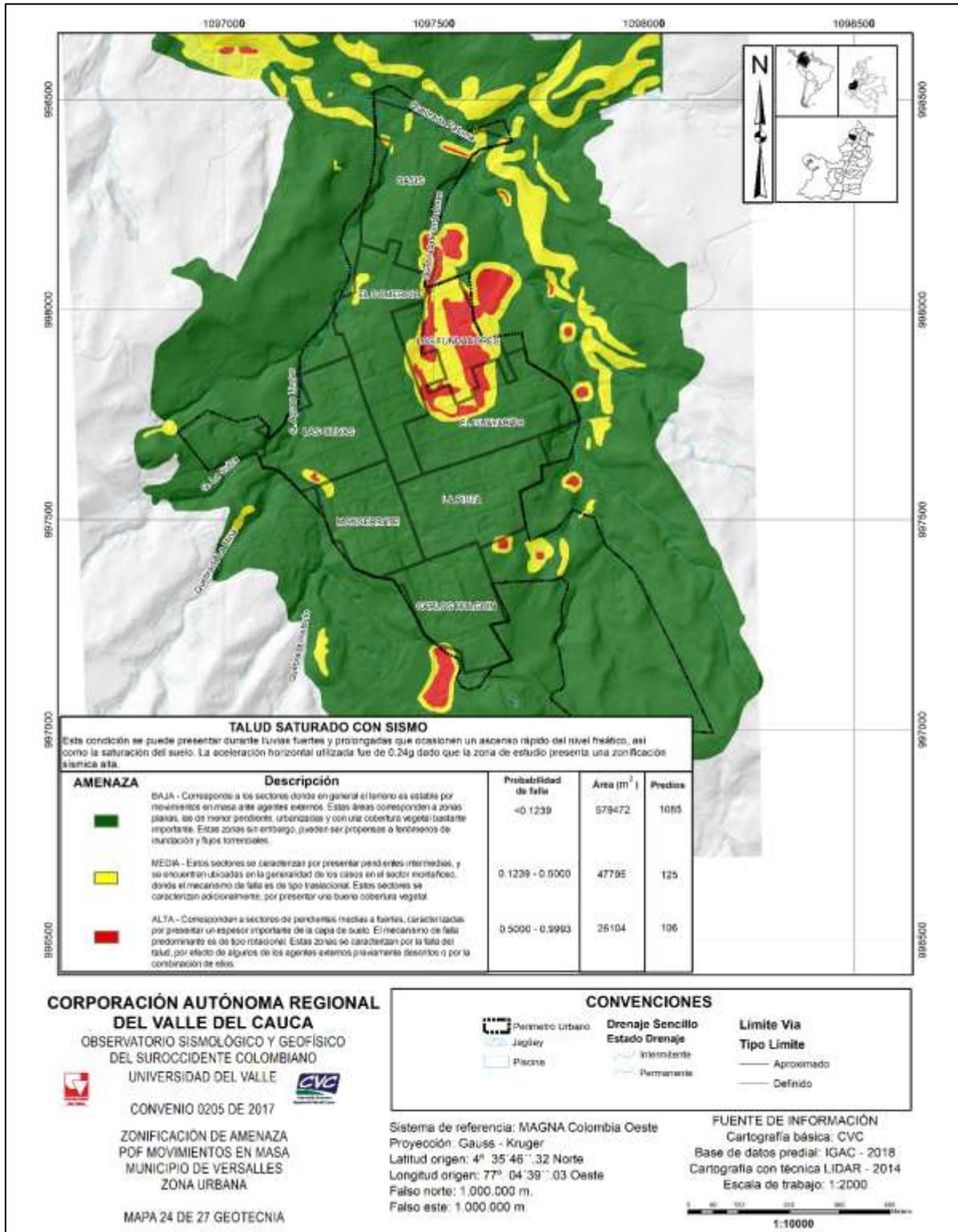


Figura 8.1. Mapa de amenaza categorizado correspondiente a la condición futura para el municipio de Versalles

Fuente: Elaboración propia

La condición futura de la amenaza es media con algunas zonas de amenaza alta, las cuales se deben a las altas pendientes y depósitos de suelos antrópicos y transportados aluviales. Los resultados del análisis de amenaza por movimientos en masa para la condición futura, mediante el método determinístico, se ilustra en la Figura 8.2 y Tabla 8.2, destacándose los siguientes aspectos:

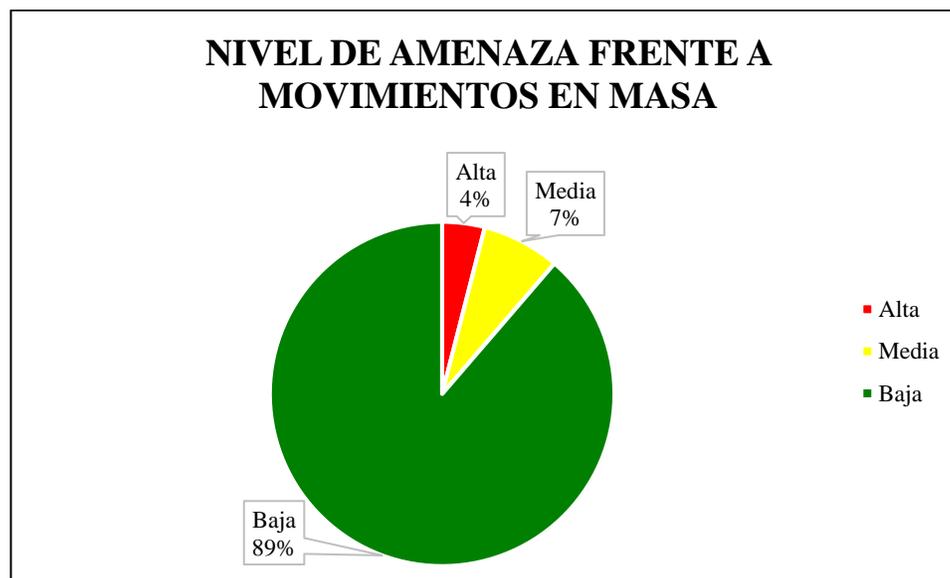


Figura 8.2. Distribución de niveles de amenaza para la condición futura en el municipio de Versalles

Fuente: Elaboración propia

Tabla 8.2. Áreas según los niveles de amenaza para la condición futura en el municipio de Versalles

| NIVEL DE AMENAZA | ÁREA NIVEL DE AMENAZA (Ha) | PREDIOS |
|------------------|----------------------------|---------|
| Alta | 2,610 | 106 |
| Media | 4,779 | 125 |
| Baja | 57,957 | 1085 |

Fuente: Elaboración propia

- Las zonas que presentan amenaza alta y media corresponden principalmente a áreas de rellenos antrópicos en las cuales la geomorfología indica que han ocurrido deslizamientos, estas áreas se localizan en mayor proporción en el barrio Los Fundadores, en el cual el 46% de su área (aproximadamente 1,54 Ha) posee niveles de amenaza alta y el 49% (1,59 Ha, aproximadamente) está en media (ver Tabla 8.3). Por fuera del casco urbano, también se presentan zonas con niveles de amenaza alta y media, los cuales se localizan en sectores específicamente ubicados al oriente del municipio de Versalles.

Tabla 8.3. Porcentaje de amenaza por movimientos en masa en el sector más afectados

| BARRIO | PORCENTAJE DE AMENAZA (MM) POR BARRIO (Ha) y (%) | | | | | |
|----------------|--|----------------|-------|----------------|-------|----------------|
| | ALTA | Porcentaje (%) | MEDIA | Porcentaje (%) | BAJA | Porcentaje (%) |
| Los Fundadores | 1,541 | 46,28 | 1,588 | 48,65 | 0,168 | 5,07 |

Fuente: Elaboración propia

8.1 MAGNITUD

Se define como parámetro de magnitud el volumen de la masa potencialmente inestable. Para determinar el valor del volumen se deberá contar con un mapa en planta, en el que se detalle el contorno del movimiento potencial, y un perfil donde se pueda estimar el espesor de la masa comprometida en el movimiento. Así, el volumen se calculara de acuerdo con la siguiente ecuación y las definiciones de la figura (Figura 8.3).

$$V = \left(\frac{1}{6} \pi D_r W_r L_r \right) f_{exp} \quad (14)$$

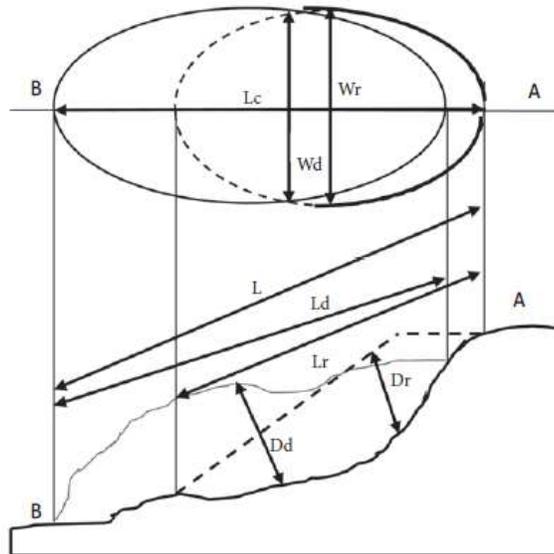


Figura 8.3. Determinación del volumen de un deslizamiento

Fuente: SGC, (2015).

Donde:

V es el volumen del deslizamiento, D_r es la profundidad máxima de la superficie de falla, W_r es el ancho máximo de la superficie de falla, L_r es la longitud de la superficie de falla y f_{exp} es un factor de expansión del material deslizado; generalmente este factor es de 1,25 a 1,3 hasta 1,7, dependiendo de los materiales comprometidos.

8.2 DISTANCIA DE VIAJE

Los métodos geométricos se basan en la hipótesis de dependencia de la distancia de viaje a la configuración geométrica de la ladera (los parámetros considerados aparecen en la Figura 8.4. Así, se han propuesto diversas correlaciones de tales variables para determinar el valor de la

distancia de viaje, L . A continuación se presentan algunos resultados de las regresiones reportadas en Hungr et al. (2005) (Tabla 8.4 y Tabla 8.5).

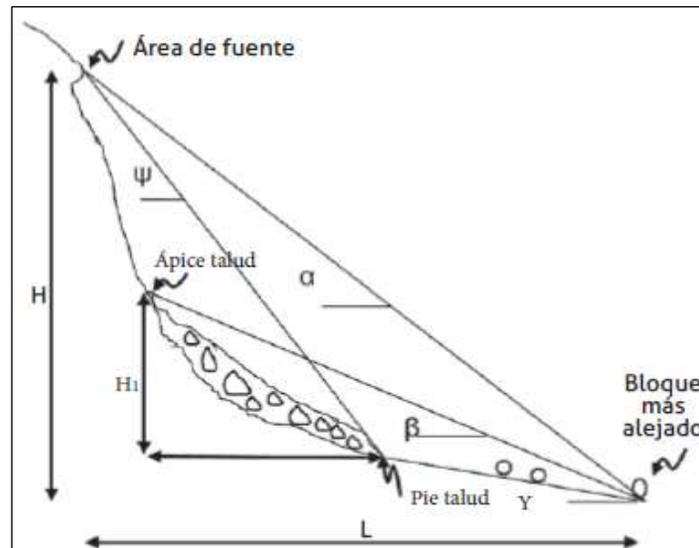


Figura 8.4. Variables geométricas para definir la distancia de viaje de un deslizamiento
Fuente: Hungr et al., 2005

Tabla 8.4. Ecuaciones para determinar la distancia de viaje, obtenidas en Hong Kong

| VARIABLE DEPENDIENTE | | ECUACIÓN |
|----------------------|----------|---|
| Corte talud | LCI | $\text{Log } L = 0,062 + 0,965 \text{ Log } H - 0,558 \text{ Log } (\tan \delta)$ |
| | Promedio | $\text{Log } L = 0,109 + 1,010 \text{ Log } H - 0,506 \text{ Log } (\tan \delta)$ |
| | UCI | $\text{Log } L = 0,156 + 0,155 \text{ Log } H - 0,166 \text{ Log } (\tan \delta)$ |
| Relleno talud | LCI | $\text{Log } L = 0,269 + 0,325 \text{ Log } H - 0,166 \text{ Log } (V/W)$ |
| | Promedio | $\text{Log } L = 0,453 + 0,547 \text{ Log } H - 0,305 \text{ Log } (V/W)$ |
| | UCI | $\text{Log } L = 0,693 + 0,768 \text{ Log } H - 0,443 \text{ Log } (V/W)$ |
| Muro de contención | LCI | $\text{Log } L = 0,037 + 0,350 \text{ Log } H + 0,108 \text{ Log } (V/W)$ |
| | Promedio | $\text{Log } L = 0,178 + 0,587 \text{ Log } H + 0,309 \text{ Log } (V/W)$ |
| | UCI | $\text{Log } L = 0,319 + 0,825 \text{ Log } H + 0,150 \text{ Log } (V/W)$ |
| Caída de roca | LCI | $\text{Log } L = 0,041 + 0,515 \text{ Log } H - 0,629 \text{ Log } (\tan \delta)$ |
| | Promedio | $\text{Log } L = 0,253 + 0,703 \text{ Log } H - 0,417 \text{ Log } (\tan \delta)$ |
| | UCI | $\text{Log } L = 0,466 + 0,891 \text{ Log } H - 0,206 \text{ Log } (\tan \delta)$ |

Fuente: Finlay et al., (1999), en Hungr et al., (2005).

Nota: H es la caída vertical, δ es el ángulo del talud, V el volumen de deslizamiento y W el peso del deslizamiento. LCI y UCI son el intervalo superior e inferior del 95 % de confianza, respectivamente.

Tabla 8.5. Ecuaciones de regresión para $\log (H/L) = A + B * \log V$

| TIPO DE DESLIZAMIENTO | TRAYECTORIA | A | B | R2 |
|-----------------------|--------------|-------|---------|------|
| Caída de rocas | Todo | 0,210 | - 0,109 | 0,76 |
| | Obstruido | 0,231 | - 0,091 | 0,83 |
| | Sin obstruir | 0,167 | - 0,119 | 0,92 |

| TIPO DE DESLIZAMIENTO | TRAYECTORIA | A | B | R2 |
|----------------------------|----------------|---------|---------|------|
| Deslizamiento traslacional | Todo | - 0,159 | - 0,068 | 0,67 |
| | Obstruido | - 0,133 | - 0,057 | 0,76 |
| | Sin obstruir - | 0,143 | - 0,080 | 0,80 |
| Flujo de detritos | Todo | - 0,012 | - 0,105 | 0,76 |
| | Obstruido | - 0,049 | - 0,108 | 0,85 |
| | Sin obstruir - | 0,031 | - 0,102 | 0,87 |
| Flujos de tierra | Todo | - 0,214 | - 0,070 | 0,65 |
| | Sin obstruir - | 0,220 | - 0,138 | 0,91 |

Fuente: Corominas (1996) para diferentes materiales (Hung et al., 2005).

La distancia de viaje también se podrá estimar mediante la aplicación del método del bloque deslizante, como se muestra en la descripción de la intensidad. Los profesionales que desarrollen el estudio de riesgo evaluarán la correlación más adecuada, de acuerdo con las condiciones del terreno y los materiales en la zona de estudio. Se podrán emplear otras correlaciones reportadas en la bibliografía técnica internacional, como las expresiones de Hsu (1975) y Domaas (1994). En este caso, se indicará la referencia donde se presenta la correlación usada.

8.3 INTENSIDAD

Se define como parámetro de intensidad la velocidad de la masa involucrada. Para evaluar esta velocidad se propone emplear el método del bloque deslizante, el cual modela el movimiento del deslizamiento como el movimiento de un bloque sobre una superficie curva, con una resistencia friccional constante (Figura 8.5).

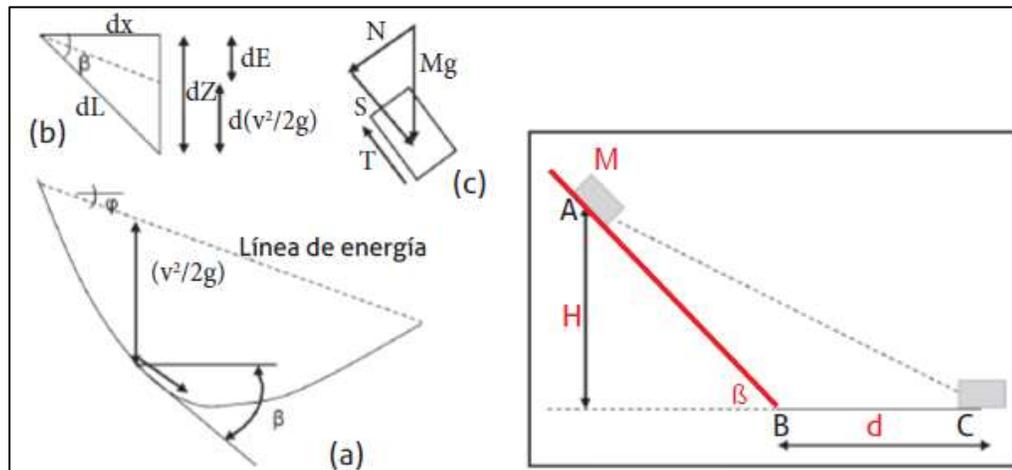


Figura 8.5. Bloque deslizante, consideraciones dinámicas. a) Perfil de la trayectoria. b) Geometría local del contacto. c) Diagrama de fuerzas. d) Planteamiento del problema

Fuente: Yue, 2014

Al aplicar las leyes de Newton y para una condición de se obtienen las siguientes ecuaciones.

$$Mg\sin\beta - Mg\cos\beta\tan\phi = Ma(t) \text{ de A hasta B} \quad -Mg\tan\phi = Ma(t) \text{ de B hasta C} \quad (15)$$

Donde:

M es la masa deslizada y g la aceleración de la gravedad
 β es la inclinación del terreno
 ϕ es el ángulo de fricción interna en el talud ($A-B$)
 ϕ_p es el ángulo de fricción interna en la zona plana ($B-C$)
 $a(t)$ es la aceleración desarrollada por la masa.

De esta manera, la velocidad desarrollada por la masa deslizada mientras baja por el tramo $A-B$ está definida por la ecuación

$$V_{AB} = \sqrt{2Hg \left(1 - \frac{\tan \phi}{\tan \beta}\right)} \quad (16)$$

Presumiendo que no hay pérdida de energía a causa del impacto en el punto B , debido al cambio de pendiente, cambiando la dirección de la velocidad, la distancia de viaje d y el ángulo de viaje desde A hasta C están dados por las expresiones

$$d = \left(1 - \frac{\tan \phi}{\tan \beta}\right) \frac{H}{\tan \phi_p} \quad (17)$$

Y la velocidad en el tramo $B-C$ puede determinarse de acuerdo con la ecuación

$$V_{BC}^2 - V_{AB}^2 = 2g \tan \phi_p d \quad (19)$$

Las velocidades calculadas permiten estimar la intensidad del deslizamiento para los diferentes escenarios.

$$V_{inclinado} = \sqrt{2gh * \left(1 - \frac{\tan \phi}{\tan \beta}\right)} \quad (20)$$

$$E_c = \frac{1}{2} m V_{plano}^2 \quad (21)$$

$$E_p = mgh \quad (22)$$

$$E_c = \frac{1}{2} E_p \quad (23)$$

$$\frac{1}{3} E_p = \frac{1}{2} m V_{plano}^2 \quad (24)$$

Igualamos las ecuaciones 21 y 23

$$\frac{1}{3} mgh = \frac{1}{2} m V_{plano}^2 \quad (25)$$

Remplazamos E_p en la ecuación 24

$$V_{plano}^2 = \frac{\frac{1}{3} mgh}{\frac{1}{2} m} \quad (26)$$

$$V_{plano}^2 = \frac{2}{3}gh \quad (27)$$

$$V_{plan} = \sqrt{\frac{2}{3}gh} \quad (28)$$

$$V_{plan} = \begin{cases} V_{inclinado} - V_{plano} \\ V_{plano} - V_{inclinado} \end{cases} \quad (29)$$

depende de que tan grandes sean los valores de ϕ y β

En la evaluación del riesgo por movimientos en masa, es fundamental predecir el modo de falla de las laderas y cuantificar el desplazamiento de la masa, incluyendo la distancia de viaje y la velocidad (Hung et al., 2005). Entre los parámetros que definen la magnitud de los movimientos en masa se deben incluir todos aquellos que describan su capacidad destructiva (Australian Geomechanics Society - AGS, 2007). En la (Tabla 8.6) se presentan los resultados de dichos parámetros (Magnitud, intensidad y distancia de viaje).

Tabla 8.6. Caracterización de la Amenaza para el municipio de Versalles

| CARACTERIZACIÓN DE LA AMENAZA | | | |
|-------------------------------|-----------------------------------|-------------------------------|---------------------------|
| SECCIÓN | MAGNITUD Vol (m ³) | INTENSIDAD Velocidad (m/s) | DISTANCIA DE VIAJE (m) |
| A-A' | 259308 | 4.6 | 45 |
| B-B' | 18075 | 1.4 | 19 |
| C-C' | 1825193 | 4.6 | 98 |
| D-D' Izq | 234902 | 2.5 | 40 |
| D-D' Der | 851026 | 2.1 | 45 |
| E-E' | 29871 | 4.3 | 27 |
| F-F' | 61667 | 5.3 | 28 |

Fuente: Elaboración propia

9. CONCEPTO TÉCNICO DE LA PLANTA DE TRATAMIENTO DE AGUAS RESIDUALES (PTAR)

Tipo de evento: Falla del muro de contención en gaviones N°3, cercano a la laguna facultativa N°1. Fue construido con el fin de controlar la amenaza por inundación de la PTAR.

Causas: Posible erosión y arrastre de sedimentos en el pie de la estructura.

Afectación de la infraestructura: Se afectó en muro de contención en gavión número 3, ubicado al frente de la laguna facultativa 1

Descripción del escenario

En 2011 mediante el Contrato CVC 961 de 2010, la firma CONSORCIO HJM construyó obras de protección contra inundaciones en la Planta de Tratamiento de Aguas Residuales Domésticas (PTAR) de la cabecera del municipio de Versalles y cuya interventoría fue realizada por la Asociación de Servisociales Integrales ONG mediante el Convenio 169 de 2010, con supervisión de CVC. Para este proyecto, Se elaboraron tres muros de contención ubicados en la margen izquierda de la Quebrada Patuma, los dos primeros muros ubicados en frente y aguas

arriba de la laguna facultativa 1 (Figura 9.1) y uno adicional de concreto, en voladizo, aguas debajo de la laguna 1.

El objetivo de los muros en gaviones era proteger los taludes de la erosión causada por la quebrada, mientras que el muro en concreto se elaboró con el fin contener la inundación, evitando así perjuicios en la Planta de Tratamiento de Aguas Residuales del municipio, aunque el objeto contractual era proteger la PTAR de las inundaciones

En 2017, para el 15 de junio, se presenta el deslizamiento detrás del muro de contención en gavión número 3, del evento, la DAR BRUT mencionó que “La afectación pudo haberse producido por no haber construido el muro de contención con las especificaciones técnicas recomendadas, específicamente en lo referente a la profundidad de cimentación.”

Cabe especificar que cuando se realizó la visita a campo, no se obtuvo acceso hasta la quebrada, para visualizar el estado actual de la estructura, por ende, se tomó el registro fotográfico de la DAR BRUT.

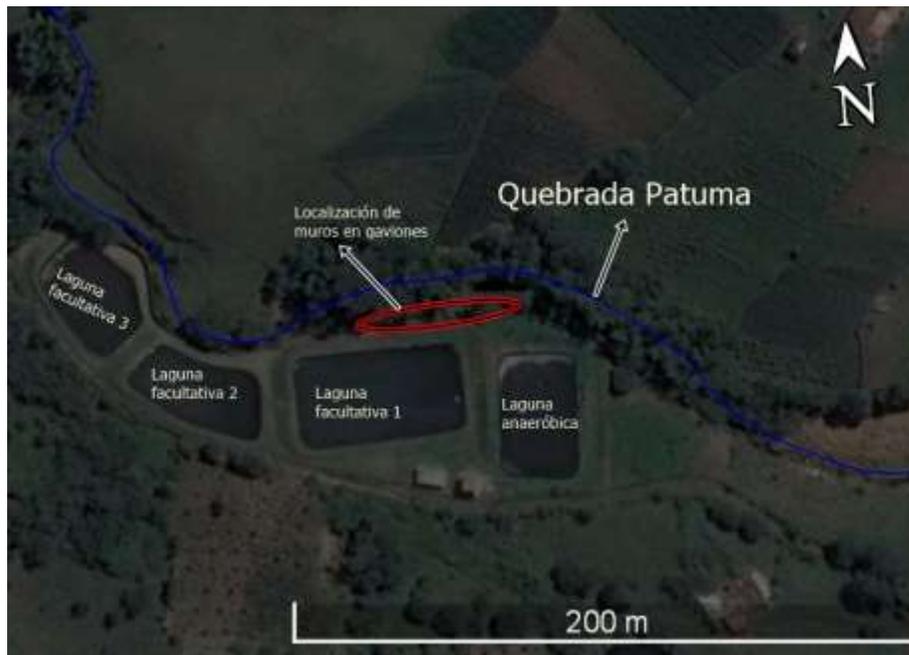


Figura 9.1. Localización parcial del área afectada en la PTAR

Fuente: Adaptado del informe consorcio PTAR

A partir del registro fotográfico, el consorcio PTAR clasificó el movimiento en masa, como un deslizamiento de tipo rotacional, donde, el empuje de tierra generado durante el evento cizalló el muro de contención y, el revestimiento en concreto presentó una ruptura torsional, evidenciado en grietas verticales y horizontales (ver Figura 9.2) (Consortio PTAR, 2011).



Figura 9.2. Ruptura a torsión del muro de contención en gaviones número 3
Fuente: Archivo fotográfico, DAR BRUT

Visita a campo

El equipo técnico realizó la visita a campo el 25 de octubre para evidenciar el estado del deslizamiento, las lagunas de la PTAR muro, no obstante, el terreno se encontraba con mucha vegetación, adicional a ello la visita se realizó en temporada de lluvias, lo cual hizo difícil el acceso hasta el punto requerido (muro en gavión # 3, por el cauce de la Quebrada Patuma), por ende, no se pudo tomar registros del estado actual de la estructura.

La PTAR, se está a menos de 20m de la margen izquierda de la Quebrada, por ello era necesario el diseño de obras de protección, que permitieran reducir la amenaza por erosión e inundación de la planta. Las estructuras proyectadas fueron tres muros en gaviones y un muro en voladizo de concreto.

En relación al deslizamiento ocurrido en 2017, la superficie de falla está cubierta de vegetación y no se visualizaron nuevas grietas que indiquen la actividad del mismo, lo que permite inferir que el deslizamiento posiblemente se encuentra estable. Por otra parte, se logró observar que la distancia entre material de relleno y el muro es aproximadamente 20 cm

A partir del concepto técnico emitido por la PTAR y el recorrido en campo, se determina que el muro de contención construido para la protección de la erosión ocasionada por la quebrada se encuentra fallado, denotando que el dique no presenta fallas que estén asociadas a la ruptura.

Análisis de la información

La exploración geotécnica fue realizada (Consorcio PTAR) en la parte alta del talud, en la margen izquierda del cauce. Adicional a esto, se realizaron 3 perforaciones a 4 metros de profundidad a percusión (Figura 9.3) durante las exploraciones se tomaron muestras alterados que permitieron conocer la estratigrafía del suelo y se realizaron ensayos de penetración estándar (SPT) para determinar el comportamiento mecánico de los materiales y con ello obtener los parámetros de resistencia del suelos al corte.

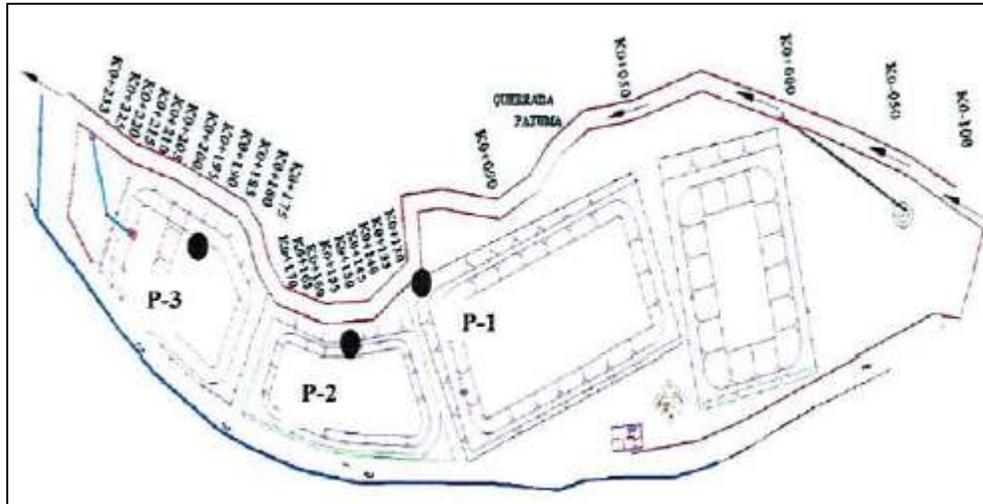
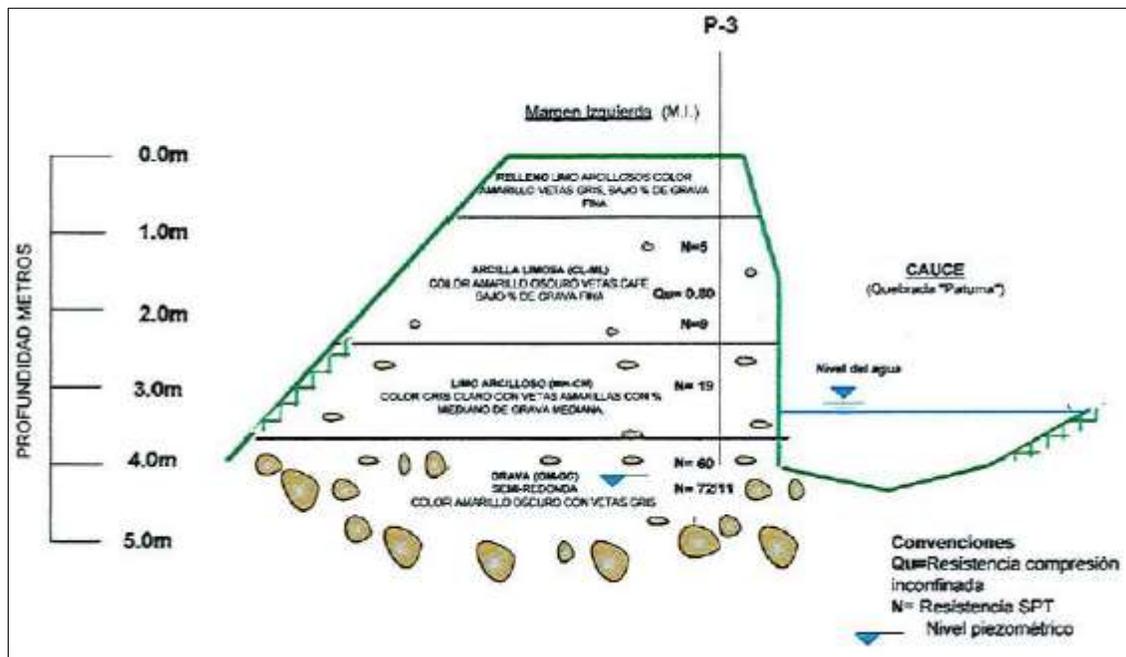


Figura 9.3. Localización de perforaciones (Consortio Ptar Versalles 2009 – 2010)
Fuente: Consortio Ptar Versalles 2009 - 2010

Según la exploración de campo, los suelos presentes en el área del proyecto se componen de suelo aluvial, arcillas blandas a rígidas, y gravas de gradación media a fina, al llegar a los 4,0 m se encontró acumulación de bolos de roca lo que generó la suspensión de los sondeos en esa profundidad. La Figura 9.4 presenta la estratigrafía encontrada en el área de interés y sintetiza los resultados de laboratorio (clasificación y compresión simple), también presenta la profundidad a la cual se encontró el nivel freático y el número de golpes NSPT (CVC, 2017).



El estudio hidráulico de la quebrada se dividió en dos (2) zonas, la primera, de k0+000 a k0+175m, según el informe en este transepto, se requieren obras para controlar la erosión. En la segunda, de los k0+175m a los k0+190m (aguas abajo) obras de fijación de la orilla y control de inundación. Debido a que la cota de inundación en un periodo de 100 años es de 1722,9 msnm., las estructuras de protección fueron diseñadas con cuotas superiores a este nivel. En sí, las estructuras planteadas consistieron en diseñar muros de contención en gaviones en la primera parte, para controlar la erosión, estas estructuras, estarían cimentadas a 1,5 metros por debajo del lecho de la Quebrada Patuma y alcanzarían una altura de 4m, para la zona inundable, se proyectó un muro de contención en voladizo (Figura 9.5). El diseño de cada tipo de muro se presenta en las Figura 9.6 y Figura 9.7.

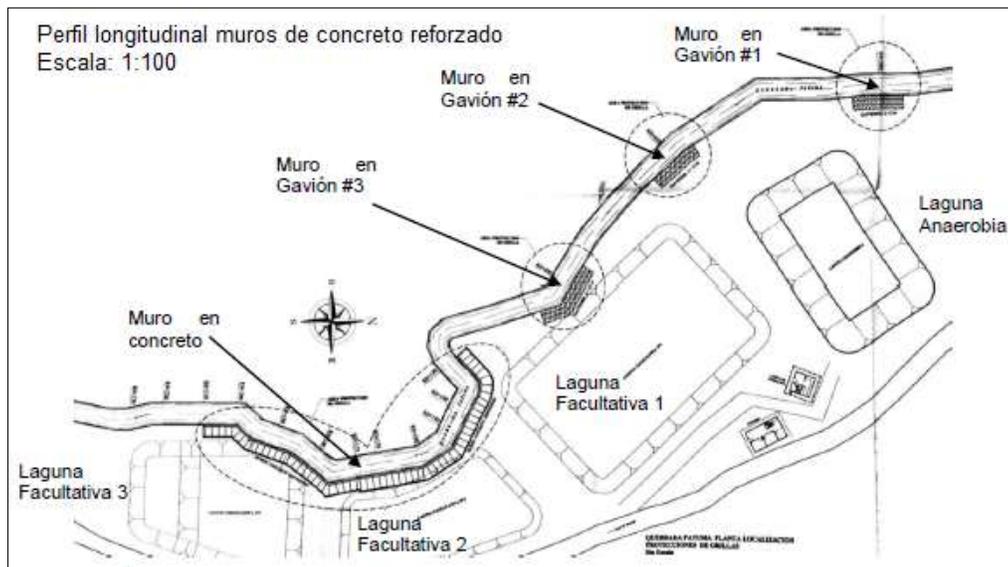


Figura 9.5. Localización de las estructuras de protección de orilla (muros en gavión y muro en concreto)

Fuente: Consorcio PTAR Versalles 2009 – 2010

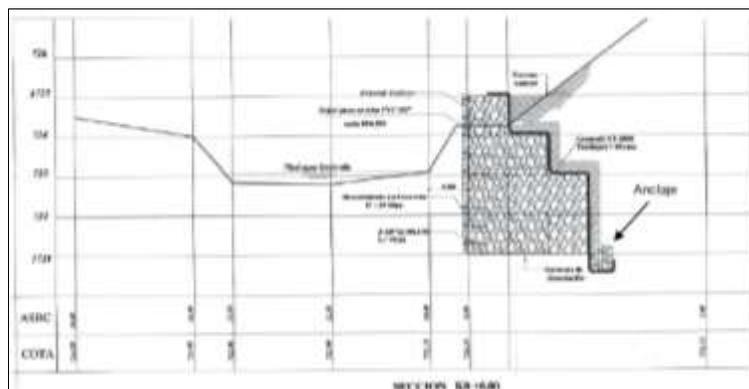


Figura 9.6. Diseño del muro de contención en gavión

Fuente: Consorcio PTAR Versalles 2009 - 2010



Figura 9.7. Diseño del muro de contención en voladizo

Fuente: Consorcio PTAR Versalles 2009 - 2010

Los parámetros de resistencia de los materiales encontrados en la zona de estudio, se realizaron por medio de correlaciones existentes en la literatura técnica, lo cual nos da un rango de incertidumbre, debido a que estas correlaciones varían mucho dependiendo el autor. En proyectos de esta clase, se debe realizar ensayos de resistencia a las muestras obtenidas, para así conocer de forma más precisa cómo se comportan estos materiales.

- **Diseño del muro en Gaviones # 3**

El muro en gaviones # 3 fue diseñado para controlar las inundaciones en la PTAR del municipio de Versalles, pero lo evidenciado en campo fue que estas obras están diseñadas para proteger el talud contra la erosión generada por la quebrada Patuma. De acuerdo a las especificaciones técnicas, el muro quedó cimentado a una profundidad de 1.5m, pero no se encontró soporte de diseños y planos que confirmen la profundidad del muro.

No se evidencia en los registros fotográficos todo el proceso constructivo del gavión # 3.

El muro se encuentra fallado, posiblemente a la socavación en su cimentación y al desestabilizar su apoyo debido a la pérdida de soporte, se produjo un deslizamiento tipo rotacional.

- **Zonificación de la Amenaza por Movimientos en Masa**

De acuerdo a la Figura 9.8 se presenta el mapa de amenaza por movimientos en masa en la zona de la PTAR, la cual presenta amenaza alta y media. De acuerdo a la zonificación de la amenaza por movimientos en masa se sugiere realizar obras que mitiguen esta amenaza, dado que la PTAR se encuentra en una zona con condiciones especiales y debe tener un monitorio para prevenir daños graves en las estructuras y en el personal que opera la planta.

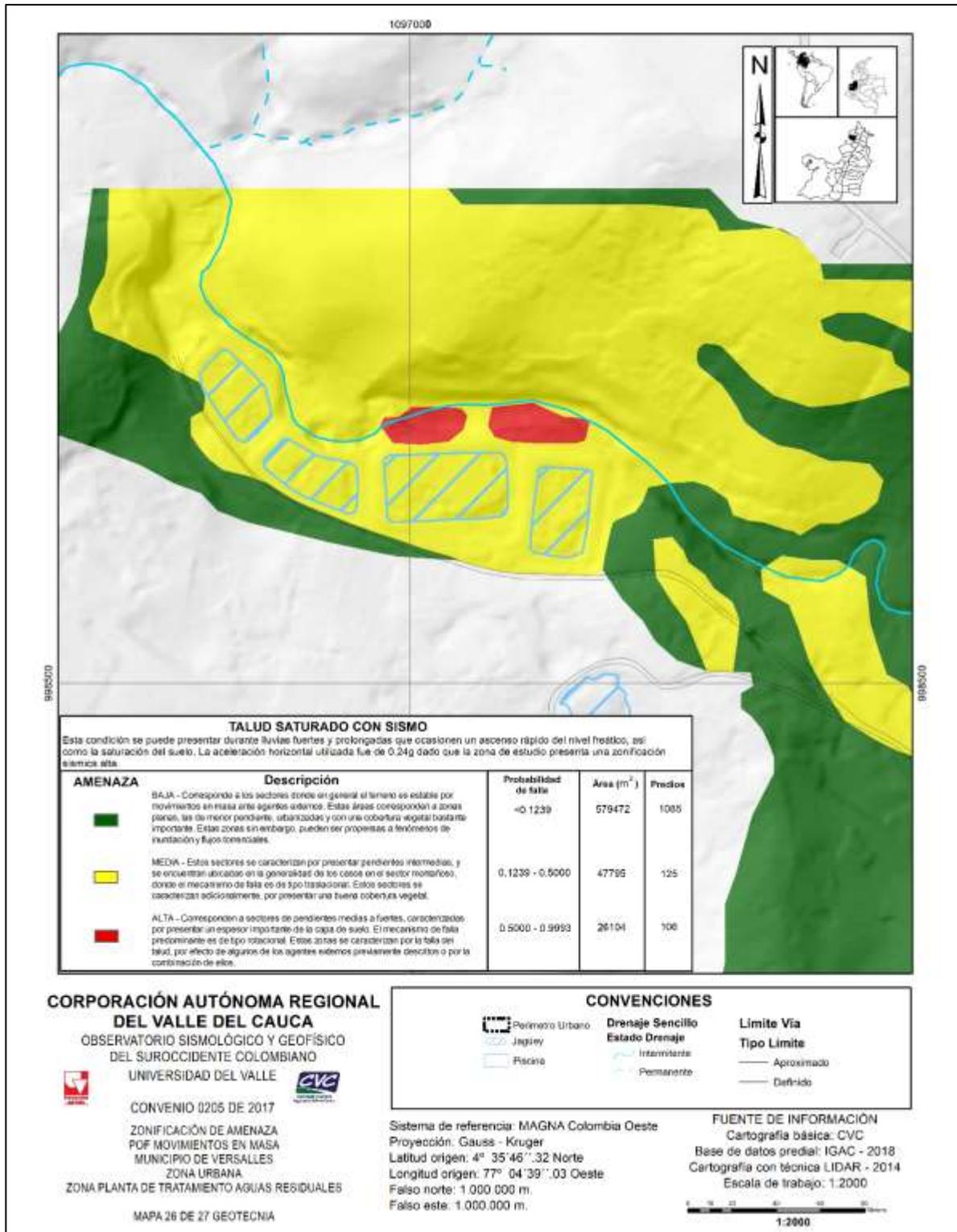


Figura 9.8. Mapa de amenaza categorizado correspondiente a la condición futura para el municipio de Versalles (PTAR)

Fuente: Elaboración propia

- **Conclusiones y recomendaciones**

De acuerdo a la importancia del proyecto, se debió cambiar el tipo de perforación a rotación y aumentar la profundidad (10m) de las mismas, además de realizar por lo menos una (1) perforación adicional en el cauce, ya que se necesita conocer en detalle el suelo en el que se va cimentar el muro y sus posibles empujes.

Cabe mencionar que la quebrada Patuma posee una energía de arrastre alta, debido a los cantos rodados encontrados en el cauce, por lo cual se recomienda realizar un estudio hidráulico, para así poder construir obras que disminuyan la energía del cauce aguas arriba de la zona de estudio, limitando su velocidad y erosión en la zona donde se localiza la PTAR.

Se recomienda realizar un nuevo muro en reemplazo del muro en gaviones # 3 que contemple un estudio hidráulico incluyendo un análisis de socavación a lo largo del muro.

De acuerdo al mapa de amenaza por movimientos en masa, la ubicación de la PTAR no fue la más óptima debido a las amenazas que se presentan en la zona de estudio, por lo cual, se recomienda que se realicen obras para mitigar la amenaza alta y media.

CONCLUSIONES

Se debe tener en cuenta que una unidad territorial como el municipio, posee unas dinámicas especiales, donde se presentan diferentes escenarios, como infraestructuras, varias fuentes hídricas, que prestan una serie de servicios y posee una amplia variedad de recursos naturales y económicos, que también se encuentran sometidas a actividades antrópicas que en su mayoría afectan de manera negativa la conservación de este tipo de lugares, razón por la cual deben considerarse las áreas de amenaza media y alta que pueden llegar a convertirse en un riesgo futuro. Es necesario valorar el efecto adverso al cual se encuentran sometidos el territorio y la población asentada en el área de estudio, con el fin de tomar medidas en pro de la reducción de la susceptibilidad y posterior amenaza por movimientos en masa.

Es importante identificar y demarcar las zonas susceptibles a sufrir movimientos en masa, con el fin de proteger estos sectores, con lo cual se busque disminuir el proceso erosivo, se debe realizar un control en la zona de ladera ya que factores como las coberturas de la tierra inadecuadas a las condiciones del terreno, las aguas de escorrentía se convierten en un factor desestabilizador del suelo, y las obras que se realicen deben ser acorde con el tipo de suelo, pues estas deben fortalecer y evitar la pérdida del mismo, en otras palabras, no aportar peso al suelo que ayude disminuir su resistencia.

Este estudio ha sido elaborado principalmente con información primaria recolectada en un amplio trabajo de campo realizado por un grupo interdisciplinario de profesionales. Del proyecto se concluye que es necesario reforzar las áreas que presentan nivel de amenaza alta y actualmente se encuentran urbanizadas, lo cual permita reducir la cantidad de viviendas afectadas en el municipio, ya que el municipio se encuentra en zona de amenaza sísmica alta, los suelos permiten que el agua se infiltre (bien drenados) y en la topografía predominan inclinaciones que van de moderada a extremadamente abruptas.

El municipio requiere la implementación de medidas ingenieriles que ayuden a reforzar el suelo y ayuden a evitar la pérdida de suelo por escorrentía (control de aguas de escorrentía). Pues como se pudo denotar las áreas con eventos registrados se encuentran al costado oriental del municipio, en pendientes superiores a los 16°.

En la zona de amenaza alta se recomienda no realizar construcciones y/o adecuaciones del terreno siempre y cuando no se realicen obras que mitiguen el impacto del evento. Tampoco utilizar estas áreas identificadas como inestables (las cuales pueden tener las siguientes características: altas pendientes, zonas con erosión, áreas aledañas a las riberas de los ríos, quebradas, o antiguos cauces) para localizar actividades antrópicas

Puntualmente para el barrio Los Fundadores, es necesario una limpieza de la quebrada para conocer su estado, al igual que monitorear por medio de piezómetro de cuerdas vibrantes el nivel freático e instalar inclinómetro, para conocer si se presentan modificaciones en el terreno (cambio en la inclinación)

A partir de la modelación de la amenaza frente a movimientos en masa, se obtuvo que el barrio Los Fundadores posee aproximadamente el 60% de la amenaza alta total del municipio, lo cual se asocia a que este barrio se construyó sobre rellenos antrópicos, en otras palabras, se cubrió la Quebrada para construir las viviendas, pero con el paso de los años la socavación provocada por la quebrada provocó hundimiento en partes del barrio, indicando la inestabilidad del suelo, por ende es necesario establecer normas que determinen el tipo de construcción y el número máximo de pisos que estas deben tener.

La amenaza por movimientos en masa en el municipio de Versalles se obtuvo por medio de la modelación de los parámetros de resistencia, las lluvias y los sismos que se presentan en la zona de estudio. La amenaza es baja en la mayor parte del territorio (89 %), media en un porcentaje notoriamente inferior (7 %), y alta es del (4 %), lo cual es el resultado de la poca incidencia de los detonantes sobre el terreno.

REFERENCIAS

- Alcaldía municipal de Versalles. (2000). Acuerdo 026 de 2000. “Por medio del cual se adopta el Esquema de Ordenamiento Territorial municipal Participativo y se expide el Estatuto Municipal de Planeación, se reglamenta el uso del suelo urbano y rural, y el crecimiento urbanístico y se plantean los planes complementarios para el futuro desarrollo territorial del municipio”. Versalles, Colombia.
- Alcaldía municipal de Versalles (s.f). Nuestro municipio. en línea. Recuperado de: http://www.versalles-valle.gov.co/territorios.shtml?scr1=41&apc=bbxx-2-&scr_41_Go=3
- Alcaldía municipal de Versalles (2016). Plan de Desarrollo Municipal (2016 – 2019). “Como siempre... comprometidos con el bien común primero la salud”. 124 p.
- Alvarado F. C, Medina B. E, Sandoval R. J, García N. J. (2012). Zonificación de amenaza por movimientos en masa aplicando un método bivariado y un proceso heurístico. Caso aplicado a la cuenca del río Combeima, Ibagué-Tolima-Colombia. Recuperado de: https://www.researchgate.net/publication/308926844_zonificacion_de_amenaza_por_movimientos_en_masa_aplicando_un_metodo_bivariado_y_un_proceso_heuristico_caso_aplicado_a_la_cuenca_del_rio_combeima_ibague-tolima-colombia.
- Asociación Colombiana de Ingeniería Sísmica, (2009). Estudio General de Amenaza Sísmica de Colombia. Bogotá. 226 p. Recuperado de: http://www.rcrisis.com/Content/files/EstudioGeneraldeAmenazaSismicadeColombia2009_AIS_lowres.pdf
- Australian Geomechanics Society -AGS (2007). Commentary on guideline for landslides susceptibility, hazard and risk zoning for land use planning. Aust Geomech, 42 (1), 37-62.
- Barrero, D. (1979). Geology of the central Western Cordillera, West of Buga and Roldanillo, Colombia. Publicaciones Geológicas Especiales de INGEOMINAS, 4, 75p.
- Becerra Y; Chamba L; Chillón E; Cusma J; Manchay A; Monja Y; Roncal A; Torres R (2015). Ensayo Consolidación de Suelos. Informe de Laboratorio. Facultad de Ingeniería Civil y Ambiental, (Usat). Universidad católica. Santo Toribio de Mogrovejo, Perú.
- Bonham-Carter, G.F (2002). Geographic information systems for geoscientist: Modelling with GIS. In: Merriam, D.F. (Ed.), Computer Methods in the Geosciences, vol. 13. Pergamon/Elsevier, New York, pp. 302–334.
- Carrara, A. (1983). Multivariate model for landslide hazard evaluation. Mathematical Geology, vol. 15, No. 3 pp. 403 – 427
- Carvajal, J. H. (2012). Propuesta de estandarización de la cartografía geomorfológica en Colombia. Bogotá: INGEOMINAS. Recuperado de: <https://www2.sgc.gov.co/Publicaciones/Cientificas/NoSeriadas/Documents/Propuesta%20de%20estandarizaci%C3%B3n.PDF>
- Consejo Municipal de Versalles (2013). Acuerdo 07 “por el cual se ajusta el Esquema de Ordenamiento Territorial del municipio de Versalles, adoptado mediante acuerdo 026 de diciembre del 2000, incorporando al perímetro urbano predios requeridos para la construcción de viviendas de interés social (VIS) y propietario (VIP) y se dictan otras disposiciones. 6 p.
- Corominas, J. (1996). The angle of reach as a mobility index for small and large landslides. Canadian Geotechnical Journal, 33, 260-271

- INGEOMINAS (2002). Clasificación Regional de Amenaza Relativa de Movimientos en Masa en Colombia. Bogotá D.C., mayo de 2002.
- INGEOMINAS (2005). Estudio de microzonificación sísmica de Santiago de Cali. Convenio INGEOMINAS-DAGMA, Bogotá.
- INGEOMINAS (2006), Mapa Geológico de Colombia, Escala 1:2.800.000, Bogotá
- Instituto de Hidrología, Meteorología y Estudios Ambientales - IDEAM (2018). Documento en línea. Consultado el 1 agosto de 2018. Recuperado de: <http://www.ideam.gov.co/web/ecosistemas/coberturas-tierra>
- Instituto de Hidrología, Meteorología y Estudios Ambientales - IDEAM (2016). Información pluviométrica.
- Instituto de Hidrología, Meteorología y Estudios Ambientales de Colombia - IDEAM (2012). Metodología para la zonificación de susceptibilidad general del terreno a los movimientos en masa. Consultado el 16 de junio de 2018. Recuperado de: http://www.ideam.gov.co/documents/11769/152732/Metodologia+suscept+FRM_oficial_final.pdf/6ded04e2-9378-440f-8902-2e6c92fcc745
- Jimeno, C. L. (Ed.). (2013). Ingeniería del terreno. UD Proyectos, ETSI Minas, UPM.
- Lal, R. (2001). Soil degradation by erosion. *Land degradation & development*, 12(6), 519-539. Disponible en, consulta 10 de dic de 2018 <https://onlinelibrary.wiley.com/doi/abs/10.1002/ldr.472>
- Lee, S., Choi, J., (2004). Landslide susceptibility mapping using GIS and the weights-of-evidence model. *International Journal of Geographical Information Science* 18, 789–814.
- Lozano, H. (1986). Oro y plata en Colombia, Áreas promisorias. I Taller Latinoamericano sobre Exploración y Explotación de Oro Aluvial, Memorias, I, 56p
- McCourt, W. J., (1984). The Geology of the Central Cordillera in the Department of Valle del Cauca, Quindío and NW Tolima: British Geological Survey Report, v. Series 84, p. 8 - 49.
- Ministerio de Ambiente Vivienda y Desarrollo Territorial (2010). Reglamento Colombiano de Construcción Sismo Resistente: NRS 10. Título H- Estudios geotécnicos. Bogotá DC.
- Ministerio de Vivienda, Salud y Territorio de Colombia (2014). Decreto 1807 del 19 septiembre de 2014. "Por el cual se reglamenta el artículo 189 del Decreto Ley 019 de 2012 en lo relativo a la incorporación de la gestión del riesgo en los planes de ordenamiento territorial y se dictan otras disposiciones". Recuperado de: <http://wsp.presidencia.gov.co/Normativa/Decretos/2014/Documents/SEPTIEMBRE/19/DECRETO%201807%20DEL%2019%20DE%20SEPTIEMBRE%20DE%202014.pdf>
- Nivia, A., Galvis, N., y Maya, M. (1995). Mapa geológico de Colombia, plancha 242-Zarzal, Scale: 1: 100,000. INGEOMINAS, Cali.
- Nivia, A., Galvis, N., y Maya, M. (1997). Geología de la Plancha 242, Zarzal. INGEOMINAS. (1997). Mapa geológico de Colombia. Geología de la plancha 242-Zarzal. Escala 1:100.000. Memoria explicativa, Bucaramanga, INGEOMINAS. Bogotá.
- Parra, E., Caballero, H., Muñoz, R. Zapata, G. y Zuluaga, J. (1984). Pág. 24. Mapa Geológico de Colombia - Escala 1:100000, Plancha 223 - El Cairo. INGEOMINAS. Bogotá.
- Peña M, C. y Mosquera A, C. (2010). Reevaluación de la amenaza sísmica en la ciudad de Cali por medio de un método de análisis integral de la información sísmológica, geofísica y geológica. Memoria de Tesis para optar al título de Ingeniero Civil. Escuela de Ingeniería Civil y Geomática. Universidad del Valle. Santiago de Cali. Colombia, 122p.

- Organización de las Naciones Unidas (ONU), (2018). Taxonomía de suelos USDA. Consulta 14 de junio de 2018 Recuperad en: <http://www.fao.org/soils-portal/soil-survey/clasificacion-de-suelos/taxonomia-de-suelos-de-usda/es/>
- Romana, M. (1995). “The geomechanical classification SMR for slope correction”. En: FUJII (ed.) Proc. 8th Int. ISRM Congress.
- Santacana. (2001). Analisis de la Susceptibilidad del Terreno a la Formación de Deslizamientos Mediante el Uso de Sistemas de Información Geografica. Aplicación a la Cuenca Alta del Río Llobregar. Barcelona, Catalunya, España: Universidad Politecnica de Catalunya.
- Secretaría Jurídica Distrital de la Alcaldía Mayor de Bogotá D.C (13 de julio de 2006). Resolución 227 de 2006. "Por la cual se adoptan los términos de referencia para la ejecución de estudios detallados de amenaza y riesgo por fenómenos de remoción en masa para proyectos urbanísticos y de construcción de edificaciones en Bogotá D.C. Recuperado de: <https://www.alcaldiabogota.gov.co/sisjurMantenimiento/normas/Norma1.jsp?i=20845>
- Servicio Geológico Colombiano -SGC (2015). Guía Metodológica para Estudios de Amenaza, Vulnerabilidad y Riesgo por Movimientos en Masa. Bogotá, D. C, Cundinamarca, Colombia: Imprenta Nacional de Colombia
- Servicio Geológico Colombiano -SGC y Universidad Nacional (2010). Mapa Nacional de Amenaza Sísmica Periodo de Retorno 475 años. Escala 1:1.500.000.
- Servicio Geológico Colombiano -SGC (s.f). Glosario de términos Documento en línea. Consultado el 20 de junio de 2018. Recuperado de: <https://www2.sgc.gov.co/atencionalciudadano/lists/glosario%20de%20terminos/allitems.aspx#InplviewHash5aa0669c-85e8-44a8-a289-25b056edb64e=>
- Suárez J. (1998). Deslizamientos y Estabilidad de Taludes en Zonas Tropicales. Disponible en: <http://desastres.usac.edu.gt/documentos/docgt/pdf/spa/doc0101/doc0101.pdf>
- Sistema de Información Ambiental de Colombia (SIAC). (s.f). Degradación de suelos. Disponible en: <http://www.siac.gov.co/erosion>
- Suriol Castellví, J., Josa García-Tornel, A., y Lloret Morancho, A. (2007). Reconocimiento geotécnico del terreno. Universitat Politècnica de Catalunya. Iniciativa Digital Politècnica.
- Varnes, D. (1978). Slope Movement: Types and Proceses. In Scuster & Krizek, Landslides: Analysis and Control. Special report 176. Transportation Comisión on Sociotechnical Systems, National Research Council. Washington. D.C: National Academy of Sciences.
- Van Westen, C.J. (1996). Análisis estadístico de riesgo de deslizamiento, International Institute for Geoinformation Science and Earth Observation (ITC), The Netherlands.
- Villalta A y González M (2011). Zonificación de Amenazas Geológicas por Movimientos en Masa que permita el Ordenamiento Territorial en la Urbanización Ciudad Victoria de Loja (Tesis de pregrado). Universidad Nacional de Loja, Loja, Ecuador. Recuperado de: <http://dspace.unl.edu.ec/jspui/bitstream/123456789/16301/1/Gonz%C3%A1lez%20Capa%20Mar%C3%ADa%20Paola%20Villalta%20Castillo%20Azucena%20Ondina.pdf>
- Yue, Z. Q. (2014). Dynamics of large and rapid landslides with long travel distance underdense gas expanding power. Landslide Science for a Safer Geoenvironment, 3. Springer, pp. 233-240.

ANEXOS

- Anexo 1. Cartografía susceptibilidad por movimiento en masa
- Anexo 2. Archivo fotográfico Amenaza MM
- Anexo 3. Registros de perforaciones, apiques y líneas sísmicas
- Anexo 4. Ensayos de laboratorio
- Anexo 5. Análisis de estabilidad en zonas de amenaza alta y media
- Anexo 6. Cartografía amenaza por movimientos en masa