

PROYECTO DE GRADO

IMPLEMENTACIÓN DE LOS SISTEMAS DE INFORMACIÓN GEOGRÁFICO,
PARA LA ZONIFICACIÓN GEOTÉCNICA COMO HERRAMIENTA PARA LA
GESTIÓN DE LOS GEORECURSOS, EN UNA PEQUEÑA CENTRAL
HIDROELÉCTRICA CASO DE ESTUDIO LA CHORRERA - MUNICIPIO DE
SANTA ROSA DE OSOS, ANTIOQUIA

JUAN JOSÉ CALLEJAS VÉLEZ

TRABAJO DE GRADO PRESENTADO COMO REQUISITO PARA OPTAR AL
TÍTULO DE GEÓLOGO

Asesorado Por

PHD. MARÍA ISABEL MARÍN CERÓN

MSE. EDGAR ALLAND SÁENZ MATEUS



DEPARTAMENTO DE CIENCIAS DE LA TIERRA

2018

AGRADECIMIENTOS

Quiero agradecer en primera instancia al Dios infinito que me brindó la sabiduría y entendimiento necesario para lograr este importante paso de haber culminado este proyecto de grado, para obtener el título de geólogo.

Un agradecimiento muy especial para mi padre José Arturo y mi madre María Elena por su infinito apoyo, paciencia y esfuerzo en estos 5 años de vida universitaria. A mis abuelos, los cuales, con su consejos y apoyo moral, hicieron de mí una mejor persona, para realizar todo tipo de tareas. Por último, quisiera mencionar y agradecerle a Ximena Naranjo, por su incondicional colaboración, consejos y sobre todo su amor.

Agradecimiento y reconocimientos especiales al Profesor Edgar Alland Saenz Mateus, por ser parte indispensable de mi desarrollo profesional y por haberse desempeñado como mi tutor en la práctica y como asesor del proyecto de grado; además mención especial a la profesora y co-asesora María Isabel Marín Cerón, por su ayuda en la revisión del proyecto de grado; y por su profesionalismo como docente durante estos 5 años, en los cuales pudimos compartir diversas asignaturas.

A mis amigos y colegas mi total gratitud durante este proceso de formación; a la Universidad EAFIT por brindar los espacios y el acompañamiento necesario para el desarrollo de las actividades académicas; y por último quisiera mencionar a mis compañeros geólogos y personal de la empresa IRYS S.A, donde fueron claves para el desarrollo de este proyecto.

Finalmente, quisiera mencionar mi agradecimiento a los docentes Marco Fidel Gamboa Ramírez, Oscar Geovanny Bedoya y a la docente jubilada Gloria María Sierra por sus consejos y orientaciones en todo momento.

Muchas Gracias a todos.

RESUMEN

En el presente trabajo de grado, se discute la importancia de un enfoque integrador haciendo usos de la herramienta SIG, para la generación y manejo de la base de datos geológicas, que permitan finalmente generar la zonificación por susceptibilidad de movimientos en masa (Método Bivariado), como base para la implementación de la metodología para la zonificación Geotécnica propuesta por el Área metropolitana del Valle de Aburra (AMVA). A la luz de la cartografía existente de usos de suelo, se identificó que la Zonificación Geotécnica, se convierte en una eficaz herramienta de planificación ambiental, que deberá a ser tenido en cuenta en el Estudio de Impacto ambiental (EIA), para la fase de diseño de la PCH-La Chorrera. Este enfoque sistémico permite una mejor comprensión de la sostenibilidad de los recursos geológicos para los EIA en pequeñas centrales hidroeléctricas, de gran utilidad para los profesionales y tomadores de decisiones involucrado en el proyecto.

ABSTRACT

In this work for obtain our university degree, the importance of an approach of integration of uses of the GIS tool is discussed, for the generation and management of the geological database, which will also be given the zoning for the susceptibility of mass movements (Bivariate Method), as a basis for the implementation of the methodology for the Geotechnical Zoning proposed for the Metropolitan Area of the Aburra Valley (AMVA). In light of the cartography existence of land uses, it was identified that the Geotechnical Zoning becomes an effective tool for the conservation of the environment, it was taken into account in the Environmental Impact Study (EIA), for the design phase of the PCH-La Chorrera. This systemic approach allows a better understanding of the sustainability of the geological resources for the EIA in small hydroelectric centrals, very useful for the professionals and decision makers involved in the project.

TABLA DE CONTENIDO

1	INTRODUCCIÓN	9
2	ESTUDIOS PREVIOS	11
2.1	Etapas de un Proyecto para una Pequeña Central Hidroeléctrica.....	11
2.2	Metodología	13
2.3	Fase de Campo.....	16
2.3.1	Elaboración De Estudios Geológicos	16
2.3.2	Elaboración De Estudios Geomorfológicos.....	17
2.4	Fase de Laboratorio	18
2.4.1	Elaboración Del Método Bivariado Para La Susceptibilidad Por Movimientos En Masa Tipo Deslizamiento.....	18
2.4.2	Conformación de la Geodatabase.....	19
2.4.3	Zonificación Geotécnica	19
3	CASO DE ESTUDIO PEQUEÑA CENTRAL HIDROELÉCTRICA LA CHORRERA	21
4	HIPÓTESIS	24
5	PREGUNTA	24
6	PLANTEAMIENTO DEL PROBLEMA	24
7	OBJETIVO GENERAL	24
7.1	Objetivos Específicos	24
8	RESULTADOS	26
8.1	Elaboración de estudios Geológicos	28
8.1.1	Rocas graníticas del Batolito Antioqueño.....	30
8.1.2	Depósitos de deslizamiento o Vertiente (Qv).....	32

8.1.3	Depósitos aluviotorrenciales (Qat)	33
8.2	Geología estructural local	34
8.2.1	Lineamientos estructurales	34
8.2.2	Diaclasas	36
8.3	Elaboración de Estudios Geomorfológicos	37
8.3.1	Lomos denudados bajos de longitud larga (Dldebl)	37
8.3.2	Lomos denudados moderado de longitud media (Dldemm).....	38
8.3.3	Lomos denudados bajos de longitud media (Dldebm)	39
8.3.4	Cerro Residual (Dcrs)	40
8.3.5	Abanico Aluviotorrencial (Faa).....	40
8.3.6	Escarpe de terraza de acumulación (Ftae)	41
8.3.7	Llanura de Inundación (Fpi).....	42
8.3.8	Lomo residual (Dires).....	42
8.4	Conformación de la Geotabase.....	48
8.5	Implementación Del SIG Mediante La Zonificación De Susceptibilidad Por Movimientos En Masa Por El Método Estadístico Bivariado	48
8.6	Zonificación Geotécnica	59
9	DISCUSIÓN.....	62
10	CONCLUSIONES.....	67
11	BIBLIOGRAFÍA.....	69

LISTA DE FIGURAS

Figura 1 Etapas de un Proyecto Hidroeléctrico	11
Figura 2 Metodología para la elaboración de estudios básicos.....	15
Figura 3 Mapa de Localización general de la zona del proyecto.....	22
Figura 4 Perfil de elevación de la quebrada La Chorrera.....	23
Figura 5 Mapa de estaciones de campo y estaciones donde se realizó levantamiento del macizo rocoso	27
Figura 6 Mapa Geológico de la zona del proyecto.....	29
Figura 7 Diagrama de polo para discontinuidades.....	36
Figura 8 Mapa Geomorfológico de la zona del proyecto.....	44
Figura 9 Mapa de los deslizamientos presentes en la zona de estudio.....	45
Figura 10 Mapa de pendientes de la zona del proyecto.....	46
Figura 11 Mapa de Curvaturas de la zona del Proyecto	53
Figura 12 Mapa de Coberturas de la zona del proyecto.....	54
Figura 13 Mapa del Relieve Relativo de la zona del proyecto.....	55
Figura 14 Mapa de las distancia a Drenajes de la zona del proyecto.....	56
Figura 15 Mapa de las distancia a Fallas de la zona del proyecto.....	57
Figura 16 Mapa de Zonificación por Susceptibilidad por movimientos en masa de la quebrada La Chorrera.....	58
Figura 17 Mapa de Zonificación geotécnica de la zona de estudio.....	61
Figura 18 Mapa de la zonificación geotécnica en zona de captación.....	65
Figura 19 Mapa de la zonificación geotécnica en zona de casa de máquinas.....	66

LISTA DE TABLAS

Tabla 1. Niveles de meteorización de acuerdo con norma británica BS5930 e ISRM.	17
Tabla 2. Descripción General De La Geología Presente En La Zona Del Proyecto.	28
Tabla 3. PERFIL DE METEORIZACIÓN TÍPICO DEL BATOLITO ANTIOQUEÑO.	31
Tabla 4. Direcciones de las principales tendencias de diaclasas.	36
Tabla 5. Rangos de pendientes y presencia en el AID.	47
Tabla 6. Curvatura de la zona del proyecto.	49
Tabla 7. Cobertura de la zona del proyecto	50
Tabla 8. Relieve Relativo de la zona del proyecto	50
Tabla 9. Distancia a Drenajes de la zona del proyecto	51
Tabla 10. Distancia a Fallas de la zona del proyecto	51
Tabla 11. Zonificación de susceptibilidad por movimientos en masa tipo deslizamiento.	52
Tabla 12. Áreas de la zonificación geotécnica.	60

LISTA DE FOTOGRAFÍAS

Fotografía 1 Afloramientos representativos del Batolito Antioqueño.....	30
Fotografía 2 Depósito de vertiente - tipo deslizamiento (Qd).....	33
Fotografía 3 Vista general de los depósitos aluviotorrenciales.....	33
Fotografía 4. Lineamiento en margen izquierda de la quebrada La Chorrera.	35
Fotografía 5. Fracturamiento intenso de roca granítica.....	35
Fotografía 6. Lomos denudados bajos de longitud larga	38
Fotografía 7. Lomos denudados moderados de longitud media.	39
Fotografía 8. Lomos denudados bajos de longitud media.	40
Fotografía 9. Cerro Residual	41
Fotografía 10. Escarpe de terraza de acumulación.	42
Fotografía 11. Llanura de Inundación.....	43

LISTA DE ANEXOS

Anexo 1 Datos de Campo

Anexo 2 Levantamiento de Macizo Rocoso

Anexo 3 Fotointerpretación

Anexo 4 Software Dips

Anexo 5 Registro fotográfico

Anexo 6 SIG

Anexo 7 Informe SIG

1 INTRODUCCIÓN

En Colombia, el creciente déficit en la cobertura de la red nacional de electricidad y el incremento del consumo masivo de combustibles fósiles; crea la necesidad de implementar el uso de tecnologías alternativas para la generación de energías más amigables con el medio ambiente, como lo son la energía solar, eólica e hidroeléctrica. Adicionalmente, la situación privilegiada de nuestro país desde el punto de vista hidrológico, incrementa el potencial para desarrollar proyectos de generación hidroeléctrica. Este potencial, genera la necesidad de construir nuevos proyectos hidroeléctricos de gran o de pequeña escala (PCH), ya que esto ofrece grandes alternativas de desarrollo para las regiones, donde se realicen este tipo de proyectos. En este contexto, las PCH ofrecen una alternativa para las zonas no interconectadas debido a que aprovechan pequeños saltos y caudales de agua; adicionalmente pueden ser de fácil manipulación y ser operadas por personal local (MORALES, 2014), razón por la cual, los entes territoriales como la gobernación de Antioquia, apoyan iniciativas como el proyecto PCH La Chorrera.

En el marco del proyecto fase de factibilidad para el desarrollo de una PCH La Chorrera (municipio de Santa Rosa de Osos), se le encomendó a IRYS S.A.S el levantamiento base geológico, geomorfológico y geotécnico, haciendo uso de los términos de referencia para pequeñas centrales hidroeléctricas (HE-TER-1-01), de la Agencia Nacional de Licencias Ambientales (ANLA).

El presente proyecto de grado, hace una propuesta de aproximación a la zonificación geotécnica en pequeñas centrales hidroeléctricas, a partir de la implementación de los Sistemas de Información Geográficos (SIG) para la conformación de la geodatabase, manejo de la información de campo (levantamiento geológico, geomorfológico, caracterización del macizo rocoso) y Zonificación por Susceptibilidad por movimientos en masa tipo deslizamiento (Método Bivariado).

La Zonificación geotécnica propuesta, siguió los lineamientos metodológicos para la elaboración de estudios geológicos y geomorfológicos asociados a la intervención de laderas en el valle de aburrá, propuesto por el Área Metropolitana del Valle de Aburrá (AMVA, 2012). La combinación de esta información básica, se convierte en una herramienta para la gestión de los georecursos, y como un mapa de apoyo para el Estudio de Impacto Ambiental (EIA), que apoye en la toma de decisiones ambientales a los profesionales y tomadores de decisiones, encargados del proyecto.

2 ESTUDIOS PREVIOS.

2.1 Etapas de un Proyecto para una Pequeña Central Hidroeléctrica

Los niveles de estudio que se requieren para la concepción de una PCH se resumen en la Figura 1 y se detallan a continuación.

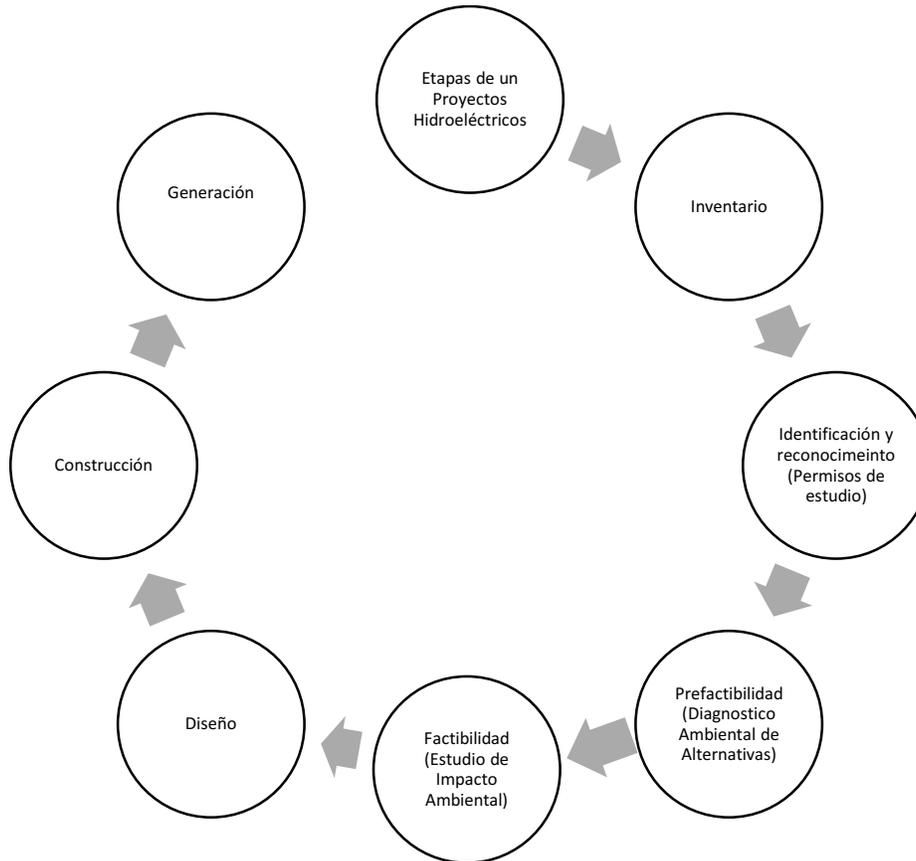


Figura 1 Etapas de un Proyecto Hidroeléctrico

Adaptado de (MORA & HURTADO, 2004)

Inventario: Está orientado hacia el estudio de poblaciones que no tienen servicios de energía eléctrica, con el fin de determinar aquéllas en las cuales se presentan condiciones adecuadas para la instalación de una pequeña central hidroeléctrica.

Identificación y Reconocimiento: En la etapa de identificación se realizan visitas a la población involucrada y a los lugares posibles de emplazamientos de las obras. Por otra parte, en el reconocimiento, se debe obtener información secundaria de la zona e información relevante para el diseño. Por último en esta fase se deben recopilar antecedentes bibliográficos de la zona, fotografías aéreas e información general de la zona del proyecto.

Prefactibilidad: Esta fase evalúa el potencial de desarrollo de toda la cuenca, estudia la diversidad de las caídas de agua existentes y efectúa una estimación de los costos de cada aprovechamiento. De esta forma, da impulso para desarrollar el proyecto o recomienda que se terminen las investigaciones, si no presentan condiciones favorables (MORALES, 2014). Además, en esta fase del proyecto se debe delimitar el área de influencia directa e indirecta (AII y AID), las cuales están contenidas en el estudio de diagnóstico ambiental de alternativas.

Factibilidad: Los estudios de factibilidad tienen como objetivo la justificación de un proyecto tanto en su conjunto como en sus dimensiones principales: técnicas, económicas, financieras, sociales y ambientales. El propósito del análisis es determinar si una idea dada de proyecto es suficientemente buena para continuar con ella, y llegar a la mejor solución de acuerdo con las circunstancias. (MORA & HURTADO, 2004)

Diseño: La etapa de diseño final inicia una vez se define la mejor alternativa desde el punto de vista técnico y económico. En esta etapa se dimensionan las diferentes obras del proyecto. Estos diseños deben responder a las exigencias de resistencia, estabilidad, larga duración y fácil explotación. (MORA & HURTADO, 2004)

Construcción: En esta etapa se inicia la construcción de las obras previstas en las fases anteriores y con el debido cumplimiento del cronograma.

Generación: Finalmente, se realizan las pruebas de funcionamiento de la central con el fin de verificar que esté lista para entrar en operación y posteriormente a la producción de energía. (MORALES, 2014)

2.2 Metodología

Para la construcción de una pequeña central hidroeléctrica se hace necesario realizar varios estudios con el fin de identificar los posibles aprovechamientos hídricos, seleccionarlos y optar por el mejor. Estos estudios se ejecutan en las etapas de prefactibilidad y factibilidad, previas al diseño, construcción y puesta en marcha de la planta.

La metodología, como se observa en la Figura 2, consistió en la implementación de un SIG, para el manejo de la geodatabase de la información primaria (trabajo de campo) y secundaria (archivos obtenidos a partir de los modelos digitales de elevación), con miras a la zonificación de la susceptibilidad por movimientos en masa tipo deslizamiento (Método bivariado), como insumo base para la zonificación geotécnica del área de influencia directa del proyecto (aproximadamente 471 Ha), como una herramienta para la toma de decisiones en la gestión adecuada de los georecursos de esta PCH. Las etapas realizadas se presentan a continuación.

Para el desarrollo de una PCH, se deben de seguir diversas etapas: estudio Cartográfico y Topográfico, estudio Geotécnico, Estudio de Impacto Ambiental (MORALES, 2014). Estas son necesarias para brindar una mejor visión del proyecto. Las etapas que se tomaron a consideración para la elaboración de este proyecto fueron:

Estudio Cartográfico y Topográfico: Por lo general, las zonas aisladas no disponen de mapas cartográficos adecuados al estudio, de ahí que se realice un estudio topográfico que permita obtener los datos necesarios de la zona y conocer la caída aprovechable, para determinar la potencia del recurso hidro-energético. Además, se debe recorrer la zona de estudio, donde se analice los diversos cambios de pendientes y estructuras que modelan el paisaje.

Estudio Geotécnico: El estudio geotécnico permite conocer las características del terreno en el cual se va a realizar el proyecto. El origen geológico de los materiales del suelo en el aprovechamiento desempeña un papel esencial pues éste determina sus características físicas. Esto es muy importante para definir la localización de las obras del proyecto.

Estudio de Impacto Ambiental: Este análisis permitirá evaluar el impacto que el proyecto podría generar sobre el medio ambiente y definir las medidas que permitan reducirlo, mitigarlo o evitarlo. Deberá hacerse de acuerdo con las normas ambientales vigentes.

Finalmente, siguiendo los lineamientos del AMVA se realizaron las siguientes fases: Fase precampo: recopilación bibliográfica, análisis fotografías aéreas, ortofotos e imágenes satelitales; Fase de campo: verificación de mapas temáticos (geología, geomorfología, procesos morfodinámicos) y Fase de laboratorio tal como lo muestra la Figura 2 de la metodología para estudios básicos, que consistió en implementar los estudios realizados en campo y los SIG, para la generación de mapas temáticos en miras hacia la zonificación geotécnica del área de influencia directa; siguiendo la terminología y métodos propuestos por el Área metropolitana del valle de Aburrá (AMVA), para la elaboración de estudios geológicos y geomorfológicos asociados a la intervención de laderas. Por otra parte, se implementó el método estadístico bivariado de la metodología para la zonificación de susceptibilidad por movimientos en masa, propuesta por el servicio geológico colombiano. Estos dos métodos nos permitieron caracterizar la estabilidad de las laderas y de esta manera lograr generar un modelo acertado para la zonificación geotécnica. A continuación, se detalla la fase de campo y de laboratorio.

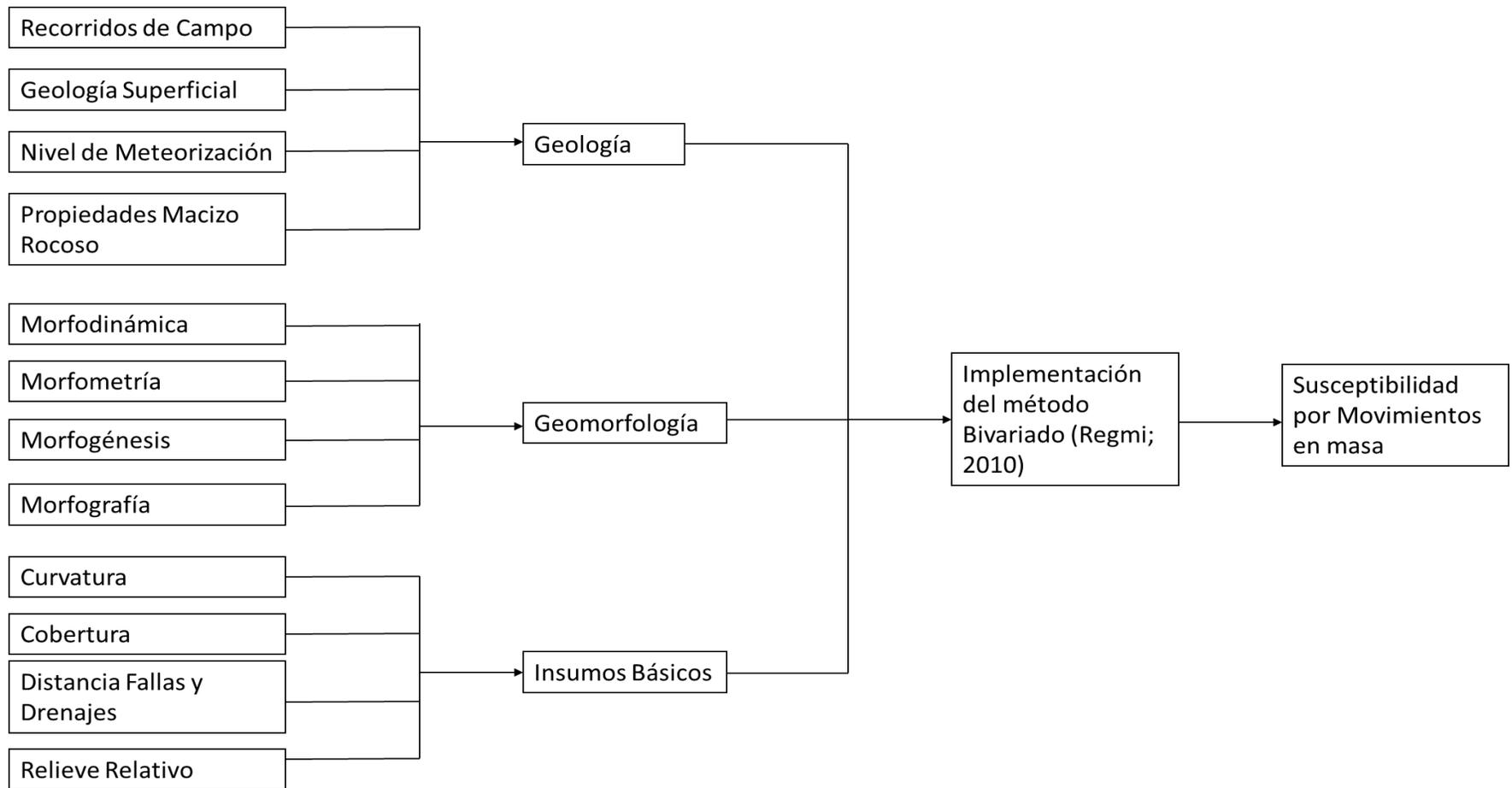


Figura 2 Metodología para la elaboración de estudios básicos.

2.3 Fase de Campo

2.3.1 Elaboración De Estudios Geológicos

La elaboración de los estudios geológicos tiene como objetivo la identificación, delimitación y descripción superficial de los tipos de roca, depósitos de vertiente o aluviales y llenos artificiales de cualquier tipo que conforman la zona del proyecto. (AMVA, 2012).

Para los estudios geológicos, se realizaron visitas de campo y recorridos detallados en la zona de estudios. Los estudios deben tener un levantamiento de afloramientos de roca, donde se describa detalladamente cada uno de los afloramientos se debe describir como mínimo el tipo de roca, depósito de vertiente o aluvial, o lleno artificial de cualquier tipo, la relación espacial y estratigráfica de los materiales y su grado de meteorización. Para la descripción de depósitos superficiales, se debe indicar el tipo de depósito, la granulometría, el tipo de matriz, el grado de meteorización y la relación matriz–bloques expresada de manera porcentual. (AMVA, 2012).

Lo anterior se elaboró con el mejor detalle, esto para generar un modelo temático geológico de la zona de estudio, donde se evidencie las unidades geológicas y como están ubicadas a lo largo de la ladera, o para nuestro caso de estudio como se distribuye espacialmente en la zona del proyecto.

El estudio geológico se realizó a partir de la revisión de información secundaria regional, fotointerpretación y reconocimientos detallados de campo; donde se logró delimitar las unidades geológicas, perfiles de suelos y la caracterización de la meteorización de las diferentes unidades litológicas

La meteorización de las rocas se describió de acuerdo con la nomenclatura de la (ISRM, 1981) y la norma británica (BS, 1999). En Tabla 1 se presenta la descripción de las características generales para cada horizonte de meteorización en cada uno de los afloramientos analizados. Otra herramienta para la descripción

litológica, fue la implementación de tablas para describir el macizo rocoso, esto en miras hacia determinar las características principales de la roca tales como discontinuidades, apertura, espaciamiento, persistencia, dirección, buzamiento, entre otras.

Tabla 1. Niveles de meteorización de acuerdo con norma británica BS5930 e ISRM.

Nivel de Meteorización	Descripción
I	Roca Fresca. Sin ningún tipo de alteración.
II	Poco Meteorizada. Solo alterada en paredes de discontinuidades. En perforaciones presenta más del 80% de recobro.
III	Moderadamente Meteorizada. Roca alterada, con suelo entre discontinuidades, colores originales alterados, ha perdido su resistencia original. En perforaciones presenta recuperaciones entre un 51% y 80%.
IV	Transición Suelo-roca. Mezcla de matriz de suelo y bloques rocosos. Recuperación en perforaciones entre el 10 y el 50%.
V	Saprolito. Suelo que conserva la textura de la roca original. Tiene hasta un 10% de bloques rocosos.
VI	Suelo Residual. La estructura de la roca no se puede reconocer. Usualmente conformado por limo y arcilla.

Fuente: (BS, 1999) y (ISRM, 1981)

2.3.2 Elaboración De Estudios Geomorfológicos

Los estudios geomorfológicos tienen como objetivo delimitar la caracterización y cartografía de las unidades geomorfológicas, la definición de rangos de pendientes, la identificación de los procesos morfodinámicos activos, inactivos y esperados que estén localizados dentro de la unidad morfológica independiente con incidencia directa o indirecta sobre el predio de interés. (AMVA, 2012)

Como resultado del procesamiento de los estudios geomorfológicos, se generó el mapa geomorfológico siguiendo la metodología descriptiva propuesta por el Servicio Geológico Colombiano en la propuesta metodológica sistemática para la generación de mapa geomorfológicos analíticos (SGC, 2015).

2.4 Fase de Laboratorio

2.4.1 Elaboración Del Método Bivariado Para La Susceptibilidad Por Movimientos En Masa Tipo Deslizamiento.

Según el Servicio Geológico Colombiano (SGC, 2013), la susceptibilidad es la evaluación de los factores intrínsecos presentes en el suelo de una región determinada, sin tener en cuenta un tiempo en específico ni factores detonantes que puedan generar deslizamientos, la ecuación 1 y 2, permite la valoración por el método bivariado (Regmi, 2010).

$$w_{i+} = \log_e \left(\frac{\frac{A1}{A3}}{\frac{A1+A2}{A3+A4}} \right) \text{ Ecuación 1}$$

$$w_{i-} = \log_e \left(\frac{\frac{A1}{A3}}{\frac{A1+A2}{A3+A4}} \right) \text{ Ecuación 2}$$

Donde A1 es el número de píxeles de deslizamiento presentes en una determinada clase, A2 es el número de píxeles de los deslizamiento que no están presentes en dada clase, A3 es el número de píxeles en la clase en la cual no existen píxeles de deslizamiento, y A4 es el número de los píxeles en los que no hay deslizamientos ni la clase. (Regmi, 2010) (ver ecuación 1 - 2)

$$Wc = (w_{i+} - w_{i-}) - \text{Ecuación 3}$$

Según (Regmi, 2010), la diferencia entre los dos pesos se conoce como el contraste de peso (ecuación 3); donde la magnitud del contraste refleja el espacio general asociación entre la clase y los deslizamientos de tierra. Si el peso el contraste es positivo, el factor es favorable para los deslizamientos, y si es negativo, es desfavorable para los deslizamientos.

2.4.2 Conformación de la Geodatabase

Se recopiló y estructuró información primaria y secundaria de cada uno de los componentes del área de influencia directa (AID). Posteriormente, con herramientas propias de los SIG, tales como dissolve, intersect y superposiciones de elementos geográficos, se obtienen bases para que los especialistas tomen decisiones y análisis de la información.

La Geodatabase se estructuró en los sistemas de información geográfico partir de geodatabase, feature dataset y feature clases; donde se alimentó mediante la recopilación bibliográfica, análisis fotografías aéreas, ortofotos.

2.4.3 Zonificación Geotécnica

Una vez elaborados los estudios geológicos y geomorfológicos para las laderas identificadas como área de influencia del proyecto, se deberá proceder a la elaboración del mapa de zonificación de la aptitud geotécnica, para lo cual se deben considerar cuatro tipos de zonas como se indica a continuación (AMVA, 2012):

- Zonas aptas: Corresponden a zonas que presentan alto grado de estabilidad; no se aprecia la ocurrencia de procesos morfodinámicos activos e inactivos tales como socavación de márgenes y movimientos en masa que afecten la estabilidad global del predio de interés. (AMVA, 2012)

- Zonas aptas con restricciones moderadas: Corresponden a zonas estables dentro del predio de interés; sin embargo, su estabilidad está condicionada por la incidencia directa que presentan procesos morfodinámicos activos tales como socavación de márgenes y movimientos en masa identificados; la estabilidad global de estas zonas dependerá del manejo que se dé a los procesos morfodinámicos y al tipo de intervención que se proyecte. Se considera que las obras de estabilización proyectadas son técnica y económicamente viables. (AMVA, 2012)

- Zonas aptas con restricciones altas: En las cuales se evidencia la ocurrencia de procesos morfodinámicos activos tales como socavación de márgenes y movimientos en masa localizados en el predio de interés; la estabilidad global de estas zonas dependerá del manejo que se dé a los procesos morfodinámicos y al tipo de intervención que se proyecte sobre estas. El estudio debe evaluar la viabilidad técnica y económica de las obras de estabilización proyectadas dentro del lote. (AMVA, 2012)
- Zonas no aptas: Son aquellas con evidente inestabilidad por la ocurrencia de procesos morfodinámicos activos tales como socavación de márgenes y movimientos en masa dentro del lote de interés; el estudio considera que las obras de estabilización proyectadas son técnicamente complejas y de alto costo con respecto a las inversiones proyectadas en la zona o predio de interés. Las zonas con restricciones normativas se considerarán como no aptas. (AMVA, 2012). Cabe resaltar que estas zonas son de retiro asociadas a los cauces de agua. Para intervenir estos sitios se debe realizar trámite de solicitud de permiso ambiental de ocupación o de retiro de cauce.

3 CASO DE ESTUDIO PEQUEÑA CENTRAL HIDROELÉCTRICA LA CHORRERA

La Altiplanicie de Santa Rosa de Osos corresponde a una meseta irregular, ubicada en el núcleo de la Cordillera Central, al noreste del Departamento de Antioquia y a 2.581 m.s.n.m. El Municipio tiene una extensión de 812 km²; está ubicado en una planicie a 71,5 km de la Ciudad de Medellín y sus límites son: al norte, con los Municipios de San José de la Montaña, Yarumal y Angostura; al este, con los Municipios de Carolina Del Príncipe, Gómez Plata y Yolombó; al sur, con los Municipios de Santo Domingo, Donmatías y al oeste, con los Municipios de Entreríos y Belmira, tal como lo muestra la Figura 3. (UMATA, 2015)

La quebrada La Chorrera nace al sureste del municipio de Santa Rosa a 2.300 m.s.n.m, desde su nacimiento hasta la desembocadura en el Río Grande tiene una longitud de aproximadamente 8 kilómetros, además la cuenca hidrográfica se encuentra rodeada por las veredas San Isidro, San Pablo y El Coco. La diferencia de altura desde el nacimiento hasta su desembocadura en el río Grande, es de aproximadamente 1375 m en 13 km de distancia como se muestra en la Figura 4.

En los primeros 3 km de recorrido, el cauce presenta una pendiente suave, bajo gradiente hidráulico, moderada capacidad de erosión y baja capacidad de arrastre; en este tramo el río fluye en el altiplano. Entre el km 3 y el km 4 se presenta el mayor gradiente hidráulico, donde las vertientes son muy fuertes a escarpadas, con comportamiento torrencial y alta capacidad de arrastre; posteriormente el río va perdiendo altura y gradiente hasta llegar a la desembocadura en el río Grande. La quebrada presenta un comportamiento torrencial en gran porcentaje de su recorrido, ya que se observan grandes bloques de roca como se muestra en el anexo 5, el cual corresponde el registro fotográfico realizado en los recorridos de campo.

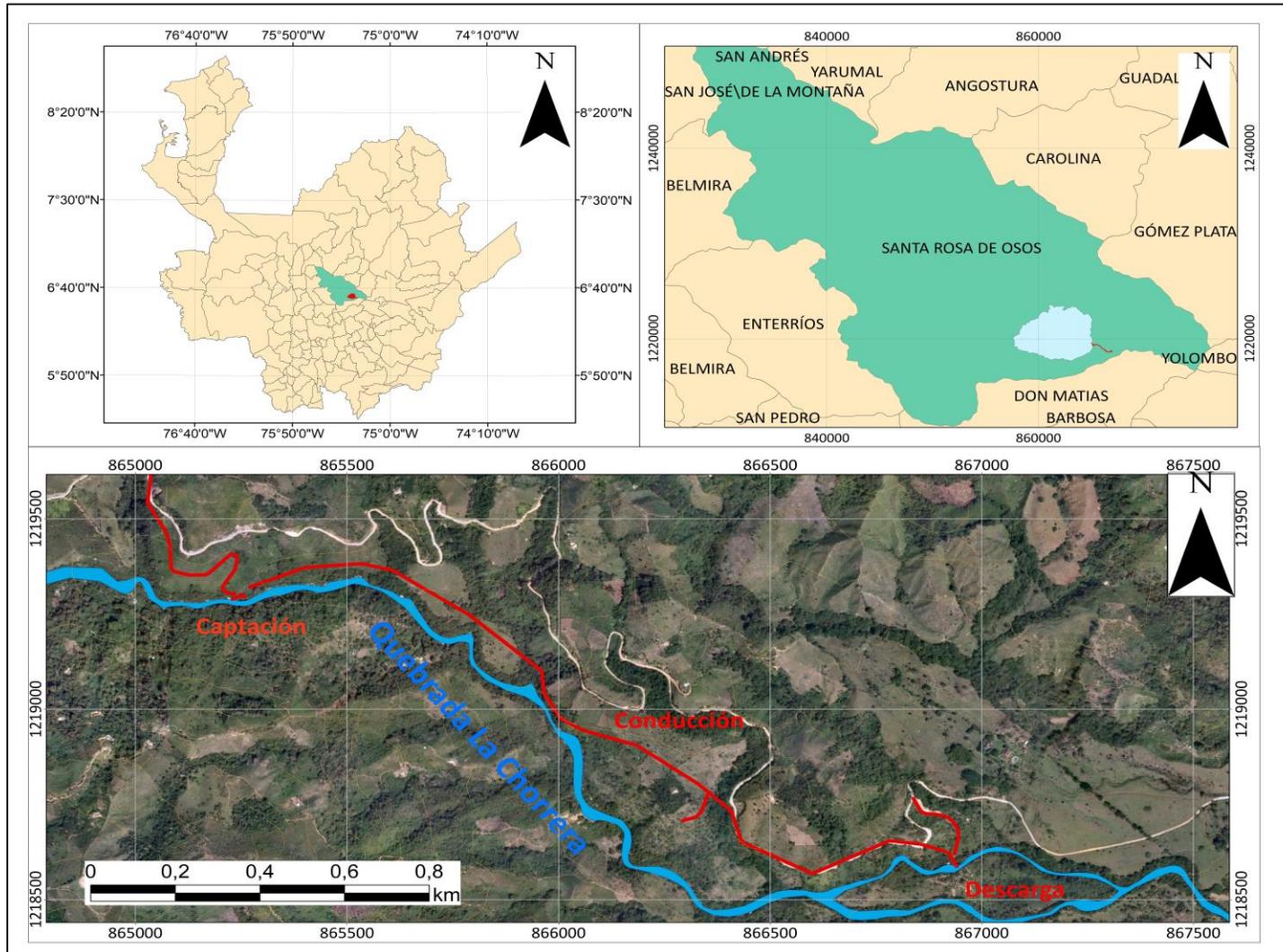


Figura 3 Mapa de Localización general de la zona del proyecto.
Fuente: (IRYS, 2017)

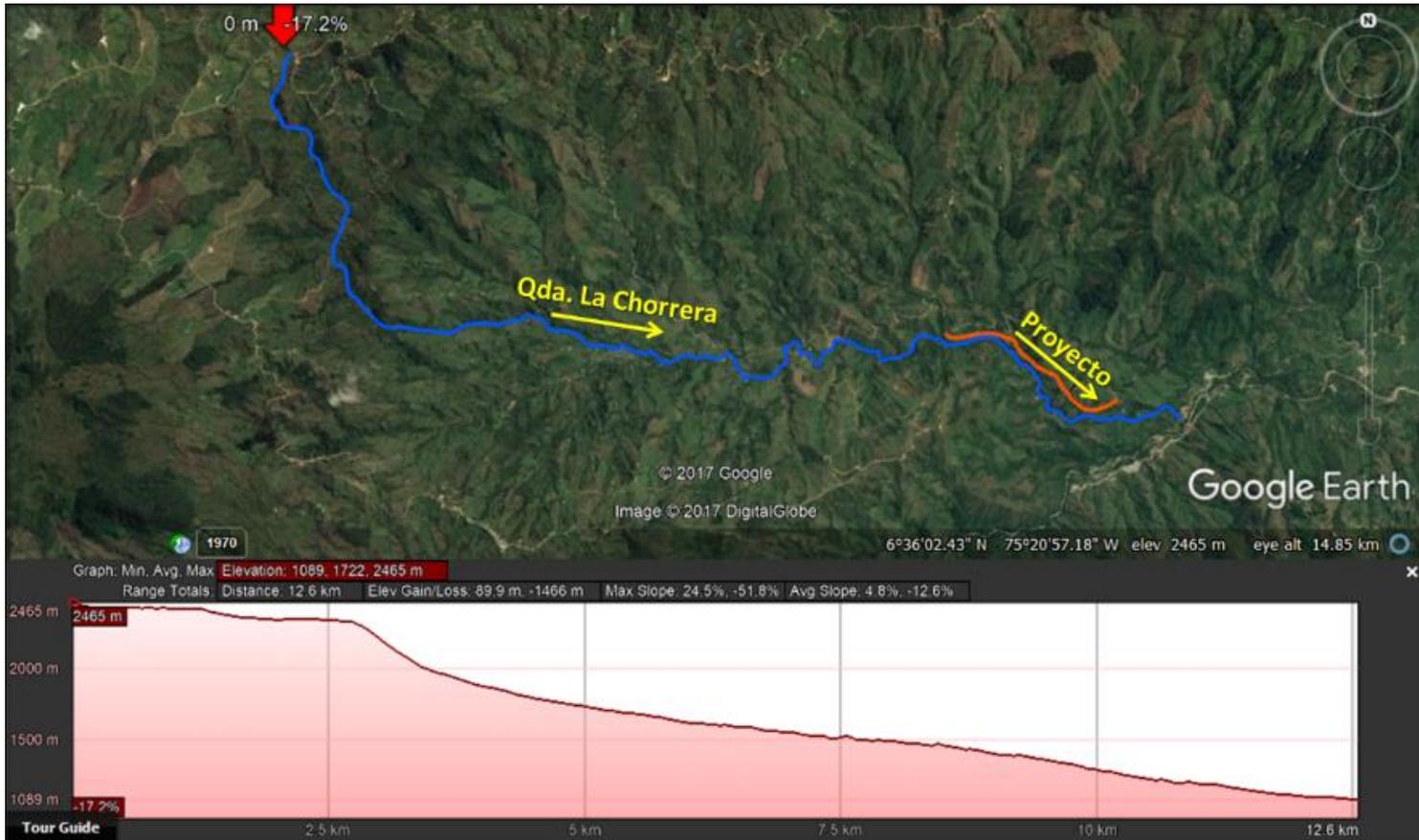


Figura 4 Perfil de elevación de la quebrada La Chorrera.

Imagen adaptada de Google Earth©.

Fuente: (IRYS, 2017)

4 HIPÓTESIS

La zonificación geotécnica mediante la implementación del SIG, se convierte en una herramienta clave para la toma de decisiones y la gestión ambiental de los georecursos en una pequeña central hidroeléctrica (PCH): caso de estudio La Chorrera municipio de Santa Rosa de Osos, Antioquia.

5 PREGUNTA

¿Es el mapa de zonificación geotécnica un insumo clave para la toma de decisiones en la factibilidad y la gestión ambiental de los georecursos en una pequeña central hidroeléctrica (PCH): caso de estudio La Chorrera - municipio de Santa Rosa de Osos, Antioquia?

6 PLANTEAMIENTO DEL PROBLEMA

La toma de decisiones y la gestión de los georecursos, en la factibilidad de un proyecto de generación hidroeléctrica (PCH La Chorrera); no se basa en sistemas de información geográficos (SIG) y su relación con la estabilidad de las laderas en el área de influencia directa (AID).

7 OBJETIVO GENERAL

Implementar los SIG para la zonificación geotécnica como herramienta para la gestión ambiental de los georecursos en una pequeña central hidroeléctrica (PCH): caso de estudio La Chorrera - municipio de Santa Rosa de Osos, Antioquia.

7.1 Objetivos Específicos

- Realizar el levantamiento geológico y geomorfológico del área de estudio escala 1:10.000.
- Implementar un SIG que permita gestionar la geodatabase para el desarrollo de los mapas temáticos

- Implementar la zonificación de la susceptibilidad por movimientos en masa tipo deslizamiento, aplicando el método bivariado.
- Aplicar la metodología de zonificación geotécnica siguiendo los criterios establecidos por el Área Metropolitana del Valle de Aburrá.
- Discutir los resultados a la luz de la gestión integral de los georecursos en una PCH.

8 RESULTADOS

En el caso de estudio, para el proyecto en la quebrada La Chorrera, se realizaron los estudios de factibilidad de la componente geoesférica incluidos en los términos de referencia del (ANLA, 2006) y los estudios a detalle del (AMVA, 2012), para la generación de la zonificación geotécnica. La información completa del trabajo de campo se presenta en el anexo 1, de los datos obtenidos en las estaciones de campo, además en el anexo 2 se presenta el levantamiento realizado en las estaciones de campo donde se presentó afloramientos del macizo rocoso como lo muestra la Figura 5.

A continuación, se presentan los resultados obtenidos en la etapa de estudios básicos, implementación del SIG para la zonificación de la susceptibilidad por movimientos en masa y la zonificación geotécnica a partir del método del análisis de expertos.

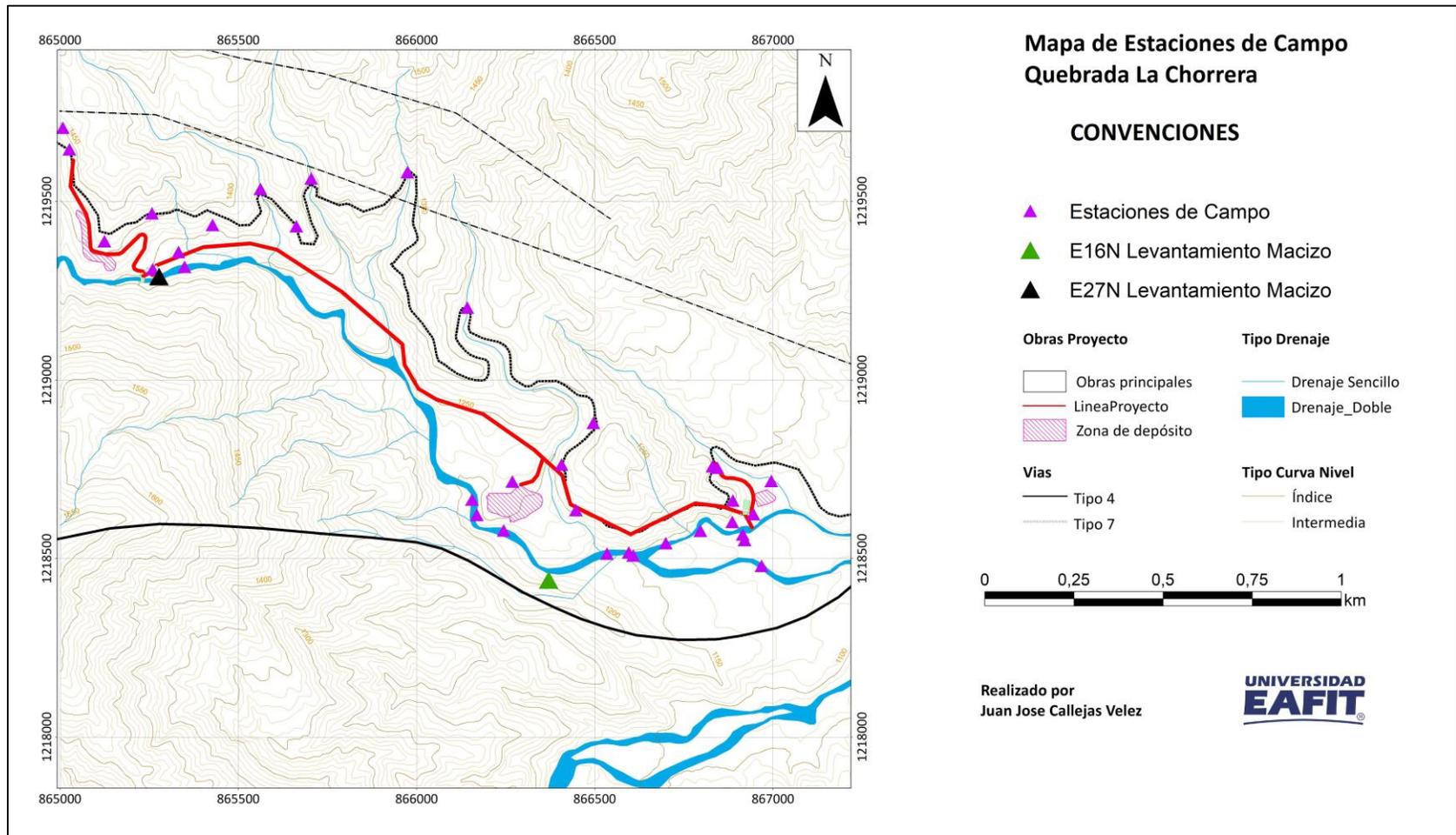


Figura 5 Mapa de estaciones de campo y estaciones donde se realizó levantamiento del macizo rocoso

8.1 Elaboración de estudios Geológicos

En el área de estudio, afloran rocas graníticas de edad cretácica pertenecientes al Batolito Antioqueño, además de depósitos de vertiente como lo muestra la Figura 6. Las principales características geológicas se resumen en la Tabla 2, y se detallan a continuación.

Tabla 2. Descripción General De La Geología Presente En La Zona Del Proyecto.

Unidad	Descripción	Fotografía
Deposito de Deslizamiento	Asociados principalmente a procesos de remoción en masa en los cortes de la vía veredal hacia Santa Rosa de Osos, presentan pendientes moderadas, de aspecto cónico, los cuales reposan sobre suelos residuales de rocas graníticas.	
Deposito Aluviotorrencial	Se encuentran localizados a lo largo del cauce de la quebrada La Chorrera, con carácter clastosoportado, compuestos principalmente por cantos subredondeados a subangulosos, de composición granítica, resistencia moderadamente dura a dura, meteorizados y con pátinas de oxidación, con tamaños de hasta 3 m de diámetro; envueltos en una matriz areno limosa a areno gravosa, de tonalidad café con pátinas de oxidación, compacidad densa a medio densa	
Batolito Antioqueño	Roca ígnea plutónica correspondiente principalmente a granodiorita y tonalita, presenta textura fanerítica granular; debido a las características físicas del macizo rocoso tales como fracturamiento, diaclasamiento y zonas de cizalla generan profundos perfiles de meteorización.	

Fuente: (IRYS, 2017)

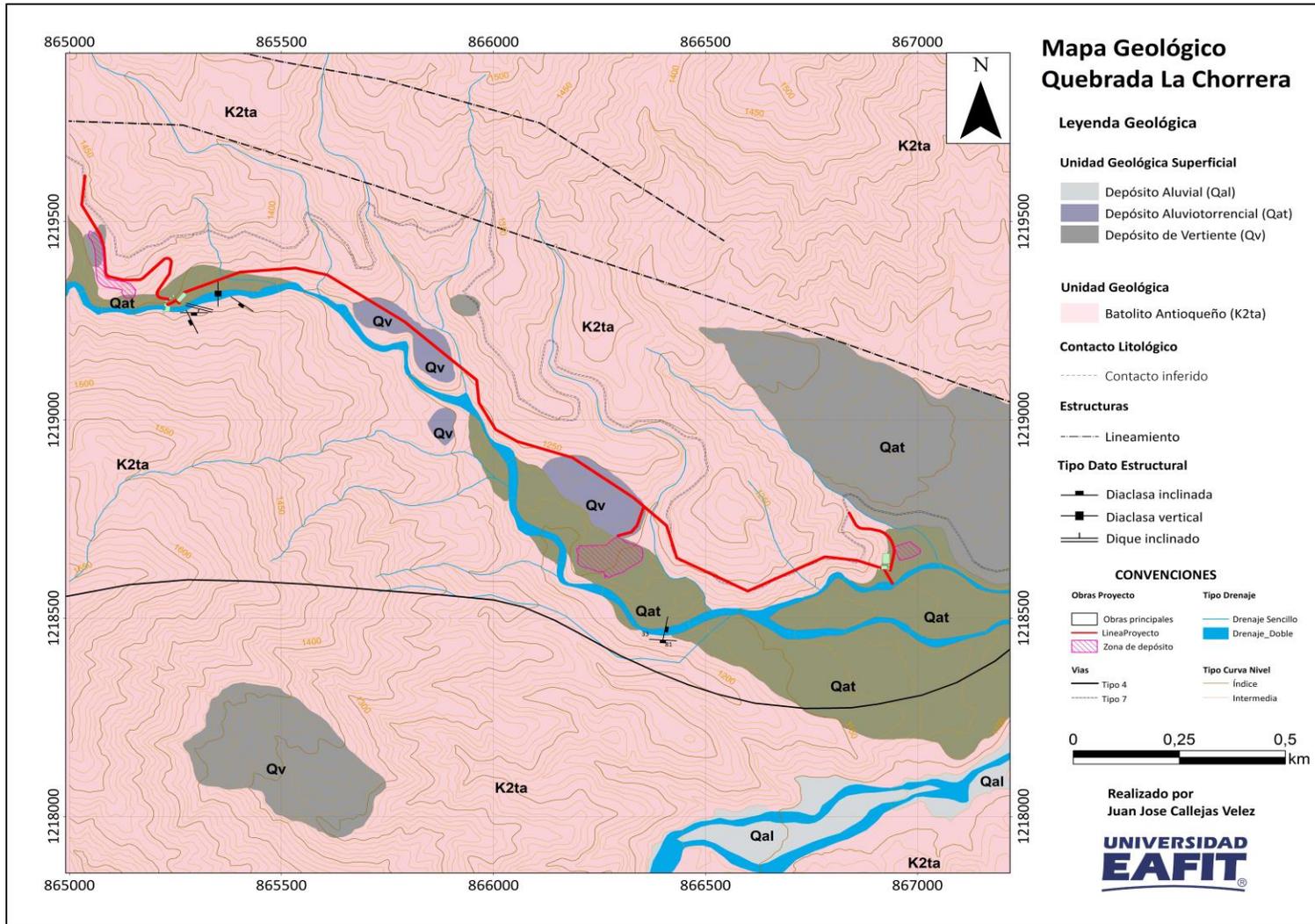
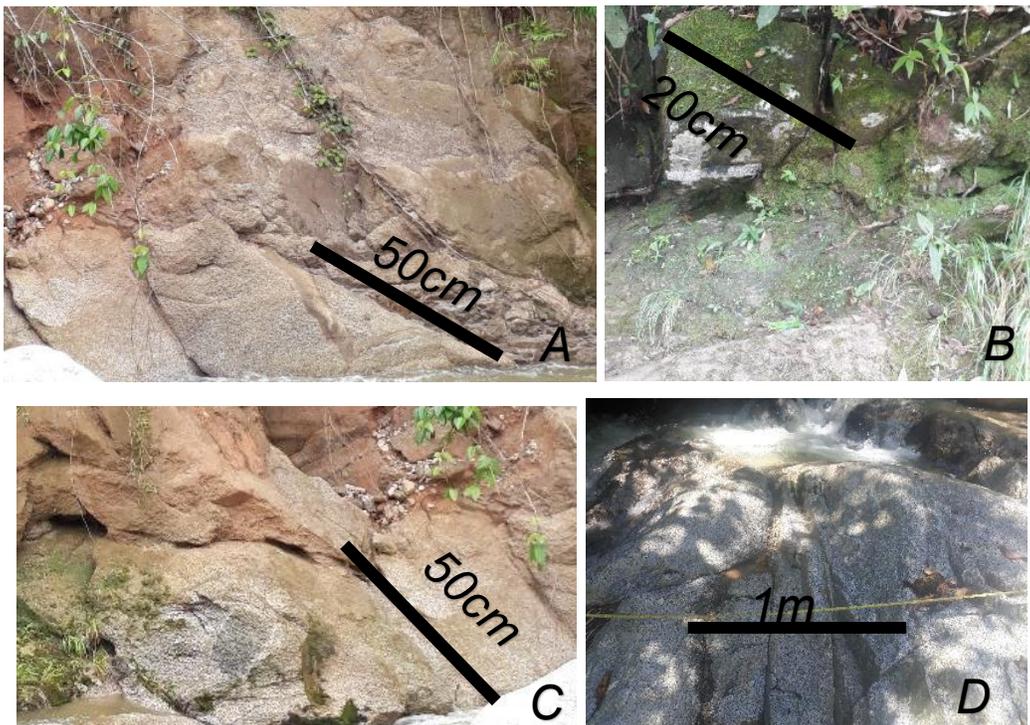


Figura 6 Mapa Geológico de la zona del proyecto.

8.1.1 Rocas graníticas del Batolito Antioqueño

Roca ígnea plutónica correspondiente principalmente a granodiorita y tonalita, presenta textura fanerítica granular; debido a las características físicas del macizo rocoso tales como fracturamiento, diaclasamiento y zonas de cizalla generan profundos (hasta 20) metros de perfiles de meteorización.

La roca está constituida principalmente por feldespato, biotita, hornblenda y cuarzo y es común encontrar bloques de orden métrico redondeados parcialmente meteorizados debido al proceso de meteorización esferoidal facilitado por el diaclasamiento ortogonal. En la Fotografía 1 se pueden apreciar afloramientos de roca granítica meteorizada en las vertientes y en el cauce de la quebrada La Chorrera y de otros afluentes; además, en zonas puntuales se observan diques basálticos que cortan las rocas graníticas (Fotografía 1-D), con un espesor aproximado de 20 cm.



Fotografía 1 Afloramientos representativos del Batolito Antioqueño.

Fuente: (IRYS, 2017)

Tabla 3. PERFIL DE METEORIZACIÓN TÍPICO DEL BATOLITO ANTIOQUEÑO.

Nivel	Nombre	Descripción	Fotografía típica
VI	Suelo residual	Limo a limo arcilloso de color naranja a amarillento, consistencia blanda, humedad media y plasticidad media; con evidencia de cristales de cuarzo y micas meteorizadas. No conserva textura ni estructuras heredadas de la roca original.	
V	Saprolito	Limo arenoso de tonalidades naranjas y rojizas con pátinas de oxidación, consistencia firme, humedad media a baja y plasticidad baja a nula. Conserva textura fanerítica de la roca original.	
IV	Transición suelo - roca	Suelo limo arenoso a limo arcilloso de tonalidades naranja, rojiza, amarilla, negra y blanca con pátinas de oxidación, consistencia blanda a firme, humedad media, plasticidad baja; envolviendo fragmentos de cuarzo tamaño grava y arena y bloques de roca granítica alta a moderadamente meteorizada y oxidada, con resistencia moderadamente dura a dura, los cuales presentan meteorización esferoidal. La relación matriz/fragmentos es 40%/60% respectivamente.	

Nivel	Nombre	Descripción	Fotografía típica
III-II	Roca moderadamente a poco meteorizada	Roca de textura fanerítica, de grano medio, moderadamente dura a dura, moderada a poco meteorizada, presenta pátinas de oxidación en las fracturas. En la zona de estudio se observa la roca poco meteorizada en el lecho de las quebradas, principalmente en la quebrada La Chorrera.	

Fuente: (IRYS, 2017)

8.1.2 Depósitos de deslizamiento o Vertiente (Qv)

Asociados principalmente a procesos de remoción en masa en los cortes de la vía veredal hacia Santa Rosa de Osos, presentan pendientes moderadas, de aspecto cónico, los cuales reposan sobre suelos residuales de rocas graníticas. Compuestos por suelos limosos a limo arenosos, de consistencia blanda a firme, plasticidad baja, envolviendo fragmentos de roca granítica, subredondeados, con tamaños de hasta 1,0 m como se observa en la Fotografía 2(A-B). La mayoría de estos depósitos presentan líneas de escorrentía y formación de surcos que lo incisa. Este tipo de depósitos está asociado principalmente a los cortes de la vía veredal que conduce a Santa Rosa de Osos.



Fotografía 2 Depósito de vertiente - tipo deslizamiento (Qd).

Fuente: (IRYS, 2017)

8.1.3 Depósitos aluviotorrenciales (Qat)

Se encuentran localizados a lo largo del cauce de la quebrada La Chorrera, con carácter clastosoportado, compuestos principalmente por cantos subredondeados a subangulosos, de composición granítica, los cuales presentan una resistencia moderadamente dura a dura, meteorizados y con pátinas de oxidación, con tamaños de hasta 3 m de diámetro; envueltos en una matriz areno limosa a areno gravosa, de tonalidad café con pátinas de oxidación, compacidad densa a medio densa.



Fotografía 3 Vista general de los depósitos aluviotorrenciales.

Fuente: (IRYS, 2017)

8.2 Geología estructural local

Durante los recorridos de campo no se identificaron fallas tectónicas que pudiesen afectar el proyecto. Se evidencian expresiones geomorfológicas que pueden catalogarse como lineamientos, principalmente en la vertiente izquierda de la quebrada la Chorrera. Además, se recopilaron datos estructurales correspondientes a diaclasas, identificadas en los afloramientos de roca granítica en el lecho o en las márgenes de la quebrada La Chorrera.

8.2.1 Lineamientos estructurales

La zona donde se plantea ubicar la pequeña central hidroeléctrica se encuentra en su mayor parte cubierta por suelos residuales dificultando la identificación de las estructuras en los afloramientos; sin embargo, a partir de la observación de las características morfológicas del área, la fotointerpretación realizada, y los afloramientos visitados en campo, se identifican principalmente expresiones a nivel de lineamientos.

Las mejores expresiones se pueden ver en la vertiente izquierda de la quebrada a media ladera (ver Fotografía 4), con tendencia N70 W, similar a la de la falla Cisneros (INGEOMINAS, 2011). Dentro de las evidencias geomorfológicas que se encuentran en la zona, se presentan silletas, cambio en la dirección de drenajes tributarios, facetas triangulares, lomos deflectados y basculamiento de un depósito tipo flujo de lodos y/o escombros; además, hay evidencia de fracturamiento intenso de la roca que concuerda con los lineamientos que presentan expresión morfológica (ver Fotografía 5).



Fotografía 4. Lineamiento en margen izquierda de la quebrada La Chorrera.

Fuente: Ingeniería de rocas y suelos – IRYS, 2017



Fotografía 5. Fracturamiento intenso de roca granítica.

Fuente: Ingeniería de rocas y suelos – IRYS, 2017

8.2.2 Diaclasas

Corresponden a la discontinuidad predominante en los pocos sitios donde se encontró aflorando el macizo rocoso; con orígenes asociados tanto al enfriamiento del Batolito Antioqueño como a esfuerzos de tipo tectónico. Para la zona de estudio se realizó el levantamiento de tres estaciones geomecánicas donde se tomaron perfiles de rugosidad y valores de rebote con el martillo de Schmidt (ver Anexo 2).

En general, la roca granítica (granodiorita – tonalita) presenta una estructura masiva donde se logran identificar al menos tres familias de discontinuidades (ver Tabla 4 y

Figura 7). La roca presenta resistencia dura a muy dura, meteorización moderada a leve, con pátinas de oxidación en las paredes de las discontinuidades; el espaciamiento varía entre muy juntas y moderadamente juntas, persistencia muy baja, abiertas a cerradas, con perfiles ondulado liso a rugoso, sin evidencia de rellenos.

Tabla 4. Direcciones de las principales tendencias de diaclasas.

Familia	Rumbo	Buzamiento
1	N07E	84SE
2	N78E	23SE
3	N64W	77SW

Fuente: (IRYS, 2017)

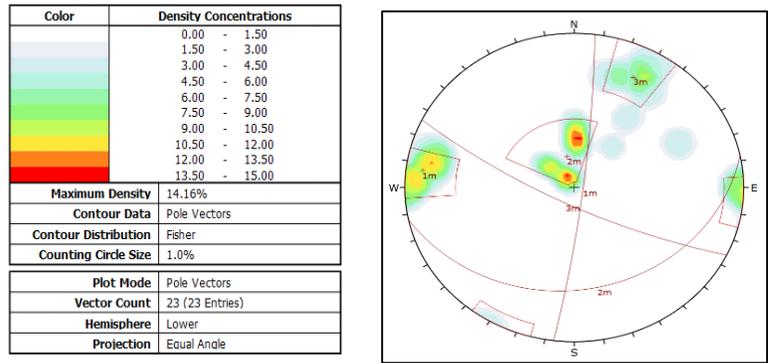


Figura 7

Diagrama

de polo para discontinuidades.

Fuente: (IRYS, 2017)

8.3 Elaboración de Estudios Geomorfológicos

Para la cuenca de la quebrada La Chorrera el ambiente denudativo es el más predominante, el cual presenta incisiones suaves y geoformas especialmente marcadas. Por otra parte, el ambiente acumulativo también se hace notorio en las zonas aledañas a los causes principales dando cabida a geoformas asociadas a la acumulación fluvial. Se observan lineamientos y zonas de deformaciones de las geoformas, esto asociado al ambiente estructural. La Figura 8 presenta la distribución espacial de las geoformas (INGEOMINAS, 2011). El control de las estaciones de campo se puede revisar en el anexo 1 donde se muestra en cuales estaciones se realizó levantamiento de unidades geomorfológicas y posterior a este en el anexo 3 la foto interpretación de las unidades geomorfológicas presentes en las zonas del proyecto.

En el área de influencia directa (AID), se identificaron ocho subunidades: Lomos denudados bajos de longitud larga (Dldebl); Lomos denudados moderado de longitud media (Dldemm); Lomos denudados bajos de longitud media (Dldebm); Cerro Residual (Dcrs); Abanico Aluviotorrencial (Faa); Escarpe de terraza de acumulación (Ftae); Llanura de Inundación (Fpi) y Lomo residual (Dlres) (Ver Figura 8). Las subunidades encontradas en los recorridos de campo corresponden a una subdivisión de las unidades geomorfológicas, determinadas principalmente por los contrastes morfológicos y morfométricos que relacionan el tipo de material o la disposición estructural de los mismos, con la correspondiente topografía del terreno. En general, fueron definidas por el contraste que generan las formaciones superficiales asociadas a procesos morfodinámicos actuales de meteorización, erosión, transporte y acumulación. La descripción detallada de cada sub-unidad se presenta a continuación:

8.3.1 Lomos Denudados Bajos De Longitud Larga (Dldebl)

Las laderas se caracterizan por presentar pendientes mayores al 30%, muy fuertes, longitudes moderadas, forma irregular con sectores cóncavos y convexos,

perpendiculares al drenaje principal, presentan patrón de drenaje subparalelo y los topos son principalmente subredondeados (Fotografía 6). Los terrenos se conforman principalmente por suelo residual (nivel VI y V) de Batolito Antioqueño; los principales procesos morfodinámicos corresponden desgarres superficiales, cicatrices de deslizamiento, líneas de escorrentía y sobrepastoreo.



Fotografía 6. Lomos denudados bajos de longitud larga

Fuente: (IRYS, 2017)

8.3.2 Lomos Denudados Moderado De Longitud Media (Dldemm)

Se caracterizan por presentar flancos con pendientes mayores al 50% (muy fuertes), longitudes largas, formas irregulares con sectores cóncavos y convexos, el patrón del drenaje característico es subparalelo y presenta topos planos (Fotografía 7). Los terrenos se conforman principalmente por suelo residual (nivel VI y V) en las partes altas y termina en una transición suelo roca (nivel IV) hacia el cauce de la quebrada La Chorrera, donde los principales procesos morfodinámicos corresponden a deslizamientos, desgarres superficiales, cicatrices de deslizamiento, empozamiento, sobrepastoreo y líneas de escorrentía.

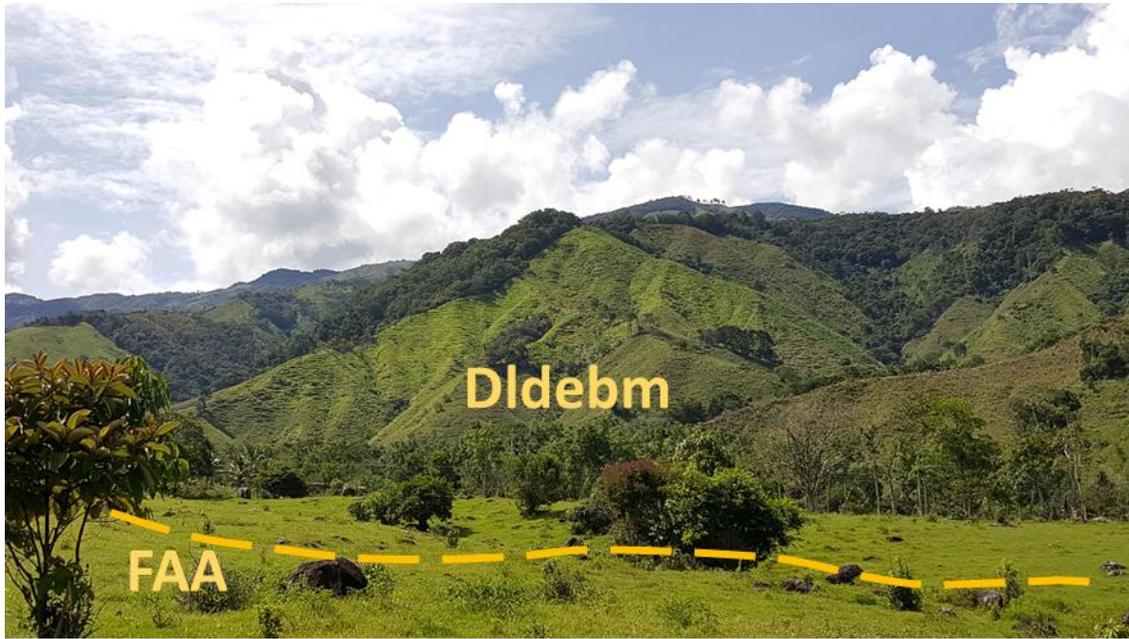


Fotografía 7. Lomos denudados moderados de longitud media.

Fuente: (IRYS, 2017)

8.3.3 Lomos Denudados Bajos De Longitud Media (Dldebm)

Los flancos se caracterizan por presentar pendientes muy fuertes, longitudes moderadas, son rectos con una geometría en planta triangular a trapezoidal, con evidencia de un patrón de drenaje subparalelo (Fotografía 8). Los terrenos se conforman por suelo residual (nivel VI y V) y transición suelo roca (nivel IV) de Batolito Antioqueño; los principales procesos morfodinámicos corresponden desgarres superficiales, cicatrices de deslizamiento, líneas de escorrentía y sobrepastoreo.



Fotografía 8. Lomos desnudos bajos de longitud media.

Fuente: (IRYS, 2017)

8.3.4 Cerro Residual (Dcrs)

La subunidad presenta cima subredondeada, con laderas de pendientes fuertes a muy fuertes, longitud moderada a larga, de forma convexa (Fotografía 9). El terreno está compuesto principalmente de suelo residual (nivel VI y V) hacia el tope y transición suelo roca (nivel IV) hacia las partes bajas; los principales procesos morfodinámicos corresponden a coronas de deslizamiento, desgarres superficiales, cicatrices de deslizamiento, líneas de escorrentía y sobrepastoreo.

8.3.5 Abanico Aluviotorrencial (Faa)

Se caracteriza por presentar pendientes suaves a moderadas, con extensión y altura variable respecto al cauce actual de la quebrada; su origen es relacionado a la acumulación torrencial y fluvial donde la corriente de la quebrada desemboca en una zona plana. Los canales de la quebrada La Chorrera fluyen cortando el abanico. El principal proceso morfodinámico presente en la zona corresponde a socavación lateral del cauce de la quebrada.(Fotografía 9)



Fotografía 9. Cerro Residual

Fuente: (IRYS, 2017)

8.3.6 Escarpe De Terraza De Acumulación (Ftae)

Se caracteriza por ser una superficie elongada, de pendiente suave a moderada, modelada sobre sedimentos aluviotorrenciales de diferente altura a lo largo del cauce de la quebrada La Chorrera. Se presentan dos niveles, el TA1 corresponde al depósito aluviotorrencial más alto con respecto al cauce actual de la quebrada y un poco más antiguo que el nivel denominado TA2. Los principales procesos morfodinámicos corresponden a desgarres superficiales, líneas de esorrentía y sobrepastoreo para el caso de TA1 y socavación lateral del cauce para el TA2.



Fotografía 10. Escarpe de terraza de acumulación.

Fuente: (IRYS, 2017)

8.3.7 Llanura De Inundación (Fpi)

Se localiza al sur del proyecto hidroeléctrico bordeando el cauce del río Grande; se encuentra asociada a la unidad denominada Superficies de Acumulación (SA). Tal como lo muestra la Fotografía 11 es una superficie de morfología plana, eventualmente inundable, con evidencia de socavación lateral del cauce.

8.3.8 Lomo Residual (DIres)

Elevación del terreno menor de 200 metros con morfología alomada y alargada, laderas cortas a moderadamente largas, convexas a eventualmente cóncavas y pendientes muy inclinadas a muy abruptas y con drenaje dendrítico, desarrollada de manera general, sobre materiales afectados por meteorización diferencial intensa.



Fotografía 11. Llanura de Inundación.

Fuente: (IRYS, 2017)

Para el (AMVA, 2012), en la geomorfología se debe anexar el mapa de los movimientos en masa presentes en el aérea de estudio (Figura 9), ya que estos movimientos son elementos claves para generar una evaluación más detallada de la estabilidad de las laderas; además de esta variable se debe anexar un modelo temático de las pendientes de la zona (Figura 10), ya que nos brindara una mejor visión del comportamiento y espacialidad de los deslizamientos. Aunque en la zona no se aprecian procesos de una magnitud tal que puedan inviabilizar el proyecto, o que hayan hecho cambiar su trazado, a lo largo del recorrido, se identificaron procesos activos e inactivos en las laderas de los lomos, además de inestabilidades que afectan los taludes de la vía que va desde la vereda El Caney hasta Santa Rosa de Osos, tales como: sobrepastoreo y reptación de suelos, desprendimiento y caída de material de taludes, formación de surcos, socavación lateral del cauce; y algunas cicatrices de deslizamientos antiguos.

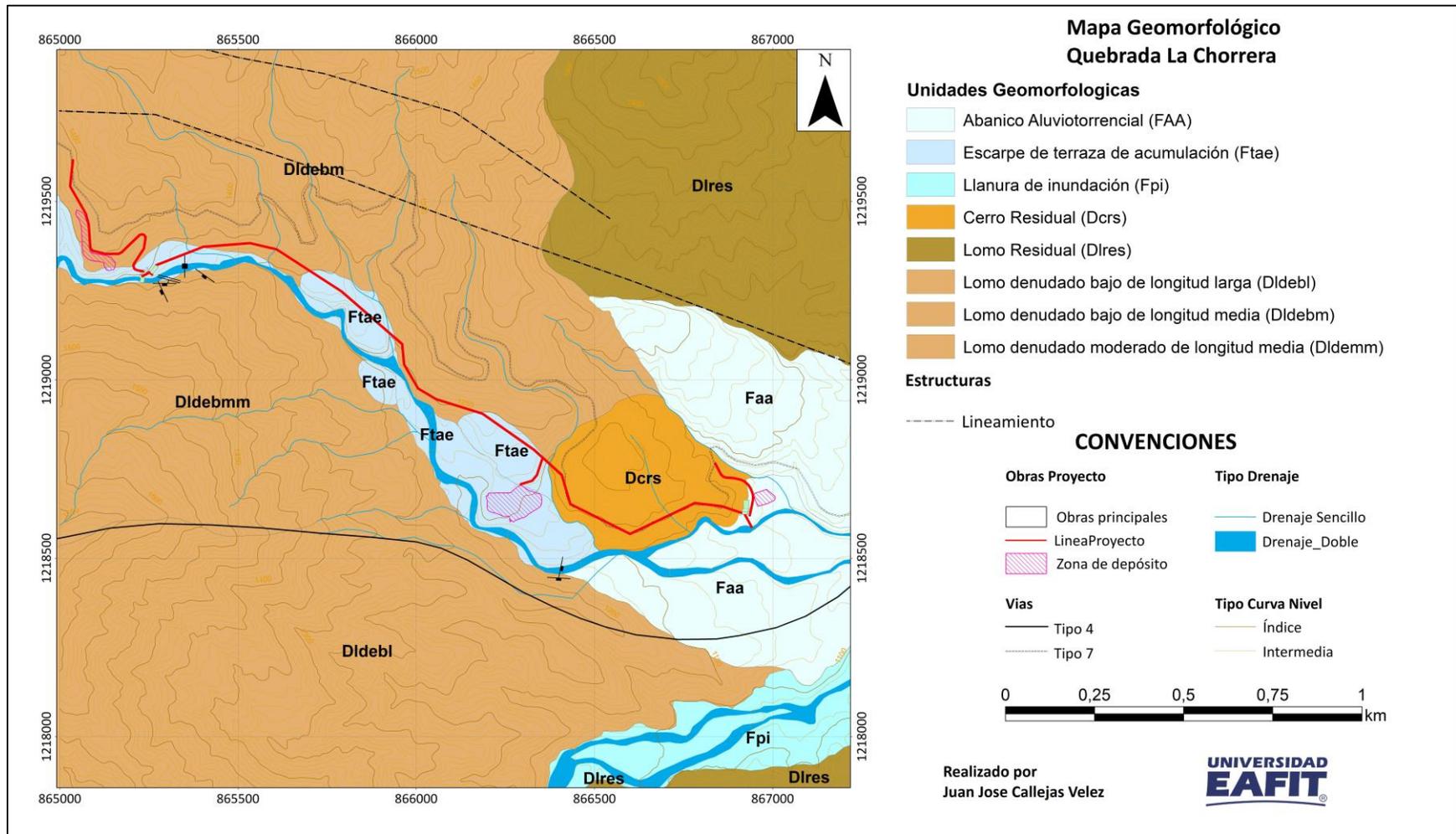


Figura 8 Mapa Geomorfológico de la zona del proyecto.

Fuente: (SGC, 2015)

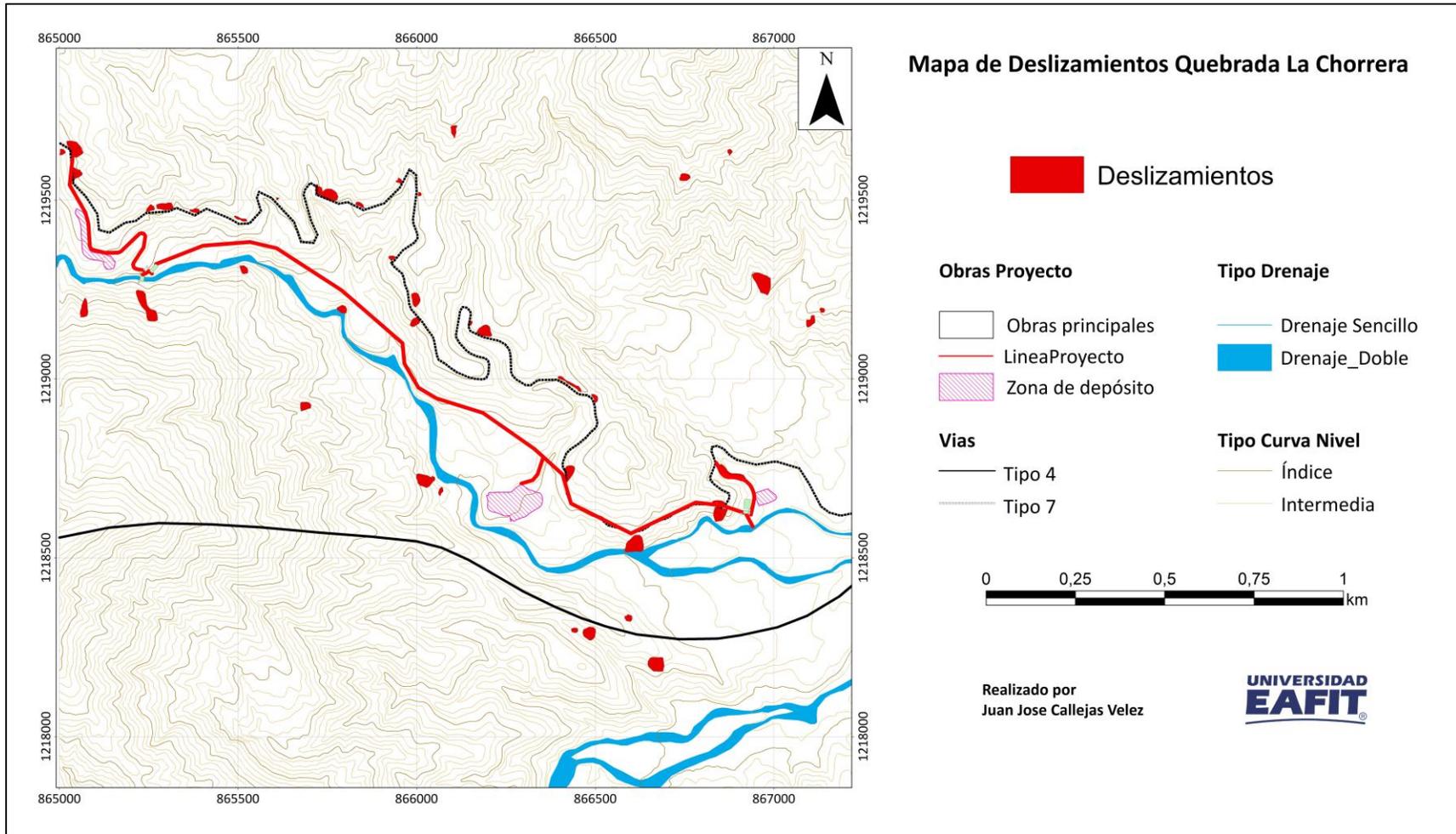


Figura 9 Mapa de los deslizamientos presentes en la zona de estudio.

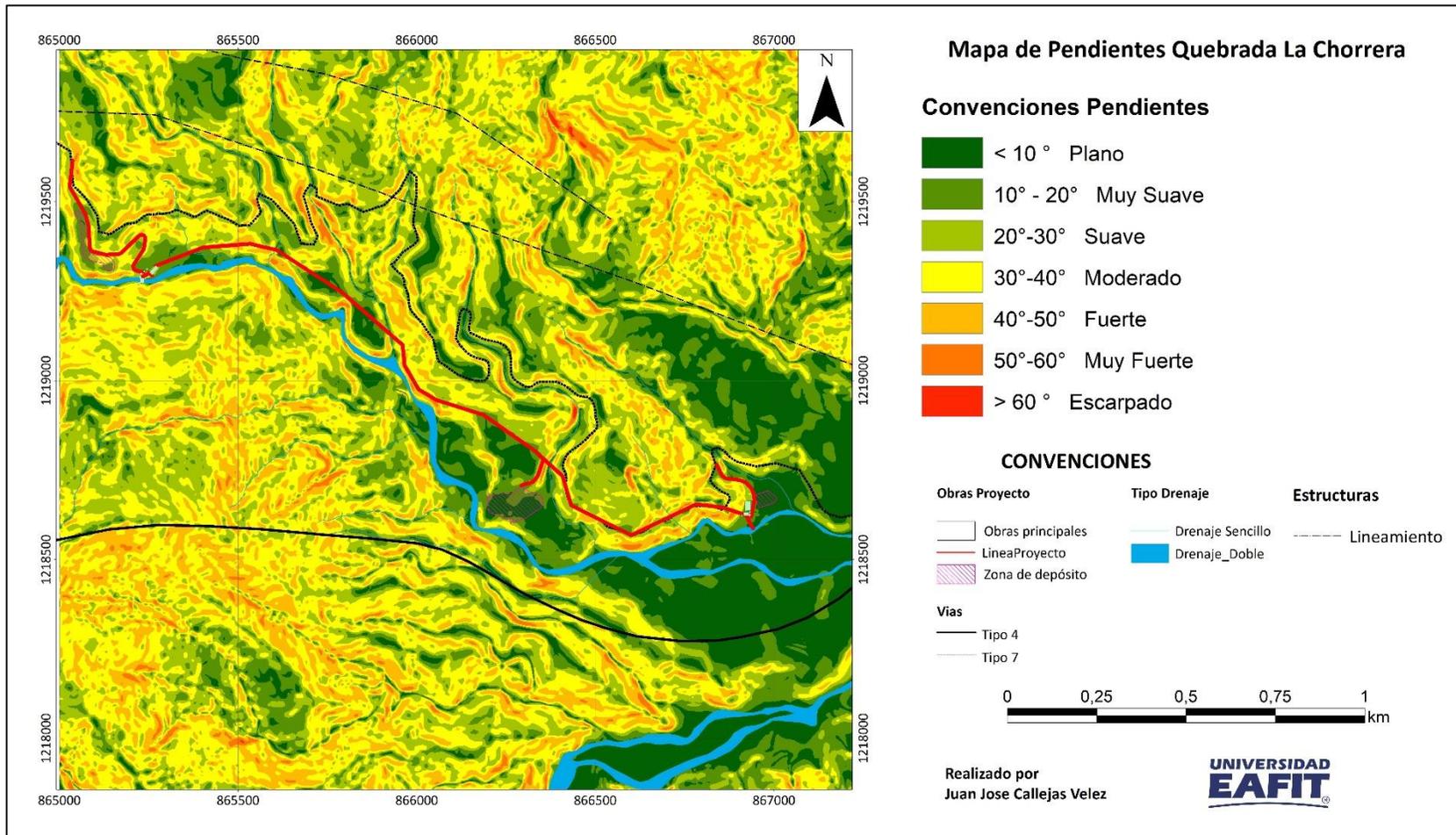


Figura 10 Mapa de pendientes de la zona del proyecto.

Tabla 5. Rangos de pendientes y presencia en el AID.

Porcentaje de pendiente		Calificación	Presencia en el área del proyecto
< 10		Plana	Media
10 – 20		Muy Suave	Baja
20 – 30		Suave	Baja
30 – 40		Moderado	Alta
40 – 50		Fuerte	Muy Alta
50 – 60		Muy Fuerte	Baja
>60		Escarpado	Media

Fuente: (Regmi, 2010)

En el AID, predominan las pendientes muy fuertes, encontrándose en la mayor parte del área del proyecto, mientras que las laderas de pendientes fuertes se encuentran en un porcentaje moderado asociado a la terminación de las subunidades de lomos; las de categorías planas y moderadas, correspondientes a zonas de acumulación y topes de lomos, tienen presencia de media a baja. Buena parte del proyecto transcurre sobre zonas de pendientes muy fuertes a fuertes.

Las pendientes están directamente relacionadas a la ocurrencia de procesos de inestabilidad y espesores de capas de suelo, en el área se observa que la mayor parte de los procesos ocurren en las zonas de pendientes muy fuertes a fuertes donde se encuentran los mayores espesores de suelos derivados del Batolito Antioqueño nivel V-saprolito y IV transición suelo roca.

8.4 Conformación de la Geotabase

La Geodatabase se estructuró los sistemas de información geográfico y se alimentó mediante la recopilación bibliográfica, análisis fotografías aéreas, ortofotos; además de una cartografía básica proporcionada por Corantioquia, de donde se extrajo información tal como, curvas de nivel, drenajes, vías, coberturas vegetales, entre otras capas necesarias para el procesamiento. La estructuración del SIG y la geodatabase se presenta en detalle en el Anexo 7 Informe SIG.

8.5 Implementación Del SIG Mediante La Zonificación De Susceptibilidad Por Movimientos En Masa Por El Método Estadístico Bivariado

El análisis de susceptibilidad por movimientos en masa puede considerarse el primer paso para la zonificación de la amenaza y evaluación de riesgo. Un mapa de susceptibilidad contiene información sobre los tipos de movimientos en masa, áreas más probables para su ocurrencia e incluso áreas posiblemente afectadas.

En estudios a escala media (1:10000 a 1:2000) y zonas donde no existe suficiente información sobre la temporalidad de los movimientos en masa, el mapa de susceptibilidad puede considerarse en sí mismo como un producto final que puede usarse directamente en la planificación territorial. (SGC, 2017)

El método estadístico bivariado descrito por (Bonham, 1994) y adaptado por él (SGC, 2017), se basa principalmente en analizar los pesos de las variables con respecto a las áreas donde se producen los eventos de inestabilidad, donde el peso de cada una de las variables se calcula a partir de una probabilidad incondicional y condicional de que un evento tipo movimiento en masa ocurra en determinada zona.

Los factores condicionantes propios del terreno utilizados en el método estadístico bivariado fueron la geología, la geomorfología y la cobertura terrestre. Además, se calcularon diferentes variables a partir del modelo digital de elevación (MDE), las cuales fueron las pendientes, la curvatura, el relieve relativo, y por ultimo las

distancias a vías, drenajes y fallas. Por último, estas variables se describieron y reclasificaron de la siguiente manera:

La Curvatura (Figura 11) determina el grado de convexidad o concavidad de la superficie en la dirección de la pendiente (longitudinal). Es considerada sólo en dos dimensiones: la vertical y la dirección de la pendiente; el valor 0 indica que la superficie es plana, valores positivos indican que la superficie es cóncava y valores negativos indican convexidad (LONDOÑO, 2006).

Las áreas predominantes son planas las cuales están asociadas a las márgenes de los ríos y zonas de depósito tanto aluvial (terrazas y llanuras de inundación) y zonas de depósitos de vertiente. Además, las zonas que de convexidad y concavidad representan más del 50% (Tabla 6) de la zona del proyecto las cuales están representadas en las laderas y valles de las geoformas.

Tabla 6. Curvatura de la zona del proyecto

Nombre	Color	Area en Ha	Area en %
Muy convexo		2	0
Convexo		136	29
Plano		203	43
Concavo		126	27
Muy Concavo		4	1

La Cobertura (Figura 12) es un resultado de la interacción de la dinámica natural geológica, geomorfológica, los suelos, el clima y sistemas de comunidades bióticas, interrumpida por el hombre para su supervivencia y desarrollo. Dicha interrupción genera o contribuye a la aparición de diferentes procesos como cambios en el patrón de ciclos hidrológicos, cambios en las formas del relieve. (SGC, 2013). Esta capa es una de las más influyentes en el terreno ya que está asociada directamente al desprendimiento de material como lo son los movimientos en masa esto es gracias a los cambios en los diferentes usos del suelo. las áreas de cada una de las capas de la cobertura se ven reflejadas en la Tabla 7.

Tabla 7. Cobertura de la zona del proyecto

Nombre	Color	Area en Ha	Area en %
Bosque natural fragmentado		41	9
Mosaico de cultivos pastos y espacios naturales		75	16
Mosaico de pastos y cultivos		33	7
Mosaico de pastos y espacios naturales		123	26
Pastos limpios		200	42
Rios (50m)		7	2

El Relieve Relativo (Figura 13) hace referencia a que representa la diferencia de altitud de la geofoma, independientemente de su altura absoluta o nivel del mar. Ella se mide por la diferencia de alturas entre la parte más baja y alta, llámese colina, montaña, meseta, terraza y otros. (INGEOMINAS, 2004). El relieve relativo que predomina en la zona del proyecto es el bajo y moderado, ya que la diferencia de las alturas de las geofomas es poco notoria y muy homogénea tal como se observa en la Tabla 8.

Tabla 8. Relieve Relativo de la zona del proyecto

Nombre	Color	Area en Ha	Area en %
Muy Bajo		149	31,6
Bajo		289	61,3
Moderado		33	7,1
Muy Alto		1	0,1

La Distancia a Drenajes (Figura 14) las quebradas y los ríos combinados con otros parámetros fisiográficos de las laderas, son factores determinantes para la generación de inestabilidades, donde el transporte de agua favorece la humidificación de los suelos, los cuales podrían ser más propensos a propiciar procesos morfodinámicos. (Regmi, 2010).

La Distancia a Fallas (Figura 15) Los lineamientos y las fallas son un factor importante en la generación de movimientos en masa, ya que, en las cercanías de los trazos de las mismas, la densidad de diaclasamiento es más alta y a su vez son un factor importante en las Inestabilidades de los suelos, debido a que la meteorización es más intensa por la penetración del agua a través de las fracturas. (Gutierrez & Naranjo, 2017). Las áreas para estos atributos están expresadas en la Tabla 9 y Tabla 10

Tabla 9. Distancia a Drenajes de la zona del proyecto

Nombre	Color	Area en Ha	Area en %
Muy cerca		44	9
Cerca		34	7
Moderadamente Cerca		99	21
Distante		157	33
Muy distante		137	29

Tabla 10. Distancia a Fallas de la zona del proyecto

Nombre	Color	Area en Ha	Area en %
Muy cerca		44	9
Cerca		34	7
Moderadamente Cerca		99	21
Distante		157	33
Muy distante		137	29

Las variables condicionales de geología, geomorfología, procesos morfodinámicos y pendientes fueron descritos y procesados con los mismos criterios propuestos anteriormente.

Posterior a la descripción de las variables y sus procesamientos del método estadístico bivariado en la zona de la quebrada La Chorrera, se debe generar un modelo temático, el cual brinde información necesaria de la distribución espacial de las zonas con susceptibilidades altas, medias y bajas; tal como lo muestra la Figura 16 Además, la distribución espacial de las zonas mencionadas anteriormente según su área se observa en la Tabla 11

Tabla 11. Zonificación de susceptibilidad por movimientos en masa tipo deslizamiento

Tipo de Zona	Color	Area en Ha	Area en %
Baja		64	14
Media		310	66
Alta		95	20

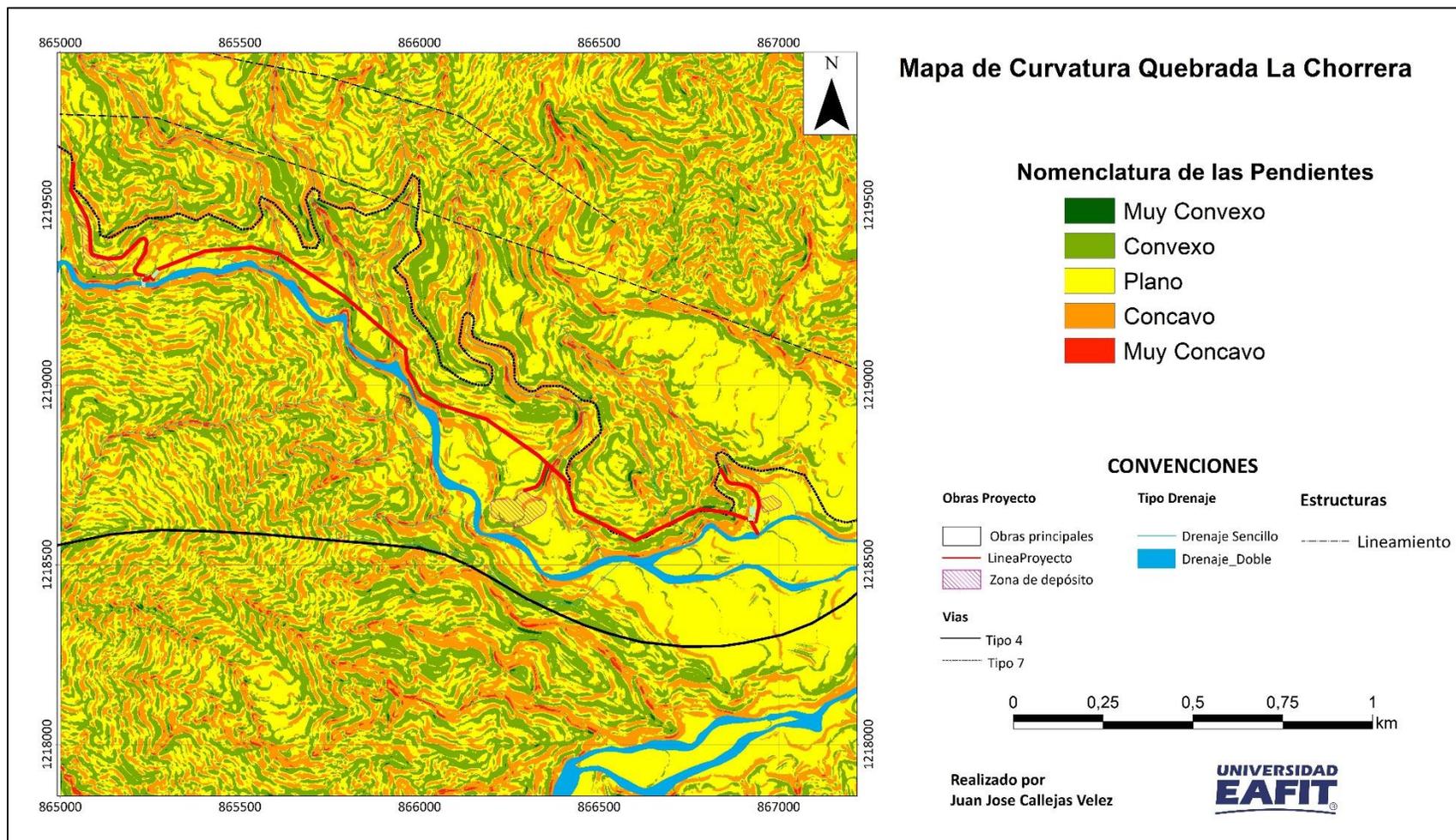


Figura 11 Mapa de Curvaturas de la zona del Proyecto

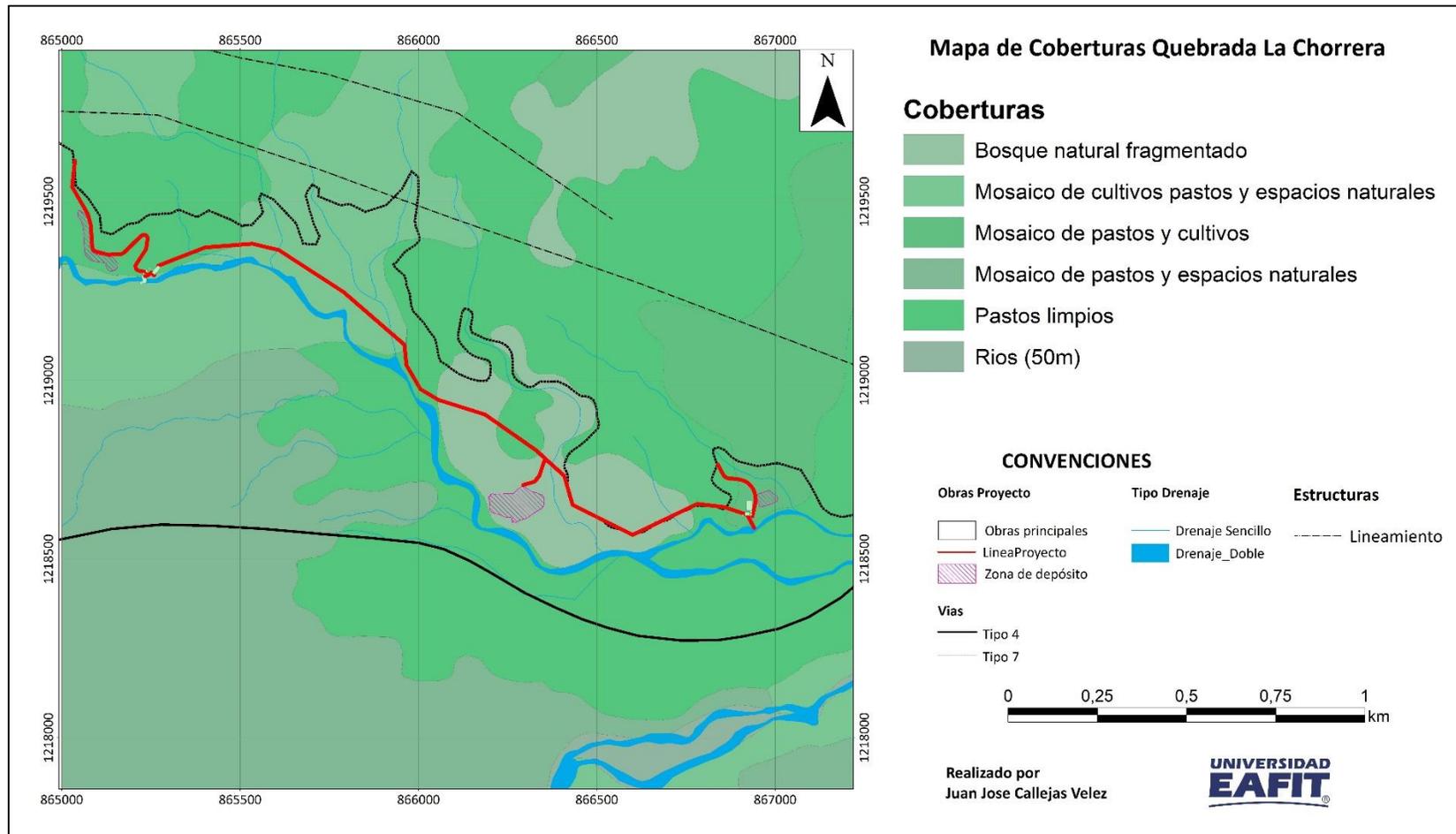


Figura 12 Mapa de Coberturas de la zona del proyecto.

Fuente: Corantioquia

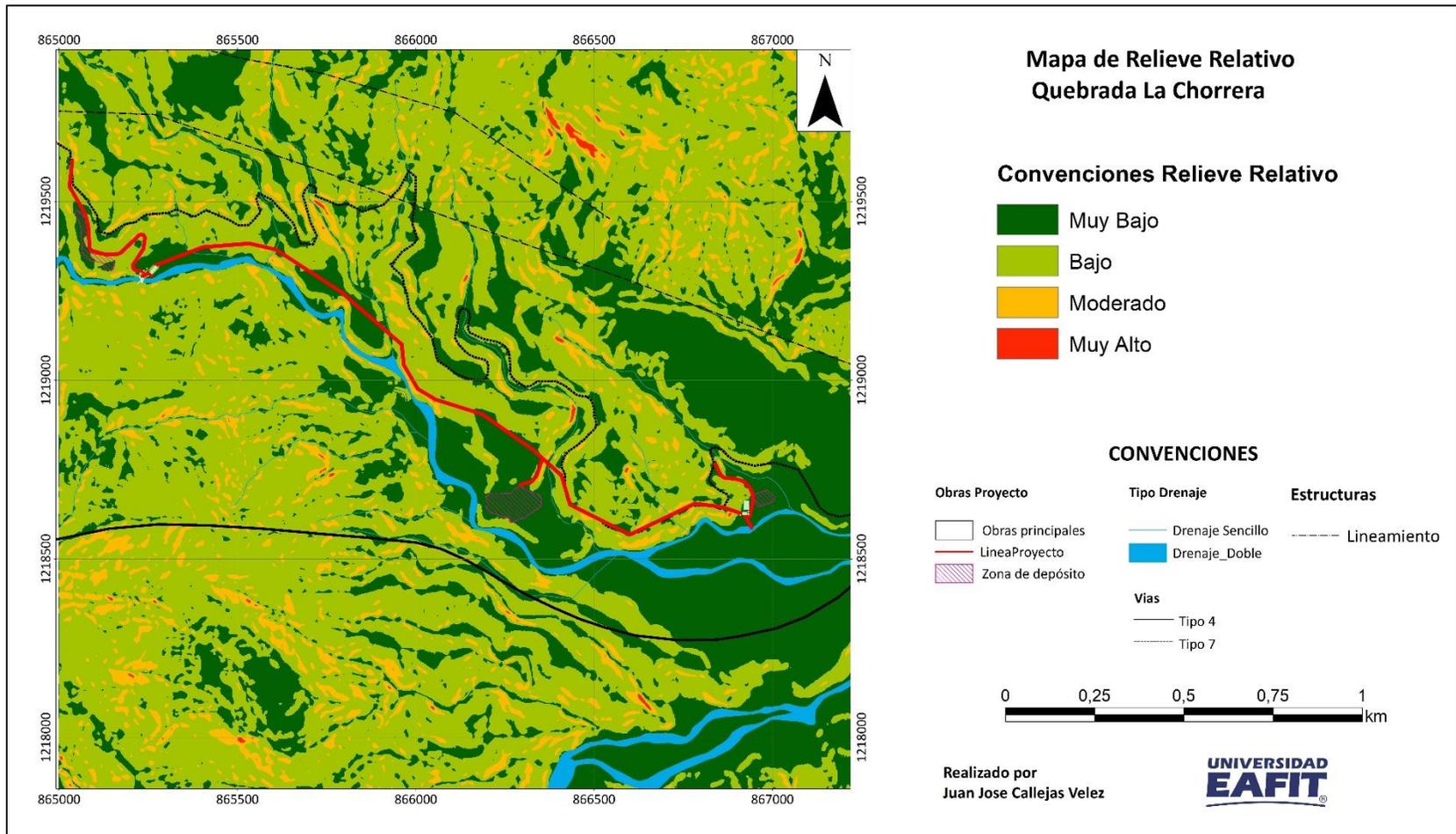


Figura 13 Mapa del Relieve Relativo de la zona del proyecto.

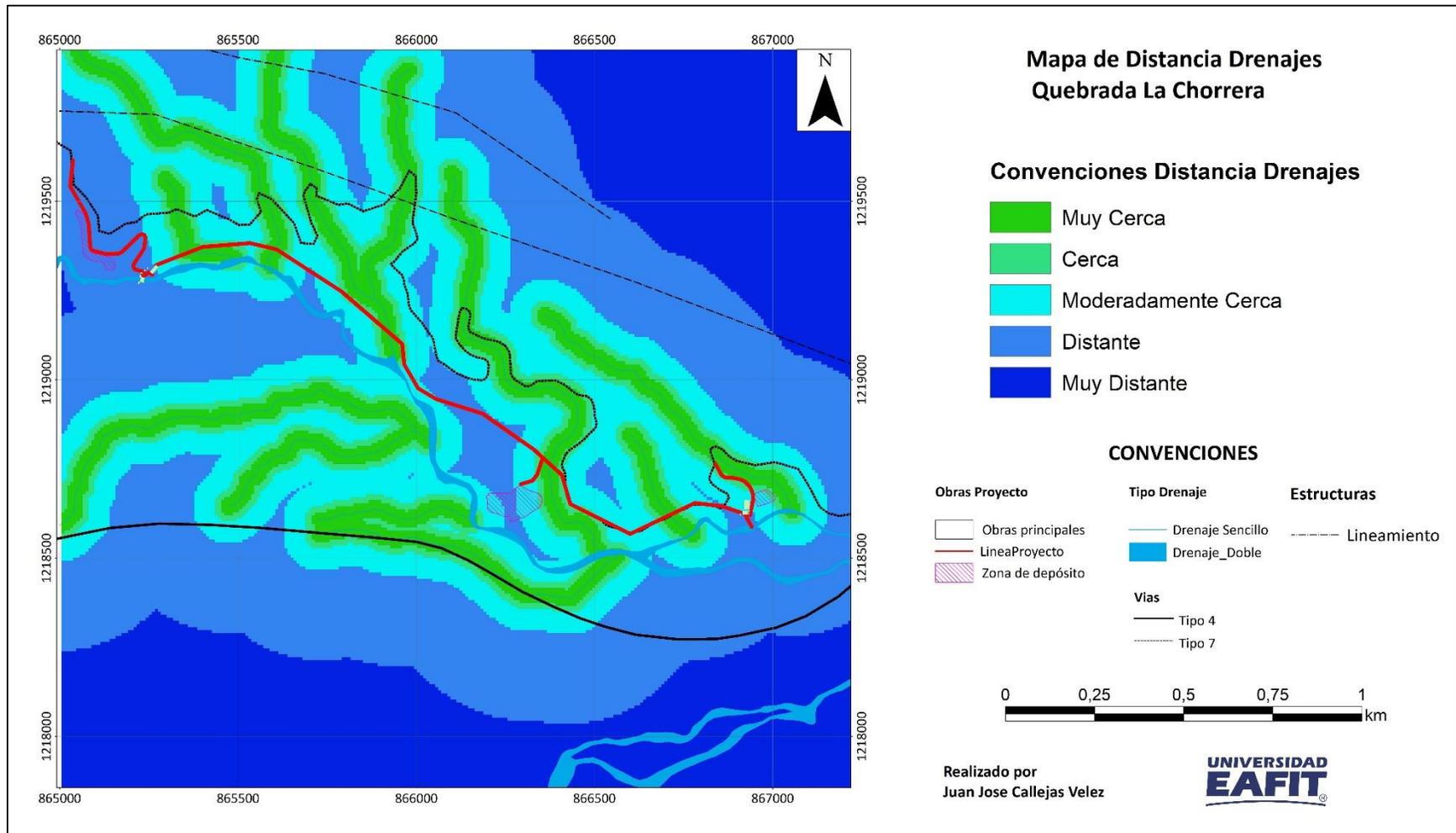


Figura 14 Mapa de las distancia a Drenajes de la zona del proyecto.

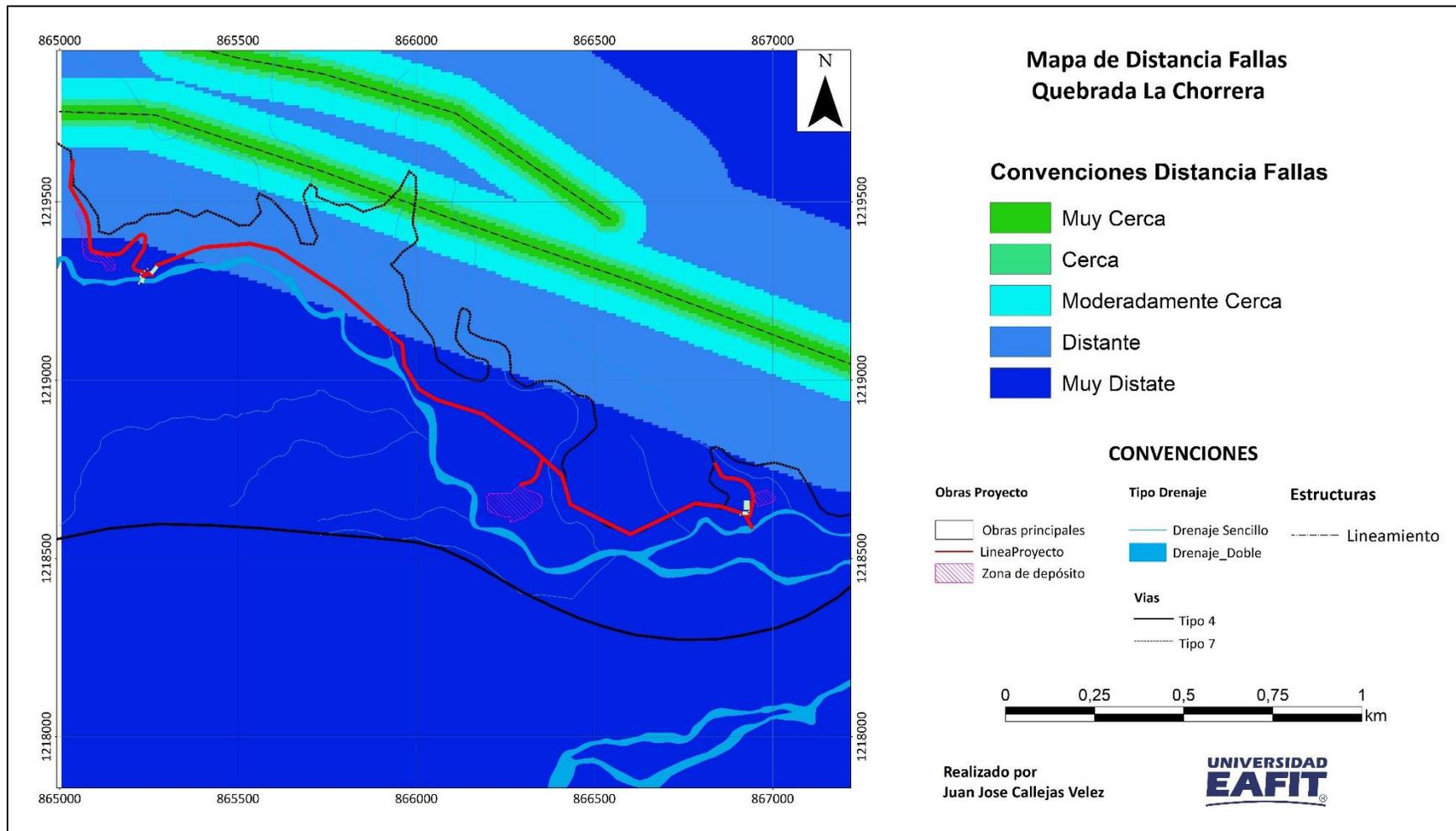


Figura 15 Mapa de las distancia a Fallas de la zona del proyecto.

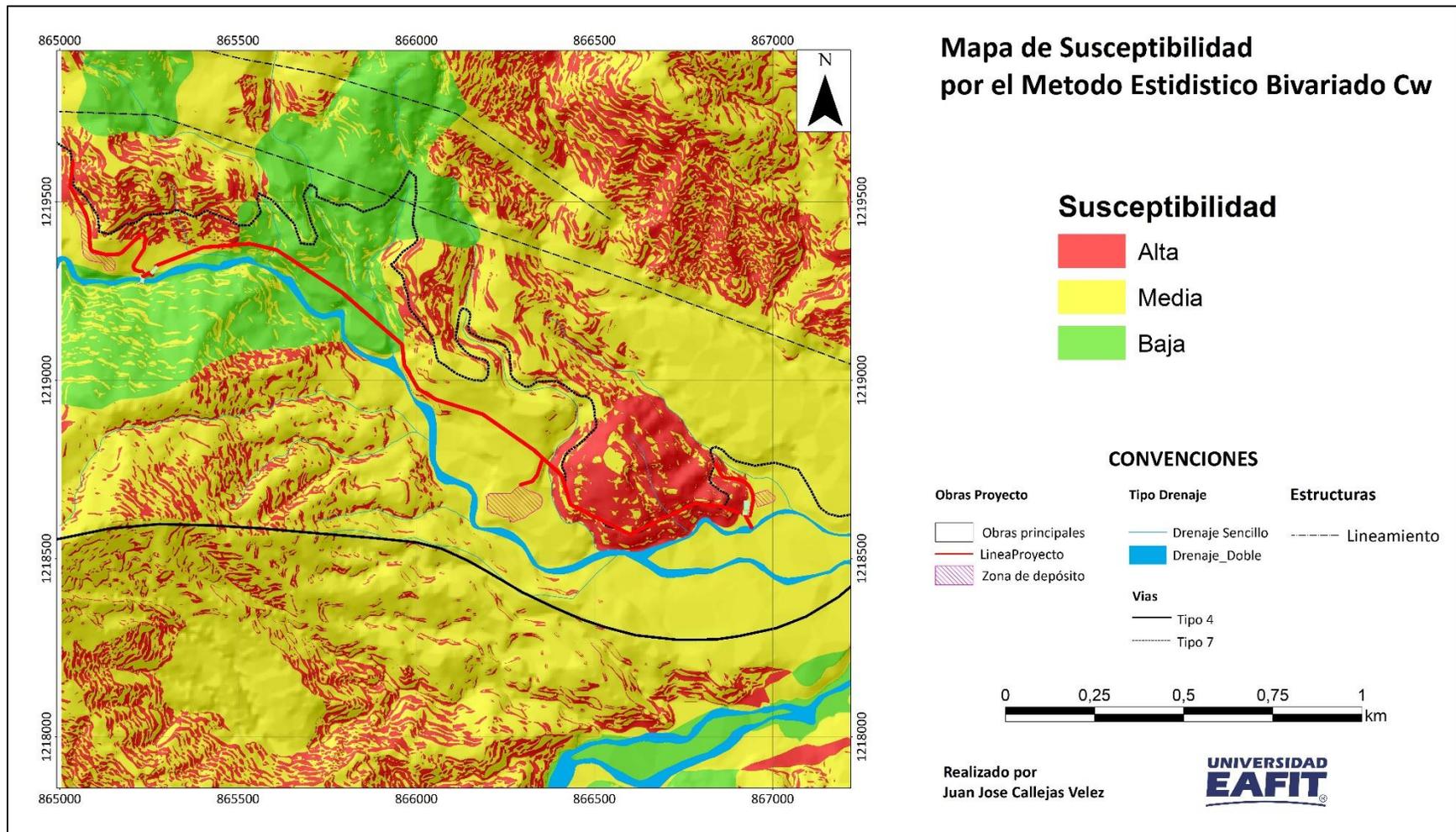


Figura 16 Mapa de Zonificación por Susceptibilidad por movimientos en masa de la quebrada La Chorrera.

8.6 Zonificación Geotécnica

A partir de los insumos anteriormente mencionados y de las metodologías implementadas, se logró realizar el modelo de zonificación geotécnica para el caso de estudio en la quebrada La Chorrera. Por otra parte, este modelo temático se llevó a cabo mediante el análisis de expertos competentes en el ámbito geológico, geomorfológico y geotécnico. Adicionalmente, se siguieron los lineamientos del Área Metropolitana del Valle de Aburrá (AMVA, 2012) para la identificación de zonas Aptas, Aptas con restricciones, Aptas con restricciones altas y Zonas no Aptas. Estas zonas fueron clasificadas en la etapa posterior a la fase de campo (Mapas geológicos, geomorfológico y de procesos morfodinámicos).

La zonificación geotécnica en el proyecto hidroeléctrico de la quebrada La Chorrera, muestra una distribución espacial de las aptitudes del terreno, donde se llevarán a cabo obras de construcción.

La sumatoria de las variables físicas del terreno obtenidas en el campo, y las variables obtenidas a partir de procesamientos de datos en SIG, con la ayuda de modelos digitales de elevación (MDE) y la unificación de diferentes metodologías para la zonificación de áreas afectadas por procesos morfodinámicos; nos llevó a la generación del modelo de zonificación geotecnia, mediante la técnica de valoración por criterio de expertos.

La zonificación geotécnica del terreno como se muestra en la Figura 17, indica que aproximadamente el 72% del área es estimada como apta para el libre desarrollo de las obras constructivas, con diverso grado de dependencia a la estabilidad de las laderas, además de un bajo nivel de intervención humana para la elaboración de obras. Por otra parte, en estas zonas del proyecto no se evidencia ocupaciones de cause ni zonas de bosque en estado de protección lo cual puedan afectar el desarrollo urbanístico de las obras del proyecto hidroeléctrico. Menos del 12% se encuentra como zonas no aptas, lo que se traduce en que el proyecto presenta una buena condición natural para ser desarrollado, pero que se deben ejecutar estudios

geotécnicos de detalle en su diseño, tales como manejo de taludes, manejo de aguas superficiales para contralar la socavación y la erosión; además de trabajos de pavimentación y manejo de las vías veredales aledañas a las obras, donde se le permitan hacer los trámites ante las autoridades ambientales competentes para la licencias de operación y funcionamiento de la pequeña central hidroeléctrica. Por último, el 16% de la zona de estudio presenta restricciones altas para la construcción de obras, esto debido a la presencia de movimiento en masa y zonas donde la estabilidad de las laderas se convierte en algo económicamente costoso. En la Tabla 12 se presenta el porcentaje de área para cada una de las zonas en función de las aptitud de estabilidad.

Tabla 12. Áreas de la zonificación geotécnica

Tipo de Zona	Color	Area en Hectareas	Porcentaje en la Zona
Zona Apta		119	25
Zona Apta con restricciones moderadas		224	47
Zonas Aptas con restricciones Altas		77	16
Zonas No Aptas		56	12

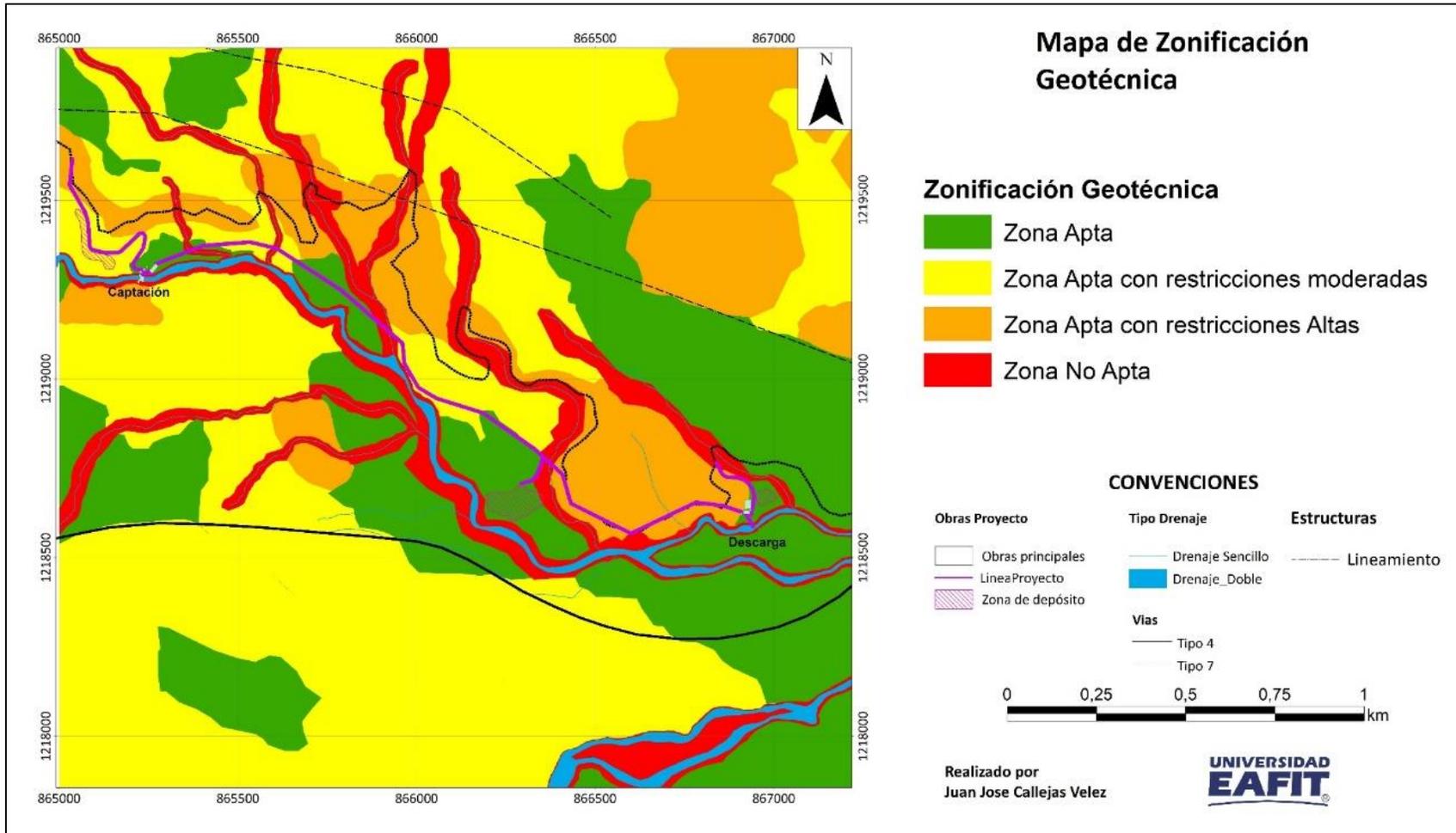


Figura 17 Mapa de Zonificación geotécnica de la zona de estudio.

9 DISCUSIÓN

La metodología utilizada en el presente trabajo, permitió identificar diferentes zonas geotécnicas y su susceptibilidad a los procesos morfodinámicos superficiales. Esto implica que, según sus aptitudes, en cada zona se identificaron claramente las limitaciones en relación al uso de los suelos, ya que, si se realizan cambios, esto se puede convertir en un factor determinante que afectará la estabilidad de las laderas subyacentes a las obras del proyecto.

La zonificación geotécnica realizada, proporcionó un análisis integrado de diversas variables (litología, relieve, usos del suelo) en la evaluación de las características naturales y antrópicas, en relación al comportamiento de la estabilidad de las laderas y zonas donde se llevarán a cabo las obras de construcción para el desarrollo de la pequeña central hidroeléctrica en la quebrada La Chorrera. Un ejemplo de esto, se evidencia a lo largo del corredor vial, ya que el cambio del uso del suelo, sumado al inadecuado manejo de la escorrentía, el poco cuidado del sistema vial veredal, el mal estado de los taludes aledaños en la vía y el factor lluvia, son los principales detonantes para la generación de movimientos en masa tipo deslizamiento.

En el escenario futuro, durante el proceso construcción del proyecto, las obras proyectadas propiciarán cambios drásticos en el uso del suelo; viéndose esto reflejado en la afectación de las zonas rivereñas aledañas a la quebrada La Chorrera (p.e. edificaciones del sistema de captación y desarenación); el corredor lineal a lo largo de las obras de conducción (p.e. tuberías); el área de la casa de máquinas (turbinas, transformadores y sistemas de producción de energía); los nuevos accesos viales y las zonas de depósito de material.

Las afectaciones a las laderas, en general pueden ser mitigables, diseñando obras de ingeniería que aseguren la estabilidad de los taludes y laderas. En general el proceso de construcción deberá estar acompañado de revegetalización, control de aguas superficiales, suavizado de la geometría y la pendiente, diseños de bermas,

y diseños de taludes según las especificaciones técnicas necesarias para cada obra (Suarez, 2009).

La Figura 18 y Figura 19, indican que la localización de las zonas de captación y de casa de máquinas, se encuentran ubicadas en una zona geotécnica apta, las cuales corresponden a zonas que presentan alto grado de estabilidad; no se aprecia la ocurrencia de procesos morfodinámicos activos e inactivos tales como socavación de márgenes y movimientos en masa que afecten la estabilidad global del predio de interés.

Por Otra parte, dos zonas de depósito fueron seleccionadas La Figura 18 y Figura 19, la zona 1 cerca a la captación y otra cerca a la casa de máquina. Especial cuidado se debe tener durante la adecuación de la zona 1, ya que se encuentra en una Zona apta con restricciones moderadas, las cuales corresponden a zonas estables dentro del predio de interés; sin embargo, su estabilidad está condicionada por la incidencia directa que presentan procesos morfodinámicos activos tales como socavación de márgenes y movimientos en masa identificados; la estabilidad global de estas zonas dependerá del manejo que se dé a los procesos morfodinámicos y al tipo de intervención que se proyecte.

En cuanto al corredor vial y la línea de la conducción, la cual llega hasta la casa de máquinas, se desarrolla en su mayoría sobre una zona apta con restricciones altas, en la cual se evidencia la ocurrencia de procesos morfodinámicos activos tales como socavación de márgenes y movimientos en masa localizados en el predio de interés. El estudio de diseño, deberá evaluar la viabilidad técnica y económica de las obras de estabilización proyectadas a lo largo de este corredor.

Finalmente, las ventajas del mapeo del análisis multicriterio que incluye la zonificación por movimiento en masa (Método Bivariado) y la opinión de los expertos propuesta por el (AMVA, 2012) permiten la caracterización de las inestabilidades del terreno en función de la obras proyectadas para la PHC. Esta herramienta tiene el potencial de optimizar las decisiones a tomar, ya que indica las zonas donde se

encuentran localizadas cada una de las obras de la PCH, en función de la aptitud de las laderas; identificándose que el tramo de mayor criticidad, estaría asociado al corredor vial y la línea del proyecto, por lo tanto, estudio de detalle en el diseño, deberá evaluar la viabilidad técnica y económica de las obras de estabilización proyectadas a lo largo de este corredor

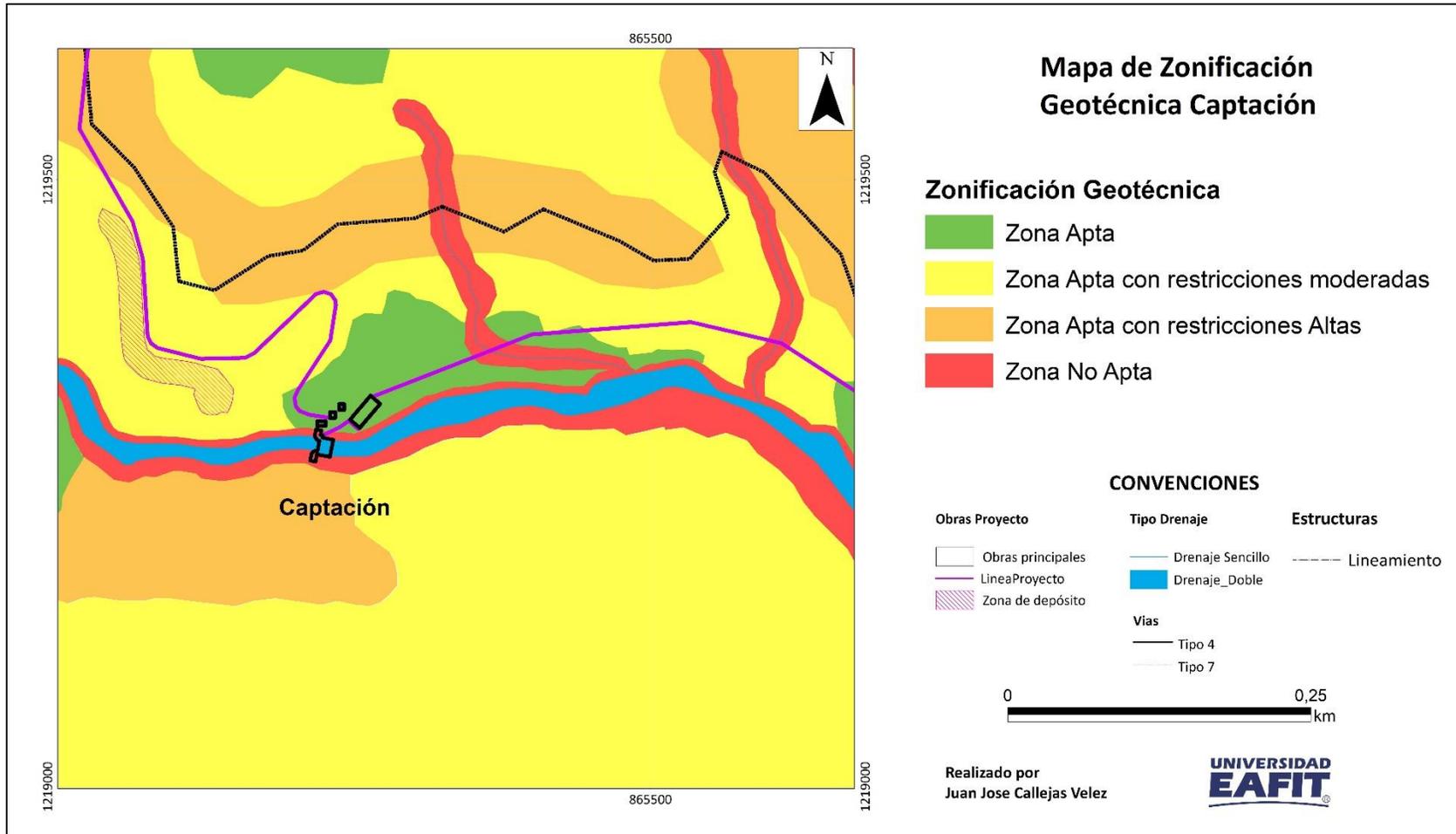


Figura 18 Mapa de la zonificación geotécnica en zona de captación.

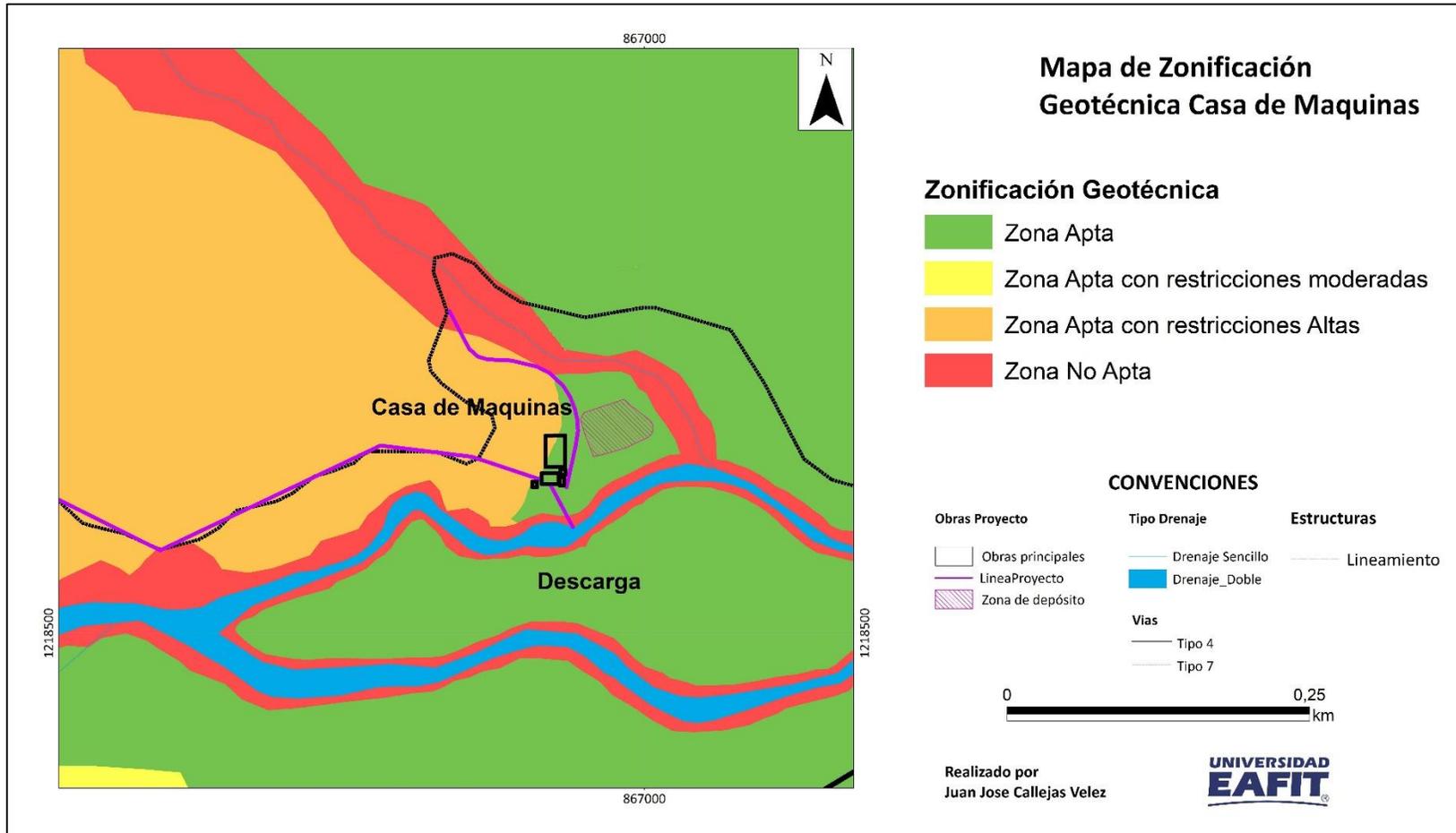


Figura 19 Mapa de la zonificación geotécnica en zona de casa de máquinas.

10 CONCLUSIONES

La metodología utilizada en el presente trabajo, permitió indicar diferentes zonas geotécnicas y su susceptibilidad a los procesos morfodinámicos superficiales. El 72% del AID, luego de los estudios, se zonificó como apta; menos del 12% como zona no apta, estas se encuentran ubicadas en las zonas de retiro de los ríos incluyendo su cauce y en lugares donde se ubiquen suelos de protección como bosques nativos y reservas naturales, ya que en estos lugares no está permitido realizar obras de ningún tipo sin autorización previa de la autoridad ambiental competente. Finalmente, el 16% de la AID presenta restricciones altas para la construcción de obras civiles.

Según lo anterior, las obras del proyecto hidroeléctrico se encuentran distribuidas espacialmente según su aptitud geotécnica, como lo son las zonas de captación y de casa de máquinas; estas se encuentran ubicadas en una zona geotécnica apta, las cuales corresponden a zonas que presentan alto grado de estabilidad. Las zonas de depósito de material se encuentran en una zona apta con restricciones moderadas, las cuales corresponden a zonas estables dentro del predio de interés y, por último, en cuanto a las zonas lineales del proyecto como lo son los corredores viales y las obras de conducción se desarrollarán en su mayoría sobre una zona apta con restricciones altas, en la cual debe ser tratada y estudiada con mayor profundidad por los profesionales encargados de los diseños.

El modelo de susceptibilidad por movimientos en masa realizado mediante el modelo estadístico, sirvió como insumo clave para el desarrollo de la zonificación geotécnica, ya que permitió identificar aquellas zonas susceptibles. Adicionalmente, el análisis multicriterio y la opinión de los expertos, permitió integrar los datos obtenidos en los recorridos de campo y los datos resultantes del procesamiento de datos, los cuales fueron consolidados en un SIG con miras a la generación del mapa de zonificación geotécnica, el cual diera cumplimiento a los lineamientos propuestos por la ANLA, como insumo base para el estudio de impacto ambiental.

Adicionalmente, se pudo determinar con esta aproximación, que el mapa de zonificación geotécnica, se convierte en una importante herramienta para la toma de decisiones respecto al proyecto en general, ya que permite entender que las modificaciones en los usos del suelo asociados o no a la construcción de la pequeña central hidroeléctrica en la quebrada La Chorrera, podrían inducir cambios en la aptitud de las laderas.

Finalmente, el presente estudio, permite identificar que en general la AID presenta buena condición natural para el desarrollo del proyecto, sin embargo, se deberán realizar estudios geotécnicos más detallados los cuales determinen el modelamiento de los taludes generados a lo largo del corredor vial y la línea de conducción.

11 BIBLIOGRAFÍA

- AMVA. (2012). Directrices Y Lineamientos Para La Elaboración De Los Estudios Geológicos Y Geomorfológicos Asociados A La Intervención De Laderas En El Valle De Aburrá. Medellín.
- ANLA. (2006). Terminos De Referencia Para La Elaboración De Estudios De Impacto Ambiental-Eia En Proyectos De Construcción Y Operación De Centrales Generadoras De Energía Hidroeléctrica. Bogotá.
- BS, B. S. (1999). Bs 5930 Code Of Practice For Site Investigations. Technical Committee B/526, Geotechnics, To Subcommittee B/526/1, Strengthened/Reinforced Soils And Other Fills. 207 P.
- Correa, C. V. (2017). Geo-Environmental Zoning Using Physiographic Compartmentalization: A Proposal For Supporting Sustainable Decision-Making.
- Gutierrez, Y., & Naranjo, X. (2017). Caracterización Y Zonificación De Susceptibilidad Por Movimientos En Masa En La Cuenca De La Quebrada La Ayurá En El Tramo Cerros Astilleros Parque Ecológico El Salado. Medellín.
- INGEOMINAS. (2004). Desarrollo Metodológico Y Estándares De La Zonificación Geomecánica Teniendo En Cuenta La Variable Edáfica. Volumen V. 24p.
- INGEOMINAS. (2011). Memoria Explicativa Del Mapa Geológico De La Plancha 131 Santa Rosa De Osos.
- IRYS. (2017). Estudio De Impacto Ambiental Del Proyecto De Aprovechamiento Hidroeléctrico De La Quebrada La Chorrera. Medellín.
- ISRM. (1981). Suggested Methods For Rock Characterization, Testing And Monitoring.

- Londoño, J. (2006). Evaluación Holística Del Riesgo Frente A Deslizamientos En Áreas Urbanas Andinas. Estudio De Caso: Manizales. Tesis De Maestría. Universidad Nacional De Colombia, Sede Manizales. 244 Pág.
- Mora, D. C., & Hurtado, J. M. (2004). Guía Para Estudios De Prefactibilidad De Pequeñas Centrales Hidroeléctricas Como Parte De Sistemas Híbridos. Bogotá.
- Morales, S. E. (2014). Stages In The Development Of A Small Hydropower Project: Context And Implementation Basic Criteria. Medellin.
- Regmi, E. A. (2010). Modeling Susceptibility To Landslides Using The Weight Of Evidence Approach. Western Colorado, Usa.
- SGC. (2013). Documento Metodológico De La Zonificación De Susceptibilidad Y Amenaza Relativa Por Movimientos En Masa. Bogota D.C.
- SGC. (2015). Propuesta Metodológica Sistemática Para La Generación De Mapa Geomorfológicos Analíticos.
- SGC. (2017). Guía Metodológica Para La Zonificación De Amenaza Por Movimientos En Masa Escala 1: 25.000. Bogotá.
- Suarez, J. (2009). Deslizamientos: Técnicas De Remediación.
- Umata. (2015). Plan Ambiental Municipal.