

GEOLOGIA DE LA SOLICITUD ODT-16361, RIONEGRO

Contribución al conocimiento geológico del área de la solicitud ODT-16361 ubicada  
en la vereda Galanes del municipio de Rionegro, Santander

Angela María Valencia Castro

Deicy Duarte Cristancho

Trabajo de Grado para Optar por el Título de Geólogo

Director

Ana Milena Cardozo Ortiz

Geóloga Magister en Ingeniería Geológica

Codirector

Hamel Roy Bello Rocha

Ingeniero en minas Magister en administración de empresas

Universidad Industrial de Santander

Facultad de Ingenierías Físicoquímicas

Escuela De Geología

Bucaramanga

2021

**Dedicatoria**

*A Dios mi fortaleza.*

*A mis padres Martin Julián y Luz Marina, mis superhéroes, por su apoyo y amor incondicional, gracias por mostrarme el camino.*

*A mi Estrella que me cuida desde arriba, te extraño cada día.*

*A Gabriel mi confidente, motivación, corazón y hasta pañuelo de lágrimas, que hermoso es el mundo contigo en él.*

*A Melissa mi hermana de otra madre, por un millón de momentos y un millón de sonrisas más, que honor tenerte en mi vida.*

*A mis amigos, compañeros, familia y todos los que me han apoyado y han compartido conmigo un trocito de este viaje.*

*Angela María Valencia Castro*

**Dedicatoria**

*A Dios por darme valor y sabiduría para cumplir mis metas*

*A mi madre Omaira Cristancho por su valentía y fortaleza sin importar los golpes de*

*la vida y lo difícil que pudo llegar a ser.*

*A mis hermanas mayores Beatriz y Elizabeth Duarte por su apoyo y por su ejemplo*

*que ha sido mi inspiración en momentos de duda*

*A José David por ser mi confidente, mi compañero de aventuras, siempre estando*

*presente en mis momentos de duda o conflictos, apoyándome y animándome.*

*A Karen V. por estar para mí siempre con una sonrisa, por su grata y cálida*

*compañía, por las cosas positivas que aporta a mi vida.*

*Finalmente, a todas aquellas personas que aportaron a su manera para que pudiera*

*cumplir una de mis mayores metas en la vida.*

**Deicy Duarte**

### **Agradecimientos**

Nuestro profundo agradecimiento a nuestra alma máter la Universidad Industrial de Santander y a la Escuela de Geología por la oportunidad de adquirir conocimiento y convertirnos en profesionales al servicio de la comunidad.

A la directora de este proyecto, la profesora Ana Milena Cardozo por brindarnos su conocimiento, guianza y apoyo en el desarrollo de este proyecto.

A la empresa CME SAS por brindarnos la oportunidad de adentrarnos en la industria minera y adquirir habilidades y conocimientos de gran valor para nuestra vida profesional que apenas comienza.

A Hamel Roy Bello por ser nuestro mentor y guía, por brindarnos su confianza y compartir con nosotras tantas enseñanzas de la industria y de la vida.

A Esteban Bello por su diligencia, compromiso, comprensión y apoyo.

Al geólogo José Javier rojas morales por su comprensión y apoyo en nuestro proceso de formación y aprendizaje.

A don Carlos, doña Aurora, Tania, don Campos, don Ángel y don Gonzalo por su hospitalidad, amabilidad y arduo trabajo para la culminación de este proyecto.

**Tabla de contenido**

Introducción.....	14
1 Planteamiento del problema .....	15
2 Justificación .....	15
3 Objetivos .....	17
3.1 Objetivo general.....	17
3.2 Objetivos específicos.....	17
4 Metodología.....	18
4.1 Inducción.....	18
4.2 Recopilación de Información Geológica.....	18
4.3 Reconocimiento de Campo.....	18
4.4 Procesamiento de Datos Obtenidos Durante las Labores de Exploración.....	19
4.5 Análisis de Resultados y Elaboración del Informe Final.....	19
5 Generalidades del área de rabajo.....	20
5.1 Delimitación Definitiva del Área de Exploración.....	20
5.2 Vías de Acceso.....	21
5.3 Clima.....	22
6 Antecedentes.....	22
7 Geología Regional.....	24
7.1 Descripción de las Unidades Presentes.....	24
7.1.1 Rocas Metamórficas.....	24
7.1.2 Rocas Sedimentarias.....	26
7.1.3 Rocas Ígneas .....	29

## GEOLOGIA DE LA SOLICITUD ODT-16361, RIONEGRO

7.2 Geología Estructural Regional.....	30
7.2.1 Sistema de fallas Bucaramanga –Santa Marta (SFB): .....	31
7.2.2 Falla de Suratá (FSU):.....	32
7.2.3 Falla del río Cucutilla (FCU):.....	32
8 Resultados .....	32
8.1 Fotogeología.....	32
8.2 Cartografía geológica de superficie.....	34
8.2.1 Litologías aflorantes.....	35
8.2.2 Marco tectónico y estructural del área de estudio.....	41
8.2.3 Geomorfología.....	44
8.2.4 Amenaza de remoción en masa.....	51
8.3 Petrografía.....	66
8.3.1 Muestra AD-118-1- Granodiorita alterada.....	66
8.3.2 Muestra AD-118-2 veta mineralizada.....	71
8.4 Alteraciones y mineralizaciones asociadas.....	75
8.4.1 Evento de Epidotización.....	78
8.4.2 Evento de Cloritización.....	79
8.4.3 Evento de muscovitización y alteración mc+qtz+rut.....	80
8.4.4 Evento de alteración Qz – Ser.....	80
8.4.5 Evento de alteración supergena.....	81
8.5 Resumen de la evolución hidrotermal de la zona.....	82
8.6 Geoquímica.....	83
8.6.1 Procesamiento geoestadístico.....	84

## GEOLOGIA DE LA SOLICITUD ODT-16361, RIONEGRO

8.6.2 Mapas de isovalores para anomalías de oro y plata.....	90
9 Conclusiones.....	92
10 Recomendaciones .....	93
Referencias.....	95

**Lista de tablas**

Tabla 1. Coordenadas del polígono de la solicitud ODT-16361.	21
Tabla 2. Área que ocupa cada una de las unidades geomorfológicas identificadas en la zona de estudio.	47
Tabla 3. Resultados de análisis de DRX para la muestra AD-118-1.	71
Tabla 4. Resultados de difracción de rayos X para la veta mineralizada muestra AD-118-2	75
Tabla 5. Resultados de concentración de oro (Au_ppm) y plata (Ag_ppm) en 27 muestras.	85

## GEOLOGIA DE LA SOLICITUD ODT-16361, RIONEGRO

**Lista de figuras**

Figura 1. Diagrama de flujo	20
Figura 2. Mapa de localización de la solicitud ODT-16361	20
Figura 3. Títulos vigentes en cercanías a la solicitud ODT-16361	22
Figura 4. Mapa de anomalías geoquímicas	23
Figura 5. Mapa geológico regional de la solicitud ODT-1636	24
Figura 6. Ortofoto RN-103 de la solicitud ODT-16361	33
Figura 7. Trazo preliminar de estructuras sobre la ortofoto RN-103 de la solicitud ODT-16361	34
Figura 8. Mapa geológico local de la solicitud ODT-16361	35
Figura 9. Afloramiento y muestra de mano	36
Figura 10. Granodiorita biotítica porfirítica de matriz fanerítica	37
Figura 11. Evidencia de epidotización en granodiorita	37
Figura 12. Dique de 36 cm de diabasa intruyendo a la granodiorita en dirección 355/83	38
Figura 13. Diques de diabasa siendo cortados por diques de tonalita	39
Figura 14. Afloramiento y muestra de mano de cuarzomonzonita	40
Figura 15. Depósito aluvial a orillas del cauce principal	41
Figura 16. Localización del área de la solicitud ODT-16361	42
Figura 17. Mapa geológico de las principales fallas dentro del polígono y alrededor	43
Figura 18. Evidencias de la cinemática normal de la falla 4	44
Figura 19. Mapa de pendientes del área de estudio	46
Figura 20. Guía de colores para los polígonos de la cartografía geomorfológica según Genesis de las geformas	46
Figura 21. Mapa geomorfológico a escala 1:25000 del área de la solicitud de legalización ODT- 16361	47
Figura 22. Expresión geomorfológica en el terreno de la unidad Sefc	48
Figura 23. Expresión geomorfológica en campo de la unidad Ses	49
Figura 24. Expresión geomorfológica de la unidad Slf junto a su perfil de elevación	50
Figura 25. Expresión geomorfológica de las facetas triangulares ubicadas al W de la falla de Bucaramanga-Santa Marta.	51

GEOLOGIA DE LA SOLICITUD ODT-16361, RIONEGRO	10
Figura 26. Clasificación litológica según Mora y Vahrson 1993	53
Figura 27. Mapa de susceptibilidad por Geología. elaboración propia	54
Figura 28. Clasificación de vulnerabilidad de pendiente	54
Figura 29. Mapa de susceptibilidad de movimientos de remoción en masa por inclinación de la pendiente	55
Figura 30. Mapa de susceptibilidad de remoción en masa por geomorfología	56
Figura 31. Mapa de tipos de suelo para el área de interés	57
Figura 32. Mapa de susceptibilidad de remoción en masa según tipos de suelo	59
Figura 33. Mapa de usos de suelo	60
Figura 34. Nivel de riesgo según el uso de suelo	60
Figura 35. Mapa de susceptibilidad por usos del suelo	61
Figura 36. Mapa de susceptibilidad de remoción en masa	62
Figura 37. Mapa de precipitación media anual.	63
Figura 38. Susceptibilidad de remoción en masa por precipitación.	63
Figura 39. Mapa de vulnerabilidad por detonante sísmico	64
Figura 40. Mapa de amenaza de remoción en masa.	65
Figura 41. Muestra de mano AD-118-1	66
Figura 42. Microfotografías de la muestra AD-118-1	67
Figura 43. Microfotografías de la muestra AD-118-1	69
Figura 44. Microfotografías de la muestra AD-118-1	70
Figura 45. Microfotografías de la sección delgada realizada a una muestra de la zona mineralizada	74
Figura 46. Afloramiento principal de la Zona B ubicado en X: 1102942E Y: 1301000N	75
Figura 47. Granodiorita que presenta una alteración sericitica baja a moderada	76
Figura 48. Granodiorita	77
Figura 49. Franja de 30 centímetros de pirita diseminada	77
Figura 50. Muestra de granodiorita	78
Figura 51. Evidencias en muestra de mano y sección delgada de epidotización	79

GEOLOGIA DE LA SOLICITUD ODT-16361, RIONEGRO	11
Figura 52. Venas de biotita alterando a clorita rellenas fracturas en la granodiorita	79
Figura 53. muscovitización y alteración mc+qtz+rut	80
Figura 54. Evento de alteración Qz – Sr	81
Figura 55. Evento de alteración supergena Zona oxidada	81
Figura 56. Mapa de la zona B con los puntos de toma de muestra para análisis de anomalías de oro y plata	84
Figura 57. Histograma de la distribución de tenores del oro (Au)	86
Figura 58. Histograma de la distribución de tenores de la plata (Ag)	86
Figura 59. Prueba de normalidad para el oro (Au)	88
Figura 60. Prueba de normalidad para la plata (Ag)	88
Figura 61. Grafica de probabilidad para el oro (Au)	89
Figura 62. Grafica de probabilidad para la plata (Ag)	89
Figura 63. Resumen de las estadísticas descriptivas de los datos transformados para oro (Au)	90
Figura 64. Resumen de las estadísticas descriptivas de los datos transformados para la plata (Ag)	90
Figura 65. Mapa de isovalores de anomalías de oro (Au) en ppm	91
Figura 66. Mapa de isovalores de anomalías de plata (Ag) en ppm	92

### Resumen

**Título:** Contribución al conocimiento geológico del área de la solicitud ODT-16361 ubicada en la vereda Galanes del municipio de Rionegro, Santander\*

**Autores:** Angela María Valencia Castro, Deicy Duarte Cristancho \*\*

**Palabras clave:** Pequeña minería, remoción en masa, alteración hidrotermal.

### Descripción

La minería en Colombia ha sido catalogada como una actividad clave para la reactivación económica del país en el marco de la pandemia de COVID-19; este sector tiene importantes retos en cuanto a la regulación de la extracción ilícita de minerales, y la tecnificación de la pequeña y mediana minería, por lo cual es preciso optimizar procesos para garantizar en mayor medida el cumplimiento de las normativas nacionales.

Este trabajo tiene como objetivo aportar al conocimiento geológico general del área, de la solicitud de legalización ODT-16361 ubicada en la vereda Galanes del municipio de Rionegro, en el departamento de Santander, por lo tanto, la información obtenida se usará para la elaboración del plan de trabajos y obras, el cual será presentada a la Agencia Nacional de Minería en el marco del proceso de formalización de las actividades mineras adelantadas en la zona.

Finalmente, por medio del trabajo de campo, procesamiento de imágenes satelitales y consulta bibliográfica, se concluye que en el área se encuentran rocas ígneas pertenecientes al batolito de Rionegro donde predomina la granodiorita de dicho batolito, la cual presenta evidencias de superposición de alteraciones hidrotermales y una concentración de oro en algunos sectores que puede llegar hasta a 70gr/ton demostrando que es un área de interés económico.

---

\* Trabajo de grado

\*\* Universidad Industrial de Santander, facultad de ingenierías fisicoquímicas, escuela de geología, directora geóloga Ana Milena Cardozo.

### Abstract

**Title:** contribution to the geological knowledge from the área of the application ODT-16361 located in the Galanes villege of the municipality of Rionegro, Santander\*

**Authors:** Angela María Valencia Castro, Deicy Duarte Cristancho \*\*

**Key words:** Small scale mining, mass removal processes, hydrothermal alteration.

### Description

Mining activities in Colombia has been classified as a key activity for the economic reactivation of the country in the framework of the COVID-19 pandemic; This sector faces important challenges in terms of the regulation of the illegal extraction of minerals, and the modernization of small and medium-sized mining, for which it is necessary to optimize processes to further guarantee compliance with national regulations.

In that order of ideas, this work aims to contribute to the general geological knowledge of the area, of the request for legalization ODT-16361 located in the village of Galanes of the municipality of Rionegro, in the department of Santander, therefore, the information obtained It will be used to prepare the works and works plan, which will be presented to the National Mining Agency within the framework of the process of formalizing the mining activities carried out in the area.

Finally, through field work, satellite image processing and bibliographic consultation, it is concluded that igneous rocks that belong to the Rionegro batholith are found in the area where granodiorite predominates, which presents evidence of superposition of hydrothermal alterations and a concentration of gold in some sectors that can reach up to 70gr / ton, showing that it is an area of economic interest.

---

\* Bachelor thesis

\*\* Universidad Industrial de Santander, Faculty of Physicochemical Engineering, School of Geology, Geologist Director Ana Milena Cardozo.

### **Introducción**

La minería a pequeña escala o pequeña minería en Colombia es una actividad que se ha desarrollado históricamente a lo largo del territorio principalmente de forma artesanal, en la actualidad este tipo de extracción mineral debe cumplir una serie de parámetros para ser formalizada, dentro de ellos se encuentra la elaboración de un plan de trabajos y obras, en el cual debe presentarse información geológica detallada de la zona de interés, así como su potencial en cuanto a recursos minerales.

Por lo tanto, El objetivo de este trabajo es aportar al conocimiento geológico del área de la solicitud ODT-16361 con el fin de que los insumos generados en los resultados puedan utilizarse como información base para la elaboración del plan de trabajos y obras que permita al titular de la solicitud realizar labores de extracción mineral bajo el amparo de la legalidad. Mediante el trabajo realizado para el desarrollo de este proyecto de grado fue posible determinar que la zona de estudio es de sumo interés no solo económico sino también académico ya que se identificaron distintos eventos hidrotermales que cuyo estudio detallado podría llevar a una mejor comprensión de los fenómenos magmáticos, hidrotermales y tectónicos que han afectado al macizo de Santander y que pueden estar relacionados con el sistema de fallas de Bucaramanga – Santa Marta.

## **1 Planteamiento del problema**

La exploración minera es un concepto definido por el Ministerio de Minas y Energía de Colombia (2015) como “ la búsqueda de depósitos minerales mediante labores realizadas para proporcionar o establecer presencia, cantidad y calidad de un depósito mineral en un área específica”. Esta etapa es fundamental ya que en ella se desarrollan estudios geológicos a partir de análisis topográficos, litológicos, estructurales, geomorfológicos, geoquímicos y geofísicos con el objetivo de determinar las características geológicas del área y de la mineralización que se pretende explotar.

Este trabajo consistirá en realizar una integración de la información geológica compuesta por datos topográficos, mineralógicos, geoquímicos y geofísicos proporcionados por la empresa CME SAS junto a información geológica consultada y material descargado de fuentes fiables con el objetivo de realizar un análisis de las características geológicas del área y el comportamiento de la mineralización en el subsuelo lo que a su vez creara una pauta para el planeamiento de las labores mineras posteriores en la zona.

## **2 Justificación**

La formalización minera es un objetivo que se alcanza paulatinamente, a medida que se desarrollan las actividades establecidas por la autoridad competente (Minenergía, 2015); el ministerio establece 3 grados de formalización minera; el grado uno que corresponde a un nivel básico de formalización, el grado 2 que corresponde a la minería formal y el grado 3 o de minería formal avanzada.

El titular de la solicitud ODT-16361 actualmente se encuentra desarrollando actividades que le permitan acceder al nivel básico de formalización, estas actividades comprenden la solicitud de un título minero (actualmente aprobada), la realización de exploración geológica de superficie (en proceso), la construcción de infraestructura que permita el desarrollo de la

## GEOLOGIA DE LA SOLICITUD ODT-16361, RIONEGRO

actividad minera y finalmente la elaboración de un Plan de trabajos y obras (PTO) que debe ser presentado ante la agencia nacional de minería.

La realización de este trabajo permitirá al titular de la solicitud tener insumos para la realización del PTO, respecto al componente geológico exigido por los términos de referencia, los cuales requieren una descripción detallada de la geología local del polígono de interés y de las actividades de exploración que se han realizado (ANM, 2018). Esto permitirá que las labores mineras en esta zona se desarrollen bajo parámetros técnicos y ambientales adecuados.

De igual manera el trabajo de formalización minera de la solicitud ODT-16361 contribuirá a la reactivación económica del país, teniendo en cuenta que el sector minero energético fue señalado como un factor estratégico en la reactivación económica nacional en el marco de la pandemia covid-19 (Vicepresidencia de la república de Colombia, 2020), ya que una vez que se obtenga un concepto positivo por parte de la ANM será posible continuar con el grado dos de formalización minera, lo que generará nuevos empleos en el municipio de Rionegro, Santander.

### **3 Objetivos**

#### **3.1 Objetivo general**

Aportar al conocimiento geológico del área de la solicitud de legalización ODT-16361 ubicada en la vereda Galanes en el municipio de Rionegro, Santander.

#### **3.2 Objetivos específicos**

- Realizar un análisis geológico superficial con base en información topográfica y de sensores remotos en la solicitud de legalización ODT-16361.
- Realizar un mapa geomorfológico y de amenaza por remoción en masa del área de la solicitud de legalización a partir de información obtenida mediante sensores remotos.
- Determinar la existencia de anomalías de oro a partir del procesamiento de datos geoquímicos en el área definida dentro de la solicitud de legalización.

## **4 Metodología**

### **4.1 Inducción**

En esta fase de la metodología la empresa CME SAS realiza una actividad de inducción, la cual consiste en definir el área de estudio y las actividades de exploración geológica a realizar dentro de la misma. Adicionalmente se realiza una inducción sobre los términos de referencia exigidos por la Agencia Nacional de Minería para la elaboración de exploración geológica en sus distintas etapas en el ámbito de la industria minera.

### **4.2 Recopilación de Información Geológica**

Durante esta etapa se realiza una recopilación de la información existente sobre el área y sus zonas aledañas en lo referente a geología y metalogenia, se realiza un análisis de imágenes satelitales obtenidas de la plataforma Earth Explorer de la NASA con la finalidad de obtener la mayor cantidad de información posible en lo referente al área de geología estructural y para tener una aproximación a los posibles contactos litológicos presentes en la zona según parámetros geomorfológicos y estructurales. Adicionalmente a partir de datos de concentración de metales preciosos proporcionados por la empresa se procede a realizar un análisis geoestadístico con la finalidad de generar mapas de isovalores para concentraciones de oro y plata.

### **4.3 Reconocimiento de Campo**

En esta fase se realiza una visita de campo al área de la solicitud ODT-16361, en la cual se hace un reconocimiento general del área para establecer puntos de interés, presencia de alteraciones hidrotermales, vetas de cuarzo y cualquier indicador que pudiera sugerir la presencia de un enriquecimiento de oro y plata en la zona.

Con base en los datos tomados en campo se definen los contactos litológicos, se comprueban las características estructurales y geomorfológicas observadas por medio de

## GEOLOGIA DE LA SOLICITUD ODT-16361, RIONEGRO

imágenes satelitales para generar los resultados finales a nivel geológico, geomorfológico y de amenazas naturales.

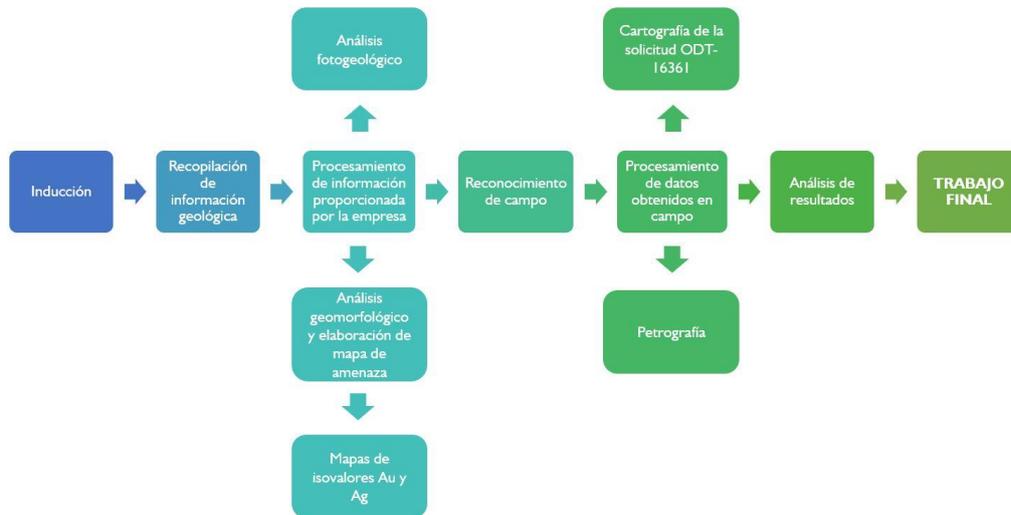
### **4.4 Procesamiento de Datos Obtenidos Durante las Labores de Exploración**

En esta etapa se realiza el procesamiento de los datos obtenidos en campo con el fin de generar resultados finales los cuales fueron un mapa geológico a detalle de la zona, un mapa geomorfológico y un mapa de amenazas naturales. Inicialmente se digitalizaron los datos obtenidos en campo y por medio del programa ArcGIS 10.5 se generaron los mapas. Para la realización del mapa geomorfológico se tuvieron en cuenta los estándares establecidos por el Servicio Geológico Colombiano en lo referente a color y nomenclatura de las unidades, del mismo modo para elaboración del mapa de amenaza de remoción en masa se tuvieron en cuenta los estándares del servicio geológico colombiano para la zonificación de este tipo de fenómenos naturales. Adicionalmente fueron elaboradas dos secciones delgadas a partir de muestras tomadas en campo de la zona mineralizada y su roca caja las cuales fueron analizadas en el laboratorio de petrografía de la universidad industrial de Santander con el fin de conocer la disposición de las distintas alteraciones hidrotermales observadas en la zona.

### **4.5 Análisis de Resultados y Elaboración del Informe Final**

En esta fase se realizó un análisis e integración de la información obtenida con el fin de tener una mayor comprensión del terreno desde el punto de vista litológico, estructural y metalogénico, clasificando cada una de las alteraciones hidrotermales observadas en el área, así como sus minerales de mena asociados. Por otro lado, se procesaron los datos estructurales obtenidos con el fin de definir la cinemática de las fallas observadas, así como las características geomorfológicas de la zona y sus niveles de vulnerabilidad y riesgo. Finalmente se llevó a cabo la elaboración del informe final.

## GEOLOGIA DE LA SOLICITUD ODT-16361, RIONEGRO

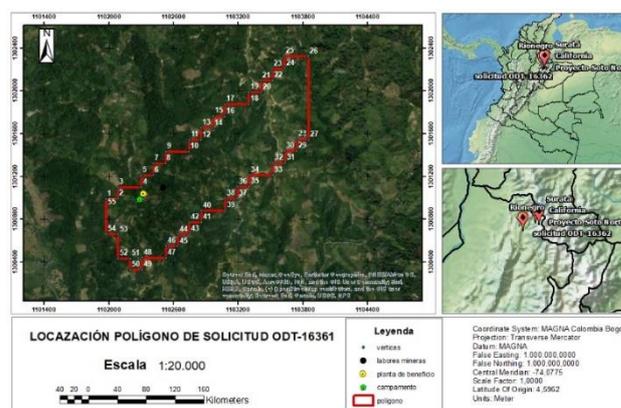
**Figura 1***Diagrama de flujo*

*Nota: donde se ilustra la metodología seguida para la elaboración del proyecto.*

## 5 Generalidades del área de trabajo

### 5.1 Delimitación Definitiva del Área de Exploración

La solicitud de legalización ODT-16361 se encuentra ubicada en el sector nororiental de Colombia en el Macizo de Santander. Localmente la zona de interés se encuentra en el municipio de Rionegro entre las veredas Galanes alto y Galanes bajo, a 5.6km al norte del casco urbano del municipio. Las coordenadas del polígono se enlistan en la Tabla 1 y la localización geográfica de la zona se observa en la Figura 2.

**Figura 2***Mapa de localización de la solicitud ODT-16361*

## GEOLOGIA DE LA SOLICITUD ODT-16361, RIONEGRO

**Tabla 1***Coordenadas del polígono de la solicitud ODT-16361*

<b>Vértice</b>	<b>X</b>	<b>Y</b>	<b>Vértice</b>	<b>X</b>	<b>Y</b>
<b>1</b>	1101974,69	1300989,05	<b>28</b>	1103740,523	1301548,907
<b>2</b>	1102085,077	1300993,196	<b>29</b>	1103743,12	1301437,246
<b>3</b>	1102086,375	1301099,664	<b>30</b>	1103630,16	1301437,246
<b>4</b>	1102305,803	1301100,963	<b>31</b>	1103634,055	1301325,584
<b>5</b>	1102303,206	1301211,326	<b>32</b>	1103523,692	1301325,584
<b>6</b>	1102414,868	1301213,923	<b>33</b>	1103521,095	1301213,923
<b>7</b>	1102414,868	1301320,391	<b>34</b>	1103300,369	1301212,624
<b>8</b>	1102523,932	1301320,391	<b>35</b>	1103300,369	1301106,156
<b>9</b>	1102529,126	1301433,35	<b>36</b>	1103190,006	1301102,261
<b>10</b>	1102744,658	1301432,052	<b>37</b>	1103192,603	1300994,495
<b>11</b>	1102748,554	1301545,012	<b>38</b>	1103080,941	1300997,092
<b>12</b>	1102851,126	1301541,117	<b>39</b>	1103082,24	1300882,833
<b>13</b>	1102855,021	1301654,077	<b>40</b>	1102858,917	1300880,237
<b>14</b>	1102966,683	1301651,48	<b>41</b>	1102857,618	1300772,47
<b>15</b>	1102967,981	1301765,738	<b>42</b>	1102748,554	1300771,172
<b>16</b>	1103073,151	1301761,843	<b>43</b>	1102748,554	1300663,406
<b>17</b>	1103075,748	1301874,803	<b>44</b>	1102643,384	1300658,212
<b>18</b>	1103296,474	1301874,803	<b>45</b>	1102639,489	1300547,849
<b>19</b>	1103296,474	1301987,763	<b>46</b>	1102529,126	1300551,744
<b>20</b>	1103412,03	1301987,763	<b>47</b>	1102529,126	1300440,083
<b>21</b>	1103408,135	1302095,529	<b>48</b>	1102307,101	1300441,381
<b>22</b>	1103521,095	1302098,126	<b>49</b>	1102308,4	1300327,123
<b>23</b>	1103515,902	1302207,19	<b>50</b>	1102198,037	1300328,421
<b>24</b>	1103628,861	1302212,384	<b>51</b>	1102198,037	1300434,889
<b>25</b>	1103624,966	1302324,045	<b>52</b>	1102087,674	1300432,292
<b>26</b>	1103846,991	1302322,747	<b>53</b>	1102087,674	1300658,212
<b>27</b>	1103853,483	1301545,012	<b>54</b>	1101974,714	1300662,107

**5.2 Vías de Acceso**

El área de estudio se localiza en la vereda Galanes del municipio de Rionegro Santander, para acceder a la zona desde Rionegro hay que tomar la vía que de este municipio conduce al Playón, hasta llegar un comercio llamada “Parador las Ávilas” en este sector se toma un camino rural que debe recorrerse a pie hasta llegar del campamento

## GEOLOGIA DE LA SOLICITUD ODT-16361, RIONEGRO

### 5.3 Clima

En la vereda Galanes según el Plan de Ordenamiento Territorial del municipio de Rionegro para el año 2003 las precipitaciones anuales se encuentran entre 660 y 2168 mm, el régimen de lluvias es bimodal con periodos de invierno entre marzo y mayo y entre septiembre y noviembre. El promedio de días con lluvia durante el invierno es entre 7 y 16 días con precipitaciones máximas de 167mm por día.

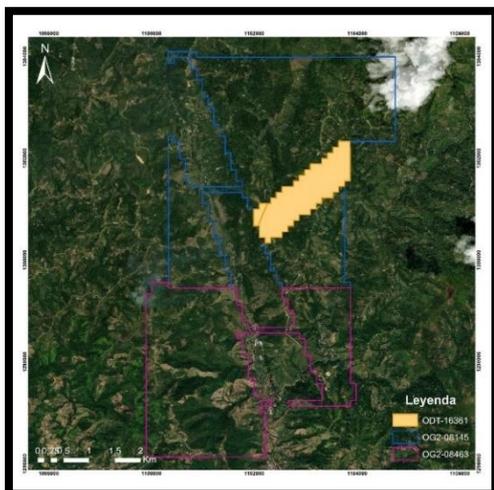
En cuanto al clima, la temperatura en la zona se encuentra entre los 11 y 24 grados centígrados, presentando variaciones según el régimen bimodal, los valores más altos se registran durante los meses de marzo a mayo y los más bajos en el mes de noviembre, en el área se estima una humedad relativa de 80%.

## 6 Antecedentes

El área de la solicitud de legalización ODT-16361 se encuentra a nombre del señor Carlos Julio Gómez desde abril del año 2013, quien durante algunos años realizó actividades de minería artesanal en el área para la extracción de oro y plata, sin embargo, no se ha llevado a cabo hasta el momento ningún tipo de estudio geológico para conocer las características de la mineralización en la zona de la solicitud.

### Figura 3

*Títulos vigentes en cercanías a la solicitud ODT-16361.*

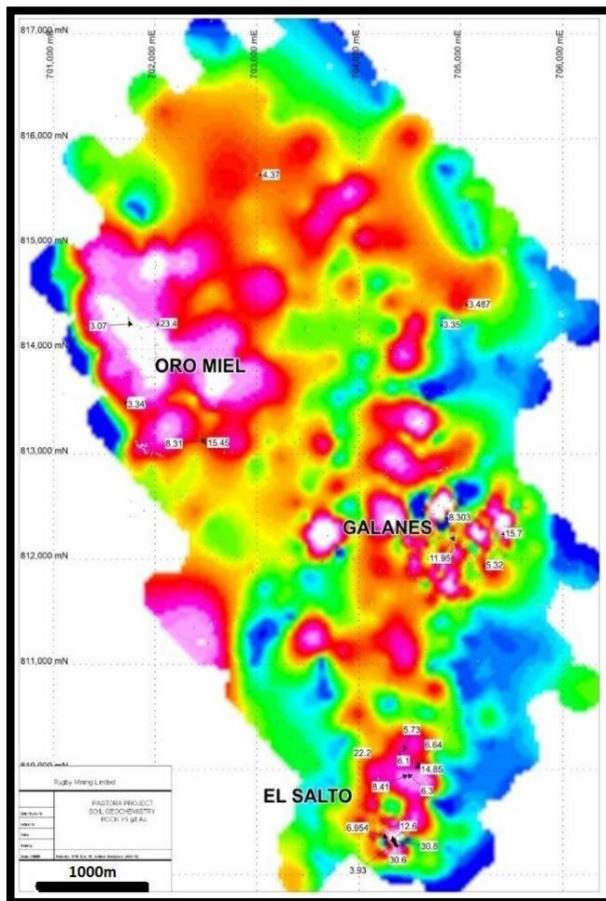


## GEOLOGIA DE LA SOLICITUD ODT-16361, RIONEGRO

En contraste, existen solicitudes aledañas a este predio que han sido sometidas a estudios geológicos entre la que se destacan los títulos OG2-08145 y OG2-08463 como se muestra en la Figura 3 que se encuentran a nombre de Sociedad Soratama, empresa que opera como filial de la minera canadiense Rugby Mining Limited desde 2016 para la exploración y explotación de metales preciosos en Colombia. Esta área denominada como Proyecto Pastora que comprende la vereda Galanes y ha sido sometida a estudios cartográficos y geoquímicos (Figura 4) que consistieron en la toma de 917 muestras de roca y 816 muestras de suelo a partir de la cual fue posible definir una anomalía de oro significativa de 7x5km (Rugby Mining Limited).

### Figura 4

#### Mapa de anomalías geoquímicas



*Nota. correspondientes al Proyecto Pastora ubicado en el municipio de Rionegro. Tomado de Rugby Mining Limited, 2016.*

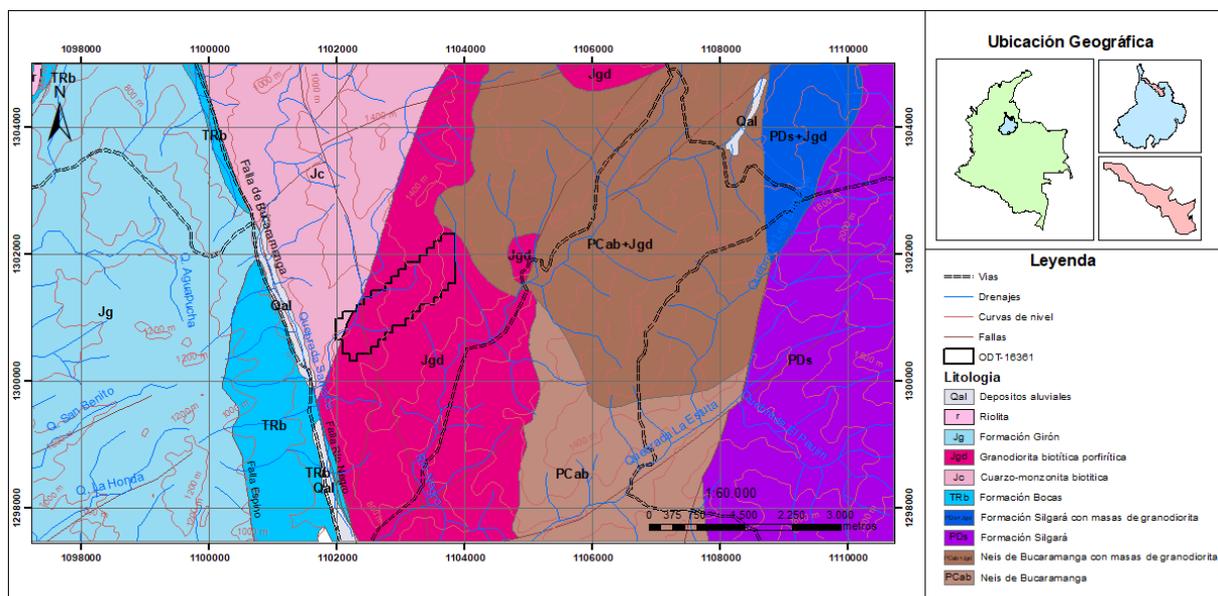
## GEOLOGIA DE LA SOLICITUD ODT-16361, RIONEGRO

## 7 Geología Regional

El área de la solicitud ODT-1636-1 se encuentra ubicada en la vereda Galanes perteneciente al municipio de Rionegro en el flanco occidental del Macizo de Santander, en el municipio afloran rocas metamórficas, ígneas y sedimentarias; dentro de las metamórficas se encuentran el Neis de Bucaramanga y la Formación Silgara del precámbrico y el predevónico respectivamente. Las rocas sedimentarias están representadas en esta área por las formaciones Diamante, Bocas, Jordán y Girón. Por otro lado, las rocas ígneas presentes en la zona datan del jurásico y están constituidas por cuarzomonzonita, granito y granodiorita siendo estas últimas las que afloran en el área de la solicitud minera como se muestra en la Figura 5.

Figura 5

Mapa geológico regional de la solicitud ODT-1636.



Nota. Tomado y modificado de Ward et al., 1973.

## 7.1 Descripción de las Unidades Presentes

## 7.1.1 Rocas Metamórficas

**7.1.1.1 Neis de Bucaramanga.** El Neis de Bucaramanga es la unidad más antigua del

## GEOLOGIA DE LA SOLICITUD ODT-16361, RIONEGRO

basamento del Macizo de Santander, siendo su origen aproximado el Proterozoico superior. Consiste en una secuencia de rocas de protolito sedimentario que presentan un alto grado de metamorfismo (Ward *et al.*, 1973). Está compuesta por una secuencia de neis cuarzo feldespático y silimanítico con niveles de neis hornbléndico, cuarcita y anfibolita (Urueña-Suarez & Zuluaga, 2011).

Esta unidad aflora en tres franjas, la más occidental se conoce como faja Bucaramanga, ubicada al este de la falla que lleva el mismo nombre, se extiende hacia el norte hasta el batolito de Rionegro con una ancha zona de contacto. La segunda faja se conoce como central, abarca los territorios de Berlín y California – Cachirí hasta el oeste de Mutiscua y finalmente la falla más pequeña del Neis de Bucaramanga conocida como faja oriental, se encuentra cerca a Chitagá hacia el este y al sur de Pamplona; en esta área el neis se encuentra en bloques fallados (Ward *et al.*, 1973).

Por otro lado, el Neis de Bucaramanga se encuentra afectado por varios eventos intrusivos que datan del Triásico - Jurásico. en cercanías al municipio de Rionegro se encuentra afectada por el batolito del mismo nombre, también ha sido intruida en otras zonas por la cuarzomonzonita de Mogotes y cuarzomonzonita de Santa Bárbara. (Urueña-Suarez & Zuluaga, 2011).

**7.1.1.2 Formación Silgará.** La formación Silgará está constituida por pizarras, filitas, meta – limolitas, meta arenisca impura, meta – waca, y meta – guaca guijarrosa. Toma su nombre de la quebrada silgará al occidente de Cáchira, donde las litologías de esta formación están bien expuestas (Ward *et al.*, 1973). Las relaciones estratigráficas sugieren que esta unidad supra yace al Neis de Bucaramanga, sin embargo, el contacto entre estas formaciones ha sido difícil de establecer por la similitud de algunas de sus litologías (Royero, Gutiérrez & Clavijo, 2001).

Recientemente la Formación Silgará ha sido dividida en 3 diferentes unidades: Esquistos

## GEOLOGIA DE LA SOLICITUD ODT-16361, RIONEGRO

del Silgará, Esquistos del Chicamocha y Filitas de San Pedro. La unidad Esquistos del Silgara está compuesta principalmente por rocas pelíticas y semipelíticas y presenta su pico de metamorfismo durante la orogenia Quetame - Caparonensis. Por otro la unidad Esquistos del Chicamocha está compuesta por metasamitas, metapelitas y metabasitas; y posiblemente litologías calco-silicatadas y presenta su pico de metamorfismo en el mismo evento que la unidad referida anteriormente, pero ambas unidades presentan diferencias litológicas que impiden unificarlas. Y finalmente las Filitas de San Pedro están conformadas por metapsamitas, metapelitas; y localmente litologías meta- volcanoclásticas, presentando su pico metamórfico durante la Orogenia Fammatiniana de edad silúrica (Mantilla-Figueroa *et al.*, 2016).

### 7.1.2 Rocas Sedimentarias

**7.1.2.1 Formación Diamante.** La Formación Diamante data del Carbonífero - Pérmico, fue definida por Ward *et al.* (1973) como la parte inferior del grupo Suratá, toma su nombre de la localidad tipo ubicada en zona de explotación de la compañía Cementos Diamante S.A, donde se extraen calizas para la elaboración de cemento. Está conformada por una secuencia de arenisca gris purpura en su parte inferior, en la zona media está conformada por lodolita gris oscura e intercalaciones de caliza grisácea y en su parte superior se encuentran calizas también de color gris, ligeramente arcillosas con intercalaciones delgadas de arcillolitas y areniscas grises a rojas (Royero Gutiérrez & Clavijo, 2001).

De acuerdo con los fósiles y las facies identificadas en la formación se concluyó que esta se formó en un ambiente epicontinental, cuenta con un espesor a aproximado de 550m de los cuales 440 fueron medidos en la localidad tipo; 139m corresponden a las areniscas de la parte basal descritas anteriormente, por otro lado, la parte media de la formación tiene un espesor de 97m y la parte superior tiene cerca de 204m (Ward *et al.*, 1973).

## GEOLOGIA DE LA SOLICITUD ODT-16361, RIONEGRO

**7.1.2.2 Formación Bocas.** La Formación Bocas está conformada una alternancia de limolitas, areniscas y arcillolitas calcáreas, gris verdosas y gris oscuras, limolitas gris verdosas, con nódulos calcáreos, conglomerados gris verdosos y arcillolitas gris oscuras, fosilíferas, limolitas gris verdosas a rojo grisáceas, levemente calcáreas, se depositó en un ambiente continental y cuenta con un espesor de aproximadamente 50m (Royero Gutiérrez & Clavijo, 2001).

El límite inferior de la formación Bocas y la formación Diamante (infrayacente) es aparentemente normal, mientras que el contacto con la Formación Jordán que suprayace a la Formación Bocas es transicional, con un cambio notorio entre los estratos gris verdosos de Bocas y los de color marrón rojizo de Jordán (Ward *et al.*, 1973).

**7.1.2.3 Formación Jordán.** La sección tipo de esta formación fue establecida por Cediél (1968) en la zona norte del cañón del río Chicamocha en inmediaciones del municipio de Jordán, en el departamento de Santander. Está conformada por areniscas gris verdosas, de grano grueso a muy grueso, presenta estratificación cruzada con intercalaciones de arcillolitas de color gris verdoso. En la parte superior se observan intercalaciones de limolitas marrón rojizas y areniscas de grano fino, su ambiente de depositación es continental volcanoclástico y su espesor varía entre 300 y 660m (Royero Gutiérrez & Clavijo, 2001).

Esta formación infrayace a las formaciones Girón y Los Santos en contacto discordante y se encuentra en contacto concordante en la base con la formación Bocas. Su edad ha sido establecida como jurásico inferior a medio teniendo en cuenta relaciones estratigráficas (Royero Gutiérrez & Clavijo, 2001).

**7.1.2.4 Formación Girón.** Cediél describe lo que él denomina el Grupo Girón como una serie de areniscas ligeramente conglomeráticas con intercalaciones periódicas de limolitas y arcillolitas rojas que suprayacen las formaciones Bocas o Jordán en discordancia angular y sobre este grupo se encuentran concordantemente y sin discontinuidades una sucesión de

## GEOLOGIA DE LA SOLICITUD ODT-16361, RIONEGRO

calizas oscuras pertenecientes a la formación Rosablanca del cretácico inferior (Cediel, 1968).

Esta formación está conformada principalmente por areniscas de grano medio, grueso y ligeramente conglomerático, se caracteriza por tener una coloración rojiza, violácea a grisácea. Presenta estratificación cruzada en capas gruesas con interestratificación de limolitas y lodolitas, además se evidencian algunos niveles de conglomerado con guijos de cuarzo de hasta 4cm, su espesor tomado en su localidad tipo en el río Lebrija es de unos 4650m; esta formación se depositó en un ambiente fluvial a lacustre-fluviátil. (Royero Gutiérrez & Clavijo, 2001).

La formación Girón se divide según Cediel en 7 facies que no llegan al rango estratigráfico de formaciones o miembros (Cediel, 1968):

- Facie A que consiste en arenisca de grano grueso, compacta, con estratificación entrecruzada en unidades de hasta dos metros de espesor con coloración gris clara a semiclara.
- Facie B formada por una interestratificación de areniscas de grano medio a grueso con red beds.
- Facie C: Areniscas de grano medio a grueso en cuerpos de estratificación entrecruzada de hasta 2,5m de espesor, presentan frecuentemente lechos de conglomerados de cuarzo con cantos de hasta 4cm de diámetro, esta facie presenta una coloración entre gris verdosa y gris oliva claro.
- Facie D: Capas rojas de limolita y arenisca con interestratificación de hasta 1m de espesor.
- Facie E: Arenisca de grano medio en capas de 70 cm de potencia, con un color gris azulado.
- Facie F: Areniscas gris verdosas, limolitas y arcillolitas interestratificadas de coloración rojiza.
- Facie G: Arenisca de grano grueso con estratificación cruzada, también se observan capas conglomeráticas y aumentan en la parte superior, los colores varían de gris verdoso en la base a gris amarillento y amarillo grisáceo en la parte superior

## GEOLOGIA DE LA SOLICITUD ODT-16361, RIONEGRO

**7.1.3 Rocas Ígneas**

La historia magmática del Macizo de Santander puede resumirse en la ocurrencia de 5 pulsos magmáticos sin contar los responsables del metamorfismo presente en la zona; el primer evento magmático sería el causante de una intrusión de fluidos de composición granítica con una edad K-Ar de 461 Ma aproximadamente. El segundo evento magmático granítico es señalado como causante de la formación de la monzonita de Onzaga con una edad aproximada de 394 Ma. El tercer evento magmático de unos 210 Ma aproximadamente está relacionado con la formación de los Batolitos de Mogotes, Rionegro y los plutones del Páramo Rico, Santa Bárbara y Pescadero (Mantilla *et al.*, 2009).

El cuarto evento magmático dio lugar a la formación de diques de composición riolítica y diabásica durante el cretácico inferior con una edad aproximada de 127 Ma. Y finalmente un quinto evento magmático con una edad aproximada de 55 Ma. De acuerdo con estudios realizados por Mantilla *et al.*, (2009) es posible identificar dentro de la historia magmática de Santander un pulso del mioceno con una edad de 8,4 a 9,0 Ma que se encuentra representado en forma de diques de 1m de espesor, sin embargo, se recomiendan más estudios al respecto (Mantilla *et al.*, 2009).

Las rocas ígneas que se encuentran en el municipio de Rionegro hacen parte del grupo plutónico de Santander, más específicamente del batolito de Rionegro. Están compuestas principalmente por cuarzomonzonita, granito y granodiorita, se encuentran al este de la falla de Bucaramanga. (Ward *et al.*, 1973)

**7.1.3.1 Granodiorita y tonalita Jgd.** Estas rocas afloran al nororiente de Santander y conforman el Batolito de Rionegro y el Plutón tonalítico del Páramo Rico. Se caracteriza por una coloración grisácea, granulometría de media a gruesa. En las inmediaciones del municipio de Rionegro esta unidad está compuesta por granodiorita gris, porfirítica con abundantes xenolitos del Neis de Bucaramanga (Ward *et al.*, 1973). Hacia la parte NE se

## GEOLOGIA DE LA SOLICITUD ODT-16361, RIONEGRO

encuentra en contacto con cuarzomonzonita y hacia la parte SE con el neis de Bucaramanga.

**7.1.3.2 Cuarzomonzonita Jc.** Estas rocas afloran al nororiente y suroriente del departamento de Santander, su composición es principalmente cuarzomonzonita con variaciones a granito y granodiorita en ciertos sectores (Royero Gutiérrez & Clavijo, 2001). Se caracteriza por una coloración rosada a gris clara, es equigranular, biotítica, de grano medio. Presenta fenocristales de feldespatos potásicos de color rosado y también de plagioclasa en algunas zonas (Ward *et al.*, 1973). La cuarzomonzonita del Batolito de Rionegro es menos rosada y más biotítica que la de otros batolitos del grupo plutónico de Santander.

**7.1.3.3 Rocas dique.** En el Batolito de Rionegro se distinguen diques félsicos, máficos, lamprofiros, dacíticos así como diques de basalto y diabasa, en su mayoría no alcanzan el tamaño necesario para ser cartografiados en los mapas geológicos (Ward *et al.*, 1973). Los diques félsicos van de pórfido riolítico y los diques máficos se caracterizan por presentar una coloración grisácea a verde oscuro, su tamaño de grano es equigranular y en algunas ocasiones presentan textura porfirítica, se encuentran con frecuencia intruyendo la granodiorita del batolito de Rionegro (Ward *et al.*, 1973).

Los diques lamprofiros se caracterizan por la presencia de fenocristales de hornblenda y se encuentran comúnmente en los batolitos de Mogotes y Rionegro. Por otro lado, los diques dacíticos son comunes en el distrito minero de Vetas- California, son de color gris, textura afanítica, grano fino y con presencia de fenocristales de plagioclasa. Los diques de composición diabásica y basáltica se encuentran comúnmente alterados, siendo los principales productos de alteración clorita, óxido de hierro, calcita y epidota (Ward *et al.*, 1973).

## 7.2 Geología Estructural Regional

El área de interés se encuentra en el Macizo de Santander en la provincia tectónica de Ocaña y en la región estructural oriental; se caracteriza por un estilo estructural de fallamiento

## GEOLOGIA DE LA SOLICITUD ODT-16361, RIONEGRO

en bloques delimitado por la presencia de fallas en dirección N-S a NE, en esta región se destacan los sistemas de fallas de Suratá (FSU), Cucutilla (FCU), sistema del río Umpalá (FRU), sistema del río Perchiques (FRP), sistema de Servitá (FSE) y el sistema de fallas Bucaramanga Santa Marta (FSB). (Royero Gutiérrez & Clavijo, 2001). Los sistemas de fallas más cercanos al área de interés y que por lo tanto tendrían mayor impacto en su geología son los sistemas FSU, FSB Y FCU, por lo que serán descritos a continuación.

### **7.2.1 Sistema de fallas Bucaramanga –Santa Marta (SFB):**

El sistema de fallas Bucaramanga – Santa Marta es definido como un accidente tectónico en el bloque Norandino, con un movimiento sinistral en sentido N15°E, que se extiende unos 600Km desde el borde occidental de la sierra nevada de santa marta hasta el límite occidental del macizo de Santander, con una edad entre el paleógeno y el neógeno (Velandia & Villamizar, 2014).

Este sistema de fallas se compone de 3 segmentos principales dispuestos de forma escalonada; un segmento en el norte, uno central y uno al sur. El segmento Norte del sistema está constituido por la falla Santa Marta que define el borde occidental de la sierra nevada del mismo nombre. El segmento central atraviesa depósitos aluviales de los ríos Magdalena y Cesar donde se oculta para luego reaparecer hacia el sur donde se conoce como la falla Boloazul y finalmente el segmento sur está constituido por la falla Bucaramanga responsable del levantamiento del macizo de Santander (Diederix et al., 2009)

La falla de Bucaramanga tiene una expresión geomorfológica bastante clara hasta el municipio de Piedecuesta, donde como se mencionó anteriormente resulta cubierta por depósitos cuaternarios, sin embargo, presenta indicios geomorfológicos de su presencia como lomos de obturación, drenajes desplazados, facetas triangulares, sillars de falla y lomos de presión. El desplazamiento de esta falla es mejor a 45km ya que es amortiguado por fallas inversas de bajo ángulo como lo son las fallas de Boyacá y Soapagá. El desplazamiento

## GEOLOGIA DE LA SOLICITUD ODT-16361, RIONEGRO

en lateral izquierdo de la falla de Bucaramanga está asociado con el desplazamiento del bloque Maracaibo en sentido NW debido a la relación entre las placas suramericana y caribe (Velandia & Villamizar, 2014).

### **7.2.2 Falla de Suratá (FSU):**

La falla de Suratá es una falla inversa de alto con ángulo, su plano de falla buza al NW y presenta un rumbo predominante de N15°E, su trazo sigue el curso del río Suratá y se prolonga en el departamento de norte de Santander donde es conocida como falla de Gramalote (Nolasco, 2017). La falla de Suratá tiene una historia de movimiento cretácico y pre cretácico siendo opuestos entre sí, cerca del municipio del mismo nombre el movimiento vertical de la falla se estima en aproximadamente 2100m (Ward *et al.*, 1973).

### **7.2.3 Falla del río Cucutilla (FCU):**

La falla del río Cucutilla presenta ramificaciones, el ramal principal se dirige hacia el río Vetas y el Páramo Rico donde se cruza con la falla de Charta, otra de sus ramificaciones puede conectar con una falla inferida a lo largo del río La Baja, el desplazamiento de esta falla es indeterminado ya que la litología no permite observarlo con facilidad (Ward *et al.*, 1973).

## **8 Resultados**

### **8.1 Fotogeología**

En esta etapa del proyecto se realizó un análisis mediante el uso de la ortofoto RN-103 (Figura 6) provista por la empresa CME S.A.S. la cual consiste en una fotografía con una escala constante en la que los objetos ocupan sus posiciones horizontales reales y posee propiedades de una proyección ortogonal, lo que proporciona una detallada representación de la superficie terrestre. Adicionalmente a partir de curvas de nivel cada metro que fueron proporcionadas por la empresa que se obtuvieron a partir del levantamiento topográfico realizado en julio de 2020

## GEOLOGIA DE LA SOLICITUD ODT-16361, RIONEGRO

se elaboró un modelo de elevación digital DEM a partir del cual es posible evaluar las características morfológicas del relieve y los elementos y objetos presentes en él.

### Figura 6

*Ortofoto RN-103 de la solicitud ODT-16361*



El método utilizado para la obtención de estos datos es el levantamiento topográfico mediante vuelo de dron, ya permite una mayor facilidad a la hora de levantar datos topográficos en terrenos escarpados o de difícil acceso optimizando el tiempo requerido para dichas labores. Para el levantamiento de la información topográfica del área inicialmente se realizó un reconocimiento del terreno, se definieron puntos de foto control y se realizó el diseño del vuelo con sus respectivas líneas a fin de obtener un ortomosaico el cual consiste en un conjunto de imágenes traslapadas que son combinadas en una sola.

Para la generación de ortomosaicos las imágenes individuales son rectificadas a partir de modelos de elevación para eliminar la distorsión asociada al relieve; la técnica empleada para la obtención del modelo digital de elevación es la fotogrametría la cual puede definirse como la técnica para obtener información cuantitativa y cualitativa válida a partir de

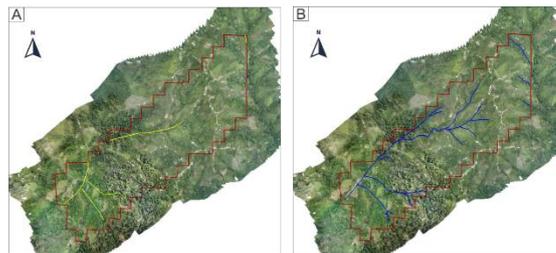
## GEOLOGIA DE LA SOLICITUD ODT-16361, RIONEGRO

fotografías. se divide en métrica e interpretativa, siendo la primera de especial interés en topografía.

Estas herramientas fueron usadas antes de salir a campo con el objetivo de tener una mejor idea de los rasgos geológicos principales de las unidades que conforman el área ya que su morfología es un reflejo directo de su naturaleza y de los procesos a los cuales han estado expuestos. De igual forma este análisis permite evaluar otras características como vías de acceso y rasgos más detallados como el tipo de vegetación en el área gracias a su detallada resolución.

### Figura 7

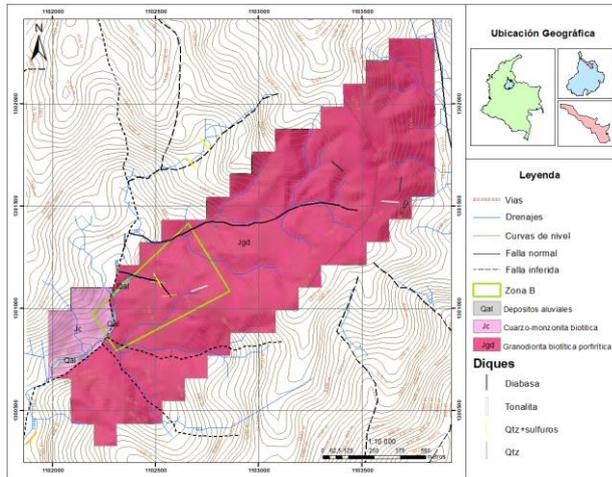
*Trazo preliminar de estructuras sobre la ortofoto RN-103 de la solicitud ODT-16361*



*Nota. [A] Trazo de las estructuras principales sobre la ortofoto RN-103. [B] Trazo de los principales sistemas de drenaje a partir del análisis de la ortofoto RN-103.*

### 8.2 Cartografía geológica de superficie

La cartografía geológica de superficie consiste en hacer un registro de la naturaleza, relación y comportamiento de las rocas que conforman un área específica. Se realizó una cartografía geológica de superficie a escala 1:10000 en el área de la solicitud de legalización ODT-16361 ubicada en la vereda Galanes en el municipio de Rionegro, Santander como parte del estudio requerido para la elaboración del Programa de Trabajos y Obras (PTO) por parte de la empresa CME S.A.S (Consultoría Minera Especializada) en cuyo documento técnico debe consignarse las labores desde la etapa de exploración hasta la etapa de cierre de mina.

**Figura 8***Mapa geológico local de la solicitud ODT-16361***8.2.1 Litologías aflorantes**

**8.2.1.1 Granodiorita.** En el sector ubicado en la vereda Galanes en el área que se extiende desde Galanes bajo hasta Galanes alto se observan cuerpos intrusivos que hacen parte del denominado Batolito de Rionegro (Ward *et al.*, 1973).

Esta unidad ígnea aflora en la mayor parte del polígono de la solicitud ODT-16361 y se extiende en dirección NE-SW. Del análisis macroscópico se observa un cambio en el tamaño de grano y el grado de meteorización en los escasos afloramientos que son visibles hacia las zonas más densamente vegetadas en área ubicada más al sur y sureste del polígono.

A escala de afloramiento pueden observarse dos familias de diaclasas en dirección 114/41 y 11/63 que afectan a una roca alterada poco maciza que abarca todo el corte de la carretera (Figura 9). Corresponde a una roca fanerítica de colores crema, naranja y café con tamaño de grano que va de medio a grueso y ligeramente inequigranular. Composicionalmente presenta un 35% de plagioclasa de color blanco, tamaño de grano medio y aspecto terroso, 25% de biotita tamaño de grano medio a grueso, aspecto laminar y brillo vítreo cuya oxidación proporciona esos tonos naranjas que posee la roca, 20% de cuarzo de tamaño de grano grueso de 2 a 5mm incoloro, 15% de feldespato potásico de tamaño de grano medio de color rosado

## GEOLOGIA DE LA SOLICITUD ODT-16361, RIONEGRO

naranja, y un 5% de óxidos como minerales accesorios.

**Figura 9***Afloramiento y muestra de mano*

*Nota: Donde se muestra la granodiorita más meteorizada.*

Siguiendo los drenajes principales que atraviesan la unidad es posible observar la roca más fresca. Esta corresponde a una roca ígnea de tamaño de grano grueso y color predominantemente gris y crema, compacta y ligeramente inequigranular porfirítica de matriz fanerítica. Composicionalmente presenta un 35% de cuarzo de tamaño de grano grueso incoloro a blanco lechoso, 30% de biotita de color negro, tamaño de grano medio, aspecto laminar y brillo vitreo, 20% de plagioclasa de color blanco, tamaño de grano medio y aspecto terroso, 10% de feldespato potásico de tamaño de grano grueso a muy grueso de color rosado claro que constituye los fenocristales presentes en la roca y un 5% de óxidos. Esta roca se denota como una granodiorita biotítica porfirítica.

**Figura 10**

*Granodiorita biotítica porfírica de matriz fanerítica.*



*Nota. [A] Afloramiento donde se observa la granodiorita en roca fresca. [B] Muestra de mano donde logra observarse los minerales constituyentes de la granodiorita biotítica porfírica como la biotita (Bt), cuarzo (Qtz), plagioclasa (Pl), feldespato potásico (Kfs)*

A lo largo del área es posible observar varios diques y venas no cartografiables intruyendo a la granodiorita que presentan una alteración hidrotermal de tipo epidotización con espesores que van desde 2mm hasta 12cm como se observa en la Figura 11.

**Figura 11**

*Evidencia de epidotización en granodiorita*



*Nota. [A] Vena de 12cm con epidotización intruyendo a la granodiorita. [B] Venilla de 1cm con alteración hidroterma de tipo epidotización intruyendo a la granodiorita*

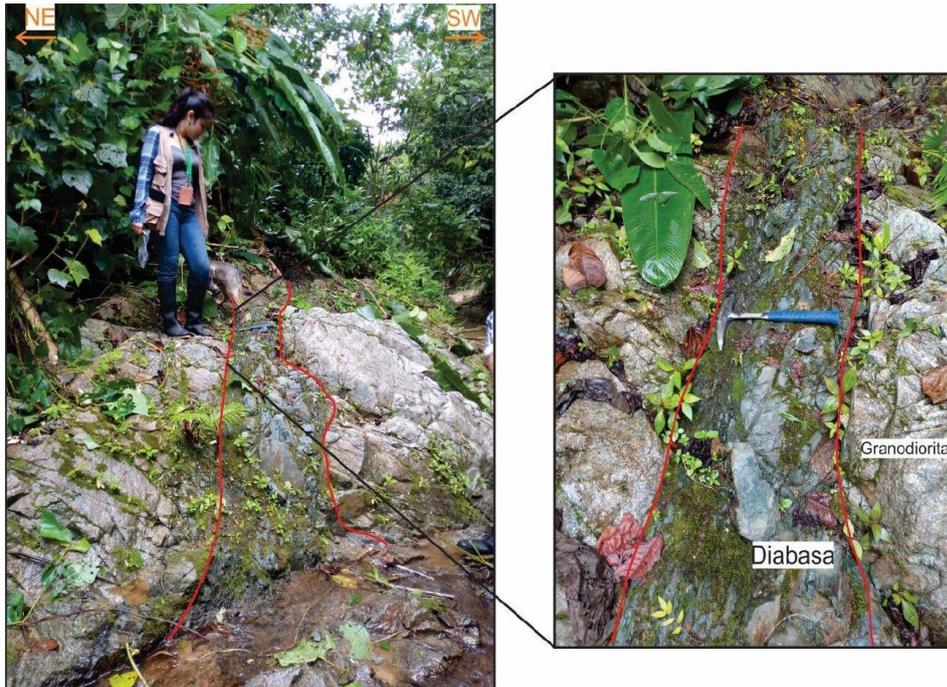
A lo largo de toda el área se observan intrusiones de diques de composición máfica y

## GEOLOGIA DE LA SOLICITUD ODT-16361, RIONEGRO

textura afanítica que corresponden diabasas con espesores que van desde los 10cm hasta 1.20m. En la (Figura 12) puede observar un dique de 36cm de ancho dispuesto en dirección 355/83 que se encuentra intruyendo la granodiorita aprovechando los planos de debilidad de la roca.

**Figura 12**

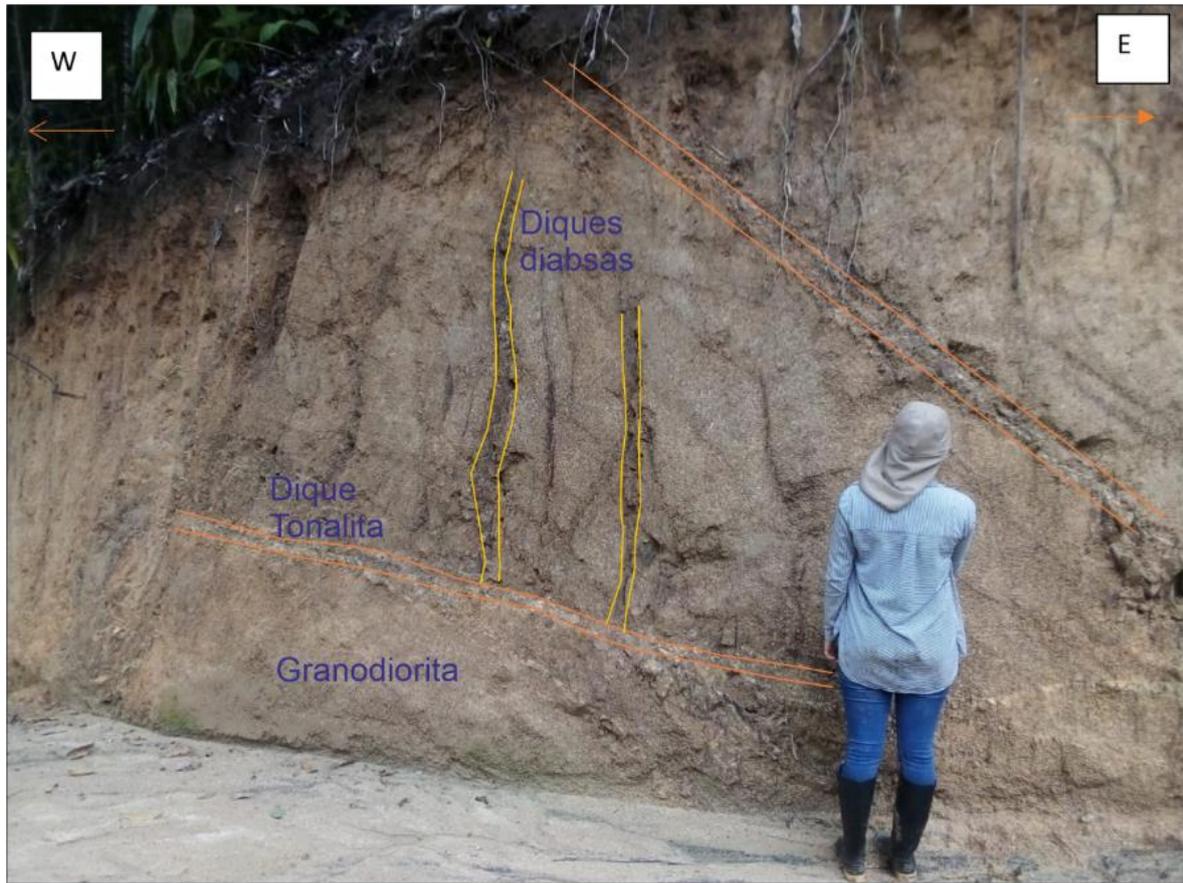
*Dique de 36 cm de diabasa intruyendo a la granodiorita en dirección 355/83*



Por otro lado, en la zona norte del polígono de la solicitud ODT-16361 se identifican diques de tonalita que son cortados por diques de diabasa, cabe señalar que los diques de diabasa hacia el norte son de menor tamaño que los observados hacia el SW, sus espesores van de 5 a 10cm tanto para la diabasa como la tonalita. Los diques tonalíticos se caracterizan por ser equigranulares de grano fino con un contenido bajo de máficos, se encuentran intruyendo a la granodiorita que es la roca más abundante en el área de la solicitud.

**Figura 13**

*Diques de diabasa siendo cortados por diques de tonalita intruyendo el cuerpo granodiorítico*



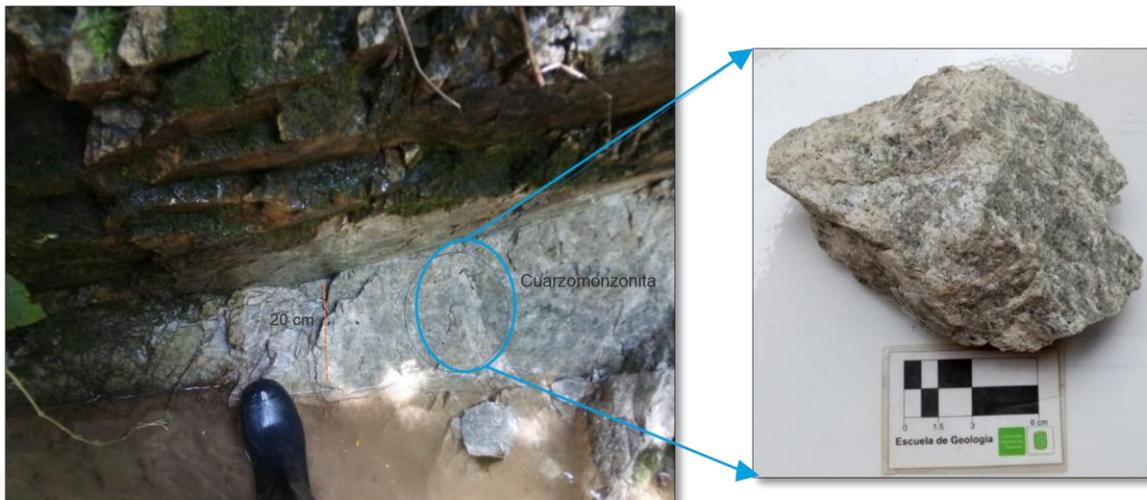
**8.2.1.2 Cuarzomonzonita.** La cuarzomonzonita aflora hacia el SW del área de estudio, los afloramientos de esta roca son escasos dentro del polígono y sus áreas aledañas ya que se encuentran geformas de pendientes escarpadas cubiertas de cultivos y pastos, con suelo profundo de textura franco-arcillosa, sin embargo en el cauce de la quebrada principal del área que va en sentido SW-NE es posible identificar algunos afloramientos de este tipo de roca; el cauce mencionado parece marcar el transcurrir de una falla inferida, esto debido que mientras se avanza en dirección NE es posible notar algunos cambios abruptos en el transcurrir del drenaje, así como cambios de pendiente, por lo que dicha falla pareciera marcar el contacto entre la granodiorita y la cuarzomonzonita, se trataría de un contacto fallado.

## GEOLOGIA DE LA SOLICITUD ODT-16361, RIONEGRO

En muestra de mano la roca presenta textura fanerítica, inequigranular compuesta por cristales xenomorfos de feldespato potásico de grano fino a medio, cristales xenomorfos de plagioclasa con una ligera tonalidad verdosa debido a la presencia de epidotización, así como cuarzo y sulfuros identificados como pirita y calcopirita. Al realizar un conteo de 20 puntos en muestra de mano se observa que la roca tiene una composición de plagioclasa en un 40%, cuarzo en un 10%, feldespato potásico que abarca aproximadamente entre el 45y 50% de la roca y sulfuros que representarían el 5% de la roca; con los porcentajes mencionados la roca fue clasificada como una cuarzomonzonita según el diagrama QAPF.

**Figura 14**

*Afloramiento y muestra de mano de cuarzomonzonita*



*Nota: tomado en el punto de coordenadas 1102159,85 N y 1300721E a 808.3 msnm*

**8.2.1.3 Depósitos cuaternarios.** En el área abarcada por el polígono de la solicitud ODT- 16361 se encuentran depósitos cuaternarios de pequeña extensión sobre el trayecto del cauce principal, compuesto en su mayoría por arenas no consolidadas y en algunas zonas por clastos y guijarros en su mayoría de rocas ígneas, aunque también se identifican algunas metamórficas.

**Figura 15**

*Deposito aluvial a orillas del cauce principal tomado en las coordenadas 1103421.83N y 1302042.14 E, con una elevación de 1266.4 msnm*

**8.2.2 Marco tectónico y estructural del área de estudio**

El área de la solicitud de legalización ODT-16361 se encuentra al SW del bloque tectónico de Maracaibo; Este bloque de geometría triangular está limitado por cadenas de montaña y grandes fallas de rumbo activadas durante la fase de deformación Andina (Taboada *et al.*, 1998). La falla de Boconó ubicada en los andes de Mérida en Venezuela conforma el límite SE del bloque, su dirección es N50E y posee un movimiento de rumbo dextral.

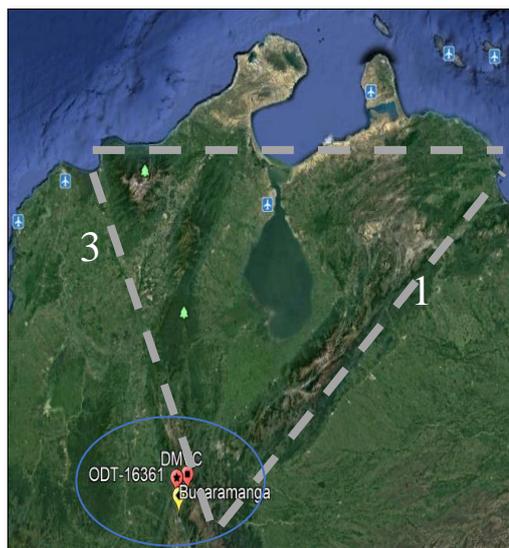
Hacia el norte el límite está establecido por la presencia de la falla de Oca la cual se caracteriza por tener un sentido EW con una dirección de movimiento dextral y finalmente el límite SW del bloque está conformado por el sistema de fallas Bucaramanga – Santa Marta, el cual posee una dirección NNW con un movimiento de rumbo siniestral, siendo esta última falla

## GEOLOGIA DE LA SOLICITUD ODT-16361, RIONEGRO

la más cercana al área de la solicitud y la podría estar influyendo en la configuración morfoestructural del área.

**Figura 16**

*Localización del área de la solicitud ODT-16361*



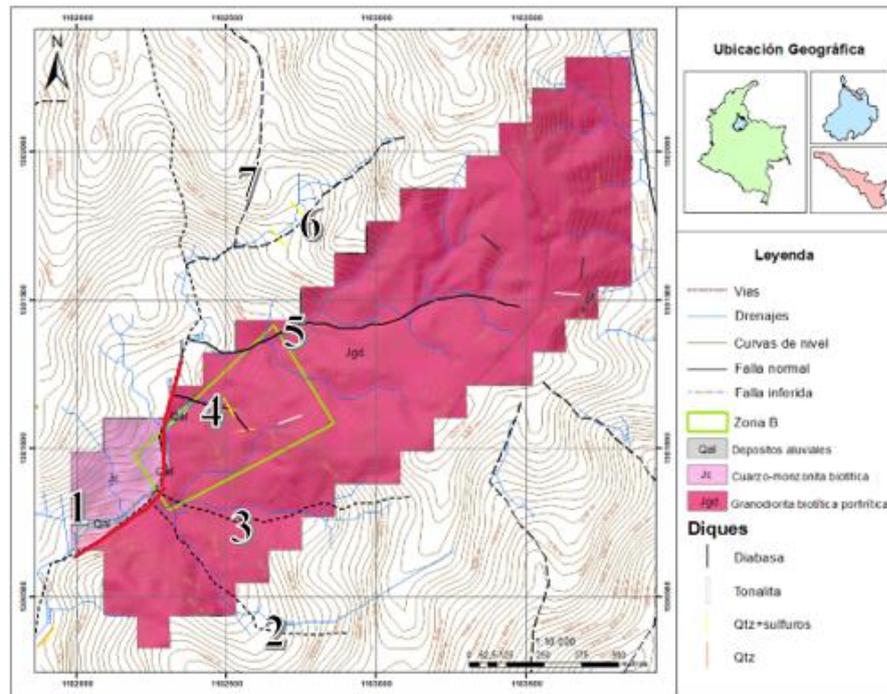
*Nota: con respecto al bloque tectónico de Maracaibo, 1. Falla de Boconó, 2. Falla de Oca, 3. Falla de Bucaramanga - Santamarta*

A escala 1:10.000 en cercanías del área de la solicitud se observan 7 lineamientos derivados de la falla de Bucaramanga - Santa Marta teniendo como principales evidencias de estas la presencia de facetas triangulares que serán descritas en la sección de geomorfología, cambios en las direcciones de drenajes, así como un patrón de drenaje rectangular de subparalelo a paralelo, donde se observa que los tributarios tienden a formar ángulos rectos a semirectos con el cauce principal el cual presenta una dirección NS en la mayoría de su trayecto sin embargo hacia el SW del polígono muestra una dirección en ese mismo sentido lo que constituye un fuerte indicador de la presencia de una falla que en el mapa geológico presentado en la Figura 17 se presenta como una falla inferida señalada con el número 1. Los lineamientos 2, 3, 6 y 7 fueron inferidos con base a características morfológicas a partir de un modelo digital de elevación, así como imágenes aéreas obtenidas por vuelo de dron, teniendo como indicadores de su presencia patrones de drenaje y cambios en la pendiente.

## GEOLOGIA DE LA SOLICITUD ODT-16361, RIONEGRO

**Figura 17**

*Mapa geológico de las principales fallas dentro del polígono y alrededor*



*Nota: en rojo se señala el cambio en la dirección del drenaje principal.*

Por otro las fallas 4 y 5 fueron determinadas a partir de los mismos parámetros morfológicos aplicados a las demás, pero adicionalmente en campo fueron identificados indicadores de movimiento e indicadores cinemáticos para cada una de ellas, dando como resultado una cinemática de tipo normal. Los indicadores cinemáticos de la falla 5 fueron identificados en el punto de control de campo con coordenadas N1102510,0484 Y E1301191,5282 a una altura de 896 msnm, se determinó que se trata de una falla normal siguiendo el principio de que el movimiento de la falla está dado hacia la dirección donde haya menor fricción a la hora de pasar la mano (Lillo & Oyarzún, 2013).

Los indicadores cinemáticos de la falla número 4 fueron identificados en dos puntos distintos; los saltos de falla se identificaron en las coordenadas N1102458,1562 y E1301126,3434, mientras que las estrías de falla se identificaron a mayor altura siguiendo el cauce del drenaje que transcurre por la zona de falla en el punto de coordenadas N

## GEOLOGIA DE LA SOLICITUD ODT-16361, RIONEGRO

1102529.2794 y E1301102,4914 a una altura de 903.3msnm. se determinó la cinemática usando el mismo principio que para la falla 5.

**Figura 18**

*Evidencias de la cinemática normal de la falla 4*



*Nota: se observan estrías señaladas con líneas punteadas en color amarillo y saltos de falla en color naranja.*

Las fallas 2, 3, 6 y 7 fueron obtenidas mediante el análisis del terreno haciendo uso de un modelo digital de elevación, un mapa de sombras y la una orto imagen, por lo que se trata de lineamientos, es necesario obtener en campo criterios que permitan confirmar su presencia más allá de los indicadores morfológicos puesto que estos no permiten determinar una cinemática.

**8.2.3 Geomorfología**

Regionalmente el área de la solicitud de legalización ODT-16361 Se encuentra dentro del denominado bloque tectónico de Maracaibo limitado al W por el sistema de fallas Bucaramanga – Santamarta y hacia el E por la falla Boconó. El área de interés se encuentra en el departamento de Santander ubicado en la geomorfoestructura denominada Sistema Orogénico Andino; y las provincias: Cinturón Orogénico de la Cordillera Oriental y el Valle Inter cordillerano del Magdalena (Khurama, Velandia, Chaparro, & Buitrago, 2014)

## GEOLOGIA DE LA SOLICITUD ODT-16361, RIONEGRO

En la zona se ha identificado un predominio de geoformas asociadas a un ambiente morfogenético estructural, se observan espolones, espolones facetados, facetas triangulares y Lomos de falla, así como un patrón de drenaje rectangular donde los ángulos de las conexiones entre los drenajes tributarios y los principales son rectos o semirectos lo cual es consistente con el dominio estructural observado en la zona marcado por la presencia de la falla Bucaramanga y sus fallas satélites.

Para la elaboración del mapa geomorfológico de la zona se tuvo en cuenta la propuesta metodológica para la elaboración de mapas geomorfológicos analíticos aplicados a la zonificación de amenaza por movimientos en masa del servicio geológico colombiano; los insumos utilizados fueron una imagen Landsat obtenida del servicio geológico norteamericano de la cual se obtuvo un modelo de elevación digital así como curvas de nivel y un mapa de pendientes y de sombras para resaltar los rasgos geomorfológicos, también se utilizaron imágenes satelitales obtenidas de Google Earth pro.

Las pendientes del terreno fueron divididas en 7 clases según el grado de inclinación de acuerdo con la guía metodológica mencionada anteriormente, donde la clase 1 se define como plana a suavemente inclinada y va desde los 0 a 5°, la clase 2 abarca desde los 5 hasta los 10° y es clasificada como inclinada, la tercera clase de 10 a 15° se establece como pendiente muy inclinada, la clase número 4 abarca desde los 15 a los 20° y se define como pendiente abrupta, de 20 a 30° pendiente muy abrupta, de 30 a 45° escarpada y >45 muy escarpada (Leiva *et al.*, 2012). siendo las dos últimas categorías las que predominan en el polígono B definida como la zona de mayor interés dentro del polígono de la solicitud ODT-16361 como se muestra en la Figura 19.

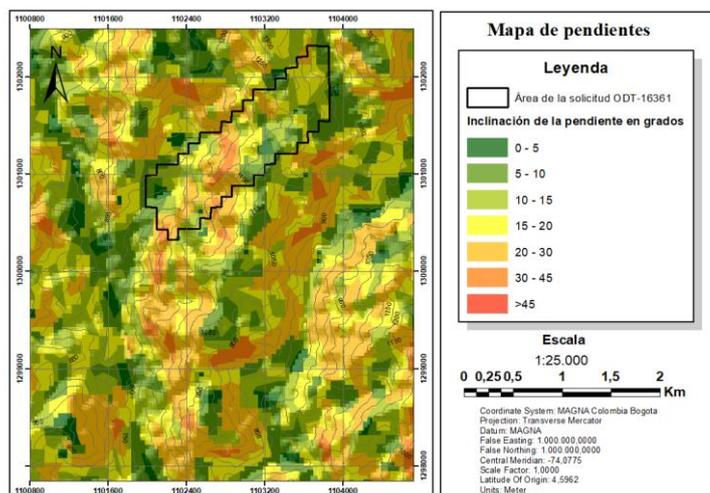
Las unidades geomorfológicas identificadas en la zona fueron clasificados de acuerdo con el anexo A del estándar metodológica mencionada en párrafos anteriores titulada “glosario

## GEOLOGIA DE LA SOLICITUD ODT-16361, RIONEGRO

de unidades y subunidades geomorfológicas”, de igual manera la nomenclatura y el código de color usado para cada unidad fue tomado de dicha guía.

**Figura 19**

*Mapa de pendientes del área de estudio.*



*Nota: se observa en negro el polígono de la solicitud de legalización ODT-16361 en donde hacia la parte central predominan las pendientes abruptas y escarpadas.*

**Figura 20**

*Guía de colores para los polígonos de la cartografía geomorfológica según Genesis de las geoformas*

UNIDAD DE MAPEO POR GENESIS DE LAS GEOFORMAS	COLOR
Formas de Origen Estructural	Púrpura
Formas de Origen Volcánico	Rojo
Formas de Origen Denudativo	Marrón
Formas de Origen Fluvial	Azul
Formas de Origen Lacustre/Marino	Verde
Formas de Origen Glaciar/Periglaciar	Grises
Formas de Origen Eólico	Amarillo
Formas de Origen Cárstico	Naranja
Formas de Origen Antropogénico/Biológico	Negro

*Nota: tomado de la propuesta metodológica y sistemática para la elaboración de mapas geomorfológicos analíticos aplicados a la zonificación de amenaza por movimiento en masa.*

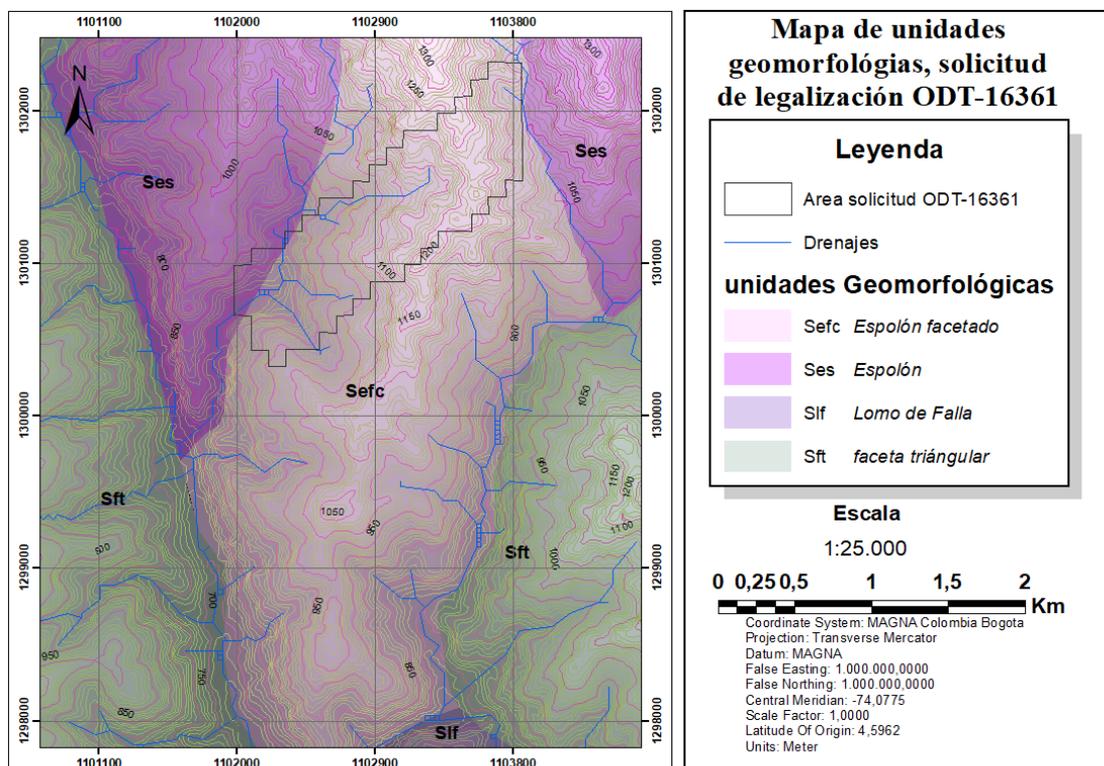
**8.2.3.1 Descripción de unidades geomorfológicas.** El ambiente morfogenético predominante en la zona es el ambiente estructural representado por geoformas caracterizadas por pendientes abruptas, escarpadas y muy escarpadas, con patrones de drenaje rectangular.

## GEOLOGIA DE LA SOLICITUD ODT-16361, RIONEGRO

Las geoformas están compuestas principalmente por litologías de origen ígneo y metamórfico hacia el Este de la falla de Bucaramanga y hacia el Oeste litologías sedimentarias. Las unidades definidas en el área son espolones hacia el NW y NE, espolón facetado el cual se ubica en el centro del mapa casi que en sentido N-S, facetas triangulares tanto en rocas ígneas como en rocas sedimentarias hacia el W y el E del mapa y finalmente un lomo de falla identificado en la parte sur del mapa como se muestra en la Figura 21.

**Figura 21**

*Mapa geomorfológico a escala 1:25000 del área de la solicitud de legalización ODT- 16361.*



**Tabla 2**

*Área que ocupa cada una de las unidades geomorfológicas identificadas en la zona de estudio.*

Unidad	Área (Hc)	Ambiente	Área %
Sefc	837,534706	estructural	31,3243187
Ses	540,662615	estructural	20,2211179

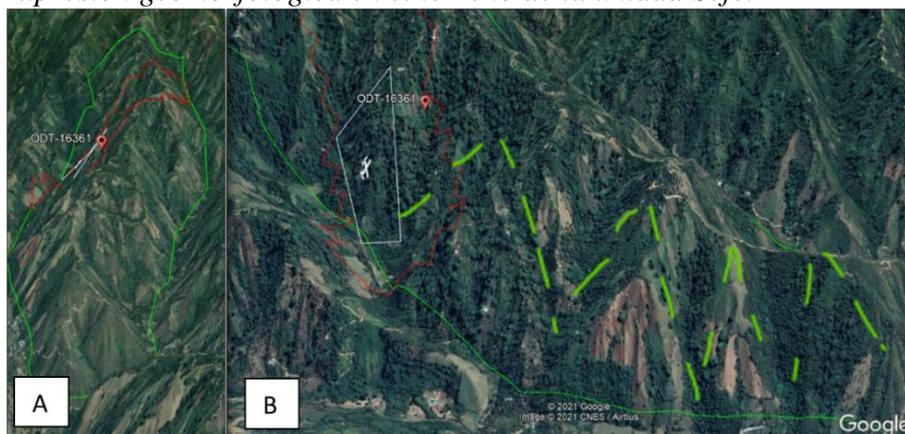
## GEOLOGIA DE LA SOLICITUD ODT-16361, RIONEGRO

<b>Slf</b>	52,487567	estructural	1,96306764
<b>Sft</b>	1243,06746	estructural	46,4914958

**8.2.3.1.1** *Espolón facetado (Sefc).* Esta geoforma se encuentra en la parte central de la plancha entre las veredas galanes alto y galanes bajo; se caracteriza por presentar pendientes abruptas a muy escarpadas, se identifican 2 fallas inferidas hacia las zonas laterales evidenciándose la formación de facetas triangulares hacia el flanco occidental. Se encuentra conformada por cuarzo monzonitas que dan lugar a la formación de un suelo franco arenoso a franco arcilloso poco profundo con una cobertura vegetal compuesta principalmente por cultivos permanentes con sombrío. Esta geoforma ocupa un área de 837,53 hectáreas lo que constituye un 31,3% del terreno total. En la Figura 22 se observa la expresión geomorfológica en el terreno de esta unidad

**Figura 22**

*Expresión geomorfológica en el terreno de la unidad Sefc.*



*Nota: A. vista N-S de la geoforma B vista lateral del espolón facetado donde se observan facetas triangulares en el flanco occidental*

**8.2.3.1.2** *Espolón (Ses).* esta geoforma se identifica en las zonas NW y NE del mapa, el espolón ubicado en la zona noroccidental limita hacia el oeste con la falla Bucaramanga- Santa Marta y hacia el E con una falla local inferida, mientras que el que se encuentra hacia el NE se encuentra limitado por dos fallas inferidas en cada uno de sus flancos.

## GEOLOGIA DE LA SOLICITUD ODT-16361, RIONEGRO

Se caracteriza por presentar pendientes desde muy abruptas a escarpadas, así como por un sistema de drenajes escaso y rectangular. En la zona NW la geoforma está compuesta por rocas ígneas cuarzo monzoníticas que dan lugar a la formación de un suelo franco arenoso a franco arcilloso con una cobertura vegetal de cultivos permanentes con sombrío, al igual que el espolón identificado hacia el NE, sin embargo, este último se encuentra formado por rocas metamórficas pertenecientes al Neis de Bucaramanga con algunas intrusiones de cuarzo monzonita

Esta unidad abarca un área de 540,66 hectáreas lo que constituye un 20,2% del área total del mapa geomorfológico de la zona. La expresión geomorfológica de esta unidad se muestra en la Figura 23.

### Figura 23

*Expresión geomorfológica en campo de la unidad Ses.*



*Nota A. espolón ubicado hacia la parte NW del mapa geomorfológico, B. espolón ubicado hacia la zona NE del mapa. Imagen satelital tomada de Google earth con una exageración vertical de 3*

**8.2.3.1.3 Lomo de falla (Slf).** Una pequeña fracción de esta geoforma logra identificarse en la parte sur del área del mapa geomorfológico, se caracteriza por tener una forma convexa como se muestra en la Figura 24 y por su pendiente muy abrupta a escarpada, se encuentra asociada a una sierra de presión ubicada en la parte Este del área pero que debido a la escala del mapa no alcanza a apreciarse dentro de este, limita hacia el oeste con el sistema de fallas Bucaramanga-Santamarta y hacia el Este con una falla inferida de magnitud considerable. Está compuesto por cuarzo monzonita que da lugar a la formación de suelo franco

## GEOLOGIA DE LA SOLICITUD ODT-16361, RIONEGRO

arcilloso, cubierto por cultivos permanentes con sombrío. Esta geoforma abarca un área de 52,5 hectáreas lo que constituye el 1,96% del área total del mapa geomorfológico.

**Figura 24**

*Expresión geomorfológica de la unidad S1f junto a su perfil de elevación*



*Nota: donde se muestra su forma convexa y su pendiente escarpada. Imagen satelital tomada de Google earth con una exageración vertical de 3.*

**8.2.3.1.4 Faceta triangular (Sft).** Expresiones de esta unidad geomorfológica se identifican hacia el oeste del mapa y hacia el SE; la geoforma presente en el lado occidental se encuentra a la izquierda del sistema de fallas Bucaramanga Santa Marta y está compuesta por rocas sedimentarias de la formación Bocas, se caracteriza por poseer un patrón de drenaje rectangular y por mostrar pendientes abruptas a muy abruptas. En cuanto a los usos del suelo se encuentran principalmente cultivos permanentes con sombra y pastos mejorados, así como pequeñas fracciones de bosques secundarios hacia el SW, en esta zona se forman suelos franco-arenosos a franco arcillosos profundos, moderadamente a bien drenados.

Las facetas triangulares identificadas en la zona SE se caracterizan por presentar pendientes de muy abruptas a escarpadas principalmente, se encuentra compuesta por rocas ígneas del jurásico correspondientes a granodioritas en las cuales se da la formación de un suelo franco arcilloso poco profundo, la cubierta vegetal de esta área corresponde a cultivos

## GEOLOGIA DE LA SOLICITUD ODT-16361, RIONEGRO

permanentes con sombrero principalmente de café, cacao y cítricos. Las facetas triangulares identificadas en la zona abarcan en conjunto 1243,1 hectáreas lo que constituye un 46,5% del área total del mapa geomorfológico. La expresión de esta unidad en el terreno se muestra en la Figura 25.

### Figura 25

*Expresión geomorfológica de las facetas triangulares ubicadas al W de la falla de Bucaramanga-Santa Marta.*



*Nota: en color rojo se observa una fracción del área de la solicitud ODT-16361. Imagen orientada hacia el Oeste, tomada de Google Earth*

### 8.2.4 Amenaza de remoción en masa

La zonificación de amenaza fue realizada de manera cualitativa teniendo en cuenta como parámetros condicionantes la geología de la zona, el tipo de suelo, la cobertura o uso de suelo, pendiente y geomorfología, considerando como factor detonante la precipitación. Una vez obtenida la susceptibilidad del terreno con cada uno de los factores se representa gráficamente en 4 categorías o clases según lo recomendado por el servicio geológico colombiano en su guía metodológica para la zonificación de amenaza por movimiento en masa a escala 1:25000, estas categorías son susceptibilidad baja, media, alta y muy alta. (Rodríguez *et al.*, 2017).

El nivel de vulnerabilidad baja indica que el fenómeno de remoción puede llegar a ocurrir, pero es poco probable, mientras que el nivel medio implica que el fenómeno es

## GEOLOGIA DE LA SOLICITUD ODT-16361, RIONEGRO

esperable. Por otro lado, el nivel alto implica que existe una alta probabilidad de que ocurra un movimiento de remoción en masa y finalmente el nivel muy alto excede el nivel de riesgo aceptable por lo que es necesario tomar medidas de mitigación inmediatas (Sierra & Duran, 2019).

Una vez obtenida la vulnerabilidad por cada uno de estos factores se procede a realizar el mapa de amenaza de remoción en masa en donde además de los factores condicionantes se tienen en cuenta factores detonantes como precipitación y sismicidad. El cálculo de la vulnerabilidad del terreno se realiza mediante la suma ponderada de cada una de las variables condicionantes asignando un peso a cada una de ellas según lo recomendado por el IDEAM.(Arevalo *et al.*, 2012). Del mismo modo para realizar el cálculo de la amenaza se adicionan los factores detonantes para obtener el resultado final.

**8.2.4.1 Susceptibilidad por geología.** Dentro del área seleccionada para la realización del mapa de susceptibilidad del terreno afloran litologías ígneas, sedimentarias y metamórficas. Las rocas ígneas están representadas principalmente por las unidades Jc y Jgd que corresponden a cuarzo monzonita biotítica y granodiorita biotítica respectivamente. Las litologías sedimentarias corresponden a areniscas y lutitas grises de la formación bocas y depósitos cuaternarios, mientras que las rocas metamórficas están representadas en el área por esquistos, neises y migmatitas pertenecientes al Neis de Bucaramanga. Cada una de estas litologías recibió una ponderación según las categorías definidas anteriormente con una numeración de 1 a 4 siendo uno vulnerabilidad baja y 4 vulnerabilidad muy alta. Para asignar los valores a cada litología se tuvo en cuenta la clasificación litológica de Mora y Vahrson (1993) como se muestra en la Figura 26, como esta clasificación tiene 5 clases y para este trabajo se definieron 4 se fusionaron las clases 2 y 3 de la metodología de Mora y Vahrson en una sola que será la clase 2 en este documento.

En ese orden de ideas las unidades Jc y Jgd fueron ponderadas con una puntuación de

## GEOLOGIA DE LA SOLICITUD ODT-16361, RIONEGRO

1, lo que significa que corresponde a vulnerabilidad baja debido a que se trata de rocas ígneas. Por otro las litologías pertenecientes al neis de Bucaramanga fueron clasificadas dentro del rango de vulnerabilidad alta ya que se trata de rocas metamórficas esquistosas en algunas zonas, del mismo modo los depósitos cuaternarios fueron ponderados con la misma puntuación. Finalmente, las rocas pertenecientes a la formación bocas fueron clasificadas dentro de vulnerabilidad muy alta ya que se trata de areniscas y lutitas que pueden ser poco competentes, adicionado a su rango de pendiente hacen que sea la litología más predispuesta a presentar movimientos de remoción en masa.

Después de realizar la ponderación de cada litología según sus características se disolvieron los polígonos según su puntuación utilizando la herramienta ArcMap del software AcrGis 10.5 obteniendo como resultado el mapa de vulnerabilidad por Geología que se muestra en la Figura 27. El mapa de Susceptibilidad por geología presenta zonas de vulnerabilidad baja, media y alta, siendo la vulnerabilidad baja la que más predomina en la zona ocupando un área de 1546,63 hectáreas lo que constituye el 86% del área total.

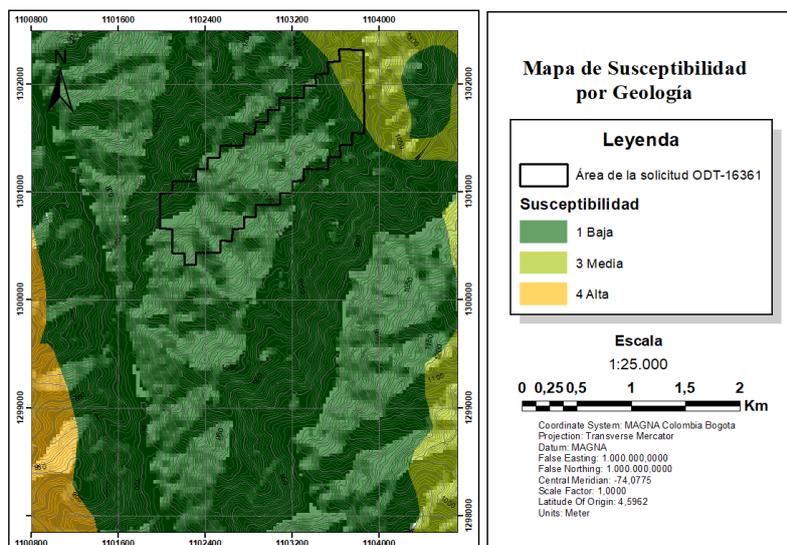
## Figura 26

*Clasificación litológica según Mora y Vahrson 1993.*

Litología	Calificación	Factor SI
Aluvión Grueso, permeable, compacto, nivel freático bajo Calizas duras permeables Rocas intrusivas, poco fisuradas, bajo nivel freático Basaltos, andesitas, ignimbritas <b>Características físicas y mecánicas;</b> materiales sano con poca o ninguna meteorización, resistencia al corte elevada, fisuras sanas y sin relleno.	Baja	1
Rocas sedimentarias no o muy poco alteradas, poco fisuradas rocas intrusivas, calizas duras <b>Características físico mecánicas:</b> resistencia al corte media a elevada.	Moderado	2
Rocas sedimentarias, intrusivas, lavas, ignimbritas, tobas poco soldadas, rocas metamórficas mediana a fuertemente alteradas. Niveles freáticos relativamente altos	Medio	3
Aluviones fluvio lacustres, suelos piroclásticos poco compactados, rocas fuertemente alteradas.	Alto	4
Materiales aluviales, coluviales de muy baja calidad mecánica, rocas con estado de alteración avanzado, drenaje pobre. Se incluyen los casos 3 y 4 con niveles freáticos muy someros, sometidos a grandes hidrodinámicos elevados	Muy Alto	5

*Nota: Tomado de zonificación de amenazas por deslizamiento según el modelo de Mora y Vahrson. (Sandoval Sierra & Ruíz Figueroa, 2018)*

## GEOLOGIA DE LA SOLICITUD ODT-16361, RIONEGRO

**Figura 27***Mapa de susceptibilidad por Geología. elaboración propia.*

**8.2.4.2 Susceptibilidad por geomorfología e inclinación de la pendiente.** El mapa de pendientes de la zona fue generado a partir de un modelo digital de elevación obtenido del servicio geológico estadounidense. Las pendientes se dividieron en 7 clases, cada una de estas clases fue reclasificada según su grado de susceptibilidad siguiendo la metodología mostrada en la Figura 28.

**Figura 28***Clasificación de vulnerabilidad de pendiente*

Indicador	Porcentaje	Ángulo de inclinación	Nivel de riesgo
Pendiente del terreno	Más de 100%	más de 45 grados	Muy Alto
	50 a 100 %	26.6 a 45 grados	Alto
	30 a 50 %	16.7 a 26.6 grados	Medio
	15 a 30 %	8.5 a 16.7 grados	Bajo

*Nota: Tomado de Guía metodológica para recolección de datos, evaluación, monitoreo, seguimiento e informe de gestión del riesgo en la remoción de masas (Sierra & Duran, 2019)*

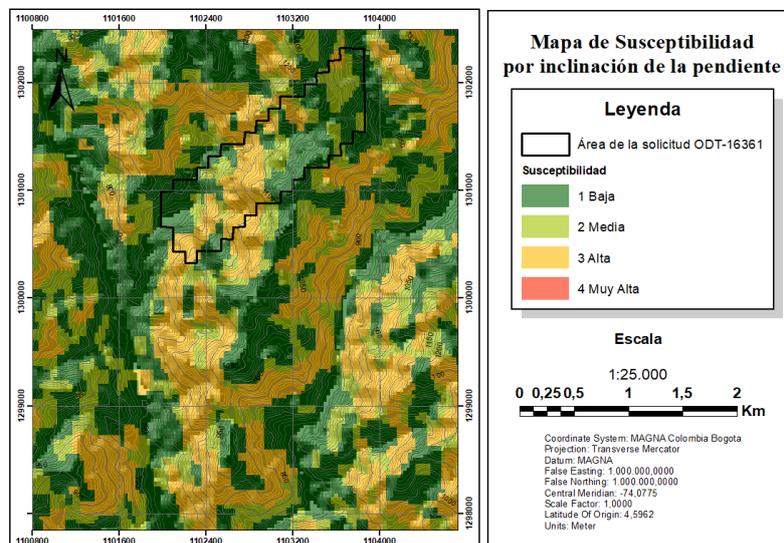
Una vez realizada la ponderación susceptibilidad según el grado de pendiente se realizó el mapa final mostrado en la Figura 29; en la zona fueron identificadas áreas de vulnerabilidad baja, media y alta. Las zonas de vulnerabilidad baja se distribuyen a lo largo de ligeras depresiones

## GEOLOGIA DE LA SOLICITUD ODT-16361, RIONEGRO

generadas por el transcurrir de los drenajes principales, así como en las cimas de las geoformas en donde la pendiente se vuelve menos inclinada teniendo entre 0 y 15° de inclinación; en total el área de vulnerabilidad baja está compuesta por 5666.2 hectáreas de terreno lo que constituye un 58% del área total estudiada. Las zonas de vulnerabilidad media se distribuyen a lo largo de todo el mapa de manera uniforme localizadas en zonas de pendiente de entre 15 y 20° abarcando una zona de 1466.4 hectáreas o el 15% del terreno total y finalmente las zonas de vulnerabilidad alta se distribuyen en los flancos de los espolones y espolones facetados donde las pendientes alcanzan hasta 45° de inclinación, también en las zonas donde se encuentran facetas triangulares la vulnerabilidad es alta debido a las pendientes escarpadas que caracterizan a esta geoforma, ocupan 2635 hectáreas o el 26.9% del terreno.

### Figura 29

*Mapa de susceptibilidad de movimientos de remoción en masa por inclinación de la pendiente.*



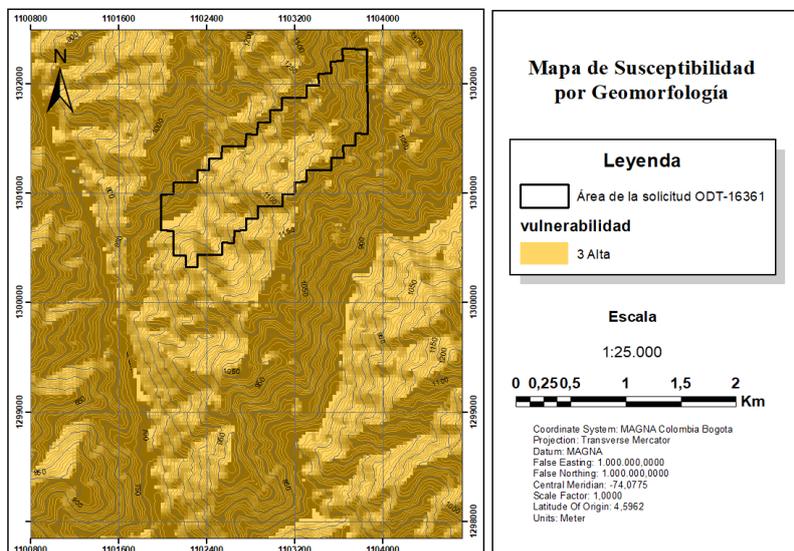
La vulnerabilidad por geomorfología fue definida teniendo en cuenta el mapa geomorfológico, donde se identifican distintas geoformas con características específicas. Los espolones facetados fueron clasificados como de vulnerabilidad alta debido a su pendiente marcada y a la presencia de fallas en cada uno de sus flancos, no se clasificó como Muy alto

## GEOLOGIA DE LA SOLICITUD ODT-16361, RIONEGRO

debido a que está conformado en su mayoría por rocas ígneas, con un suelo franco arcilloso y cubierto permanentemente por cultivos de cacao y cítricos. Los espolones fueron clasificados dentro del rango de vulnerabilidad alta por las mismas razones que los espolones facetados, al igual que estos predominan las pendientes muy abruptas a escarpadas con fallas inferidas limitando cada uno de sus flancos; por otro lado las facetas triangulares fueron clasificadas dentro del mismo rango que las demás unidades geomorfológicas debido a su pendiente escarpada, sus litologías y la influencia de fallas importantes como lo es la falla de Bucaramanga santa marta que pudo generar un amplio fracturamiento en las rocas llevándolas a ser altamente propensas a movimientos de remoción en masa. El resultado final es el mapa de Susceptibilidad de remoción en masa por geomorfología mostrado en la Figura 30, donde el 100% del territorio fue clasificado dentro del rango de vulnerabilidad alta.

**Figura 30**

*Mapa de susceptibilidad de remoción en masa por geomorfología.*



**8.2.4.3 Susceptibilidad por tipo de suelo.** Para la zonificación de la vulnerabilidad por tipo de suelo se tomó como insumo el mapa de tipos de suelo del plan de ordenamiento territorial del municipio de Rionegro Santander para el año 2003, del cual se extrajo la zonificación del tipo de suelo del área de estudio mediante la digitalización de cada polígono

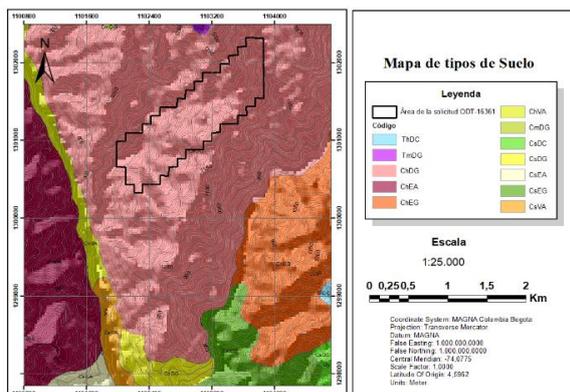
## GEOLOGIA DE LA SOLICITUD ODT-16361, RIONEGRO

usando Arcgis 10.5 dando como resultado el mapa de usos de suelo mostrado en la Figura 31, en el cual se definen 12 áreas según las características del suelo.

Según el consorcio Gradex inpo los suelos en Rionegro se dividen en asociaciones de distintos tipos relacionadas geográfica o litológicamente; en el área de interés se encuentran doce asociaciones. La asociación Sucre (ThDC) se caracteriza por una textura franco-arenosa, franca y franco arcillosa, se trata de suelos bien drenados profundos a superficiales limitados por contacto lítico con su material parental constituido por cuarcitas, este tipo de suelo posee una fertilidad de moderada a baja. La asociación el olivo (TmDG) se caracteriza por presentar texturas franco arcillo arenosas a francas, estos suelos se encuentran bien drenados, son superficiales a medianamente profundos, presentan una fertilidad baja y su material parental son granodioritas.

La asociación San Carlos (ChDG y ChEG) corresponde a suelos generados a partir de granodioritas bien drenados, con textura franco-arcillosa, baja fertilidad y elevada acidez. El grupo indiferenciado la colorada (ChEA) está conformado por suelos generados a partir de areniscas, con abundantes fragmentos de roca, bien drenados y con baja fertilidad. La asociación el Pórtico (ChVA) se caracteriza por tener suelos con texturas franco-arcillosas a franco arenosas, moderadamente a bien drenados, fuertemente ácidos a neutros y fertilidad baja.

**Figura 31**  
Mapa de tipos de suelo para el área de interés.



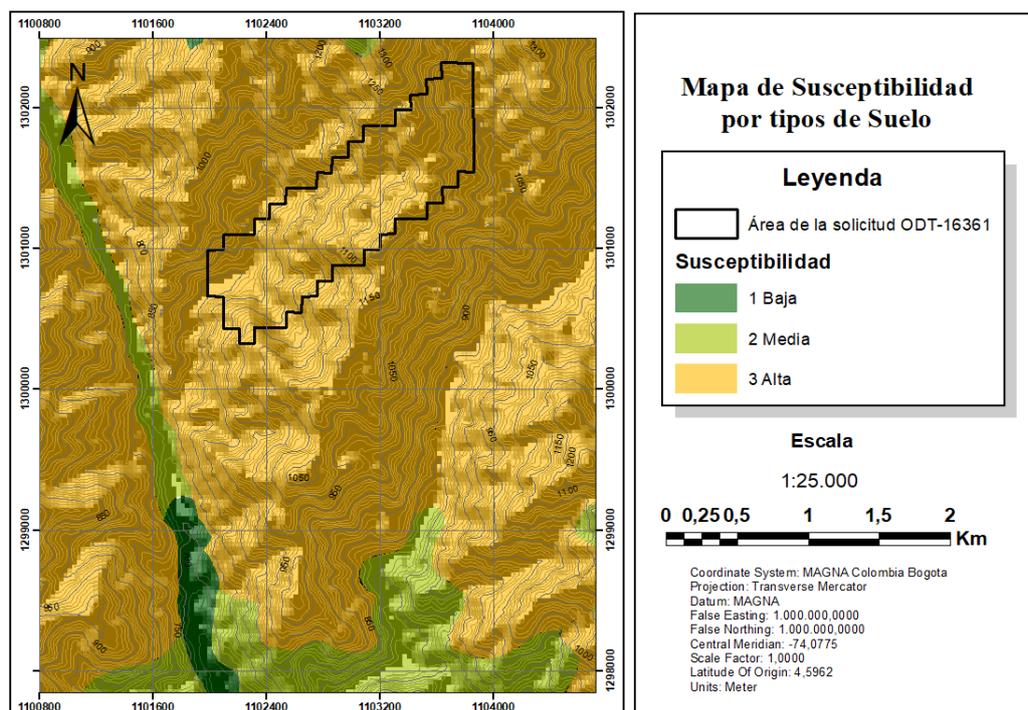
## GEOLOGIA DE LA SOLICITUD ODT-16361, RIONEGRO

La asociación el Cairo (CmDG) está constituida por suelos bien drenados, fuertemente ácidos, superficiales a profundos limitados por un contacto lítico con granodioritas y baja fertilidad. La asociación (CsDG - CsEG) corresponde a suelos formados sobre granodioritas con una textura franco arcillo arenosa y franca, con una acidez y fertilidad moderadas. La asociación Valparaíso (CsDC) se caracteriza por tener una textura franco-arcillosa y arcillosa con fragmentos líticos de cuarcita que corresponde con su material parental, se trata de suelos bien drenados y profundos, pero con fertilidad baja. La asociación CsEA definida como el grupo Churricas se caracteriza por ser un suelo desarrollado sobre areniscas con una textura arenosa y arenosa franca, poca profundidad y fertilidad moderada. Finalmente, la asociación CsVA conocida como asociación Rionegro corresponde a suelos de valle aluvial con textura franco-arcillosa a arenosa franca, abundantes fragmentos rocosos, con una acidez y fertilidad moderadas.

El grado de susceptibilidad según el tipo de suelo fue definido de acuerdo con las texturas presentadas por cada una de las asociaciones, los suelos que presentan texturas franco-arcillosas y arcillosas localizados en zonas de pendientes abruptas a escarpadas fueron clasificados dentro del rango de vulnerabilidad alta, no se clasifican dentro del rango de vulnerabilidad muy alta debido a que en su mayoría son poco profundos a moderadamente profundos. Los suelos de texturas arenosas a franco arenosas localizados en pendientes moderadamente inclinadas fueron clasificados dentro del nivel de vulnerabilidad media, mientras los suelos relacionados con depósitos aluviales localizados en zonas de pendiente plana fueron clasificados en la categoría de vulnerabilidad baja, el resultado final se muestra en la Figura 32. En el área total el 86.8% del terreno corresponde a vulnerabilidad alta de remoción en masa, mientras que la vulnerabilidad media abarca el 11,4% y la vulnerabilidad baja el 1.8%.

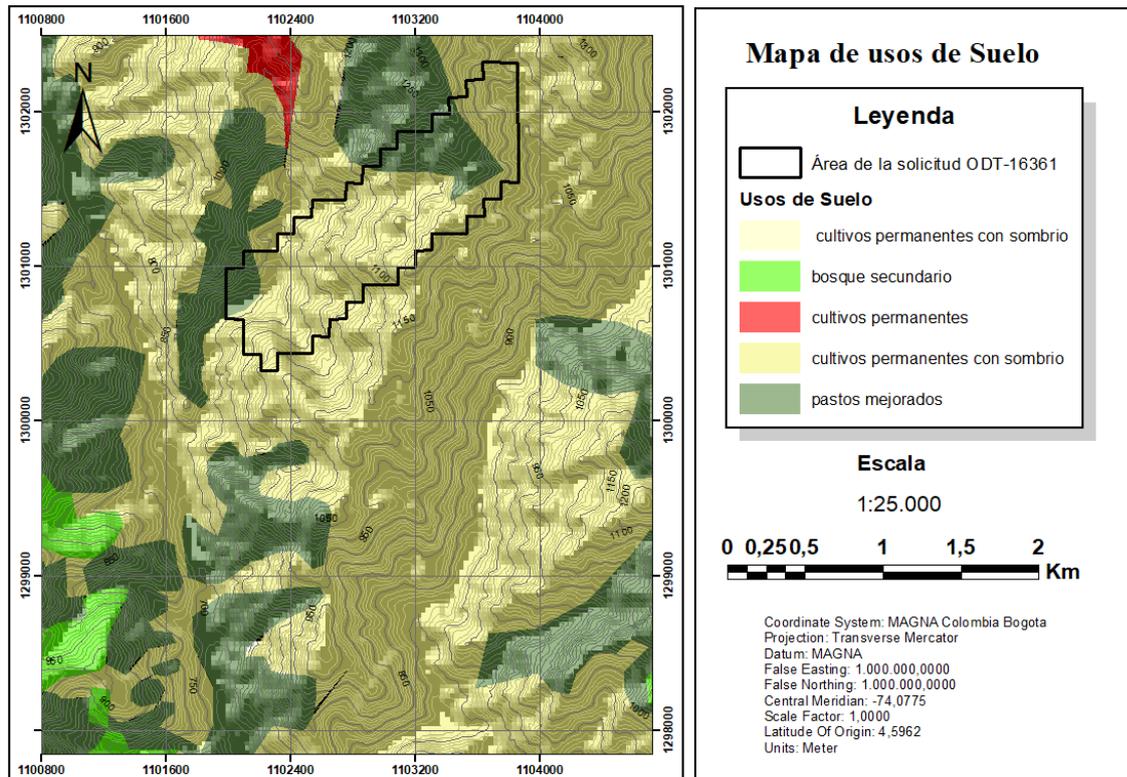
**Figura 32**

*Mapa de susceptibilidad de remoción en masa según tipos de suelo*



**8.2.4.2 Susceptibilidad por uso de suelo.** para la zonificación de la susceptibilidad de remoción en masa por usos del suelo se tomó como insumo el mapa de usos del suelo del plan de ordenamiento territorial para el municipio de Rionegro, Santander del año 2003 que se muestra en la Figura 33. En este mapa se identifican 6 tipos de uso del suelo en el área de estudio; se encuentran cultivos permanentes con sombrío, bosque secundario, cultivos permanentes y pastos mejorados. Para la zonificación de la vulnerabilidad por uso de suelo se tuvo en cuenta la clasificación utilizada por Sierra y Duran que se muestra en la Figura 34. En ese orden de ideas las áreas utilizadas para cultivos permanentes con sombrío se clasificaron dentro de vulnerabilidad media abarcando una de 1338.9 hectáreas lo que es el 72.9% del total, mientras que las áreas de cultivos Permanentes y pastos mejorados se clasificaron dentro del nivel de vulnerabilidad alta abarcando 452.9 hectáreas lo que equivale al 24.6% y finalmente las zonas de bosques secundarios se clasificaron dentro del rango de vulnerabilidad baja ocupando 48,4 hectáreas de terreno lo que corresponde al 2.5% del área total.

## GEOLOGIA DE LA SOLICITUD ODT-16361, RIONEGRO

**Figura 33***Mapa de usos de suelo*

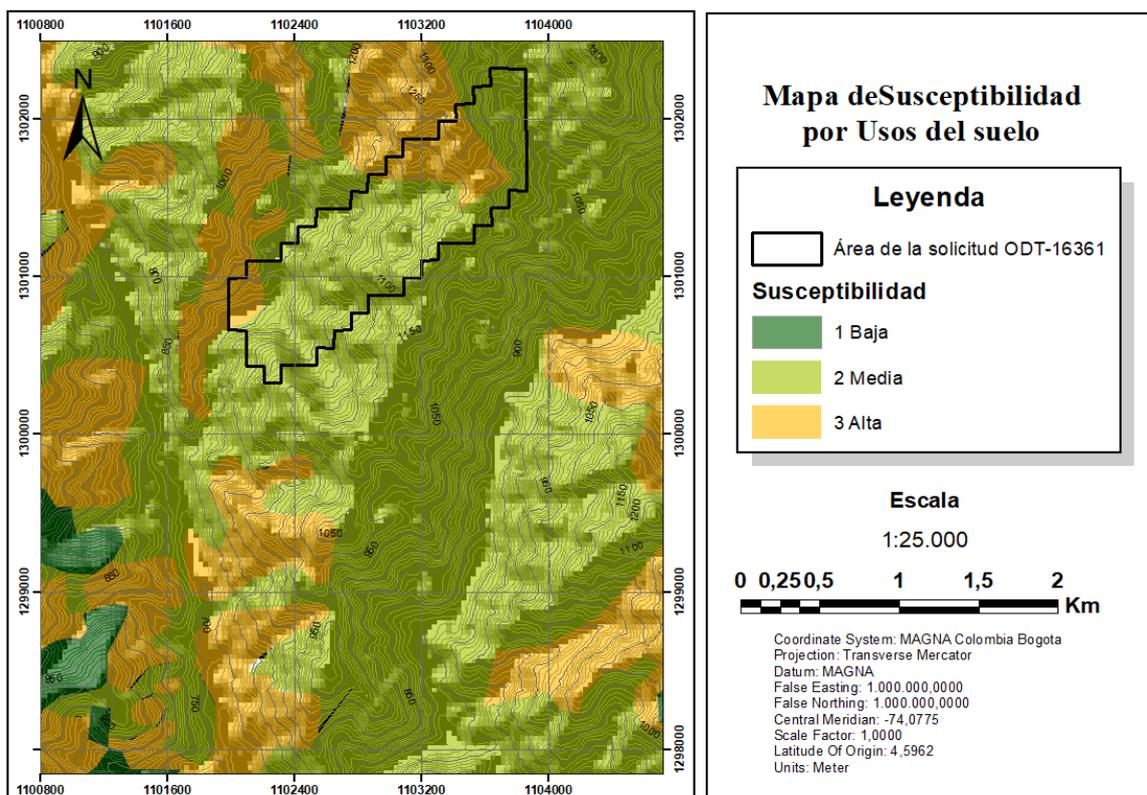
*Nota: tomado del plan de ordenamiento territorial del municipio de Rionegro Santander, año 2003*

**Figura 34***Nivel de riesgo según el uso de suelo.*

Indicador	Tipo de suelo	Uso de suelo	Nivel de riesgo
Tipo de suelo.	Relieve abrupto y escarpado, rocoso con falta de cobertura vegetal 70-100 %. Zonas muy inestables, roca intensamente meteorizada, fracturada y saturada. Zonas de intensa erosión.	Áreas urbanas comunicadas por redes.	Muy alto
	Relieve de mesetas, suelo compuesto por arena eólica. Falta de cobertura vegetal 70-40 %. Zonas inestables, macizos meteorizados muy fracturados, depósitos no consolidados, materiales parcialmente muy saturados, intensa erosión. Roca intensamente meteorizada, fracturada y saturada en zonas de intensa erosión.	Cultivo e industrial.	Alto
	Relieve rocoso escarpado, suelo granular fino y arcilloso sobre grava aluvial o coluvial. Falta de cobertura vegetal 20-40 %. Zonas de inestabilidad marginal, ladera con erosión intensa o materiales parcialmente saturados y moderadamente meteorizados.	Plantaciones forestales.	Medio
	Relieve plano u ondulado. Suelos compuestos por afloramientos rocosos y estratos de grava. Falta de cobertura vegetal 0 - 20 %. Ladera con materiales fracturados, con poca meteorización moderada, parcialmente erosionadas no saturadas.	Pastos naturales.	Bajo

**Figura 35**

*Mapa de susceptibilidad por usos del suelo.*



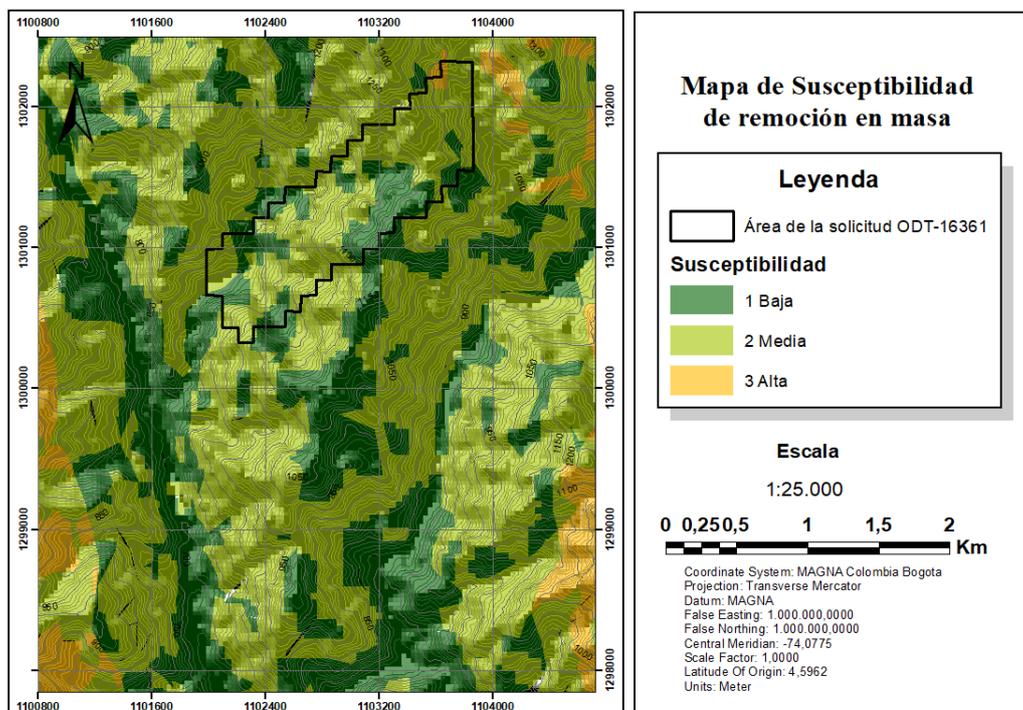
**8.2.4.5 Susceptibilidad de remoción en masa.** El cálculo de la susceptibilidad o vulnerabilidad se realiza mediante la suma ponderada de cada una de las variables anteriormente mencionadas, donde a cada una de ellas se le asigna un peso. Para la geomorfología se tuvieron en cuenta los parámetros de unidades geomorfológicas e inclinación de la pendiente, estos parámetros fueron sumados dando un peso a cada uno de 0.5 y el resultado es la vulnerabilidad por geomorfología que recibe un peso de 36% según lo recomendado por el servicio geológico colombiano en su metodología para la zonificación general del terreno a los movimientos en masa. La variable geología recibió un peso de 21% o 0.21, mientras que los tipos de suelo recibieron un 26% y finalmente los usos de suelo recibieron un peso de 17% o 0.17 según las recomendaciones del servicio geológico colombiano. Una vez asignados los pesos de cada parámetro se procede a realizar la suma mediante el uso de la herramienta ArcMap del software ArcGIS 10.5 dando como resultado el

## GEOLOGIA DE LA SOLICITUD ODT-16361, RIONEGRO

mapa de susceptibilidad por remoción en masa presentado en la Figura 36.

**Figura 36**

*Mapa de susceptibilidad de remoción en masa*



Mediante el proceso realizado se obtuvieron tres rangos de vulnerabilidad; la vulnerabilidad alta tiene una distribución reducida limitándose a algunas zonas hacia el E y W. por otro lado la vulnerabilidad media es la más predominante en la zona localizándose en zonas de pendientes abruptas a escarpadas, sobre espolones y facetas triangulares. Finalmente, las zonas de vulnerabilidad baja se distribuyen a lo largo de las zonas con una pendiente poco inclinada sobre los depósitos aluviales y en las cimas de las geformas de pendientes escarpadas ya que en estas áreas la pendiente se hace más suave.

#### 8.2.4.6 Factores detonantes.

**8.2.4.6.1 Susceptibilidad por precipitación.** De acuerdo con el atlas climatológico del IDEAM la zona de estudio se caracteriza por tener un clima templado semi húmedo con una precipitación media a anual ubicado el rango de los 1000 a 1500 mm como se

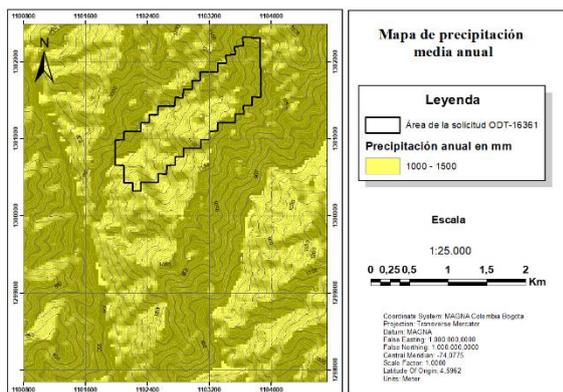
## GEOLOGIA DE LA SOLICITUD ODT-16361, RIONEGRO

muestra en la Figura 37, por otro lado, la precipitación media en 24h para el área de estudio es de 75 a 100 mm por lo que la vulnerabilidad por precipitación según la clasificación utilizada por Sierra y Duran es Muy alta como se muestra en la Figura 38.

La temperatura media anual se encuentra entre los 11 y 24 °C, siguiendo los periodos secos y húmedos característicos del régimen bimodal las temperaturas más altas se registran entre marzo y mayo. Por otro lado, la humedad relativa en la zona se estima entre el 74% y 85% observando valores ligeramente mayores en los meses de abril y mayo y octubre y noviembre. (POT, 2003)

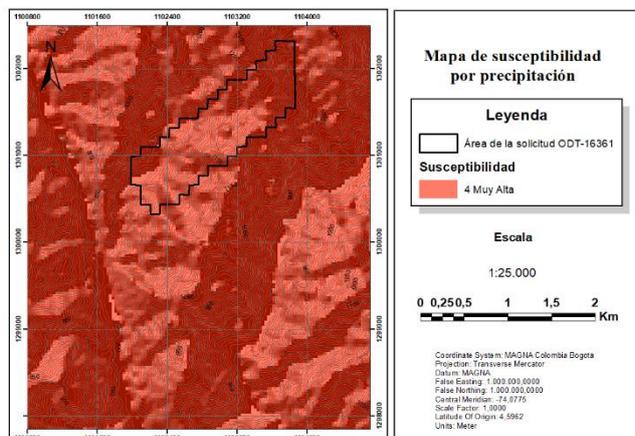
**Figura 37**

*Mapa de precipitación media anual.*



**Figura 38**

*Susceptibilidad de remoción en masa por precipitación.*



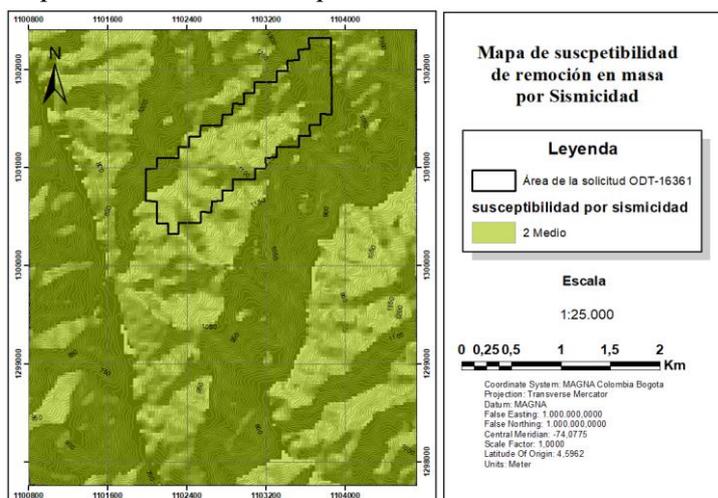
**8.2.4.6.2** *Susceptibilidad por sismicidad.* Dependiendo de sus características

## GEOLOGIA DE LA SOLICITUD ODT-16361, RIONEGRO

morfológicas, coberturas, litologías y usos de suelo una ladera o un talud puede ser estable a marginalmente estable; en ese orden de ideas la ocurrencia de un sismo dependiendo de su magnitud puede desencadenar movimientos del terreno lo que puede generar daños considerables (Khurama, Velandia, et al., 2014). El servicio geológico colombiano en la memoria explicativa del mapa de amenaza de remoción en masa de la plancha 109 señala que “El elemento físico para establecer las posibilidades de influencia de los sismos corresponde a la Aceleración Máxima Horizontal PGA a nivel de roca calificada con base en su contribución a la generación de movimientos en masa”; con base en la aceleración máxima horizontal se generó un mapa de detonante sísmico donde los valores para el área de interés de este documento se ubican en la categoría de vulnerabilidad media como se muestra en la figura 39.

**Figura 39**

*Mapa de vulnerabilidad por detonante sísmico.*



*Nota: tomado de “memoria explicativa de la zonificación de la susceptibilidad y amenaza relativa por movimientos en masa escala 1:100000 plancha 109 Rionegro.*

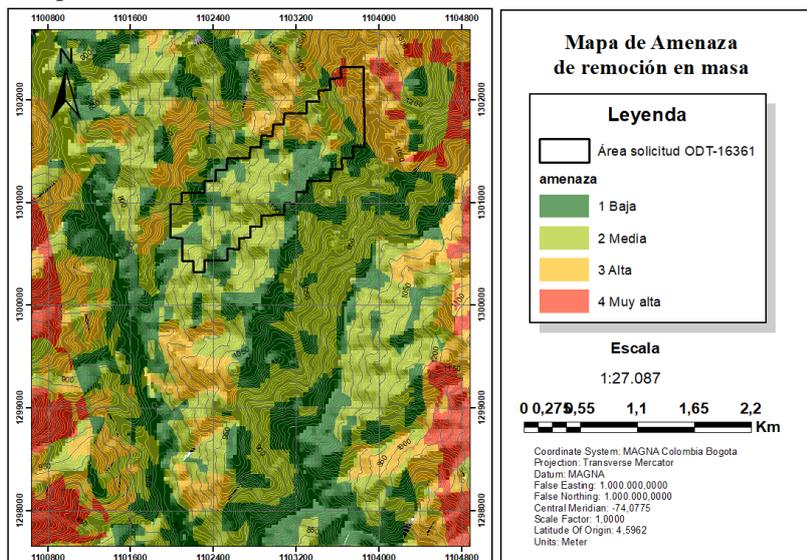
**8.2.4.7 Mapa de Amenaza de remoción en masa.** El mapa de amenaza de remoción en masa fue obtenido mediante la adición del mapa de susceptibilidad general presentado en la Figura 37 con los factores detonantes que en este caso fueron detonante sísmico y detonante por precipitación, como resultado se obtuvieron 4 categorías de amenaza; amenaza muy alta, alta, media y baja como se muestra en la Figura 40.

## GEOLOGIA DE LA SOLICITUD ODT-16361, RIONEGRO

Las zonas donde se registra un grado de amenaza muy alta se concentran principalmente hacia el SW y el E sobre facetas triangulares con pendientes de entre 30 y 45°, en donde las rocas ígneas al E y sedimentarias al W dan lugar a la formación de suelos franco-arcillosos y la cobertura vegetal está constituida en su mayoría por pastos mejorados, la categoría de amenaza muy alta abarca el 13.9% del área total. La Amenaza Alta se concentra en las laderas de las facetas triangulares y los espolones identificados en el área de estudio donde las pendientes están entre los 30, 45 y más de 45°, con una cobertura vegetal conformada por pastos mejorados y una textura de suelos franco arcillosa, se da tanto en rocas ígneas al E de la falla Bucaramanga como en rocas sedimentarias al W de esta, la susceptibilidad alta abarca el 24.5% del área total.

**Figura 40**

*Mapa de amenaza de remoción en masa.*



La categoría de Amenaza media es la más ampliamente extendida a lo largo del terreno, abarcando un 36,1% del área total; se encuentra en zonas donde hay cultivos permanentes y cultivos permanentes con sombrío sobre las laderas de facetas triangulares y espolones en zonas donde las pendientes son menores que en aquellas donde se encuentra una vulnerabilidad alta a muy alta, esta categoría se da tanto en la formación bocas, el neis de Bucaramanga y las rocas ígneas identificadas en el terreno, adicionalmente se encuentra en suelos franco arcillosos y

## GEOLOGIA DE LA SOLICITUD ODT-16361, RIONEGRO

franco arenosos con clastos de roca.

Las zonas de amenaza baja constituyen el 25.5% del terreno total, se concentran principalmente en áreas de ladera suave en las partes más bajas de las geoformas donde las pendientes están entre los 0 y 15° y se encuentran principalmente pastos mejorados y cultivos permanentes como cobertura vegetal.

### 8.3 Petrografía

#### 8.3.1 Muestra AD-118-1- Granodiorita alterada

La roca corresponde a una roca ígnea plutónica holocristalina de grano grueso, cuyos feldespatos están intensamente alterados principalmente a sericita, con presencia de biotita que ha sido alterada a moscovita en variedades finogranulares y gruesogranulares. Atravesada por venillas de cuarzo de orden centimétrico (7 mm y 7.1 mm) con cristales dispuestos perpendicularmente a las paredes de las venillas.

#### Figura 41

Muestra de mano AD-118-1



Las fases minerales identificadas son:

#### Sericita (Ser) 65.1%:

Se presenta como producto de la alteración de los feldespatos en forma de agregados finos distribuido de manera homogénea a lo largo de toda la muestra. Se encuentra un relicto de feldespato (Fk) subhedral casi completamente reemplazados por sericita (Figura 42 A, B).

## GEOLOGIA DE LA SOLICITUD ODT-16361, RIONEGRO

Debido a la alteración tan pervasiva que sufre la muestra no puede distinguirse entre feldespato alcalino y plagioclasa, sin embargo, en el DRX se pudo detectar la presencia de sanidina, microclina y albita (Tabla 3).

**-Cuarzo (Qtz) 20.3%:**

Se presentan cristales anhedrales muy limpios de hasta 3mm incoloros de relieve muy bajo. En nicoles cruzados se observa que presenta extinción ondulosa y colores de interferencia hasta amarillo de segundo orden (Figura 46 A,B).

**-Moscovita (Ms) 5.1%:**

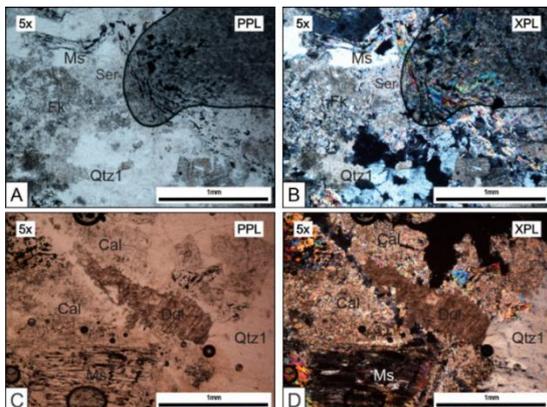
Se presenta en dos variedades:

Variedad finogranular: Se encuentra como reemplazamiento total de feldespato a modo de agregados muy finos y de relieve variable, aunque mayor que el cuarzo. Alcanza colores de interferencia amarillo de segundo orden.

Variedad gruesogranular: Se observa a manera de un reemplazamiento pseudomorfo de biotitas con exsoluciones de rutilo con textura sagenítica. El tamaño de los cristales alcanza 2mm. Es incolora de hábito micáceo bien desarrollado de relieve variable y colores de interferencia de segundo y tercer orden (Figura 44 A, B).

**Figura 42**

*Microfotografías de la muestra AD-118-1*



## GEOLOGIA DE LA SOLICITUD ODT-16361, RIONEGRO

*Nota. [A-B] Microfotografía donde se evidencia la alteración de los feldespatos potásicos a sericita, así como los cristales anhedral de cuarzo y de moscovita. [C-D] En el centro un cristal anhedral de dolomita, rodeado de cristales de calcita y la primera generación de cuarzo. Ser=Sericita; Ms=Moscovita; Fk=Feldespato potásico; Cal=Calcita; Dol=Dolomita; Qtz1=Cuarzo 1*

**-Calcita (Cal) 2.5%:**

Individuos incoloros, de relieve variable generalmente presentes en forma de agregados de grano fino (Figura 42 C,D).

**-Dolomita (Dol) 2%:**

Individuos de color pardo claro subidioblásticos de relieve variable (más que el cuarzo) en ocasiones con buen clivaje rombohedral. Presenta colores de interferencia beige. El tamaño de los cristales varía entre 300µm y 1.1mm (Figura 42 C,D).

**-Rutilo (Rt) 1%:**

Los individuos se presentan como exoluciones en las biotitas alteradas en forma de textura sagenítica, de relieve muy alto (Figura 44 A,B).

**-Clinzoisita (Csz) 1%:**

Se observó un cristal cerca de una de las vetillas de cuarzo junto con dolomita y cuarzo. Subidioblástico y de relieve alto, incoloro sin clivaje con un color de interferencia gris anómalo de primer orden. Posee una macla simple (Figura 51 C, D).

**-Zircon (Zr) 1%:**

Individuos homeoblásticos, subidioblásticos incoloros prismáticos, de relieve alto y muy alta birrefringencia (Figura 43 A,B).

**-Esfena (Ef) 1%:**

Individuos homeoblásticos incoloros, con forma de rombo y relieve muy alto, se

## GEOLOGIA DE LA SOLICITUD ODT-16361, RIONEGRO

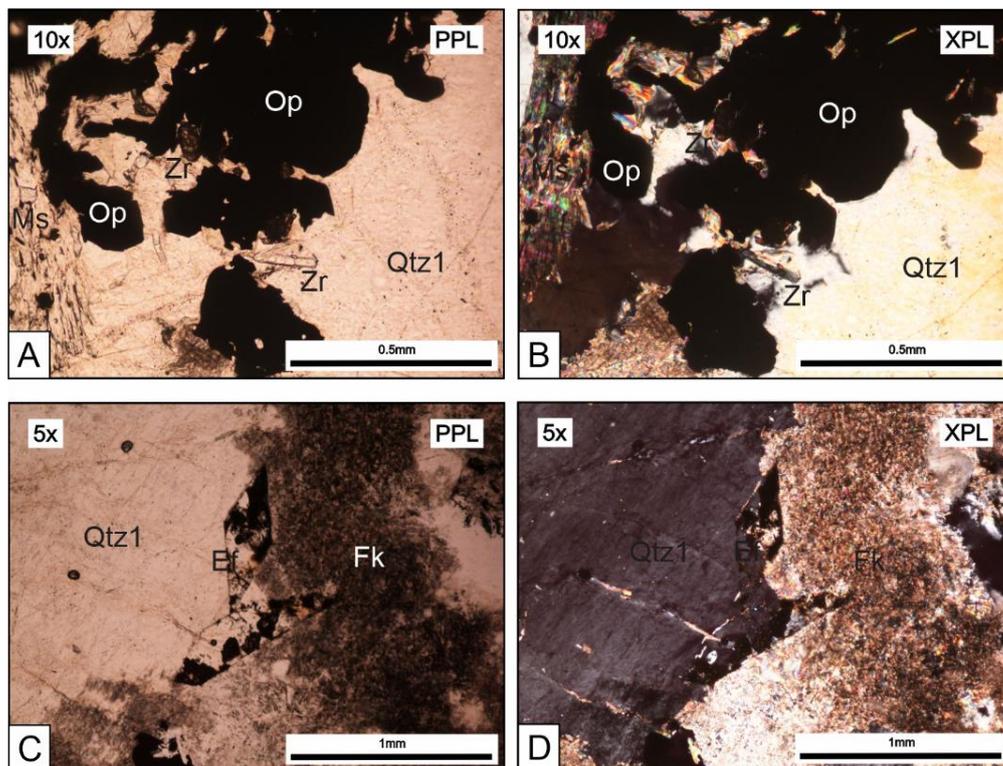
concentra en una sola área de la muestra (Figura 43 C,D).

**-Opacos (Op) 1%:**

Individuos opacos que presentan formas distintas, son mas abundantes en la roca alterada que dentro de la venilla (Figura 43 C,D).

**Figura 43**

*Microfotografías de la muestra AD-118-1*



*Nota. [A-B] Microfotografía donde resalta la presencia de minerales opacos anhedrales y algunos cristales de zircón de 0.1mm de largo. [C-D] En el centro dos cristales de esfena, un silicato de titanio y calcio rodeado de la primera generación de cuarzo y de feldespato potásico visiblemente. Ms=Moscovita; Fk=Feldespato potásico; Qtz1=Cuarzo 1; Zr=Zircón; Ef=Esfena, Op=Opacos.*

**Minerales en venillas**

**Cuarzo (Qtz2) 98%:**

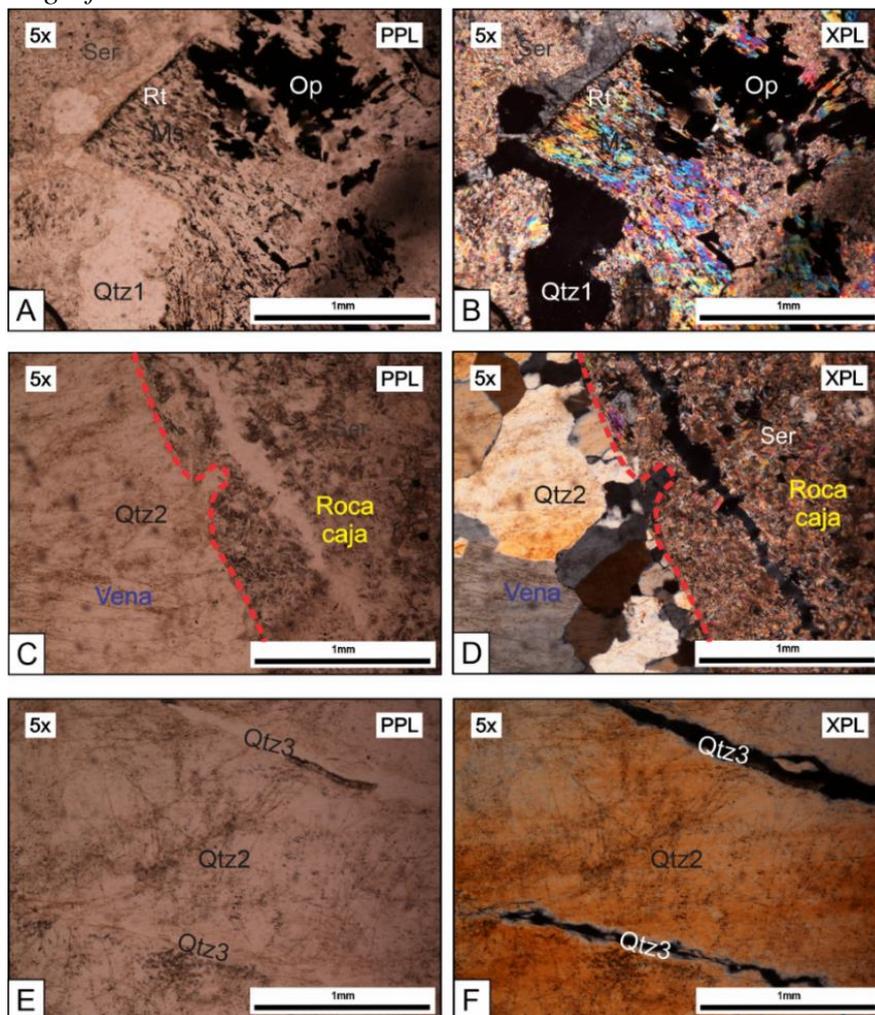
Segunda generación de cuarzo ubicado en las venas. El cuarzo que se presenta como individuos subidioblasticos, incoloro de relieve bajo, con numerosas inclusiones a menudo orientadas perpendicularmente a las paredes de la venilla. Se observan cristales de menor

## GEOLOGIA DE LA SOLICITUD ODT-16361, RIONEGRO

tamaño en el contacto entre la roca caja y la venilla (Figura 44 C, D). En los cristales más grandes de cuarzo en ocasiones encierran a cristales más pequeños orientados también de manera perpendicular a la venilla (Qtz3) (Figura 44 E, F).

**Calcita (Cal) 1%:** Individuos subidioblasticos presentes segunda generación de calcita2.

**Opacos (Op) 1%:** Individuos opacos que presentan formas distintas ubicados dentro de la venilla.

**Figura 44***Microfotografías de la muestra AD-118-1*

*Nota. [A-B] Microfotografía donde se observa una moscovita a manera de un reemplazamiento pseudomorfo de biotitas con exsoluciones de rutilo con textura sagenítica. [C-D] Contacto entre la vena dominada por la segunda generación de cuarzo y la roca caja la cual está altamente alterada a sericita*

## GEOLOGIA DE LA SOLICITUD ODT-16361, RIONEGRO

[E-F] Vena compuesta por la segunda generación de cuarzo con pequeñas inclusiones perpendiculares a la venilla formada por la tercera generación de cuarzo. Ser=Sericita; Ms=Moscovita; Op=Opacos; Rt=Rutilo; Qtz1=Cuarzo 1; Qtz2=Cuarzo 2; Qtz3=Cuarzo 3, .

El análisis de DRX en la muestra del granitoide reporta la presencia de cuarzo, moscovita, microclina, albita, calcita, illita, sanidina, pirita, caolinita y clinocloro.

**Tabla 3**

*Resultados de análisis de DRX para la muestra AD-118-1*

	PDF No	Nombre	Cantidad
<b>Cristalino</b>	01-089-6427	Albita	1,50%
	01-070-3752	Albita	5,90%
	01-086-2335	Calcita, Mg	4,70%
	01-074-1137	Clinocloro	0,20%
	01-070-8135	Fluorapatita	....
	01-078-5137	Illita- 1M	3,00%
	01-075-1593	Caolinita-1A	0,20%
	01-083-1895	Microclina	13,80%
	01-080-3033	Moscovita-2M1	18,00%
	01-071-5207	Pirita	1,10%
	01-089-3057	Pirita	....
	01-083-2465	Cuarzo, bajo	50%
	01-073-6603	Sanidina	1,60%

### Condiciones de alteración hidrotermal

De acuerdo con el diagrama de los ensambles mineralógicos propuesto por Corbett & Leach, (1998) la asociación sericita-carbonato-cuarzo, es estable bajo unas condiciones de temperatura medias y de un pH intermedio.

#### **8.3.2 Muestra AD-118-2 veta mineralizada**

En esta muestra se distinguieron como minerales formadores de roca cuarzo, plagioclasa y feldespato potásico, como minerales secundarios o de alteración sericita y epidota y como minerales accesorios algunos minerales opacos probablemente pirita y calcopirita de acuerdo con lo observado en muestra de mano y también zircones.

#### **Cuarzo (Qtz)**

## GEOLOGIA DE LA SOLICITUD ODT-16361, RIONEGRO

Se presenta en agregados granulares con inclusiones de zircon y con inclusiones fluidas, en contacto neto con plagioclasas altamente alteradas a sericita y epidota, cristales subhedrales, incoloro de relieve bajo y colores de interferencia amarillo y gris de segundo orden como se muestra en la Figura 45 A, B, E y F

### **Feldespatos potásicos (Kfs)**

Este mineral es bastante escaso en la sección, presenta un relieve bajo y una apariencia manchada que permite distinguirlo del cuarzo, presenta colores de interferencia de gris a amarillo de segundo orden, macla difícil de apreciar. Se encuentra en contacto con minerales opacos, cuarzo y sericita, en la Figura 45 A y B es posible observar cómo se encuentra el mineral en lamina delgada, así como sus contactos.

### **Plagioclasa (Pl)**

Las plagioclasas se encuentran fuertemente alterada, en su mayoría se observa una alteración a sericita, aunque también se puede encontrar epidota, es difícil determinar su porcentaje debido a la intensidad de la alteración. Se presenta en forma de cristales euhedrales con un relieve bajo y macla de Carlsbad, este mineral se observa en la Figura 45 E y F donde es posible visualizar su macla tipo Carlsbad es probable que en la figura 45 C y D se observe también una plagioclasa totalmente alterada.

**Calcita (Cal)** La calcita se presenta en forma de cristales subhedrales, con relieve moderado a alto, exhibiendo en algunos cristales su exfoliación en tres dimensiones se encuentra en contacto con cuarzo, minerales opacos, sericita y epidota.

### **Minerales de alteración**

El mineral de alteración predominante es la sericita de grano fino (Ser) que se encuentra reemplazando cristales de plagioclasa, en general este es el mineral más abundante

## GEOLOGIA DE LA SOLICITUD ODT-16361, RIONEGRO

en toda la sección, aunque predomina el grano fino también es posible ver algunos cristales de mayor tamaño, pero son escasos se puede apreciar en la Figura 45 A, B, C y D.

Por otro lado, la epidota se encuentra también como mineral de alteración de la plagioclasa en menor medida que la sericita, se observa principalmente en forma de cristales euhedrales alargados con un relieve alto, así como colores de interferencia altos como se observa en la Figura 45 F.

Otro mineral de alteración identificado en la sección delgada es el rutilo que se encuentra en forma de agregados de hábito acicular, color pardo oscuro casi negro, el cual se encuentra asociado con cuarzo y sericita como se muestra en la Figura 45 A, B, C y D.

### **Minerales accesorios**

Los minerales accesorios identificados en la muestra son opacos y zircones, los minerales opacos de acuerdo con los análisis de difracción de rayos X y las observaciones de campo podrían estar representados por sulfuros como pirita y calcopirita. Por otro lado, los zircones se presentan en forma de cristales prismáticos alargados con un relieve muy alto y colores de interferencia de tercer orden.

En la zona mineralizada se tomó una muestra para realizar análisis cuantitativo de fases cristalinas por difracción de rayos X, con el fin de conocer con más detalle la composición mineral de la roca ya que en sección delgada debido a su grado de alteración no es posible distinguir con certeza algunos minerales; los resultados se muestran en la Tabla 4.

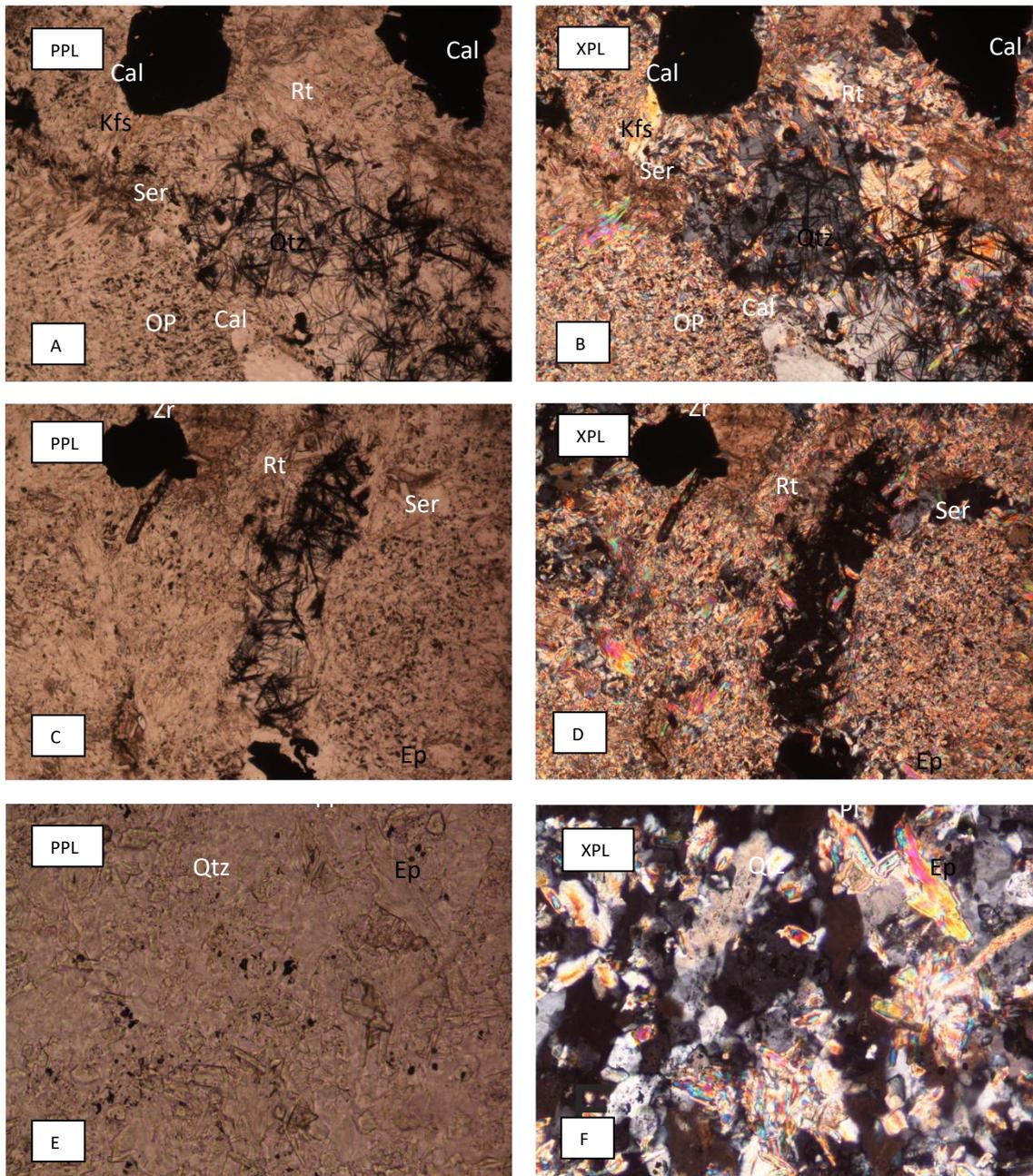
Estos resultados permiten saber que la plagioclasa identificada en sección delgada es plagioclasa sódica o albita, el feldespato potásico está representado por ortoclasa. Con base en estos resultados es de esperar que los minerales opacos sean sulfuros muy posiblemente pirita y calcopirita ya que estos minerales fueron observados en campo en muestra de mano. Estos

## GEOLOGIA DE LA SOLICITUD ODT-16361, RIONEGRO

minerales accesorios podrían estar relacionados con el enriquecimiento de metales preciosos observado en la zona en donde se observa un contenido de oro de hasta 70g/ton y un contenido de plata de 50g/ton según lo reportado en los análisis de ensayo al fuego.

**Figura 45**

*Microfotografías de la sección delgada realizada a una muestra de la zona mineralizada.*



*Nota: Donde se observan los distintos minerales identificados en la roca, así como la asociación entre ellos.*

**Tabla 4**

*Resultados de difracción de rayos X para la veta mineralizada muestra AD-118-2*

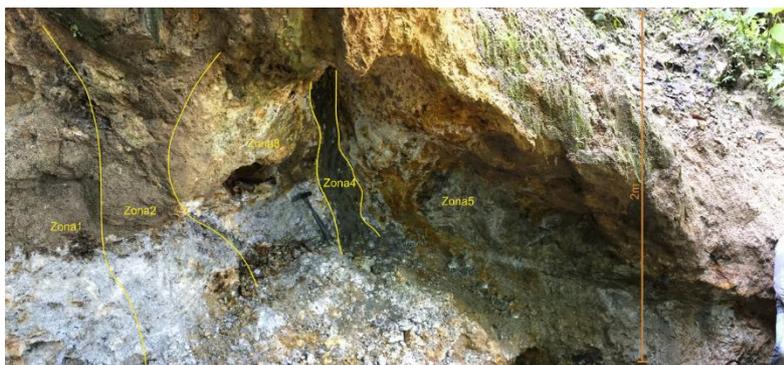
	PDF No	Nombre	cantidad
<b>Cristalino</b>	01-070-3752	Albita	2,70%
	01-086-2335	Calcita, Mg	0,70%
	01-085-0849	Calcita	2,80%
	01-074-1905	yeso	2,50%
	01-083-1895	Microclina	5,30%
	01-080-3033	Moscovita-2M1	14,10%
	01-089-8572	ortoclasa	....
	01-071-5207	Pirita	5,40%
	01-075-0443	Cuarzo	50,20%
	01-076-8335	Moscovita-2M1	16,30%

#### **8.4 Alteraciones y mineralizaciones asociadas**

En el afloramiento ubicado en la parte central de la denominada Zona B en las coordenadas X: 1102942E Y: 1301000N se observa una sección de interés en la cual se logran discriminar 5 zonas en las que es posible apreciar distintas características, alteraciones y mineralizaciones por lo que se decide realizar un análisis y descripción más a detalle de cada una de estas zonas.

#### **Figura 46**

*Afloramiento principal de la Zona B ubicado en X: 1102942E Y: 1301000N*



*Nota : donde es posible observar 5 zonas donde se evidencian distintas alteraciones de interés.*

#### **Zona 1: Roca caja**

Se observa intrusivo plutónico granodiorítico de granulometría equigranular con presencia de venas de cuarzo lechoso con pirita diseminada y calcopirita. Adicionalmente presenta una oxidación supergena representada por sulfuros de hierro como limolitas

## GEOLOGIA DE LA SOLICITUD ODT-16361, RIONEGRO

principalmente hematita y goetita. Las venas son de aproximadamente 1cm, tabulares y poco sinuosas. Presenta una alteración sericitica baja a moderada.

### **Figura 47**

*Granodiorita que presenta una alteración sericitica baja a moderada*



### **Zona 2**

Se observa 1,20m de intrusivo granodiorítico intensamente alterado predominado por cuarzo y sericita muy pervasiva, la roca caja presenta oxidos de cobre como pirita y oxidos de hierro como calcopirita. El grado de alteración hace difícil reconocer la textura y composición original de la roca. La ocurrencia de sulfuros es moderada.

### **Zona 3**

Se observa el intrusivo plutónico que exhibe una alteración muy intensa de cuarzo y sericita. A diferencia de la anterior esta tiene más presencia de cuarzo que de sericita, pero es la alteración pervasiva de la roca. Esta zona se diferencia de la anterior en que aquí predominan sulfuros principalmente de pirita de grano muy fino que probablemente posean buenos valores de mineralización de oro. Se evidencia una superposición entre la alteración cuarzo-sericita y

## GEOLOGIA DE LA SOLICITUD ODT-16361, RIONEGRO

una alteración supérgena.

**Figura 48**

*Granodiorita*



*Nota: logra evidenciar una sobreposición de una pervasiva alteración cuarzo-sericitica y una alteración supérgena.*

**Zona 4 - Enriquecida**

Se observa una franja aproximadamente de 30cm de espesor de pirita fina diseminada posiblemente asociada con marcasita y sulfuros de cobre y sulfuros de plomo. Esta zona mineralizada presenta dos halos fallados con presencia de gauge de falla posiblemente se asume una zona de cizalla enriquecida y asociada a un enriquecimiento de sulfuros de hierro principalmente de carácter masivo.

**Figura 49**

*Franja de 30 centímetros de pirita diseminada*



### Zona 5

Al margen derecho de la zona enriquecida se observa el intrusivo granodiorítico moderadamente alterado con alteración cuarzo sericita, pero adicionalmente presenta una mineralización rica en sulfuros de hierro y cobre ya sea diseminado en venas de 1cm. Se observan sulfuros de cobre por enriquecimiento supergeno tales como covelina, calcosina y bornita

### Figura 50

#### *Muestra de granodiorita*



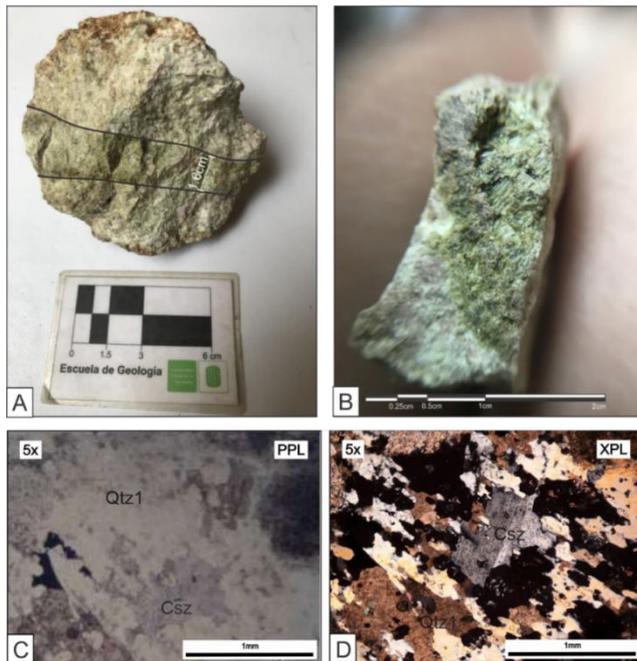
*Nota: donde se observa una vena de cuarzo lechoso con presencia de bornita*

#### 8.4.1 *Evento de Epidotización*

Esta alteración se observa en muestra de mano en forma de venas que pueden llegar a tener varios centímetros de espesor que intruyen la granodiorita presentando una alteración hidrotermal de tipo epidotización. La intensidad de esta alteración es relativa y es posible verla en zonas específicas a largo y ancho de esta unidad. A través del análisis petrográfico se observa la ocurrencia de clinzoicita en la muestra AD-118-1 (Figura 51).

**Figura 51**

*Evidencias en muestra de mano y sección delgada de epidotización*



*Nota. [A-B] Muestra de mano en donde se observa una vena con epidota intruyendo a la granodiorita. [C-D] Individuo subidioblastico de clinozoicita (Csz) maclada en la sección AD-118-1 que corresponde la*

**8.4.2 Evento de Cloritización**

Es un evento que se diferenció únicamente a escala macroscópica, el cual se caracteriza por la cloritización parcial de biotita presente en forma de vetillas dentro de la granodiorita. En este evento se produce una disminución parcial de SiO<sub>2</sub> y TiO<sub>2</sub> y total de K<sub>2</sub>O mientras que al mismo tiempo se da aumento progresivo de FeO y MgO al igual que el componente volátil (Rong y Wang, 2016).

**Figura 52**

*Venas de biotita alterando a clorita relleno de fracturas en la granodiorita*

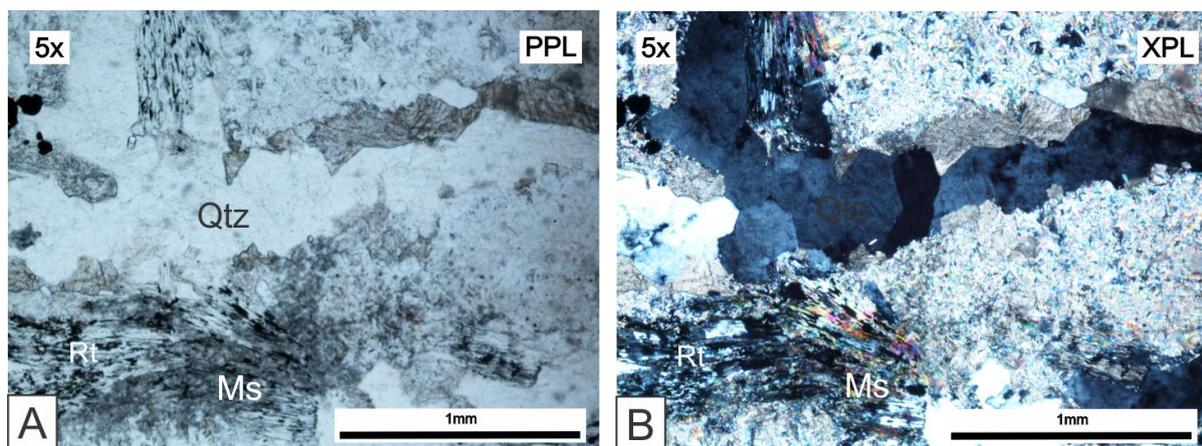


### 8.4.3 Evento de muscovitización y alteración mc+qtz+rut

Fue posible identificarlo a escala microscópica en la roca con una pervasiva alteración cuarzo-sericitica próxima a la veta mineralizada en la que ocurre un reemplazamiento co-orientado de muscovita a partir de biotita. Este evento se da ya que el fluido hidrotermal, que posee contenidos de Si y Al puede penetrar a lo largo de la exfoliación de la biotita, desplazando el Fe, Mg y Ti, lo que resulta en la transformación de biotita a moscovita. (Rong & Wang, 2016). Como mineral accesorio de esta alteración se ha reconoce el rutilo que se presenta en formas prismáticas hipidiomorfas y en general se encuentran orientados conforme al clivaje de la moscovita.

#### Figura 53

muscovitización y alteración mc+qtz+rut.



*Nota Se evidencia un reemplazamiento de muscovita a partir de la biotita*

### 8.4.4 Evento de alteración Qz – Ser

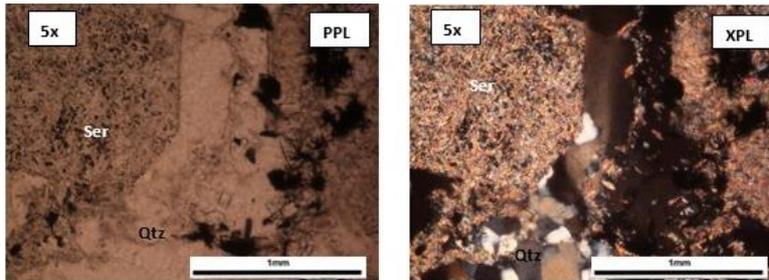
Es la alteración más desarrollada en cuanto a intensidad, ya que afectada de manera generalizada la roca caja que corresponde a la granodiorita. Este evento puede definirse como alteración filica o cuarzo-sericitica y se ve representada por la neo-formación de cuarzo y sericita (Figura 54). Esta alteración se debe esencialmente a la desestabilización de los feldspatos en presencia de H<sup>+</sup>, OH<sup>-</sup>, K y S, para formar cuarzo, mica blanca y algunos sulfuros como pirita, calcopirita. (Pirajno, 2009). En la muestra AD-118-1 y AD-118-2 es posible

## GEOLOGIA DE LA SOLICITUD ODT-16361, RIONEGRO

observar la superposición de esta alteración a las anteriormente mencionadas. También se evidencia su intensidad clasificándose como muy pervasiva, destacándose la presencia de sericita y cuarzo tanto pre-existentes como nuevos cristales, óxidos y opacos.

**Figura 54**

Evento de alteración Qz – Sr



*Nota: Evidencia del evento de alteración cuarzo-sericitica en sección delgada*

**8.4.5 Evento de alteración supergena**

La alteración supérgena no fue identificada en sección delgada sin embargo por observaciones de campo se establece que los minerales asociados son óxidos de hierro. Esta alteración se distribuye sobre áreas muy específicas de la roca donde se observa que esta toma una coloración rojiza debido a la formación de limolita; esta coloración se encuentra asociada a las zonas donde la roca presenta sericitización.

**Figura 55**

*Evento de alteración supergena Zona oxidada*



*Nota: se evidencia alteración supergena superpuesta en alteración cuarzo - sericitica.*

### **8.5 Resumen de la evolución hidrotermal de la zona**

En el área se identifican rocas ígneas generadas a partir de magmas calco alcalinos ricos en potasio formadas en un ambiente de arco magmático asociado a una zona de subducción. Como producto de este magmatismo se generan dos fases ígneas donde la principal corresponde a una granodiorita biotítica, porfirítica de matriz fanerítica y la fase posterior corresponde a una cuarzomonzonita de textura fanerítica, inequigranular. Las dos unidades son afectadas por procesos hidrotermales.

En la granodiorita se observan 4 eventos hidrotermales, los cuales se superponen entre sí, debido a la escasez de secciones delgadas es difícil determinar cuál evento es primero, por lo que se enumeraron según su profundidad. En primera instancia se tiene un evento de alteración potásica representado en el área por la presencia de venillas milimétricas de biotita primaria que posteriormente sufre cloritización.

Los eventos de alteración hidrotermal que se han desarrollado sobre ellas corresponden a un evento donde se generó una alteración propilítica que es evidenciada por procesos de epidotización en forma de venas y la presencia de minerales como la clinozoicita que fue posible observar en el análisis petrográfico, al igual que procesos de cloritización observable por la alteración de vetillas de biotita a clorita que pudieron detallarse a escala de afloramiento.

Se observa de igual forma un evento de alteración que fue definido como Ms-Qtz-Rt en donde la moscovita se generó a partir de la alteración hidrotermal que sufrió la biotita primaria de la roca, lo que puede observarse por medio del análisis petrográfico al observarse relictos de lo que era el individuo primitivo de la biotita. Adicionalmente, se observa una asociación directa de los cristales de rutilo a la moscovita ya que se encuentran orientados conforme al clivaje de los individuos de moscovita, por esta razón podría afirmarse que la fuente de titanio para la generación de los cristales de rutilo provino directamente de la

## GEOLOGIA DE LA SOLICITUD ODT-16361, RIONEGRO

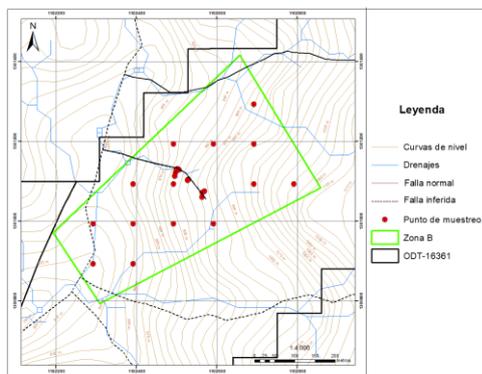
liberación de titanio por parte de la biotita primaria que fue responsable de que se diera su alteración a moscovita. Con base en la información que fue recolectada en campo no fue posible determinar cuál de estos eventos hidrotermales ocurrió primero. Sin embargo, es posible observar un evento de alteración cuarzo sericitica (fílica) que se encuentra sobreponiéndose a las demás alteraciones mencionadas anteriormente. Esta alteración cuarzo sericitica puede observarse desde una intensidad baja, moderada, hasta muy pervasiva caso en el cual se produce la destrucción parcial y en algunos casos total de la mineralogía que interactúa con ese fluido hidrotermal. Este tipo de alteración hidrotermal ha sido bien registrada en otros cuerpos que hacen parte el denominado Grupo Platónico de Santander, más exactamente en el Batolito de Mogotes en el cual Ardila y Ayala (2017) reportan edades de  $184 \pm 1$ Ma para ese evento de alteración cuarzo-sericitica, lo que a su vez concuerda con el contexto de la geología regional y las dataciones realizadas por Mantilla *et al.*, (2013) y Van Der Lelij *et al.*, (2016) donde se sugiere que el magmatismo de edad Jurásico-Triásico que se evidencia en el Macizo de Santander termina aproximadamente alrededor de los  $\pm 197$ Ma lo que a su vez concuerda con los primeros registros de las rocas sedimentarias reportadas o lo que este evento pudo haberse dado al inicio del colapso del arco magmático. Y finalmente el último evento hidrotermal corresponde a alteración supérgena que se reconoce por la formación de óxidos de hierro.

### 8.6 Geoquímica

El método geoquímico de exploración o prospección respectivamente es un método indirecto. La exploración geoquímica se basa en el muestreo y análisis sistemático de uno o varios elementos químicos que se formaron de manera natural en un entorno con el fin de encontrar áreas prospectivas para un depósito mineral.

Se realizó una campaña mediante la toma de 27 muestras de roca para la cual se seleccionó un área de 20 hectáreas con base en las observaciones de campo hechas en las visitas anteriores a partir de la cual se seleccionó como el área más prospectiva dentro de la solicitud

ODT-16361.

**Figura 56***Mapa de la zona B con los puntos de toma de muestra para análisis de anomalías de oro y plata***8.6.1 Procesamiento geoestadístico**

El primer paso para hacer el análisis exploratorio de datos se basa en realizar una limpieza de data geoquímica y control de calidad en los datos proporcionados por el laboratorio. Con el objetivo de hacer el análisis estadístico por medio del software Minitab es necesario realizar primero el tratamiento de los valores que están por debajo del límite de detección a un valor numérico que pueda ser reconocido por el software. Para que sea posible realizar una sustitución debe cumplirse el criterio de que el total de valores de la columna de cada uno de los elementos debe ser menor al 15% del total de los datos. En caso de que esto no se cumpla y el porcentaje de los datos que están por debajo del límite de detección es mayor al 15% del total, ya no es correcto aplicar este método ni realizar esta sustitución por lo que se requeriría cambiar el método de detección mediante el cual se determinó la concentración del elemento o en su defecto, hacer un cambio a un laboratorio cuyo límite de detección ante esos elementos sea menor.

En base al total de datos de la concentración de los elementos a analizar en este caso oro y plata, se calcula el porcentaje de incidencia de aquellos datos que están por debajo del límite de detección (LD) siendo estos el 14.8% para el caso del oro y el 3.7% para la plata. En

## GEOLOGIA DE LA SOLICITUD ODT-16361, RIONEGRO

base a estos resultados es posible realizar el cálculo y sustitución de estos datos a valores numéricos por el 65% del Límite de detección como se ve en la (Tabla 5).

**Tabla 5** Resultados de concentración de oro (Au\_ppm) y plata (Ag\_ppm) en 27 muestras

ID	MUESTRA	X	Y	Tipo	Unidad	Au_ppm	Ag_ppm
1	AD-118-1-2	1,102,530.11	1,301,104.25	Roca	Grd	2.43	5.1
2	AD-118-2	1,102,528.85	1,301,102.91	Roca	Grd	74.33	0.1
3	AD-118-3	1,102,527.82	1,301,101.71	Roca	Grd	16.94	14.06
4	AD-119-1	1,102,570.03	1,301,074.25	Roca	Grd	3.06	3.64
5	AD-119-2	1,102,565.16	1,301,071.71	Roca	Grd	52.59	0.19
6	AD-135-1-2	1,102,502.42	1,301,129.51	Roca	Grd	2.84	8.39
7	AD-135-2	1,102,500.32	1,301,127.16	Roca	Grd	0.58	0.59
8	AD-135-3-2	1,102,498.86	1,301,121.64	Roca	Grd	1.67	0.66
9	AD-135-5	1,102,496.83	1,301,113.13	Roca	Grd	0.75	2.45
10	AD-V1-1	1,102,502.33	1,301,130.62	Roca	Grd	9.58	11.81
11	AD-V1-2	1,102,496.70	1,301,113.14	Roca	Grd	4.76	0.68
12	AD-V2	1,102,507.19	1,301,128.47	Roca	Grd	16.98	50.62
13	AD-V3	1,102,564.51	1,301,059.63	Roca	Grd	4.7	1.78
14	CAQ001R	1102293	1300993	Roca	Grd	0.1	3.39
15	CAQ002R	1102293	1300893	Roca	Grd	0.28	8.39
16	CAQ003R	1102393	1300893	Roca	Grd	0.48	4.54
17	CAQ005R	1102493	1300993	Roca	Grd	< 0.1	1.05
18	CAQ006R	1102393	1301093	Roca	Grd	< 0.1	< 0.1
19	CAQ008R	1102493	1301193	Roca	Grd	0.24	8.34
20	CAQ011R	1102593	1301193	Roca	Grd	0.14	3.46
21	CAQ007RA	1102493	1301093	Roca	Grd	0.25	1.25
22	CAQ009RA	1102593	1300993	Roca	Grd	0.37	6.47
23	CAQ013RA	1102693	1301093	Roca	Grd	0.64	1.55
24	CAQ015RA	1102693	1301293	Roca	Grd	0.14	0.75
25	CAQ004RB	1102393	1300993	Roca	Grd	< 0.1	5.45
26	CAQ012RB	1102693	1301193	Roca	Grd	0.28	1.38
27	CAQ014RB	1102793	1301093	Roca	Grd	< 0.1	2.72
<b>Numero de datos</b>						27	27
<b>Datos debajo del limite de deteccion</b>						4	1
<b>Porcentaje</b>						14.8%	3.7%
<b>Sustitucion por el 65% del LD</b>						0.065	0.065

*Nota. Tabla donde se presentan las concentraciones de Au y Ag obtenidas a partir de análisis de ensayo al fuego. Verificación de calidad de datos geoquímicos y procesamiento y sustitución de datos debajo del límite de detección.*

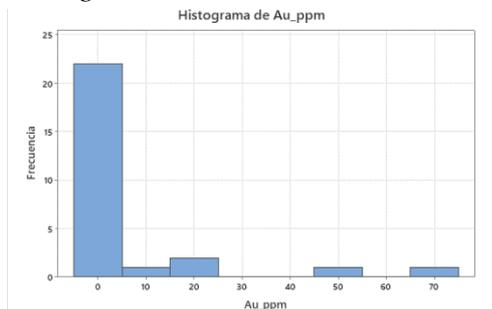
**8.6.1.1 Análisis univariable.** Los métodos de análisis univariable se utilizan para estudiar el comportamiento de las variables de forma individual. La ventaja principal de las distribuciones de frecuencias es que pueden llevarse a cabo sea cual sea la escala en que están medidas las variables que se deben analizar. Con el objetivo de verificar si de entrada los datos exhiben una distribución normal o si por otra parte están sesgados, se elaboraron histogramas a partir de los data geoquímica que ha sido verificada para así visualizar el comportamiento de los datos de cada elemento. Al observar las figuras 57 y 58 es posible ver que el oro y la plata no tienen una distribución normal, por lo que se requiere hacer una transformación que se

## GEOLOGIA DE LA SOLICITUD ODT-16361, RIONEGRO

define a partir la elaboración de una prueba de normalidad.

**Figura 57**

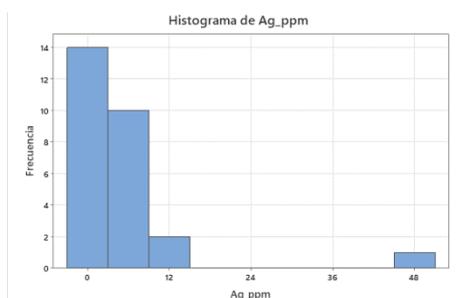
*Histograma de la distribución de tenores del oro (Au)*



*Nota: generado por el software Minitab*

**Figura 58**

*Histograma de la distribución de tenores de la plata (Ag)*



*Nota: generado por el software Minitab*

En esta etapa se realizaron pruebas de normalidad de cada una de las variables en función de la concentración del elemento con el objetivo de determinar qué tipo de transformación es la más adecuada. Esto se realiza mediante el análisis del coeficiente de Anderson Darling para pruebas de normalidad, mediante el cual se establece que los valores del coeficiente que se encuentren entre 0 y 1 son poseen una distribución normal.

La prueba de Anderson-Darling es una prueba no paramétrica sobre si los datos de una muestra provienen de una distribución específica. La fórmula para el estadístico determina si los datos (observar que los datos se deben ordenar) vienen de una distribución con función acumulativa F. La prueba de Anderson-Darling se basa en la comparación de la distribución de probabilidades acumulada empírica (resultado de los datos) con la distribución de

## GEOLOGIA DE LA SOLICITUD ODT-16361, RIONEGRO

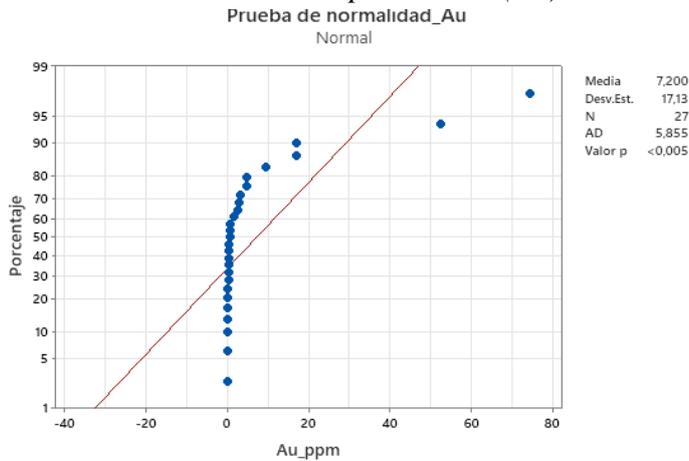
probabilidades acumulada teórica (definida en  $H_0$ ).

El valor  $p$  es una probabilidad que mide la evidencia en contra de la hipótesis nula. Un valor  $p$  más pequeño proporciona una evidencia más fuerte en contra de la hipótesis nula. Si el valor  $p$  es menor que o igual al nivel de significancia, la decisión es rechazar la hipótesis nula y concluir que sus datos no siguen una distribución normal. Si el valor  $p$  es mayor que el nivel de significancia, la decisión es que no se puede rechazar la hipótesis nula. Usted no tiene suficiente evidencia para concluir que los datos no siguen una distribución normal. (Stephens, 1974).

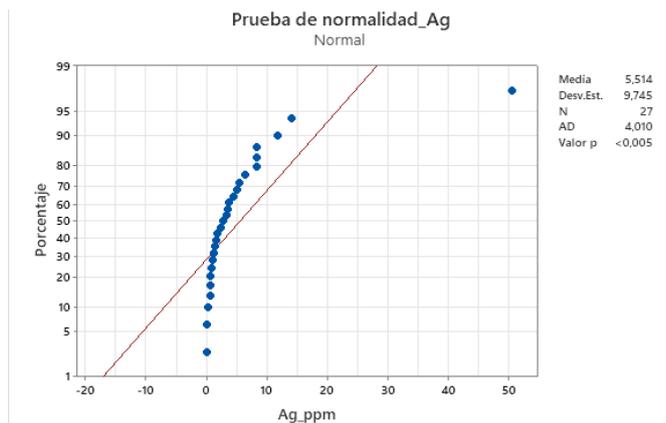
En este caso se observa que el coeficiente de Anderson Darling es de 5.855 para el oro y 4.010 para la plata, por lo que se concluye que estos datos no poseen una distribución normal, lo que también puede observarse en las figuras 59 y 60 en donde los valores no se ajustan totalmente a la línea de regresión. Al observar que ninguno de los dos elementos cumple con una distribución normal el siguiente paso es determinar qué tipo de transformación se le va a aplicar a cada elemento.

Al analizar las gráficas de ambos elementos se observa que el plot de distribución tiende a curvarse hacia la parte izquierda de manera similar. Esta tendencia es típica de una distribución logarítmica por lo que se procede a corroborar mediante la creación de una gráfica de probabilidad a partir de la cual se define si efectivamente se requiere una transformación logarítmica o exponencial.

Se procede a realizar una gráfica de probabilidad para cada elemento con el objetivo de determinar qué tipo de transformación debe aplicársele al elemento. Con base en el comportamiento observado en las gráficas de prueba de normalidad generadas para oro y plata, se selecciona el tipo de distribución logaritmo natural y se procede a aplicarla a los datos de concentración de metales preciosos que en este caso son oro y plata.

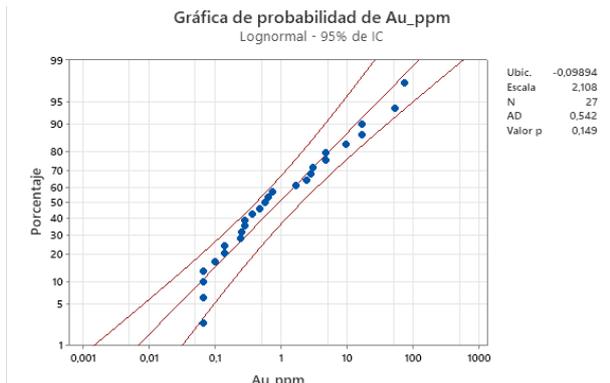
**Figura 59***Prueba de normalidad para el oro (Au)*

*Nota: generado por el software Minitab*

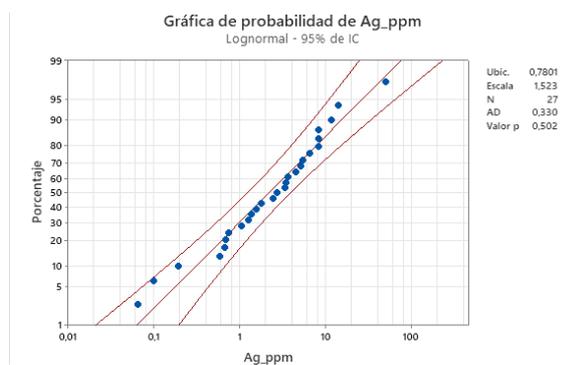
**Figura 60***Prueba de normalidad para la plata (Ag)*

*Nota: generado por el software Minitab*

A partir de las gráficas de probabilidad generadas puede observarse que los datos se alinean mucho mejor a la línea de regresión principal y de igual forma se acomodan dentro de los límites de las otras dos líneas de regresión que evidencian el rango de error aceptable. Al evaluar nuevamente el coeficiente de Anderson Darling se obtiene un resultado de 0.542 para el caso del oro y 0.330 para la plata, lo que permite concluir que la aplicación de esta transformación es correcta puesto que los coeficientes ya cumplen la regla de estar en un rango entre 0 y 1 y se elige como la más aceptable para estos elementos (Figuras 61 y 62).

**Figura 61***Grafica de probabilidad para el oro (Au)*

*Nota: generado por el software Minitab*

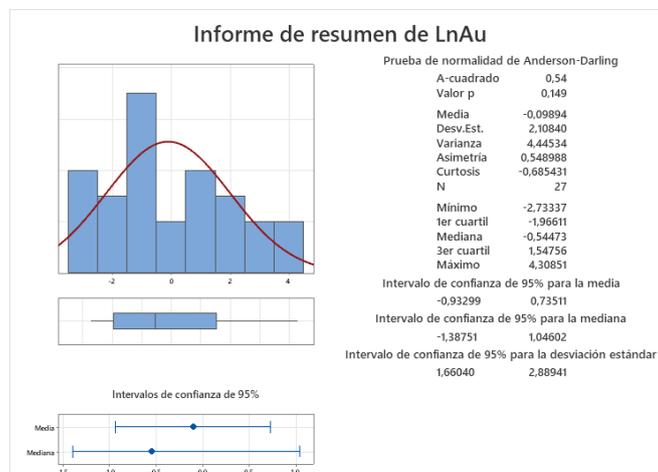
**Figura 62***Grafica de probabilidad para la plata (Ag)*

*Nota: generado por el software Minitab*

Después de comprobar cuál es el tipo de transformación adecuada para ser aplicada a los elementos, se procede a ejecutar esta acción en el software Minitab mediante el uso de la herramienta calculadora en donde se selecciona cada una de las variables y se le aplica en la expresión el logaritmo natural. Luego de realizar este cálculo se procede a crear los resúmenes de las estadísticas descriptivas de los datos transformados para cada elemento con un intervalo de confianza de 95% por defecto en donde se logran observar tanto el histograma de los datos transformados como los box plot a partir del cual se observa que en este caso específico no se generan datos atípicos (Figuras 63 y 64) por lo que los valores obtenidos hasta este punto son totalmente confiables y representan la estadística más cercana a la realidad.

**Figura 63**

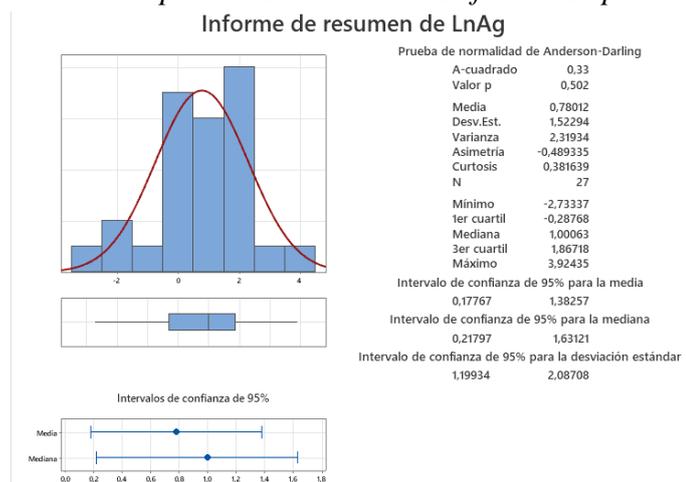
*Resumen de las estadísticas descriptivas de los datos transformados para oro (Au)*



*Nota: generado por el software Minitab*

**Figura 64**

*Resumen de las estadísticas descriptivas de los datos transformados para la plata (Ag)*



*Nota 1 generado por el software Minitab*

A partir de los datos procesados y normalizados se elaboran mapas de isovalores para el oro y la plata en ppm por medio de kriging ordinario.

### 8.6.2 Mapas de isovalores para anomalías de oro y plata

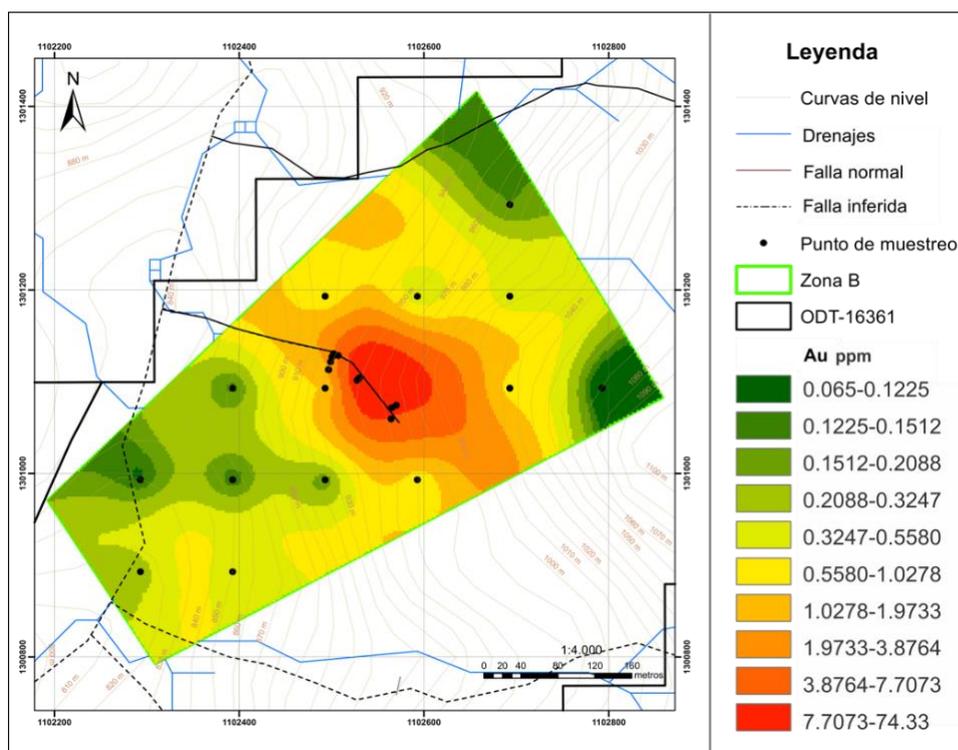
Kriging es un método de interpolación espacial, el cual permite estimar los valores de una variable en lugares no muestreados utilizando la información proporcionada por un set de datos. El método está planteado de manera que da el mejor estimador lineal no sesgado con

## GEOLOGIA DE LA SOLICITUD ODT-16361, RIONEGRO

una varianza mínima. El método de estimación de kriging ordinario es el mejor estimador lineal no sesgado. Es lineal porque el valor estimado es obtenido como un promedio pesado de los datos disponibles. Es no sesgado porque la estimación del error medio residual  $mR$  es cero. Es el mejor, u óptimo en el sentido de los cuadrados mínimos, porque minimiza la varianza  $\sigma^2R$  de los errores de estimación del modelo probabilístico. Esta última es la característica distintiva de este método respecto de otros métodos de estimación. Los datos de entrada se utilizan para construir una función matemática con un semivariograma, crear una superficie de predicción y, luego, validar el modelo con validación cruzada. Los semivariogramas cuantifican la autocorrelación porque grafican la varianza de todos los pares de datos según la distancia (Villada-Arias & Londoño-Ciro, 2014). A partir del mapa de isovalores se puede observar que la mayor concentración de oro está situada en el área donde se identificaron las vetas mineralizadas por el cauce de un drenaje controlado por una falla normal lo que confirma que esta zona es de interés económico.

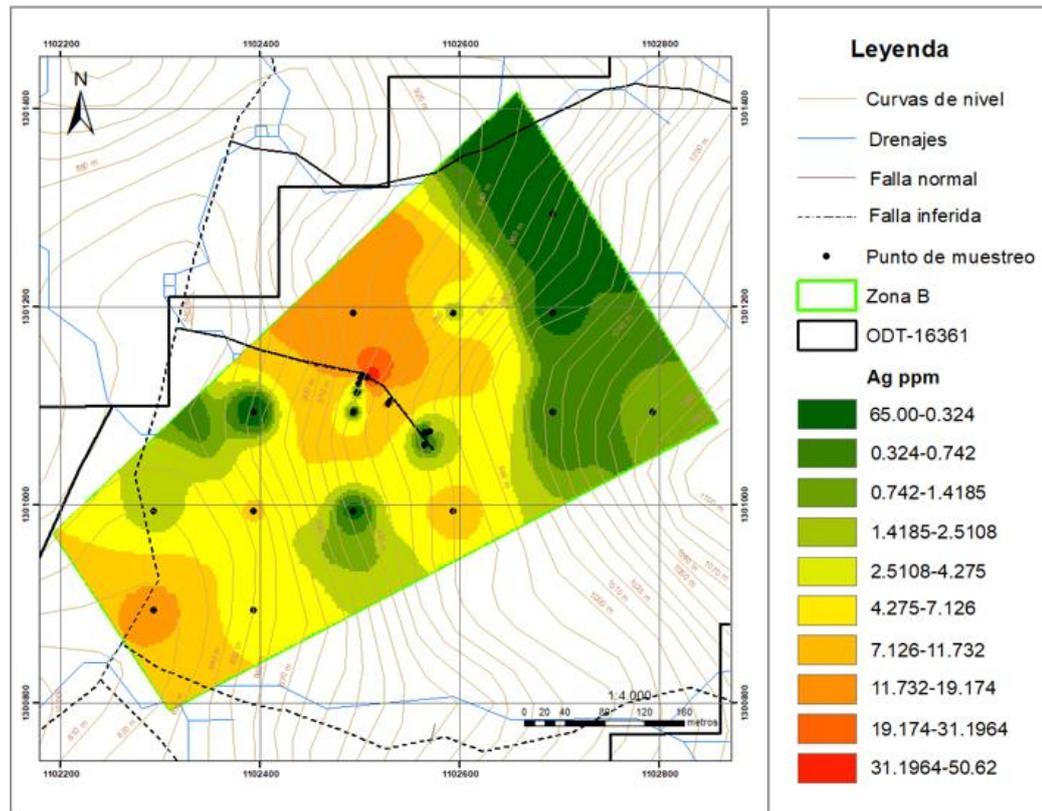
**Figura 65**

Mapa de isovalores de anomalías de oro (Au) en ppm



**Figura 66**

Mapa de isovalores de anomalías de plata (Ag) en ppm



## 9 Conclusiones

- La zona en general se caracteriza por presentar pendientes abruptas a escarpadas en la mayor parte de la extensión de su terreno, así como suelos arcillosos a franco arcillosos por lo que en caso de que en algunas zonas haya un cambio significativo en la cobertura vegetal podría aumentar el grado de amenaza. Particularmente el área de la solicitud de legalización ODT -16361 que es la de principal interés para este informe se caracteriza por presentar un grado de amenaza medio principalmente ya que pese a sus escarpadas pendientes en la zona se cultiva cacao y cítricos lo que ayuda a mitigar el posible efecto de los factores detonantes como lo son la sismicidad y la precipitación.
- En el área de la solicitud de legalización ODT – 16361 se presenta al menos 4 eventos hidrotermales: una posible alteración potásica evidente por la presencia de venillas

## GEOLOGIA DE LA SOLICITUD ODT-16361, RIONEGRO

milimétricas de biotita que se observaron en afloramiento, una alteración propilítica evidente por la presencia de venas con epidotización y cloritización de venillas de biotita, otro evento donde se evidencia la asociación  $Ms + Qtz + Rt$  donde se observa que la moscovita se genera a partir de la alteración de la biotita primaria y como consecuencia de esta alteración se produce la liberación de titanio responsable de la generación de los cristales de rutilo y se orientan con respecto al clivaje de los individuos de moscovita. No es posible determinar cual de las dos últimas alteraciones fue primero sin embargo se observa una superposición de un evento de alteración cuarzo sericitica que va desde leve hasta muy prevasiva y que en algunos casos puede causar la destrucción parcial o total de la mineralogía que interactuó con ese fluido hidrotermal y finalmente se tiene un evento supérgena evidenciado por la presencia de zonas oxidadas con formación de óxidos de hierro.

- La zona más enriquecida de metales preciosos se encuentra en cercanías de la falla definida como falla 4 en el capítulo de geología estructural local, en donde se obtuvieron valores de 74 ppm de oro y 50 ppm de plata en un punto. Adicionalmente al observar el mapa de isovalores es notorio que el enriquecimiento mineral se centra en dicha área y a los alrededores. La zona se caracteriza por un marcado control estructural relacionado con la presencia de la falla Bucaramanga por lo que podría estar relacionada con los procesos que dieron lugar a la mineralización en la zona de estudio y en otras zonas como el Batolito de Mogotes.

### **10 Recomendaciones**

Se recomienda realizar un levantamiento en campo de datos de remoción en masa activos e inactivos, así como una actualización del mapa de uso de suelos para complementar el mapa de amenazas realizado en este trabajo a fin de tener una información más exacta de la vulnerabilidad de la zona.

## GEOLOGIA DE LA SOLICITUD ODT-16361, RIONEGRO

Adicionalmente se recomienda realizar un análisis petrográfico con una mayor densidad de muestras que permita determinar la secuencia de los eventos hidrotermales, así como su temporalidad, por otro lado, se recomienda un muestreo geoquímico sistemático que permita determinar a qué evento hidrotermal está asociado el enriquecimiento de metales preciosos.

Para efectos de las labores de exploración minera se recomienda la realización de ya sea de levantamiento de datos geofísicos o de un túnel exploratorio que permita tener una mayor comprensión de la distribución de la mineralización para poder desarrollar una explotación minera económicamente rentable en el futuro.

### Referencias

ANM. (2018). Términos de Referencia. Trabajos de Exploración, Programa Mínimo Exploratorio y Programa de Trabajos y Obras (PTO) para Materiales y minerales Distintos del Espacio y Fondo Marino. Acogidos Mediante Resolución No. 299 del 13 de junio de 2018. 65.

Ardila, D. & Ayala, A. (2017). Estudio mineralógico-petrográfico de las alteraciones hidrotermales presentes en las rocas ígneas aflorantes a lo largo de la transcta Mogotes-San Joaquín (Macizo de Santander, Colombia). Universidad Industrial de Santander, Bucaramanga 76 pp.

Arevalo, L. M., Sanchez, R., Martinez, N., Corrales, J., & Ceballos, L. (2012). Metodología para la zonificación de susceptibilidad general del terreno a los movimientos en masa. 20, 1–28.

Cediel, F. (1968). El grupo Giron, Una molaza mesozoica de la cordillera oriental.

Corbett G. J. & Leach T. M., 1998, Southwest Pacific gold-copper systems: Structure, alteration and mineralisation: Special

Publication 6, Society of Economic Geologists, 238 p

Khurama, S., Velandia, A., Chaparro, J., Moreno, L., & Ardila, I. (2014). Memoria explicativa de la zonificación de la susceptibilidad y la amenaza relativa por movimientos en masa escala 1:100.000 plancha 109 - rionegro. 008, 1–40.

Khurama, S., Velandia, F., Chaparro, J. L., & Buitrago, J. (2014). Memoria explicativa del mapa geomorfológico aplicado a movimientos en masa escala 1:100.000. plancha 109 rionegro, departamento de santander. 009, 1–132.

Leiva, O., Moya Berbeo, H., Trejos González, G., & Carvajal, J. (2012). Propuesta Metodológica Sistemática Para La Generación De Mapas Geomorfológicos Analíticos

## GEOLOGIA DE LA SOLICITUD ODT-16361, RIONEGRO

Aplicados a La Zonificación De Amenaza Por Movimientos En Masa Escala 1:100.000. Servicio Geológico Colombiano, 88.

Lillo, J., & Oyarzún, R. (2013). Geología Estructural Aplicada a la Minería y Exploración Minera. 206.

Mantilla, L., Valencia, V. A., Barra, F., Pinto, J., & Colegial, J. (2009). Geocronología U-Pb de los cuerpos porfiríticos del distrito aurífero de Vetas- California (Santander, Colombia). Boletín de Geología, Vol 31, p. 2–6.

Mantilla-Figueroa, L., Bissig, T., Valencia, V. & Hart C. (2013). The magmatic history of the Vetas-California mining district; Santander Massif, Eastern Cordillera, Colombia. Journal of South American Earth Sciences, Vol 45, p. 235-249.

Mantilla-Figueroa, L. C., García-Ramírez, C. A., & A.Valencia, V. (2016). Propuesta de escisión de la denominada “Formación Silgará” (Macizo de Santander, Colombia), a partir de edades U-Pb en circones detríticos. Boletín de Geología, Vol 38, p. 33–50.

Ministerio de Minas y Energía, (2015). Decreto 1886 de 2015, por el cual se establece Reglamento de Seguridad en las Labores Mineras Subterráneas.

Pirajno, F. (2010). Hydrothermal Processes and Mineral Systems, Springer pp 1250.

Rodríguez, E., Sandoval, J., Chaparro, J., Trejos, G., & Medina, E. (2017). Guía metodológica para la zonificación de amenaza por movimientos en masa escala 1: 25.000. In Guía metodológica para la zonificación de amenaza por movimientos en masa escala 1: 25.000. <https://doi.org/10.32685/9789585978225>

Rong, J. & Wang F. (2016). Metasomatic Textures in Granites: Evidence from Petrographic Observation, Singapore: Springer (Springer Mineralogy), pp 162.

Royero Gutiérrez, J. M., & Clavijo, J. (2001). Mapa Geológico Generalizado

## GEOLOGIA DE LA SOLICITUD ODT-16361, RIONEGRO

Departamento De Santander.

Sandoval Sierra, E. M., & Ruíz Figueroa, D. (2018). Zonificación de amenazas por deslizamientos a partir del modelo de Mora y Vahrson. *Entorno Geográfico*, 13, 28. <https://doi.org/10.25100/eg.v0i13.6035>

Sector minero, clave en reactivación y repotenciación económica del país. (n.d). Retrieved January 31, 2021, from <https://mlr.vicepresidencia.gov.co/Paginas/prensa/2020/Sector-minero-clave-en-reactivacion-y-repotenciacion-economica-del-pais.aspx>

Sierra, A. C., & Duran, L. A. (2019). Guía metodológica para recolección de datos, evaluación, monitoreo, seguimiento e informe de gestión del riesgo en la remoción de masas. [https://ciencia.lasalle.edu.co/ing\\_civil](https://ciencia.lasalle.edu.co/ing_civil)

Stephens, M. A. (1974). EDF Statistics for Goodness of Fit and Some Comparisons, *Journal of the American Statistical Association*, 69, pp. 730-737

Taboada, A., Dimaté, C., & Fuenzalida, A. (1998). Sismotectónica de Colombia: deformación continental activa y subducción. *Sismotectónica de Colombia: Deformación Continental Activa y Subducción*, 10, 111–148. [https://doi.org/10.5209/rev\\_FITE.1998.n10.12980](https://doi.org/10.5209/rev_FITE.1998.n10.12980)

Van der Lelij, R., Spikings, R., Ulianov, A., Chiaradia, M., & Mora, A. (2016). Paleozoic to Early Jurassic history of the northwestern corner of Gondwana and implications for the evolution of the Iapetus, Rheic and Pacific Oceans. *Gondwana Research* 31, 271-294

Villada-Arias, Isabel C., & Londoño-Ciro, Libardo A. (2014). Aplicación de métodos geoestadísticos para la caracterización de la calidad química de un depósito de material calcáreo. *Boletín de Ciencias de la Tierra*, (35), 15-24. <https://doi.org/10.15446/rbct.n35.38233>