



# **ESCUELA SUPERIOR POLITÉCNICA DEL LITORAL**

## **Facultad de Ingeniería en Ciencias de la Tierra**

**“ANÁLISIS DE SUBSIDENCIA POR LA ACTIVIDAD MINERA EN EL CASCO URBANO DE ZARUMA. CASO DE ESTUDIO ESCUELA LA INMACULADA”**

### **PROYECTO DE GRADO**

Previo a la obtención del Título de:

### **INGENIERO EN MINAS**

Presentado por:

**CARLOS EDUARDO CAMPOVERDE LEON**

GUAYAQUIL – ECUADOR  
2017

## DEDICATORIA

El presente proyecto se lo dedico a Dios, por permitirme a pesar de los obstáculos llegar hasta esta meta.

A mi madre y familiares, por todo el apoyo a lo largo de mi vida.

A todos mis amigos, profesores y demás que tuve el honor de conocer y aprender de ellos a lo largo de mi vida universitaria.

Carlos Eduardo Campoverde Leon

## **AGRADECIMIENTO**

Mis más sinceros agradecimientos al Personal del Centro de Investigación y Proyectos Aplicados a las Ciencias de la Tierra (CIPAT-ESPOL).

A mis amigos que me ayudaron a realizar el presente trabajo así como al personal docente de la ESPOL por permitirme alcanzar todos los conocimientos necesarios para realizar este trabajo.

Carlos Eduardo Campoverde Leon

# **TRIBUNAL DE GRADUACIÓN**

---

**PhD. Eduardo Luis Recalde Chiluiza  
DIRECTOR DE MATERIA INTEGRADORA**

---

**Ing. Juan Carlos Pindo Macas  
MIEMBRO EVALUADOR**

## **DECLARACIÓN EXPRESA**

"La responsabilidad y la autoría del contenido de este Trabajo de Titulación, me corresponde exclusivamente; y el patrimonio intelectual de la misma, a la Escuela Superior Politécnica del Litoral"

(Reglamento de Exámenes y Títulos Profesionales de la ESPOL)

---

**Carlos Eduardo Campoverde Leon**

## RESUMEN

Zaruma forma parte del distrito minero más importante del Ecuador,, la actividad minera juega un rol económico importante en esta zona, pero la proliferación de la minería ilegal ha llevado graves consecuencias a la zona, por lo tanto, existe el desafío de enfrentar los problemas asociados a la actividad minera informal y desarrollar esta actividad bajo un marco de desarrollo sostenible. En el presente estudio se hace un análisis de las afectaciones, provocadas principalmente por la actividad de minería informal e ilegal que ha sufrido el macizo rocoso ubicado por debajo del sector céntrico de la ciudad, mediante la caracterización geomecánica de la zona, acompañado de mediciones periódicas por receptores de sistemas satelitales de navegación global (GNSS), se presenta un análisis del caso de estudio de subsidencia ocurrido en el sector de la Escuela La Inmaculada y sus afectaciones en la infraestructura de sus alrededores. Como resultado relevante de la investigación se obtiene el análisis de la zona potencial de riesgo a subsidencia en base al monitoreo de campo y su correlación con el procesamiento de información geomecánica mediante herramientas informáticas, además de recomendaciones para su remediación.

**Palabras claves:** Zaruma, Subsidencia, Análisis Geomecánico, Geodesia.

# TABLA DE CONTENIDO

DEDICATORIA	I
AGRADECIMIENTO	II
TRIBUNAL DEL PROYECTO	III
DECLARACIÓN EXPRESA	IV
RESUMEN	V
ÍNDICE GENERAL	VII
ABREVIATURAS	XI
ÍNDICE DE FIGURAS	XII
ÍNDICE DE TABLAS	XIII
<b>CAPÍTULO 1</b>	<b>1</b>
<b>INTRODUCCIÓN</b>	<b>1</b>
1.1. Antecedentes	2
1.2. Planteamiento del problema y justificación	3
1.3. Hipótesis	5
1.4. Alcance	6
1.5. Objetivo	7

1.5.1. Objetivo General	7
1.5.1. Objetivos específicos	8
1.6. Metodología	8
<b>CAPÍTULO 2</b>	<b>11</b>
<b>ESTADO DEL ARTE</b>	<b>11</b>
2.1. Área de estudio	12
2.2. Geología	13
2.2.1 Geología regional	14
2.2.2 Geología local	14
2.2.3 Geología Estructural	16
2.2.4 Características Hidrogeológicas	17
2.3 Subsistencia	18
2.3.1. El barrio de la Estación de Sallent, Barcelona, España	19
2.3.2. Ciudad México, México	21
2.3.3. La Unión, Murcia, España	23
2.4. Sistema GNSS	24
2.4.1 Segmento Espacial	25
2.4.2 Segmento de Control y Monitorización	26

2.4.3 Segmento de usuarios	26
2.4.4 Posicionamiento	27
2.5 Clasificaciones geomecánicas	28
2.5.1 R.Q.D.	28
2.5.2 RMR de Bieniawski	30
2.5.3 GSI	34
2.6 Modulo de Young	38
2.7 Coeficiente de Poisson	39
2.8 Criterio de rotura no lineal de Hoek & Brown	40
2.9 Tomografías eléctricas	43
<b>CAPÍTULO 3</b>	<b>45</b>
<b>TRABAJO DE CAMPO Y GABINETE</b>	<b>45</b>
3.1 Red de control geodésica para control de subsidencias en el casco urbano de Zaruma.	46
3.1.1 Antecedentes	47
3.1.2 Ubicación de los puntos de control	48
3.1.3 Monumentación	62
3.1.4 Control periódico de los puntos de control	66
3.2 Análisis Geomecánico: Escuela La Inmaculada	68

3.2.1 Perforaciones	69
3.2.2 Logeo geotécnico	70
3.2.3 Modelo geológico: Rockworks	75
<b>CAPÍTULO 4</b>	<b>88</b>
<b>ANÁLISIS DE RESULTADOS</b>	<b>88</b>
4.1 Análisis de desplazamiento verticales	89
4.1.2 Simulación de subsidencia en Phase 2	91
4.1.3 Zonificación de riesgo geotécnico.	92
4.2 Red de monitoreo	94
4.2.1 Estación total	94
4.1.2 Receptores GNSS	100
<b>CAPÍTULO 5</b>	<b>105</b>
<b>CONCLUSIONES Y RECOMENDACIONES</b>	<b>105</b>
5.1 Conclusiones	106
5.2 Recomendaciones	108

ANEXOS

BIBLIOGRAFÍA

## ABREVIATURAS

GAD	Gobierno Autónomo Descentralizado
INIGEMM	Instituto Nacional de Investigación Geológico Minero y Metalúrgico.
ARCOM	Agencia de Regulación y Control Minero
SGR	Secretaria de Gestión de Riesgos
RQD	Rock Quality Designation
GSI	Geological Strength Index
RMR	Rock Mass Rating
GNSS	Global Navigation Satellite System

## ÍNDICE DE FIGURAS

<b>Figura 1. 1</b> Zona de estudio Escuela La Inmaculada, Zaruma, El Oro, Ecuador. ....	6
<b>Figura 1. 2</b> Ubicación de la segunda y tercera zona de estudio, Zaruma, El Oro, Ecuador. ....	7
<b>Figura 1. 3</b> Metodología planteada para la investigación. ....	10
<b>Figura 2. 1</b> Ubicación geográfica de la ciudad de Zaruma, Provincia El Oro, Cantón Zaruma. ....	13
<b>Figura 2. 2</b> Mapa geológico escala 1:2500 de la zona céntrica del casco urbano de la ciudad de Zaruma. ....	16
<b>Figura 2. 3</b> Vista en general y en planta del barrio la Estación Sallent, en el año 1965. ....	19
<b>Figura 2. 4</b> Vista en planta de la ciudad de México y su tasa de subsidencia, estudio realizado mediante InSAR y GPS. ....	22
<b>Figura 2. 5</b> Vista en planta del pueblo minero de la Unión, Murcia, España y su tasa de subsidencia, periodo 1993-2007. ....	24
<b>Figura 2. 6</b> Estimación de RQD a partir de una maniobra de un sondeo. ....	29
<b>Figura 2. 7</b> Sistema de clasificación RMR y su valoración. ....	31
<b>Figura 2. 8</b> Instrucciones para el cálculo del parámetro condición de las discontinuidades. ....	32

<b>Figura 2. 9</b> Efecto de la orientación de las juntas y el buzamiento en la estabilidad de los túneles.....	33
<b>Figura 2. 10</b> Valores de corrección en función de la orientación de las discontinuidades. ....	33
<b>Figura 2. 11</b> Caracterización del macizo rocoso, basado en el entramamiento y las condiciones de las juntas.....	36
<b>Figura 2. 12</b> Estimación del GSI para macizos heterogéneos. ....	37
<b>Figura 2. 13</b> Abaco estimativa de las relaciones de las principales constantes de elasticidad del macizo rocoso en función de su estado y el GSI. ....	39
<b>Figura 2. 14</b> Guía para estimar el factor de alteración D. ....	42
<b>Figura 2. 15</b> (a) Método de prospección eléctrica (b) Líneas equipotencial de resistividades.....	44
<b>Figura 3. 1</b> Puntos de control existentes en la ciudad de Zaruma.....	48
<b>Figura 3. 2</b> Puntos de control seleccionados en la ciudad de Zaruma.....	49
<b>Figura 3. 3</b> Red de puntos instalada en la zona de estudio. ....	50
<b>Figura 3. 4</b> Zona 1 de estudio, escuela La Inmaculada y sus alrededores. ..	52
<b>Figura 3. 5</b> Resquebrajamiento en una pared producto de eventos de movimientos en la zona. ....	55
<b>Figura 3. 6</b> Segunda zona de control en el casco urbano de la ciudad de Zaruma. ....	56
<b>Figura 3. 7</b> Resquebrajamiento de una extensión de aproximadamente 10 m. visto en una casa.....	59

<b>Figura 3. 8</b>	Zona 3, localizada dentro del hospital y la colegio Juan Bosco. .	60
<b>Figura 3. 9</b>	Anomalías presentes en la zona 3 (a) anomalía presente en Colegio Juan Bosco (b) macro fractura presente en el hospital. ....	61
<b>Figura 3. 10</b>	Modelo de placa instalada en la ciudad de Zaruma.....	62
<b>Figura 3. 11</b>	(a) Vista en planta de la ubicación de la placa P.C.Z. 01 (b) Monumentación y medición de la placa P.C.Z. 01. ....	63
<b>Figura 3. 12</b>	(a) Vista en planta de la ubicación de la placa P.C.Z. 02 (b) Monumentación y medición de la placa P.C.Z. 02. ....	64
<b>Figura 3. 13</b>	(a) Vista en planta de la ubicación de la placa P.C.Z. 03 (b) Monumentación y medición de la placa P.C.Z. 03. ....	64
<b>Figura 3. 14</b>	(a) Vista en planta de la ubicación de la placa P.C.Z. 04 (b) Monumentación y medición de la placa P.C.Z. 04 .....	65
<b>Figura 3. 15</b>	(a) Vista en planta de la ubicación de la placa P.C.Z. 05 (b) Monumentación y medición de la placa P.C.Z. 05 .....	66
<b>Figura 3. 16</b>	Red de monitoreo de subsidencias en la ciudad de Zaruma. ...	68
<b>Figura 3. 17</b>	Ubicación de sondeos en la zona de estudio. ....	70
<b>Figura 3. 18</b>	Modelo geológico de la zona de estudio. ....	76
<b>Figura 3. 19</b>	Modelo geomecánico de la zona de estudio. ....	78
<b>Figura 3. 20</b>	Perfiles longitudinales y transversales dibujados en la zona de estudio.....	80
<b>Figura 3. 21</b>	Perfil estratigráfico longitudinal (a), perfiles estratigráficas transversales (b) y (c) dibujados en la zona de estudio. ....	82

<b>Figura 3. 22</b> Perfil geomecánico longitudinal (a), perfiles geomecánicos transversales (b) y (c) dibujados en la zona de estudio. ....	83
<b>Figura 4. 1</b> Desplazamientos verticales en perfiles longitudinal (a), transversales (b) y (c) dibujados en la zona de estudio. ....	90
<b>Figura 4. 2</b> Desplazamientos verticales esperado en el perfil longitudinal A"-A.....	92
<b>Figura 4. 3</b> Zonificación de riesgo de desplazamientos verticales y/o hundimientos en la zona de estudio.....	93
<b>Figura 4. 4</b> Mapa de desplazamientos horizontales y verticales en la zona de estudio 1, monitoreo mediante Estación Total. ....	95
<b>Figura 4. 5</b> Mapa de desplazamientos horizontales y verticales en la zona de estudio 2, monitoreo mediante Estación Total. ....	98
<b>Figura 4. 6</b> Mapa de desplazamientos horizontales y verticales en la zona de estudio 1, monitoreo mediante sistema GNSS.....	101
<b>Figura 4. 7</b> Mapa de desplazamientos horizontales y verticales en la zona de estudio 2 y 3, monitoreo mediante sistema GNSS.....	103

## ÍNDICE DE TABLAS

<b>Tabla I.</b> Calidad de la roca en base al RQD de Deere. ....	30
<b>Tabla II.</b> Calidad de la roca en base al RMR de Bieniawski. ....	34
<b>Tabla III.</b> Punto IGM, ubicado en la glorieta del parque central. ....	67
<b>Tabla IV.</b> Datos técnicos de los sondajes exploratorios, logísticos y de remediación del proyecto La Inmaculada-Zaruma .....	70
<b>Tabla V.</b> Valoración para diferentes materiales y su resistencia a la compresión simple. ....	84
<b>Tabla VI.</b> Valores de Coeficiente de Poisson para los materiales. ....	86
<b>Tabla VII.</b> Resultados de la evolución de los puntos monitoreados mediante Estación Total, zona 1. ....	97
<b>Tabla VIII.</b> Resultados de la evolución de los puntos monitoreados mediante Estación Total, zona 2. ....	99
<b>Tabla IX.</b> Resultados de la evolución de los puntos monitoreados mediante Estación Total, zona 1. ....	102
<b>Tabla X.</b> Resultados de la evolución de los puntos monitoreados mediante Estación Total, zona 2 y 3. ....	104

# **CAPÍTULO 1**

## **INTRODUCCIÓN**

## 1.1. Antecedentes

En Zaruma, uno de los minerales más explotados desde el Imperio Inca hasta los tiempos actuales ha sido el oro. En estas zonas, las secuelas producidas por la actividad minera subterránea son muy visibles. La falta de técnicas apropiadas de explotación, que permitan una buena planificación, control y regulación de esta actividad, han hecho que la minería informal provoque inestabilidad de las zonas donde realizan sus labores, estas se evidencian en los deslizamientos producidos y en los hundimientos del terreno observados en ciertos sectores de la ciudad. (Pesantes, C.; Carrión, P. ,2005)

El 26 de octubre de 2016, en la ciudad de Zaruma, bajo la Unidad Educativa La Inmaculada se registró subsidencia, la cual afectó a dos salones de clases, el 14 de Diciembre de 2016, se registró un nuevo evento en el mismo centro educativo, el 02 de Enero de 2017, se registró un nuevo evento mucho más crítico que los dos anteriores, que derivó en el colapso de parte de la infraestructura de la Escuela La Inmaculada, esto conllevó a que las autoridades correspondientes: GAD-Zaruma (Gobierno Autónomo Descentralizado de Zaruma), ARCOM (Agencia de Regulación y Control Minero), SGR (Secretaria de Gestión de Riesgos), INIGEMM (Instituto Nacional de Investigación Geológico Minero Metalúrgico), tomarán acciones que permitan caracterizar y tomar medidas pertinentes ante los eventos registrados.

Debido a esto, el Ministro de Minería, en Enero de 2017, mediante acuerdo ministerial N° 2017-002, en su artículo 2, acuerda ampliar la zona de exclusión, la cual empezó a delimitarse desde el año 1993 en un inicio con un área de 70.5 hectáreas a una nueva área de 173 hectáreas, con el fin de proteger la zona urbana de la ciudad de Zaruma, por lo cual las actividades mineras que se ejecuten dentro de esta nueva zona de exclusión, serán consideradas como actividades de minería ilegal.

## **1.2. Planteamiento del problema y justificación**

La actividad minera realizada sin técnica y control, puede traer serios efectos al entorno donde se desarrolla, unos claros ejemplos de estas consecuencias se pueden ver en la ciudad de Zaruma, en donde debido a las malas prácticas de minería, ha causado subsidencias, esto a partir de la explotación anti técnica de vetas mineralizadas, ubicadas bajo el casco urbano, realizada de manera ilegal.

Cuando se realiza una excavación subterránea, los estados de equilibrio tensional natural del terreno se ven alterados, ante este desorden tensional el terreno busca generar un nuevo estado de equilibrio, que conlleva a deformaciones en el interior del mismo, el nuevo estado de equilibrio generado puede verse reflejado en la superficie como subsidencias, las mismas pueden afectar a las estructuras que están alrededor. (Espinoza, 2005)

La subsidencia minera o por construcción de obras subterráneas consiste en el hundimiento de la superficie del terreno con motivo de la deformación y/o colapso de galerías generadas para la extracción de minerales o la construcción de túneles respectivamente al intentar ocupar el suelo al vacío generado en los terrenos circundantes (Tomás, Herrera, Delgado, & Peña, 2009), las consecuencias de las mismas pueden verse en los impactos sociales, económicos y ambientales que se presentan.

Entre los impactos sociales asociados a este fenómeno se encuentra el abandono de viviendas y el desalojo de zonas de riesgos, mientras que en los impactos económicos están caracterizados por las inversiones en restauración de edificaciones y zonas afectadas, entre los impactos ambientales se destacan el cambio en el paisaje.

El análisis de susceptibilidad a la subsidencia del terreno es el primer paso en la gestión del riesgo, que se puede enmarcar dentro del ordenamiento ecológico como parte del reconocimiento del territorio y sus elementos físicos, así como en las evaluaciones de impacto ambiental que permitan identificar la influencia de las actividades humanas y sus consecuencias sobre el ambiente, (Herrera, 2012). Esto lo convierte en un instrumento para la gestión del territorio.

La detección de indicios de casos de subsidencias es de vital importancia en la gestión del riesgo asociado y la toma de decisiones posterior, esto solo se puede realizar a partir de las diferentes herramientas existentes que permiten detectarlas, una herramienta muy importante es mediante

técnicas de sistemas satelitales de navegación global (GNSS), especialmente el sistema de posicionamiento global, ya que juegan un papel importante en el monitoreo de deformaciones, tal como la deformación de suelo, deformación de puentes y monitoreo de subsidencias mineras. En general, el punto de referencia suele establecerse en condiciones geológicas estables y fácil de preservar en el tiempo, de vital importancia en el monitoreo de deformaciones (Bian, Zhang, Zhang, & Zheng, 2014). Además, esto es comprobado por un estudio de prueba práctica realizado por LEICA, en donde se concluye que el uso de receptores GNSS para proporcionar un marco de referencia estable en un entorno inestable (movimiento), es una opción viable y con muchas más ventajas sobre técnicas complejas de ajuste de red.

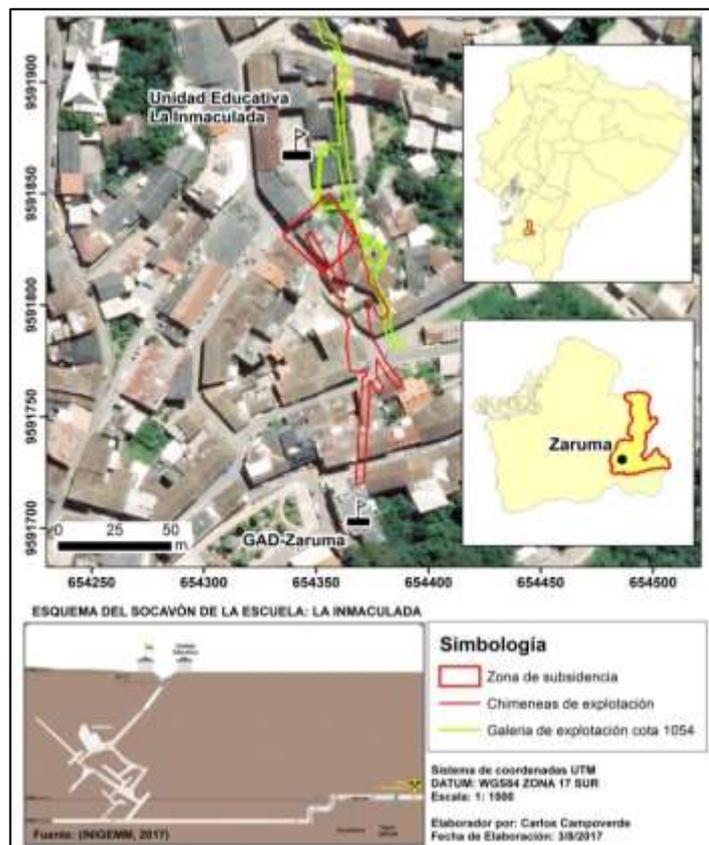
### **1.3. Hipótesis**

En base a los antecedentes que se han registrado en la ciudad de Zaruma se plantea la hipótesis: La información geomecánica de la zona, complementada con mediciones periódicas a base de sistemas GNSS, permiten definir zonas de riesgos geotécnicos, en zonas susceptibles o con indicios de riesgos a subsidencias, para poder tomar medidas preventivas.

## 1.4. Alcance

Existen algunos casos de subsidencia en el casco urbano de Zaruma, en este estudio, se plantea analizar tres zonas de interés, debido a las anomalías presentes en las mismas; la primera zona, corresponde a la del casco urbano circundante a la Escuela La Inmaculada, en la cual se encuentra localizada una cámara minera, la misma que se encuentra por debajo de varias infraestructuras de la ciudad.

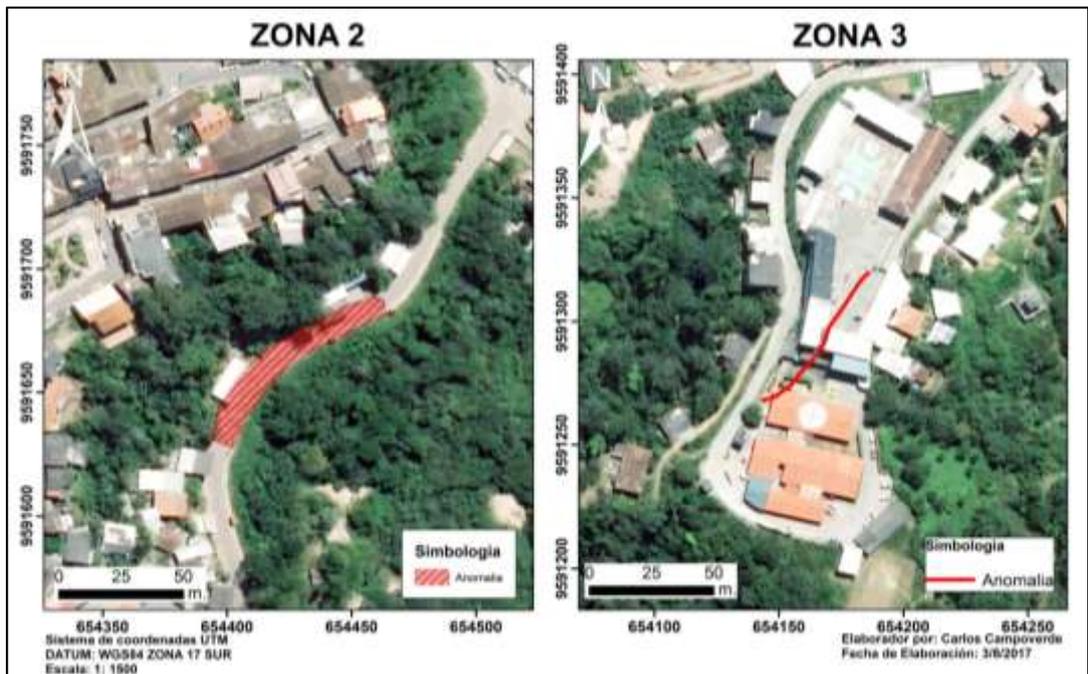
En la Figura 1.1, se muestra la zona 1, parte del casco urbano en la cual está enfocado este estudio, donde se realizará un análisis geotécnico y un monitoreo topográfico periódico.



**Figura 1. 1** Zona de estudio Escuela La Inmaculada, Zaruma, El Oro, Ecuador.

**Fuente:** Campoverde , C., 2017.

La segunda zona corresponde, a la zona de la Avenida Gonzalo Pizarro, la cual se encuentra ubicada en el sector centro-sur de la ciudad, mientras la tercera zona de estudio, está ubicada en el sector sur, en el sector de la Escuela San Juan Bosco y el Hospital Humberto Molina, la figura 1.2, muestra las dos zonas mencionadas.



**Figura 1. 2** Ubicación de la segunda y tercera zona de estudio, Zaruma, El Oro, Ecuador.

**Fuente:** Campoverde , C., 2017.

## 1.5. Objetivo

### 1.5.1. Objetivo General

Analizar el evento de subsidencia por actividad minera ilegal producido en la Escuela La Inmaculada, con el fin de determinar

una zona susceptible a hundimientos/subsidencias, mediante una red de monitoreo geodésico y análisis geotécnico.

#### **1.5.1. Objetivos específicos**

- Analizar las características geomecánicas del terreno que derivan en fenómenos de subsidencias.
- Implementar una red de monitoreo geodésico mediante equipos GNSS en el casco urbano de la ciudad con el fin de detectar desplazamientos en otras zonas de la ciudad.
- Generar un mapa de susceptibilidad a desplazamiento a través de análisis Geomecánico en la zona de la escuela la Inmaculada y sus alrededores.

#### **1.6. Metodología**

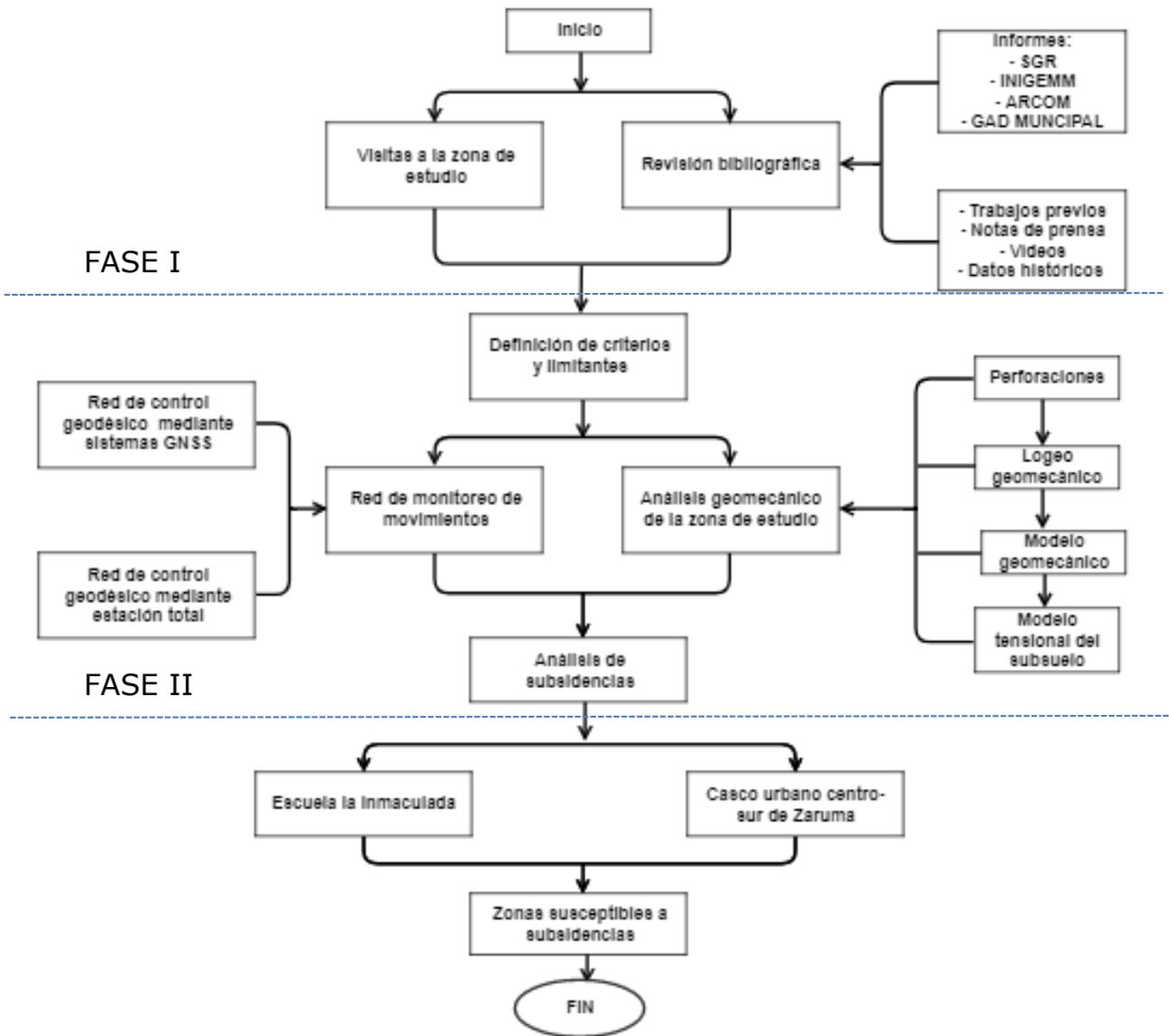
La investigación en el presente estudio está dividida en tres fases, para lograr abarcar la problemática planteada:

**I Fase:** se plantea una revisión bibliográfica de la zona de estudio, donde se revisan antecedentes, informes, y demás estudios relacionados sobre los fenómenos de subsidencia en la zona de estudio y metodologías similares de otros casos de estudio, aparte se complementa con visitas a la zona, para tener una mejor comprensión de la problemática a abordar.

**II Fase:** consiste en la definición del alcance del estudio, herramientas y métodos que ayudarán al análisis de la problemática, entre los cuales se realiza un estudio geomecánico del subsuelo de la Escuela La Inmaculada y sus alrededores, así como el control topográfico periódico mediante sistemas GNSS y estación total cuyo fin es la búsqueda de anomalías con respecto a desplazamientos horizontales y verticales.

**III Fase:** se realiza una correlación de los datos obtenidos en las fases anteriores, mediante el tratamiento de los mismos, su análisis, para tener una caracterización del problema, y presentar medidas de mitigación en caso de que se requiera, así como una zonificación del área de estudio.

En la Figura 1.3 se muestra un diagrama de la metodología de la investigación.



**Figura 1. 3** Metodología planteada para la investigación.  
**Fuente:** Campoverde , C., 2017.

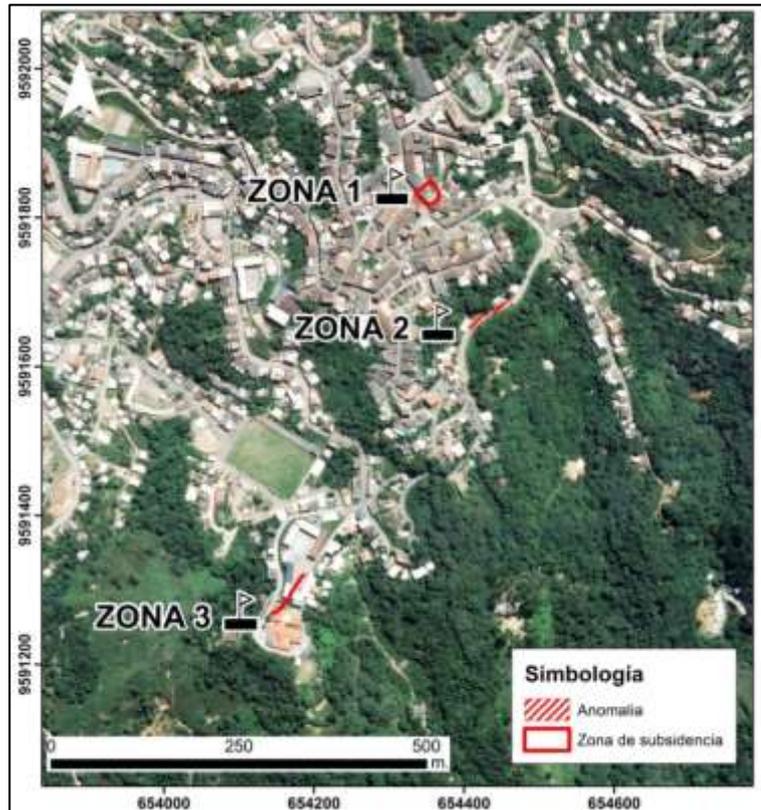
## **CAPÍTULO 2**

### **ESTADO DEL ARTE**

## **2.1. Área de estudio**

La zona de estudio está planteada en la ciudad de Zaruma, la cual se encuentra ubicada al sur del Ecuador, en la parte alta de la Provincia de El Oro, es la cabecera cantonal del cantón que da a su nombre, la ciudad ocupa casi en su totalidad una región alta y se encuentra entre los 1000 y 1200 msnm. en la figura 2.1 se puede visualizar la extensión urbana de la ciudad.

Dentro de la ciudad se han definido tres zonas las cuales serán objeto de análisis, una primera zona denominada zona 1, en donde se llevará un monitoreo periódico de subsidencia y análisis geotécnico, se encuentra ubicado en el sector céntrico del casco urbano de la ciudad y otras dos zonas denominadas zona 2 y zona 3 en las cuales solo se llevará un monitorio periódico de desplazamientos, estas zonas se encuentran ubicadas en el suroeste y sector sur de la ciudad, respectivamente.



**Figura 2. 1** Ubicación geográfica de la ciudad de Zaruma, Provincia El Oro, Cantón Zaruma.  
**Fuente:** Campoverde , C., 2017.

## 2.2. Geología

La geología de la zona de estudio abarca una zona que se extiende desde el sur en la ciudad de Portovelo, en dirección norte, pasando por la ciudad de Zaruma, hasta el noroeste en la localidad de Ayapamba, la mineralización tiene una extensión de alrededor 16 km de longitud, ocupa una franja de aproximadamente 5 km de ancho, con una profundidad de hasta 1.5 km, en general la mineralización es del tipo epitermal en dirección norte-sur, con ramificaciones hacia el noroeste y buzamientos que varían desde los 90° hasta los 45°-70° hacia el este.

### **2.2.1 Geología regional**

La ciudad de Zaruma se encuentra ubicada sobre una serie volcano-sedimentaria andesítica-porfirítica mineralizada con sulfuros metálicos, en zonas elevadas se pueden encontrar intrusivos de granodiorita y tonalita. La región se caracteriza estructuralmente por dos importantes fallas, la falla Piñas-Portovelo, la cual divide a la zona en dos áreas, al norte de la falla, rocas volcánicas e intrusivas y al sur, rocas metamórficas, la segunda es la falla Puente Busa-Palestina.

### **2.2.2 Geología local**

Para el contexto de este trabajo se hace referencia a las unidades más importantes de la zona y que se encuentran aflorando.

#### **DEPOSITOS COLUVIALES**

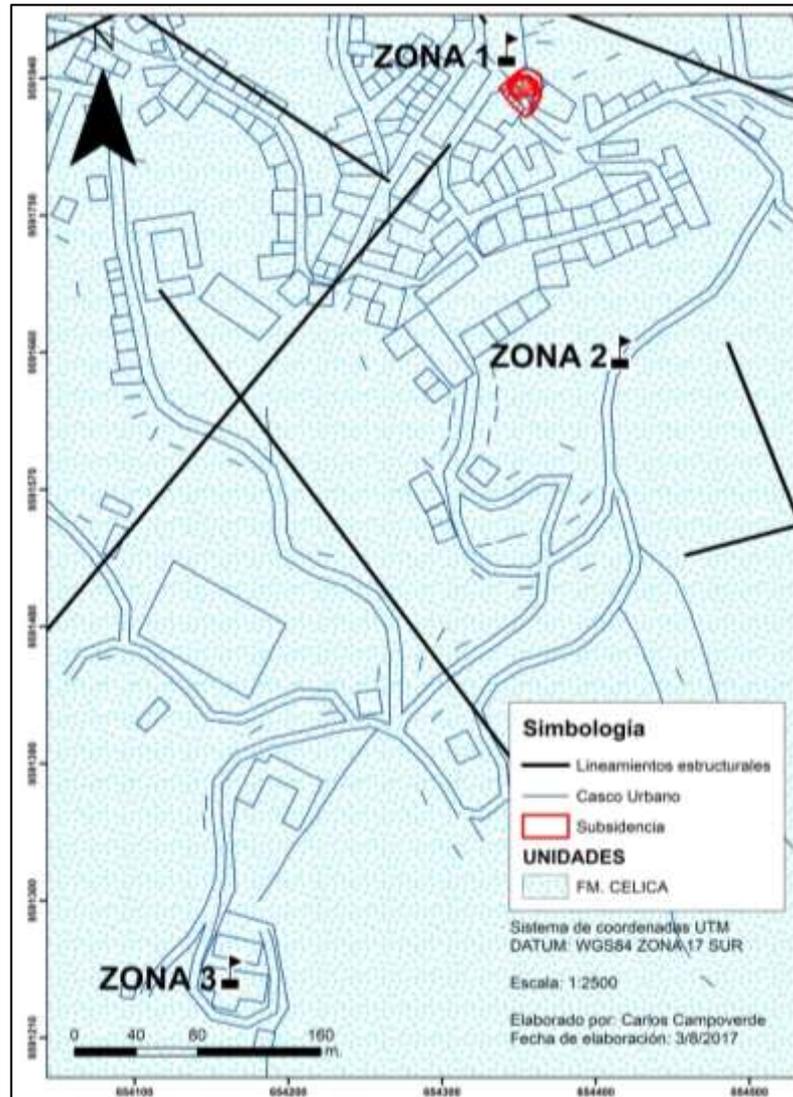
Se encuentra aflorando a lo largo de los ríos importantes en la zona, estos son; Amarillo, Calera y Pindo, está conformado por extensas terrazas en las partes baja de Zaruma.

#### **VOLCÁNICOS ZARUMA URCU**

Esta formación comprende riolitas, por lo cual es conocida también como riolitas de Zaruma Urcu, forma dos colinas, donde se observan los afloramientos al oeste del cantón.

## **FORMACIÓN CELICA**

Es la formación más importante en el contexto del presente trabajo, ya que de acuerdo al mapa geológico de la zona de estudio como se muestra en la figura 2.2, donde además se muestran los principales lineamientos estructurales de la ciudad de Zaruma, esta formación está conformada por rocas andesíticas, pórfidos andesíticos, tobas andesíticas y aglomeráticas, en la zona se pueden observar andesitas color gris, con una fuerte meteorización, fracturadas y diaclasadas, así como también una gran cantidad de sulfuros metálicos (pirita, arsenopirita, calcopirita), cuarzo, carbonatos, micas, entre los más importantes.



**Figura 2. 2** Mapa geológico escala 1:2500 de la zona céntrica del casco urbano de la ciudad de Zaruma.  
**Fuente:** Campoverde , C., 2017.

### 2.2.3 Geología Estructural

Regionalmente la zona está localizada en un sector con una tectónica disyuntiva, en la que se encuentran predominando tres direcciones de fallamiento; fallas NO-SE, estas fallas están relacionadas con la falla regional, Piñas-Portovelo. Fallas NE-SO,

este sistema de fallas esta correlacionado con las fallas Piñas-Portovelo y Puente Buza-Palestina.

Dentro de la zona de estudio se pudieron observar estructuras en sentido N-S, en donde se encuentra emplazada la mineralización, cuyo buzamiento se encuentra en sentido este.

#### **2.2.4 Características Hidrogeológicas**

Las rocas encajantes de las vetas se caracterizan por ser lavas, por lo cual no poseen porosidad ni permeabilidades primarias, debido a esto el drenaje del agua a través del macizo se produce por medio del fracturamiento, en sectores en que la roca se encuentra meteorizada, la permeabilidad se incrementa.

El sistema hidrogeológico de la zona de estudio, se encuentra condicionada a las fracturas, las cuales sirven como drenes para el transporte del agua en el macizo rocoso del casco urbano, a nivel general el nivel freático se encuentra a aproximadamente 5 metros de la superficie, los socavones ubicados a cotas menores de este nivel se convierten en galerías de drenaje, por donde el agua desciende, provocando que disminuya el nivel freático.

### 2.3 Subsistencia

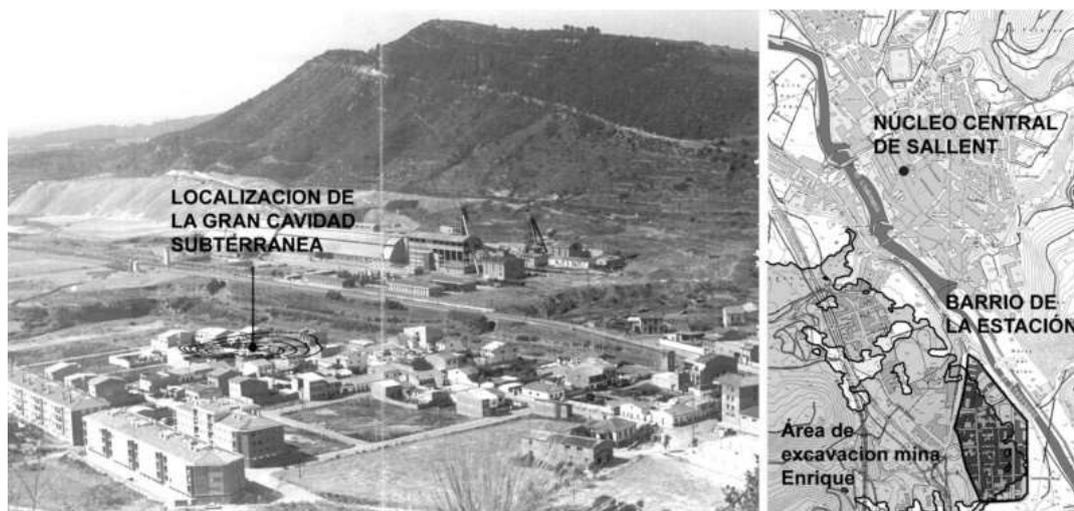
La subsidencia del terreno es un fenómeno que puede ser producto de diversas causas, este fenómeno puede ser tanto debido a causas naturales, así también como influenciadas por el hombre, en este estudio analizaremos un tipo de subsidencia causado por influencia humana.

La excavación de una labor minera (galería, cámara) subterránea, causa una redistribución de las tensiones en el interior del terreno, debido al desequilibrio natural y descompresión que se produce en la sección, producto de la extracción de material, a medida que la excavación está próxima a la superficie se reflejan movimientos en la misma, es posible disminuir este fenómeno, mediante una presurización del frente, es decir, reduciendo artificialmente la descompresión que se provocaría, por medio de sostenimiento.

A pesar de existir medidas para solucionar problemas asociados a eventos post-subsistencia, estas medidas resultan ser demasiado costosas, que en ciertos casos es mejor volver a construir, por lo cual el monitoreo y detección temprana de estos eventos siempre será la mejor medida de mitigación, ya que entre más temprano se detecten, el costo capital de remediación es menor, lo que resulta más importante, se puede proteger el capital humano. A continuación, se presentan varios casos de subsidencia:

### 2.3.1. El barrio de la Estación de Sallent, Barcelona, España

Durante 1932 hasta 1974, en la Mina Enrique, Barcelona, España, se desarrolló la explotación minera de potasa, la cual se vio suspendida debido a la imposibilidad de drenar las infiltraciones de agua que impendían desarrollar la explotación, la entrada de agua permitió a su vez la disolución de las margas, lo cual sumado a procesos geológicos de descompresión de los terrenos situados por encima de las labores excavadas, favoreció a que se produzcan procesos de subsidencia, la lixiviación de sedimentos salinos, fomentó a que se forme una cavidad de una profundidad de 145 metros, como se muestra en la figura 2.3, donde se puede apreciar esta cavidad, que luego fue llamada “Gran Caverna”, (Díaz et al., 2015).



**Figura 2. 3** Vista en general y en planta del barrio la Estación Sallent, en el año 1965.

**Fuente:** Díaz et al., 2015.

Las empresas mineras que desarrollaron sus actividades en la zona desde sus inicios, mantuvieron un monitoreo de la zona, mediante campañas de nivelación para detectar efectos de subsidencia. De acuerdo a los datos obtenidos de la zona, durante el periodo entre 1948 y 1988, indicaron una velocidad de subsidencia de entre 1 y 2.5 cm/año, campañas de medición realizadas entre el periodo 1999-2006 indicaron valores medios de subsidencia de 2.8 cm/año y para el año 2008 los valores medidos alcanzaron hasta 5.8 cm. Valores que fueron corroborados por un estudio realizado por la Agencia Espacial Europea mediante imágenes satelitales entre los años 1992-2004.(Díaz et al., 2015)

Los estudios realizados sobre este caso, refleja claramente que la consecuencia directa del cierre de las galerías y cámaras de extracción mineral, es una transmisión hacia los estratos superiores de un movimiento de hundimiento, el terreno buscando el equilibrio tensional provoca que este hundimiento termine llegando a la superficie dando lugar al evento conocido como subsidencia o desplazamiento superficial del terreno. (LL. Sanmiquel, J. Edo, M. Freijo, 2008).

### **2.3.2. Ciudad México, México**

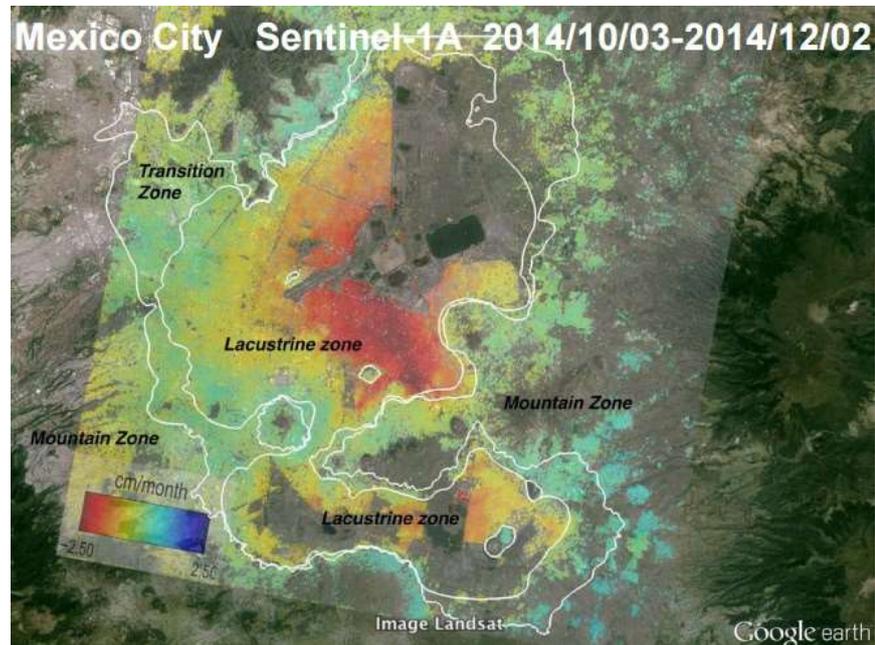
La ciudad de México, fundada en 1325 por los aztecas, a lo largo del tiempo fue desarrollada sobre un antiguo lago, estos restos de lago, conformados por arcillas y un alto contenido de agua, comprometieron la estabilidad de las edificaciones asentadas sobre las mismas.

Desde la época prehispánica se han registrados casos de subsidencias, debido a la consolidación de las arcillas y el peso de las edificaciones religiosas y civiles que se construían en la zona, a medida que pasaban los años el suelo se fue consolidando y los efectos de subsidencia disminuyeron, a mediados del siglo XX, la necesidades de agua de la ciudad aumentaron, debido al incremento en la población, lo que provocó un nuevo incremento en los eventos de subsidencia producto del drenaje de agua desde los estratos del suelo blando y su posterior consolidación.

Datos registrados desde inicios del siglo XX hasta la actualidad, han podido determinar que la plaza central de la ciudad ha descendido cerca de 7.5 m. en este periodo, la tasa de subsidencia actual es de 8 cm/año, los efectos de la misma han sido graves para el sistema de drenaje de la ciudad y los edificios históricos, las causas de la misma han sido correspondidos al desequilibrio hidrogeológico entre la tasa de agua que se extrae y

la que se recarga por medio de las filtraciones de agua del acuífero.

De acuerdo a estudios realizados mediante técnicas de sensores remotos en la zona, demuestran el riesgo de subsidencia en el centro de la ciudad, esto se muestra la figura 2.4.



**Figura 2. 4** Vista en planta de la ciudad de México y su tasa de subsidencia, estudio realizado mediante InSAR y GPS.

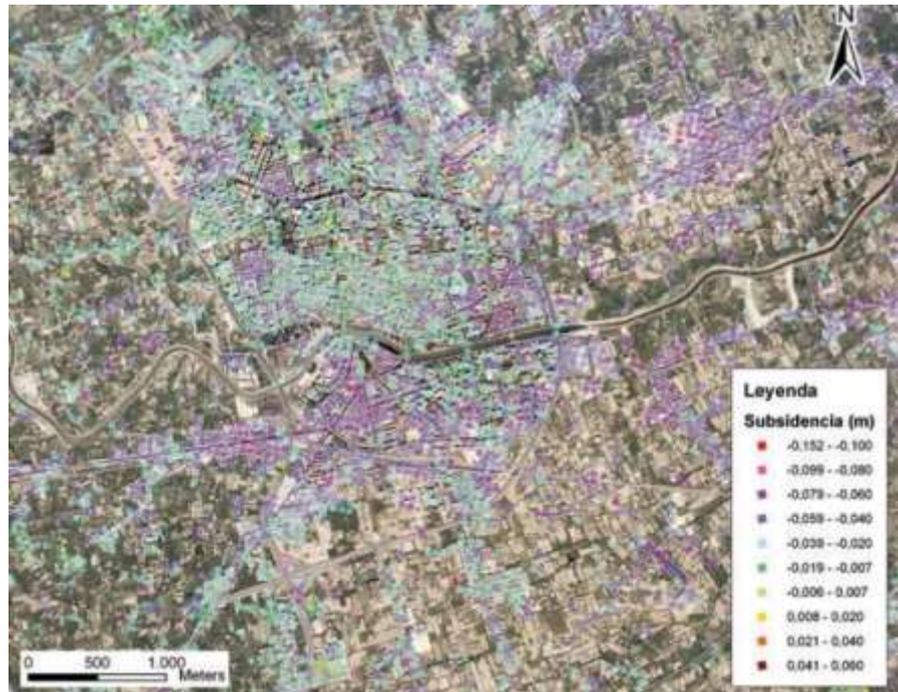
**Fuente:** Cabral-Cano et al., 2014.

Nuevas técnicas de construcción han permitido que se pueda evitar el fenómeno de subsidencia en la ciudad, el uso de pilotes de control, asentados sobre estratos duros, permiten un descenso controlado del edificio y así eliminar la emersión del mismo, pero este método resulta ser muy costoso.

### **2.3.3. La Unión, Murcia, España**

La Unión es un pueblo minero, en la Provincia de Murcia, la minería en este sitio se remonta desde la época del imperio Romano hasta finales del siglo XX, se caracteriza por la minería de plomo y zinc, la actividad minera en esta zona ha dejado una gran cantidad de galerías subterráneas abandonadas, que causan inestabilidad en la superficie.

Estudios realizados en la zona de galerías abandonadas por medio de una red de nivelación topográfica con 25 puntos de control determinó hasta junio 1999, eventos máximos de -53.6 cm., con tasas de hasta 4.8 cm/mes. En diciembre de 2002 el número de puntos de control aumentó hasta 57 y hasta julio de 2004 se obtuvieron valores máximos de subsidencias de hasta 5.3 cm, estos datos han sido corroborados por medio de técnicas de interferometría diferencial avanzada (Tomás et al., 2009), en la figura 2.5 se muestra valores de subsidencia registrados en un estudio mediante interferometría SAR diferencial.



**Figura 2. 5** Vista en planta del pueblo minero de la Unión, Murcia, España y su tasa de subsidencia, periodo 1993-2007.  
**Fuente:** Tomás et al., 2009.

## 2.4. Sistema GNSS

El sistema GNSS conocido como Sistema Global de Navegación por Satélite, consiste en un conjunto de satélites, que está interconectado con el usuario para proveerle de información de alta precisión que es mayormente usada en el posicionamiento y localización de un punto en cualquier parte del planeta (Kaplan & Hegarty, 1997).

El origen de los sistemas GNSS, proviene de su desarrollo para fines militares por el departamento de defensa de los Estados Unidos, en los años 70. Al ser único en contar con este sistema, llevó a que otras potencias vean la necesidad de tener su propio sistema de navegación y

dejar la dependencia de Estados Unidos, debido a esto en la actualidad se han desarrollado algunos sistemas, entre los más famosos destacan:

1. NAVSTAR-GPS, Sistema de Posicionamiento Estadounidense.
2. GLONASS, Sistema de Navegación Global con Satélites Ruso.
3. GALILEO, Sistema Europeo de Navegación por Satélites.
4. BEIDOU, Sistema Chino de Navegación por Satélites.

La estructura de los sistemas GNSS, básicamente está constituida por tres segmentos distintos; segmento espacial, segmento de control y un segmento de usuarios.

#### **2.4.1 Segmento Espacial**

Este segmento está constituido por la constelación de satélites, los cuales se dividen en dos partes, la primera parte constituidos por los satélites de comunicación y la segunda parte la constituyen los satélites de corrección, la primera parte de satélites orbitan la tierra, repartiéndose los planos orbitales, la segunda parte de satélites corresponden a los sistemas de aumento, que mediante algoritmos propios del sistema, corrigen los errores de posición que pueden darse.

Actualmente la constelación de satélites NAVSTAR GPS, está conformada por 31 satélites, esto permite tener un mínimo de cinco satélites disponibles en cualquier parte del mundo. El periodo de

cada satélite para completar una órbita es de alrededor de 12 horas a una altitud de 20200 Km.

#### **2.4.2 Segmento de Control y Monitorización**

Este segmento es el encargado del monitoreo y la garantía del servicio prestado por el sistema de navegación, está conformado por una serie de estaciones en tierra, las cuales se encargan de las configuraciones del sistema, las estaciones se encargan del monitoreo constante, realizar la corrección orbital y temporal de los satélites, mediante la sincronización de relojes atómicos ubicados en los mismos.

#### **2.4.3 Segmento de usuarios**

Este segmento está conformado por receptores que reciben la señal de los satélites, los dispositivos GNSS receptores consisten en dos elementos básicos; la antena receptora, la cual está configurada a la frecuencia del sistema y el receptor el cual se encarga de pasar la alta frecuencia recibida por la antena a una frecuencia baja, y muestra la información de la ubicación.

El funcionamiento del sistema consiste en la medición de las distancias entre el receptor y el conjunto de satélites, esto se lo realiza mediante la trilateración inversa en tres dimensiones.

#### **2.4.4 Posicionamiento**

Existen diferentes métodos para conocer el posicionamiento usando este sistema, el usar un método u el otro dependerá del tiempo y la precisión requerida por el usuario.

##### **Método Estático**

Este método es el más preciso para conocer las coordenadas de un punto desconocido a partir de un punto conocido, pero a su vez demanda mayor cantidad de tiempo, el método consiste en ubicar un receptor base en un punto con coordenadas conocidos, y ubicar un receptor móvil en un punto desconocido, se configura el tiempo de medición y el sistema realizará una serie de lecturas, que luego mediante técnicas estadísticas el software proporcionará la ubicación del punto.

##### **Método Cinemático**

Este método es conocido también como RTK es similar al método estático, pero el tiempo de medición de un punto es mucho menor, por lo cual es un método menos preciso que el método estático, pero proporciona la ubicación de un punto desconocido, a partir de uno conocido con un alto grado de fiabilidad

Al igual que los equipos tradicionales de medición este sistema está sujeto a errores que pueden afectar la precisión de la medición realizada, estos errores dependerán del tipo de receptor, la

posición relativa de los satélites y la magnitud del error (Cedeño, 2015).

## **2.5 Clasificaciones geomecánicas**

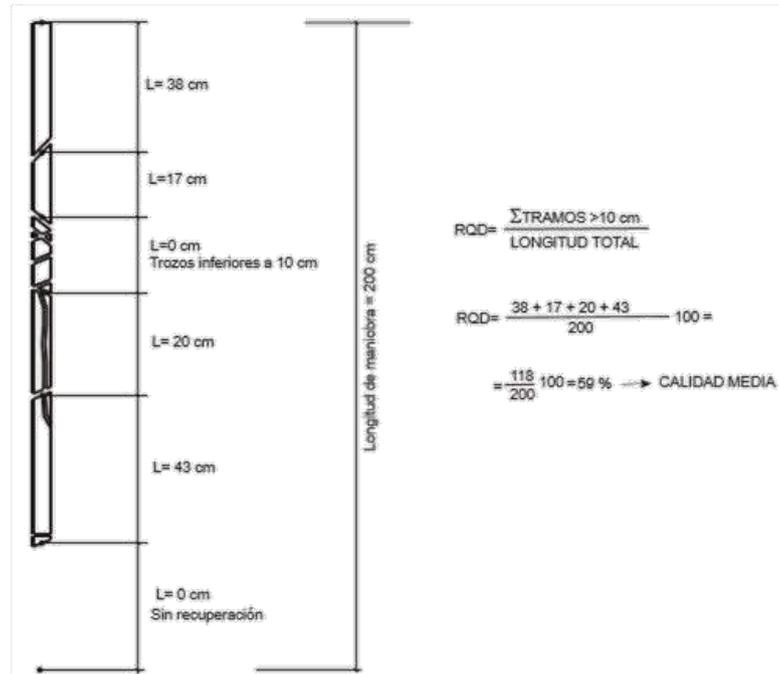
Las clasificaciones geomecánicas, es un término que nace a partir de los años 50, en donde hay la necesidad de caracterizar el macizo rocoso, en base a observaciones y datos empíricos, para evaluar su estado y la necesidad de sostenimiento, el método consiste en una serie de parámetros tomados en campo, en lugares estratégicos, o zonas de interés, en donde se levantarán estaciones geomecánicas, en dichas estaciones se obtienen todos los parámetros necesarios y se los puntúa, y en base a la puntuación recibida se clasifica al macizo en una categoría existente.

Una vez determinada la categoría a la cual pertenece el macizo rocoso, la misma propone una serie de recomendaciones sobre su estabilidad en el tiempo, necesidades y los tipos de sostenimientos aplicables.

### **2.5.1 R.Q.D.**

Propuesto por Deere y sus colaboradores (1967), esta clasificación se basa en clasificar al macizo rocoso, únicamente por el valor del RQD (Rock Quality Designation) a partir de sondeos de testigos. El RQD se define como el porcentaje de fragmentos del sondeo

mayores de 10 cm en total de la maniobra del sondeo, la figura 2.6 muestra la descripción y el cálculo de este método (Jordá-Bordehore, 2015).



**Figura 2. 6** Estimación de RQD a partir de una maniobra de un sondeo.

**Fuente:** Bordehore, J., 2015.

El RQD debe determinarse por cada maniobra de un sondeo, esto se refiere hasta que el tubo del testigo se encuentre lleno, o por alguna razón ya no pueda avanzar, cabe recalcar que un sondeo se realiza a través de varias maniobras sucesivas que permiten alcanzar la profundidad deseada.

Una vez calculado el RQD, podremos consultar la calidad del macizo a partir de la clasificación de Deere, como se muestra en la Tabla I.

**Tabla I.** Calidad de la roca en base al RQD de Deere.

<b>RQD %</b>	<b>CALIDAD</b>
< 25	Muy Mala
25-50	Mala
50-75	Media
75-90	Buena
90-100	Muy Buena

**Fuente:** Deere, J., 1967.

### **2.5.2 RMR de Bieniawski**

Conocida también como clasificación geomecánica, definida así por Bieniawski en el año 1976, en 1989 se realizó una versión actualizada de la misma, esta clasificación consiste en puntuar cinco parámetros del macizo rocoso, con una suma total cuyo valor máximo a alcanzar de 100 puntos, el puntaje total se le conoce como RMR, "Rock Mass Rating".

Los cinco parámetros y sus puntajes máximos para el cálculo del RMR básico son:

5. Resistencia a la compresión simple (Puntaje máximo: 15 puntos).
6. RQD (Puntaje máximo: 20 puntos).
7. Espaciamiento entre las juntas (Puntaje máximo: 20 puntos).
8. Condiciones de las juntas (Puntaje máximo: 30 puntos)

9. Presencia de agua (Puntaje máximo: 15 puntos)

En la figura 2.7, se muestra la escala de puntajes, para cada parámetro en el RMR básico.

Parámetro		Rango de valores							
1	Resistencia de la roca intacta	Índice de resistencia a carga puntal (Point load index) $\geq 10$ MPa	>10	4-10	2-4	1-2	Para este rango es preferible el ensayo de compresión uniaxial.		
		Resistencia compresión uniaxial (UCS) $\geq 10$ MPa	>20	10-20	5-10	2-5	1-2	<0	
	Valoración	15	12	7	4	2	1	0	
2	RQD (%)	90-100	75-90	50-75	25-50	<25			
	Valoración	20	17	13	8	3			
3	Espacido - Separación de discontinuidades	>2 m	0.6-2 m	0.2-0.6 m	0.05-0.2 m	<0.05 m			
	Valoración	20	13	10	5	1			
4	Condición de las discontinuidades	Superficies muy rugosas. No continuas. Sin separación. Paredes intactas	Superficies ligeramente rugosas. Separación < 1mm. Paredes ligeramente abolladas	Superficies ligeramente rugosas. Separación = 1 mm. Paredes muy abolladas	Superficies estratificadas (alveoladas). Relleno de < 1mm espesor. Separación 1-1 mm continuas	Relleno blando > 5 mm espesor. Separación > 5 mm continuas			
		Valoración	30	25	20	15	5		
5	Agua subterránea	Flujo libre por 30 m de longitud de trazo (l/min)	Nulo	<10	10-25	25-125	>125		
		Ratio Precip. agua en juntas (menor precip. mayor = 0)	0	0-0.1	0.1-0.2	0.2-0.5	>0.5		
	Condiciones presentes	Completamente seco	Ligeramente húmedo	Húmedo	Grasado	Flujando			
Valoración		15	10	7	4	0			

**Figura 2. 7** Sistema de clasificación RMR y su valoración.

**Fuente:** Bordehore, J., 2015.

El cuarto parámetro referente a la condición de las juntas tiene una serie de parámetros para calcular su valor final la cual se muestra en la figura 2.8.

parámetro	valoración				
	Longitud de la discontinuidad (Persistencia/continuidad)	<1 m	1-3 m	3-10 m	10-20 m
	6	4	2	1	0
Separación (apertura)	Nada	<0.1 mm	0.1-1.0 mm	1-5 mm	>5 mm
	6	5	4	1	0
Rugosidad	Muy rugosa	Rugosa	Ligeramente rugosa	Suave	Estriada (slickensided)
	6	5	3	1	0
Relleno	Ninguno	Relleno duro		Relleno blando	
		<5 mm	>5 mm	<5 mm	>5 mm
		6	4	2	2
Alteración	Inalterado	Ligeramente alterado	Moderadamente alterado	Muy alterado	Descompuesto
	6	5	3	1	0

**Figura 2. 8** Instrucciones para el cálculo del parámetro condición de las discontinuidades.

**Fuente:** Bordehore, J., 2015.

Adicionalmente a los cinco parámetros básicos, en 1989, se agregó un parámetro extra, que se conoce también como parámetro de corrección o  $RMR_6$  el cual está definido con respecto a la orientación de las juntas. El rumbo y buzamiento de las discontinuidades en el caso de túneles y obras de ingeniería tiene una gran influencia en la estabilidad del macizo rocoso, en la figura 2.9, se muestra el efecto del rumbo y buzamiento de las juntas en túneles, cabe recalcar que los casos de estudio para la determinación de esta clasificación fueron realizados en túneles.

Rumbo perpendicular al eje del túnel				Rumbo paralelo al eje del túnel		Buzamiento 0 - 20° Independiente del rumbo
Exc. a favor buzamiento		Exc. contra buzamiento				
Buz.>45°	Buzamien: 20-45°	Buz.>45°	Buzamien: 20-45°	Buz.>45°	Buzamien: 20-45°	
Muy favorable	Favorable	Medio	Desfavorable	Muy desfavorable	Medio	Medio

**Figura 2. 9** Efecto de la orientación de las juntas y el buzamiento en la estabilidad de los túneles.  
**Fuente:** Bordehore, J., 2015.

Calculado el estado del macizo en función de la orientación, se procede al cálculo del factor de corrección, su valoración depende de la obra de ingeniería aplicada, en la figura 2.10 se muestra el valor de corrección a realizar.

Orientaciones de rumbo y buzamiento de las discontinuidades		Muy favorable	Favorable	Medio	Desfavorable	Muy desfavorable
Valoración para	Túneles	0	-2	-5	-10	-12
	Cimentación	0	-2	-7	-15	-25
	Taludes	0	-5	-25	-50	-60

**Figura 2. 10** Valores de corrección en función de la orientación de las discontinuidades.

**Fuente:** Bordehore, J., 2015.

Los primeros cinco parámetros que se expusieron conforman como se mencionó anteriormente el RMR básico, que una vez obtenido el factor de corrección en función de la orientación de las juntas con respecto a la obra se procede a realizar la corrección y se obtiene el valor final de RMR, que es conocido como el RMR corregido.

$$RMR_{\text{corregido}} = RMR_{\text{básico}} - RMR_{\text{corrección}}$$

Obtenido el valor de  $RMR_{\text{corregido}}$ , podemos verificar la calidad del macizo para el caso de estudio. Bieniawski clasifica la calidad del macizo rocoso en 5 categorías en función de valor de RMR obtenido, estas categorías y su valoración se presentan en la tabla II.

**Tabla II.** Calidad de la roca en base al RMR de Bieniawski.

CLASE	I	II	III	IV	V
CALIDAD	Muy buena	Buena	Media	Mala	Muy mala
Rango de RMR	100-81	80-61	60-41	40-21	20-0

**Fuente:** Bieniawski., Z., 1967.

### 2.5.3 GSI

También conocido como clasificación de Hoek y Brown, propuesto en 1995, como el índice de resistencia geológica (Geological Strength Index), nació como un complemento al criterio generalizado de falla en rocas, el índice evalúa la calidad del macizo rocoso, Bajo este criterio la caracterización del macizo rocoso está basada en la impresión visual del macizo y su estructura, basados en los términos de visualizar al macizo como bloques y de la condición superficial de las discontinuidades dadas por la rugosidad y la alteración de las juntas (Hoek, 2006).

El GSI además estima la reducción de la resistencia del macizo rocoso para diferentes condiciones geológicas, en el caso de macizos muy débiles de baja calidad, el GSI ha sido actualizado en algunas ocasiones.

La aplicación del GSI se da en la estimación de los parámetros de entrada en la estimación de la resistencia del macizo, esta es solo una relación empírica. Para el cálculo del GSI existen ábacos a los que se ingresan desde dos puntos diferentes, uno horizontal; referente al tamaño y entramamiento de los bloques, la composición y estructura de los mismos, que se muestra en la figura 2.11.(Hoek, 2006)

CONDICIONES DE SUPERFICIE		DECRECE LA CALIDAD DE LA SUPERFICIE →				
<p>ROCAS DIACLASADAS (Hoek and Marinos, 2000)</p> <p>A partir de la litología, estructura y condiciones superficiales de las discontinuidades, se estima un valor promedio del GSI. No se debe tratar de ser muy preciso. Un rango de 33-37 es más realista que un GSI=35. Note que la tabla a macizos estructuralmente controlados por fallas, donde planos estructurales débiles están presentes en una dirección desfavorable con respecto al frente de excavación, estos podrán dominar el comportamiento del macizo rocoso. Las zonas de falla son propensas a la alteración como resultado de los cambios de humedad que pueden reducirse cuando el agua está presente. Cuando trabajamos en rocas de regular o mala calidad, cambian las condiciones por el cambio de humedad. La</p>		MUY BUENAS Superficies muy rugosas, superficies no meteorizadas, frescas	BUENAS Superficies rugosas, ligeramente meteorizadas, manchadas con hierro	REGULAR Superficies lisas, moderadamente meteorizadas y alteradas	POBRE Superficies con espejos de falla, con alto grado de meteorización y rellenos compactos o rellenos de frag.	MUY POBRE Superficies con espejos de falla, con alto grado de meteorización con rellenos de arcillasuave.
DECRESE EL ENTRABAMIENTO DE LOS BLOQUES		DECRESE EL ENTRABAMIENTO DE LOS BLOQUES				
	INTACTA O MASIVA - Especímenes de roca intacta o masiva in-situ, roca con discontinuidades amplias y espaciadas	90			N/A	N/A
	FRACTURADA - Macizo rocoso con bloques entrelazados, consistente en bloques cúbicos formados por tres intersecciones de	80	70			
	MUY FRACTURADA - Macizo parcialmente perturbado con bloques entrelazados y angulares, formados por cuatro o más		60	50		
	FRACTURADA / PERTURBADA - Macizo rocoso plegado formado por bloques angulares formados por la intersección de varios			40		
	DESINTEGRADA - Macizo rocoso altamente fracturado con mezcla de fragmentos angulares y redondeados, pobremente				30	
	FOLIADA / LAMINADA - Se carece de bloques debido a débil material presente en los planos de foliación o de cizalla	N/A	N/A		20	
						10

**Figura 2. 11** Caracterización del macizo rocoso, basado en el entrelazamiento y las condiciones de las juntas.

**Fuente:** Hoek, E., 2006.

Mientras el ábaco con ingreso vertical, corresponde a las condiciones de las discontinuidades, mediante estas dos entradas se converge al valor del GSI que está dispuesto como se observa en las figuras 2.12 como líneas diagonales.



## 2.6 Modulo de Young

El módulo de Young o módulo de elasticidad, es un parámetro que define el comportamiento elástico de respuesta del macizo rocoso, está marcado por la estructura del macizo rocoso antes que las propiedades de la matriz rocosa que lo conforma.

Para estimar el módulo de Young o módulo de deformación suelen emplearse correlaciones empíricas que parten de clasificaciones geomecánicas, cabe recalcar que al momento de utilizar estas correlaciones el rango de incertidumbre es muy amplio, Bienawski y Serafim & Pereira propusieron una relación entre el módulo de deformación in situ y la clasificación RMR, esta relación se obtuvo en base a análisis retrospectivo de las deformaciones observadas en presas (TAVANTZIS, 1987). De acuerdo a Bienawski, 1978

$$E_m = 2RMR - 100 \text{ (GPA)}$$

Siempre y cuando el valor de RMR sea mayor a 55, para valores menores se recomienda la relación propuesta por Serafim & Pereira, 1983:

$$E_m = 10^{\frac{RMR-10}{40}} \text{ (GPA)}$$

Siempre y cuando el RMR se encuentre en el rango entre 10 y 50.

## 2.7 Coeficiente de Poisson

Al igual que el módulo de Young el coeficiente de Poisson es una constante elástica, el cual proporciona una medida de la deformación de sección de un prisma de material isotrópico cuando el mismo se estira longitudinalmente y se adelgaza en las direcciones perpendiculares a las fuerzas de estiramiento que se aplican (Estados Unidos Mexicanos, 2016).

ESTRUCTURA		CONDICION SUPERFICIAL DE LAS JUNTAS					
		MUY BUENA Superficies rugosas e inalteradas	BUENA Superficies rugosas, algo meteorizadas, con manchas de óxido	MEDIA Superficies lisas, moderadamente meteorizadas, alteradas	MALA Superficies con espejos de falla, muy alteradas, con recubrimientos compactos o rellenos que contienen fragmentos angulares de rocas	MUY MALA Superficies con espejos de falla, muy meteorizadas, con rellenos o recubrimientos de arcillas blandas	
	FRACTURADO - Macizo rocoso muy bien encajado e inalterado, consistente en bloques cúbicos formados por tres familias de discontinuidades ortogonales.	$m_p/m_s$	0.60	0.40	0.26	0.16	0.08
	$s$	0.190	0.062	0.015	0.003	0.0004	
	$a$	0.5	0.5	0.5	0.5	0.5	
	$E_{m1}$	75,000	40,000	20,000	9,000	3,000	
	$v$	0.2	0.02	0.25	0.25	0.25	
GSI	85	75	62	48	34		
	MUY FRACTURADO - Macizo rocoso encajado aunque algo alterado con bloques poliédricos angulares formados por cuatro o más familias de discontinuidades.	$m_p/m_s$	0.40	0.29	0.16	0.11	0.07
	$s$	0.042	0.021	0.003	0.001	0	
	$a$	0.5	0.5	0.5	0.5	0.53	
	$E_{m1}$	40,000	24,000	9,000	5,000	2,500	
	$v$	0.2	0.25	0.25	0.25	0.3	
GSI	75	65	48	38	25		
	FRACTURADO/VETEADO - Plegado y fallado con muchas discontinuidades que se intersectan formando bloques angulares.	$m_p/m_s$	0.24	0.17	0.12	0.08	0.06
	$s$	0.012	0.004	0.001	0	0	
	$a$	0.5	0.5	0.5	0.5	0.55	
	$E_{m1}$	18,000	10,000	6,000	3,000	2,000	
	$v$	0.25	0.25	0.25	0.3	0.3	
GSI	60	50	40	30	20		
	MACHACADO - Poco encajado y muy roto con una mezcla de bloques angulares y redondeados.	$m_p/m_s$	0.17	0.12	0.08	0.06	0.04
	$s$	0.004	0.001	0	0	0	
	$a$	0.5	0.5	0.5	0.55	0.60	
	$E_{m1}$	10,000	6,000	3,000	2,000	1,000	
	$v$	0.25	0.225	0.3	0.3	0.3	
GSI	50	40	30	20	10		

**Figura 2. 13** Abaco estimativa de las relaciones de las principales constantes de elasticidad del macizo rocoso en función de su estado y el GSI.

**Fuente:** Ramírez et al., 2008.

Cabe señalar que la influencia del coeficiente en los resultados de simulaciones, no suele ser muy determinante, ya que su influencia es pequeña, la gama de variabilidad del coeficiente es bastante pequeña el

rango va entre 0.15-.45, por lo que se aconseja el uso de ábacos para su determinación, para esto Hoek y Brown proponen valores para estimar el coeficiente en función de la calidad del macizo rocoso (Ramírez & Alejano Monge, 2008), este ábaco se presenta en la figura 2.13.

## **2.8 Criterio de rotura no lineal de Hoek & Brown**

Uno de los retos más grandes que se presenta en el diseño de obras subterráneas, es a la estimación de las propiedades de deformabilidad y resistencia del macizo rocoso y que dichas estimaciones sean lo más realistas posibles.

Introducido por primera vez en 1980, desde entonces el criterio de rotura no lineal ha tenido diversas aplicaciones adicionales para los que fue propuesto, debido a esto, con el fin de mejorarlo, como por ejemplo la adición de nuevo parámetros, para definir el estado del material, así como nuevas propuestas para mejorar la caracterización del macizo rocoso, el criterio en el paso de los años ha sido modificado (Hoek, 1997).

EL criterio no lineal de Hoek & Brown es un criterio empírico, el cual es uno de los más utilizados ya que permite valorar de manera sencilla, la rotura de la matriz rocosa, a partir de las principales características geológicas y geotécnicas.

Como se mencionó anteriormente el criterio ha sufrido diversas modificaciones, debido a su uso no solo en macizos rocosos duros, sino también en macizos débiles y/o pobres, esto ha llevado a la reformulación del criterio (Farmer, 1968), la última versión del criterio se expresa como se muestra a continuación:

$$\sigma_1' = \sigma_3' + \sigma_{ci} \left[ m_b \frac{\sigma_3'}{\sigma_{ci}} + S \right]^a$$

En donde:

$\sigma_1'$  representa la tensión principal mayor al momento de rotura.

$\sigma_3'$  representa la tensión principal menor al momento de rotura.

$\sigma_{ci}$  representa la resistencia a compresión uniaxial del macizo rocoso.

$m_b$  representa la constante del material y viene dado en términos del  $m_i$ , GSI y D como se muestra a continuación:

$$m_b = m_i \exp\left(\frac{GSI - 100}{28 - 14 D}\right)$$

En donde  $m_i$  es la constante del material, GSI representa la clasificación geomecánica del índice de resistencia geológica, y D representa el factor de alteración el cual es la relación con el macizo rocoso y el tipo de excavación, es un parámetro introducido por Hoek para considerar los daños ocasionales producidos al macizo rocoso por la influencia de las voladuras, en la figura 2.14 se muestra la relación entre este parámetro y el tipo de voladura (Ramírez & Alejano Monge, 2008).

APARIENCIA DEL MACIZO ROCOSO	DESCRIPCION DEL MACIZO ROCOSO	VALOR SUGERIDO DE D
	Excelente calidad por voladura controlada o excavación con tuneladora, TBM, resultando en la perturbación mínima del macizo alrededor del túnel	D=0
	Excavación mecánica o manual en macizo de mala calidad (sin voladura) resultando en la mínima perturbación en el macizo rocoso circundante Cuando se presentan problemas de fluencia con significantes movimientos en el piso, la perturbación puede ser severa a menos que una solera temporal o contrabóveda se instalada, como muestra la fotografía.	D=0 D=5 sin solera
	Voladura de muy mala calidad en un túnel en roca competente con daños locales severos, extendiéndose 2-3m en el macizo circundante.	D=0,8
	Pequeñas voladuras en taludes de ingeniería civil dan lugar a pequeños daños en el macizo rocoso, particularmente si se usan voladuras de contorno como se muestra en el lado izquierdo de la fotografía	D=0,7; buena voladura. D=1 pobre voladura
	Los taludes en las grandes minas a cielo abierto sufren alteraciones significativas debido a las grandes voladuras de producción y también debido a la relajación de tensiones al retirar el estéril de recubrimiento. En algunas rocas blandas la excavación puede llevarse a cavo mediante el ripado y empuje con tractores de orugas y el grado de afección a los taludes será menor	D=1; voladura de producción D=0,7; excavación mecánica.

**Figura 2. 14** Guía para estimar el factor de alteración D.  
**Fuente:** Hoek, E., 2006.

S y a son constantes del macizo rocoso las cuales están en función de GSI y en valor, cuyo valor viene dado por las relaciones:

$$s = \exp\left(\frac{GSI - 100}{9 - 3D}\right)$$

$$a = \frac{1}{2} + \frac{1}{6} (e^{-GSI/15} - e^{-20/3})$$

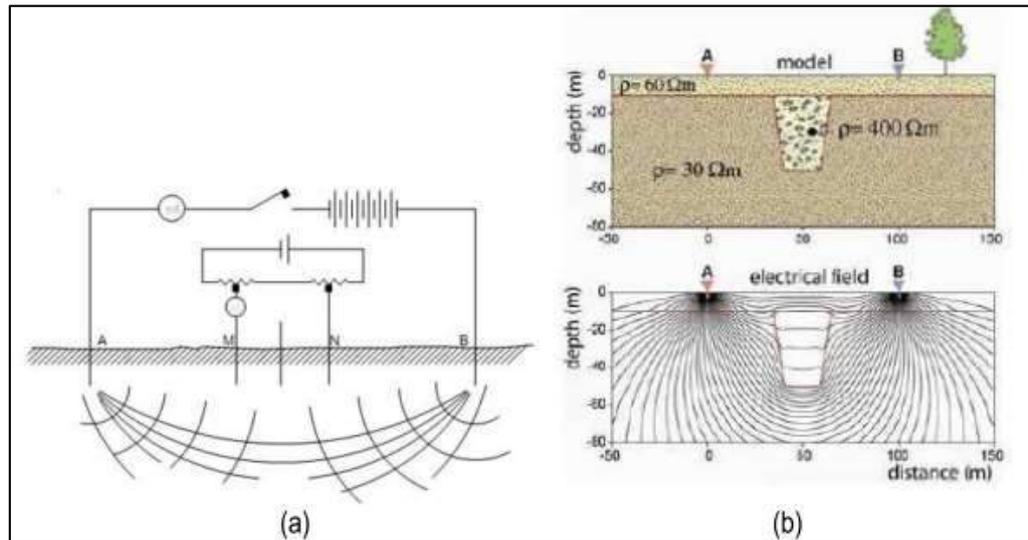
## 2.9 Tomografías eléctricas

Es un método de resistividad multielectrónico, cuyo fin es obtener modelos en 2D y 3D de resistividades del terreno, es una técnica muy utilizada en diferentes campos como en: geología, minería, petróleo, medio ambiente, geotecnia, ect. Debido a su sencilla aplicación y los resultados que arrojan son de gran confiabilidad.

La metodología para obtener el modelo de resistividad del terreno, consiste en inyectar una cantidad conocida de corriente al terreno a partir de una configuración de electrodos ubicados a distancias conocidas, la inyección de corriente en el terreno provocará una diferencia de potencial entre los dos puntos, este proceso será repetido varias veces dependiente de la profundidad que se desea llegar, obtenidas las medidas de diferencia de potencial, se dispone una distribución de resistividades experimentales a lo largo de la zona, la figura 2.15 muestra esquemáticamente el proceso de este método.

En la aplicación de este método hay que tener muy en cuenta la heterogeneidad del subsuelo, esto quiere decir, que el suelo está compuesto por diferentes capas y materiales, y cada capa tiene un comportamiento diferente y medida de resistividad, entonces el conjunto de resistividades medidas no corresponderá a una distribución real sino a una amalgama de todas las capas presentes en el subsuelo, por lo cual para obtener los perfiles y modelos 3D de resistividades del terreno se

realiza a través de técnicas de inversión utilizando un sistema de iteración.(Teixidó & Quintana, 2013).



**Figura 2. 15** (a) Método de prospección eléctrica (b) Líneas equipotencial de resistividades.  
**Fuente:** Teixidó et al., 2013.

# **CAPÍTULO 3**

## **TRABAJO DE CAMPO Y GABINETE**

### **3.1 Red de control geodésica para control de subsidencias en el casco urbano de Zaruma.**

A pesar de sucesos ocurridos en la ciudad de Zaruma, en años posteriores, que prevenían sobre la existencia de movimientos de desplazamientos, no existía en la ciudad una red de monitoreo de subsidencias, después de lo ocurrido en la Escuela La Inmaculada, el INIGEMM implemento una red de control topográfico, mediante mediciones periódicas con Estación Total TOPCON GTS-750 convencional con una precisión de angular de 3 segundos y en distancia de 2 mm. para poder llevar un control, esta red estaba en un principio compuesta por 24 puntos de control de las cuales se tienen datos de 3 mediciones realizadas durante 2 meses (Marzo-Abril) con un rango de tiempo de 45 días entre la primera y la última medición.

Para el presente proyecto se ubicaron 5 puntos de control permanentes distribuidos en 3 zonas, en las cuales se tienen registros de anomalías de desplazamientos, de estos puntos se tomaron 4 puntos de control de la red del INIGEMM y 3 puntos de control topográfico del catastro GAD municipal de la ciudad, los cuales eran usados como puntos de levantamientos topográfico en trabajos de catastros, serán usados en la red de control de subsidencias en el casco de la ciudad de Zaruma, teniendo como base principal como punto de control, el hito del IGM, ubicado en glorieta del parque central de ciudad, los puntos serán

ocupados por los receptores GNSS de tipo geodésico para realizar medidas periódicas mensuales.

La función de estos 12 puntos que en su conjunto conforman la red que se va estudiar en este proyecto, es el de recopilar datos periódicamente, que luego después de un post-proceso realizar las respectivas correcciones, que den resultados de alta confiabilidad.

### **3.1.1 Antecedentes**

Durante los meses de Marzo-Abril del 2017 se realizaron campañas de monitoreo topográfico por medio de estación total, se realizaron 3 campañas utilizando esta herramienta, de esta campaña se obtuvieron 24 puntos de control, a partir de Junio de 2017 se empezó a realizar una campaña de monitoreo por medio de receptores GNSS, la cual tendrá una duración de tres meses y se realizarán 3 mediciones, para ver la evolución de los puntos en el tiempo y comprobar si existen desplazamiento y/o subsidencias, la figura 3.1 muestra la red de control del INIGEMM, de la cual se obtuvo datos para 2 meses.



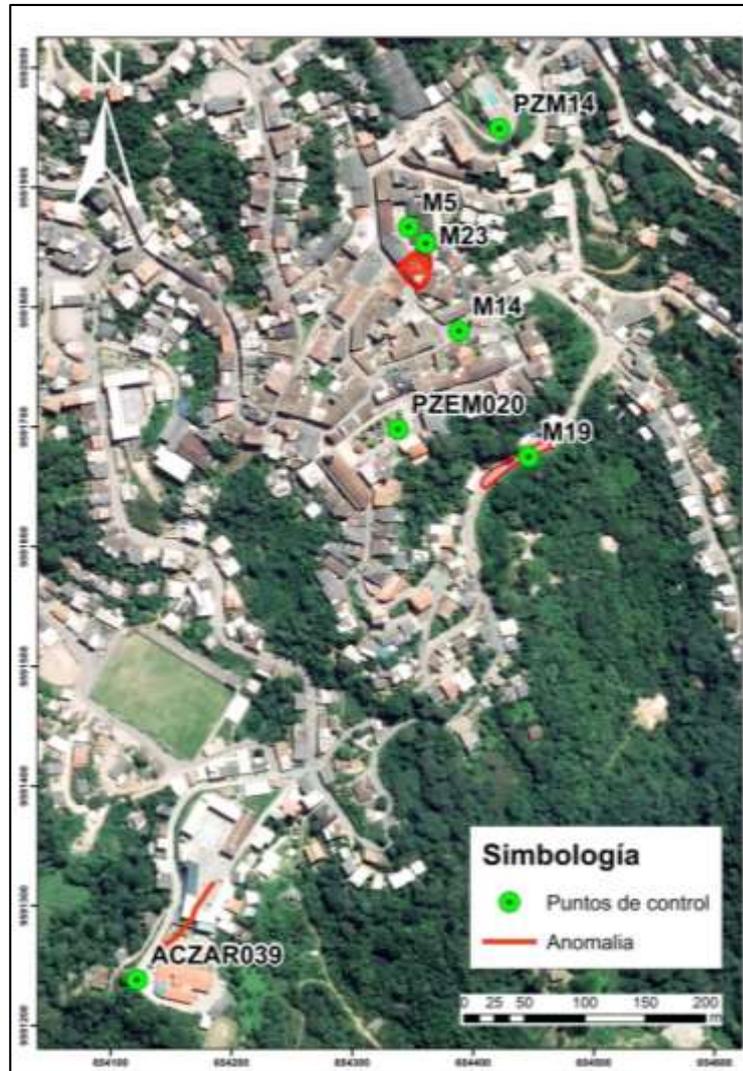
**Figura 3. 1** Puntos de control existentes en la ciudad de Zaruma.  
**Fuente:** Campoverde , C., 2017.

### 3.1.2 Ubicación de los puntos de control

A partir de los puntos base seleccionados de la red del INIGEMM y del GAD municipal, se seleccionaron otras localidades para ubicar 5 nuevos puntos de control permanente, tomando como referencia localidades donde se han observado o registrado eventos de subsidencias y afectaciones a infraestructuras.

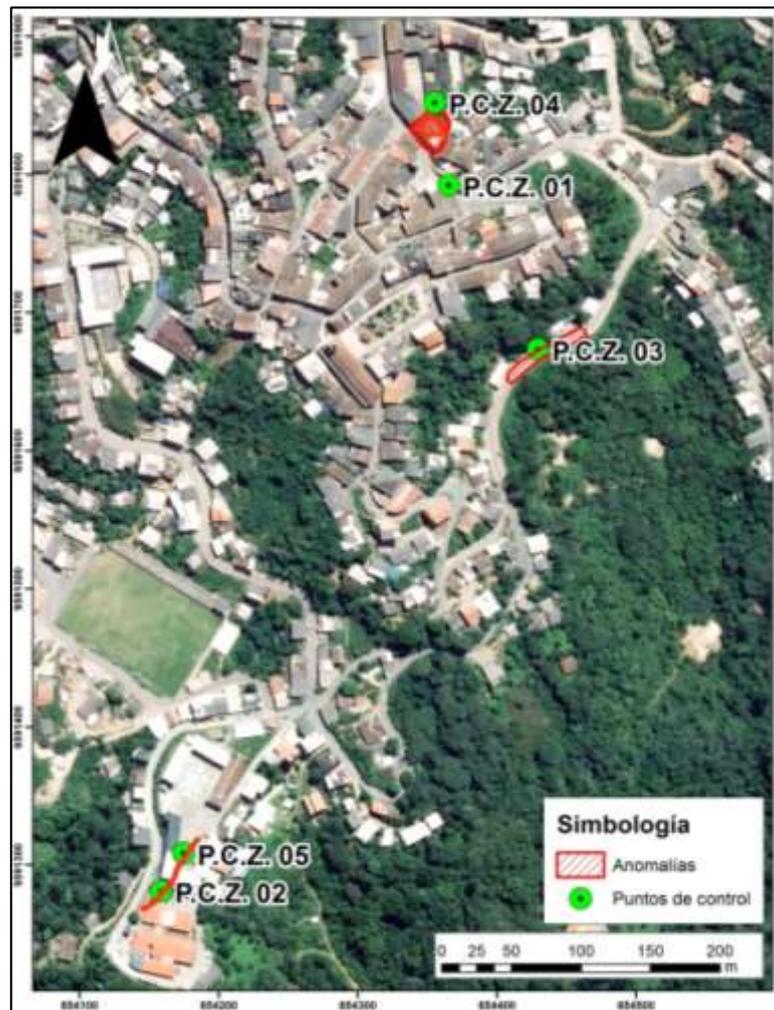
En la figura 3.2 se muestran la ubicación de los puntos previamente establecidos por el INIGEMM y el GAD municipal que serán utilizados en la red de monitoreo que se implementará en la ciudad para el control de subsidencias, cabe recalcar que se tomaron un

total de 7 puntos de esta red previamente establecida por estas entidades.



**Figura 3. 2** Puntos de control seleccionados en la ciudad de Zaruma.  
**Fuente:** Campoverde , C., 2017.

Estos puntos sirven como una red de partida para la instalación de puntos permanentes en la zona, la figura 3.3, muestra las localidades de los puntos que se instalaron de manera permanente a modo de hitos en la zona de estudio, los cuales fueron distribuidos de la siguiente manera: 2 puntos en la zona céntrica, dentro y fuera de la Escuela La Inmaculada, 1 punto en la Avenida Gonzalo Pizarro, y otros dos puntos en la zona del hospital y Colegio Juan Bosco.

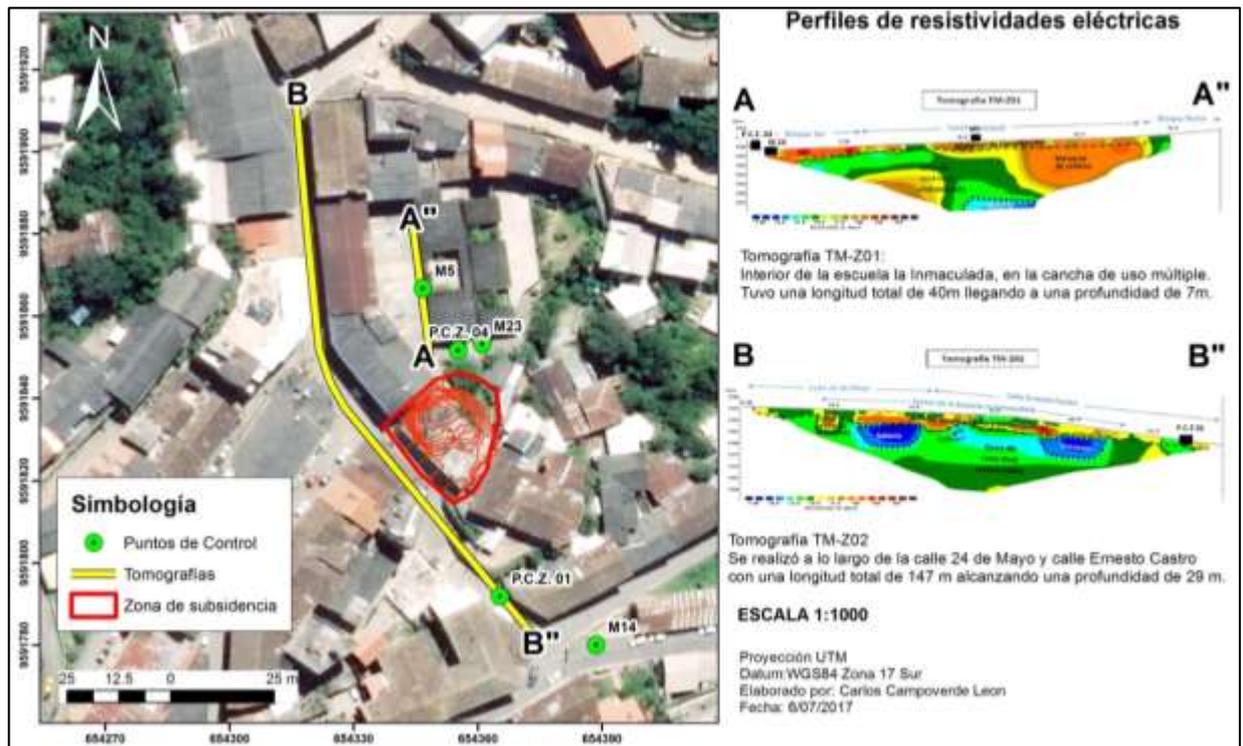


**Figura 3. 3** Red de puntos instalada en la zona de estudio.  
**Fuente:** Campoverde , C., 2017.

Se dividió a la ciudad en 3 zonas, las cuales están marcadas con eventos de subsidencias y/o desplazamientos, los criterios utilizados para seleccionar la ubicación de los puntos de control en estas zonas, estuvieron basados en antecedentes previos como; el informe de la SGR, donde por medio de tomografías eléctricas se analizaron el estado de subsuelo en distintas localidades del casco urbano de la ciudad, notas de prensa realizadas en la ciudad, informes de ARCOM.

### **Zona 1**

La zona 1 comprende la zona en la cual está enfocado este estudio, el casco urbano céntrico de la ciudad, enfocada en la Escuela La Inmaculada y sus alrededores, la figura 3.4 muestra la ubicación de la zona 1 y las tomografías eléctricas realizadas en esta zona.



**Figura 3. 4** Zona 1 de estudio, escuela La Inmaculada y sus alrededores.  
**Fuente:** Campoverde , C., 2017.

En la zona 1 se realizaron varias tomografías eléctricas por parte de INIGEMM, las cuales en la figura 3.4 se muestran los perfiles del terreno de mayor interés para este estudio obtenidos de estas tomografías y que serán usados en este estudio, el perfil A-A", fue realizado a partir de la tomografía eléctrica TM Z-01, al interior de la Escuela La Inmaculada en la cancha de uso múltiple, con una longitud de 40 m. con lo cual se alcanzó una profundidad de 7 m., en la interpretación de este perfil se identificó una capa superficial de 1 m. de espesor, lo cual corresponde a material de relleno y capa de cimentación, esta capa, se encuentra delimitada por una

línea punteada, bajo esta capa existe una capa hasta los 7 m de profundidad, la cual se interpreta como roca muy meteorizada, y es representada en el perfil con una coloración verde y amarilla, y también una capa de material de relleno representada con un color naranja, en este perfil se pudo observar una anomalía entre los 18 – 24 m desde el inicio de la tomografía hacia el sentido sur a una profundidad de 6 m, en el perfil se representa con una coloración azul, esta anomalía corresponde muy posiblemente a una zona de vacío en el subsuelo, posiblemente una galería. (SGR, 2017)

Se ubicó un punto de control del INIGEMM en este perfil justamente en la mitad y a unos 30 metros de uno de los bordes de frontera de la subsidencia de la escuela. También se instaló otro punto a un extremo del perfil, a unos 10 metros de un borde de frontera de la subsidencia y a 3 metros de uno de los puntos de control del INIGEMM, en total dentro de la escuela se tendrán como control; 3 puntos, dos de la red del INIGEMM y uno instalado.

El perfil B-B", fue realizado a partir de la tomografía TM Z-02 fue realizado a lo largo de la calle 24 de Mayo y Ernesto Castro, su longitud total 147 m., con lo que se alcanzó una profundidad total de 29 m. a lo largo de este perfil se pudieron identificar diferentes estratos, empezando por una primera zona superficial de 3 m. de espesor, y que está delimitada con una línea punteada, esta zona corresponde a una capa asfáltica, cimentaciones de soporte de

infraestructura y alcantarillados, por debajo de esta capa se identificó una capa de roca muy meteorizada que está representada en el perfil con una coloración verde, en este perfil se pudo observar dos anomalías, que se interpretan como zonas de vacío en el subsuelo, la primera de ella ubicada entre los 37 m. hasta 55 m. medidos desde el inicio de la tomografía y a una profundidad de 4 m. sobre la superficie. La segunda anomalía se identificó entre los 93 m.- 111 m. medidos desde el inicio de la tomografía, encontrada a una profundidad de 3 m. esta anomalía corresponde al socavón de la Escuela La Inmaculada, estas anomalías pueden observarse con una coloración azul en el perfil.

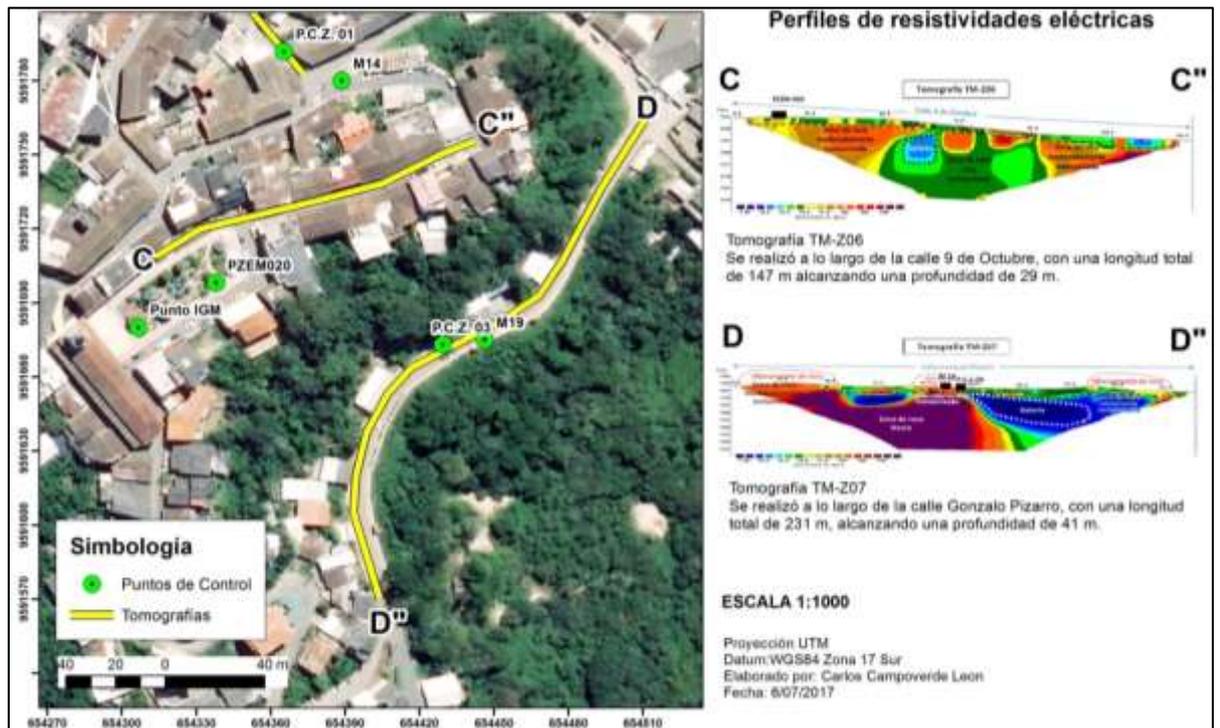
En este perfil se ubicó un punto de control a un extremo del perfil debido a la cercanía con el socavón, y a las anomalías presentes en la superficie con resquebrajamiento en las estructuras sobre la superficie como se muestra en la figura 3.5. Este perfil se encuentra cercano a dos puntos de control del INIGEMM, de los cuales se seleccionó uno para la red de monitoreo de este proyecto.



**Figura 3. 5** Resquebrajamiento en una pared producto de eventos de movimientos en la zona.  
**Fuente:** Campoverde , C., 2017.

## **Zona 2**

Esta zona se encuentra definida detrás de las inmediaciones del GAD municipal, a lo largo de la calle Gonzalo Pizarro, esta zona será una de las zonas las cuales será monitoreada debidos a las anomalías de desplazamiento presentadas tanto en superficie como en el subsuelo de la misma, la figura 3.6, muestra algunas de las anomalías identificadas por medio de tomografías eléctricas y la ubicación de puntos de control en la zona (SGR, 2017).



**Figura 3. 6** Segunda zona de control en el casco urbano de la ciudad de Zaruma.

**Fuente:** Campoverde , C., 2017.

En la segunda zona dentro del casco urbano de Zaruma, se tomaron como referencia dos perfiles, realizados a partir de tomografías eléctricas, el perfil C-C'' fue realizado a partir de la tomografía TM-Z06, la cual fue realizada a lo largo de la calle 9 de Octubre, con una longitud de 147 m. alcanzando hasta una profundidad de 29 m. en este perfil se identificó una zona superficial de 3 m. de espesor la cual se definió como la zona de capa asfáltica, alcantarillado, cimentaciones. Después de esta zona se identificaron dos zonas correspondientes a roca meteorizada, las cuales están ubicadas entre los 0-60 m. y la otra entre los 96-200 m. medidos desde el inicio de la tomografía, en el perfil puede

ubicarse esta zona con una coloración anaranjada, y entre esta zona intermedia que se encuentra entre los 60-96 m. se identificó una zona con roca totalmente meteorizada, que se representa en el perfil con una coloración verde (SGR, 2017).

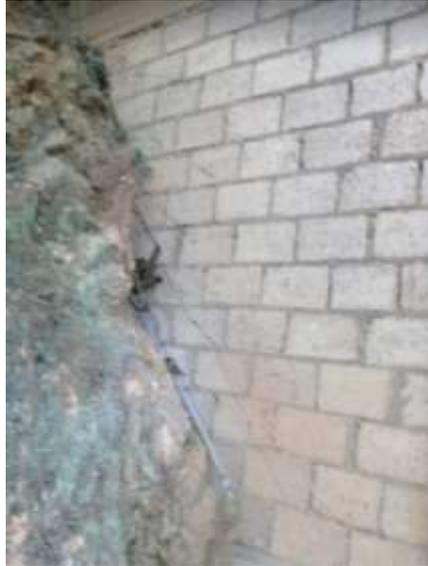
Este perfil se usó como referencia para sustentar el uso de un punto de la red del GAD municipal en el parque central de la ciudad, que se encuentra a un extremo del perfil a unos 20 metros perpendicular del perfil y a 40 metros desde el inicio de la tomografía, este punto será usado como control tanto para la zona 1 y zona 2 (SGR, 2017).

El perfil D-D", realizado a partir de la tomografía TM-Z07, a lo largo de la calle Gonzalo Pizarro, con una longitud total de 231 m, se alcanzó una profundidad de 41 m. en este perfil se pudo identificar una primera capa de 3 m de espesor que corresponde a la capa asfáltica, cimentaciones, infraestructura y alcantarillado, luego de esta capa se identificaron varias capas, una capa ubicada desde los 0-54 m. y desde los 90-114 m. medidos desde el inicio de la tomografía, se pudieron observar que estas capas corresponden a unas formaciones relacionados con dos afloramientos observados en superficie, en el perfil estas zonas se identifican con color naranja (SGR, 2017).

Bajo estas dos zonas, se identificaron zona cuyas bajas resistividades, han llevado a que se interpreten como roca fresca,

que pueden visualizarse en el perfil con coloración morada, entre los 176-231 m. medidos desde el inicio de la tomografía, se identificaron anomalías con bajas resistividades, que se interpretó como una zona de roca totalmente meteorizada, la cual se presenta en el perfil con una tonalidad azul, que se relaciona con otra gran anomalía ubicada entre los 120-175 m. y a una profundidad de 6m, esta anomalía se presume como una gran galería minera (SGR, 2017).

Basados en este perfil se instaló un punto de control y se seleccionó uno de los puntos de control del INIGEMM, para la red de control y monitoreo del presente proyecto, estos puntos fueron ubicados cerca de resquebrajamientos en estructuras vistos en infraestructura cercana, específicamente resquebrajamientos en casa, como se observa en la figura 3.7.



**Figura 3. 7** Resquebrajamiento de una extensión de aproximadamente 10 m. visto en una casa  
**Fuente:** Campoverde , C., 2017.

### **Zona 3**

Está ubicado en la zona sur de la ciudad de Zaruma, en el hospital de la ciudad y el Colegio Juan Bosco, como se muestra en la figura 3.8, aquí se muestra el mapa de ubicación de los puntos de control escala 1:1000 ubicados en base a anomalías vistas en superficie, resquebrajamientos en las estructuras superficiales, claramente presentes en las paredes de la escuela y el hospital.



**Figura 3. 8** Zona 3, localizada dentro del hospital y la colegio Juan Bosco.

**Fuente:** Campoverde , C., 2017.

Esta zona fue seleccionada debido a la falta de monitoreo y a las anomalías visibles, en donde se pudo constatar en la escuela resquebrajamientos en el suelo, y la separación de un bloque de aulas de alrededor 5 cm. En el hospital que se encuentra detrás de este bloque ocurre la misma situación, en donde se hace más visible la situación del hospital la figura 3.9 (a) (b) muestra claramente la situación expresada.



(a)

(b)

**Figura 3. 9** Anomalías presentes en la zona 3 (a) anomalía presente en Colegio Juan Bosco (b) macro fractura presente en el hospital.

**Fuente:** Campoverde , C., 2017.

Como se muestra en la figura 3.8 se observan las anomalías mencionadas, la anomalía en el colegio se extiende hacia la parte de atrás del colegio, y se muestra la separación de los bloques, de alrededor de 5 cm. en la parte de atrás se encuentra el hospital.

### 3.1.3 Monumentación

La monumentación de los hitos de control instalados en la zona, cumple con los requisitos estándar de una instalación de carácter geodésico de primer orden en lo concerniente a su estabilidad, posicionamiento y acceso.

Para identificar las placas de control se inscribió en las mismas: Nombre de la instituciones colaboradores (ESPOL-GAD ZARUMA), Proyecto (Tesis: Carlos Campoverde), Nombre de la placa (P.C. ZARUMA 01 hasta P.C. ZARUMA 05), año de elaboración (2017), la figura 3.10, muestra una de las placas instaladas como hitos.



**Figura 3. 10** Modelo de placa instalada en la ciudad de Zaruma.  
**Fuente:** Campoverde , C., 2017.

A continuación se detallan las ubicaciones e instalación de las cinco placas alrededor del casco urbano de la ciudad de Zaruma.

La placa P.C. ZARUMA 01 se encuentra empotrada en la calle Ernesto Castro sentido sur a medio metro de la vereda y a 10 metro de la Calle Colón, como se muestra en la figura 3.11.



(a)

(b)

**Figura 3. 11** (a) Vista en planta de la ubicación de la placa P.C.Z. 01 (b) Monumentación y medición de la placa P.C.Z. 01.

**Fuente:** Campoverde , C., 2017.

La placa P.C. ZARUMA 02 se encuentra empotrada dentro de las instalaciones del hospital, en las escalinatas de la entrada al mismo, como se muestra en la figura 3.12.



(a)

(b)

**Figura 3. 12** (a) Vista en planta de la ubicación de la placa P.C.Z. 02 (b) Monumentación y medición de la placa P.C.Z. 02.

**Fuente:** Campoverde , C., 2017.

La placa P.C. ZARUMA 03 se encuentra empotrada en una vereda de lado derecho en sentido sur a la mitad de la avenida Gonzalo Pizarro, como se muestra en la figura 3.13.



(a)

(b)

**Figura 3. 13** (a) Vista en planta de la ubicación de la placa P.C.Z. 03 (b) Monumentación y medición de la placa P.C.Z. 03.

**Fuente:** Campoverde , C., 2017.

La placa P.C. ZARUMA 04 se encuentra empotrada dentro de las instalaciones de la Escuela de La Inmaculada, en las escalinatas ubicadas de lado este de la cancha de básquet como se muestra en la figura 3.14.



(a)

(b)

**Figura 3. 14** (a) Vista en planta de la ubicación de la placa P.C.Z. 04 (b) Monumentación y medición de la placa P.C.Z. 04

**Fuente:** Campoverde , C., 2017.

La placa P.C. ZARUMA 05 se encuentra empotrada dentro de las instalaciones del colegio Juan Bosco, en el patio principal del colegio, como se muestra en la figura 3.15.



(a)

(b)

**Figura 3. 15** (a) Vista en planta de la ubicación de la placa P.C.Z. 05 (b) Monumentación y medición de la placa P.C.Z. 05

**Fuente:** Campoverde , C., 2017.

### 3.1.4 Control periódico de los puntos de control

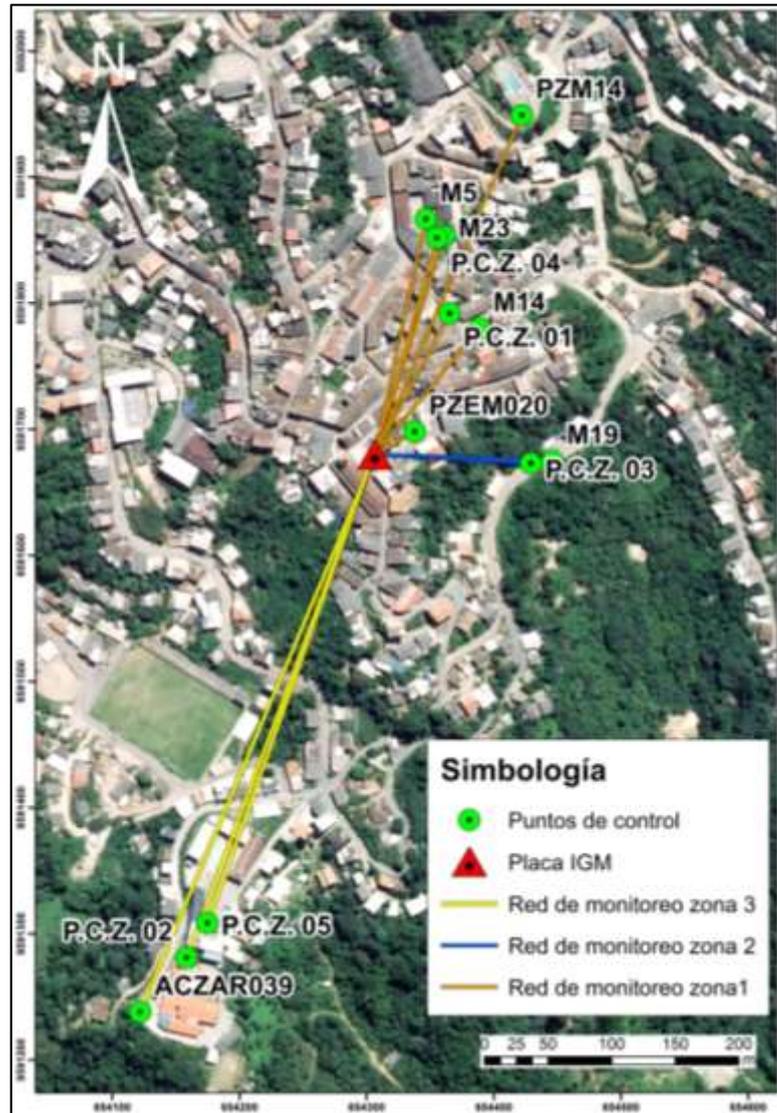
Definidas las zonas de monitoreo, en la ciudad de Zaruma se procede a definir la red de monitoreo a implementar en la ciudad, la cual cuenta con 12 puntos de control, ubicados en tres zonas definidas como zonas en las cuales se han registrado eventos de movimientos e hundimientos, la figura 3.16, se muestran los puntos de control de la red de monitoreo, y la ubicación del punto de control, el cual es el hito del IGM, ubicado en la glorieta del parque central de la ciudad, las coordenadas de este punto del IGM se presentan en la tabla III.

**Tabla III.** Punto IGM, ubicado en la glorieta del parque central.

Punto	X	Y	Z
Punto IGM	654306.563	9591680.196	1195.620

**Fuente:** Campoverde , C., 2017.

Esta red implementada será monitoreada por 3 meses, con el fin de llevar un control periódico mes a mes y poder analizar la existencia de movimientos en la ciudad.



**Figura 3. 16** Red de monitoreo de subsidencias en la ciudad de Zaruma.  
**Fuente:** Campoverde , C., 2017.

### 3.2 Análisis Geomecánico: Escuela La Inmaculada

Con el fin de comprender los factores que llevaron al colapso del bloque de aulas sur de la Escuela La Inmaculada, se realiza un análisis geomecánico en la zona, donde por medio de perforaciones realizadas y su logeo

geomecánico mediante el RMR de Bienawski, se realizan modelamientos geológico, geomecánico y un análisis de los esfuerzos inducidos alrededor de la excavación subterránea ubicada por debajo de la escuela mediante los software Rockworks 16, Arcgis 10.2.2, RocData y Phase 2.

### **3.2.1 Perforaciones**

Se realizaron perforaciones por parte del INIGEMM, con el fin de recolectar muestras inalteradas de la zona de estudio, se realizaron un total de 5 perforaciones, con profundidades variables y un diámetro de perforación HQ, que equivale a 63.5 mm como diámetro interno y 95.6 mm como diámetro externo, la figura 3.17 muestra la ubicación de las perforaciones en el área de estudio, donde vemos que se encuentran distribuidos alrededor de una área de  $4000 \text{ m}^2$ , dentro de la Escuela La Inmaculada y sus zonas circundantes hacia el lado sur.



**Figura 3. 17** Ubicación de sondeos en la zona de estudio.  
**Fuente:** Campoverde , C., 2017.

Las perforaciones fueron realizadas a profundidades variables, la tabla IV muestra un resumen de las características técnicas de los sondeos realizados por el INIGEMM.

**Tabla IV.** Datos técnicos de los sondajes exploratorios, logísticos y de remediación del proyecto La Inmaculada-Zaruma

NOMBRE	FECHA		Duración Días	COORDENADAS INICIO			LONGITUD (m)	AZIMUT (°)	INCLINACION (°) R/H
	Inicio	Final		ESTE	NORTE	COTA			
SONDEO 1	3/3/2017	6/3/2017	3	654343.498	9591862.816	1206.195	70.25	0	-90
SONDEO 2	8/3/2017	15/3/2017	7	654341.208	9591784.307	1198.387	80	175	-87
SONDEO 3	22/3/2017	10/4/2017	19	654369.064	9591787.614	1193.642	61.95	214	-87
SONDEO 4	11/4/2017	16/4/2017	5	654349.406	9591820.712	1201.898	58.25	79	-87.5
SONDEO 5	17/4/2017	24/4/2017	7	654367.823	9591785.761	1193.67	62.2	228	-86.5

**Fuente:** INIGEMM, 2017.

### 3.2.2 Logeo geotécnico

El INIGEMM, como parte de las actividades que realiza, es el ente encargado de las investigaciones geológicas del Ecuador,

supervisa las actividades de remediación en la Escuela La Inmaculada, para poder realizar una caracterización de la zona, las perforaciones fueron realizadas a profundidades variables, ya que algunas se realizaron con fines más allá de investigación del subsuelo. A continuación se realiza un breve análisis de cada sondeo.

### **Sondeo 1**

Este sondeo se realizó en el patio de la Escuela La Inmaculada, tuvo una longitud de 70.25 m. de acuerdo al logeo geológico realizado por el INIGEMM, se tiene una primera capa de 30 cm. correspondiente a hormigón, luego una capa de alrededor de 19.70 m. de longitud de arcilla, la cual de acuerdo a su composición corresponde a saprolito, después de esta capa, se encuentra una capa de alrededor de 5 m. de espesor de andesita fuertemente meteorizada y por último, una capa de brecha volcánica de un espesor 45 m. de longitud hasta el fin del sondeo, como parte del logeo se realizó además el cálculo del RMR en cada maniobra, el mismo se encuentra en el ANEXO A (ver anexo A), los valores varían de RMR obtenido varían en un rango que va desde 14 para el valor más bajo hasta un valor de RMR de 67.

### **Sondeo 2**

Este sondeo está ubicado al suroeste de la zona de estudio, se realizó en el patio de una vivienda del sector, tuvo una longitud de

80 m. y de acuerdo al logeo geológico realizado por el INIGEMM, se tienen dos litologías bien definidas, una primera capa de arcillas saprolíticas de una longitud de 3 m. y una capa de andesitas que se extiende hasta finalizar el sondeo en los 80 m., entre los primeros metros de andesita la misma se encuentra en un alto grado de fracturación, esto corresponde a una capa de unos 11 m. de espesor, después de esta capa la meteorización cambia de moderada durante unos 3 metros hasta obtener una roca relativamente sana, se realizó el cálculo del RMR en cada maniobra, el mismo se encuentra en el Anexo B (ver anexo B), se observa que valores de RMR, que varían en un rango que va desde 22 hasta 72, en las partes más profundas del sondeo.

### **Sondeo 3**

Este sondeo está ubicado al sureste de la zona de estudio, se realizó en el lado izquierdo sentido sur-norte de la calle 24 de Mayo y Ernesto Castro , tuvo una longitud de 61.95 m. y de acuerdo al logeo realizado por el INIGEMM, se tiene una primera capa de hormigón que abarca unos 60 cm. después de esta capa, se encuentran tres litologías bien definidas una primera capa de arcillas saprolíticas de una longitud de 3 m. de longitud, la segunda capa está compuesta de andesitas, dentro de la cual se subdivide en una primera capa de andesitas fuertemente meteorizadas de 13 m. de longitud, luego se observó una capa de andesita con una

fracturación moderada de alrededor 2 metros, en este sondeo se pudieron ver también dos intercalaciones de vetas de 30 cm. de espesor, la primera ubicada a los 18 m. de profundidad y la segunda ubicada a los 20 m. de profundidad, entre estas vetas se encontraba una capa de andesita, luego de las capas de vetas vistas, se observó andesita hasta los 22m. de profundidad de la perforación y después de los 22 m. de profundidad existe una capa de brechas volcánicas que se extiende hasta finalizar la perforación, en donde se hizo contacto con la cámara que se encuentra en el subsuelo, se realizó el cálculo del RMR en cada maniobra, el mismo se encuentra en el Anexo C (ver anexo C), los valores de RMR obtenidos varían entre 4 y 70.

#### **Sondeo 4**

Este sondeo está ubicado al suroeste de subsidencia de la Escuela La Inmaculada, se realizó en la calle 24 de Mayo y Ernesto Castro, tuvo una longitud de 58.25 m. y de acuerdo al logeo realizado por el INIGEMM, se tienen tres litologías bien definidas una primera capa de arcillas saprolíticas de una longitud de 5 m., la segunda capa está compuesta de andesitas, dentro de la cual se subdivide en una primera capa de andesitas fuertemente meteorizadas de 10 m. de longitud, y la capa restante de andesita con una fracturación moderada, luego se observó una capa de brechas volcánicas con una fuerte mineralización hasta los 41.15 m de profundidad desde

la superficie, después de esta capa la perforación muestra un dique andesítico de 6 m. de longitud, a los 47.15 m. de profundidad se tiene una capa de brechas volcánicas que se extiende hasta finalizar el sondeo, se realizó el cálculo del RMR en cada maniobra, el mismo se encuentra en el Anexo D (ver anexo D), obteniendo valores de RMR que varían en un rango de 8-72. Los mínimos valores en la superficie e incrementándose el RMR a medida que se profundiza.

### **Sondeo 5**

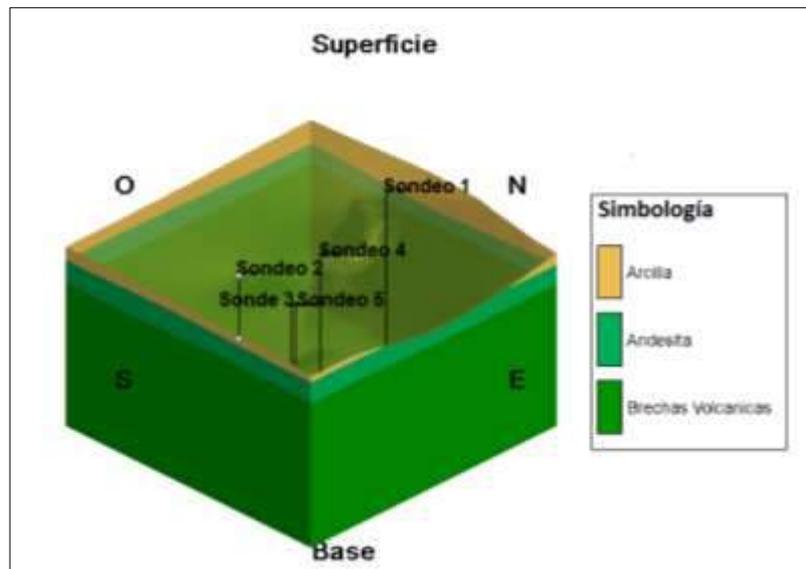
Este sondeo está ubicado en el lado derecho sentido sur-norte de la calle 24 de Mayo y Ernesto Castro, separado a 3 m hacia el oeste del sondeo 2, tuvo una longitud de 62.20 m. y de acuerdo al logeo realizado por el INIGEMM, se tienen tres litologías bien definidas una primera capa de arcillas saprolíticas de una longitud de 4.0 m., la segunda capa está compuesta de andesitas fuertemente meteorizadas de 1.5 m. de espesor, luego se observó una capa de brechas volcánicas hasta finalizar la perforación, es decir hasta los 62.20 m de profundidad desde la superficie, en donde se pudo hacer contacto con la cámara minera localizada debajo del subsuelo, se realizó el cálculo del RMR en cada maniobra, el mismo se encuentra en el Anexo E (ver anexo E), el rango de RMR obtenido en este sondeo varia de 3 hasta 74.

Como se mencionó anteriormente, algunos de los sondeos se realizaron con otros fines, los sondeos tres y cinco, su objetivo era comunicar con la cámara minera ubicada bajo el subsuelo y servir de puente de comunicación para poder enviar a esta cámara líneas de agua y energía para poder empezar con las labores de sostenimiento planificadas por el INIGEMM en la zona de la Escuela La Inmaculada.

### **3.2.3 Modelo geológico: Rockworks**

A partir de los sondeos realizados en la zona de estudio, se procede a realizar un modelo geológico, para visualizar una estimación de la disposición de los estratos en el subsuelo, por lo cual mediante el software Rockworks, una herramienta usada en varias disciplinas afines a las ciencias de la tierra, ya que permite visualizar de datos del subsuelo, este software ofrece un gran número de opciones para el análisis de datos del subsuelo y acepta diferentes tipos de datos, para este caso se ingresaron los datos de la estratigrafía observada en los sondeos, a partir de esto se elaboró un modelo estratigráfico tridimensional, con el propósito de realizar interpretaciones acerca de la extensión de las secuencias litológicas dentro de la zona en donde no se cuenta con información.

El método de interpolación utilizado en el modelamiento es el método de inverso a la distancia simple, debido a la disponibilidad de los datos y a la distribución de los sondeos y su estratigrafía, además que este método es ampliamente usado en topografía y disciplinas similares, también mediante la topografía de la zona obtenida a partir de las curvas de nivel escala 1:10.000 y la realizada por parte del GAD Municipal, se procedió a añadirla a modo de una malla de superficie del terreno, en la figura 3.18 se muestra el modelo construido en el software mencionado.



**Figura 3. 18** Modelo geológico de la zona de estudio.

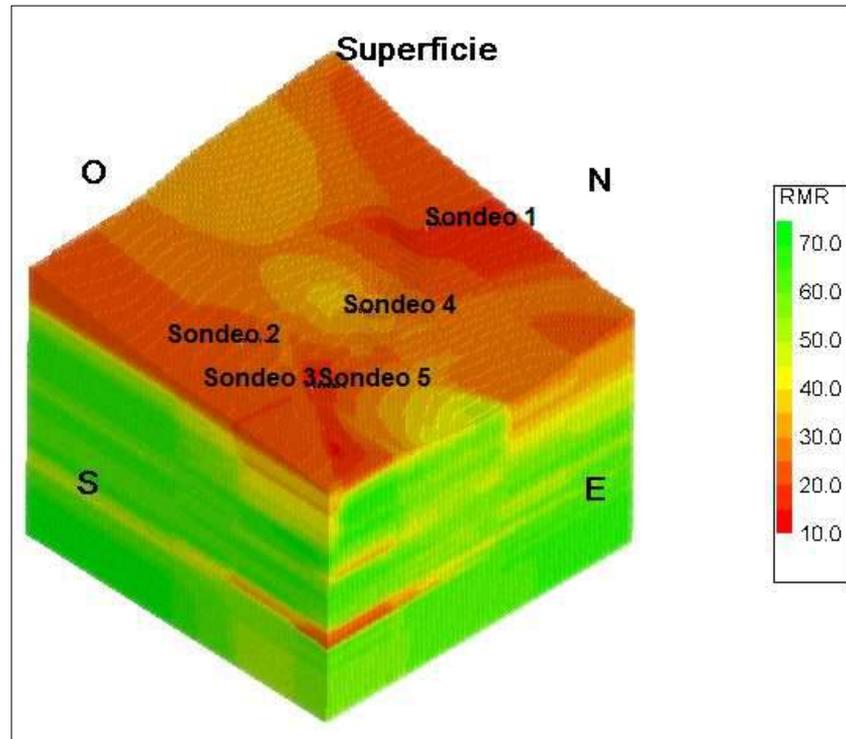
**Fuente:** Campoverde , C., 2017.

A partir del modelo geológico se puede visualizar de mejor manera la distribución de las capas en la zona, para luego relacionarlas con la geomecánica de las mismas y realizar el análisis tensional posterior.

### 3.2.4 Modelo geomecánico: Rockworks

Un modelo geomecánico tiene como base el modelo geológico, para la construcción del mismo, en este estudio, se utilizaron los datos del logeo geomecánico realizado a partir del registro geotécnico a la perforaciones mediante el RMR de Bieniawski, en donde se incluyen las propiedades físicas y mecánicas de la rocas observadas en las perforaciones, a partir de los RMR obtenidos en cada maniobra de las perforaciones se construyó una columna de valores de RMR para cada perforación.

El método de interpolación usado para construir el modelo tridimensional geomecánico de la zona fue el Inverso a la distancia anisotrópico, debido a que se busca modelar el subsuelo, naturalmente el suelo es un material heterogéneo por sí mismo, al igual que las diferentes litologías en el subsuelo, pero el comportamiento de estos estratos es anisotrópicos, de acuerdo a Nisihimura, 2014, demuestra que el suelo se comporta horizontalmente de una manera isotrópica y verticalmente de forma anisotrópica, este comportamiento es explicado debido a las propiedades físicas y mecánicas que lo componen, a partir de esto se modelo el RMR obtenido en cada maniobra de cada perforación, y se obtuvo el modelo que se puede visualizar en la figura 3.19.



**Figura 3. 19** Modelo geomecánico de la zona de estudio.

**Fuente:** Campoverde , C., 2017.

De acuerdo al modelo geomecánico de la zona puede observarse de color rojo-anaranjado los valores de RMR más bajo los cuales van en un rango desde 10-45, estos valores se observan en su mayoría en la superficie, a medida que se profundiza se observan coloraciones con intercalaciones amarillo-verde para valores de RMR superiores a 45 hasta los valores más alto que van hasta 75, puede observarse también que existen valores bajos de lado sur de la zona, estos se explica a que en esa parte se encuentran las perforaciones tres y cinco las cuales hicieron contacto con la cámara minera, por lo cual en estas zonas debido a las labores anti-técnicas realizadas, la roca ha sufrido daños internos que la han debilitado y han disminuido su valor de RMR.

El modelo geomecánico obtenido será correlacionado con las litologías en el modelo geológico para poder realizar en análisis tensional posterior.

### **3.2.5 Análisis tensional del subsuelo: Phase 2.0**

Al realizar una galería minera en el subsuelo, el subsuelo experimenta un cambio tensional, ya que los materiales que se encontraban a modo de confinamiento en el mismo, se ven de pronto liberados de modo que los esfuerzos siguen trayectorias convergentes hacia el centroide del área transversal de la labor realizada, impulsados por el estado inicial de esfuerzos antes de la excavación de labor subterránea.

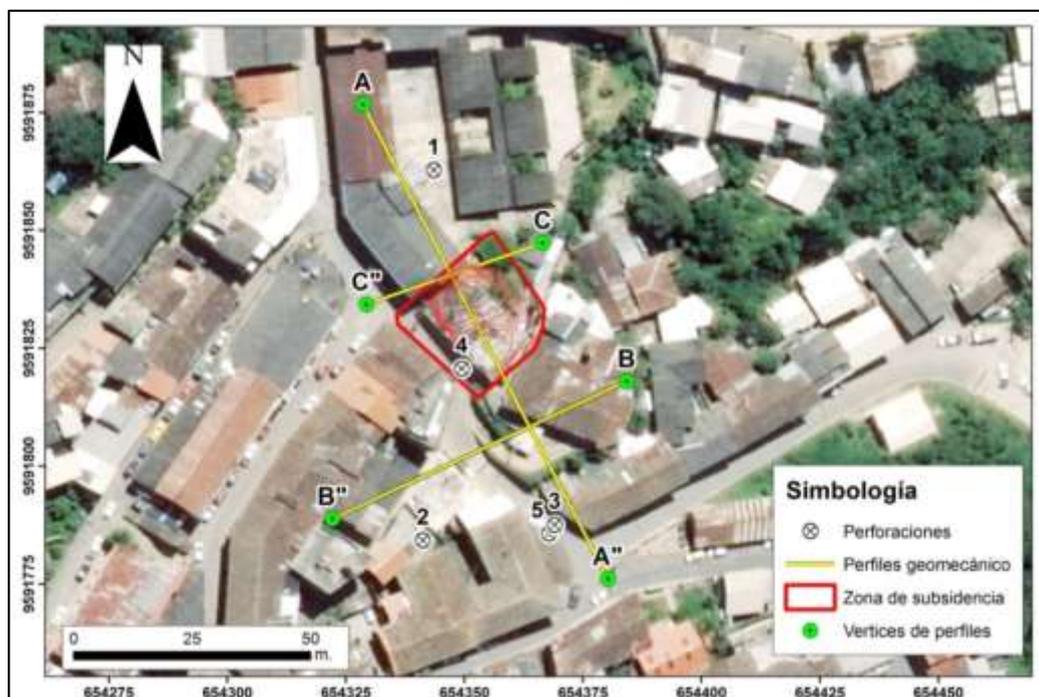
Los esfuerzos liberados en la excavación sufren una redistribución de los esfuerzos principales, para lograr un nuevo estado de equilibrio, esto se explica mediante la teoría de elasticidad alrededor de una abertura formada en un sólido sujeto a un campo de esfuerzos unidireccionales, en el nuevo estado, la roca desconfiada, no puede resistir incremento de esfuerzos generados en la excavación.

El software utilizado en esta sección es el Phase 2, el cual es una de las aplicaciones de este software es el modelamiento en 2D de esfuerzos mediante análisis de elementos finitos y poder llevar a cabo análisis de excavaciones subterráneas o de superficie en roca o suelo.

Para realizar el análisis tensional del subsuelo, tendremos que tener en cuenta que el software requiere ciertos parámetros los cuales son:

- Tipo de material (Litología)
- Propiedades del material

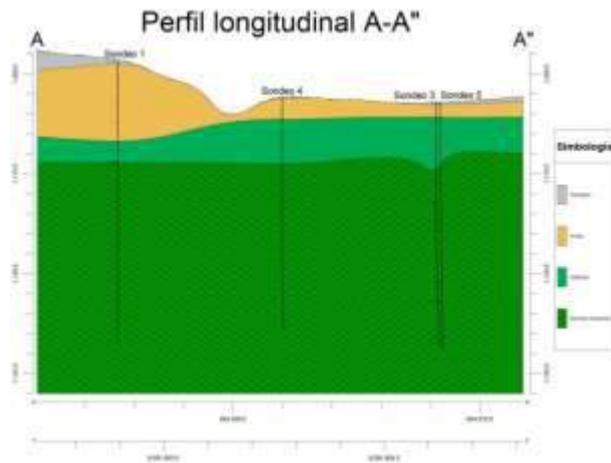
Para obtener estos parámetros en la zona se dibujaron tres perfiles del terreno, 1 perfil longitudinal A-A" y dos perfiles transversales B-B", como se muestra en la figura 3.20, con el fin de poder visualizar posteriormente a manera de perfil las labores subterráneas en el área de estudio.



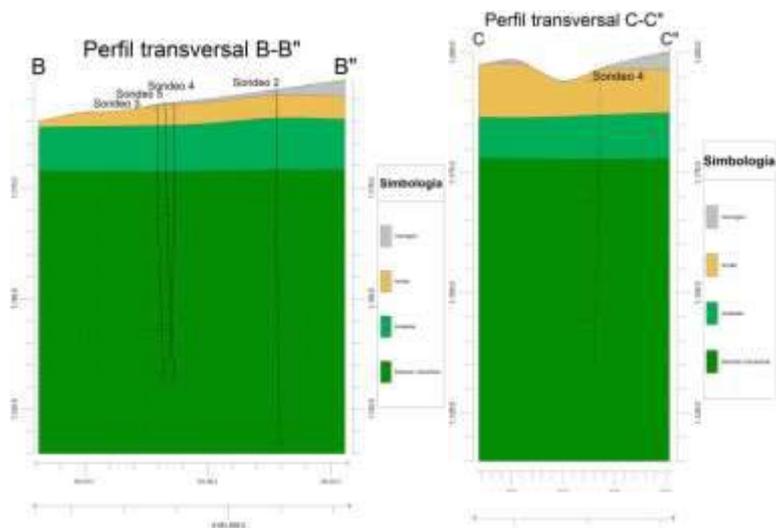
**Figura 3. 20** Perfiles longitudinales y transversales dibujados en la zona de estudio.

**Fuente:** Campoverde , C., 2017.

A partir de los perfiles dibujados y los modelos geológicos y geomecánicos se obtuvieron los parámetros que serán suministrados en el modelamiento tensional y posterior análisis a realizar, para empezar deberemos definir las litologías representativas ya que a partir de estas obtendremos el material y las propiedades físicas y mecánicas necesarias en el modelamiento en la figura 3.21 se pueden observar los perfiles estratigráficos obtenidos a partir del modelo geológico, y se pueden observar las tres litologías mencionadas posteriormente, las cuales son; arcillas saprolíticas (café), andesita (verde claro) y brechas volcánicas (verde con degradaciones circulares), y su disposición en el área de estudio, estas litologías serán los materiales que definiremos en el software.



(a)



(b)

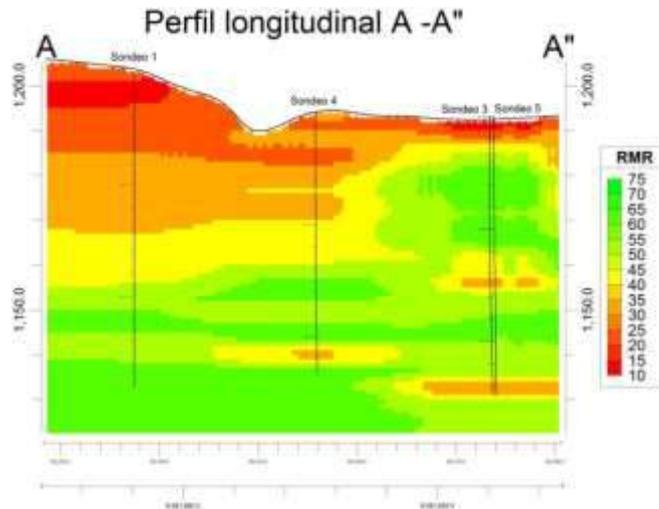
(c)

**Figura 3. 21** Perfil estratigráfico longitudinal (a), perfiles estratigráficos transversales (b) y (c) dibujados en la zona de estudio.

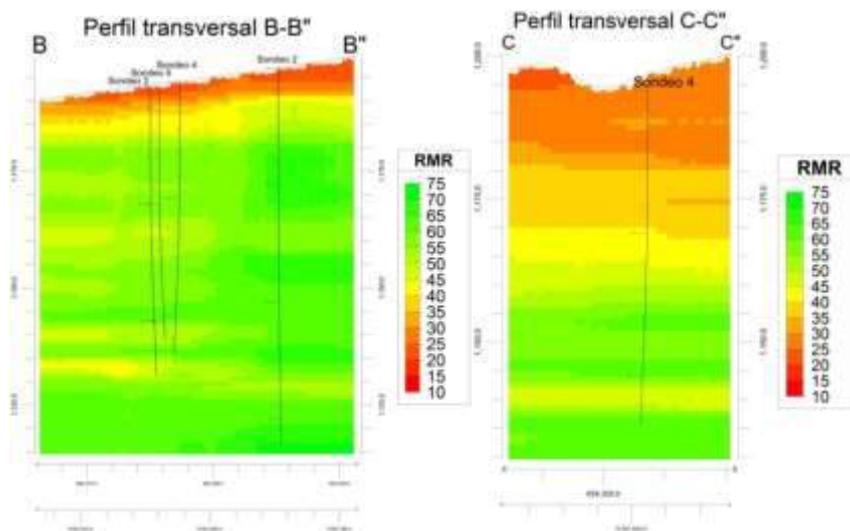
**Fuente:** Campoverde , C., 2017.

Para obtener las propiedades físicas y mecánicas partiremos del modelo geomecánico de la zona, se dibujaron los perfiles y así obtener los perfiles geomecánicos longitudinales y transversales en

la zona, para realizar interpretaciones sobre el estado del macizo rocoso del subsuelo de la Escuela La Inmaculada y sus zonas aledañas, la figura 3.22 muestran los perfiles mencionados.



(a)



(b)

(c)

**Figura 3. 22** Perfil geomecánico longitudinal (a), perfiles geomecánicos transversales (b) y (c) dibujados en la zona de estudio.

**Fuente:** Campoverde , C., 2017.

Como se observa en los perfiles los menores valores de RMR, se encuentran en las cercanías de la subsidencia así como en las zonas dominadas por las arcillas saprolíticas, a partir de la litología y los valores de RMR en la zona se definirán las propiedades de los materiales.

### **Resistencia a la compresión de los materiales**

La resistencia a la compresión se obtiene a partir de los logeos geomecánicos realizados por el INIGEMM, ya que al realizar el cálculo del RMR, el primer parámetro que solicita la clasificación es la resistencia a la compresión, después de un análisis realizado a las cinco perforaciones, se obtuvieron las valoraciones promedio en cuanto a su resistencia que recibió cada material, dichas valoraciones y las resistencias a la compresión se muestran en la tabla V.

**Tabla V.** Valoración para diferentes materiales y su resistencia a la compresión simple.

<b>Litología</b>	<b>Valoración</b>	<b>Resistencia a la compresión simple (Mpa)</b>	<b>Descripción</b>
Saprolito (arcilla)	1	1-25	Muy blanda
Andesita	7	50-100	Dura
Brecha Volcanica	7	50-100	Dura

**Fuente:** Campoverde , C., 2017.

Para el análisis a realizar se procederá a usar la resistencia media en cada rango de los vistos en la tabla para equilibrar el

desconfinamiento de presiones producido al obtener la muestra de la perforación, y debido a que el rango de la valoración es muy amplio.

### **Peso unitario**

El peso unitario se define como la relación entre el peso del material y el volumen del mismo, para este parámetro se usarán valores referenciales obtenidos por bibliografía, Gonzales de Vallejo sugiere valores para las litologías que se tienen definidas en la zona de estudio.

### **Módulo de Young de los materiales**

Para el cálculo del Módulo de Young en el análisis tensional se usarán las relaciones establecidas a partir de RMR, ya que existe una variabilidad muy alta para diferentes zonas con respecto al RMR, esto debido a que hay zonas de igual litología en donde la roca ha sufrido mayor y menores esfuerzo entonces para una misma litología se tienen diferentes valores de RMR, para disminuir variabilidad en los materiales, se usarán los perfiles estratigráficos y geomecánicos creados, para definir diferentes materiales, los cuales estarán definidos a partir de la litología y el valor de RMR más crítico.

### **Coefficiente de Poisson**

El Coeficiente Poisson es otro de los parámetros requerido para el modelamiento, debido a que no se realizaron ensayos para su determinación se usarán valores referenciales dados por la bibliografía, de acuerdo a Gónzales de Vallejo et al., 2008, la tabla vi muestra los valores de Coeficiente de Poisson obtenidos en la consulta.

**Tabla VI.** Valores de Coeficiente de Poisson para los materiales.

<b>Litología</b>	<b>Coeficiente de Poisson</b>
Saprolito (arcilla)	0.3
Andesita	0.23
Brecha Volcanica	0.28

**Fuente:** Campoverde , C., 2017.

#### **Parámetros $m_b$ , $s$ , (criterio de Hoek y Brown)**

Estos parámetros serán obtenidos a partir del software RocData, el cual permite determinar los parámetros de resistencia del suelo y la masa rocosa, el programa será ajustado al criterio de falla generalizado de Hoek y Brown, mediante el sistema de tablas del software, se estimará los parámetros de esfuerzos típicos de las litologías de la zona.

Para poder estimar los parámetros  $m_b$  y  $s$ , propios de criterio de Hoek y Brown se deberá proporcionar al software cuatro parámetros, la resistencia a la compresión, GSI, el cual será determinado mediante la relación con el RMR, la constante del

material  $m_i$  es proporcionada por el software mediante referencias propias de la casa rocscience, y el valor D el cual corresponde al factor de alteración del macizo, será de 0.8 que de acuerdo a los ábacos, este valor, corresponde a túneles con una baja calidad de voladura, lo cual ha producido graves daños en el macizo, que es el caso de estudio en la Escuela La Inmaculada, en la cual se desarrolló una minería anti-técnica.

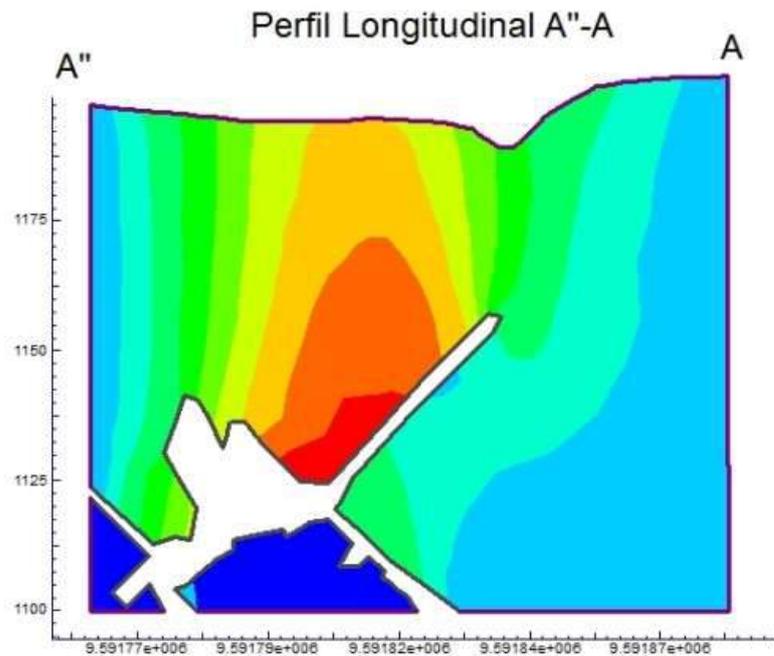
Definidos los valores a ingresar en el software se proceden a definir los distintos materiales que se ingresarán en el Phase 2.0 en base a los perfiles creados.

# **CAPÍTULO 4**

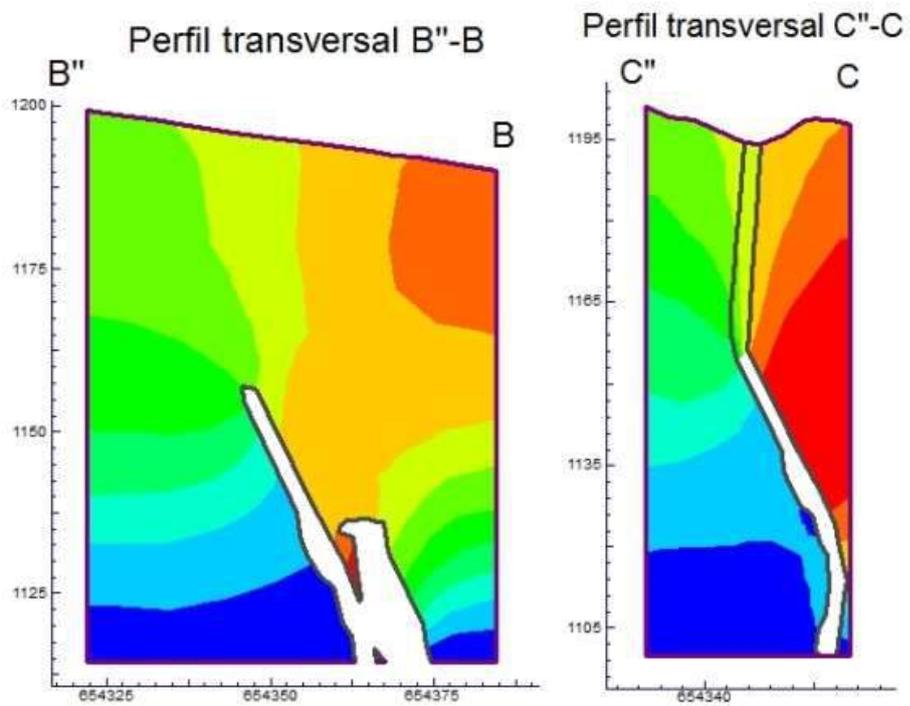
## **ANÁLISIS DE RESULTADOS**

#### **4.1 Análisis de desplazamiento verticales**

A partir del análisis de los materiales que componen el subsuelo y la calidad de la roca establecida en el registro geomecánico dado por el RMR de Bieniawski en cada maniobra, se define el tipo de material para realizar el análisis de desplazamiento verticales en el software Phase 2, el cual utiliza método de elementos finitos, el software realiza un análisis en base al tipo de material que se define, el cual para este caso se basó en su litología y calidad de roca definida en los perfiles, con respecto a las otras propiedades del subsuelo como cohesión, módulo de Young y parámetros del criterio de Hoek y Brown se definieron a partir de relaciones en base al RMR y valores obtenidos de bibliografía, el análisis se realiza en dos dimensiones, en la figura 4.1 se pueden observar los desplazamientos verticales esperados en los perfiles longitudinales y transversales.



(a)



(b)

(c)

**Figura 4. 1** Desplazamientos verticales en perfiles longitudinal (a), transversales (b) y (c) dibujados en la zona de estudio.

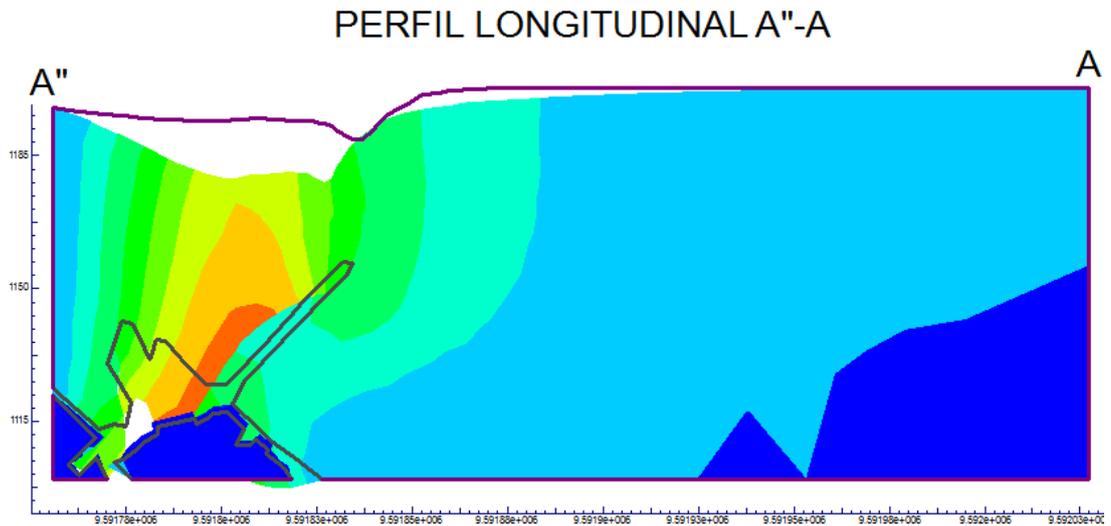
**Fuente:** Campoverde , C., 2017.

Como se observan en los perfiles en coloración rojiza, se muestran las zonas en donde se espera que se den los desplazamientos verticales más críticos, y así progresivamente en la paleta de colores con coloración azul, muestra las zonas en donde se esperan menos desplazamientos verticales. En el perfil longitudinal se muestra de acuerdo al análisis de la zona por encima de la comunicación entre la chimenea de explotación y la cámara de extracción se esperan los valores más alto de desplazamientos verticales.

En los perfiles transversales b y c se observan que en los alrededores de las chimeneas los valores esperados más altos de desplazamientos verticales esto sumado a que existe una zona de pendiente y la litología arcillosa, podría desencadenar en hundimientos y/o deslizamientos.

#### **4.1.2 Simulación de subsidencia en Phase 2**

Mediante el software Phase 2 se realizó la simulación de subsidencia progresiva para estimar el límite de afectación de la cámara en función de la geología y su calidad de roca, esto con el fin de definir una zona de riesgo alrededor de la zona de labores subterránea, para definir el límite de la zona se realizó la simulación utilizando el perfil longitudinal A"-A, en la figura 4.2, se muestra este análisis realizado.



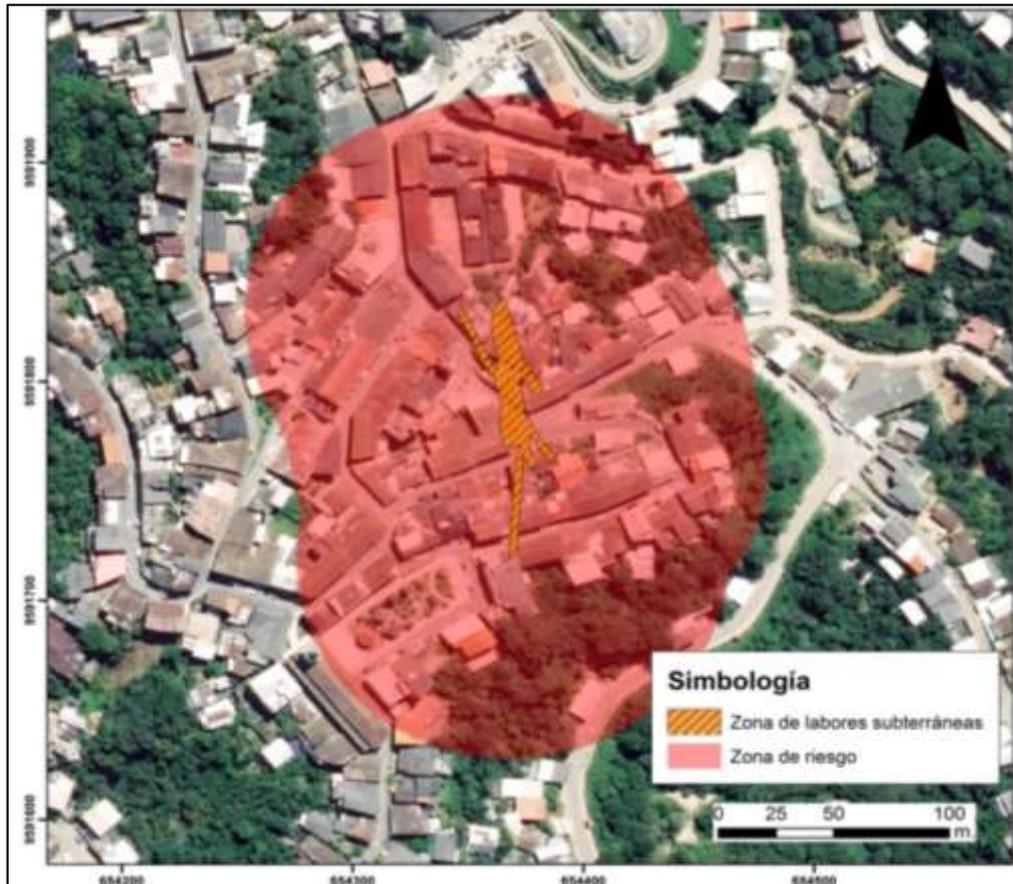
**Figura 4. 2** Desplazamientos verticales esperado en el perfil longitudinal A''-A.

**Fuente:** Campoverde , C., 2017.

Mediante la simulación de hundimiento debido a la labor subterránea en este perfil se pueden definir los límites de afectación debido a las labores en la cual debido al análisis esta área corresponde a una distancia de 94 m. desde la subsidencia de La Inmaculada.

#### 4.1.3 Zonificación de riesgo geotécnico.

A partir de la simulación realizada se definieron los límites de afectación debido a las labores subterráneas y a las condiciones del subsuelo, esta zonificación realizada se observa en la figura 4.3.



**Figura 4. 3** Zonificación de riesgo de desplazamientos verticales y/o hundimientos en la zona de estudio.  
**Fuente:** Campoverde , C., 2017.

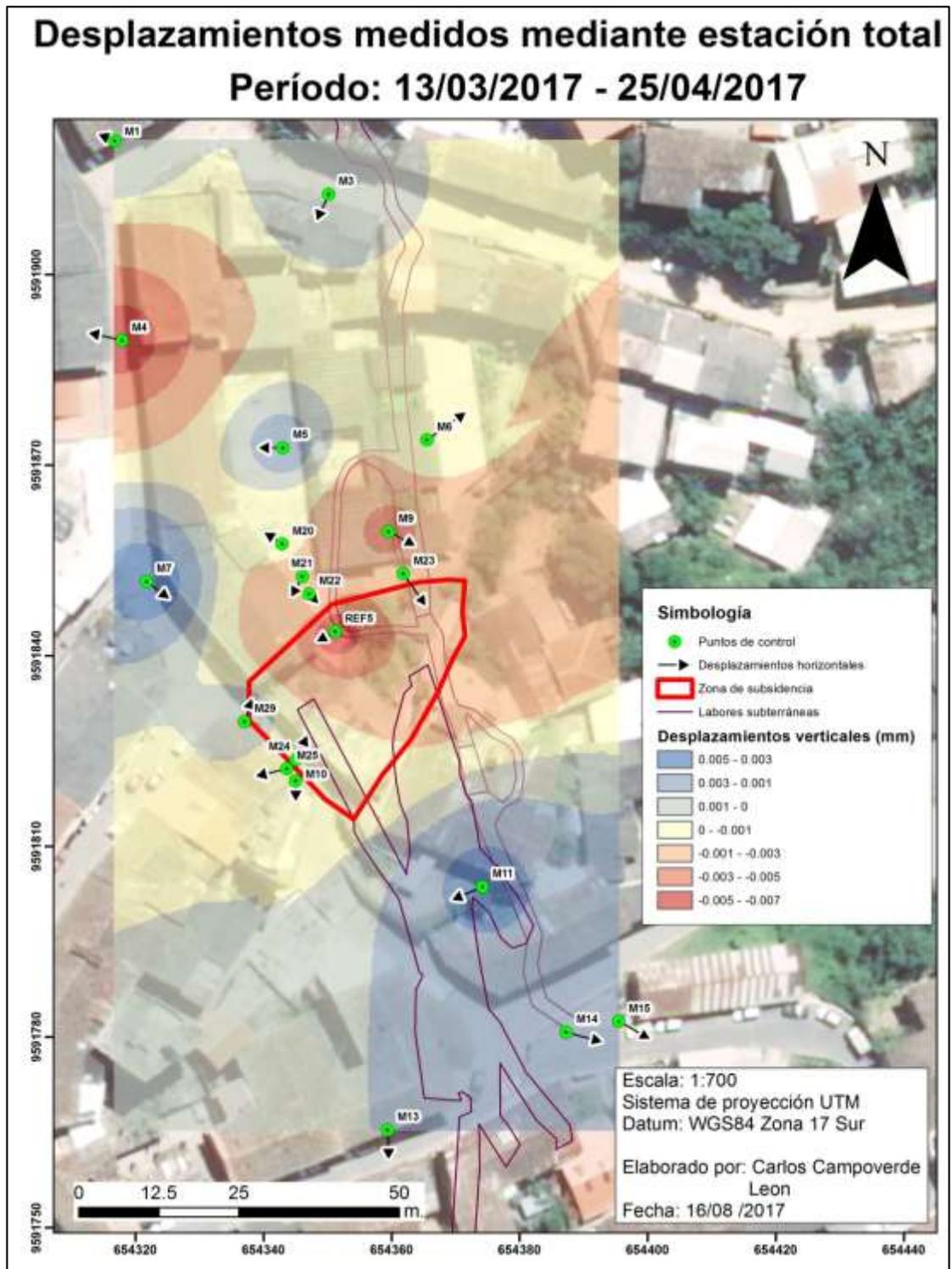
Como se observa en el mapa, existe una zona de afectación directa la cual está dada por las zonas que se encuentran por encima de las labores subterráneas y la zona de afectación indirecta, que se muestra en coloración rojiza y es la zona en la cual se pueden presentar desplazamientos verticales a futuro debido a la influencia de las labores subterránea mostrada.

## **4.2 Red de monitoreo**

### **4.2.1 Estación total**

#### **Zona 1**

A partir de la red de monitoreo previo establecida por parte de INIGEMM en la zona 1 y 2, se llevó a cabo un monitoreo entre los meses de marzo y abril, mediante Estación Total TOPCON GTS-750 convencional con una precisión de angular de 3 segundos y 2mm de precisión en distancia, esta campaña fue realizada en un periodo invernal. Como resultado relevante del monitoreo se presentan los resultados de los desplazamientos monitoreados en el mapa que se muestra en la figura 4.4



**Figura 4. 4** Mapa de desplazamientos horizontales y verticales en la zona de estudio 1, monitoreo mediante Estación Total.

**Fuente:** Campoverde , C., 2017.

Como se muestra en el mapa de desplazamientos en la zona 1, se observan de coloraciones con tonalidades anaranjadas a rojizas los hundimientos de acuerdo a los datos del INIGEMM, las variaciones de los desplazamientos verticales van en el rango de 0 hasta 7 mm. Mientras que los vectores de desplazamientos horizontales su magnitud varía en el rango de 1 hasta 14 mm. obteniéndose el desplazamiento más crítico en los puntos, M5, M9, M11 Y REF5 que debido a su ubicación correlacionada a otros parámetros previos dan indicios a anomalías previas en el sector, en coloración celeste se muestra los levantamientos registrados en la zona, mientras que en coloración rojizas se muestran los hundimientos estos, se producen en una zona que se encuentra sobre una capa de arcillas de alrededor de entre 12 y 15 metros de altura y en una zona que se encuentra próxima a labores subterráneas en superficie, las arcillas de acuerdo al registro geológico corresponden a arcillas saprolíticas, por lo cual de acuerdo a las propiedades de esta litología poseen una baja cohesión a la cual se relacionan estos desplazamientos de los puntos ubicados en esta zona. Además, se representan los desplazamientos horizontales mediante vectores de desplazamientos observados en el monitoreo de estos puntos, la tabla VII, muestra la evolución de estos puntos mediante la

diferencia entre sus coordenadas tanto en x,y,z entre la primera y segunda medición.

**Tabla VII.** Resultados de la evolución de los puntos monitoreados mediante Estación Total, zona 1.

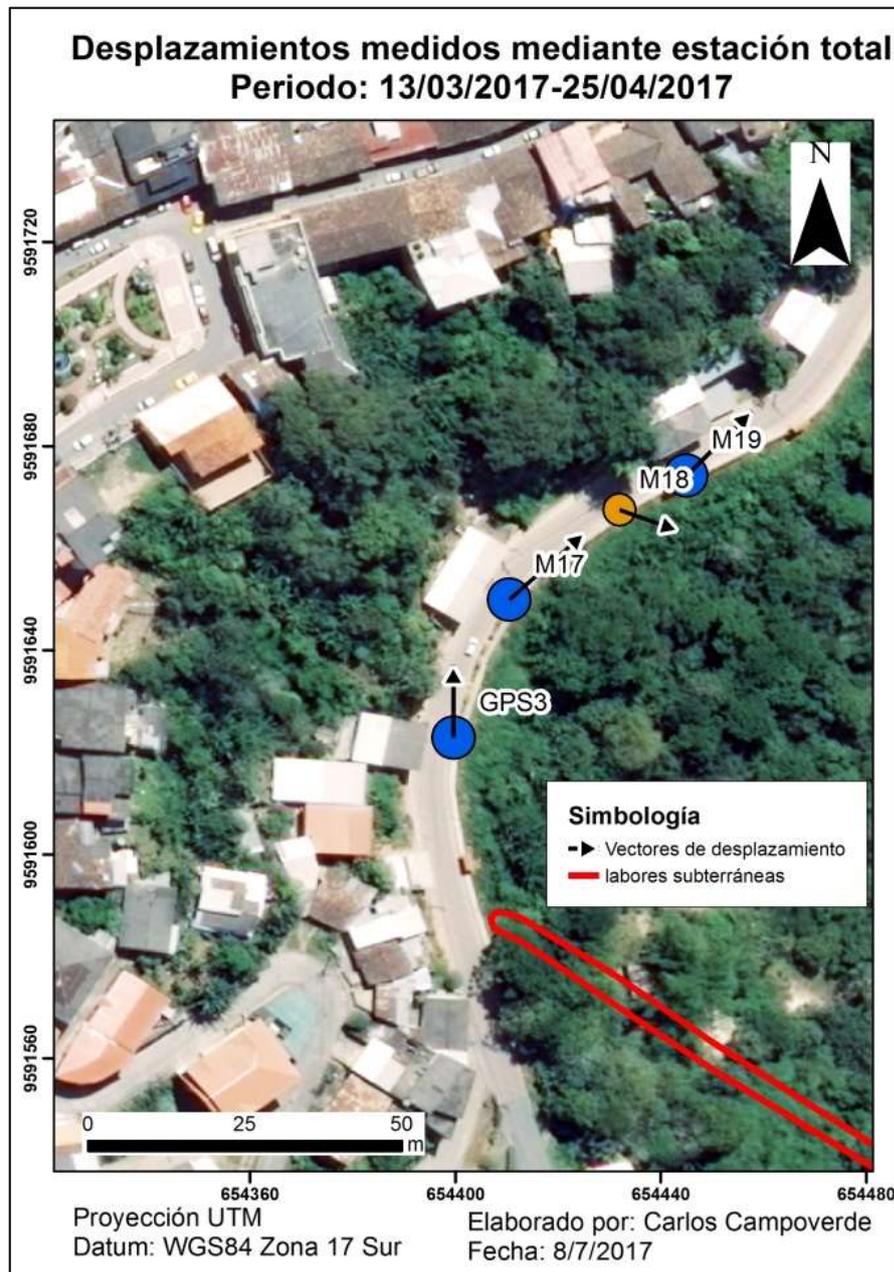
<i>Punto</i>	<i>dx</i>	<i>dy</i>	<b>Vector desplazamiento</b>	<b>Hundimiento(-) y/o levantamiento</b>
M1	-0.008	0.001	0.008	0.001
M10	0.000	-0.001	0.001	0.000
M11	-0.010	-0.007	0.012	0.004
M13	0.000	-0.001	0.001	0.001
M14	0.007	-0.002	0.007	0.002
M15	0.006	-0.004	0.007	0.003
M20	0.001	0.004	0.004	0.000
M21	-0.001	-0.002	0.002	-0.003
M22	0.002	-0.011	0.011	-0.001
M23	0.003	-0.004	0.005	-0.002
M24	0.001	0.005	0.005	0.000
M25	-0.004	-0.001	0.004	-0.001
M29	0.003	0.009	0.009	0.001
M3	0.000	-0.009	0.009	0.001
M4	-0.001	0.002	0.002	-0.006
M5	-0.003	0.000	0.003	0.002
M6	0.005	0.003	0.006	0.000
M7	0.011	-0.007	0.013	0.005
M9	0.008	-0.005	0.009	-0.004
REF5	-0.006	-0.003	0.007	-0.007

**Fuente:** INIGEMM, 2017.

## **Zona 2**

De acuerdo al monitoreo de desplazamientos realizados por parte del INIGEMM en esta zona, en la figura 4.5 se muestra los resultados de los desplazamientos verticales y horizontales monitoreados, en donde se observan los desplazamientos

verticales a modo de levantamientos y/o hundimiento en la zona de estudio y además los desplazamiento horizontales registrados.



**Figura 4. 5** Mapa de desplazamientos horizontales y verticales en la zona de estudio 2, monitoreo mediante Estación Total.  
**Fuente:** Campoverde , C., 2017.

De acuerdo al monitoreo realizado en este periodo de tiempo de 45 días entre la primera y segunda campaña, realizada en época

invernal, se puede apreciar desplazamientos y hundimientos demarcados en los puntos ubicados, los desplazamientos se muestran en la tabla VIII, de acuerdo a la magnitud de los desplazamientos medidos, se tienen desplazamientos verticales que van para el punto GPS3 de 4 mm y desplazamientos horizontales con una magnitud de 14mm. Y para el punto M18 se tiene un ligero levantamiento de 4 mm. y desplazamiento horizontal de magnitud del vector de 6 mm. , el cual de acuerdo a las visitas en campo se correlaciona a las arcillas que se encuentran en esa zona y presentadas en el informe de tomografías y análisis de la litología del subsuelo en aquella zona, en la tabla VIII, se muestra la evolución de estos puntos mediante la diferencia entre sus coordenadas tanto en x,y,z entre la primera y segunda medición.

**Tabla VIII.** Resultados de la evolución de los puntos monitoreados mediante Estación Total, zona 2.

<b>Punto</b>	<b>dx</b>	<b>dy</b>	<b>Vector desplazamiento</b>	<b>Hundimiento(-) y/ o levantamiento</b>
GPS3	0.000	+0.014	0.014	+0.004
M17	+0.004	+0.008	0.009	+0.008
M18	+0.006	+0.001	0.006	-0.004
M19	+0.004	+0.006	0.007	+0.006

**Fuente:** INIGEMM, 2017.

#### **4.1.2 Receptores GNSS**

##### **ZONA 1**

A partir de los puntos instalados en la red de monitoreo implementada para esta investigación en la zona, se realizó el monitoreo mediante un receptor GNSS marca Trimble modelo R8s con una precisión estática en lectura de alta precisión de 3 mm en coordenada horizontal y 3.5 mm de coordenada vertical, de la cual en un principio se tuvieron un total de cinco puntos, de los cuales debido a los trabajos de remediación y sostenimiento realizados como medidas de protección y sostenimiento de la Escuela La Inmaculada llevadas a cabo por el INIGEMM, se tuvo la pérdida de un punto de monitoreo, al finalizar las campañas de monitoreo se contó con un total de cuatro puntos de control, de los cuales un punto se ubicó en zona en la cual se esperaba el mayor desplazamiento vertical dado por el análisis geomecánico, en la figura 4.6 se muestra el mapa de los resultados del monitoreo llevado a cabo en tal zona.



**Figura 4. 6** Mapa de desplazamientos horizontales y verticales en la zona de estudio 1, monitoreo mediante sistema GNSS.

**Fuente:** Campoverde , C., 2017.

Como se observa en el mapa se ubicó la base a una distancia de 200 metros desde el punto del control IGM, después de eso se procedió a medir las coordenadas de los puntos de monitoreo entre las fechas establecidas y se muestran en el mapa los principales desplazamientos verticales, en donde se muestra que el mayor desplazamiento vertical se registró a modo de hundimiento en el punto ubicado por encima de la zona que de acuerdo al análisis geomecánico se registraría el mayor hundimiento, el cual es producto, de acuerdo a la correlación entre el monitoreo previo y al análisis geomecánico a la descompresión tensional del subsuelo

producto de la excavación que ha afectado directamente a los materiales del subsuelo, la tabla IX, muestra la evolución de estos puntos mediante la diferencia entre sus coordenadas tanto en x,y,z entre la primera y segunda medición.

**Tabla IX.** Resultados de la evolución de los puntos monitoreados mediante Estación Total, zona 1.

Punto	Dx	dy	Vector desplazamiento	Hundimiento(-) y/ o levantamiento
M5	0.047	-0.016	0.049	+0.100
M23	-0.085	+0.046	0.096	+0.019
P.C.Z 01	+0.117	-0.008	0.1172	-0.154
M14	-0.001	+0.050	0.050	+0.071

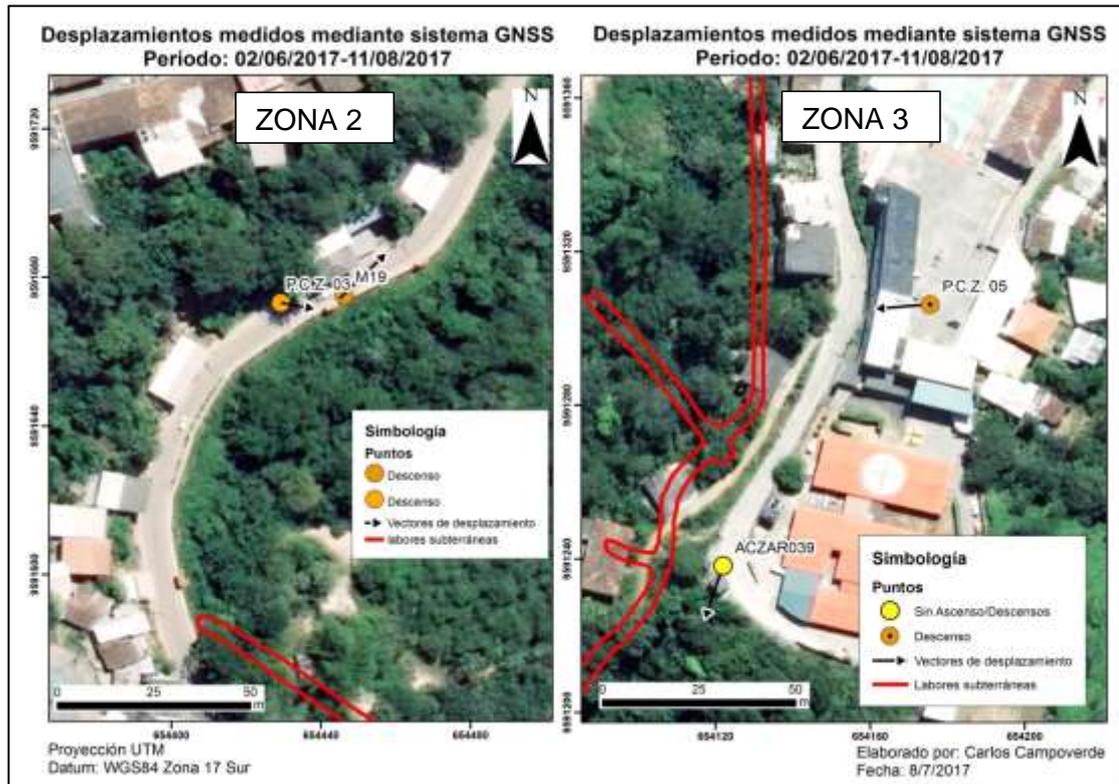
**Fuente:** Campoverde , C., 2017.

### ZONA 2 Y ZONA 3

En la zona 2 se ubicaron dos puntos de monitoreo en la zona estratégica seleccionada a partir del monitoreo previo realizado por INIGEMM, en donde se ubicó un punto al otro lado de la vía de donde se registró la primera anomalía de desplazamientos.

En la zona 3 se ubicaron en un principio 3 puntos de control a partir de las anomalías vistas en campo (fracturamientos de edificaciones, desplazamientos en infraestructura), en el transcurso del estudio debido a la mala recepción satelital de un punto ubicado en las graderías del hospital de Zaruma, el punto fue eliminado del análisis, se obtuvieron al final 2 puntos de control.

La figura 4.7 muestra los resultados de los desplazamientos monitoreados en este sector:



**Figura 4. 7** Mapa de desplazamientos horizontales y verticales en la zona de estudio 2 y 3, monitoreo mediante sistema GNSS.

**Fuente:** Campoverde , C., 2017.

De acuerdo a los resultados observados en el monitoreo mediante sistemas GNSS, en la zona, se pudo comprobar la tendencia que se observó en el monitoreo previo realizado por parte del INIGEMM en esta zona, en donde se deberá realizar un estudio más exhaustivo para comprobar si se está llevando a cabo un movimiento de masas en esa zona.

Los resultados del monitoreo realizado en la zona 3 muestran desplazamientos verticales en uno de los puntos ubicados mientras que con respecto a los desplazamientos horizontales se ve una tendencia de movimiento hacia la zona de pendiente, la pérdida de uno de los puntos instalados debido a la mala recepción de la señal de satélite y la falta de una red más densa de puntos no permiten marcar una tendencia sobre el movimiento de masas en este sector, por lo cual es necesario ubicar más puntos de control y monitoreo, así como estudio geofísicos para poder predecir un comportamiento del subsuelo, la tabla X, muestra la evolución de estos puntos mediante la diferencia entre sus coordenadas tanto en x,y,z entre la primera y segunda medición en estas zonas.

**Tabla X.** Resultados de la evolución de los puntos monitoreados mediante Estación Total, zona 2 y 3.

ZONA	Punto	dx	Dy	Vector desplazamiento	Hundimiento(-) y/ o levantamiento
Zona 2	P.C.Z.03	0.083	-0.107	0.135	-0.741
	M19	0.053	0.01	0.054	-0.045
Zona 3	ACZAR039	-0.005	-0.02	0.021	0
	P.C.Z.05	-0.047	-0.007	0.048	-0.239

**Fuente:** Campoverde , C., 2017.

# **CAPÍTULO 5**

## **CONCLUSIONES Y RECOMENDACIONES**

## CONCLUSIONES

A partir de la información de campo recopilada y su posterior procesamiento se pudo obtener un mapa de riesgo geotécnico el cual estuvo en función de la simulación de desplazamientos verticales realizada en la zona de la escuela la inmaculada. Mediante este mapa podemos observar las zonas de influencia directa las cuales están definidas por la zona que se encuentra por encima de las labores subterráneas y las zonas de influencia indirecta que corresponden a las zonas delimitada alrededor de la zona de labores.

El monitoreo mediante sistema GNSS, constituye un método práctico en la detección de anomalías, siempre y cuando se cumplan que los puntos de control se encuentren en zonas adecuadas para la toma de lecturas, los tiempos de medición dependerá mucho del grado de precisión que se desee, la ventaja frente a otros métodos tradicionales, es el rango de acción de estos receptores que puede llegar a tomar lecturas del receptor móvil de hasta 10 km desde el posicionamiento del receptor base. El monitoreo de campo realizado mediante estos sistemas evidenció zonas de desplazamientos verticales y horizontales, estos desplazamientos está correlacionado con los datos geológicos y geotécnicos registrados, fueron registrados en donde la calidad de la roca es muy pobre y en cercanías de labores subterráneas.

A partir del monitoreo mediante sistema GNSS se pudieron observar otras zonas de anomalías geotécnicas, como en el caso de la avenida Gonzalo Pizarro y en el sector de la Escuela Juan Bosco.

El evento de subsidencia ocurrido en el sector centro de la ciudad, en la Escuela La Inmaculada, fue un evento que pone en riesgo el patrimonio de Zaruma y su capital humano, mediante este trabajo se caracterizó el comportamiento de la zona post-evento subsidencia, donde se observa que las labores subterráneas que se encuentran en el casco urbano aumentan el riesgo a desplazamiento verticales y/o hundimientos, estas labores asociadas a la litología de la zona aumentan el riesgo de la zona.

## RECOMENDACIONES

Se recomienda analizar alternativas de mitigación de subsidencia a largo plazo, que permiten solucionar el problema Zaruma, una de éstas alternativas y debido a su aplicación en otros casos de minería es el relleno hidráulico a partir de material de relave de las cámaras y galerías de extracción.

Se recomienda realizar un estudio en la zona de la avenida Gonzalo Pizarro para determinar el análisis de las anomalías observadas en los desplazamientos registrados.

Se recomienda realizar campañas de prospección geofísica para la recopilación de datos geológicos y poder tener una estimación de la litología y las propiedades geomecánicas del subsuelo en otras zonas del casco urbano de la ciudad de Zaruma y establecer puntos de control de monitoreo.

Se recomienda ampliar la red de monitoreo geodésico, mediante la instalación de más puntos de control en el casco urbano de Zaruma y así poder llevar un monitoreo y gestión del riesgo asociado a desplazamientos verticales, ya que esto permite la detección de anomalías tempranas.

Se recomienda realizar planes en conjunto las autoridades y la sociedad que impulsen programas de desarrollo social y económico para la búsqueda de nuevas alternativas que permitan a grupos económicamente marginados concientizar sobre el riesgo al cual se exponen y exponen a la población, además presentar otras alternativas para su desarrollo económico.

La ciudad de Zaruma constituye la ciudad patrimonial geológica-minera más importante del Ecuador, considerando su estatus actual de candidata a ser

designada Patrimonio de la Humanidad por la Unesco, el proteger este patrimonio es de vital importancia para alcanzar tal designación, por lo tanto el monitoreo constante en una zona afectada por tareas de minería anti-técnica es de vital importancia.

# **ANEXOS**

**Anexo A**  
**CÁLCULO DE RMR EN CADA MANIOBRA, PERFORACIÓN 1(INIGEMM, 2017).**



LOGEO GEOTECNICO DE TESTIGOS DE PERFORACION

<b>DRILL HOLE No.</b>	<b>FECHA</b>	<b>Diámetros de perforación</b>	<b>Logeado por:</b>	<b>Rev.:</b>
<b>PE-01</b>	<b>marzo 8, 2017</b>	<b>HQ TO : 70,25 m</b>	<b>FP</b>	<b>D.B</b>

**VALORACION DEL MACIZO ROCOSO**  
**RMR - Rock Mass Rating - Bieniawski 1989**

PROFUNDIDAD		LONG (m)	TIPO y Nº DE Disc/m	RESISTENCIA COMPRESIVA		RQD			ESPACIADO		CONDICION DE JUNTAS								AGUA SUBTERRAN.		RMR	TIPO			
DE (m)	A (m)			Grado	VAL	(m)	(%)	VAL	Grado	VAL	PERSISTENCIA	APERTURA		RUGOSIDAD		RELLENO		ALT(Grad.descomp)		Grado			VAL		
0.00	0.28	0.28	0.0	Hor	4	7	0.00	0	3	5	5	5	0	5	0	5	0	5	0	5	0	2	10	25	IV=M ala
0.28	1.00	0.72	0.0	sap	2	2	0.00	0	3	5	5	5	0	5	0	5	0	5	0	5	0	4	4	14	V=M uy M ala
1.00	3.45	2.45	>10	sap	1	1	0.00	0	3	5	5	1	6	5	0	5	0	5	0	5	0	4	4	19	V=M uy M ala
3.45	6.45	3.00	>10	sap	1	1	0.00	0	3	5	5	1	6	5	0	5	0	5	0	5	0	4	4	19	V=M uy M ala
6.45	10.45	4.00	>10	sap	1	1	0.00	0	3	5	5	1	6	5	0	5	0	5	0	5	0	4	4	19	V=M uy M ala
10.45	12.00	1.55	3.0	sap	2	2	0.81	52	13	3	10	1	6	5	0	5	0	5	0	5	0	4	4	35	IV=M ala
12.00	13.68	1.68	>5	sap	1	1	0.00	0	3	5	5	1	6	5	0	5	0	5	0	5	0	4	4	19	V=M uy M ala
13.68	16.45	2.77	>10	sap	1	1	0.48	17	3	3	10	1	6	5	0	5	0	5	0	5	0	4	4	24	IV=M ala
16.45	16.70	0.25	>5	and	3	4	0.00	0	3	5	5	1	6	4	1	3	3	4	1	3	3	4	4	30	IV=M ala
16.70	20.10	3.40	>10	and	2	2	0.35	10	3	3	10	1	6	4	1	4	1	4	1	4	2	4	4	30	IV=M ala
20.10	25.20	5.10	>20	Bx	3	4	0.00	0	3	4	8	1	6	4	1	3	3	3	2	4	2	4	4	33	IV=M ala
25.20	28.70	3.50	>10	Bx	3	4	1.62	46	8	3	10	1	6	5	0	4	1	4	1	3	3	4	4	37	IV=M ala
28.70	30.35	1.65	>10	Bx	3	4	0.26	16	3	4	8	1	6	5	0	4	1	4	1	4	2	4	4	29	IV=M ala
30.35	32.38	2.03	>5	Bx	4	7	0.64	32	8	3	10	1	6	4	1	3	3	4	1	3	3	4	4	43	III=Regular
32.38	36.22	3.84	>20	Bx	3	4	0.81	21	3	3	10	1	6	5	0	4	1	4	1	3	3	4	4	32	IV=M ala
36.22	39.50	3.28	5.0	Bx	3	4	2.20	67	13	3	10	1	6	4	1	3	3	2	4	3	3	3	7	51	III=Regular
39.50	42.00	2.50	5.0	Bx	3	4	0.55	22	3	3	10	1	6	4	1	3	3	2	4	3	3	3	7	41	III=Regular
42.00	45.20	3.20	12.0	Bx	3	4	2.36	74	13	3	10	1	6	4	1	3	3	2	4	3	3	3	7	51	III=Regular
45.20	46.73	1.53	>5	Bx	3	4	0.22	14	3	3	10	1	6	4	1	3	3	2	4	3	3	3	7	41	III=Regular
46.73	50.10	3.37	6.0	Bx	4	7	2.72	81	17	3	10	1	6	3	4	3	3	2	4	3	3	3	7	61	II=Buena
50.10	53.90	3.80	11.0	Bx	4	7	1.92	51	13	3	10	1	6	3	4	3	3	2	4	3	3	3	7	57	III=Regular
53.90	56.50	2.60	12.0	Bx	4	7	2.50	96	20	3	10	1	6	3	4	3	3	2	4	3	3	3	7	64	II=Buena
56.50	59.00	2.50	12.0	Bx	5	12	1.06	42	8	3	10	1	6	3	4	2	5	2	4	2	5	3	7	61	II=Buena
59.00	61.90	2.90	>10	Bx	4	7	0.47	16	3	3	10	1	6	4	1	2	5	2	4	2	5	3	7	48	III=Regular
61.90	64.40	2.50	>10	Bx	5	12	0.90	36	8	3	10	1	6	3	4	2	5	2	4	2	5	3	7	61	II=Buena
64.40	66.40	2.00	8.0	Bx	5	12	1.16	58	13	3	10	1	6	3	4	1	6	2	4	2	5	3	7	67	II=Buena
66.40	67.90	1.50	>5	Bx	5	12	0.62	41	8	3	10	1	6	2	5	3	3	2	4	2	5	3	7	60	III=Regular
67.90	70.25	2.35	6.0	Bx	5	12	1.50	64	13	3	10	1	6	2	5	3	3	2	4	2	5	3	7	65	II=Buena

## Anexo B CÁLCULO DE RMR EN CADA MANIOBRA, PERFORACIÓN 2(INIGEMM, 2017).



### LOGEO GEOTECNICO DE TESTIGOS DE PERFORACION

<b>DRILL HOLE No.</b>	<b>FECHA</b>	<b>Diámetros de perforación</b>		<b>Logeado por:</b>	<b>Rev.:</b>
<b>PE-02</b>	marzo 18, 2017	HQ TO : 149.95	NQ TO: 299.80	F.A. / D. A	<b>DB</b>

### VALORACION DEL MACIZO ROCOSO RMR - Rock Mass Rating - Bieniawski 1989

PROFUNDIDAD DE A		LONG (m)	TIPO y Nº DE Disc/m	RESISTENCIA COMPRESIVA		RQD			ESPACIADO		CONDICION DE JUNTAS								AGUA		RMR	TIPO				
											PERSISTENCIA		APERTURA		RUGOSIDAD		RELLENO		ALT(Grad.descomp)				Grado	VAL		
Grado	VAL	(m)	(%)	VAL	Grado	VAL	Grado	VAL	Grado	VAL	Grado	VAL	Grado	VAL	Grado	VAL	Grado	VAL	Grado	VAL	Grado	VAL	Grado	VAL		
0.00	2.00	2.00	>5	1	1	0.00	0	3	5	5	1	6	5	0	5	0	5	0	5	0	3	7	22	IV=M ala		
2.00	3.05	1.05	>5	1	1	0.00	0	3	5	5	1	6	5	0	5	0	5	0	5	0	3	7	22	IV=M ala		
3.05	5.10	2.05	0.0	2	2	0.00	0	3	5	5	1	6	5	0	3	3	4	1	4	2	3	7	29	IV=M ala		
5.10	8.20	3.10	4.0	3	4	0.80	26	8	4	8	1	6	2	5	3	3	4	1	2	5	2	10	50	III=Regular		
8.20	12.00	3.80	5.0	3	4	1.65	43	8	3	10	1	6	2	5	2	5	4	1	2	5	2	10	54	III=Regular		
12.00	14.20	2.20	6.0	3	4	0.93	42	8	4	8	1	6	2	5	3	3	4	1	2	5	1	15	55	III=Regular		
14.20	16.35	2.15	4.0	3	4	1.78	83	17	3	10	1	6	1	6	3	3	2	4	2	5	1	15	70	II=Buena		
16.35	18.50	2.15	3.0	3	4	1.90	88	17	4	8	1	6	1	6	3	3	2	4	1	6	1	15	69	II=Buena		
18.50	25.00	6.50	4.0	4	7	5.60	86	17	4	8	1	6	2	5	3	3	2	4	1	6	1	15	71	II=Buena		
25.00	27.50	2.50	2.0	3	4	2.30	92	20	3	10	1	6	4	1	3	3	2	4	1	6	1	15	69	II=Buena		
27.50	29.00	1.50	3.0	3	4	1.50	100	20	4	8	1	6	1	6	3	3	2	4	1	6	1	15	72	II=Buena		
29.00	33.45	4.45	2.0	3	4	3.53	79	17	4	8	1	6	4	1	3	3	2	4	1	6	1	15	64	II=Buena		
33.45	37.45	4.00	6.0	3	4	2.50	63	13	3	10	1	6	3	4	4	1	2	4	2	5	2	10	57	III=Regular		
37.45	39.45	2.00	2.0	3	4	1.50	75	17	3	10	1	6	3	4	3	3	4	1	2	5	2	10	60	III=Regular		
39.45	43.45	4.00	2.0	4	7	3.28	82	17	3	10	1	6	3	4	3	3	2	4	2	5	1	15	71	II=Buena		
43.45	49.45	6.00	5.0	3	4	4.17	70	13	4	8	1	6	2	5	2	5	4	1	1	6	1	15	63	II=Buena		
51.30	53.17	1.87	6.0	3	4	1.28	68	13	4	8	1	6	2	5	2	5	4	1	1	6	1	15	63	II=Buena		
53.17	60.90	7.73	6.0	4	7	5.60	72	13	4	8	1	6	4	1	2	5	2	4	1	6	1	15	65	II=Buena		
60.90	64.90	4.00	4.0	4	7	2.99	75	13	3	10	1	6	3	4	2	5	2	4	1	6	1	15	70	II=Buena		
64.90	67.08	2.18	7.0	3	4	0.70	32	8	4	8	1	6	4	1	3	3	2	4	1	6	2	10	50	III=Regular		
67.08	67.90	0.82	3.0	2	2	0.10	12	3	4	8	1	6	3	4	5	0	4	1	4	2	2	10	36	IV=M ala		
67.90	70.90	3.00	4.0	3	4	1.20	40	8	4	8	1	6	4	1	2	5	2	4	1	6	1	15	57	III=Regular		
70.90	73.90	3.00	3.0	3	4	2.74	91	20	4	8	1	6	4	1	3	3	2	4	1	6	1	15	67	II=Buena		
73.90	76.90	3.00	5.0	3	4	2.20	73	13	3	10	1	6	3	4	3	3	4	1	2	5	1	15	61	II=Buena		
76.90	80.00	3.10	4.0	3	4	2.90	94	20	3	10	1	6	3	4	3	3	2	4	1	6	1	15	72	II=Buena		

## ANEXO C CÁLCULO DE RMR EN CADA MANIOBRA, PERFORACIÓN 3(INIGEMM, 2017).



LOGEO GEOTECNICO DE TESTIGOS DE PERFORACION

DRILL HOLE No.	FECHA	Diámetros de perforación		Logeado por:	Rev.:
<b>PE-03</b>	18/23/2017	HQ TO : 61.95	NQ TO:	F.PINZON	<b>DB</b>

VALORACION DEL MACIZO ROCOSO  
RMR - Rock Mass Rating - Bieniawski 1989

PROFUNDIDAD		LONG	TIPO y Nº DE	RESISTENCIA COMPRESIVA		RQD			ESPACIADO		CONDICION DE JUNTAS								AGUA		RMR	TIPO			
DE (m)	A (m)			Grado	VAL	(m)	(%)	VAL	Grado	VAL	PERSISTENCIA		APERTURA		RUGOSIDAD		RELLENO		ALT(Grad.descomp)				Grado	VAL	
0.00	0.66	0.66	0.0 Con	1	1	0.00	0	3																4	V=M uy Mala
0.66	1.73	1.07	>10 Sapre	1	1	0.00	0	3	5	5	1	6	5	0	5	0	5	0	5	0	4	4	19	V=M uy Mala	
1.73	3.60	1.87	>10 Sapre	1	1	0.00	0	3	5	5	1	6	5	0	5	0	5	0	5	0	4	4	19	V=M uy Mala	
3.60	5.00	1.40	>5 And	2	2	0.50	36	8	4	8	1	6	5	0	5	0	5	0	5	0	4	4	28	IV=M ala	
5.00	8.00	3.80	>5 And	2	4	0.51	43	8	4	10	1	6	5	5	5	5	1	5	5	4	10	54	III=Regular		
8.00	10.70	2.20	>5 And	2	4	1.20	42	8	3	8	1	6	4	5	4	3	5	1	5	5	4	15	55	III=Regular	
10.70	13.00	2.15	>5 And	2	4	0.70	83	17	4	10	1	6	4	6	4	3	5	4	5	5	4	15	70	II=Buena	
13.00	15.35	2.15	>5 And	2	4	0.80	88	17	3	8	1	6	4	6	4	3	4	4	5	6	4	15	69	II=Buena	
15.35	17.45	6.50	>10 Veta	4	7	0.00	86	17	5	8	1	6	4	5	4	3	4	4	2	6	3	15	71	II=Buena	
17.45	18.40	2.50	>5 And	2	4	0.27	92	20	4	10	1	6	4	1	4	3	4	4	5	6	4	15	69	II=Buena	
18.40	18.70	1.50	>5 Veta	4	4	0.00	100	20	5	8	1	6	4	6	4	3	4	4	1	6	4	15	72	II=Buena	
18.70	20.00	4.45	>5 And	3	4	0.38	79	17	3	8	1	6	4	1	4	3	4	4	4	6	3	15	64	II=Buena	
20.00	20.30	4.00	3.0 Bx	3	4	0.00	63	13	4	10	1	6	4	4	3	1	3	4	3	5	3	10	57	III=Regular	
20.30	22.90	2.00	4.0 Bx	3	4	1.66	75	17	3	10	1	6	4	4	4	3	4	1	3	5	3	10	60	III=Regular	
22.90	24.90	4.00	>10 Bx	3	7	0.00	82	17	4	10	2	6	4	4	3	3	4	4	3	5	3	15	71	II=Buena	
24.90	27.20	6.00	>10 Bx	4	4	1.00	70	13	3	8	2	6	3	5	4	5	5	1	2	6	2	15	63	II=Buena	
27.20	27.80	2.00	2.0 Bx	5	4	0.55	68	13	3	8	1	6	2	5	3	5	1	1	1	6	2	15	63	II=Buena	
27.80	29.30	7.73	>10 Bx	4	7	0.00	72	13	4	8	2	6	3	1	3	5	2	4	2	6	2	15	65	II=Buena	
29.30	30.60	1.30	>5 Bx	3	4	0.25	19	3	3	10	2	4	4	1	3	3	2	4	3	3	2	10	42	III=Regular	
30.60	32.36	1.76	>5 Bx	4	7	0.77	44	8	3	10	1	6	4	1	3	3	3	2	2	5	2	10	52	III=Regular	
32.36	33.00	0.64	>10 Bx	4	7	0.00	0	3	4	8	2	4	4	1	3	3	3	2	2	5	2	10	43	III=Regular	
33.00	34.45	1.45	>5 Bx	4	7	0.58	40	8	3	10	2	4	4	1	3	3	3	2	2	5	2	10	50	III=Regular	
34.45	35.00	0.55	3.0 Bx	3	4	0.50	91	20	3	10	2	4	4	1	4	1	4	1	3	3	2	10	54	III=Regular	
35.00	36.30	1.30	>10 Bx	2	2	0.00	0	3	4	8	2	4	5	0	5	0	5	0	4	2	3	7	26	IV=M ala	
36.30	37.95	1.65	>10 Bx	3	4	0.36	22	3	4	8	2	4	4	1	4	1	4	1	3	3	2	10	35	IV=M ala	
37.95	41.70	3.75	6.0 Bx	4	7	2.67	71	13	2	15	1	6	4	1	3	3	4	1	2	5	2	10	61	II=Buena	
41.70	42.65	0.95	>5 Bx	3	4	0.58	61	13	4	8	1	6	4	1	4	1	4	1	3	3	3	7	44	III=Regular	
42.65	45.25	2.60	6.0 Bx	4	7	1.95	75	17	3	10	1	6	3	4	3	3	2	4	2	5	2	10	66	II=Buena	
45.25	48.45	3.20	7.0 Bx	4	7	2.58	81	17	3	10	1	6	3	4	3	3	2	4	2	5	2	10	66	II=Buena	
48.45	51.80	3.35	>10 Ct	4	7	1.97	59	13	3	10	2	4	4	1	4	1	2	4	2	5	2	10	55	III=Regular	
51.80	55.00	3.20	7.0 DA	4	7	2.82	88	17	3	10	2	4	4	1	3	3	2	4	2	5	2	10	61	II=Buena	
55.00	59.20	4.20	>10 DA	4	7	2.44	58	13	3	10	2	4	4	1	3	3	2	4	2	5	2	10	57	III=Regular	
59.20	61.15	1.95	0.0 Vac	0	0	0.00	0	3	0	FALSO	0	FALSO	0	####	0	####	0	####	0	####	0	####	3	V=M uy Mala	
61.15	61.95	0.80	5.0 DA	4	7	0.52	65	13	4	8	2	4	4	1	1	6	2	4	2	5	2	10	58	III=Regular	

**ANEXO D**  
**CÁLCULO DE RMR EN CADA MANIOBRA, PERFORACIÓN 4(INIGEMM, 2017).**



LOGEO GEOTECNICO DE TESTIGOS DE PERFORACION

<b>DRILL HOLE No.</b> <b>PE - 04</b>	<b>FECHA</b> abril 22, 2017	<b>Diámetros de perforación</b> HQ TO :      NQ TO:		<b>Logeado por:</b> FP	<b>Rev.:</b> D.B
-----------------------------------------	--------------------------------	--------------------------------------------------------	--	---------------------------	---------------------

**VALORACION DEL MACIZO ROCOSO**  
**RMR - Rock Mass Rating - Bieniawski 1989**

PROFUNDIDAD		LONG (m)	TIPO y N° DE Disc/m		RESISTENCIA COMPRESIVA		RQD			ESPACIADO		CONDICION DE JUNTAS								AGUA		RMR	TIPO		
DE (m)	A (m)		Grado	VAL	(m)	(%)	VAL	Grado	VAL	Grado	VAL	PERSISTENCIA		APERTURA		RUGOSIDAD		RELLENO		ALT(Grad.descomp)				Grado	VAL
0.00	0.28	0.28	0.0	Hor	3	4	0.18	64	13	3	10	1	6	5	0	5	0	5	0	5	0	3	7	40	IV=Mala
0.28	1.70	1.42	0.0	Sa	1	1	0.00	0	3	5	5	1	6	5	0	5	0	5	0	5	0	3	7	22	IV=Mala
1.70	4.47	2.77	0.0	Sa	1	1	1.10	40	8	3	10	1	6	4	1	4	1	5	0	5	0	3	7	34	IV=Mala
4.47	5.30	0.83	0.0	Sa	1	1	0.50	60	13	3	10	1	6	4	1	4	1	5	0	5	0	3	7	39	IV=Mala
5.30	8.00	2.70	0.0	Dac	1	1	0.95	35	8	3	10	1	6	4	1	4	1	5	0	5	0	4	4	31	IV=Mala
8.00	9.00	1.00	0.0	Dac	1	1	0.00	0	3	5	5	1	6	4	1	4	1	5	0	4	2	4	4	23	IV=Mala
9.00	10.00	1.00	0.0	va	0	0	0.00	0	3	5	5	1	6	5	0	5	0	5	0	5	0	5	0	14	V=Muy Mala
10.00	14.50	4.50	0.0	Dac	4	7	0.00	0	3	5	5	1	6	4	1	3	3	3	2	2	5	3	7	39	IV=Mala
14.50	15.50	1.00	0.0	Dac	2	2	0.00	0	3	3	10	1	6	4	1	4	1	4	1	4	2	3	7	33	IV=Mala
15.50	16.60	1.10	3.0	Dac	2	2	0.35	32	8	3	10	1	6	4	1	4	1	4	1	4	2	3	7	38	IV=Mala
16.60	18.85	2.25	3.0	Dac	2	2	1.45	64	13	3	10	1	6	4	1	4	1	4	1	4	2	3	7	43	III=Regular
18.85	19.20	0.35	0.0	Dac	2	2	0.00	0	3	5	5	1	6	4	1	4	1	4	1	4	2	3	7	28	IV=Mala
19.20	21.80	2.60	4.0	Bx	2	2	1.82	70	13	3	10	1	6	4	1	4	1	4	1	4	2	3	7	43	III=Regular
21.80	22.20	0.40	1.0	Bx	2	2	0.00	0	3	4	8	1	6	4	1	4	1	4	1	4	2	3	7	31	IV=Mala
22.20	25.50	3.30	4.0	Bx	2	2	2.06	62	13	3	10	1	6	4	1	4	1	4	1	4	2	3	7	43	III=Regular
25.50	29.10	3.60	>5	Bx	3	4	0.00	0	3	4	8	2	4	4	1	3	3	3	2	3	3	2	10	38	IV=Mala
29.10	31.55	2.45	>5	Bx	3	4	0.94	38	8	3	10	2	4	4	1	3	3	3	2	3	3	2	10	45	III=Regular
31.55	33.85	2.30	>5	Bx	3	4	1.04	45	8	3	10	2	4	4	1	3	3	3	2	3	3	2	10	45	III=Regular
33.85	36.60	2.75	>5	Zv	5	12	1.80	65	13	3	10	2	4	4	1	3	3	3	2	2	5	2	10	60	III=Regular
36.60	39.25	2.65	5.0	Bx	4	7	2.50	94	20	2	15	1	6	4	1	3	3	3	2	2	5	2	10	69	II=Buena
39.25	41.15	1.90	3.0	Bx	4	7	1.65	87	17	2	15	1	6	4	1	3	3	3	2	2	5	2	10	66	II=Buena
41.15	44.15	3.00	>5	Dac	4	7	1.80	60	13	3	10	1	6	4	1	4	1	4	1	3	3	2	10	52	III=Regular
44.15	47.15	3.00	>5	Bx	3	4	2.26	75	17	3	10	1	6	4	1	4	1	4	1	3	3	2	10	53	III=Regular
47.15	50.30	3.15	3.0	Bx	4	7	2.73	87	17	2	15	1	6	3	4	3	3	3	2	2	5	2	10	69	II=Buena
50.30	51.20	0.90	1.0	Bx	5	12	0.90	100	20	3	10	1	6	3	4	3	3	3	2	2	5	2	10	72	II=Buena
51.20	54.30	3.10	0.0	va	0	0	0.00	0	3	5	5	5	0	5	0	5	0	5	0	5	0	5	0	8	V=Muy Mala
54.30	56.20	1.90	3.0	Bx	4	7	1.50	79	17	3	10	1	6	3	4	3	3	3	2	2	5	2	10	64	II=Buena
56.20	58.25	2.05	4.0	Bx	5	12	1.48	72	13	3	10	1	6	3	4	3	3	3	2	2	5	2	10	65	II=Buena

## ANEXO E CÁLCULO DE RMR EN CADA MANIOBRA, PERFORACIÓN 5(INIGEMM, 2017).



### LOGEO GEOTECNICO DE TESTIGOS DE PERFORACION

<b>DRILL HOLE No.</b> <b>PE - 05</b>	<b>FECHA</b> abril 25, 2017	<b>Diámetros de perforación</b> HQ TO : 62,20 m    NQ TO:	<b>Logeado por:</b> FP	<b>Rev.:</b> D.B
-----------------------------------------	--------------------------------	--------------------------------------------------------------	---------------------------	---------------------

**VALORACION DEL MACIZO ROCOSO**  
RMR - Rock Mass Rating - Bieniawski 1989

PROFUNDIDAD		LONG (m)	TIPO y N° DE Disc/m	RESISTENCIA COMPRESIVA		RQD			ESPACIADO		CONDICION DE JUNTAS										AGUA SUBTERRAN.		RMR	TIPO	
DE (m)	A (m)			Grado	VAL	(m)	(%)	VAL	Grado	VAL	PERSISTENCIA		APERTURA		RUGOSIDAD		RELLENO		ALT(Grad.descomp)		Grado	VAL			
0.00	2.35	2.35	0.0	Dell	2	2	0.00	0	3	5	5	1	6	5	0	5	0	5	0	5	0	3	7	23	IV=Mala
2.35	4.00	1.65	0.0	Sar	1	1	1.40	85	17	3	10	1	6	5	0	4	1	5	0	5	0	3	7	42	III=Regular
4.00	5.70	1.70	>5	Au	2	2	0.77	45	8	3	10	1	6	4	1	4	1	4	1	5	0	3	7	36	IV=Mala
5.70	7.00	1.30	3.0	Bx	2	2	0.45	35	8	3	10	1	6	4	1	4	1	4	1	4	2	3	7	48	IV=Mala
7.00	8.80	1.80	3.0	Bx	2	2	1.04	58	13	3	10	1	6	4	1	4	1	4	1	4	2	3	7	33	III=Regular
8.80	9.10	0.30	0.0	Bx	1	1	0.00	0	3	5	5	1	6	5	0	5	0	5	0	4	2	3	7	24	IV=Mala
9.10	11.00	1.90	3.0	Bx	2	2	0.93	49	8	3	10	1	6	5	0	4	1	4	1	4	2	3	7	37	IV=Mala
11.00	15.20	4.20	7.0	Bx	2	2	3.54	84	17	2	15	1	6	4	1	4	1	4	1	4	2	3	7	52	III=Regular
15.20	17.65	2.45	8.0	Bx	2	2	1.10	45	8	3	10	1	6	4	1	4	1	4	1	4	2	3	7	38	IV=Mala
17.65	20.00	2.35	7.0	Bx	3	4	1.05	45	8	3	10	1	6	4	1	4	1	4	1	3	3	3	7	41	III=Regular
20.00	23.45	3.45	8.0	Bx	3	4	2.75	80	17	3	10	1	6	3	4	3	3	3	2	3	3	3	7	56	III=Regular
23.45	23.75	0.30	0.0	Bx	3	4	0.00	0	3	4	8	1	6	3	4	3	3	3	2	3	3	3	7	40	IV=Mala
23.75	24.35	0.60	2.0	Bx	3	4	0.46	77	17	3	10	1	6	3	4	3	3	3	2	3	3	3	7	56	III=Regular
24.35	25.00	0.65	0.0	Bx	3	4	0.10	15	3	4	8	1	6	3	4	3	3	3	2	3	3	3	7	40	IV=Mala
25.00	28.15	3.15	10.0	Bx	4	7	2.57	82	17	2	15	1	6	3	4	3	3	3	2	2	5	2	10	69	II=Buena
28.15	32.25	4.10	7.0	Bx	4	7	3.46	84	17	2	15	1	6	3	4	3	3	2	4	2	5	2	10	71	II=Buena
32.25	35.15	2.90	2.0	Bx	4	7	2.75	95	20	2	15	1	6	3	4	3	3	2	4	2	5	2	10	74	II=Buena
35.15	37.15	2.00	4.0	Bx	4	7	1.44	72	13	2	15	1	6	4	1	4	1	4	1	2	5	2	10	59	III=Regular
37.15	39.75	2.60	3.0	Bx	3	4	2.20	85	17	3	10	1	6	3	4	3	3	2	4	2	5	2	10	63	II=Buena
39.75	40.15	0.40	1.0	Bx	3	4	0.00	0	3	4	8	1	6	3	4	3	3	2	4	2	5	2	10	47	III=Regular
40.15	45.05	4.90	8.0	Bx	3	4	4.85	99	20	2	15	1	6	3	4	3	3	2	4	2	5	2	10	71	II=Buena
45.05	47.56	2.51	5.0	>Bx	4	7	1.73	69	13	2	15	1	6	3	4	3	3	2	4	2	5	2	10	67	II=Buena
47.56	51.30	3.74	4.0	Bx	4	7	2.75	74	13	2	15	1	6	4	1	4	1	3	2	2	5	2	10	60	III=Regular
51.30	55.30	4.00	6.0	Bx	4	7	3.32	83	17	2	15	1	6	4	1	3	3	3	2	2	5	2	10	66	II=Buena
55.30	57.85	2.55	5.0	Bx	4	7	2.54	100	20	2	15	1	6	3	4	3	3	3	2	2	5	2	10	72	II=Buena
57.85	60.60	2.75	0.0		0	0	0.00	0	3	0	####	0	####	0	####	0	####	0	####	0	####	0	####	3	V=Muy Mala
60.60	62.20	1.60	>	Vita	5	12	0.27	17	3	4	8	1	6	3	4	3	3	3	2	2	5	2	10	53	III=Regular

# **BIBLIOGRAFÍA**

Bian, H. F., Zhang, S. B., Zhang, Q. Z., & Zheng, N. S. (2014). Monitoring large-area mining subsidence by GNSS based on IGS stations. *Transactions of Nonferrous Metals Society of China (English Edition)*, 24(2), 514–519. [https://doi.org/10.1016/S1003-6326\(14\)63090-9](https://doi.org/10.1016/S1003-6326(14)63090-9)

Cedeño, U. D. (2015). Implantación de una Red de Control Geodésica enlazados a la REGME (Red GNSS de Monitoreo Continuo del Ecuador ) del Instituto Geográfico Militar dentro del campus. ESCUELA SUPERIOR POLITÉCNICA DEL LITORAL.

Díaz, C., Cornadó, C., Santamaría, P., Rosell, J. R., Navarro, A., & Navarro, A. (2015). Actuación preventiva de diagnóstico y control de movimientos en los edificios afectados por subsidencia en el barrio de la Estación de Sallent (Barcelona). *Informes de La Construcción*, 67(538), e089. <https://doi.org/10.3989/ic.13.168>

E. Cabral-Cano, D. Solano-Rojas, T. Oliver-Cabrera, S. Wdowinski, E. Chaussard, L. Salazar-Tlaczani, F. Cigna, C. DeMets, J. P.-M. (2014). Subsidence and associated shallow faulting hazard assessment in central Mexico using InSAR and GPS . In American Geophysical Union, Fall Meeting 2014, abstract #G41A-0471. Mexico City.

Espinoza, D. A. (2005). ANÁLISIS DE SUBSIDENCIA PRODUCIDA POR LA EXCAVACIÓN DE TÚNELES DE LA LÍNEA 4 DEL METRO DE CARACAS, APLICANDO EL MÉTODO DE LOS ELEMENTOS FINITOS Trabajo. Universidad Central de Venezuela.

Estados Unidos Mexicanos, S. de comunicaciones y transportes. (2016). Integración geotécnica y diseño preliminar. In Manual de diseño y construcción de túneles de carretera (Primera ed, p. 740). Mexico City.

Farmer, I. W. (1968). Engineering Properties of Rocks. Engineering Properties of Rocks.

Herrera, I. L. (2012). Análisis de la susceptibilidad a la subsidencia en el estado de San Luis Potosí (México) como herramienta para la gestión ambiental. UNIVERSIDAD AUTÓNOMA DE SAN LUIS POTOSÍ. Retrieved from <http://comunidadpmpca.uaslp.mx/documento.aspx?idT=266>

Hoek. (2006). Anexo C sistema GSI (Geological strenght index), 5. Retrieved from [http://www.bdigital.unal.edu.co/6782/19/ANEXO\\_C.\\_ASPECTOS\\_GENERALES\\_DEL\\_SISTEMA\\_GSI\\_-\\_Perez,\\_D.\\_\(2012\).pdf](http://www.bdigital.unal.edu.co/6782/19/ANEXO_C._ASPECTOS_GENERALES_DEL_SISTEMA_GSI_-_Perez,_D._(2012).pdf)

Hoek, E. A. B. E. . (1997). Estimacion de la resistencia de macizos rocosos en la practica, (C), 33–64.

Jordá-Bordehore, L. (2015). MANUAL BÁSICO DE CLASIFICACIONES GEOMECHANICAS Índice Q y Rock Mass Rating RMR. Guayaquil.

Kaplan, E. D., & Hegarty, C. J. (1997). Understanding GPS. Principles and applications. *Journal of Atmospheric and Solar-Terrestrial Physics* (Vol. 59). [https://doi.org/10.1016/S1364-6826\(97\)83337-8](https://doi.org/10.1016/S1364-6826(97)83337-8)

LL. Sanmiquel, J. Edo, M. Freijo, I. C. (2008). Control de la subsidencia mediante sistema GPS en la zona minera de Balsareny y Sallent. Universidad Politécnica de Cataluña. Retrieved from <http://informesdelaconstruccion.revistas.csic.es/index.php/informesdelaconstruccion/article/view/4237/4891>

Pesantes, C., Carrión, P., & Blanco, R. (2005). Evaluación y Zonificación de Riesgos Geodinámicos en el Distrito Minero de Zaruma y Portovelo. ESPOL. ESPOL.

Ramírez, P., & Alejano Monge, L. (2008). Mecánica de Rocas: Fundamentos de la Ingeniería de Taludes, 56–59. Retrieved from

[http://oa.upm.es/14183/1/MECANICA\\_DE\\_ROCAS\\_1.pdf](http://oa.upm.es/14183/1/MECANICA_DE_ROCAS_1.pdf)

RIESGOS, S. D. G. D. L. I. Y. A. DE. (2017). Informe Técnico Geológico - Geofísico sobre la estabilidad de varias zonas susceptibles a hundimientos en el casco urbano del Cantón Zaruma. Guayaquil.

Sanchez, S., Rodríguez, S. S., & Gómez, C. L. (2016). Correlaciones entre clasificaciones geomecánicas en ambientes andinos . Correlations of geomechanical indexes ... Correlaciones entre clasificaciones geomecánicas en ambientes andinos Correlations of geomechanical indexes for Andean environments, (October), 0–6.

TAVANTZIS, A. T. (1987). Modulo de young y coeficiente de poisson para distintos materiales, 1987.

Teixidó, M. T., & Quintana, Á. R. (2013). Aplicación de la Tomografía Eléctrica en la Caracterización del Deslizamiento de Doña Mencía. UNIVERSIDAD DE GRANADA.

Tomás, R., Herrera, G., Delgado, J., & Peña, F. (2009). Subsistencia del terreno. In A. (<http://www.aepect.org/>. Asociación Española para la Enseñanza de las Ciencias de la Tierra (Ed.),

Enseñanza de las Ciencias de la Tierra (2009, Volu ed., p. 295).

ESPAÑA: l'AEPECT, té la seu editorial a la Universitat de Girona.

Retrieved from

[www.raco.cat/index.php/ect/article/viewFile/199932/267375](http://www.raco.cat/index.php/ect/article/viewFile/199932/267375)