

MODELACIÓN GEOTÉCNICA DEL PROCESO CONSTRUCTIVO DE LA
CAVERNA DE MÁQUINAS PARA EL PROYECTO HIDROELÉCTRICO RÍO
NEGRO VALBUENA VALENCIA.



UNIVERSIDAD
La Gran Colombia

UNIVERSIDAD LA GRAN COLOMBIA
FACULTAD DE INGENIERIA CIVIL
ÁREA DE CIENCIAS DE LA INGENIERÍA
GEOTECNIA UNIDA GRANCOLOMBIANA
SIGUG- 2
BOGOTÁ2016

MODELACIÓN GEOTÉCNICA DEL PROCESO CONSTRUCTIVO DE LA
CAVERNA DE MÁQUINAS PARA EL PROYECTO HIDROELÉCTRICO RÍO
NEGRO VALBUENA VALENCIA.

MONOGRAFÍA DE GRADO
PARA OPTAR POR EL TÍTULO DE INGENIERO CIVIL

LUIS CARLOS VALBUENA BARRIOS

UNIVERSIDAD LA GRAN COLOMBIA
FACULTAD DE INGENIERIA CIVIL
ÁREA DE CIENCIAS DE LA INGENIERÍA
GEOTECNIA UNIDA GRANCOLOMBIANA
SIGUG- 2
BOGOTÁ 2016

CONTENIDO

	pág.
INTRODUCCIÓN	12
1. PLANTEAMIENTO DEL PROBLEMA	13
1.1 HIPÓTESIS.....	14
2 JUSTIFICACIÓN	15
3 OBJETIVOS	17
3.1 OBJETIVO GENERAL.....	17
3.2 OBJETIVOS ESPECÍFICOS.....	17
4 ANTECEDENTES	18
5 MARCO REFERENCIAL	20
5.1 MARCO CONCEPTUAL.....	20
5.1.1 Caverna.....	20
5.1.2 Sondeos in situ.....	20
5.1.3 Estructura geológica.....	20
5.1.4 Discontinuidades.....	21
5.1.5 Resistencia de la matriz rocosa	21
5.1.6 El sostenimiento	21
5.1.7 Estudio geológico-geotécnico	21
5.1.8 Métodos de investigación geofísica.....	22
5.1.9 Condiciones geológicas	22
5.1 MARCO TEORICO	23
5.1.1 Criterio de Hoek & Brown.....	23
5.1.2 Criterio de Mohr Coulomb	27
5.2 MARCO GEOGRÁFICO	33
5.3 MARCO DEMOGRÁFICO	34
5.4 MARCO LEGAL.....	34
6 DISEÑO METODOLÓGICO	39
6.1 ENFOQUE DE INVESTIGACIÓN	39
6.2 TIPO DE INVESTIGACIÓN	39
6.3 FASES DE LA INVESTIGACIÓN.....	40
6.4 INSTRUMENTOS Y TÉCNICAS DE RECOLECCIÓN DE LA INFORMACIÓN.....	40

6.4.1	Materiales y equipos	40
6.4.2	Instrumentos	41
6.4.3	Softwares	42
6.5	OPERACIONALIZACIÓN DE LAS VARIABLES.....	45
7	RESULTADOS Y ANALISIS.....	46
7.1	INTERPRETACIÓN DE LA ZONA A NIVEL CARTOGRÁFICO	46
7.1.1	Registro cartográfico del instituto geográfico Agustín Codazzi	46
7.1.2	Vista real a escala (Google EARTH).....	47
7.1.3	Componente geo-morfológico correspondiente a la orografía	48
7.1.4	Localización de las casas de máquinas (Caverna)	57
7.1.5	Morfo-geología del macizo para casa de maquinas.....	59
7.1.6	Parámetros de resistencia de la roca intacta	64
7.1.7	Sostenimiento, Revisión de cuñas inestables	72
7.1.8	Estado tensional (elementos finitos) (MIDAS GTS NX).....	83
7.1.9	Generación de mallas	90
8.	PRESUPUESTO.....	97
8	CONCLUSIONES.....	98
9	RECOMENDACIONES	99
10	BIBLIOGRAFÍA	100

LISTA DE TABLAS

	Pág.
Tabla 1 Criterios de selección del factor de alteración D.	32
Tabla 2 Entidades que intervienen.....	35
Tabla 3 Fases de la investigación.....	40
Tabla 4 Tipo de variables.....	45
Tabla 5 Registro de discontinuidades.....	60
Tabla 6 Valores típicos de peso específico, porosidad y permeabilidad de las rocas	62
Tabla 7 Propiedades físicas de la roca.....	64
Tabla 8 resistencia a la compresión inconfiada de las rocas.....	64
Tabla 9 valores del parámetro m_i para tipos de roca.....	65
Tabla 10 Guía para la selección del indicador de resistencia geológica.....	66
Tabla 11 Parámetros de entrada RocLab.....	67
Tabla 12 Parámetros de entrada, análisis de criterios de falla.....	67
Tabla 13 Parámetros Geomecánicos de la Arenisca.....	70
Tabla 14 Condición de las discontinuidades.....	72
Tabla 15 Enlace orientación vs presión de soporte y área de excavación.....	77
Tabla 16 Identificación de cuñas inestables.....	79
Tabla 17 Pre dimensionado del sostenimiento.....	80
Tabla 18 Variación en el FS respecto al espaciamiento del sostenimiento.....	82
Tabla 19 Presupuesto.....	97

LISTA DE ILUSTRACIONES

Pág.

Ilustración 1 Relaciones entre esfuerzos principales	29
Ilustración 2 Geografía del PH VV	33
Ilustración 3 Brújula Brunton estándar Geo, usada en ingeniería geológica.....	41
Ilustración 4 Ordenador alíen Dell.....	41
Ilustración 5 Icono de software TGM	42
Ilustración 6 Icono de software RocLab	42
Ilustración 7 Icono de software Dips.	43
Ilustración 8 Icono software Unwedge.	43
Ilustración 9 Logo del software Midas GTS NX.....	44
Ilustración 10 Plancha 208-I-C IGAC.....	46
Ilustración 11. Vista superior, localización de la zona de estudio	47
Ilustración 12. Vista en perspectiva norte-sur de la zona de estudio	47
Ilustración 13 Sistema de coordenadas MAGNA SIRGAS traslapadas en AutoCAD.	48
Ilustración 14 polígono importado de la base de datos Google Earth.....	49
Ilustración 15 se digitalizo la malla topográfica.	50
Ilustración 16 Parámetros de nivelación	50
Ilustración 17 Modelado de curvas de nivel, delta 25m, cota min: (425 msnm), cota máx. (1700msnm)	51
Ilustración 18 proyección del área de inundación polígono azul.....	51
Ilustración 19 modelo (cauces inmediatamente influenciados).....	52
Ilustración 20 Distribución y localización subcuentas Río Medio Negro 1	53
Ilustración 21 Afluentes con afectación directa y subcuencas de aporte	54
Ilustración 22 Histograma valores de caudales medios mensuales estación colorados - Río Medio Negro 1 (m ³ /s).....	54
Ilustración 23. Relieve en detalle cromático.....	56
Ilustración 24 Presa	56
Ilustración 25 Longitud de presa en la zona más alta	57
Ilustración 26 Proyecto hidroeléctrico Sogamoso	57
Ilustración 27 Cavernas al costado sur del lugar de retención de las aguas	58
Ilustración 28 Dimensiones de la casa de máquinas vista frontal y lateral	58
Ilustración 29 Afloramiento antrópico del macizo rocoso estudiado.....	59
Ilustración 30 Geología de la zona de estudio para PCH Valbuena Valencia.....	60
Ilustración 31 Tipo de material presente en el macizo	61
Ilustración 32 Relación de esfuerzos principales.	70
Ilustración 33 Relación del esfuerzo normal vs esfuerzo de corte.	70
Ilustración 34 Estereografía del sistema de discontinuidades, Estructura geológica	71
Ilustración 35 Familias de discontinuidades.....	71
Ilustración 36 Digitalización de las dimensiones de la caverna	73

Ilustración 37 Datos de entrada Unwedge.	73
Ilustración 38 Combinaciones analizadas en Unwedge de la 1 a la 6.	74
Ilustración 39 Combinaciones analizadas en Unwedge de la 7 a la 10	75
Ilustración 40 Grafica relación presión de soporte y orientación.....	76
Ilustración 41 Modelo de cuñas probables para orientación de 175°	78
Ilustración 42 Datos de entrada. Propiedades mecánicas	80
Ilustración 43 Visualización del sostenimiento en cuñas formadas alrededor de la caverna	81
Ilustración 44 Superficie TGM.....	84
Ilustración 45 superficie real del proyecto.....	84
Ilustración 46 Interpretación del comportamiento orográfico en la zona destinada a obras de generación	85
Ilustración 47 localización intramacizo de la caverna de máquinas.....	85
Ilustración 48 Dimensionado de la caverna.	86
Ilustración 49 Render de la caverna in situ.	86
Ilustración 50 macizo interno de la caverna particionado por etapas.....	87
Ilustración 51 Caverna al interior de la masa de roca	87
Ilustración 52 Sostenimiento en bóveda, hastiales laterales y hastiales frontales .	88
Ilustración 53. Puntos de tamaño para control.....	88
Ilustración 54 Asignación de parámetros en el modelo Midas GTS NX.....	89
Ilustración 55 Propiedades mecánicas del soporte acero y concreto	90
Ilustración 56 Malla del macizo rocoso y etapas de construcción de la caverna ...	90
Ilustración 57 Modelación del lanzado	91
Ilustración 58 procedimiento de lanzado.....	91
Ilustración 59 Geometría del lanzado	92
Ilustración 60 Geometría del lanzado	92
Ilustración 61 Restricción al movimiento desde las caras externas del medio continuo.	93
Ilustración 62 Definición de las etapas de construcción.....	94
Ilustración 63 Aplicación en el modelo del estado de esfuerzos en la etapa 1	95
Ilustración 64 Resolver modelo.....	95
Ilustración 65 Corriendo la solución del modelo.....	96
Ilustración 66 Modelo de deformaciones en proceso de ejecución.....	96

GLOSARIO

<p style="text-align: center;">C</p> <p>Cohesión (total)</p>	<p style="text-align: center;">j_r</p> <p>Índice de rugosidad (clasificación Q)</p>
<p style="text-align: center;">E</p> <p>Módulo de deformación elástica, Módulo de Young o módulo de elasticidad</p>	<p style="text-align: center;">J_v</p> <p>Parámetro que representa el número total de discontinuidades que interceptan una unidad de volumen en un macizo rocoso</p>
<p style="text-align: center;">E_m</p> <p>Módulo de deformación de la matriz rocosa</p>	<p style="text-align: center;">J_w</p> <p>Coefficiente reductor por la presencia de agua (clasificación Q)</p>
<p style="text-align: center;">G</p> <p>Peso específico de las partículas</p>	<p style="text-align: center;">K_0</p> <p>Coefficiente de empuje al reposo</p>
<p style="text-align: center;">g</p> <p>Aceleración de la gravedad</p>	<p style="text-align: center;">m</p> <p>Masa</p>
<p style="text-align: center;">H</p> <p>Altura Longitud horizontal de pernos Carga hidráulica total Máxima carga litostática a lo largo de la historia Geológica (índice SRF)</p>	<p style="text-align: center;">m_i</p> <p>Parámetro dependiente de las características del macizo rocoso (criterio de Hoek y Brown)</p>
<p style="text-align: center;">h</p> <p>Altura piezométrica o carga hidráulica</p>	<p style="text-align: center;">P_i</p> <p>Presión interna</p>
<p style="text-align: center;">i</p> <p>Angulo de rugosidad en discontinuidades</p>	<p style="text-align: center;">P_r</p> <p>Presión de roca sobre la clave de una excavación</p>
<p style="text-align: center;">J_a</p> <p>Índice de alteración (clasificación Q)</p>	<p style="text-align: center;">Q</p> <p>Caudal Carga</p>
<p style="text-align: center;">J_n</p> <p>Índice de diaclasado (clasificación Q)</p>	

Índice de calidad (clasificación Q de Barton) Contenido en cuarzo equivalente en minerales abrasivos.

R_ϕ

Fuerza resultante debida al rozamiento sobre un plano

r

Radio

Valor del rebote del martillo de Schmidt sobre la pared de una discontinuidad

S

Espaciamiento

s

Parámetro adimensional dependiente de las características del material rocoso (criterio de Hoek y Brown)

T

Tensión de anclaje

Periodo de retorno.

t

Tiempo

u

Presión intersticial o presión de agua

V

Volumen

V_P

Velocidad de las ondas sísmicas P

V_S

Velocidad de las ondas sísmicas S

V_F

Velocidad de las ondas longitudinales medida en campo

V_L

Velocidad de las ondas longitudinales medida en laboratorio

v

Velocidad

W

Peso

Energía de deformación acumulada al aplicar una carga (ensayo uniaxial)

w

Humedad

Z

Altura de posición

Altura geométrica, profundidad

z

Altura geométricas profundidad

α

Angulo director de buzamiento de una discontinuidad

Constante adimensional (criterio de Hoek y Brown)

β

Angulo de inclinación de un plano con la horizontal

Parámetro del método de Serrano y Olalla (cálculo de c y ϕ partir del criterio de Hoek y Brown)

γ

Peso específico Densidad

$\varepsilon, \varepsilon_l$

Deformación longitudinal o elongación

ε_{ax}

Deformación axial Deformación total

ε_t	Tensión horizontal
Deformación transversal	Tensión principal horizontal menor
ε_v	σ_n
Deformación volumétrica	Tensión normal
Deformación vertical	σ_t
θ	Resistencia a la tracción
Angulo entre la normal a un plano y la dirección de la tensión principal mayor	Tensión tangencial
ν	σ_v
Coeficiente de Poisson	Tensión principal vertical
ρ	σ_v
Densidad Resistividad del terreno	Tensión vertical
σ, σ'	σ_z
Tensión o esfuerzo (total, efectivo)	Tensión vertical a la profundidad
σ_c	T
Resistencia a compresión simple	Tensión tangencia Resistencia al corte
σ_{ci}	τ_f
Presión isotropa de cámara (ensayo triaxial en Resistencia a compresión simple de la matriz)	Tensión tangencial de rotura
σ_H	τ_{max}
Tensión principal horizontal mayor	Tensión tangencial máxima
σ_h	ϕ, ϕ'
	Angulo de rozamiento interno o de fricción
	ψ
	Angulo de inclinación de un talud con la horizontal.

ACRONIMOS

ISRM International society for rock mechanics

AEG Maorintian of Engineering Geologists

AENOR Asociación Española de Normalización y Conifi

AFPS Association Francaise du Génie Parasismique

ASTM American Society for Testing and Materials

CBR Californian Bearing Ratio

CEDEX Centro de Estudios y Experimentación de obras Públicas (M de Fomento)

CH Arcilla de alta plasticidad

CL Arcilla de baja plasticidad

CNEGP Comité Nacional Espanol de Grandes Presas

CPT Cone Penetration Test

CPTU Cone Penetration Test Undrained (piezocono con medida de presiones intersticiales)

CRR cyclic Resistance Ratio (resistencia al esfuerzo cortante ciclico del suelo)

CSR cyclic Shear stress Ratio (esfuerzo cortante ciclico ejercido por el terremoto)

EEM Espectro electromagnético

EMElectromagnético

ESR Excavation support Ratio (clasificación Q)

GSI Geological Strength Index

HCR Hormigon Compactado con Rodillos

IAEA International Atomic Energy Agency

IAEG International Association of Engineering Geology o

INTRODUCCIÓN

La presente investigación propone una nueva central hidroeléctrica en Colombia que estará localizada en la zona central del país en el departamento de Cundinamarca y que desde Agosto de 2014 se encuentra en etapa de investigación. Los municipios de influencia son Caparrapí, Guaduas, Villeta y Utica, el potencial embalse no había sido descubierto pero si se habían adelantado estudios de potencial hidroenergético en la región, el proyecto consiste en la utilización de las aguas del río Negro para la generación de energía eléctrica.

Se hizo un exhaustivo reconocimiento demográfico para resaltar la necesidad de la reserva para suplir de energía eléctrica. Luego se hace un enfoque detallado de la forma del proyecto al cual se puede llegar por vía carretera a 20 minutos desde el municipio Villeta y a 15 minutos desde el municipio Guaduas.

Se utilizaron herramientas computacionales modernas que permitieron determinar la orografía del relieve con aceptable precisión obtenidos mediante satélites de posicionamiento global trasladado al sistema de coordenadas Magna Sirgas, lo que permitió detallar la cuenca del embalse propio del proyecto. Con base en ello se evaluó el terreno para decidir la localización idónea de las obras principales de generación, se tuvo en cuenta la ubicación de la estructura de retención (presa) y la factibilidad de ubicación del vertedero, en particular se localizó la caverna para casa de máquinas que fue objeto principal de esta tesis. Como producto final se obtuvo la modelación a nivel de pre factibilidad del proceso de excavación y sostenimiento para estabilizar el macizo durante la construcción de la caverna.

Para el pre-dimensionamiento de la caverna fue necesario identificar el área útil necesaria en proyectos de referencia, como Ituango y Sogamoso, se digitalizaron las dimensiones y se analizó el comportamiento mecánico del macizo rocoso.

El sistema de sostenimiento requirió la implementación de elementos utilizados comúnmente para este tipo de obras, pernos, concreto lanzado, malla electro-soldada, y eventualmente tendones de anclaje.

Geológicamente se caracterizó el macizo, para ejecutar así el análisis del comportamiento geomecánico. El desarrollo y diseño de la caverna se consideraron técnicas y metodologías empíricas, revisiones de equilibrio límite y modelación mediante elementos finitos. Con el uso de herramientas computacionales que hacen parte del estado del arte en diseño de cavernas se analiza un aspecto geotécnico particular de la complejidad de las obras que conformaran el proyecto hidroeléctrico Río Negro Valbuena Valencia.

1. PLANTEAMIENTO DEL PROBLEMA

El gran potencial hídrico y la necesidad energética que eventualmente requiere Colombia, en especial en temporada de sequía, incentiva al gobierno Colombiano en impulsar los proyectos de generación eléctrica; en particular las plantas hidroeléctricas que además de ser amigables con el ambiente; generan impactos positivos en términos económicos y beneficios en el aspecto social.

El estado colombiano, a través del ministerio de minas y energía, las universidades y empresas especializadas, han estudiado el enorme potencial hidroeléctrico y las excelentes características de las cuencas adecuadas para la producción energética, sin embargo se dejaron por fuera proyectos útiles para la producción como se evidencia en el Primer Atlas hidroenergético divulgado por la unidad de planeación minero energética (UPME) en conjunto con Colciencias y la Universidad Javeriana el miércoles 7 de octubre de 2015¹, en el cual se hizo un excelente trabajo en el cual se identificó el potencial hidroenergético pero no se determinó la localización de los proyectos de generación de energía eléctrica.

Respecto al crecimiento demográfico, la población para el 2005 del valle del río Magdalena en la región denominada medio Magdalena presente en los municipios que lo conforman es de 254.000 habitantes (La Dorada (71.000), Puerto Salgar (20.000), Puerto Triunfo (21.000), Puerto Boyacá (56.000), Puerto Nare (19.000), Puerto Berrio (48.000), Yondo (19.000)) habitantes respectivamente, y aproximadamente el 35% de la totalidad de ellos según el DANE presentan necesidades básicas insatisfechas es decir que no se les es prestado el servicio de acueducto de agua potable ni el servicio de energía eléctrica, esto inhibe el desarrollo urbanístico de la región.²

En los puertos del río Magdalena las comunidades presentes cuentan con el servicio de agua y energía de manera discontinua, en especial en temporada seca motivo por el cual su calidad de vida se ve afectada puesto que para el desarrollo de las actividades sociales, económicas entre otras, se hace necesario el uso tanto del recurso hídrico como eléctrico.

¹UPME, COLCIENCIAS, UNIVERSIDAD PONTIFICIA JAVERIANA. Primer Atlas hidroenergético revela gran potencial en Colombia [línea]. Colombia, ministerio de minas y energía 6 PDF's. [20 sept., 2016]. Disponible <http://www1.upme.gov.co/sala-de-prensa/noticias/primer-atlas-hidroenergetico-revela-gran-potencial-en-colombia>

²DANE, Censo general 2005-Necesidades Básicas Insatisfechas [línea]. Colombia, 4 Pág. [citado 22 sept., 2016 https://www.dane.gov.co/files/investigaciones/boletines/censo/Bol_nbi_censo_2005.pdf

Por tanto la construcción del P.H. “Valbuena Valencia” conllevará la aplicación de varios aspectos ingenieriles; previo a la construcción de las obras subterráneas y de superficie, de las cuales no se tiene noción alguna y únicamente se determinó la ubicación en el estudio hidrográfico de la cuenca del río Guaduro ejecutado por el investigador.

Debido a las características geotécnicas del macizo identificadas luego de visitas de campo, se proyecta que la construcción de una caverna para el alojamiento de los equipos de generación puede originar impactos en la viabilidad del proyecto hidroeléctrico, debido a la complejidad y tamaño de esta obra.

Atendiendo a que el alcance del presente proyecto es meramente de carácter geotécnico, Para hacer un aporte digno de la mecánica de rocas y obras subterráneas en su momento debería ser identificado el comportamiento mecánico del macizo rocoso, específicamente para las obras subterráneas del proyecto, de las cuales se proyectaron las dimensiones, lo que creó un escenario con problemas puesto que se deberían identificar los parámetros geomorfométricos del proyecto, parámetros geo-mecánicos del macizo rocoso, y escenario dinámico de la geología que influye en el mismo para garantizar la vida útil del proyecto.

Se realiza un proyecto que debió resolverse desde la interpretación de la localización hasta la proyección de la estabilización del macizo, así surgió el siguiente cuestionamiento: ¿Cuál es el modelo idóneo para el proceso de exploración, Excavación, sostenimiento y construcción de las obras subterráneas en el proyecto Valbuena Valencia?

1.1 HIPÓTESIS

Si se hace el análisis del comportamiento geo-mecánico del macizo rocoso del P.H. “Valbuena Valencia”, entonces, se pueden desarrollar los lineamientos para la ejecución de las excavaciones y estabilización de una obra subterránea de gran tamaño como es el caso de una caverna de máquinas.

2 JUSTIFICACIÓN

El presente trabajo tuvo como finalidad demostrar la posibilidad de construir obras subterráneas para centrales hidroeléctricas en macizos rocosos que han sido estudiados de manera superficial o poco substancial por parte de la UPME, Colciencias y la Universidad Javeriana³, ofrecer alternativa de mitigación ante las eventualidades que ofrecen estos, con el propósito de suplir las necesidades de abastecimiento de agua y energía que tienen las poblaciones de la región del Magdalena medio, en temporada seca, proponiendo la ejecución de un proyecto hidroeléctrico (puesto que estos municipios son el principio de la construcción del área metropolitana en dicha región).

En los 30 años anteriores fue visible el crecimiento de ciudades como Bogotá o Medellín que poseen buenas fuentes de abastecimiento y es notable el rezago en las futuras áreas metropolitanas que no poseen fuentes apropiadas de abastecimiento. Según el DANE la población nacional crece aproximadamente en novecientosmil (900.000) habitantes al año mientras que entre el año 2005 y 2010 nacieron 4.387.205 habitantes, entre el año 2010 y 2015 nacieron 4.420.406 habitantes y se estima que entre el año 2015 y 2020 los nacimientos serán 4.465.515 habitantes, para un total de 13.273.126 en quince años.

La población colombiana a la fecha es de 48.863.500 habitantes según la Registraduría nacional del estado civil, con base en la información estadística mencionada probablemente la población para el 2030 se estima en 7.000.000 de habitantes adicionales a la población actual es decir 55.863.500 habitantes.⁴ Es decir que en Colombia habitarán siete millones de personas adicionales, a las cuales se debe abastecer y ubicar.

Por lo tanto debemos proyectar el abastecimiento de las futuras metrópolis que Colombia está construyendo actualmente, anticipando así el racionamiento de agua y de energía, se debe hacer con eficiencia y eficacia para suplir a una población nueva más grande que la población actual de Medellín.

Dicho abastecimiento no dependerá solo de una hidroeléctrica, el abastecimiento de las necesidades básicas del 35% de los habitantes del valle del río Magdalena más la nueva población para el 2030 de 12'600.000 habitantes se logrará con una nueva era de micro centrales hidroeléctricas o centrales de paso.

³UPME, COLCIENCIAS, UNIVERSIDAD PONTIFICIA JAVERIANA. Op. Cit., p.6

⁴DANE, Censo general 2005-Nivel nacional [línea]. Colombia, 498 Pág. [citado 22 sept., 2016 <http://www.dane.gov.co/files/censos/libroCenso2005nacional.pdf>

Fue necesario desarrollar un estudio geológico-geotécnico que permitió evaluar el macizo rocoso (de una manera general), para optar por las mejores técnicas en la construcción dentro del mismo y así estimar los costos en lo que concierne a las obras subterráneas.

La finalidad de esta investigación es explorar un aspecto técnico particular que hará parte de la factibilidad de la futura central hidroeléctrica, la cual es punto de partida para concebir este proyecto como una realidad.

3 OBJETIVOS

3.1 OBJETIVO GENERAL

Modelar el proceso de excavación y alternativa de sostenimiento para las cavernas de casas de máquinas en el proyecto hidroeléctrico Valbuena Valencia.

3.2 OBJETIVOS ESPECÍFICOS

- Determinar la localización de las excavaciones subterráneas.
- Caracterizar el macizo rocoso en el cual estarán inmersas las construcciones subterráneas.
- Analizar el comportamiento geo-mecánico del macizo rocoso ubicado en uno de los flancos de la futura estructura de retención (presa).

4 ANTECEDENTES

Para efecto de cumplir los objetivos de la investigación se indagaron tres antecedentes de la misma tipología.

Según un análisis de la deformación para un grupo de discontinuidades de una caverna subterránea con paso a paso de excavación, ejecutado por Wang, Zhu, Zhang, de Jinan, China; En cuya caverna se ha mitigado la deformación utilizando los beneficios del apoyo escalonado (terrazas) y criterio de convergencia correspondiente. La estabilidad de un continuo para la caverna subterránea con discontinuidades en una central hidroeléctrica grande fue analizada mediante diversas metodologías, especialmente en términos de los efectos de la construcción, factores y el beneficio de una excavación por etapas, y se verificó mediante el análisis de los resultados modelados vs las deformaciones medidas.

A través de una comparación de la influencia de diversas secuencias de excavación de tres cavernas (casa de máquinas principal, cámara del transformadores y canal de descarga, y cámara de carga) sobre la estabilidad de la roca, una optimización se llevó a cabo por el sostenimiento, esquema basado en las profundidades deducidas de las zonas de falla y los desplazamientos de los puntos clave, que se observa en la secuencia de excavación, la cual es óptima para excavar la casa de máquinas principal y la cámara de canal de descarga primero y luego la cámara de transformadores; los pernos de cable pueden ser instalados adicionalmente a las partes clave de la cámara de canal de descarga de sobretensiones transitorias para mejorar el estado de esfuerzos de la roca circundante.⁵

En la investigación del método de optimización para la excavación caverna subterránea ejecutada por Bian, Kang y Xiao Ming del Wuhan University, Wuhan, China; Con base en el método de elementos finitos elasto-plástico (FEM), las metodologías para la excavación de cavernas subterráneas son investigadas y optimizadas. La energía disipada por deformación plástica de roca circundante se presenta como un factor general a juzgar para la estabilidad de la roca. La plastificación produce más energía disipada, la roca circundante se perturba más por la excavación, la estabilidad de la roca se verá reducida. Además, el volumen de la zona agrietada, la zona plástica y la zona de rebote de la roca también son criterios importantes para evaluar las ventajas y desventajas de los diferentes métodos de

⁵WANG, WEN, Jinan. Análisis de la deformación para un grupo de discontinuidades de una caverna subterránea con paso a paso de excavación, Tecnología moderna construcción de túneles [en línea]. 1 de junio de 2015 vol. 52, p.182-188, [1 de Marzo de 2016]. ISSN: 10096582. Disponible en: <http://www.sciencedirect.com.ugc.elogim.com>

excavación. Después, se aplica el método de excavación propuesta en Changheba proyecto de energía hidroeléctrica.

Los resultados de cálculo numérico muestran que el tiempo de excavación de la parte superior de la cámara de carga influirá en todo el entorno de estabilidad de la roca. El método propuesto proporciona una forma eficaz para el análisis de optimización de la excavación de la caverna subterránea.⁶

Proveniente del análisis dinámico del techo de caverna subterránea bajo la teoría de carga de placa gruesa ejecutada por Jiang, Xueliang y Yang, Hui de la Universidad del Sur de Bosques en China, El techo fue considerado como placa gruesa unidireccional o rectangular por la teoría de Reissner y la caravana para carga dinámica se miraba como carga de armónicos. Las fórmulas prácticas de la frecuencia, el modelo de vibración, deflexión interna, la fuerza, la tensión, el desplazamiento y la ampliación dinámica de factores en el techo se obtuvieron con la condición de diversos límites y el criterio de falla se construyó por desviación.

Tomado el techo de la caverna de la mina de fosfato Wenfu como ejemplo, se calcularon los parámetros de techo. Los resultados muestran que la deflexión en la bóveda con la teoría de placa viga es 1,64 veces en comparación con la desviación con la misma teoría para placa domo. El factor de espesor es el mayor en el límite para apoyo fijo y es el más pequeño en el límite para simplemente apoyado y es intermedio cuando un extremo del techo es fijo y el otro extremo es simplemente apoyado. La dinámica de los factores de ampliación es más grandes cuando la frecuencia angular de la carga de armónicos está más cerca de la frecuencia fundamental de placa viga. La voluntad de resonancia aparece entre la caverna y el techo cuando la frecuencia angular de la carga de armónicos es igual a la frecuencia fundamental de la placa viga.⁷

⁶BIAN, KANG, Xiao. Investigación del método de optimización para la excavación caverna subterránea, Tecnología de Computación Inteligente y Automatización [en línea]. 11 de octubre de 2009 vol.3, p 269-272 [1 de Marzo de 2016]. ISBN-13: 9780769538044. Disponible en: <http://www.sciencedirect.com.ugc.elogim.com/>

⁷JIANG, XUELIANG Análisis dinámico del techo de caverna subterránea bajo la teoría de carga de placa gruesa. Automatización y Control Mecánico 2011, [en línea]. 15 julio 2011 MACE. art.5988336, ISBN-13: 9781424494392 [27 de julio de 2016]. Disponible en: <http://www.sciencedirect.com.ugc.elogim.com/>

5 MARCO REFERENCIAL

5.1 MARCO CONCEPTUAL

5.1.1 Caverna

Es una estructura que permite aprovechar el espacio subterráneo, se construyen para evitar la evaporación del agua con alta energía potencial, salvar un obstáculo natural y permitir la salida para transvases y conducciones. Estas estructuras están estrechamente relacionadas con la energía y los recursos petreos (aprovechamientos hidroeléctricos, microcentrales, centrales de paso, explotaciones mineras, y almacenamientos subterráneos).⁸

5.1.2 Sondeos in situ

Los sondeos *in situ* constituyen la parte esencial de los estudios geológico-geotécnicos necesarios para el proyecto de construcción de la caverna, de ellos se obtienen los parámetros y propiedades que definen las condiciones del terreno donde se realizaran las labores de construcción, para efectos de este proyecto las excavaciones.

5.1.3 Estructura geológica

La estructura geológica define el sistema que permite la estabilidad de una excavación subterránea, en rocas estratificadas la orientación de los estratos condiciona diferentes modos de comportamiento frente a la estabilidad de la caverna, se debe estudiar para disminuir costos y hacer de la construcción un proceso más seguro, interpretando sus componentes geoméricamente.

⁸GONZALES VALLEJO et al., Ingeniería Geológica, Túneles, Diario de Geofísica Aplicada, Volumen 1, 2003 , páginas 488-539, Mercedes Ferrer, Luis Otuño, Carlos Oteo, 13 octubre de 2015

5.1.4 Discontinuidades

Son planos preferentes de alteración y fractura, estos llamados juntas permiten el flujo de agua, su reconocimiento, descripción y caracterización es necesaria para el estudio del comportamiento mecánico del macizo rocoso como un todo.

- Cartografía geológica e interpretación estructural.
- Identificación de fallas y su clasificación en función del tipo y geometría.
- Identificación de rellenos de falla, su resistencia y expansividad.
- análisis sobre las implicaciones del estado tensional.

5.1.5 Resistencia de la matriz rocosa

De la resistencia de la matriz rocosa depende la selección del método de excavación, esta incide en la estabilidad del macizo, puesto que este será capaz de soportar un tipo específico de perturbación o resonancia.

5.1.6 El sostenimiento

Hacen parte de todos los elementos estructurales empleados en la estabilización del medio, aplicados en áreas excavadas de la caverna con el fin de asegurar su estabilidad durante el avance de los frentes de trabajo y la operación de la central.

5.1.7 Estudio geológico-geotécnico

Para proyectar y construir una caverna de máquinas, la metodología básica para realizar los estudios engloba las siguientes etapas:

- Condiciones geológicas, geotécnicas, e hidrogeológicas de la puesta a punto.
- Identificación de mayor complejidad geológica, hidrogeológica o geotécnica.
- Clasificación y sectorización geomecánica, propiedades y parámetros de diseño del macizo rocoso.

- Criterios geomecánicos para el cálculo de sostenimientos y métodos de excavación.
- Emplazamiento, excavación y estabilización de accesos internos
- Recomendaciones para la excavación, sostenimientos y proceso constructivo de la caverna
- Tratamientos del terreno para la estabilización, refuerzo, drenaje o impermeabilización del medio.⁹

5.1.8 Métodos de investigación geofísica

Más empleados son: la sísmica de refracción en zonas de pocos recubrimientos, ensayos *Down hole*, *Cross hole* y digrafías en el interior de sondeos y la sísmica de reflexión para el estudio de estructuras geológicas profundas. Los ensayos hidrogeológicos más habituales son los de permeabilidad tipo lugeon y lefranc y las medidas piezométricas. Los ensayos geotécnicos *in situ* dependen del tipo de material y de la problemática del túnel; de los más utilizados son los piezómetros y los dilatómetros, y en ocasiones los de hidró-fracturación.

5.1.9 Condiciones geológicas

Al excavar el túnel se pueden encontrar tres tipos de condiciones naturales que dan lugar a la pérdida de resistencia del macizo y, por tanto, a problemas de estabilidad.

- Orientación desfavorable de discontinuidades
- Orientación desfavorable de las tensiones respecto al eje de la caverna.
- Flujo de agua hacia el interior de la excavación a favor de fracturas, acuíferos o rocas certificadas.

Estas condiciones están directamente relacionadas con los siguientes factores geológicos: estructura, discontinuidades, resistencia de la roca matriz, condiciones hidrogeológicas y estado de esfuerzos.

⁹Ibid. páginas 500-501

5.1 MARCO TEORICO

5.1.1 Criterio de Hoek & Brown

Hoek y Brown¹⁰ introdujeron su criterio de rotura en un intento de proporcionar los datos de partida para el análisis necesario en el diseño de excavaciones subterráneas en roca competente. El criterio se dedujo a partir de los resultados de las investigaciones de Hoek¹¹ de roturas frágiles de rocas intactas y de un modelo de estudio del comportamiento de macizos rocosos de Brown¹². El criterio partía de las propiedades de la roca intacta y entonces se introducían factores reductores de estas propiedades sobre la base de las características de un macizo rocoso diaclasado. Los autores, intentando relacionar el criterio empírico con las observaciones geológicas, por medio de uno de los sistemas de clasificación de los macizos rocosos, eligieron para este propósito el RMR (Rock Mass Rating) propuesto por Bieniawski.¹³

Debido a la ausencia de otras alternativas, el criterio fue pronto adoptado por la comunidad de la mecánica de rocas y su uso rápidamente extendido más allá de los límites originales utilizados en la deducción de las relaciones de reducción de la resistencia.

Consecuentemente, llegó a ser necesario reexaminar estas relaciones e introducir nuevos elementos cada vez que dicho criterio era aplicado a un amplio rango de problemas prácticos. Fruto de estos avances fue la introducción de la idea de macizos rocosos "inalterados" y "alterados" por Hoek y Brown¹⁴, y la introducción

¹⁰HOEK, E. and BROWN, E.T. (1980). Empirical strength criterion for rock masses. J. Geotech. Engng Div., ASCE 106 (GT9), 1013-1035.(30 septiembre de 2016)

HOEK, E. and BROWN, E.T. (1980). Underground Excavations in Rock. London, Instn. Min. Metall.

¹¹HOEK, E (1968). Brittle failure of rock. Rock Mechanics in Engineering Practice. (Eds. K.G. Stagg and O.C. Zienkiewicz), 99-124. London: Wiley. (30 septiembre de 2016)

¹²BROWN, E.T. (1970). Strength of models of rock with intermittent joints. J. Soil Mech. Foundn Div., ASCE 96, SM6, 1935-1949.(30 septiembre de 2016)

¹³ BIENIAWSKI Z.T. (1976). Rock mass classification in rock engineering. Exploration for Rock Engineering, Proc. Of the Symp., (ed. Z.T. Bi- eniawski). 1, 97-106. Cape Town, Balkema. (30 septiembre de 2016)

¹⁴ HOEK, E and BROWN, E.T. (1988). The Hoek & Brown failure criterion 1988 update. Proc. 15 th Canadian Rock Mech. Symp. (Ed. J.C. Curran), 31-38. Toronto, Dept. Civil Engineering, University of Toronto. (30 septiembre de 2016)

de un criterio modificado para obligar a la resistencia a tracción del macizo rocoso a tender a cero para macizos de calidad muy mala (Hoek, Wood y Shah)¹⁵.

Una de las primeras dificultades que aparecen en muchos problemas geotécnicos, particularmente en el ámbito de la estabilidad de taludes, es que es más conveniente tratar el criterio original de Hoek- Brown en términos de esfuerzos normales y al corte más que en términos de esfuerzos principales, según la ecuación original:

$$\sigma'_1 = \sigma'_3 + \sigma_{ci} \left(m \frac{\sigma'_3}{\sigma_{ci}} + s \right)^{0.5} \quad (1)$$

Donde

σ'_1 y σ'_3 Son los esfuerzos principales efectivos mayor y menor en el momento de rotura

σ_{ci} Es la resistencia a compresión uniaxial del material intacto

m y s Son las constantes del material, donde $s = 1$ para roca intacta.

Una relación exacta entre la ecuación 1 y los esfuerzos normales y al corte en la rotura fue deducida por J.W. Bray (recopilada por Hoek¹⁶ y últimamente por Ucar¹⁷ y por Londe¹⁸).

Hoek¹⁹ trató la derivación de las resistencias cohesivas y de los ángulos de fricción equivalentes para diferentes situaciones prácticas. Estas deducciones se basaron en las tangentes a la envolvente de Mohr obtenida por Bray. Hoek²⁰ sugirió que la

¹⁵ HOEK, E., WOOD D. and SHAH, S. (1992). A modified Hoek-Brown criterion for jointed rock masses. Proc. Rock Characterization, Symp. Int. Soc. Rock Mech Eurock' 92, (ed. J.A. Hudson), 209-214. London, Brit. Geotech. Soc. (30 septiembre de 2016)

¹⁶ HOEK, E. (1983). Strength of jointed rock masses. 23 rd. Rankine Lecture. Géotechnique 33 (3), 187-223. (30 septiembre de 2016)

¹⁷ UCAR, R. (1986). Determination of shear failure envelope in rock masses. J. Geotech. Engg. Div. ASCE. 112, (3), 303-315. (30 septiembre de 2016)

¹⁸ LONDE, P. (1988). Discussion on the determination of the shear stress failure in rock masses. ASCE J. Geotech Eng Div, 14, (3), 374-376. (30 septiembre de 2016)

¹⁹ CARRANZA-TORRES, C., and FAIRHURST, C. (1999). General formulation of the elasto-plastic response of openings in rock using the Hoek & Brown failure criterion. Int. J. Rock Mech. Min. Sci., 36 (6), 777-809. (30 septiembre de 2016)

²⁰ HOEK, E. (1990). Estimating Mohr-Coulomb friction and cohesion values from the Hoek & Brown failure criterion. Intl. J. Rock Mech. & Mining Sci. & Geomechanics Abstracts. 12 (3), 227-229

resistencia cohesiva determinada al ajustar una tangente a la envolvente curvilínea de Mohr es un valor sobredimensionado y puede dar unos resultados optimistas en los cálculos de estabilidad. Consecuentemente, puede ser más apropiado un valor medio determinado al ajustar una relación lineal de Mohr-Coulomb por métodos de mínimos cuadrados. En ese artículo, Hoek también introdujo el concepto de criterio de Hoek-Brown Generalizado en el que la forma de la curva de la tensión principal o la envolvente de Mohr podría ajustarse por medio de un coeficiente variable, a , en lugar del término de la raíz cuadrada de la ecuación 1.

Hoek y Brown²¹ consolidaron todos los progresos anteriores en una presentación comprensiva del criterio de rotura y dieron numerosos ejemplos trabajados para ilustrar su aplicación práctica.

Además de los cambios en las ecuaciones, también se reconoció que el RMR de Bieniawski no era adecuado como vehículo para relacionar el criterio de rotura con las observaciones geológicas en campo, particularmente para macizos rocosos muy débiles. Ello condujo a la introducción del Índice de Resistencia Geológica, GSI (Geological Strength Index) por Hoek, Wood y Shah²², Hoek²³ y Hoek, Kaiser y Bawden²⁴. Este índice fue posteriormente extendido a macizos rocosos débiles a través de una serie de artículos de Hoek, Marinos y Benisi²⁵, Hoek y Marinos^{26,27} y Marinos y Hoek²⁸.

En este marco no se tratará el Índice de Resistencia Geológica GSI, en cambio el texto se centrará en la secuencia de cálculos ahora propuesta para la aplicación del criterio de Hoek y Brown Generalizado a macizos rocosos diaclasados.

HOEK, E. (1994). Strength of rock and masses. ISRM News Journal, 2 (2), 4-16. (30 septiembre de 2016)

²¹ HOEK, E. and BROWN, E.T. (1997). Practical estimates of rock mass strength. Intl. J. Rock Mech. & Mining Sci. & Geomechanics Abstracts. 34 (8), 1165-1186. (30 septiembre de 2016)

²² Ibid 15

²³ HOEK, E. (1994). Strength of rock and masses. ISRM News Journal, 2 (2), 4-16.

²⁴ HOEK, E., KAISER P.K. and BAWDEN W.F. (1995). Support of underground excavations in hard rock. Rotterdam, Balkema. (30 septiembre de 2016)

²⁵ HOEK, E., MARINOS, P. and BENISSI, M. (1998). Applicability of the Geological Strength Index (GSI) classification for very weak and sheared rock masses. The case of the Athens Schist Formation. Bull. Eng. Geol. Env. 57 (2), 151-160. (30 septiembre de 2016)

²⁶ MARINOS, P. and HOEK, E. (2000). GSI - A geologically friendly tool for rock mass strength estimation. Proc. GeoEng 2000 Conference, Melbourne. (30 septiembre de 2016)

²⁷ HOEK, E. and MARINOS, P. (2000). Predicting Tunnel Squeezing. Tunnels and Tunnelling International. Part 1 - November 2000, Part 2 - December, 2000. (30 septiembre de 2016)

²⁸ MARINOS, P. and HOEK, E. (2001). Estimating the geotechnical properties of heterogeneous rock masses such as flysch. Bulletin of the International Association of Engineering Geologists

✓ CRITERIO DE HOEK & BROWN GENERALIZADO

Éste se expresa como:

$$\sigma'_1 = \sigma'_3 + \sigma_{ci} \left(m_b \frac{\sigma'_3}{\sigma_{ci}} + s \right)^a \quad (2)$$

Donde m_b es un valor reducido de la constante del material m_i y está dado por:

$$m_b = m_i \exp \left(\frac{\text{GSI} - 100}{28 - 14D} \right) \quad (3)$$

s y a son constantes del macizo rocoso dadas por las siguientes relaciones:

$$s = \exp \left(\frac{\text{GSI} - 100}{9 - 3D} \right) \quad (4)$$

$$a = \frac{1}{2} + \frac{1}{6} \left(e^{-\text{GSI}/15} - e^{-20/3} \right) \quad (5)$$

D es un factor que depende sobre todo del grado de alteración al que ha sido sometido el macizo rocoso por los efectos de las voladuras o por la relajación de esfuerzos. Varía desde 0 para macizos rocosos in situ inalterados hasta 1 para macizos rocosos muy alterados. Más adelante se reconocen las pautas para la selección de D .

La resistencia a la compresión uniaxial se obtiene haciendo $\sigma_3 = 0$ en la ecuación 2, dando así:

$$\sigma_c = \sigma_{ci} s^a \quad (6)$$

y siendo la resistencia a tracción:

$$\sigma_t = -\frac{s\sigma_{ci}}{m_b} \quad (7)$$

La ecuación 7 se obtiene haciendo $\sigma_3 = \sigma_1 = \sigma_t$ en la ecuación 2. Esto representa una condición de tensión biaxial. Hoek²⁹ mostró que para materiales frágiles, la resistencia a tracción uniaxial es igual a la resistencia a tracción biaxial.

Obsérvese que el “cambio” en $\text{GSI} = 25$ para los coeficientes s y a (Hoek y Brown,³⁰) se ha suprimido en las ecuaciones 4 y 5 que dan una transición continua suave para

²⁹ HOEK, E. (1983). Strength of jointed rock masses. 23 rd. Rankine Lecture. Géotechnique 33 (3), 187–223. (30 septiembre de 2016)

³⁰ Ibid. 20

todo el intervalo de valores de GSI. Los valores numéricos de a y s dados por estas ecuaciones están muy próximos a los dados por las ecuaciones anteriores y no es necesario hacer correcciones o rehacer los antiguos cálculos.

Los esfuerzos normales y al corte están relacionados con los esfuerzos principales por las ecuaciones publicadas por Balmer³¹:

$$\sigma'_n = \frac{\sigma'_1 + \sigma'_3}{2} - \frac{\sigma'_1 - \sigma'_3}{2} \frac{d\sigma'_1/d\sigma'_3 - 1}{d\sigma'_1/d\sigma'_3 + 1} \quad (8)$$

$$\tau = (\sigma'_1 - \sigma'_3) \frac{\sqrt{d\sigma'_1/d\sigma'_3}}{d\sigma'_1/d\sigma'_3 + 1} \quad (9)$$

Siendo:

$$d\sigma'_1/d\sigma'_3 = 1 + am_b (m_b \sigma'_3 / \sigma_{ci} + s)^{a-1} \quad (10)$$

✓ MÓDULO DE DEFORMACIÓN

Los módulos de deformación de macizos rocosos están dados por:

$$E_m \text{ [GPa]} = \left(1 - \frac{D}{2}\right) \sqrt{\frac{\sigma_{ci}}{100}} 10^{\frac{GSI-10}{40}} \quad (11)$$

La ecuación 11 se utiliza cuando $\sigma_{ci} \leq 100$ MPa.

Cuando $\sigma_{ci} > 100$ MPa, se utiliza la siguiente expresión

$$E_m \text{ [GPa]} = \left(1 - \frac{D}{2}\right) 10^{\frac{GSI-10}{40}} \quad (12)$$

Obsérvese que la ecuación original propuesta por Hoek y Brown³² ha sido modificada por la inclusión del factor D , para tener en cuenta los efectos de los daños de las voladuras y la relajación de esfuerzos.

5.1.2 Criterio de Mohr Coulomb

³¹ BALMER, G. (1952). A general analytical solution for Mohr's envelope. Am. Soc. Test. Mat. 52, 1260-1271. (30 septiembre de 2016)

³² Ibid 20

Es necesario determinar los ángulos de fricción y las resistencias cohesivas para cada macizo rocoso e intervalo de esfuerzos. Esto se hace ajustando una relación lineal media a la curva generada a partir de la ecuación 2 para un intervalo de esfuerzo principal menor definido por $\sigma_T < \sigma_3 < \sigma'_{3max}$, tal como se ilustra en la ilustración 1. El proceso de ajuste supone equilibrar las áreas por encima y por debajo de la curva de Mohr-Coulomb. Esto da lugar a las siguientes ecuaciones para el ángulo de fricción ϕ' y la resistencia cohesiva c' .

$$\phi' = \sin^{-1} \left[\frac{6 am_b (s + m_b \sigma'_{3n})^{a-1}}{2(1+a)(2+a) + 6 am_b (s + m_b \sigma'_{3n})^{a-1}} \right] \quad (13)$$

$$c' = \frac{\sigma_{ci} [(1+2a)s + (1-a)m_b \sigma'_{3n}] (s + m_b \sigma'_{3n})^{a-1}}{(1+a)(2+a) \sqrt{1 + \frac{6 am_b (s + m_b \sigma'_{3n})^{a-1}}{(1+a)(2+a)}}} \quad (14)$$

Siendo $\sigma'_{3n} < \sigma'_{3max} / \sigma_{ci}$

Obsérvese que el valor de σ'_{3max} , el límite superior del esfuerzo de confinamiento sobre el que se ha considerado la relación de los criterios de Mohr Coulomb y de Hoek-Brown, ha sido determinado para cada caso individual. Más adelante se presentan pautas para tomar valores de σ'_{3max} para el caso de túneles superficiales y profundos.

La resistencia al corte de Mohr-Coulomb σ'_n se encuentra sustituyendo

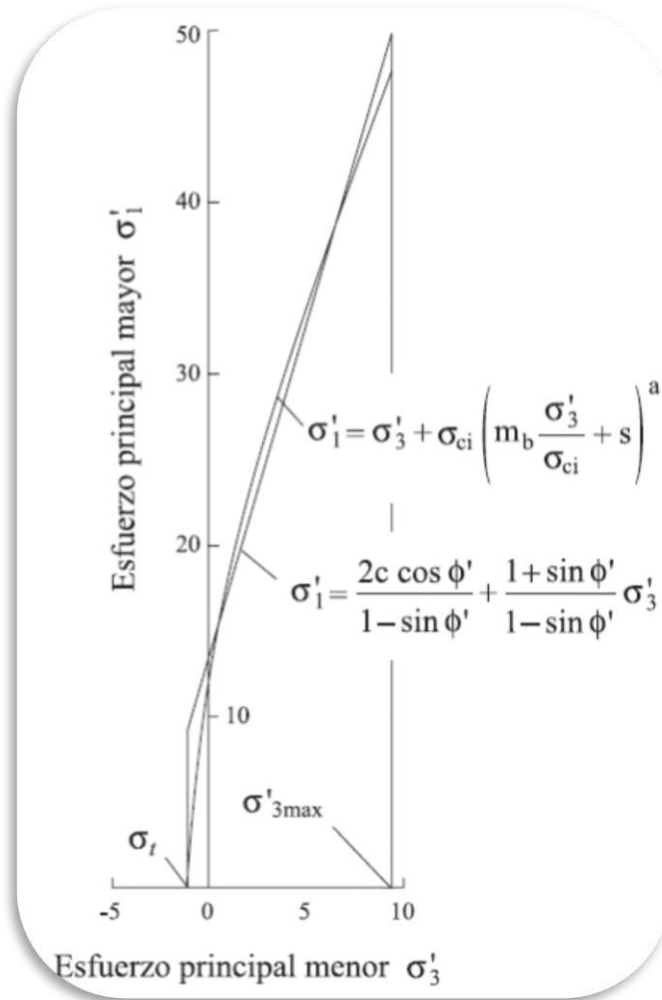
Estos valores de c' y ϕ' en la ecuación:

$$c' + \sigma' \tan \phi' \quad (15)$$

La gráfica equivalente, en términos de esfuerzos principales, menor y mayor, está definida por:

$$\sigma'_1 = \frac{2c' \cos \phi'}{1 - \sin \phi'} + \frac{1 + \sin \phi'}{1 - \sin \phi'} \sigma'_3 \quad (16)$$

Ilustración 1 Relaciones entre esfuerzos principales



Fuente. RocscienceRocLab.

En la ilustración se traslapan las relaciones entre esfuerzos principales mayores y menores para el criterio de Hoek-Brown y el equivalente de Mohr-Coulomb.

✓ RESISTENCIA DEL MACIZO ROCOSO

La resistencia a compresión uniaxial del macizo rocoso σ_{ci} está dada por la ecuación 6. La rotura se inicia en el contorno de una excavación cuando los esfuerzos introducidos en dicho contorno exceden el valor σ_{ci} . La rotura se propaga desde este punto inicial formando un campo de esfuerzos biaxial en rotura y eventualmente se estabiliza cuando la relación de esfuerzos de resistencia local, definida por la ecuación 2, resulta mayor la combinación de esfuerzos inducidos σ'_1 y σ'_3 . Muchos

modelos numéricos pueden seguir este proceso de propagación de rotura, siendo muy importante este nivel de análisis detallado cuando se trata de determinar la estabilidad de excavaciones en roca y cuando se diseñan sistemas de sostenimiento para estas excavaciones.

Además de la condición de la fracturación del macizo es útil conocer la resistencia global del mismo, Esto conduce al concepto de “resistencia del macizo rocoso” global. Hoek y Brown [14] propusieron que ésta podría estimarse a partir de la relación de Mohr-Coulomb:

$$\sigma'_{cm} = \frac{2c' \cos \phi'}{1 - \sin \phi'} \quad (17)$$

Con c' y ϕ' determinada para el intervalo de esfuerzos $\sigma_t < \sigma'_3 < \sigma_{ci}/4$. Resultando en:

$$\sigma'_{cm} = \sigma_{ci} \frac{[m_b + 4s - a(m_b - 8s)] (m_b/4 + s)^{a-1}}{2(1 + a)(2 + a)} \quad (18)$$

✓ ESTIMACIÓN DEL FACTOR DE ALTERNACIÓN D

La experiencia en el diseño de taludes en grandes rajes a cielo abierto ha mostrado que el criterio de Hoek-Brown para macizos rocosos in situ no alterados ($D = 0$) da lugar a parámetros de resistencia del macizo rocoso considerados optimistas³³. Los efectos de los intensos daños de las voladuras, así como de la relación de esfuerzos debido a la retirada del estéril de recubrimiento, provocan una alteración del macizo rocoso. Para estos macizos rocosos es más apropiado considerar propiedades “alteradas” del macizo³⁴, es decir $D = 1$ en las ecuaciones 3 y 4.

³³SOBERG, J., SHARP, J.C., and MALOREY, D.J. (2001). Slope stability at Aznalcóllar. Slope stability in surface mining. (Eds. W. A. Hustrulid, M. J. McCarter and D.J.A. Van Zyl). Littleton: Society for Mining, Metallurgy and Exploration, Inc., 183-202. (30 septiembre de 2016)

PIERCE, M., BRANDSHAUGG, T., and WARD, M. (2001). Slope stability assessment at the Main Cresson Mine. Slope stability in surface mining. (eds. W.A. Hustrulid, M.J. McCarter and D.J.A. Van Zyl). Littleton: Society for Mining, Metallurgy and Exploration, Inc., 239-250. (30 septiembre de 2016)

³⁴HOEK, E and BROWN, E.T. (1988). The Hoek- Brown failure criterion 1988 update. Proc. 15 th Canadian Rock Mech. Symp. (Ed. .C. Curran), 31-38. Toronto, Dept. Civil Engineering, University of Toronto. (30 septiembre de 2016)

Lorig y Varona³⁵ muestran que factores tales como el confinamiento lateral producido por los diferentes radios de curvatura de los taludes (en planta) comparados con su altura también tienen su influencia sobre el grado de alteración. Sonmez y Ulusay³⁶ analizaron retrospectivamente cinco roturas de taludes en minas de carbón a cielo abierto en Turquía e intentaron asignar factores de alteración a cada macizo rocoso basándose fundamentalmente en la evaluación de las propiedades de los macizos rocosos deducidas con el criterio de Hoek-Brown. Desgraciadamente, uno de los taludes parece estar controlado estructuralmente mientras otro consiste en un depósito de estéril desplazado. Los autores consideran que el criterio de Hoek-Brown no es aplicable a estos dos casos.

Cheng y Liu³⁷ recopilaron los resultados de análisis retrospectivos de medidas de deformación, a partir de extensómetros colocados antes del comienzo de la excavación, en la caverna de la central hidroeléctrica de Mingtan en Taiwan. Ellos encontraron que la zona dañada por las voladuras se extendía a una distancia de unos 2 m alrededor de toda la excavación. La resistencia y propiedades de deformación del macizo rocoso dañado calculadas de manera retrospectiva dan un factor de alteración equivalente $D = 0,7$.

A partir de estas referencias, está claro que sobre el grado de alteración en el macizo rocoso circundante a una excavación pueden influir un gran número de factores y que nunca es posible cuantificar estos factores de manera precisa. Sin embargo, a partir de la experiencia y del análisis de todos los detalles recogidos en estos artículos, los autores han intentado establecer unas guías para estimar el factor D , que son resumidas en la Tabla 1.


La influencia de este factor de alteración puede ser grande. Esto se ilustra con un ejemplo típico en el que $\sigma_{ci} = 50$ MPa, $m_i = 10$ y $GSI = 45$.

35 LORIG, L., and VARONA, P. (2001). Practical slope stability analysis using finite-difference codes. Slope stability in surface mining. (Eds. W.A. Hustrulid, M.J. McCarter and D.J.A. Van Zyl). Littleton: Society for Mining, Metallurgy and Exploration, Inc., 115–124. (30 septiembre de 2016)

36 SONMEZ, H., and ULUSAY, R. (1999). Modifications to the geological strength index (GSI) and their applicability to the stability of slopes. *Int. J. Rock Mech. Min. Sci.*, 36 (6), 743–760.

37 CHENG, Y., and LIU, S. (1990). Power caverns of the Mingtan Pumped Storage Project, Taiwan. In *Comprehensive Rock Engineering*. (Ed. J.A. Hudson), Oxford: Pergamon, 5, 111–132. (30 septiembre de 2016)

Tabla 1 Criterios de selección del factor de alteración D.

Apariencia del macizo rocoso	Descripción del macizo rocoso	Valor D sugerido
	<p>Excelente calidad de voladura controlada o excavación con tuneladora, TBM, con resultados de alteración mínima del macizo rocoso confinado circundante al túnel</p>	<p>$D = 0$</p>
	<p>Excavación mecánica o manual en macizos rocosos de mala calidad (sin voladuras) con una alteración mínima en el macizo rocoso circundante.</p> <p>Cuando aparezcan problemas de deformación en el piso durante el avance, la alteración puede ser severa a menos que se coloque una contrabóveda temporal, tal como se muestra en la fotografía.</p>	<p>$D = 0$</p> <p>$D = 0.5$ No invert</p>
	<p>Voladura de muy mala calidad en un túnel en roca competente con daños locales severos, extendiéndose 2 o 3 m en el macizo rocoso circundante.</p>	<p>$D = 0.8$</p>
	<p>Pequeñas voladuras en taludes de ingeniería civil dan lugar a pequeños daños al macizo rocoso, particularmente si se usan voladuras de contorno como se muestra en el lado izquierdo de la fotografía. Sin embargo la liberación de tensiones resulta en alguna alteración.</p>	<p>$D = 0.7$ Good blasting</p> <p>$D = 1.0$ Poor blasting</p>
	<p>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.</p> <p>En algunas rocas blandas la excavación puede llevarse a cabo mediante el ripado y empuje con tractores de orugas y el grado de afección a los taludes será menor.</p>	<p>$D = 1.0$ Production blasting</p> <p>$D = 0.7$ Mechanical excavation</p>

Fuente. Rocscience RocLab.(30septiembrede 2016)

Para un macizo rocoso inalterado circundante a un túnel a una profundidad de 100 m, con un factor de alteración $D = 0$, el ángulo de fricción equivalente es $\phi' = 47,16^\circ$ mientras que la resistencia cohesiva es $c' = 0,58$ MPa. Un macizo rocoso con

los mismos parámetros básicos pero en un talud frecuentemente alterado de 100 m de altura con un factor de alteración $D = 1$, tiene un ángulo de fricción equivalente al es $\phi' = 27,61^\circ$ y una resistencia cohesiva de $c' = 0,35$ MPa.

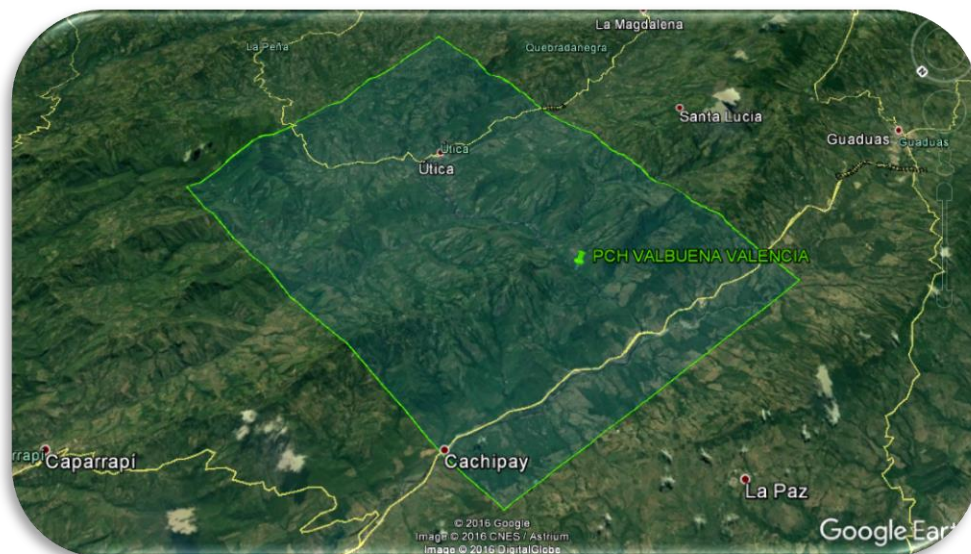
Obsérvese que éstas son solamente guías y por lo tanto se advierte al lector de que se deberán aplicar los valores dados con cautela. Sin embargo, estas guías pueden ser utilizadas para proporcionar un punto de partida realista para cualquier diseño y, si la observación o medidas registradas del comportamiento de la excavación son mejores que los previstos, los valores de alteración podrán ser ajustados a la baja.

5.2 MARCO GEOGRÁFICO

El territorio en el que se encontrará el P.H. Valbuena Valencia, se reparte actualmente entre los municipios de Útica, Guaduas y Caparrapí, las coordenadas se pueden englobar alrededor de los $5^\circ 11' 25''$ Norte y los $74^\circ 33' 20''$ Oeste.

El ámbito espacial en la zona de estudio tiene cierta homogeneidad física y climática, derivada de la altitud. Sin embargo, podemos definir el paisaje según sus características o según su adscripción a micro-unidades geológicas. Para los constructores las tierras montañosas del centro del país son visualizadas con inhabilidad de crecimiento urbano.

Ilustración 2 Geografía del PH VV



Fuente. Google Earth, $5^\circ 11' 25''$ N $74^\circ 33' 20''$ W

Estas zonas tiene un alto grado de ondulación con montañas de falda, donde la vegetación introduce sus raíces en el contacto de microfallas, cañadas encajadas en estrechas gargantas del relieve, bosques donde la luz del sol cada día penetra más debido a la deforestación y algunos caminos intransitables incluso para acceso peatonal.

5.3 MARCO DEMOGRÁFICO

Colombia es un país en el cual la mayoría de los núcleos urbanos están situados en zonas de montaña, por consiguiente sus habitantes necesitan utilizar vías que circulan entre valles y montañas para sus desplazamientos, La construcción de túneles tanto carreteros como ferroviarios optimizarán los procesos de transporte en el país, esto facilita que las poblaciones incrementen y además impacta en la preservación del medio ambiente.

Respecto al crecimiento demográfico, la población para el 2005 situada en los municipios de la zona de estudio (río Negro- Magdalena medio) en particular Útica, en el cual habitan más de 4.972 habitantes, Guaduas en el cual habitan más de 35.671 habitantes, Caparrapí con más de 16.617 habitantes.

En relación a su tamaño utica es el municipio con menor cantidad de habitantes, debido a la falta de oportunidades, en cuanto a trabajo y la reciente afectación por avalanchas, este es un municipio evidentemente rezagado en desarrollo³⁸.

En un campo de visión más amplio el proyecto pretende hacer uso del capital humano útiquence en las labores de construcción del proyecto, se crearan alternativas de empleo y posterior a la inundación del embalse se mejorará la economía del municipio, con un impacto positivo en Guaduas y Caparrapí.

5.4 MARCO LEGAL

Para crear un enfoque general de la legalidad de los proyectos hidroeléctricos, se da una descripción de las entidades que intervienen en la aprobación de la construcción y puesta en marcha del mismo como son las siguientes.

³⁸DANE, Estadísticas población Cundinamarca, Anuario población 2011 [línea].Colombia, 25 Pag. [citado 22 sept., 2016] http://www.cundinamarca.gov.co/wps/wcm/connect/9cb2f92d-f186-4688-b0e3-320e53bc7c1b/Anuario_poblacion.pdf?MOD=AJPERES

Tabla 2 Entidades que intervienen

<p>Ministerio de Minas y Energía (MME)</p>	<p>Adopta la política nacional en materia de exploración, explotación, transporte, refinación, procesamiento, beneficio, transformación y distribución de minerales e hidrocarburos, así como la política sobre generación, transmisión, interconexión, distribución y establecimiento de normas técnicas en materia de energía eléctrica, sobre el uso racional de energía y el desarrollo de fuentes alternas, y en general, sobre todas las actividades técnicas, económicas, jurídicas, industriales y comerciales relacionadas con el aprovechamiento integral de los recursos naturales no renovables y de la totalidad de las fuentes energéticas del país en concordancia con los planes generales de desarrollo.</p>
<p>Ministerio de Ambiente, Vivienda y Desarrollo Territorial (MAVDT)</p>	<p>Tiene como objetivos primordiales contribuir y promover el desarrollo sostenible a través de la formulación y adopción de las políticas, planes, programas, proyectos y regulación en materia ambiental, recursos naturales renovables, uso del suelo, ordenamiento territorial, agua potable y saneamiento básico y ambiental, desarrollo territorial y urbano, así como en materia habitacional integral. En especial orienta la adopción de criterios de sostenibilidad en la gestión de los sectores productivos e institucionales, procurando la incorporación de sistemas de gestión ambiental, reconversión tecnológica y el cambio en los patrones de consumo.</p>
<p>Departamento Nacional de Planeación (DNP)</p>	<p>Es una entidad eminentemente técnica que impulsa la implantación de una visión estratégica del país en los campos social, económico y ambiental, a través del diseño, la orientación y evaluación de las políticas públicas colombianas, el manejo y asignación de la inversión pública y la concreción de las mismas en planes, programas y proyectos del Gobierno. Debe entenderse que las políticas del Sector energético están en concordancia con las políticas macro definidas por el DNP.</p>

Ministerio del Interior y Justicia	Es el responsable de coordinar la atención integral del Estado a los Asuntos Políticos, para el fortalecimiento de nuestra democracia y de la Justicia, para proteger los derechos fundamentales de los ciudadanos. Se involucra en temas de participación pública en torno a los proyectos de energía.
Comisión Reguladora de Energía (CREG)	Su misión es regular los servicios públicos domiciliarios de energía eléctrica y gas combustible de manera técnica, independiente y transparente, promoviendo el desarrollo sostenido de estos sectores, regulando los monopolios, incentivando la competencia donde sea posible y atendiendo oportunamente las necesidades de los usuarios y las empresas de acuerdo con los criterios establecidos en la Ley.
Unidad de Planeación Minero Energético (UPME)	Tiene por objetivo planear en forma integral, indicativa, permanente y coordinada con las entidades del sector minero energético, tanto entidades públicas como privadas, el desarrollo y aprovechamiento de los recursos energéticos y mineros, y producir y divulgar la información minero energética requerida.
Corporaciones Autónomas Regionales (CAR)	Las CAR son las encargadas por la Ley de administrar dentro del área de jurisdicción, el medio ambiente y los recursos naturales renovables y propender por su desarrollo sostenible, de conformidad con las disposiciones legales y las políticas del Ministerio del Medio Ambiente.

Entidades de Control Procuraduría y Contraloría	La misión de la procuraduría es vigilar el cumplimiento de la Constitución y la Ley, promover la protección de los derechos fundamentales, el respeto de los deberes ciudadanos y proteger el patrimonio público, siendo referente de eficiencia, eficacia y valoración ética en el ejercicio de la función pública. La Contraloría General de la República (CGR) es el máximo órgano de control fiscal del Estado. Como tal, tiene la misión de procurar el buen uso de los recursos y bienes públicos y contribuir a la modernización del Estado, mediante acciones de mejoramiento continuo en las distintas entidades públicas.
Superintendencia de servicios públicos Domiciliarios	Su misión es la de vigilar y controlar la prestación de servicios públicos, proteger la competencia y los derechos de los usuarios.
XM Compañía de expertos en mercados S.A	Es una filial del grupo empresarial ISA, encargada de prestar los servicios de planeación y coordinación de la operación de los recursos del Sistema Interconectado Nacional y la administración del sistema de intercambios comerciales de energía eléctrica en el Mercado Mayorista, así como la liquidación y administración de los cargos por uso de las redes del sistema interconectado nacional. Igualmente, presta servicios especializados afines para diferentes sectores productivos del país y la región.

IDEAM	El Instituto de Hidrología, Meteorología y Estudios Ambientales de Colombia, Tiene como función generar conocimiento y producir y suministrar datos e información ambiental, además de realizar estudios, investigaciones, inventarios y actividades de seguimiento y manejo de la información que sirvan para fundamentar la toma de decisiones en materia de política ambiental y para suministrar las bases para el ordenamiento ambiental del territorio, al manejo, el uso y el aprovechamiento de los recursos naturales biofísicos del país.
Gobernaciones y Alcaldías	Los representan la Federación Colombiana de Departamentos y La Federación Colombiana de Municipios, cuya función es velar por el fortalecimiento de los mismos.
Senadores	Expide las Leyes, ejerce las funciones de Control Político, Público, Judicial y Electoral, las Protocolarias y Administrativas, observando los principios consagrados en la Constitución Política de Colombia y las leyes, dentro de un marco de justicia social y bien común.
EPGTE	Las empresas Privadas encargadas de generación y transmisión, con base en el sistema de planificación, las empresas privadas operan los proyectos de generación y transmisión con base en las leyes colombianas.
Organizaciones no Gubernamentales	Existen diversas ONG que procuran velar por el desarrollo sostenible y los derechos humanos. Sus funciones pueden ser de apoyar en proyectos, compartir información relevante, hacer un llamado de atención sobre procesos entre otras.

Fuente. Compilación

6 DISEÑO METODOLÓGICO

6.1 ENFOQUE DE INVESTIGACIÓN

Para la modelación técnica de proceso constructivo de caverna para casa de máquinas para el P.H. Valbuena Valencia en los municipios Útica, Guaduas y Caparrapí en Cundinamarca, el enfoque investigativo es de tipo mixto, que consiste en la integración de los enfoques cuantitativo y cualitativo, partir de los elementos que integran la investigación.

Una parte del estudio comprende análisis de datos numéricos, por medio de la determinación de factores geológicos y la calificación numérica de las diferentes condiciones geo-mecánicas del macizo rocoso, así también las variables que contiene el estudio geotécnico, para dar respuesta a la pregunta de investigación y verificar la propuesta mencionada.

Otra parte de la presente investigación es de tipo cualitativo porque se describió las observaciones y datos conceptuales referentes a la clasificación de macizos rocosos y las consideraciones analíticas de todos los componentes.

6.2 TIPO DE INVESTIGACIÓN

La presente investigación fue de indole científico-exploratoria, durante su ejecución se examinó el macizo rocoso que hasta entonces no se había estudiado, con visión de ampliar la información que se tiene sobre el terreno, así se produjo un panorama más objetivo de este escenario.

Además la presente investigación comprende procedimientos rigurosos y lógicos que permiten la adquisición de conocimiento a partir de la explicación de fenómenos, creando relaciones y deduciendo el comportamiento del macizo como un medio continuo.

6.3 FASES DE LA INVESTIGACIÓN

Tabla 3 Fases de la investigación

Fase 1	Se determinó la localización de las casas de máquinas (caverna). Se desarrolló un estudio de interpretación de la zona a nivel cartográfico, el componente geomorfológico correspondiente a la orografía, por ende la ubicación y dimensión de la estructura de retención (presa), en esta fase se identificó la trayectoria del flujo y el lugar idóneo para ubicar las casas de máquinas (Cavernas).
Fase 2	Se caracterizó el macizo rocoso en el cual estarán inmersas las casas de máquinas, se analizó la litología en la zona de estudio, se describió la estructura geológica del macizo, la alteración, con la ayuda de modelo de elementos finitos y la hidrogeología mediante inspección visual en los alrededores de este.
Fase 3	Se analizó el comportamiento geo-mecánico del macizo rocoso donde se construirá la casa de máquinas. Se analizaron los factores que intervienen en la construcción de las cavernas, dando a conocer información para precisar el comportamiento del macizo respecto de la geomorfología resultante luego de la alteración antrópica del mismo.

Fuente. Elaboración propia

6.4 INSTRUMENTOS Y TÉCNICAS DE RECOLECCIÓN DE LA INFORMACIÓN.

Las técnicas de recolección de la información, son técnicas objetivas teóricas, debido a que la propuesta comprende el estudio teórico reciente sobre el tema y la actualización de información científica sobre la infraestructura de cavernas en el mundo, esta es una propuesta desarrollada con base en proyectos de referencia y la indagación de aspectos puntuales que permiten originar nuevas hipótesis enfocadas en aspectos experimentales.

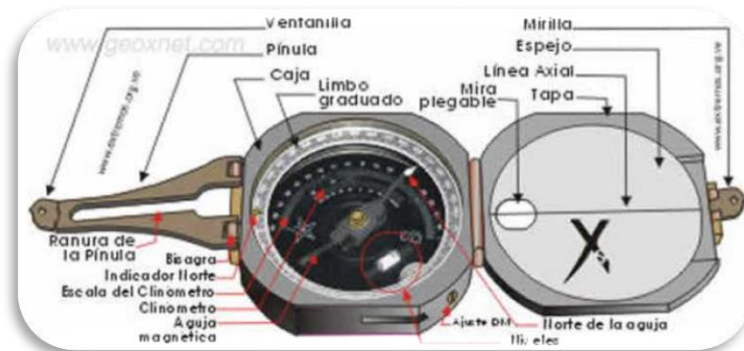
6.4.1 Materiales y equipos

Para la presente investigación se requirió una computadora especializada en la producción de modelos de elementos finitos, artefactos para estudio de campo, el acceso a material bibliográfico, y el uso de software especializado.

6.4.2 Instrumentos

6.4.2.1 Brújula de geología

Ilustración 3 Brújula Brunton estándar Geo, usada en ingeniería geológica



Fuente: post.geoxnet.com/blog/uso-de-la-brujula-modelo-brunton/ (30 Noviembre de 2016)

Este instrumento posee una aguja imantada que se dispone en la dirección de las líneas de magnetismo natural de la Tierra. A diferencia de la mayoría de las brújulas modernas, el tránsito de bolsillo Brunton utiliza amortiguación de inducción magnética en lugar de líquido para amortiguar la oscilación de la aguja orientadora. Se usa principalmente para medir orientaciones geográficas, triangular una ubicación, medir lineaciones estructurales, planos y lugares geométricos de estructuras geológicas.

6.4.2.2 Ordenador especializado

Ilustración 4 Ordenador alien Dell



Fuente: <http://www.muycomputer.com/2013/06/11/dell-alienware-haswell/> (30septiembrede 2016)

Fue necesario el uso de un ordenador que cumpliera con las especificaciones mínimas que exigen los softwares de modelación, cuyas características específicas son procesador, memoria RAM, memoria gráfica.

6.4.3 Softwares

6.4.3.1 TGM. Terrain Geometry Maker

Ilustración 5 Icono de software TGM



Fuente. http://manual.midasuser.com/en_common/GTS%20NX/100/GTS_NX/Geometry/Tools/Terrain_Geometry.htm (1° de Octubre 2016)

La función Terrain Geometría Maker (TGM) se puede utilizar para modelar una geometría del terreno mediante un archivo CAD DXF. Al utilizar GTS NX, Se origina primero el archivo CAD DXF para establecer los límites del área de análisis y guardarlo como un archivo (* .tms formato) que se puede utilizar en el GTS NX. La modelación del terreno en relieve es práctica y con base en ella se establece la frontera de los elementos finitos que conformaran el medio continuo del macizo rocoso.

6.4.3.2 RocLab. Rocscience

Ilustración 6 Icono de software RocLab



Fuente. https://www.rocscience.com/images/RocData_64px.png (1° de Octubre de 2016)

RocLab es un programa de software para determinar los parámetros de resistencia de la masa de roca, basado en la última versión del criterio general de falla de Hoek-Brown. El software proporciona una implementación sencilla e intuitiva Hoek-Brown,

lo que permite a los usuarios obtener fácilmente estimaciones fiables y visualizar los efectos de cambiar los parámetros de falla de masa de roca en condición intacta.

6.4.3.3 Dips. Rocscience

Ilustración 7 Icono de software Dips.



Fuente. https://www.rocscience.com/images/Dips_64px.png (1° de Octubre de 2016)

Dips está diseñado para el análisis interactivo de datos geológicos basados en la orientación. El programa es capaz de ejecutar varias aplicaciones y está diseñado para el usuario principiante u ocasional y para el usuario experimentado en proyección estereográfica que desea utilizar herramientas más avanzadas en el análisis de datos geológicos.

Este software permite al usuario analizar y visualizar datos estructurales siguiendo las mismas técnicas utilizadas en los métodos estereográficos manuales. Además, tiene muchas características computacionales, como el contorno estadístico del agrupamiento de orientación, la orientación media y el cálculo de la confianza, la variabilidad de los grupos, el análisis cinemático y el análisis cualitativo y cuantitativo de los atributos correspondientes al comportamiento mecánico.

6.4.3.4 Unwedge. Rocscience

Ilustración 8 Icono software Unwedge.



Fuente. https://www.rocscience.com/images/UnWedge_64px.png (1° de Octubre de 2016)

Es un programa de análisis de estabilidad 3D y visualización para excavaciones subterráneas en roca que contienen discontinuidades estructurales que se cruzan. Los factores de seguridad se calculan para las cuñas potencialmente inestables y

los requisitos de soporte se pueden modelar usando varios tipos de patrón y fijación al azar y concreto proyectado. Se utiliza Unwedge para crear rápidamente un modelo, realizar un análisis de factor de seguridad, reforzar el lugar e interpretar los resultados.

La interfaz basada en Windows de Unwedge proporciona un entorno gráfico fácil de usar para la entrada y visualización de datos que simplifica en gran medida el proceso de análisis y diseño. Las ventanas emergentes permiten una entrada y modificación sencillas de los parámetros del modelo, y las herramientas de edición fáciles de usar proporcionan un método conveniente para realizar estudios paramétricos. El intérprete de datos gráficos proporciona un rico conjunto de herramientas, incluida la animación 3D, para la conveniente visualización de las cuñas que rodean la excavación.

6.4.3.5 Midas GTS NX

Ilustración 9 Logo del software Midas GTS NX.



Fuente: <http://bowerbirding.com/wp-content/uploads/2015/07/Setup1.bmp> (1° de Octubre de 2016)

GTS NX es un paquete completo de software de análisis de elementos finitos que está equipado para manejar toda la gama de aplicaciones de diseño geotécnico incluyendo fundaciones profundas, excavaciones, sistemas complejos de túneles, análisis de filtración, análisis de consolidación, diseño de terraplenes, análisis dinámico y de estabilidad de taludes. GTS NX también tiene una plataforma de modelado amigable para el usuario que permite niveles de precisión y eficiencia sin precedentes.

Consisten en una amplia gama de modelos de contorno, hojas de cálculo y gráficos. GTS NX cuenta con una nueva función innovadora que le permite generar informes en formato PDF directamente desde el menú de resultados de post-procesado del programa. Esta característica elimina la necesidad de utilizar tediosamente la pantalla de impresión o copiar y pegar funciones para generar informes en documentos de Word. Las funciones de extracción de resultados le permiten seleccionar perfectamente el modelo de contorno 3D de interés, modificar el tamaño

y el ángulo de visualización y añadir notas, dimensiones y gráficos y hojas de cálculo correspondientes según sea necesario.

6.5 OPERACIONALIZACIÓN DE LAS VARIABLES

Tabla 4 Tipo de variables

	VARIABLE	INDICADOR	DESCRIPCION	UNIDAD
Independientes	Resistencia a la compresion incomfnada de la matriz de roca	σ_{ci}	esfuerzo maximo de resistencia, se mide en probetas de roca sin confinar	Pa
	Geotechnical Strenght Index	GSI	permite la interpretacion de dos factores, estructura de la roca y condiciones de la superficie del bloque	adimensional
	Factor de alteración	D	brinda una persepcion de cuanto esta alterado el macizo calificando este de 0 a 1, en cuanto aumenta el indice se infiere que la alteracion aumenta	adimensional
	Constante de la matriz rocosa	m_i	parametro dependiente de las propiedades de la matriz rocosa	adimensional
	Discontinuidad	α, β	azimut y buzamiento del plano	grados (°)
	seccion de excavacion	Ae	area excavable posible en un bloque antes de aplicar el sostenimiento	depende de la cuña en estudio (m ²)
Dependientes	valor reducido de m_i	m_b	$m_b = m_i \exp\left(\frac{GSI - 100}{28 - 14D}\right)$	adimencional
	constante del macizo rocoso	s	$s = \exp\left(\frac{GSI - 100}{9 - 3D}\right)$	adimencional
	constante del macizo rocoso	a	$a = \frac{1}{2} + \frac{1}{6}\left(e^{-GSI/15} - e^{-20/3}\right)$	adimencional
	Módulo de deformación de la matriz rocosa	E_m	define la relación lineal elástica entre el esfuerzo aplicado y la deformación producida en la dirección de aplicación del esfuerzo	Pa
	tamaño de bloques	V	Volumen real intrinseco en la masa de roca	m ³
Intermedias	deformaciones	δ	Desplazamientos relativos al interior del macizo, cuando la presion interna disminuye	m
	empujes	σ	estado de esfuerzos	Pa
	sostenimiento	S,L, ϕ ,	comprende el espaciamento, longitud y diametro de las barras o tendones	m

Fuente. Elaboración propia

7 RESULTADOS Y ANALISIS

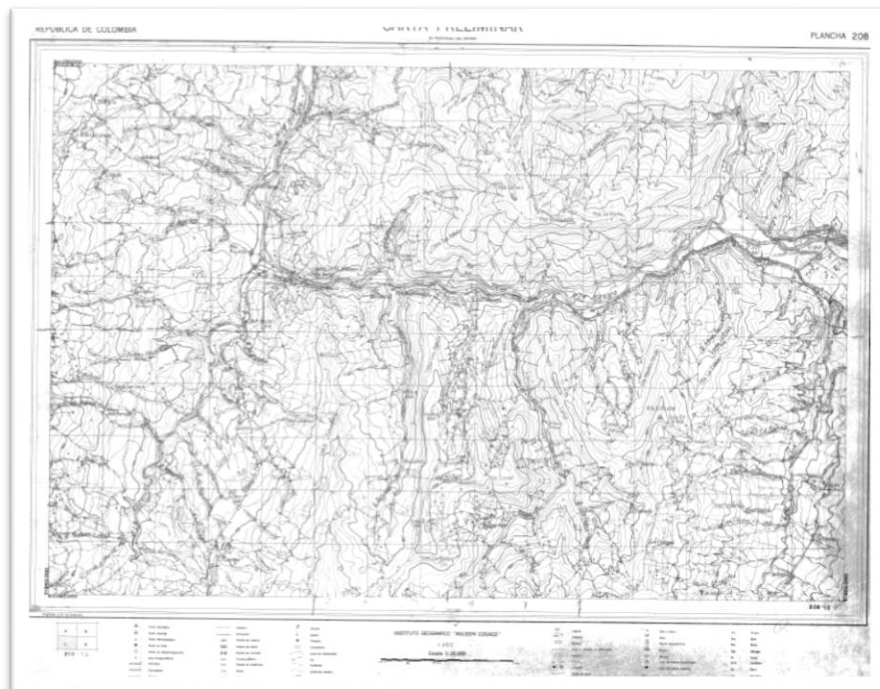
7.1 INTERPRETACIÓN DE LA ZONA A NIVEL CARTOGRÁFICO

La zona de estudio fue identificada durante la ejecución del POMCA del río Guaduro, en el cual se desarrolló la caracterización de parámetros morfométricos de la cuenca y fue necesario solicitar las planchas cartográficas de la zona en el instituto geográfico Agustín Codazzi IGAC, para ello se analizó la orografía del terreno, fue así como se identificó la factibilidad de reserva del recurso hídrico.

7.1.1 Registro cartográfico del instituto geográfico Agustín Codazzi

La cartografía de detalle topográfico obtenida en el instituto Agustín Codazzi reveló un pronunciado cañón que en algunos tramos de su trayectoria alcanza los 200m de altura.

Ilustración 10 Plancha 208-I-C IGAC.



Fuente. IGAC, Instituto geográfico Agustín Codaci. (15 de Septiembre 2014)

7.1.2 Vista real a escala (Google EARTH)

Para interpretar la magnitud del área de influencia se observó en comparación con el departamento de Cundinamarca, se hizo el reconocimiento a gran escala de la localización del proyecto hidroeléctrico.

Ilustración 11. Vista superior, localización de la zona de estudio



Fuente. Google Earth.(5 de Septiembre de 2016)

En la siguiente ilustración observada el área a menor escalase demarcola zona de influencia con un polígono en Google Earth, para la identificación delos municipios proyectados en los impactos del proyecto.Esta es una visualización general:

Ilustración 12. Vista en perspectiva norte-sur de la zona de estudio



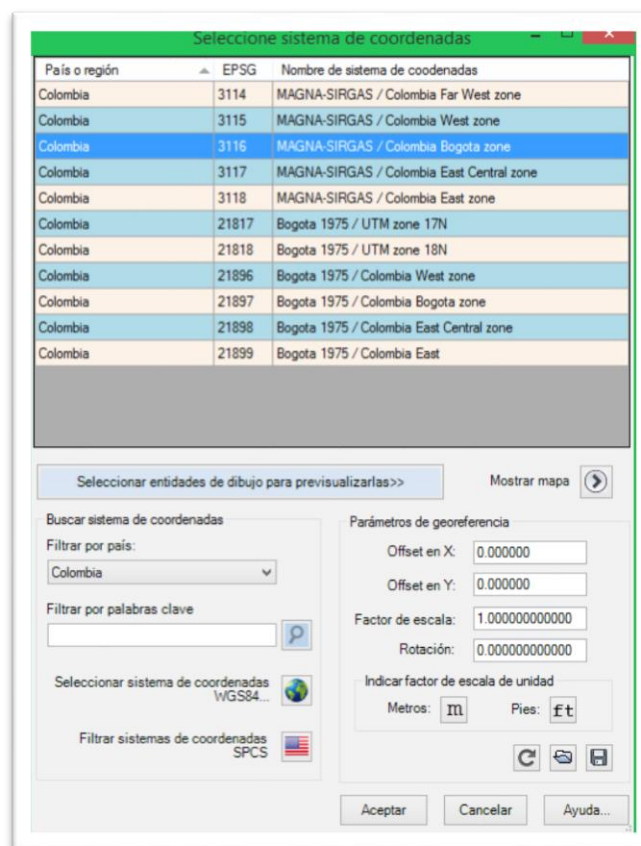
Fuente. Google Earth (7 de Septiembre de 2016)

El impacto prioritario se observó para el municipio Utica, en segunda instancia y con influencia directa del proyecto se observaron los municipios Caparrapí y Guaduas, los demás como Cachipay, La Magdalena, Santa Lucia y La Paz son veredas, cuyos impactos deben ser identificados en estudios posteriores desarrollados por entidades que pretendan invertir en el desarrollo del potencial hidroenergético.

7.1.3 Componente geo-morfológico correspondiente a la orografía

Se creó un modelo realista programando el software CAD para el desarrollo de modelado a partir del sistema de coordenadas MAGNA SIRGAS-Colombia, Bogotá zone. Para ejecutar dicho modelo se trasladaron las coordenadas en la interfaz del software, se puede dar un vistazo a continuación.

Ilustración 13 Sistema de coordenadas MAGNA SIRGAS trasladadas en AutoCAD.

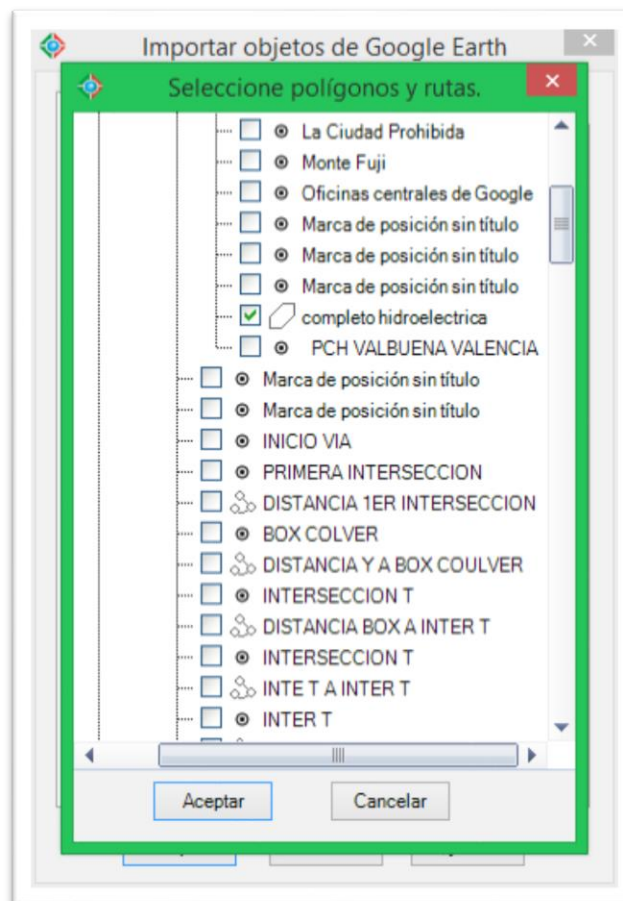


Fuente. Interfaz de software. (7 de Septiembre de 2016)

Posterior al traslapo de coordenadas, se importó de Google Earth, para ubicar el proyecto en el sistema de coordenadas métricas en CAD, la precisión que se adquiere es de carácter satelital y el error máximo fue de 5 m respecto al eje gravitacional y a los ejes planos.

La percepción del error se afirma a partir del error máximo típico que se obtiene desde un equipo de posicionamiento global Gramin utilizado en estudios topográficos cuando este se configura para trabajar en el mismo sistema de coordenadas MAGNA SIRGAS.

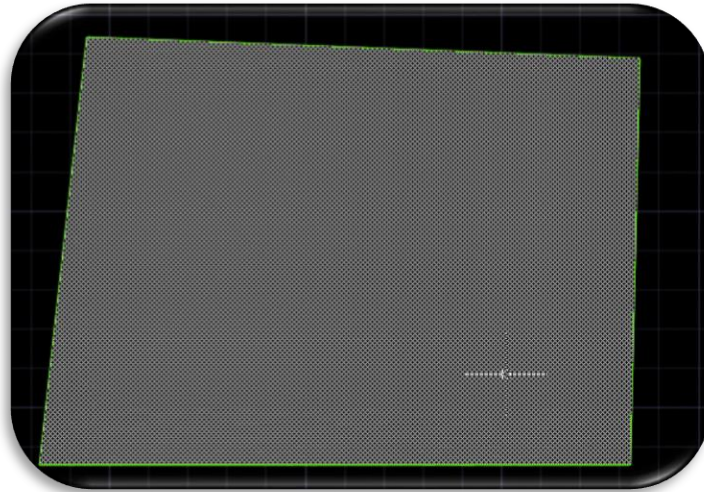
Ilustración 14 polígono importado de la base de datos Google Earth



Fuente. Interfaz de software. (7 de Septiembre de 2016)

El software proyectó una malla muy fina (10x10)m que sirvió para la edición posterior de la topografía aproximada de la zona de estudio, así se muestra a continuación.

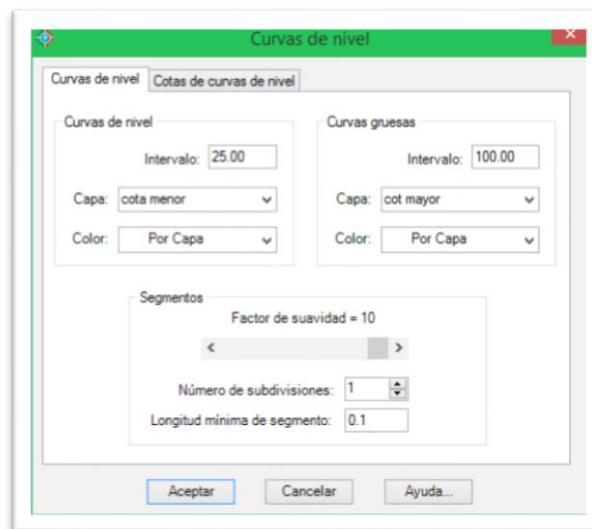
Ilustración 15 se digitalizó la malla topográfica.



Fuente. Elaboración propia en CAD. (7 de Septiembre de 2016)

Se procedió con la creación de las curvas de nivel para hacer el reconocimiento altimétrico de la región, se asignó el delta entre curvas gruesas de 100 metros y entre curvas de nivel intermedias cada 25 metros.

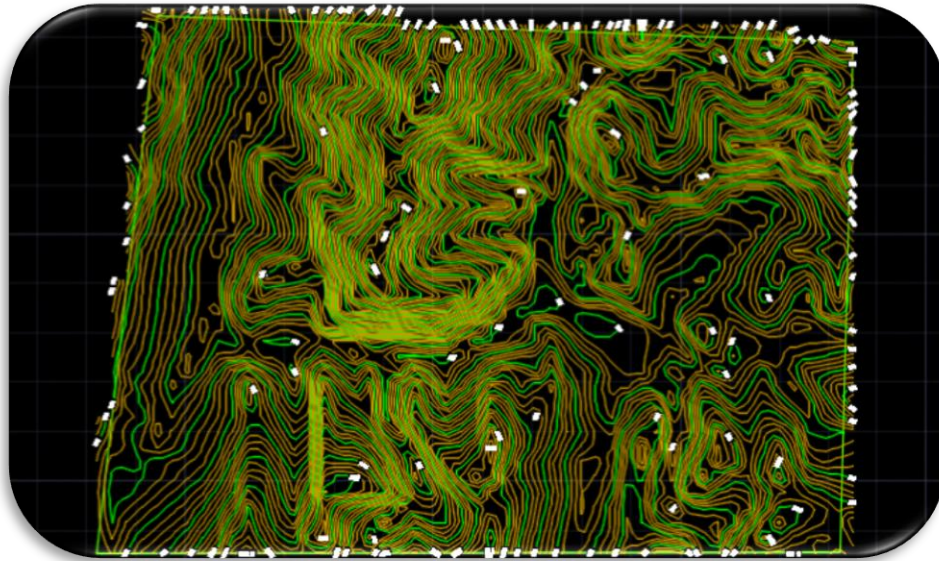
Ilustración 16 Parámetros de nivelación



Fuente. Interfaz de software. (7 de Septiembre de 2016)

Se obtuvo el modelo en planta de la topografía del área de influencia.

Ilustración 17 Modelado de curvas de nivel, delta 25m, cota min: (425 msnm), cota máx. (1700msnm)



Fuente. Elaboración propia en CAD.(7 de Septiembre de 2016)

Se traslapó sobre la imagen georreferenciada de Google Earth.Para reconocer el alcance de la inundación.

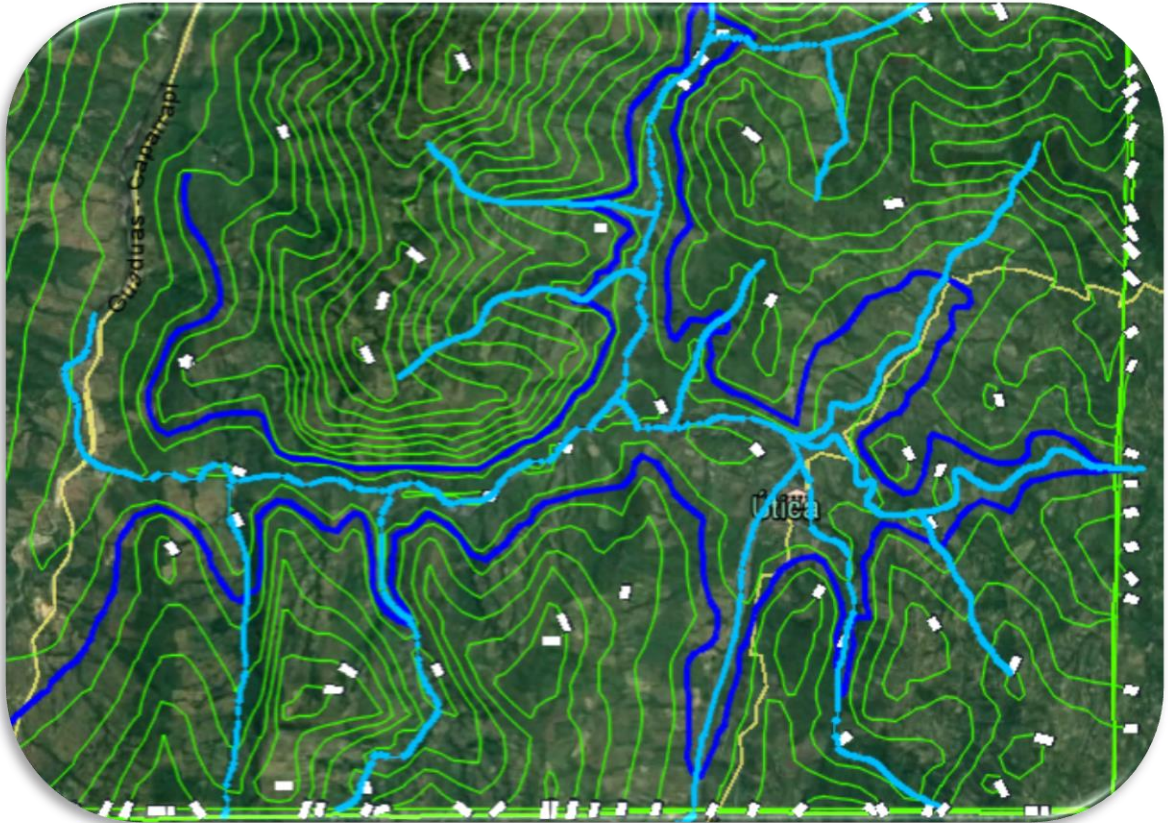
Ilustración 18 proyección del área de inundación polígono azul.



Fuente. Elaboración propia en CAD.(15 de Septiembre de 2016)

Posteriormente se identifican los afluentes que proporcionan el fluido para el llenado del embalse y se indagaron sus caudales medios.

Ilustración 19 Modelo (cauces inmediatamente influenciados).

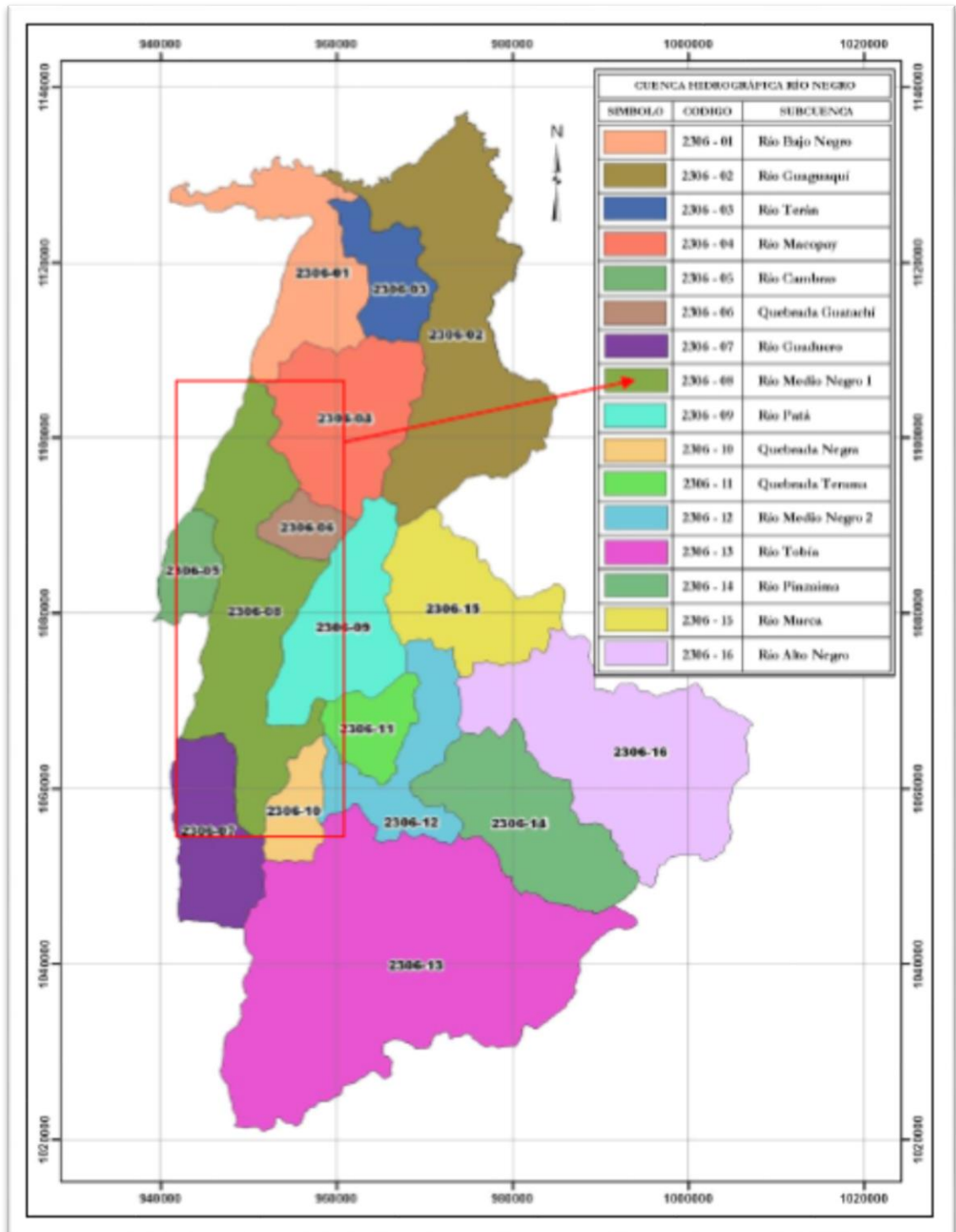


Fuente. Elaboración propia en CAD.(15 de Septiembre de 2016)

Luego de identificados los afluentes se procedió con la identificación y así a partir de registros aportados por la corporación autónoma regional CAR, obtener los caudales medios que suministran la vertientes.

En el reconocimiento de la división en subcuencas que aplica para la zona de estudio, se interpretó el mapa de distribución y localización subcuencas Río Medio Negro 1, se identifica por color.

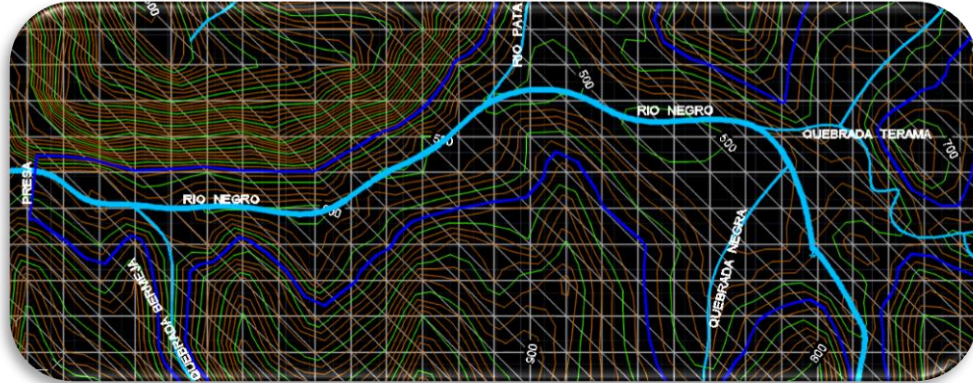
Ilustración 20 Distribución y localización subcuentas Río Medio Negro 1



Fuente. CAR. Diagnostico cuenca río Negro, Delimitación y localización de las cuencas río medio negro 1 informe pomca-001 ut.Pdf.(21 de Septiembre de 2016)

En la siguiente ilustración se muestra la identificación de cada vertiente.

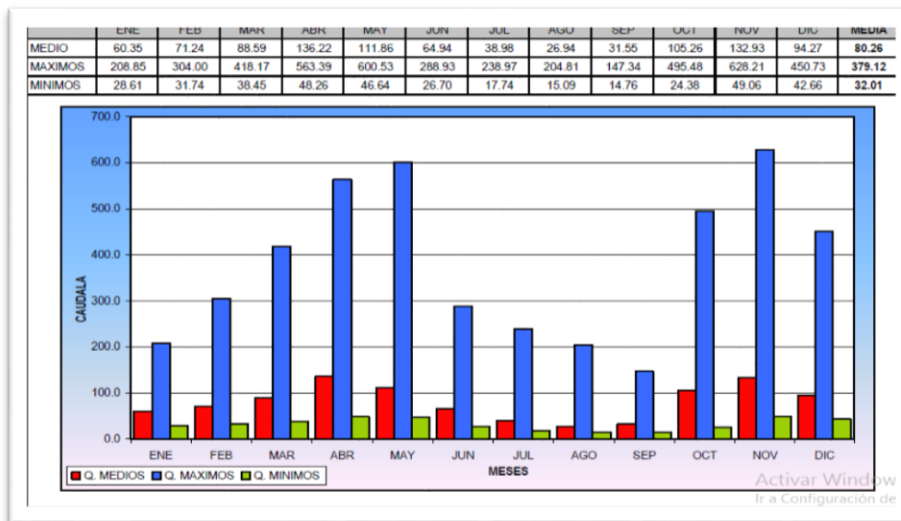
Ilustración 21 Afluentes con afectación directa y subcuencas de aporte



Fuente. Elaboración propia(21 de Septiembre de 2016)

La investigación para el desarrollo del proyecto enfatiza sobre el comportamiento de la zona del río medio Negro 1 debido a que los caudales definitivos del proyecto son los que se registran en esta zona. Un registro que muestra el cambio de caudal anualmente, aplica para el sector donde se proyectó construir la estructura de retención (Presa), como se ve en la ilustración.

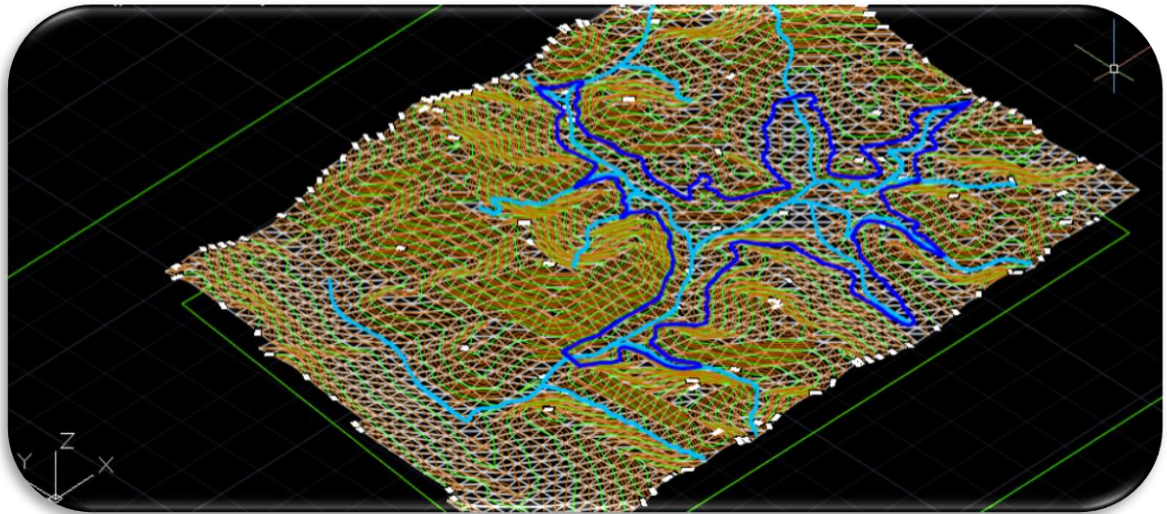
Ilustración 22 Histograma valores de caudales medios mensuales estación colorados - Río Medio Negro 1 (m³/s)



Fuente.CAR. Diagnostico cuenca río Negro, Delimitación y localización de las cuencas río medio negro 1 informe pomca-001 ut.Pdf.(21 de Septiembre de 2016)

De la ilustración anterior de la CAR, se analizó la información, el caudal mínimo para el llenado del embalse en cualquier tiempo t durante el año es de $32.10 \text{ m}^3/\text{s}$, y el caudal medio para cualquier tiempo t durante el año es de $80.26 \text{ m}^3/\text{s}$. en la siguiente ilustración el alcance de la inundación.

Ilustración 10 Perspectiva de llenado del embalse



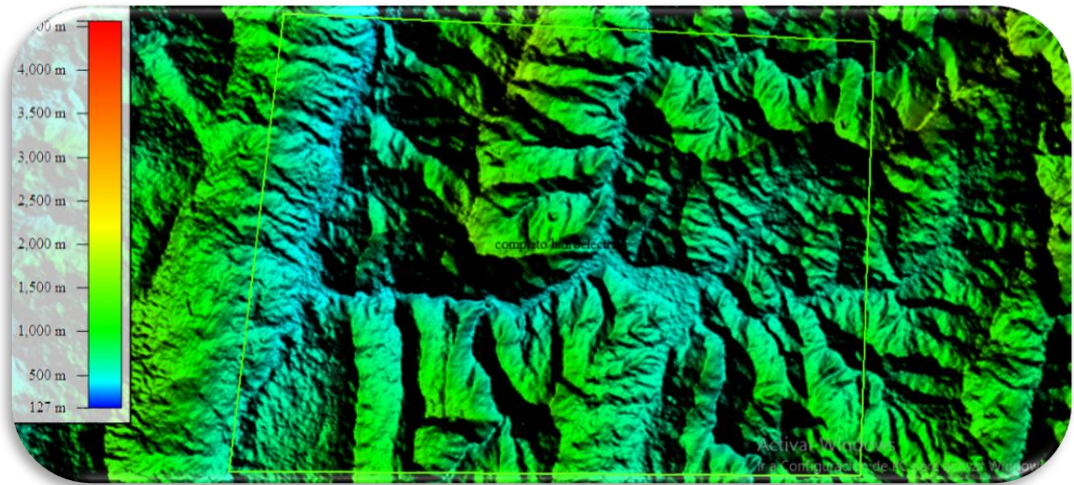
Fuente. Elaboración propia AutoCAD.(28 de Septiembre de 2016)

Se estimó un área aproximada de $3006,75 \text{ Ha}$. que equivale aproximadamente a $30'067.564,36 \text{ m}^2$. Con la Identificación del área de lámina de agua del proyectado embalse, se estimó el volumen de almacenamiento aproximado a criterio del investigador, partiendo de que la altura máxima de la lámina de agua se estimó de 150 m , con inclinaciones en contorno que reducen en una cuarta parte el volumen ideal. El almacenamiento calculado fue de $3.382'600990,77 \text{ m}^3$, es decir $3382,601 \text{ Ha}^3$.

A partir de la información anterior se procedió a calcular el tiempo máximo que demoraría el llenado del embalse, teniendo en cuenta el caudal mínimo, se estimó en $3,3985$ años. Teniendo en cuenta caudal medio de $82.26 \text{ m}^3/\text{s}$, se estimó que con las condiciones actuales demoraría $1,1$ años almacenar 3.3 km^3 del fluido.

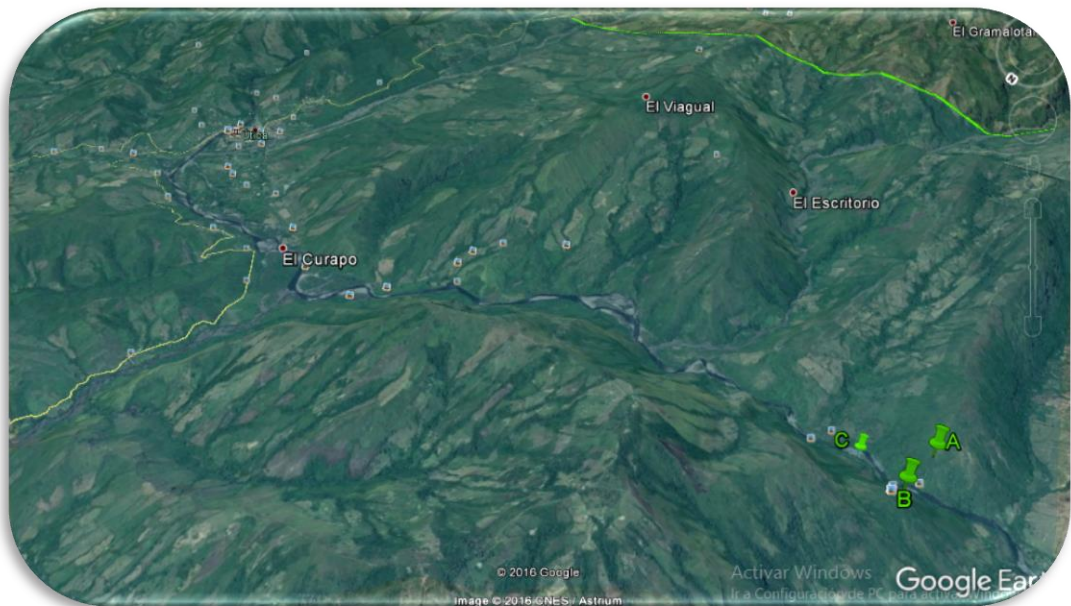
Es posible tener una visión futura de la inundación, utilizando un software de modelado sencillo para obtener el detalle cromático de toda el área de estudio, la ilustración muestra el fondo del embalse y las elevaciones del terreno.

Ilustración 23 Relieve en detalle cromático



Fuente. Elaboración propia Global Mapper.(28 de Septiembre de 2016)

Ilustración 24 Presa

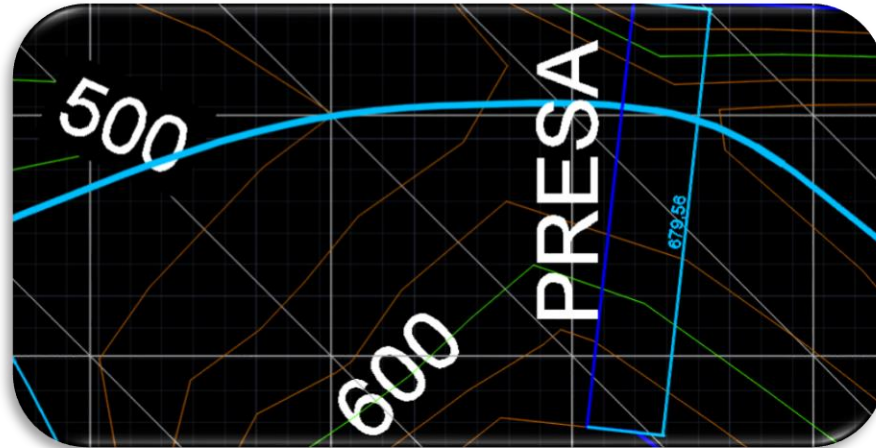


Fuente. Google Earth.(2 de Octubre de 2016)

Se estudió el sitio de retención del flujo, identificando así los parámetros morfo métricos de la presa, cuya elevación máxima será 650 msnm, y la altura de la

estructura será de 150 m, la longitud en la cresta que tendrá la estructura se proyectó de 680 m aproximadamente, a continuación se muestra en planta:

Ilustración 25 Longitud de presa en la zona más alta

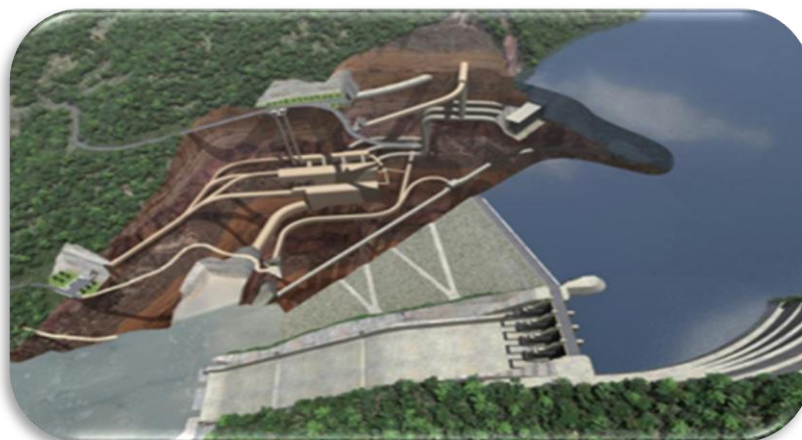


Fuente. Elaboración propia AutoCAD.(2 de Octubre de 2016)

7.1.4 Localización de las casas de máquinas (Caverna)

En la ilustración se muestra una visualización en tres dimensiones del proyecto hidroeléctrico Sogamoso, este tipo de esquemas detallados no hacen parte del estudio realizado para el proyecto hidroeléctrico Río Negro Valbuena Valencia.

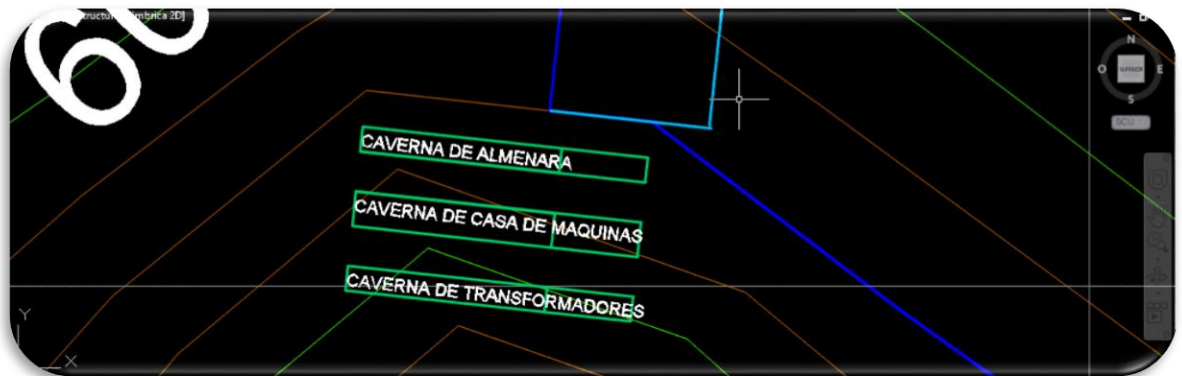
Ilustración 26 Proyecto hidroeléctrico Sogamoso



Fuente. Tomado de Isagem energía productiva. (2 de Octubre de 2016)

Entonces, luego de conocer los parámetros y la localización de la estructura de retención se modelo la ubicación de la caverna para casa de máquinas. Con base en la observación del proyecto hidroeléctrico Sogamoso, y los antecedentes del proyecto hidroeléctrico Ituango, se asignó la ubicación de la caverna de máquinas en el flanco sur de la presa. La cual se muestra en la siguiente ilustración.

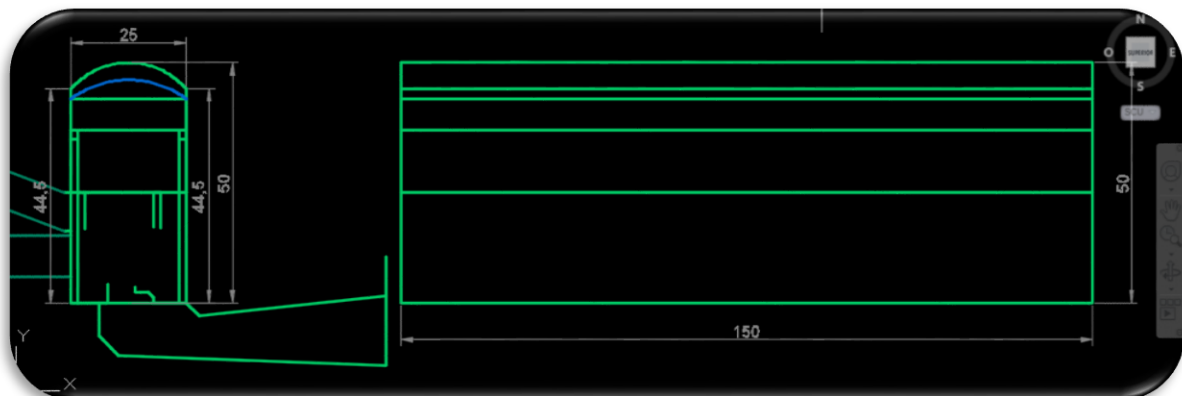
Ilustración 27 Cavernas al costado sur del lugar de retención de las aguas



Fuente. Elaboración propia CAD.(2 de Octubre de 2016)

Las dimensiones de las cavernas están en función de la capacidad hidráulica del embalse, la capacidad hídrica de los cauces puesta su rehabilitación y del potencial hidroenergético, a continuación se muestra la caverna principal.

Ilustración 28 Dimensiones de la casa de máquinas vista frontal y lateral



Fuente. Elaboración propia CAD.(2 de Octubre de 2016)

7.1.5 Morfo-geología del macizo para casa de maquinas

En una de las visitas de campo se encontró un afloramiento antrópico en el cual se observó una variación de la alteración de la roca desde el horizonte orgánico hacia la profundidad.

Ilustración 29 Afloramiento antrópico del macizo rocoso estudiado



Fuente. Elaboración propia, fotografía tomada en la zona de estudio. (23 de abril de 2016)

Se realizaron los análisis necesarios a partir del reconocimiento en campo y de parámetros típicos previamente adquiridos para obtener las características del macizo rocoso.

En la siguiente tabla se muestra el registro de la orientación de las discontinuidades mediante azimut y buzamiento. Estas se identificaron por número.

Tabla 5 Registro de discontinuidades

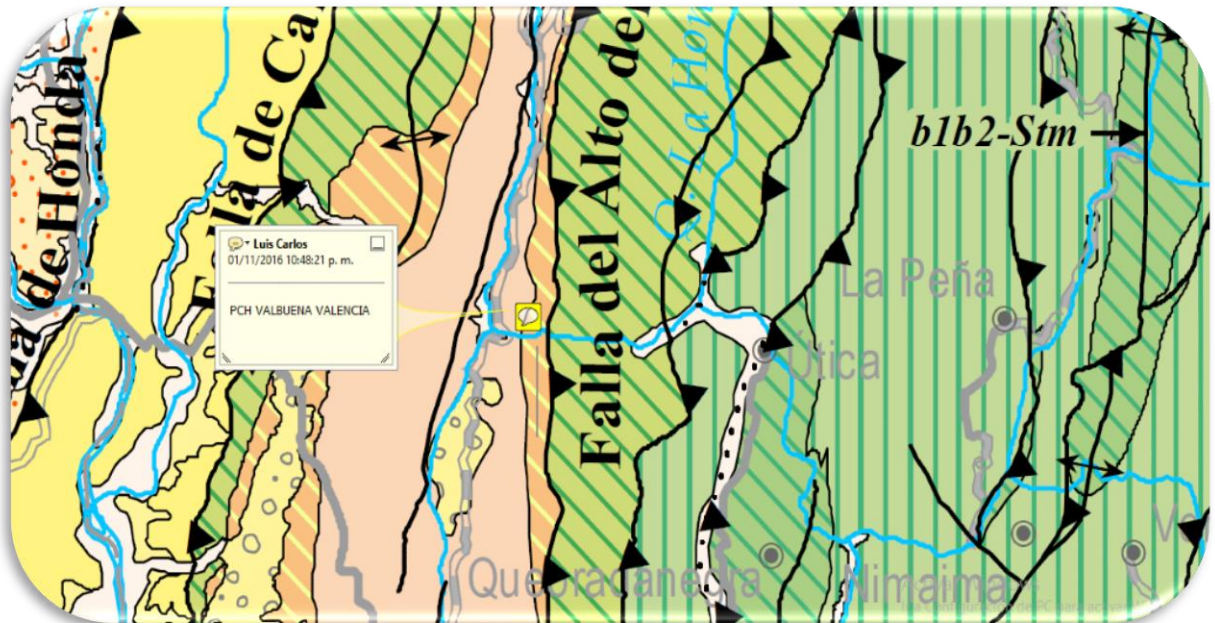
#	α	β
1	124	45
2	65	7
3	150	66
4	320	47
5	7	76

Fuente. Elaboración Propia.(24 de abril de 2016)

7.1.5.1 Caracterización geotécnica

La caracterización geotécnica consistió en determinar la composición y propiedades mecánicas, físicas e hidráulicas del terreno en el que se implantará la caverna.

Ilustración 30 Geología de la zona de estudio para PCH Valbuena Valencia



Fuente. Mapa Geológico Colombiano, SGC. (23 de abril de 2016)

Teniendo en cuenta la ubicación se indago sobre el depósito geológico presente en la zona.

Ilustración 31 Tipo de material presente en el macizo



Fuente. Mapa Geológico Colombiano, SGC.(23 de abril de 2016)

Es la composición más acertada con una arenisca conglomerada tal como se observa en la fotografía del macizo.

7.1.5.2 Propiedades físicas de la roca.

Las propiedades físicas típicas que se presentan en las areniscas.

Tabla 6 Valores típicos de peso específico, porosidad y permeabilidad de las rocas

CUADRO 3.2

Valores típicos del peso específico y porosidad de las rocas

Roca	Peso específico (g/cm ³)	Porosidad (%)
Andesita	2,2-2,35	10-15
Anfibolita	2,9-3,0	—
Arenisca	2,3-2,6	5-25 (16,0)
Basalto	2,7-2,9	0,1-2
Caliza	2,3-2,6	5-20 (11,0)
Carbón	1,0-2,0	10
Cuarcita	2,6-2,7	0,1-0,5
Creta	1,7-2,3	30
Diabasa	2,9	0,1
Diorita	2,7-2,85	—
Dolomía	2,5-2,6	0,5-10
Esquisto	2,5-2,8	3
Gabro	3,0-3,1	0,1-0,2
Gneiss	2,7-3,0	0,5-1,5
Granito	2,6-2,7	0,5-1,5 (0,9)
Grauvaca	2,3	3
Mármol	2,6-2,8	0,3-2 (0,6)
Lutita	2,2-2,6	2-15
Pizarra	2,5-2,7	0,1-1
Riolita	2,4-2,6	4-6
Sal	2,1-2,2	5
Toba	1,9-2,3	14-40
Yeso	2,3	5

Entre paréntesis algunos valores medios de porosidad eficaz.
 Datos seleccionados a partir de Goodman (1989), Rahn (1986), Walthan (1999), Farmer (1968).

CUADRO 3.3

Valores típicos de permeabilidad de la matriz rocosa

Roca	k (m/s)
Arenisca	10^{-5} - 10^{-10}
Caliza y dolomía	10^{-6} - 10^{-12}
Esquisto	10^{-7} - 10^{-8}
Pizarra	10^{-11} - 10^{-13}
Granito	10^{-9} - 10^{-12}
Lutita	10^{-9} - 10^{-13}
Rocas metamórficas	10^{-9} - 10^{-12}
Rocas volcánicas	10^{-7} - 10^{-12}
Sal	$< 10^{-11}$ - 10^{-13}

Fuente. González de vallejo, Ingeniería Geológica(9 de Octubre de 2016)

Tabla 7 Valores de gravedad especifica de algunas rocas

Tipo De Roca	Gravedad especifica
Igneas	
Granito	2.65
Sienita	2.74
Diorita	2.9
Gabro	2.96
Peridotita	3.31
Felsita	2.66
Basalto	2.86
Diabasa	2.96
Sedimentarias	
Piedra caliza	2.66
Dolomita	2.7
Arcilla esquistosa	1.8 - 2.5
Arenisca Chert	2.54
Conglomerado	2.5
Brecha	2.68
	2.57
Metamórficas	
Gneis	2.74
Esquisto	2.85
Anfibolita	3.02
Pizarra	2.74
Cuarcita	2.69
Mármol	2.63
Serpentina	2.62

Fuente. <http://www.ingenierocivilinfo.com/2010/05/clasificacion-de-los-agregados-para.html>(9 de Octubre de 2016)

De las tablas anteriores se seleccionan las propiedades físicas propias de la arenisca, en la tabla siguiente se muestran los valores típicos.

Tabla 7 Propiedades físicas de la roca

Parámetros	Densidad (g/cm ³)	Humedad (%)	Absorción (%)	Gs	Porosidad (%)
Máx.	2,6	1	1	2,56	24
Mín.	2,3	1	1	2,52	5
Prom.	2,45	1	1	2,54	14,5

Fuente. Elaboración propia(9 de Octubre de 2016)

7.1.6 Parámetros de resistencia de la roca intacta

7.1.6.1 Resistencia a la compresión in-confinada y a la tracción.

La resistencia a la compresión de la roca, se adoptó de los valores característicos para la arenisca, también se hizo para la resistencia a la tracción.

Tabla 8 resistencia a la compresión inconfiada de las rocas

CUADRO 3.6

Valores de resistencia de la matriz rocosa sana

Roca sana	Resistencia a compresión simple (kp/cm ²)		Resistencia a la tracción (kp/cm ²)
	Valores medios	Rango de valores	
Andesita	2.100-3.200	1.000-5.000	70
Anfibolita	2.800	2.100-5.300	230
Anhidrita	900	800-1.300	60-120
Arenisca	550-1.400	300-2.350	50-200
Basalto	800-2.000	600-3.500	50-250
Caliza	600-1.400	500-2.000	40-300
Cuarcita	2.000-3.200	1.000-5.000	100-300
Diabasa	2.400-3.500	1.300-3.650	550
Diorita	1.800-2.450	1.200-3.350	80-300
Dolerita	2.000-3.000	1.000-3.500	150-350
Dolomita	600-2.000	500-3.500	50-250
Esquisto	300-600	200-1.600	20-55
Gabro	2.100-2.800	1.800-3.000	140-300
Gneiss	600-2.000	500-2.500	50-200
Granito	700-2.000	500-3.000	70-250
Grauvaca	1.000-1.500	800-2.200	55-150
Limolita		350-2.500	27
Lutita	200-400	100-900	15-100
Marga	300-700	200-900	5-10*
Mármol	1.200-2.000	600-2.500	65-200
Pizarra	400-1.500	300-2.000	70-200
Sal	120	50-300	
Toba		100-460	10-40
Yeso	250	100-400	10-25

(*) A favor de superficies de laminación.
 Datos seleccionados a partir de Rahn (1986), Walthan (1999), Obert y Duvall (1967), Farmer (1968).

Fuente, Fuente. González de vallejo, Ingeniería Geológica(12 de Octubre de 2016)

La resistencia a la compresión confinada se selecciona con criterio conservador, tomando así el menor valor de los valores medios el cual se estima en 550 kg/cm².

7.1.6.2 Parámetros de resistencia de Hoek & Brown para roca intacta (m_i y σ_{ci}) y Morh Coulomb.

m_i

Para el análisis de los criterios de falla Morh Coulomb y Hoek & Brown fue necesario recurrir a bibliografía para asignar valores de parámetros propios del tipo de roca.

Tabla 9 valores del parámetro m_i para tipos de roca

CUADRO 3.14

Valores de la constante m_i para la matriz rocosa

Tipo de roca y valor de la constante m_i				
Sedimentarias elásticas	Conglomerado	(22)	Lutita	4
	Arenisca	19	Grauvaca	(18)
	Limolita	9		
Sedimentarias no elásticas	Caliza margosa	7	Caliza micrítica	8
	Brecha caliza	(20)	Yeso	16
	Caliza esparítica	(10)	Anhidrita	13
Metamórficas	Mármol	9	Gneiss (*)	33
	Cuarcita	24	Esquisto (*)	4-8
	Migmatita	(30)	Filita (*)	(10)
	Anfibolita	25-31	Pizarra (*)	9
	Milonita	(6)		
Ígneas	Granito	33	Diorita	(28)
	Riolita	(16)	Andesita	19
	Granodiorita	(30)	Gabro	27
	Dacita	(17)	Basalto	(17)
Ígneas extrusivas piroclásticas	Aglomerado	(20)	Toba	(15)
	Brecha	(18)		

Hoek y Brown, 1997. Los valores entre paréntesis son estimados.
 (*) Valores obtenidos de ensayos en matriz rocosa con dirección de aplicación de la carga normal a los planos de foliación. El valor de m_i será significativamente diferente si la rotura ocurre a favor de los planos de debilidad.

Fuente. Ingeniería Geológica, González de Vallejo. (12 de Octubre de 2016)

En particular el valor de la constante del macizo m_i se aproxima a 19.

GSI. GEOTECHNICAL STRENGTH INDEX

A partir de la litología, estructura y condiciones superficiales de las discontinuidades, se estimó el valor medio de GSI, luego de la inspección visual realizada al macizo con base en la distribución de las discontinuidades y la condición de la superficial de la matriz.

Tabla 10 Guía para la selección del indicador de resistencia geológica

Pick GSI Value		SURFACE CONDITIONS				
Rock Type: <input type="text" value="General"/>		VERY GOOD	GOOD	FAIR	POOR	VERY POOR
GSI Selection: <input type="text" value="50"/> <input type="button" value="OK"/>		DECREASING SURFACE QUALITY →				
STRUCTURE		DECREASING INTERLOCKING OF ROCK PIECES ↓				
	INTACT OR MASSIVE - intact rock specimens or massive in situ rock with few widely spaced discontinuities	90			N/A	N/A
	BLOCKY - well interlocked undisturbed rock mass consisting of cubical blocks formed by three intersecting discontinuity sets	80	70			
	VERY BLOCKY - interlocked, partially disturbed mass with multi-faceted angular blocks formed by 4 or more joint sets		60	50		
	BLOCKY/DISTURBED/SEAMY - folded with angular blocks formed by many intersecting discontinuity sets. Persistence of bedding planes or schistosity			40		
	DISINTEGRATED - poorly interlocked, heavily broken rock mass with mixture of angular and rounded rock pieces				30	
	LAMINATED/SHEARED - Lack of blockiness due to close spacing of weak schistosity or shear planes					20
						10
		N/A	N/A			

Fuente. Interfaz RocLab. Rocscience.(12 de Octubre de 2016)

Definido inicialmente un valor de GSI entre 40 A 60 se adopta finalmente un valor de 55. Se consideró que este parámetro no refleja la anisotropía y la resistencia al corte de las superficies de las rocas pueden ser propensas a deteriorarse como resultado de los cambios en el contenido de humedad del macizo, reduciría la resistencia del mismo si el agua estuviera presente.³⁹

Uso de los parámetros obtenidos en el software RocLab de RocScience.

³⁹ÍNDICE DE RESISTENCIA GEOLÓGICA PARA ROCAS CONJUNTAS (Hoek y Marinos, 2000)

Tabla 11 Parámetros de entrada RocLab

START TO ROCLAB	
σ_{ci}	55 Mpa
GSI	55
mi	19
D	0,2

Fuente. Elaboración propia. (12 de Octubre de 2016)

Como se describe anteriormente, se tomaron los valores típicos de resistencia a compresión inconfiada, el índice de resistencia geológica, la constante del macizo y el factor de alteración, estos datos se modelaron en el software RocLab. Para la profundidad de terreno asignada de 200m, el peso unitario del material de 2.7 Ton/m³, y la modalidad de obra geotécnica. Se obtuvieron las siguientes gráficas y los siguientes datos:

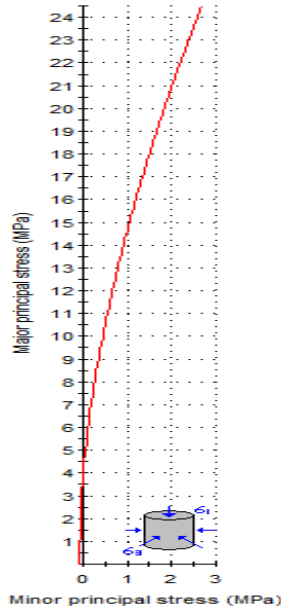
Tabla 12 Parámetros de entrada, análisis de criterios de falla

The screenshot displays the RocLab software interface with the following input parameters:

- Hoek-Brown Classification:**
 - sigci: 55 MPa
 - GSI: 55
 - mi: 19
 - D: 0.2
- Hoek-Brown Criterion:**
 - mb: 3.186
 - s: 0.0047
 - a: 0.504
- Mohr-Coulomb Fit:**
 - c: 1.155 MPa
 - phi: 49.51 deg
- Failure Envelope Range:**
 - Application: Tunnels
 - sig3max: 2.6777 MPa
 - Unit Weight: 0.027 MN/m³
 - Tunnel Depth: 200 m
- Rock Mass Parameters:**
 - sigt: -0.081 MPa
 - sigc: 3.695 MPa
 - sigcm: 13.186 MPa
 - Em: 8900.69 MPa

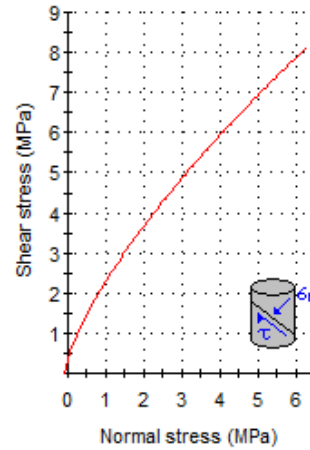
Fuente. Fuente. Interfaz RocLab. Rocscience.(12 de Octubre de 2016)

Ilustración 32 Relación de esfuerzos principales.



Fuente. Interfaz RocLab. Rocscience. (12 de Octubre de 2016)

Ilustración 33 Relación del esfuerzo normal vs esfuerzo de corte.



Fuente. Interfaz RocLab. Rocscience. (12 de Octubre de 2016)

Hoek-Brown Classification

intact uniaxial compressive strength = 55 MPa
 GSI = 55 m_i = 19 Disturbance factor = 0.2

Hoek-Brown Criterion

m_b = 3.186 s = 0.0047 a = 0.504

Mohr-Coulomb Fit

cohesion = 1.155 MPa friction angle = 49.51 deg

Rock Mass Parameters

tensile strength = -0.081 MPa
 uniaxial compressive strength = 3.695 MPa
 global strength = 13.186 MPa
 modulus of deformation = 8900.69 MPa

Tabla 13 Parámetros Geomecánicos de la Arenisca

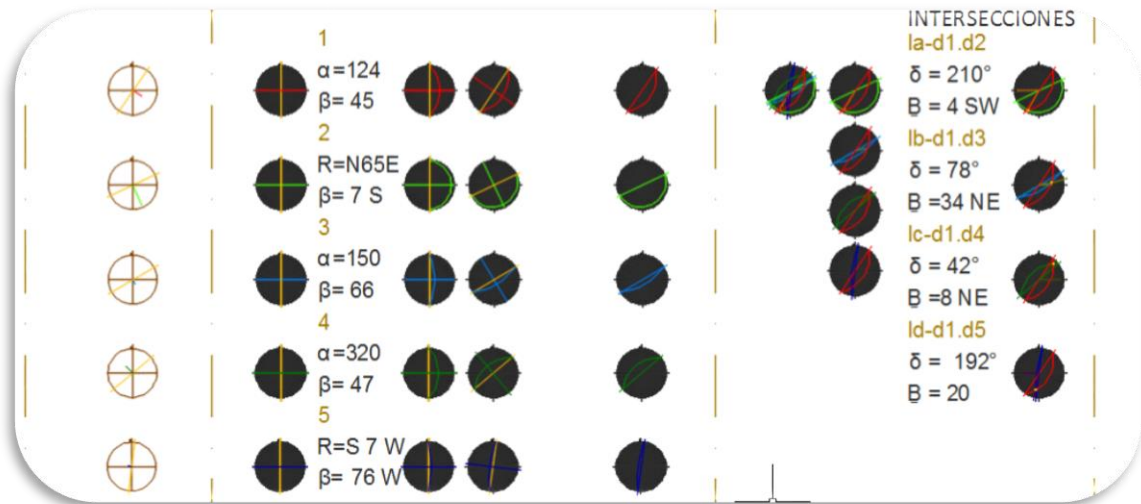
Z (m)	Deformabilidad		Mohr coulomb		Constantes Hoek - Brown			
	E(MPa)	V	C MPa	ϕ	m_i	Mb	s	a
200	8900,69	0,28	1,155	49.51	19	3,186	0,0047	0,504

Fuente. Elaboración propia. (12 de Octubre de 2016)

7.1.6.3 Estructura geológica del macizo

A continuación se observan los valores de azimut (α) y buzamiento (β), se interpretó el sistema de discontinuidades presentes en el macizo, aplicando criterios de estereografía mediante el uso de CAD.

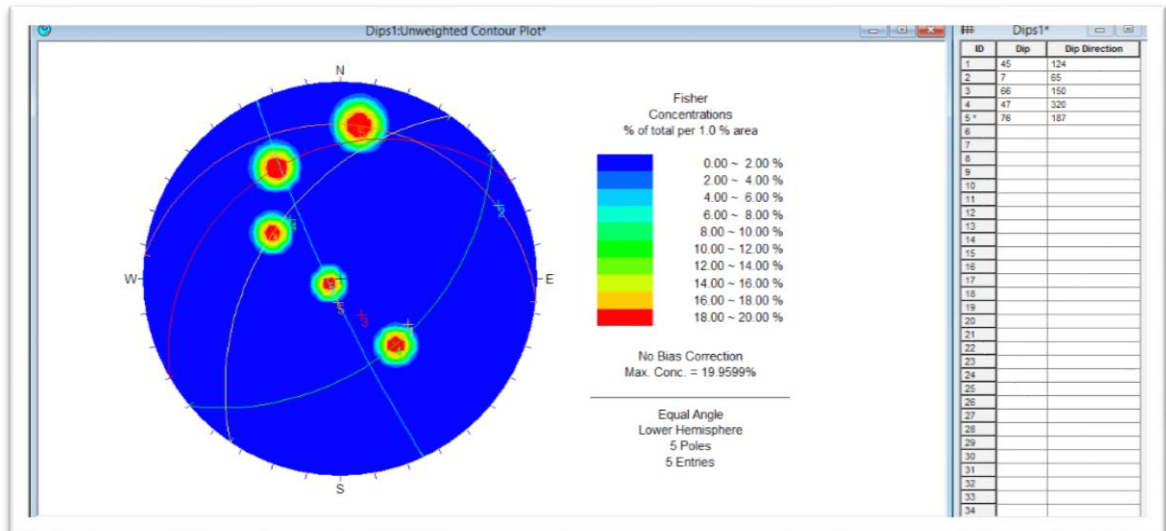
Ilustración 34 Estereografía del sistema de discontinuidades, Estructura geológica



Fuente. Elaboración propia.(31 de Abril de 2016)

La orientación de las discontinuidades son las siguientes

Ilustración 35 Familias de discontinuidades



Fuente. Interfaz Dips. Rocscience.(19 de Octubre de 2016)

7.1.6.4 Características de las discontinuidades

Tabla 14 Condición de las discontinuidades

CONDICIÓN DE LAS DISCONTINUIDADES					
Rugosidad	Promedio	1,9	Alteración	Máximo (m)	0,6
				Mínimo (m)	0,006
				Asumido (m)	0,1
	Desv. Estándar	0,7	Espaciamiento	Máximo (m)	0,6
				Mínimo (m)	0,4
				Medio (m)	0,5
Jr. Asumido	1,5				
Relleno	Ja Asumido	2	Persistencia	Máximo (mm)	1
				Mínimo (mm)	0,1
				Asumido (mm)	0,5
	ligeramente alterado. Libre de arcillas.				

Fuente. Elaboración propia.(31 de Abril de 2016)

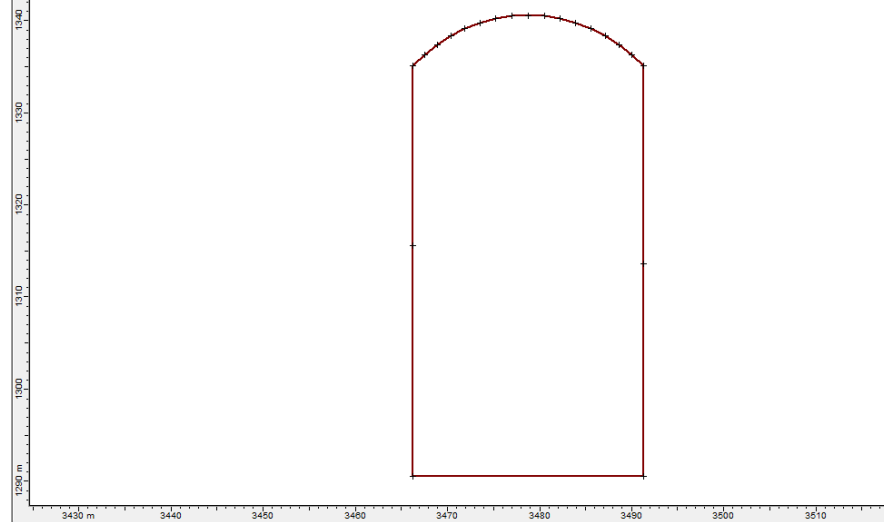
7.1.7 Sostenimiento, Revisión de cuñas inestables

Para lograr un análisis numérico de caverna en Unwedge, fue necesario tener en cuenta varios factores como conocer la dirección de la misma, cual es el ancho, como es la sección la caverna estudiada.

Para obtener un modelo de análisis de cuñas fue necesario identificar las familias de discontinuidades y variar la configuración del eje de la caverna, lo que permitió establecer una orientación optima al disminuir el riesgo de desprendimiento de bloques inestables, con esto se logró verificar como es el comportamiento y mitigar las eventualidades factibles durante la construcción, también fue necesario tener en cuenta los parámetros de resistencia de las discontinuidades ya que son datos de entrada en el programa para poder hacer nuestro análisis correctamente.

Al conocer la sección de la caverna se pudo analizar los diferentes tipos de cuñas que se forman.

Ilustración 36 Digitalización de las dimensiones de la caverna



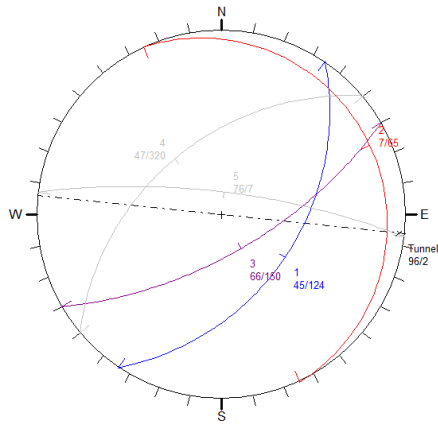
Fuente. Interfaz Unwedge. Rocscience.(26 de Octubre de 2016)

Asignamos propiedades generales a las juntas.
Bajo el criterio de falla de Mohr Coulomb asignamos ángulo de fricción phi (ϕ) típico de las juntas.

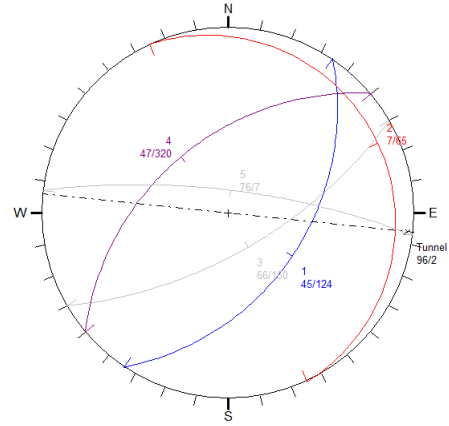
Ilustración 37 Datos de entrada Unwedge.

Fuente. Interfaz Unwedge. Rocscience.(26 de Octubre de 2016)

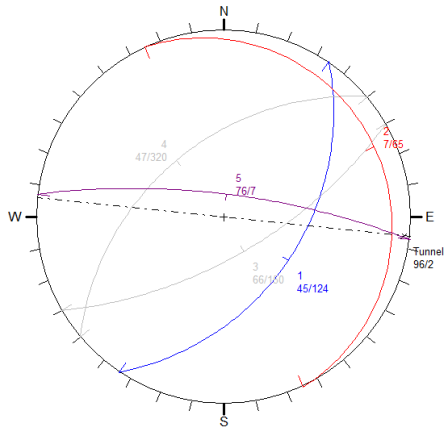
Ilustración 38 Combinaciones analizadas en Unwedge de la 1 a la 6.



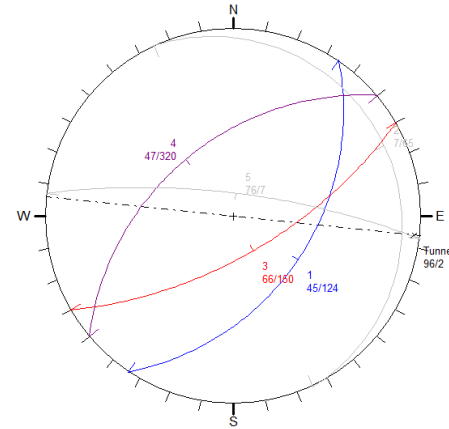
(1)



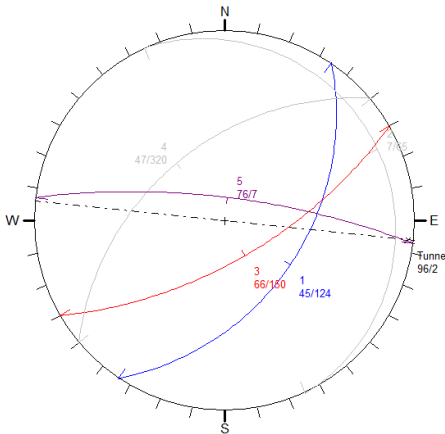
(2)



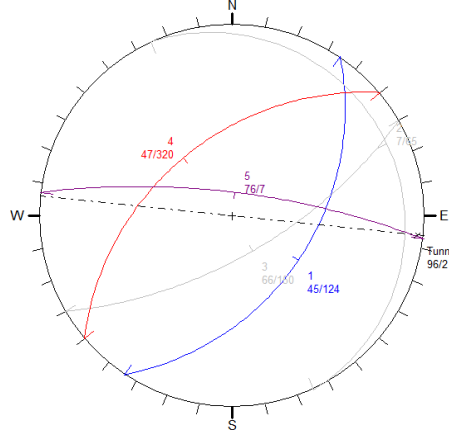
(3)



(4)



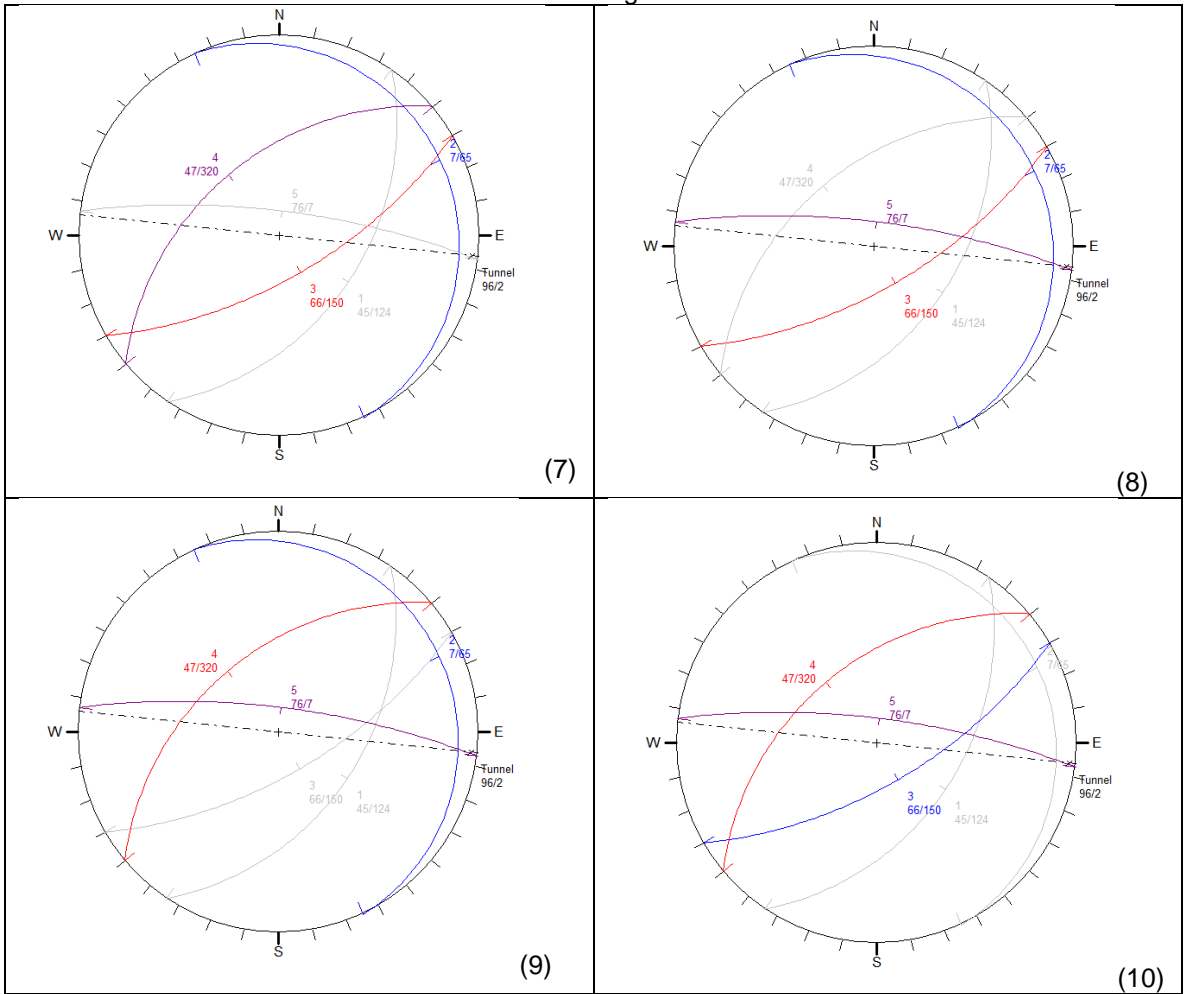
(5)



(6)

Fuente. Elaboración en Unwedge(26 de Octubre de 2016)

Ilustración 39 Combinaciones analizadas en Unwedge de la 7 a la 10



Fuente. Interfaz Unwedge. Rocscience. (26 de Octubre de 2016)

Se seleccionó la orientación de la caverna con base en criterios para el procedimiento constructivo y para la aplicación de la menor presión de soporte.

Ilustración 40 Grafica relación presión de soporte y orientación



Fuente. Interfaz Excel, elaboración propia.(26 de Octubre de 2016)

En la siguiente tabla se desarrolló el análisis de las variables que modela el software Unwedge, donde se relacionó la orientación de la caverna con la presión de soporte y el área de excavación.

Lo anterior también hace énfasis en la interpretación de la geometría correspondiente de cada cuña, durante la obra se puede reconocer en que costados de la sección de la cuña es efectiva y funcional la aplicación del sostenimiento, con criterios de revisión de las cuñas codificadas y su correcta interpretación en tres dimensiones.

El tipo de estudio realizado permitirá identificar una posible reducción en los costos de estabilización del macizo rocoso.

Tabla 15 Enlace orientación vs presión de soporte y área de excavación

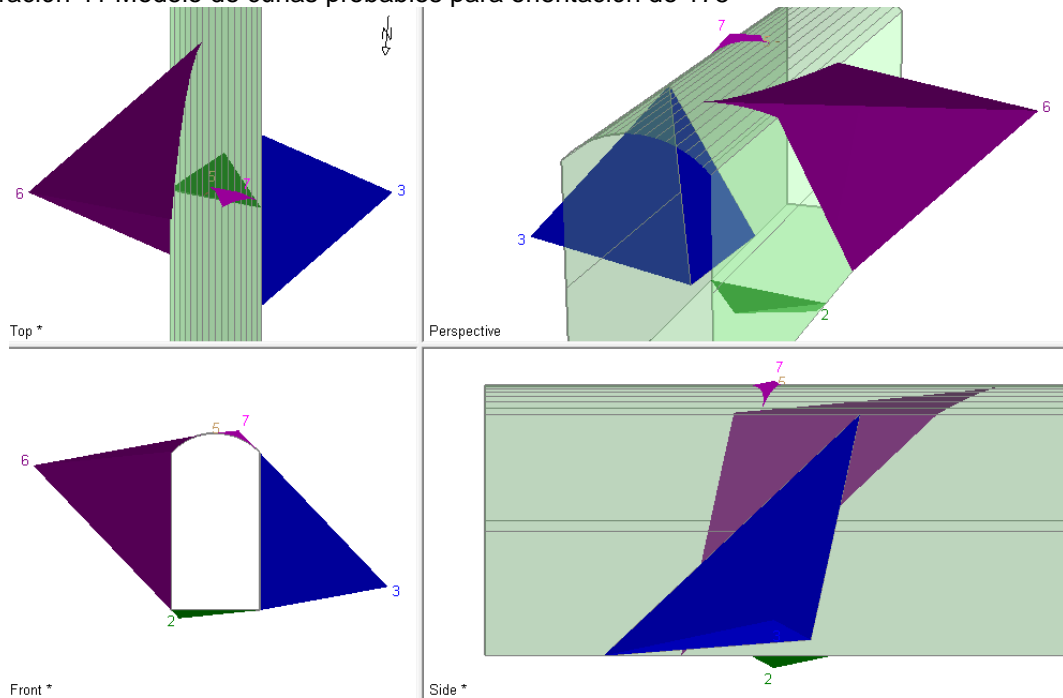
MENOR A MAYOR	PRESIÓN DE SOPORTE (ton/m2)	ORIENTACIÓN	ORIENTACIÓN	AREA DE EXCAVACIÓN (m2)	MAYOR A MENOR
	17,37	160	60	40099,80	
	17,56	170	50	35711,73	
	17,99	150	100	16123,55	
	18,02	180	70	15239,39	
	18,97	0	40	12467,14	
	19,02	140	30	10799,61	
	19,99	10	180	7108,14	
	20,61	130	90	7091,91	
	21,70	20	10	7091,05	
	22,56	120	110	6961,95	
	23,50	110	20	6526,03	
	25,97	30	170	6451,66	
	28,97	40	120	6271,57	
	37,35	80	140	5990,65	
	37,79	90	130	5510,22	
	42,95	100	0	4455,01	
	65,32	70	80	4082,57	
	85,09	50	160	3135,33	
	91,57	60	150	2332,39	

Fuente. Interfaz Excel, elaboración propia.(26 de Octubre de 2016)

Del análisis se extrae la mejor opción de orientación atendiendo dos criterios, lo cual implica el aporte de la investigación a nivel interpretativo, puesto que se quiere encontrar la orientación que implique la aplicación de la menor presión de soporte, y la sección de excavación global correspondiente a las cuñas que requieren la aplicación de esa presión de soporte. Debido a que no cuenta con ensayos que permitan obtener los esfuerzos in-situ, no se adopta otro criterio requerido para la definición del eje de la caverna.

Si el área de excavación de una cuña de roca es mayor, la aplicación del sostenimiento se podrá ejecutar con más facilidad, debido a que la excavación habrá avanzado menos en cuñas con menor área de cara a la caverna.

Ilustración 41 Modelo de cuñas probables para orientación de 175°



Fuente, Interfaz Unwedge. Elaboración propia(26 de Octubre de 2016)

De la ilustración se identifica la disposición de cuñas generadas, con la conveniente visualización de las cuñas que rodean la excavación, y permite su análisis detallado y la aplicación del sostenimiento.

Los factores de seguridad se calculan para las cuñas potencialmente inestables y los requisitos de soporte se pueden modelar usando varios tipos de patrón de concreto proyectado. Realizar un análisis de factor de seguridad, reforzar el lugar e interpretar los resultados.

Unwedge ofrece modelos de soporte mejorados para pernos, hormigón proyectado y presiones de soporte, la capacidad de optimizar la orientación de la caverna y una opción para mirar diferentes combinaciones del grupo de discontinuidades.

Se utilizó un nuevo motor de análisis basado en la teoría de bloques de Goodman y Shi, que incluye la capacidad de incorporar tensiones inducidas alrededor de la excavación y el efecto sobre la estabilidad, nuevos modelos de fuerza como Barton-Bandis y Power Curve y la capacidad de mejorar la escala y dimensionamiento de cuñas.

Tabla 16 Identificación de cuñas inestables

COMBINACION	DESLIZAMIENTO EN JUNTAS	CODIGO DE LAS JUNTAS	PRESION DE SOPORTE (Ton)	AREA EXCAVABLE (m2)	PESO (Ton)	FS	CUÑA
1	FALLING	111	0,02	0,17	0,002	0	Cuña de techo
1	3	110	0,00	3,47	0,997	12	Cuña de techo
1	1 & 3	11	0,00	1650,00	126001,115	3,96	Cuña superior derecha
2	1 & 4	10	0,00	3295,70	3224850,076	9,251	Cuña superior derecha
3	FALLING	111	0,61	6,72	2,528	0	Cuña de techo
3	5	110	0,00	0,45	0,015	9,888	Cuña de techo
3	1 & 5	10	0,00	2393,69	152140,363	1,895	Cuña superior derecha
4	FALLING	111	0,33	1,19	0,261	0	Cuña de techo
4	3	101	0,00	1,59	0,419	16,429	Cuña de techo
4	3 & 4	100	0,00	688,34	33594,786	15,353	Cuña inferior izquierda
4	1 & 3	11	0,00	815,18	42363,459	4,332	Cuña superior derecha
5	FALLING	111	0,02	0,02	0	0	Cuña de techo
5	3 & 5	100	0,00	895,87	248876,788	1,729	Cuña superior derecha
6	FALLING	111	0,57	2,83	0,965	0	Cuña de techo
6	5	110	3,10	23,64	47,916	0,175	Cuña de techo
6	4 & 5	101	1,68	589,23	129441,101	1,287	Cuña superior izquierda
6	1 & 5	10	2,39	581,72	12708,955	1,252	Cuña inferior derecha
7	FALLING	111	0,20	0,81	0,109	0	Cuña de techo
7	4	110	0,02	0,15	0,002	0,653	Cuña de techo
7	3 & 4	100	0,00	1704,90	228383,223	9,81	Cuña superior izquierda
7	2 & 3	11	0,00	1674,08	236421,037	5,741	Cuña inferior derecha
8	FALLING	111	0,90	6,41	3,565	0	Cuña de techo
8	3 & 5	100	0,00	1081,22	55310,812	1,729	Cuña superior derecha
9	5	110	2,13	26,11	36,493	0,175	Cuña de techo
9	4 & 5	101	2,69	989,88	32145,706	1,287	Cuña superior izquierda
9	4	100	0,04	0,33	0,009	0,653	Cuña de techo
9	2	10	0,00	779,76	25357,684	5,703	Cuña inferior derecha
10	FALLING	111	2,18	9,82	13,545	0	Cuña de techo
10	5	110	1,32	5,54	4,692	0,175	Cuña de techo
10	4 & 5	101	1,57	395,66	8104,349	1,287	Cuña inferior izquierda
10	3 & 4	10	0,00	393,97	8054,068	1,729	Cuña inferior derecha

Fuente. Elaboración propia.(30 de Octubre de 2016)

Se tuvo en cuenta la combinación de juntas por la cual se genera la cuña, el deslizamiento sobre articulaciones o planos, el código de la articulación, así como la presión de soporte que requiere cada cuña, el peso de la cuña, el factor de seguridad y la respectiva posición respecto al corte transversal de la caverna.

✓ PREDIMENSIONAMIENTO DEL SOSTENIMIENTO

Se desarrolló el análisis empírico propuesto por Cording, mediante este se asignó relación L/B, Pi/B, H/B, Pi/H, Así se determinaron las longitudes para pernos de la bóveda como para pernos en hastiales.

También se identificó la resistencia a tracción que puede soportar un perno de acero #8.

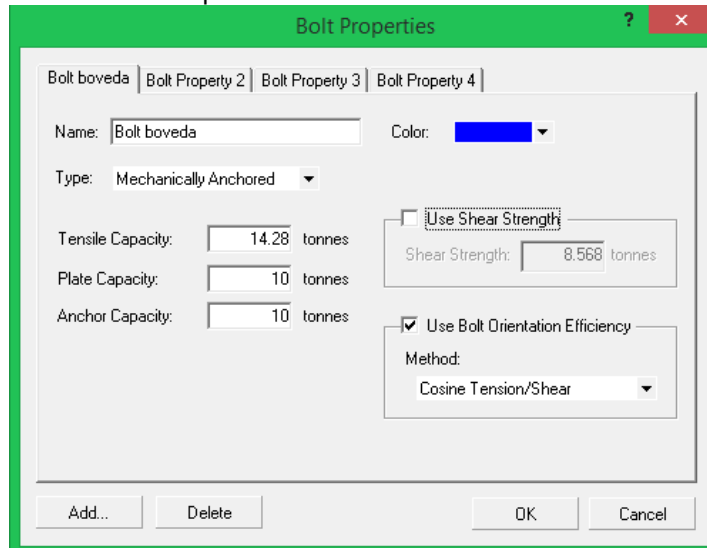
Tabla 17 Pre dimensionado del sostenimiento

PREDIMENSIONAMIENTO				
BOVEDA				
L	LONG.PERNOS	6,5	Base	25
	Pi (kg/cm2)	7,5	L/B	0,26
HASTIAL				
H	LONG.PERNOS	6,25	Pi/B	0,3
	Pi (kg/cm2)	20	H/B	0,25
Resistencia de fluencia (Mpa)		420	Espaciamiento	
Resistencia de fluencia (Ton/cm2)		4,2	Pi (Ton/m2)	75
Resistencia de perno # 8 (5,1cm2)		21,42	Rt (Ton/∅)	4,2
Factor de seguridad F.S.		1,5	Area soporte m2	17,8571429
Resistencia tipo (Ton/∅)		14,28	espaciamiento	4,22577127
Resistencia al corte (Ton/cm2)		8,568		

Fuente. Elaboración Propia.(30 de Octubre de 2016)

Posteriormente se utilizaron estos datos para asignar propiedades al material de los pernos en el modelo desarrollado en Unwedge.

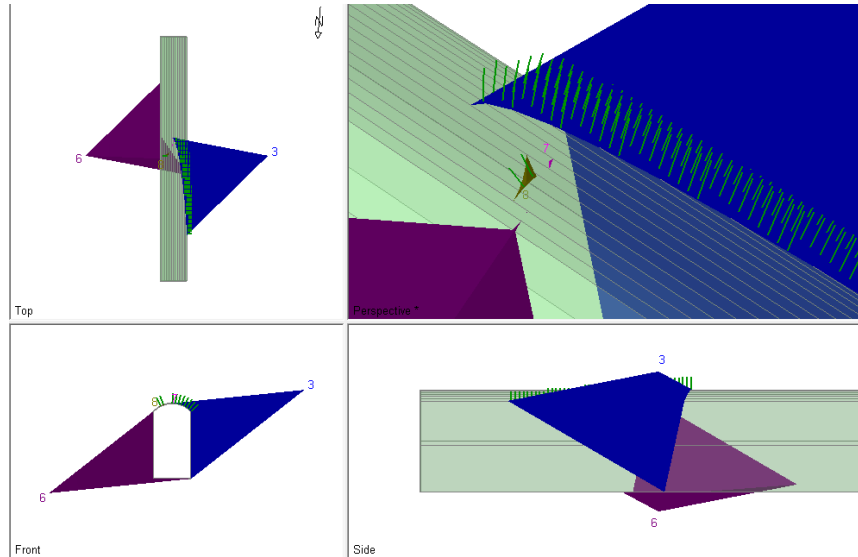
Ilustración 42 Datos de entrada. Propiedades mecánicas



Fuente. Interfaz Unwedge. (30 de Octubre de 2016)

Se procedió con la verificación de la funcionalidad de los pernos en el modelo tridimensional.

Ilustración 43 Visualización del sostenimiento en cuñas formadas alrededor de la caverna



Fuente. Interfaz Unwedge. (30 de Octubre de 2016)

A manera de ejemplo el factor de seguridad para la cuña en color azul aumento quedando por encima de 1.5., Para las cuñas de techo inestables se reconoció que el factor de seguridad aumento y se estimó mayor a 1.5.

Acorde con lo expuesto el análisis se efectuó teniendo como alternativas dos distribuciones de sostenimiento.

En este análisis se diferencia el sostenimiento variando el espaciamento de los pernos de una cuadrícula 1 x 1 a una cuadrícula 2 x 2, en el que se expone la variación del factor de seguridad correspondiente a cada cuña ya estabilizada.

La tabla relaciona el factor de seguridad generado con el espaciamento del sostenimiento.

Tabla 18 Variación en el FS respecto al espaciamiento del sostenimiento

Fso	AREA EXCAVABLE (m2)	FS 1x1	FS 2x2	CUÑA
0	0,17	4622,993	0	Cuña de techo
12	3,47	23	12	Cuña de techo
3,96	1650,00	4,68	3,96	Cuña superior derecha
9,251	3295,70	11,585	9,251	Cuña superior derecha
0	6,72	28,040	6,606	Cuña de techo
9,888	0,45	642,052	9,888	Cuña de techo
1,895	2393,69	2,115	1,895	Cuña superior derecha
0	1,19	113,898	0	Cuña de techo
16,429	1,59	36,454	16,429	Cuña de techo
15,353	688,34	16,409	15,353	Cuña inferior izquierda
4,332	815,18	4,678	4,332	Cuña superior derecha
0	0,02	20489,697	20489,697	Cuña de techo
1,729	895,87	2,891	1,729	Cuña superior derecha
0	2,83	17,301	8,257	Cuña de techo
0,175	23,64	4,837	0,175	Cuña de techo
1,287	589,23	2,155	2,153	Cuña superior izquierda
1,252	581,72	2,094	2,094	Cuña inferior derecha
0	0,81	91,238	91,238	Cuña de techo
0,653	0,15	5139,558	0,653	Cuña de techo
9,81	1704,90	16,409	9,81	Cuña superior izquierda
5,741	1674,08	9,603	5,741	Cuña inferior derecha
0	6,41	18,96	6,671	Cuña de techo
1,729	1081,22	2,9	1,729	Cuña superior derecha
0,175	26,11	6,481	0,175	Cuña de techo
1,287	989,88	2,23	2,174	Cuña superior izquierda
0,653	0,33	992,668	0,653	Cuña de techo
5,703	779,76	9,539	5,703	Cuña inferior derecha
0	9,82	7,854	3,164	Cuña de techo
0,175	5,54	8,614	0,175	Cuña de techo
1,287	395,66	2,153	2,153	Cuña inferior izquierda
1,729	393,97	2,891	2,891	Cuña inferior derecha

Fuente. Interfaz Excel, elaboración propia.

Con este análisis se corrobora que la distribución y longitud del sostenimiento cumple el estándar de factor de seguridad exigido en el Reglamento Colombiano de

Construcción Sismo Resistente del 2010 NSR-10 en su numeral Título H- Tabla H.2.4-1. Respecto a la ejecución de la obra atendiendo a criterios de sección de excavación, posterior a la identificación correcta de la cuña, se podrá decidir cuál de las dos alternativas de sostenimiento será funcional. Esto permitirá seleccionar el espaciamiento en un rango de [1- 2] m. dependiendo de la seguridad que ofrece el sostenimiento.

7.1.8 Estado tensional (elementos finitos) (MIDAS GTS NX)

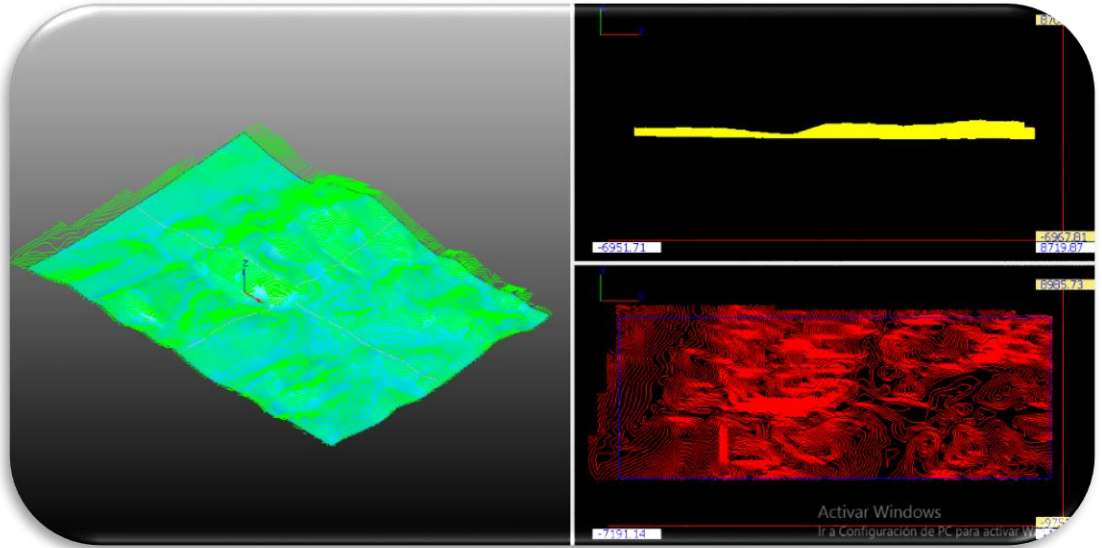
Con base a los análisis realizados previamente, y que ya se conoció que el tipo de roca analizada es sedimentaria clástica, se suministraron los parámetros necesarios para lograr el análisis requerido, es decir, parámetros de resistencia, deformabilidad, y la orientación de la caverna. Estos parámetros para el análisis eran de mucha importancia puesto que se pudo hacer un reconocimiento completo de la condición del macizo, se adoptó la envolvente de falla de Hoek & Brown para encontrar las deformaciones en las hatales y bóveda de la caverna con base en el análisis de cuñas en el software Unwedge, en este se desarrollaron modelos que solicitan parámetros de resistencia y de orientación, aun así hace falta el análisis de deformaciones.

Para conocer el comportamiento de las caras de la caverna, es decir las deformaciones máximas y mínimas que puedan presentarse durante la excavación, se debe tener en cuenta la curva característica de terreno, o bien podemos modelar el comportamiento de la caverna, para calcular la deformación de diseño y en donde la deformación de sostenimiento queda en equilibrio con la deformación de la caverna. Todos los análisis se realizaron para estimar que los factores de seguridad cumplieran los requisitos mínimos de diseño.

Para esta prefactibilidad se hizo uso del software Midas GTS NX con el que se evidenció el avance tecnológico en materia de modelo de elementos finitos (FEM). Además para los estudios de factibilidad que comprenden el diseño de otros componentes del proyecto hidroeléctrico se podrían desarrollar análisis de estabilidad de taludes y una amplia gama de aplicaciones de análisis dinámicos se pueden hacer también, como la consolidación de la presa y la interpretación y propuesta de mitigación de filtraciones.

Para el desarrollo del modelo geotécnico en GTS NX, fue de gran utilidad la topografía digitalizada en el software CAD. En la ilustración se observa la transformación de la topografía altimétrica en una superficie terrea.

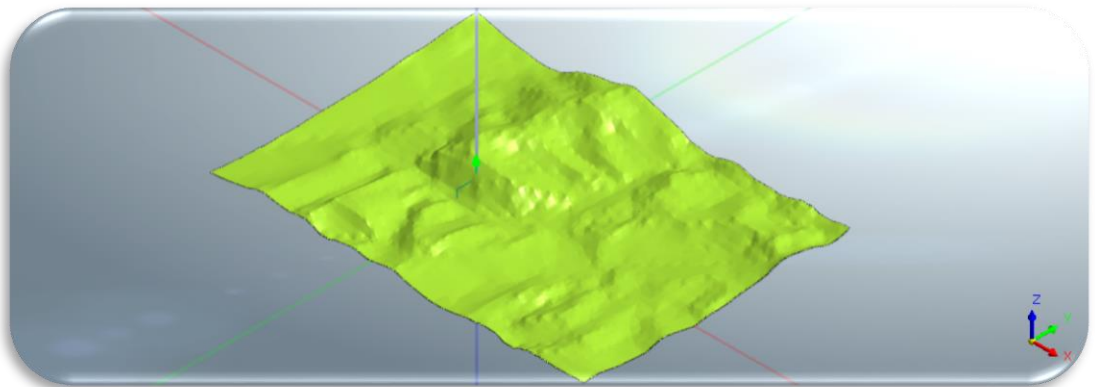
Ilustración 44 Superficie TGM



Fuente. Interfaz TGM, Midas GTS NX, Elaboración propia.

El software TGM Se utilizó para convertir la superficie en curvas de nivel a una superficie terrea, para modelar así el terreno real.

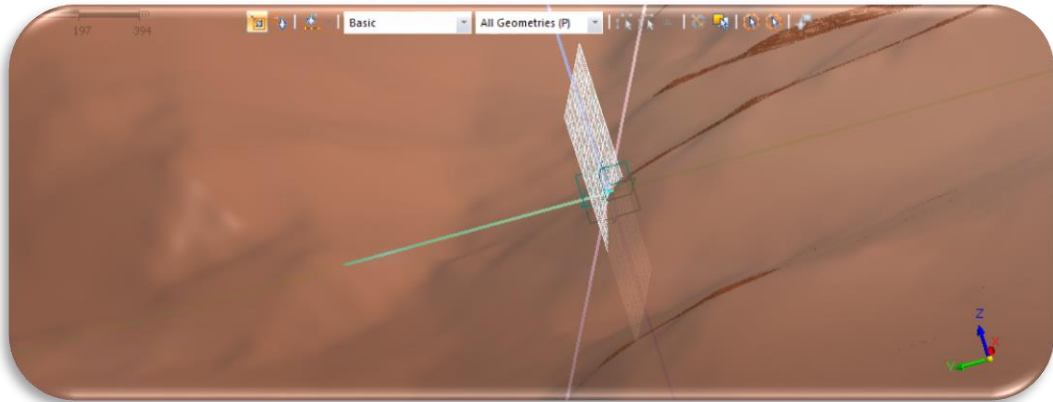
Ilustración 45 superficie real del proyecto



Fuente. InterfazMidas GTS NX, Elaboración propia.

En la siguiente ilustración se identificó la ubicación idónea de la presa cuya cresta está delimitada por el eje de coordenadas (Y) y la posición en superficie de la caverna para casa de máquinas en la intersección entre el eje de coordenadas (Z) y la superficie de terreno.

Ilustración 46 Interpretación del comportamiento orográfico en la zona destinada a obras de generación

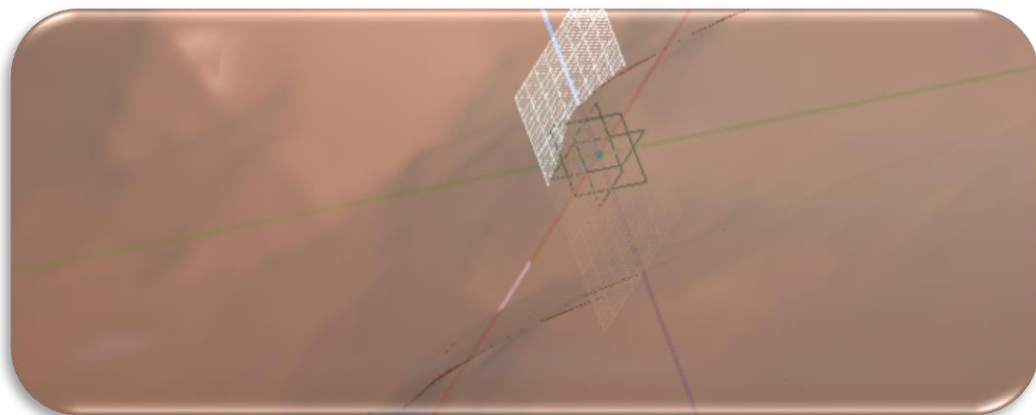


Fuente. InterfazMidas GTS NX, Elaboración propia.

En la imagen se proyecta la línea verde del eje de coordenadas y el cual se identificó precisamente la longitud de presa estimada en aproximadamente 680 metros.

La caverna de casa de máquinas se ubicó 150 metros bajo la línea de cresta de la presa, el eje x de coordenadas permitió identificar la factibilidad de la salida del fluido a través de la montaña luego de pasar por la casa de máquinas. En la ilustración se presenta la inmersión de la casa de máquinas con coordenadas de modelo (0, 0,0) teniendo en cuenta que la profundidad desde superficie es de 200m aproximadamente, se puede también estimar la magnitud de proyecto.

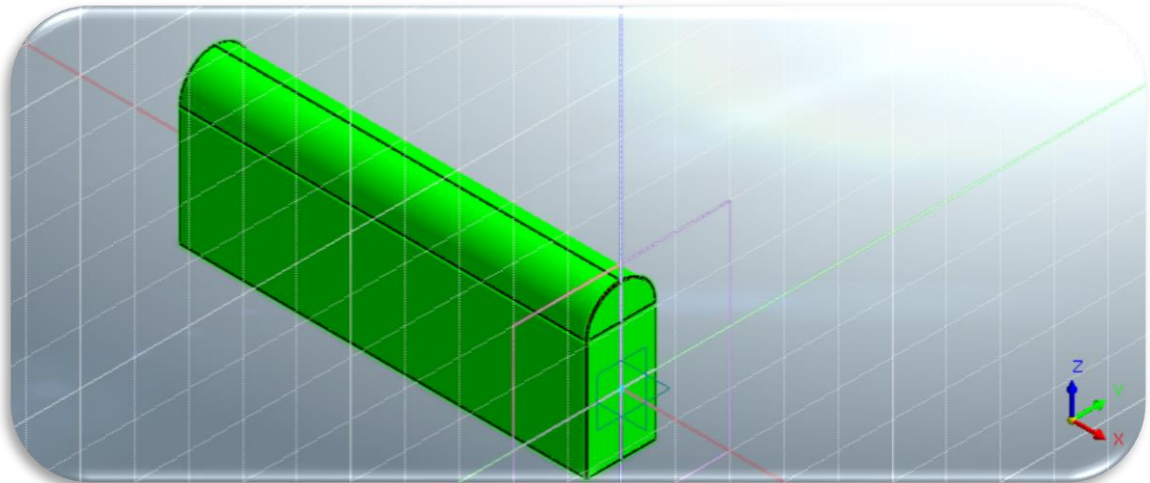
Ilustración 47 localización intramacizo de la caverna de máquinas.



Fuente. InterfazMidas GTS NX, Elaboración propia.

El diseño de la caverna en los hastiales se creó a partir de una caja de 25m de ancho X 150m de largo X 45m de altura, y en la bóveda se adicionó medio cilindro de 150m de largo X 25m de ancho, cuyo radio se estima en 12,5m.

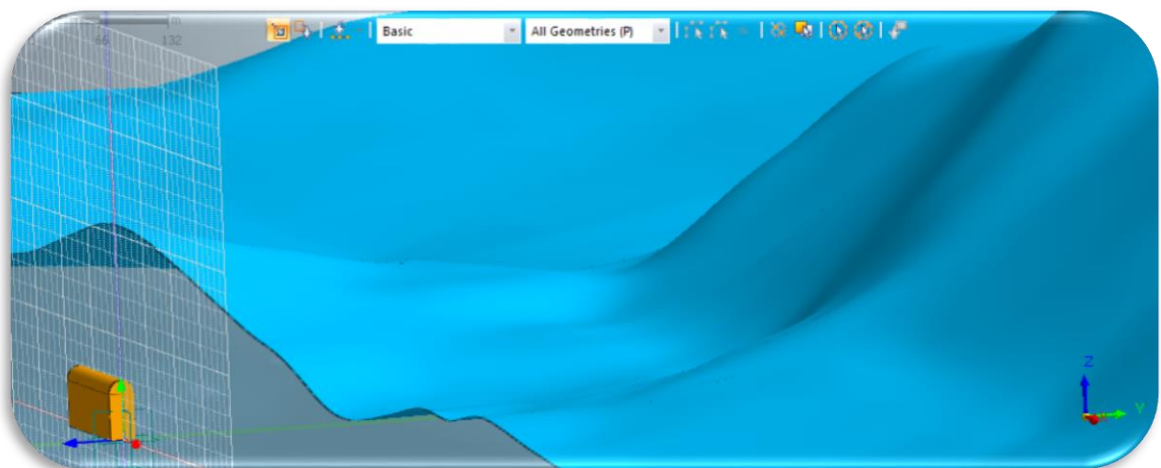
Ilustración 48 Dimensionado de la caverna.



Fuente. InterfazMidas GTS NX, Elaboración propia.

Se proyectó la posición de la caverna con respecto al cañón destinado al cierre de afluencia para la retención controlada del fluido, la imagen emite un concepto general de la topografía de la zona de estudio.

Ilustración 49 Render de la caverna in situ.

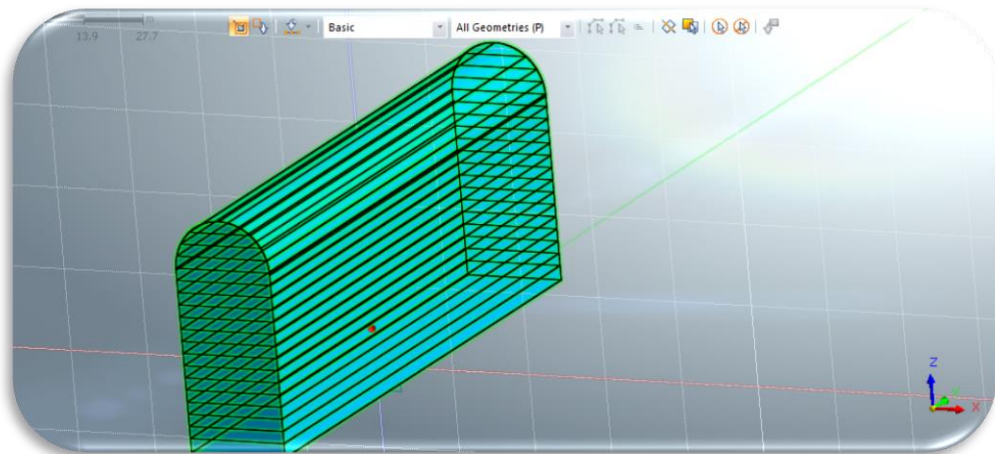


Fuente. InterfazMidas GTS NX, Elaboración propia.

Atendiendo al criterio de espaciamiento ejecutable al interior de la caverna y avance de obra eficiente se proponen las estepas de excavación cuyo espesor de roca para efectos del modelo fue de tres metros.

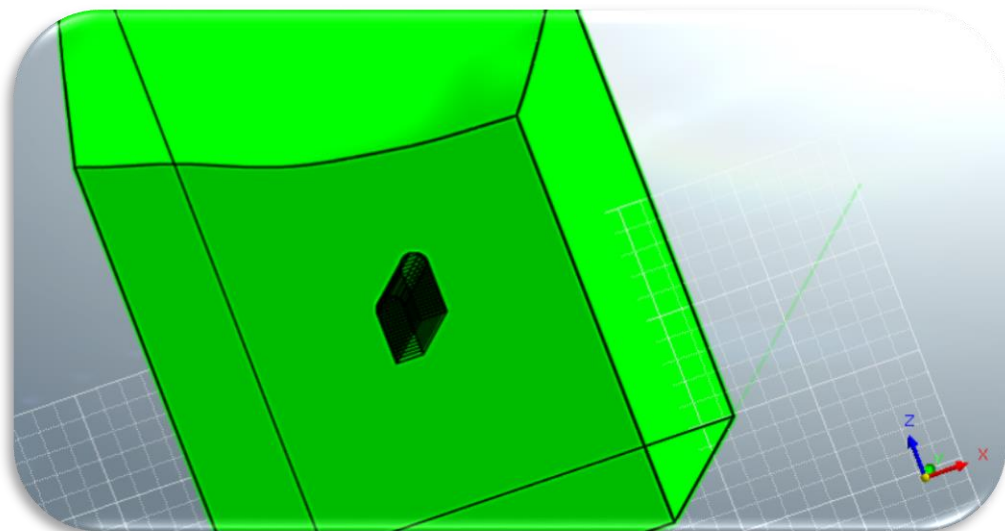
Se creó la malla de la caverna embebida en el medio continuo que subdivide la masa de roca según el espesor etapa por etapa, aclarando que la excavación se desarrollará en forma descendente.

Ilustración 50 macizo interno de la caverna particionado por etapas



Fuente. InterfazMidas GTS NX, Elaboración propia.

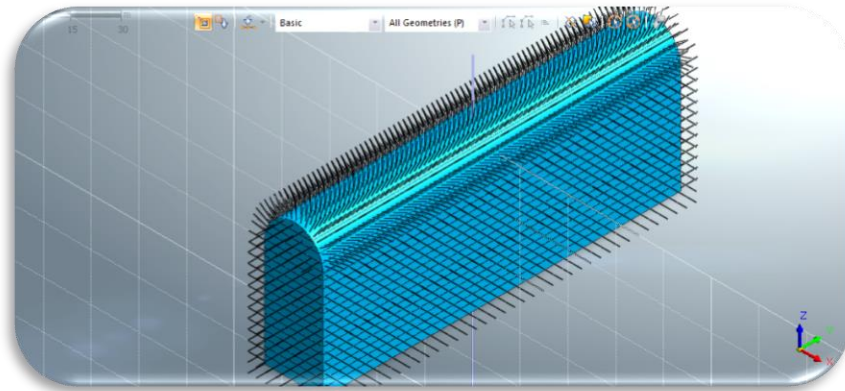
Ilustración 51 Caverna al interior de la masa de roca



Fuente. InterfazMidas GTS NX, Elaboración propia.

En cumplimiento con la proyección del mínimo sostenimiento probable aplicable durante la estabilización de la caverna con espaciamiento 2 x 2. Desde el punto de vista conservador cuyo objeto fue analizarlas deformaciones originadas por la perturbación del medio en el evento de la menor presión de soporte aplicada en obra, se renderizó el sostenimiento.

Ilustración 52 Sostenimiento en bóveda, hastiales laterales y hastiales frontales

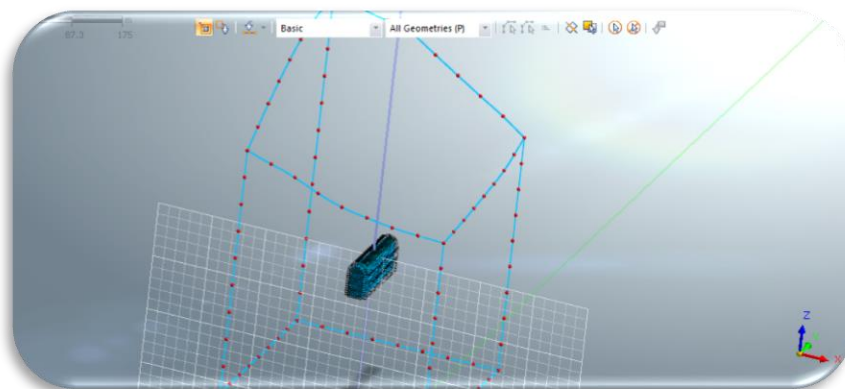


Fuente. InterfazMidas GTS NX, Elaboración propia.

Se distribuyeron en el modelo los pernos, a los cuales se asignaron dimensiones teniendo en cuenta el método empírico propuesto por Cording y su posterior análisis en el software Unwedge.

Puesto que se tenía la geometría proyectada de las etapas de excavación de la caverna de máquinas, dirigida al desarrollo de un modelo de elementos finitos en el cual intervenía también el respectivo sostenimiento para hastiales y bóveda, se asignaron controles de tamaño en la masa de roca circundante.

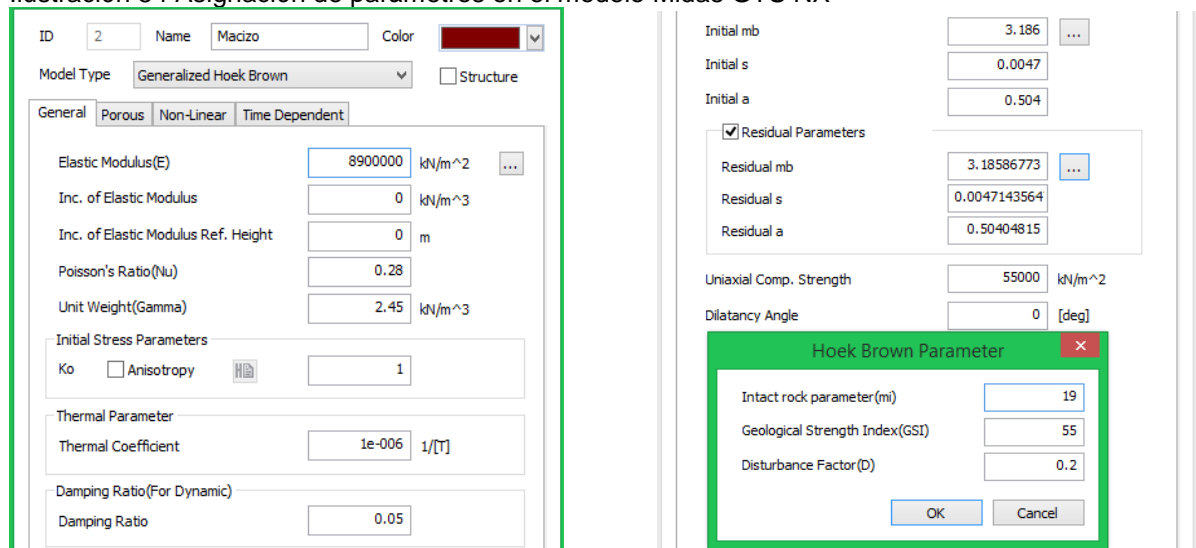
Ilustración 53. Puntos de tamaño para control.



Fuente. InterfazMidas GTS NX, Elaboración propia.

Para en análisis de la caverna se asignan datos de entrada correspondientes a las propiedades físico-mecánicas del macizo rocoso, puesto que la ejecución de los modelos de elementos finitos es un trabajo arduo, en este modelado se usaron incluso parámetros residuales para hacer un análisis más conservador y de este modo adquirir como producto definitivo un modelo idóneo para el proceso de excavación y estabilización de la masa de roca circundante.

Ilustración 54 Asignación de parámetros en el modelo Midas GTS NX



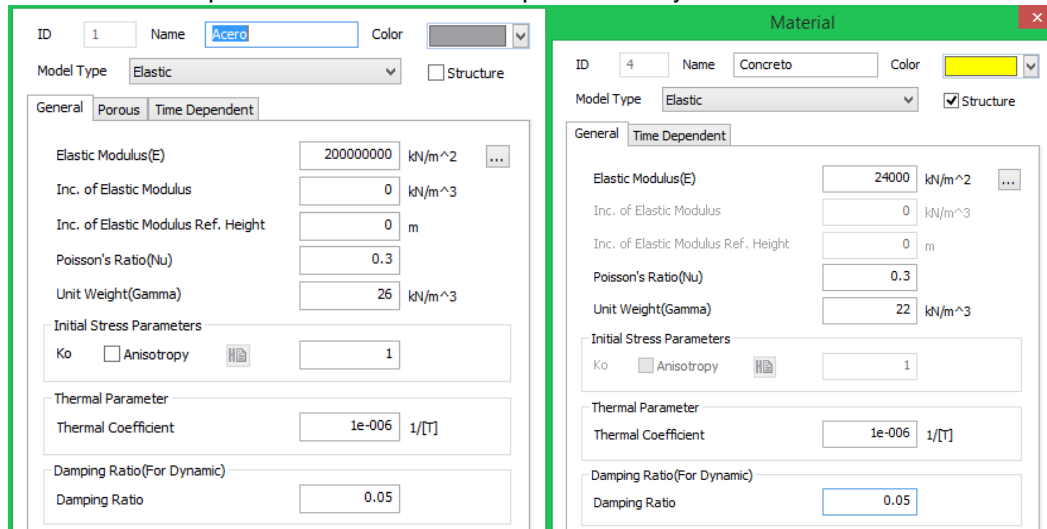
Fuente. Interfaz Midas GTS NX, Elaboración propia.

De las mismas propiedades se adicionan al modelo las constantes del macizo obtenidas utilizando la envolvente de falla de Hoek & Brown, haciendo parte del modelo continuo el valor de m_i , m_b , s y a , también se implementa el cálculo de las constantes residuales mencionadas, así se observa a continuación:

Se desarrolló el modelo de elementos finitos con base en la geometría propuesta para el proceso de excavación, como se ha observado las propiedades mecánicas son propias en el material del modelo, por ser un medio continuo los parámetros físico-mecánicos son iguales en el material circundante y el material excavable, denominado Macizo.

Se implementaron propiedades tipo de los materiales para la estabilización del macizo, así se muestra en la siguiente ilustración, en lo que concierne a los pernos el comportamiento mecánico está dado por las propiedades del acero y para el entorno propuesto se modela el lanzado cuyo comportamiento mecánico está dado por el concreto.

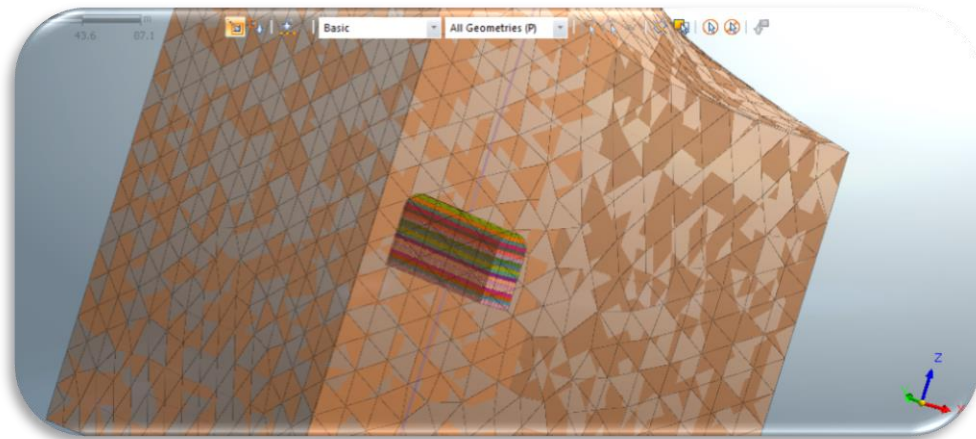
Ilustración 55 Propiedades mecánicas del soporte acero y concreto



Fuente. Interfaz Midas GTS NX, Elaboración propia.

Para el material de los pernos se asignaron valores tipo de resistencia del acero, así mismo se implementaron propiedades tipo del concreto para el lanzado, así se muestra en la siguiente figura lo que concierne al concreto.

Ilustración 56 Malla del macizo rocoso y etapas de construcción de la caverna

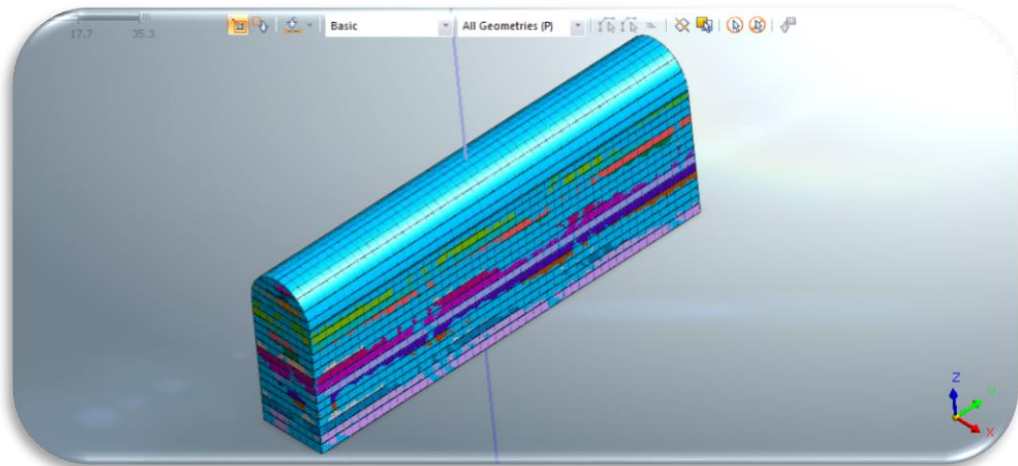


Fuente. Interfaz Midas GTS NX, Elaboración propia.

7.1.9 Generación de mallas

Se extraen elementos de las caras y a estas geometrías se le asignaron propiedades de material.

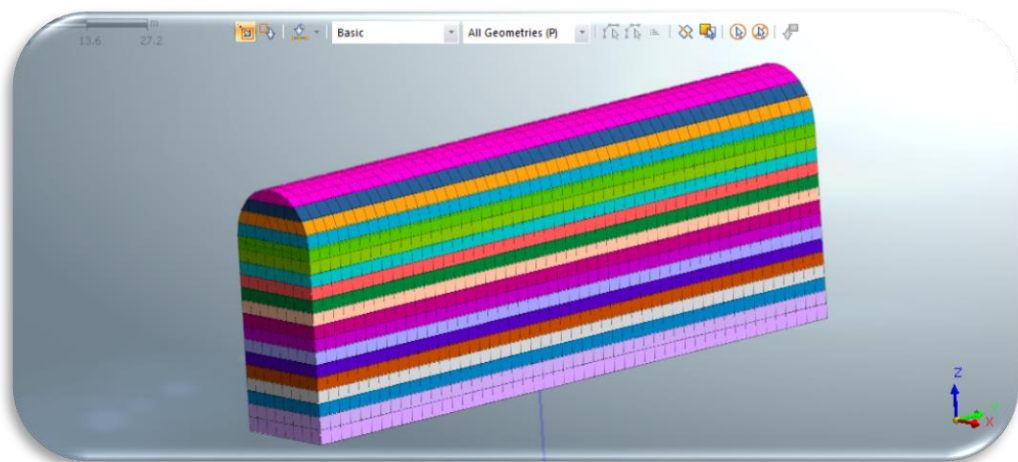
Ilustración 57 Modelación del lanzado



Fuente. Interfaz Midas GTS NX, Elaboración propia.

Se excluye la geometría básica y se obtiene el cascaron de la caverna en concreto lanzado.

Ilustración 58 procedimiento de lanzado

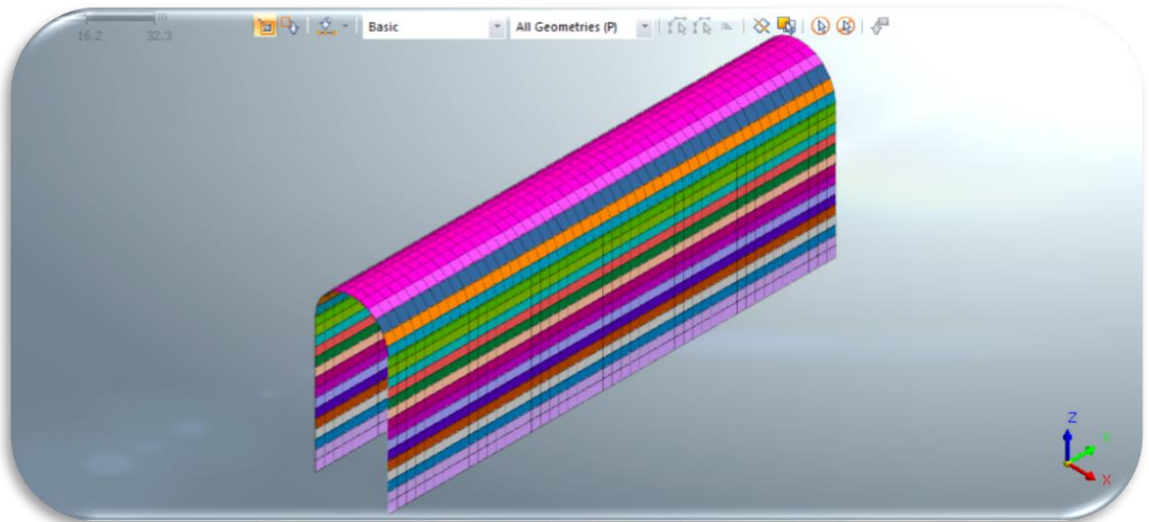


Fuente. Interfaz Midas GTS NX, Elaboración propia.

En la ilustración anterior se observa en detalle las etapas de aplicación del concreto lanzado.

Se corrobora que el concreto lanzado este aplicado solo en las caras externas de la caverna.

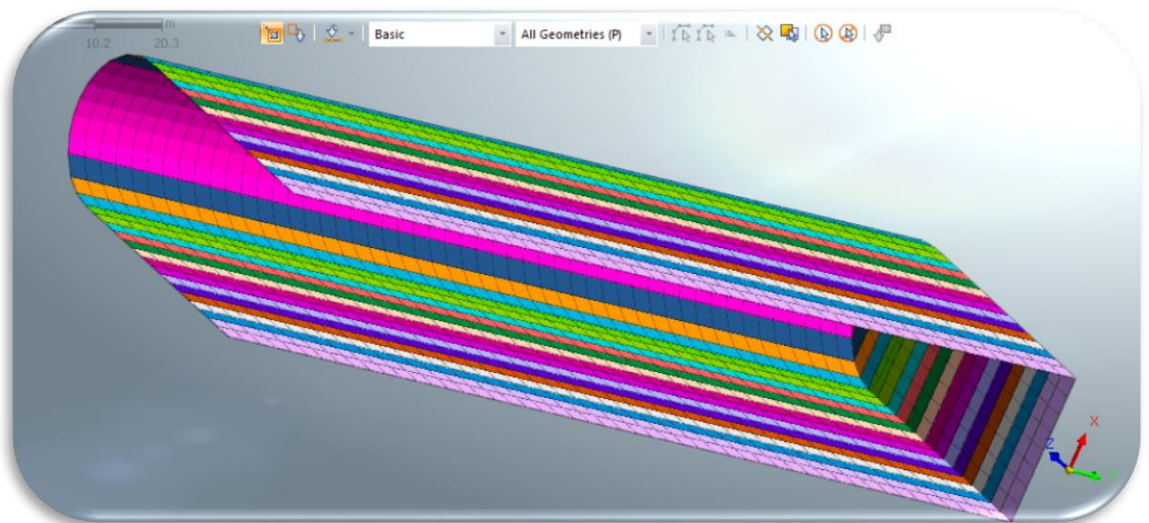
Ilustración 59 Geometría del lanzado



Fuente. Interfaz Midas GTS NX, Elaboración propia.

Este ejercicio se ejecuta observando la caverna desde diferentes perspectivas.

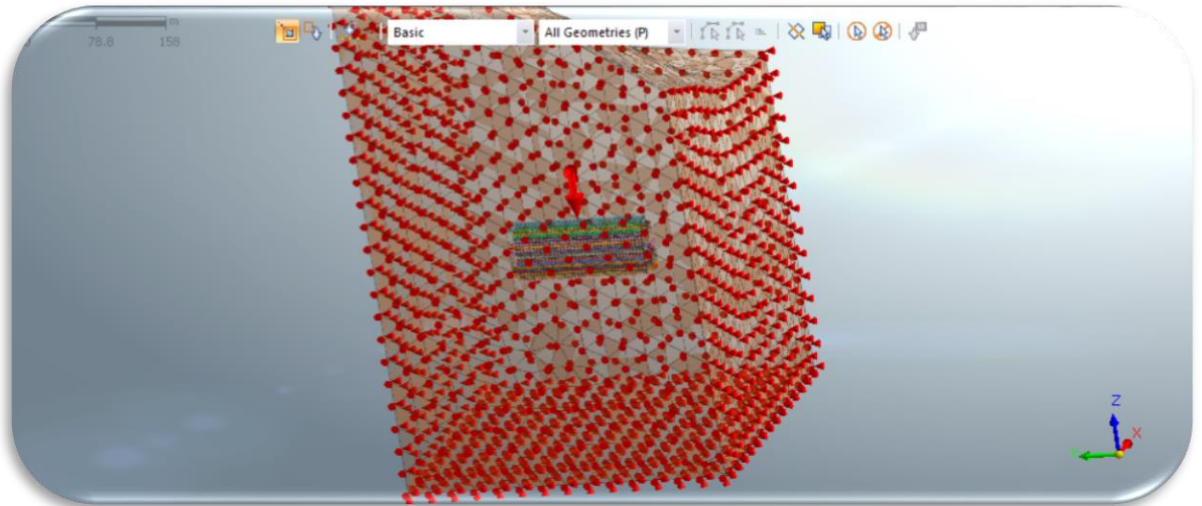
Ilustración 60 Geometría del lanzado



Fuente. Interfaz Midas GTS NX, Elaboración propia.

Se procede con la asignación de las restricciones de movimiento en el contorno de la geometría del macizo, con excepción de la superficie de terreno, cuya superficie eventualmente puede que se deforme.

Ilustración 61 Restricción al movimiento desde las caras externas del medio continuo.



Fuente. Interfaz Midas GTS NX, Elaboración propia.

En consecuencia se procede con la definición de las etapas de construcción, proceso mediante el cual se proyecta el modelo con base en la extracción del material al interior de la caverna y la aplicación del sostenimiento tras cada etapa de excavación.

En la primera fase del modelo se asigna la limpieza de desplazamientos, en las fases posteriores se asigna el factor de distribución de las deformaciones.

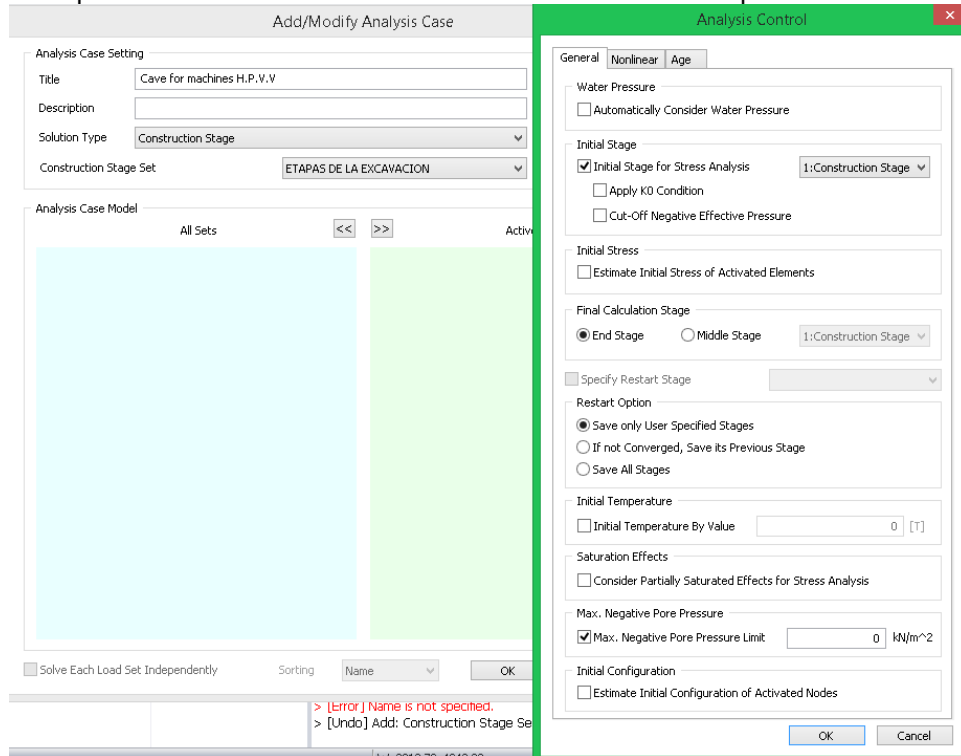
Ilustración 62 Definición de las etapas de construcción

The screenshot displays the 'Define Construction Stage' dialog box in Midas GTS NX. The dialog is configured for 'ETAPAS DE LA EXCAVACION' with Stage ID '1: Construction Stage-1' and Stage Name 'Construction Stage-1'. The 'Stage Type' is set to 'Stress'. The 'Activated Data' pane lists stages from ETAPA 1 to ETAPA 19 and LANCZADO 10 and 11. The 'Deactivated Data' pane lists 'Mesh', 'Boundary Condition', 'Static Load', and 'Contact'. The 'Initial Condition' section includes options for 'Define Water Level For Global', 'Define Water Level For Mesh Set', 'LDF...', 'Clear Displacement', and 'Slope Stability(SRM)'. A 'Load Distribution Factor' dialog is also visible, showing a table with columns 'After Current Stage' and 'Distribution Factor'.

After Current Stage	Distribution Factor
1	0.4000
2	0.3000
3	0.3000
4	

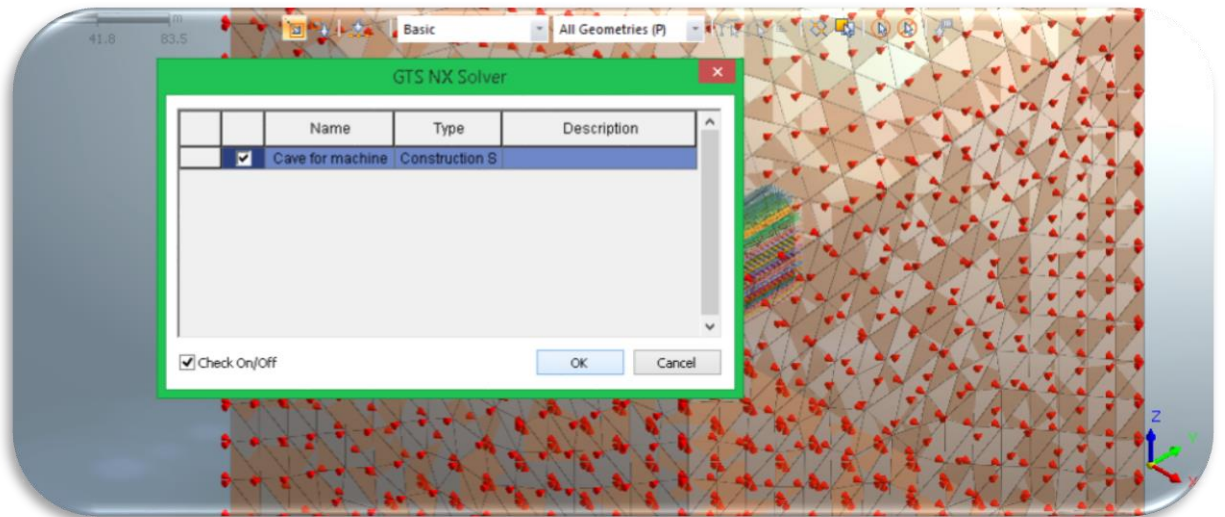
Fuente. Interfaz Midas GTS NX, Elaboración propia.

Ilustración 63 Aplicación en el modelo del estado de esfuerzos en la etapa 1



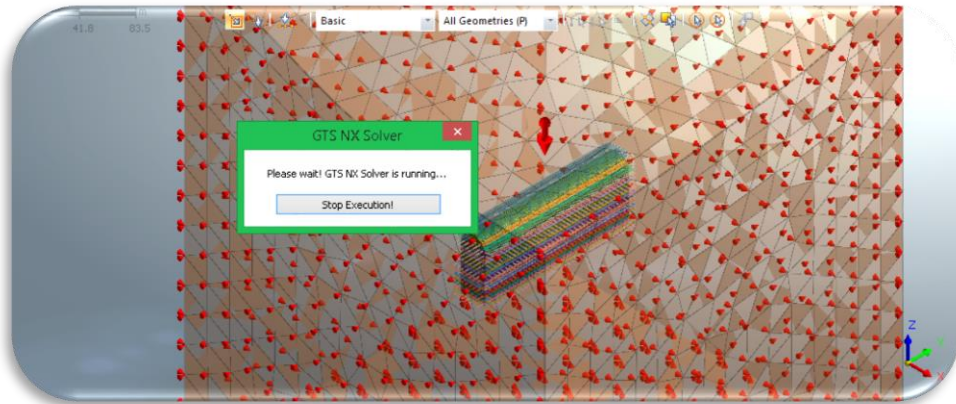
Fuente. Interfaz Midas GTS NX, Elaboración propia.

Ilustración 64 Resolver modelo



Fuente. Interfaz Midas GTS NX, Elaboración propia.

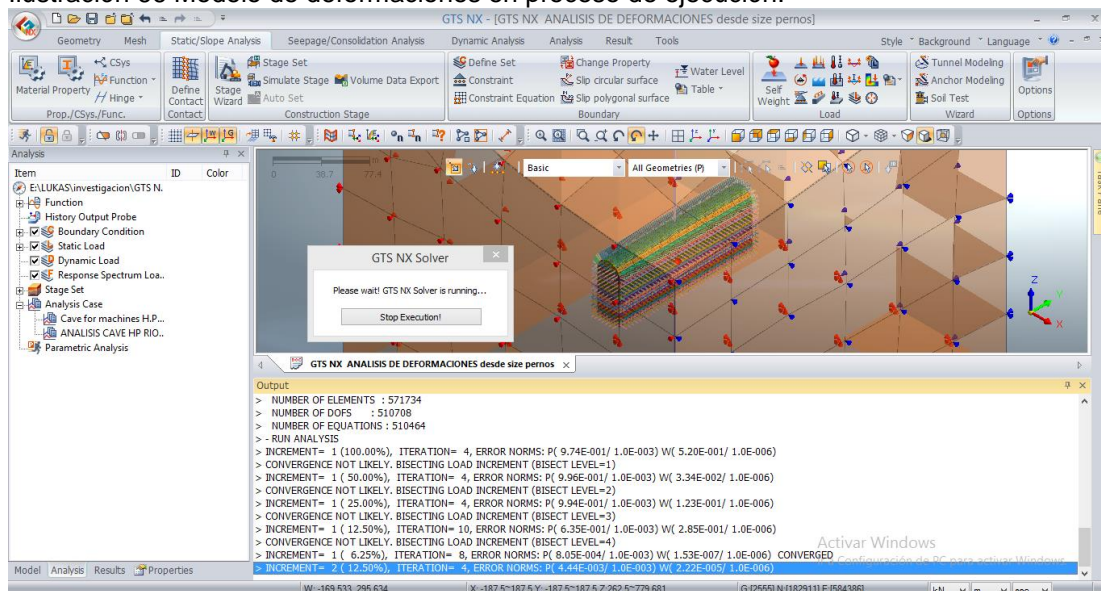
Ilustración 65 Corriendo la solución del modelo



Fuente. Interfaz Midas GTS NX, Elaboración propia.

El análisis de las deformaciones complementa el estudio realizado donde se obtienen deformaciones admisibles o que no son admisibles para el tipo de obra que hizo parte del estudio.

Ilustración 66 Modelo de deformaciones en proceso de ejecución.



Fuente. Interfaz Midas GTS NX, ejecución propia del software.

El tiempo estimado de ejecución del modelo de elementos finitos se estima en 15 días.

8. PRESUPUESTO

El presente presupuesto es generalizado en costos globales.

Tabla 19 Presupuesto

CAVERNA CASA DE MAQUINAS			
DIMENCIONES			
ANCHO	24		
ALTO	50		
LARGO	150		
CONDICIONES DE LA MALLA TENDONES			
TECHO		CANTIDAD	PRECIO
ESPACIADO (m)	1		
LONGITUD (m)	12		
AREA (m2)	3600		
AREA DE INFLUENCIA (m2)	1	3600	
PARED		CANTIDAD	
ESPACIADO (m)	3		
LONGITUD (m)	6		
AREA (m2)	17400		
AREA DE INFLUENCIA (m2)	9	1933,333333	
COSTOS			
LONGITUD TOTAL DE ACERO #8 (m)		54800	
METRO LINEAL BARRA # 8 (COP)	8000		\$ 438.400.000,00
LONGITUD TOTAL DE INYECCIÓN		27400	
METRO LINEAL INYECCIÓN (COP)	55000		\$ 1.507.000.000,00
CONDICIONES DE LA EXCAVACION			
GENERAL			
VOLUMEN (m3)		180000	
EXCAVACION roca dura (m3) (COP)	1920000		\$ 345.600.000.000,00
COSTO TOTAL EXCAVACIÓN Y ESTABILIDAD			\$ 347.545.400.000,00
ADMINISTRACION IMPREVISTOS Y UTILIDADES			\$ 86.886.350.000,00
COSTO TOTAL			\$ 434.431.750.000,00

Fuente. Elaboración propia

8 CONCLUSIONES

- ✓ Determinada la localización de las casas de maquinas y excavaciones subterráneas propias del proyecto hidroeléctrico, en particular la ubicación precisa en el flanco sur de la presa, estribo izquierdo; la identificación del macizo, reconocimiento de la trayectoria de flujo y el componente geomorfológico correspondiente a la orografía son algunas de las características físicas adoptadas que respaldan la factibilidad del desarrollo energético en la región.
- ✓ Identificados los diferentes tipos de cuñas, estas generaban inestabilidad, por lo que se asignaron patrones de pernos en la bóveda y en los hastiales; en este procedimiento se promovió el incremento del factor de seguridad. Teniendo en cuenta el análisis de los criterios de falla de Hoek & Brown y Mohr Coulomb, las recomendaciones empíricas para el sostenimiento cumplen en la revisión del comportamiento de los pernos ante mecanismos de falla, bloques inestables y squeezing o deformación excesiva.
- ✓ Se analizó el comportamiento geo-mecánico del macizo, la disposición de este para excavaciones es buena porque la resistencia de la roca y estado de tensiones habilitan la factibilidad de la excavación. Para la construcción de la caverna subterránea como centro de esta investigación se debe hacer uso exclusivo del enlace de la Orientación Vs la Presión de Soporte y el Área de excavación; el análisis geotécnico, geológico e hidrogeológico permitió identificar la facilidad constructiva de la obra y la verificación de las etapas constructivas.

9 RECOMENDACIONES

- ✓ Para el estudio de factibilidad en el diseño del sostenimiento, también deben abordarse escenarios en los cuales se relacione el volumen de las cuñas y la cantidad de cuñas presentes en cada variación de la orientación de la caverna.
- ✓ Según las dimensiones de la obra se propone identificar el patrón de cuñas en los primeros avances de excavación y estabilización, identificar esta distribución de cuñas afecta directamente los costos y seguridad de manera positiva para la correcta construcción de la caverna.
- ✓ Se deben ejecutar varias iteraciones del procedimiento ejecutado en este proyecto, variando en particular el dimensionamiento del sostenimiento para las tres metodologías de análisis: Elástico, Mohr Coulomb y Hoek & Brown relacionar los resultados obtenidos para cada iteración y corroborar la alternativa más óptima para la excavación.
- ✓ El presupuesto evaluado permite tener constancia del costo de la obra en términos aproximados, durante la evaluación del terreno en la excavación, estos costos máximos pueden reducir o aumentar según eventualidades como que no halla la necesidad de aplicar sostenimiento en cuñas específicas, o posibles derrumbes y alteraciones impertinentes del macizo.

10 BIBLIOGRAFÍA

BIAN, KANG, Xiao. Investigación del método de optimización para la excavación caverna subterránea, Tecnología de Computación Inteligente y Automatización [en línea]. 11 de octubre de 2009 vol.3, p 269-272[1 de Marzo de 2016]. ISBN-13: 9780769538044. Disponible en: <http://www.sciencedirect.com.ugc.elogim.com/>

BROWN, E.T. (1970). Strength of models of rock with intermittent joints. J. Soil Mech. Foundn Div., ASCE 96, SM6, 1935-1949. (30 septiembre de 2016)

CHENG, Y., and LIU, S. (1990). Power caverns of the Mingtan Pumped Storage Project, Taiwan. In Comprehensive Rock Engineering. (Ed. J.A. Hudson), Oxford: Pergamon, 5, 111–132. (30 septiembre de 2016)

DANE, Estadísticas población Cundinamarca, Anuario población 2011 [línea]. Colombia, 25 Pag. [citado 22 sept., 2016] http://www.cundinamarca.gov.co/wps/wcm/connect/9cb2f92d-f186-4688-b0e3-320e53bc7c1b/Anuario_poblacion.pdf?MOD=AJPERES

GONZALES VALLEJO et al., Ingeniería Geológica, Túneles, Diario de Geofísica Aplicada, Volumen 1, 2003 , páginas 488-539, Mercedes Ferrer, Luis Otuño, Carlos Oteo, 13 octubre de 2015

HOEK, E (1968). Brittle failure of rock. Rock Mechanics in Engineering Practice. (Eds. K.G. Stagg and O.C. Zienkiewicz), 99-124. London: Wiley. (30 septiembre de 2016)

HOEK, E. and BROWN, E.T. (1980). Empirical strength criterion for rock masses. J. Geotech. Engng Div., ASCE 106 (GT9), 1013-1035.(30 septiembre de 2016)

HOEK, E and BROWN, E.T. (1988). The Hoek- Brown failure criterion 1988 update. Proc. 15 th Canadian Rock Mech. Symp. (Ed. .C. Curran), 31–38. Toronto, Dept. Civil Engineering, University of Toronto. (30 septiembre de 2016)

HOEK, E. and BROWN, E.T. (1980). Underground Excavations in Rock. London, Instn. Min. Metall.

IENIAWSKI Z.T. (1976). Rock mass classification in rock engineering. Exploration for Rock Engineering, Proc. Of the Symp., (ed. Z.T. Bi- eniawski). 1, 97-106. Cape Town, Balkema. (30 septiembre de 2016)

JIANG, XUELIANG Análisis dinámico del techo de caverna subterránea bajo la teoría de carga de placa gruesa. *Automatización y Control Mecánico* 2011, [en línea]. 15 julio 2011 MACE. art.5988336, ISBN-13: 9781424494392 [27 de julio de 2016]. Disponible en: <http://www.sciencedirect.com.ugc.elogim.com/>

LORIG, L., and VARONA, P. (2001). Practical slopestability analysis using finite-difference codes. *Slope stability in surface mining*. (Eds. W.A. Hustrulid, M.J. McCarter and D.J.A. Van Zyl). Littleton: Society for Mining, Metallurgy and Exploration, Inc., 115–124. (30 septiembre de 2016)

PIERCE, M., BRANDSHAUGG, T., and WARD, M. (2001). Slope stability assessment at the Main Cresson Mine. *Slope stability in surface mining*. (eds. W.A. Hustrulid, M.J. McCarter and D.J.A. Van Zyl). Littleton: Society for Mining, Metallurgy and Exploration, Inc., 239-250. (30 septiembre de 2016)

SOBERG, J., SHARP, J.C., and MALOREY, D.J. (2001). Slope stability at Aznalcóllar. *Slope stability in surface mining*. (Eds. W. A. Hustrulid, M. J. McCarter and D.J.A. Van Zyl). Littleton: Society for Mining, Metallurgy and Exploration, Inc., 183-202. (30 septiembre de 2016)

SONMEZ, H., and ULUSAY, R. (1999). Modifications to the geological strength index (GSI) and their applicability to the stability of slopes. *Int. J. Rock Mech. Min. Sci.*, 36 (6), 743–760.

UPME, COLCIENCIAS, UNIVERSIDAD PONTIFICIA JAVERIANA. Op. Cit., p.6 DANE, Censo general 2005-Nivel nacional[*línea*]. Colombia, 498 Pág. [citado 22 sept., 2016 <http://www.dane.gov.co/files/censos/libroCenso2005nacional.pdf>

WANG, WEN, Jinan. Análisis de la deformación para un grupo de discontinuidades de una caverna subterránea con paso a paso de excavación, *Tecnología moderna construcción de túneles* [en línea]. 1 de junio de 2015 vol. 52, p.182-188, [1 de Marzo de 2016]. ISSN: 10096582. Disponible en: <http://www.sciencedirect.com.ugc.elogim.com>