

Maestría en Ingeniería Civil

**Evaluación de Amenaza por Deslizamiento para Rellenos
Antrópicos en la Ciudad de Manizales - Colombia**

Julián David Mesa González

Bogotá, D.C., 23 de diciembre de 2019

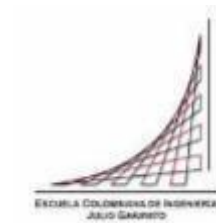


**Evaluación de Amenaza por Deslizamiento para Rellenos
Antrópicos en la Ciudad de Manizales - Colombia**

**Tesis para optar al título de magíster en Ingeniería Civil, con
énfasis en Geotecnia**

**I.C., M.Sc., M.G., DIC, Ph.D. Carlos Eduardo Rodríguez Pineda
Director**

Bogotá, D.C., 23 de diciembre de 2019



La tesis de maestría titulada “Evaluación de Amenaza por Deslizamiento para Rellenos Antrópicos en la Ciudad de Manizales-Colombia”, presentada por Julián David Mesa González, cumple con los requisitos establecidos para optar al título de Magister en Ingeniería Civil con énfasis en Geotecnia.



Director de la tesis
Carlos Eduardo Rodríguez Pineda

Jurado
Manuel García López

Jurado
José Vicente Amórtegui Gil

Bogotá, D.C., 23 de diciembre de 2019

Dedicatoria

A Dios por darme la oportunidad, sabiduría y el entendimiento para cursar esta maestría y desarrollar este trabajo de grado. A mi madre, hermano y esposa por siempre apoyarme en los momentos más difíciles para llegar a este logro.

Agradecimientos

A Dios por darme la oportunidad, sabiduría y el entendimiento para cursar esta maestría y desarrollar este trabajo de grado. A mi madre, hermano y esposa por siempre apoyarme en los momentos más difíciles para llegar a este logro.

A los Ingenieros Carlos Eduardo Rodríguez Pineda y Oscar Correa Calle por ser los guías en la ejecución de este trabajo de grado, por el aporte de sus conocimientos. Al Ingeniero Juan Sebastián Valderrama por facilitarme información de su tesis y resolverme inquietudes ya que realizo su tesis de maestría en un tema similar.

A las instituciones, empresas y personas que suministraron información para el desarrollo de este trabajo, en especial AQUATERRA S.A, IDEA UNAL MANIZALES, CORPOCALDAS, IGAC.

A los Ingenieros Luis Mesa y Julio Salgado y a la empresa CONCOL S.A, por emplearme durante el tiempo de la maestría y facilitarme el recurso tiempo y así lograr para obtener este título.

A mi grupo de estudio de la Maestría.

Resumen

En los últimos años la amenaza natural que ha causado mayores daños, damnificados y pérdidas de vidas humanas en la ciudad de Manizales han sido los deslizamientos de tierra; estos se han generado luego de presentarse lluvias en la ciudad durante muchos días seguidos o debido a la ocurrencia de lluvias de alta intensidad en periodo de tiempo muy corto.

Debido a que en la ciudad existen rellenos de cauce que se construyeron entre los años 1960 a 1980, sobre los cuales en la actualidad están asentados barrios, de los cuales se localizaron doce en la vertiente norte del río Chinchiná, se realizó el presente estudio con el propósito de evaluar la condición de amenaza por deslizamiento que presentan estos rellenos, considerando los factores detonantes precipitaciones y sismos.

El Municipio de Manizales cuenta con el Plan de Ordenamiento Territorial 2017-2031, en el cual se expone un mapa de amenaza por deslizamiento para el área urbana de la ciudad. Sin embargo, consultando las diferentes fuentes, no se encontraron estudios puntuales donde se evaluará la amenaza por deslizamiento para rellenos antrópicos en la ciudad; por esto surge este estudio.

Cabe anotar que el desarrollo de esta tesis inició antes de la elaboración del POT vigente para Manizales.

Se localizaron 12 rellenos antrópicos de cauce en la vertiente norte del río Chinchiná; se elaboraron los geométricos correspondientes, basados en cartografía de los años 1960 y 2004 obtenida de planchas del Instituto Geográfico Agustín Codazzi (IGAC) relacionadas en la Tabla 15.

Dichos rellenos se componen de dos estratos, materiales antrópicos y Formación Casabianca, a los cuales se les asignaron sus propiedades físicas, mecánicas e hidráulicas con el fin de caracterizarlos.

Con base en los registros históricos de precipitaciones de las estaciones pluviométricas El Carmen, Hospital y Agronomía, se proyectaron y calcularon unos valores de intensidad (mm/día) para periodos de retorno (T_r) de 2.33, 10, 50, 100, 250 años. Dichos valores se utilizaron para definir la tasa de infiltración, que se le ingresarían a cada uno de los rellenos como detonante lluvia.

El cálculo de esta tasa de infiltración (mm/día) se muestra en el numeral 4.5.1.

El detonante sismo se incluyó en el análisis de estabilidad de los 12 rellenos, como una aceleración sísmica pico para unos periodos de retorno determinados, T_r : 31 años, 225 años y 475 años.

Posteriormente se generan 720 escenarios de análisis, 60 por relleno, resultantes de las diferentes combinaciones de periodos de retorno T_r de los detonantes sismo y lluvia y propiedades mecánicas del estrato de relleno. A continuación, se corrió el análisis de estabilidad de cada escenario por medio del software slide, con el fin de conocer el valor del factor de seguridad FS de cada relleno.

Conocido el resultado del factor de seguridad (FS) de cada escenario por relleno, se calculó la probabilidad de falla respectivamente y se realizó la evaluación de amenaza por deslizamiento.

Este análisis consideró la incertidumbre en los parámetros de resistencia del suelo, cohesión y ángulo de fricción del estrato de relleno antrópico, y la probabilidad de ocurrencia de los factores detonantes, lluvia y sismo.

A continuación, se mencionan algunas de las conclusiones del estudio:

- Los 12 rellenos a los cuales se les realizó la evaluación de amenaza por deslizamiento presentaron un nivel de amenaza baja en todos los escenarios analizados, ya que sus probabilidades de falla total fueron menores a 0.0016, de acuerdo con lo ilustrado en la Tabla 41.

- Se definieron 80 escenarios de análisis para cada uno de los rellenos analizados, 60 en condición pseudoestática y 20 en condición estática, resultantes de la combinación de las variables: Detonante lluvia y detonante sismo en los periodos de retorno definidos; propiedades mecánicas del estrato de relleno antrópico, utilizando valores promedio de cohesión (c') y ángulo de fricción (ϕ') más o menos (+/-) sus respectivas desviaciones estándar.

Por lo tanto, se corrieron 720 análisis de estabilidad en condición pseudoestática y 240 en condición estática, para un total de 960 que representan los correspondientes escenarios de análisis. Estas combinaciones se ilustran en la Tabla 2.

- Solo 20 escenarios del relleno Villa Carmenza (VCM), de los 720 analizados en condición pseudoestática, arrojaron resultados de factores de seguridad FS menores a 1. Estos resultados se dieron con la aceleración sísmica respectiva para un Tr: 475 años; los otros 700 arrojaron valores de factor de seguridad FS entre 1.05 y 3.183.

- La probabilidad de falla total anual para cada uno de los 12 rellenos es igual a cero (0).

- Los resultados de los factores de seguridad (FS) podrían estar condicionados por la pendiente longitudinal y el espesor del estrato de relleno antrópico. Lo anterior se afirma apoyado en los datos incluidos en la Tabla 1, la cual se elaboró con base en lo observado en cada uno de los rellenos.

- De la Tabla 1 se observa que el relleno Villa Carmenza (VCM) es el que tiene mayor espesor, 22.3 m, y la pendiente mayor, 35°. Esto comparado con los demás rellenos y es el que obtuvo en un escenario de análisis el factor de seguridad más bajo FS = 0.937.

Tabla 1 Factor de seguridad mínimo FS obtenido por relleno comparado con la geometría del estrato de relleno

NOMBRE RELLENO	ID	PENDIENTE MAX (°)	ESPESOR MAXIMO DEL ESTRATO RELLENO ANTROPICO (m)	ALTURA MAXIMA DEL MODELO (m)	LONGITUD EN LA BASE DEL MODELO (m)	FACTOR DE SEGURIDAD MINIMO EN STAGE DIA 391 EN EL ESCENARIO MAS DESFAVORABLE
La Isla	ISL	20°	8.5	49	275	1.327
El Nevado	NEV	18°	9.2	77	285	1.218
Alamos	ALM	6°	8.5	42	240	1.635
El Palmar	PLM	8°	8.6	42	285	1.344
Alamos-Velez	AVL	9°	6.3	30	170	1.599
Camino del Palmar	CPM	17°	10	37	174	1.219
Villa Carmenza	VCM	35°	22.3	76.5	685	0.937
Bajo Prado	BPD	20°	6.4	27.7	85	1.496
El Guamal	GML	6°	5.8	76	430	1.776
El Paraiso	PAR	15°	4.5	49.5	164	1.597
Campin-Persia	CPR	17°	10.2	44.9	210	1.191
Bajo Prado sector centro medico	BPC	22°	7.5	33.9	158	1.414

- Caso contrario ocurre con rellenos como Álamos (ALM) y El Guamal (GML), que con pendientes máximas de 6° y espesores 8.5m y 5.6 respectivamente, obtuvieron los valores más altos de factor de seguridad 1.635 y 1.776.

- Teniendo en cuenta lo observado en los resultados e incluidos de la Tabla 1, se podría suponer que los rellenos en Manizales que tengan pendientes longitudinales máximas hasta 20°, se comportarían estables y su probabilidad de falla seria baja.

Esto en un escenario que combine una aceleración sísmica para un Tr: 475 años y una lluvia con intensidad correspondiente a un Tr: 250 años, de acuerdo con los valores mencionados en este estudio.

- En los modelos con altura mayor a 45m, exceptuando el relleno Villa Carmenza (VCM), se observó que se crea una superficie impermeable entre los dos estratos, relleno antrópico y formación Casabianca; esto generó un nivel freático NAF colgado, desde la condición inicial del modelo hasta la condición final (stages 391 días).

Por lo tanto, en el estrato de la formación casabianca se generan succiones.

- En los modelos con altura menor a 45m, el volumen de agua logra ingresar y saturar los dos estratos. Esto ocurre únicamente en la longitud del estrato de relleno antrópico.

Por lo tanto en dicha longitud se presentan presiones de poros positivas en toda la altura del modelo, es decir tanto en el estrato de relleno antrópico como la Formación casabianca.

- La calificación de la amenaza BAJA, obtenida para los 12 rellenos, es coherente con lo ilustrado en el mapa de amenaza por deslizamiento de Manizales, incluido en el POT vigente para la ciudad, y luego de haber realizado la superposición de los perímetros de cada uno de los rellenos sobre este mapa, el cual se muestra en la Figura 16 y se adjunta en el Anexo 18.

Cabe aclarar que este mapa de amenaza incluido en el POT vigente para Manizales, fue creado con posterioridad a la fecha de inicio del desarrollo de esta tesis.

Sin embargo los perímetros de los rellenos Villa Carmenza (VCM) y El Paraíso (PAR), en el mapa de amenaza por deslizamiento para Manizales, Anexo 18 y Figura 16, abarcaron unas áreas pequeñas de color café claro y roja respectivamente, lo que indicaría de acuerdo a la Tabla 13, una tasa anual de ocurrencia de deslizamientos entre 1% y 2% y entre 2% y 3% respectivamente.

- La hipótesis de considerar como cierto que los depósitos de rellenos antrópicos en Manizales presentan amenaza por deslizamiento alta, en épocas de precipitaciones altas con mínimo 25 días de lluvias acumuladas antecedentes y adicionarle un aguacero intenso de un solo día, se podría descartar de acuerdo con los resultados de este estudio.

Esto concuerda con lo revisado en la literatura, medios de comunicación y diferentes tesis, donde no se evidenciaron antecedentes que demuestren que alguno los rellenos analizados se hayan desestabilizado desde su construcción.

Por el contrario los barrios que están asentados sobre estos aún continúan allí, en estado normal.

- El motivo por el cual se generarían los deslizamientos en la ciudad, considerando los detonantes incluidos en esta tesis y las demás consideraciones, sería que las aguas de escorrentía producto de las lluvias, son mal manejadas y corren libremente por las caras de los taludes generando erosión y desencadenando deslizamientos superficiales y flujos de volumen pequeño.

ÍNDICE GENERAL

1. Introducción	29
2. Objetivos.....	36
2.1 Objetivo General	36
2.2 Objetivos Específicos	36
3. Marco de Referencia.....	37
3.1 Marco Conceptual	37
3.1.1 Gestión del Riesgo.....	37
3.1.1.1 Amenaza y análisis.....	38
3.1.1.2 Vulnerabilidad.....	39
3.1.1.3 Riesgo de desastres.....	39
3.1.2 Plan municipal de gestión del riesgo de desastres de Manizales (PMGRD).....	39
3.2 Marco de Antecedentes.....	45
3.2.1 Antecedentes de Investigación	45
3.2.2 Antecedentes del Problema	66
3.3 Marco Geográfico.....	77
3.3.1 Descripción del sitio de estudio.....	77
3.3.2 Geología Regional	87
3.3.3 Geología Estructural	88
3.3.4 Geología Local.....	89
3.3.4.1 Formación Casabianca.....	93
3.3.4.1.1 Depósitos de Flujos de Lodo de la Formación Casabianca.....	95
3.3.4.2 Depósitos de lluvia piroclástica:.....	96
3.3.4.3 Rellenos Antrópicos.....	97
3.4 Marco Teórico	97
3.4.1 Permeabilidad en suelos.....	97

3.4.2 Modelo de retención de Van Genuchten	98
3.4.3 Equilibrio Límite: Método de Dovelas	102
3.4.3.1 Método de Morgenstern - Price	103
3.4.4 Confiabilidad	108
3.4.4.1 Índice de confiabilidad y probabilidad de falla	109
3.4.4.2 Método probabilístico estimativos puntuales	114
4. Metodología	118
4.1 Recopilación de información.....	118
4.2 Selección de rellenos	120
4.3 Digitalización cartográfica.....	122
4.3.1 Digitalización y delimitación de rellenos	122
4.3.2 Superposición de cartografías.....	125
4.3.3 Perfiles longitudinal y geométrico.....	130
4.4 Perfil geológico-geotécnico para la modelación.....	134
4.4.1 Propiedades físicas y mecánicas por estrato	137
4.4.2 Propiedades hidráulicas.....	145
4.5 Detonantes en la modelación	151
4.5.1 Detonante Lluvia	151
4.5.2 Detonante sismo	163
4.6 Escenarios de análisis.....	167
4.7 Codificación escenarios.....	168
4.8 Calibración de un relleno tipo	170
4.9 Análisis de estabilidad de modelo tipo.....	172
4.9.1 Relleno el Nevado (NEV)	172
4.10 Probabilidad de Falla y Evaluación de la amenaza.....	185
5. Resultados y Análisis de Resultados	190

5.1 Resultados del Factor de Seguridad y análisis de resultados	190
5.1.1 Relleno La Isla (ISL)	192
5.1.2 Relleno el Nevado (NEV)	197
5.1.3 Relleno Álamos (ALM)	202
5.1.4 Relleno El Palmar (PLM).....	208
5.1.5 Relleno Alamos-Velez (AVL).....	213
5.1.6 Relleno Camino del Palmar (CPM)	218
5.1.7 Relleno Villa Carmenza (VCM)	223
5.1.8 Relleno Bajo Prado (BPD)	229
5.1.9 Relleno El Guamal (GML)	234
5.1.10 Relleno El Paraíso (PAR).....	239
5.1.11 Relleno Campin – Persia (CPR).....	244
5.1.12 Relleno Bajo Prado Sector Centro Medico (BPC)	249
5.2 Resultados de la probabilidad de falla y análisis de resultados	254
5.2.1 Relleno El Nevado (NEV).....	254
5.3 Cálculo de aceleraciones sísmicas para FS=1	261
5.4 Curvas de Amenaza	266
6. Conclusiones	267
6.1 Conclusiones.....	267
7. Referencias.....	272
8. Anexos.....	275

ÍNDICE DE TABLAS

Tabla 1 Factor de seguridad mínimo FS obtenido por relleno comparado con la geometría del estrato de relleno	9
Tabla 2 Escenarios de análisis por cada relleno.	33
Tabla 3 Programas, subprogramas y acciones a ejecutar relacionadas con gestión del riesgo en el Municipio de Manizales	43
Tabla 4 Relaciones IDF. Fuente: (Valderrama Giraldo, 2019).....	50
Tabla 5 Comparación de intensidades de evento. Fuente: (Valderrama Giraldo, 2019)...	51
Tabla 6 Eventos de lluvia detonante investigación. Fuente: (Londoño Linares, 2015).....	53
Tabla 7 Lluvia antecedente para diferentes intervalos Fuente: (Londoño Linares, 2015) .	53
Tabla 8 Muestra de análisis para la elaboración de modelos de susceptibilidad. Fuente: (Londoño Linares, 2015).....	56
Tabla 9 Criterios para categorizar la susceptibilidad. Fuente: (Londoño Linares, 2015)...	59
Tabla 10 Registro histórico de deslizamientos en Manizales. Fuente: Antigua página www.gestiondelriesgomanzales.com - Sistema Nacional para la Gestión del Riesgo de Desastres, SIGPAD.	69
Tabla 11 Histórico de desastres en Manizales. Fuente: Instituto de estudios ambientales IDEA – Universidad Nacional de Colombia-Sede Manizales.....	70
Tabla 12 Reporte de registros de movimientos en masa para la ciudad de Manizales. Fuente Servicio Geológico Colombiano SGC.	71
Tabla 13 Tasa anual de ocurrencia de deslizamientos para la ciudad de Manizales. Fuente: (ALCALDIA DE MANIZALES, 2017)	75
Tabla 14 Listado y nombre de rellenos que hacen parte de documento base de este estudio (Osorio Sierra & Zuluaga Moreno, 2003).	85
Tabla 15 Cartografía y Ortofotografías utilizada en el desarrollo del estudio.....	122
Tabla 16 Listado de los 12 rellenos seleccionados para el estudio.	134
Tabla 17 Perfil geológico - geotécnico definido para la modelación de estabilidad de los 12 rellenos. Fuente: Propia.....	136
Tabla 18 Parámetros físicos y mecánicos estratos modelo geotécnico. Fuente: Propia.	140
Tabla 19 Propiedades físicas y mecánicas para el estrato de relleno antrópico del perfil geotécnico. Fuente: Aquaterra S.A	140

Tabla 20 Clasificación SUCS por muestra y por estudio para estrato de relleno antrópico del perfil geotécnico. Fuente: Aquaterra S.A.....	141
Tabla 21 Propiedades físicas y mecánicas para el estrato de cenizas volcánicas. Fuente: Aquaterra S.A	142
Tabla 22 Clasificación SUCS por muestra y por estudio para estrato de cenizas volcánicas. Fuente: Aquaterra S.A	142
Tabla 23 Propiedades físicas y mecánicas para el estrato de Formación Casabianca del perfil Geotécnico. Fuente: Aquaterra S.A.....	143
Tabla 24 Clasificación SUCS por muestra y por estudio para estrato de Formación Casabianca del perfil geotécnico. Fuente: Aquaterra S.A	143
Tabla 25 Propiedades físicas y mecánicas para el estrato de relleno antrópico del perfil Geotécnico. Fuente: (Osorio Sierra & Zuluaga Moreno, 2003).....	144
Tabla 26 Valores de conductividad hidráulica o permeabilidad K_{sat} (m/d). Fuente: Corpocaldas	145
Tabla 27 Valores de permeabilidad K. Fuente: (Bowles, 1997).....	146
Tabla 28 Rangos de conductividad hidráulica. Fuente: (Das, 2007).....	146
Tabla 29 Valores de permeabilidad K_s (m/seg) para cada estrato del modelo relleno el Nevado	148
Tabla 30 Rangos de valores de propiedades físicas y mecánicas típicos para materiales que componen rellenos (ARANGO GARTNER, 2000)	149
Tabla 31 Rangos de valores de propiedades físicas y mecánicas típicos para materiales de la formación Casabianca (ARANGO GARTNER, 2000).....	150
Tabla 32 Precipitaciones máximas acumuladas de periodos de 1, 5, 10, 15, 20, 25, 30 días de la serie de datos de la estación completa el Carmen. Fuente: propia.....	154
Tabla 33 Precipitaciones (mm) proyectadas para los diferentes periodos de retorno T_r correspondientes con los diferentes periodos de lluvias acumuladas. Fuente: Propia ...	155
Tabla 34 Intensidades (mm/día) proyectadas para los diferentes periodos de retorno T_r correspondientes con los diferentes periodos de lluvias acumuladas. Fuente: Propia ...	155
Tabla 35 Precipitaciones (mm) diarias promedio por mes para cada año del registro histórico de la estación el Carmen. Fuente: Propia	157
Tabla 36 Intensidad de lluvias antecedentes de 25 días (mm/día) y aguacero evento (mm) por cada periodo de retorno T_r	158

Tabla 37 Ejemplo de los valores de intensidades que se le ingresaron a un relleno (Tr: 50 años). Incluye lluvias condición inicial de 365 días + lluvias detonantes (25 días A_{25} + aguacero evento A_1).	160
Tabla 38 Identificación ID de los 12 rellenos seleccionados.....	169
Tabla 39 Tabla de pruebas ensayo-error para calibración de modelo.....	171
Tabla 40 Calificación de la amenaza basada en el valor del factor de seguridad FS	185
Tabla 41 Calificación de la amenaza basada en el valor de la probabilidad de falla anual	186
Tabla 42 Periodos de retorno de lluvia y sismo para el cálculo de la probabilidad de falla	187
Tabla 43 Valores asignados a las variables cohesión (c') y ángulo de fricción (ϕ') para el cálculo de la probabilidad de falla del factor de seguridad (FS).	189
Tabla 44 Valores de momentos estadísticos del factor de seguridad FS, del relleno el Nevado para Tr lluvia: 2.33 años y Tr sismo: 31 años.....	255
Tabla 45 Valor del índice de confiabilidad del factor de seguridad FS, del relleno el Nevado para Tr lluvia: 2.33 años y Tr sismo: 31 años.....	255
Tabla 46 Valor de la NO probabilidad de falla del factor de seguridad FS, del relleno el Nevado para Tr lluvia: 2.33 años y Tr sismo: 31 años.....	255
Tabla 47 Valor de la probabilidad de falla del factor de seguridad FS, del relleno el Nevado para Tr lluvia: 2.33 años y Tr sismo: 31 años.....	256
Tabla 48 Resultados de probabilidad de falla del Relleno El Nevado (NEV)	258
Tabla 49 Aceleraciones sísmicas máximas con las que los 12 rellenos llega a la falla. Factor de seguridad FS=1	262
Tabla 50 Catalogo de sismos históricos importantes del Viejo Caldas Fuente: (Alcaldía de Manizales - CIMOC Universidad de los Andes, 2002).....	263
Tabla 51 Sismos relevantes con registros acelerográficos de la RSNC en la zona del Eje Cafetero. Fuente: (Alcaldía de Manizales - CIMOC Universidad de los Andes, 2002)....	264
Tabla 52 Registros disponibles del sismo de Armenia del 25 de Enero de 1999. Fuente: (Alcaldía de Manizales - CIMOC Universidad de los Andes, 2002)	265
Tabla 53 Eventos registrados por la red de acelerógrafos de la ciudad de Manizales. Fuente: (Alcaldía de Manizales - CIMOC Universidad de los Andes, 2002)	265
Tabla 54 Factor de seguridad mínimo FS obtenido por relleno comparado con la geometría del estrato de relleno	269

ÍNDICE DE FIGURAS

Figura 1 Diagrama de alineación de los objetivos específicos del plan municipal de gestión del riesgo del Manizales con las prioridades del Marco de Sendai (INGENIAR CAD/CAE LTDA, 2016)	41
Figura 2 Diagrama de alineación de los objetivos específicos del plan municipal de gestión del riesgo de Manizales con el plan nacional de gestión del riesgo (INGENIAR CAD/CAE LTDA, 2016)	42
Figura 3 Lluvia antecedente de 25 días y lluvia diaria con y sin deslizamientos del año 1993 (Terlien, 1997).	46
Figura 4 Condiciones de frontera para los 12 rellenos (Valderrama Giraldo, 2019).	47
Figura 5 Distribución de precipitaciones (promedios) en el año. Estación Agronomía. Fuente: (Londoño Linares, 2015).....	49
Figura 6 Inventario de eventos previos. Fuente: (Londoño Linares, 2015)	54
Figura 7 Muestra de análisis de la investigación. Fuente: (Londoño Linares, 2015).....	55
Figura 8 Diferentes modelos de RNA (Redes Neuronales Artificiales) calculados. Fuente: (Londoño Linares, 2015).....	57
Figura 9 Mapa de susceptibilidad por el método de Redes Neuronales Artificiales Fuente: (Londoño Linares, 2015).....	59
Figura 10 Superposición de los 12 rellenos (Polylineas en color amarillo) en el Mapa de susceptibilidad por el método de Redes Neuronales Artificiales de (Londoño Linares, 2015). Fuente: Propia	60
Figura 11 Zoom de la Figura 10 Superposición de los 12 rellenos en el Mapa de susceptibilidad por el método de Redes Neuronales Artificiales de (Londoño Linares, 2015). Fuente: Propia	61
Figura 12 Modelo de susceptibilidad elaborado con topografía del año 2004. Fuente: (Contrato interadministrativo No.240.2012 suscrito entre Corpocaldas y la Universidad Nacional de Colombia, Sede Manizales, 2014).....	62
Figura 13 Modelo de susceptibilidad elaborado con topografía del año 2010. Fuente: (Contrato interadministrativo No.240.2012 suscrito entre Corpocaldas y la Universidad Nacional de Colombia, Sede Manizales, 2014).....	62

Figura 14 Umbrales ID propuestos para Manizales. Fuente: (Contrato interadministrativo No.240.2012 suscrito entre Corpocaldas y la Universidad Nacional de Colombia, Sede Manizales, 2014)	63
Figura 15 Aguaceros del segundo periodo lluvioso del año 2013 que generaron deslizamientos. Fuente: (Contrato interadministrativo No.240.2012 suscrito entre Corpocaldas y la Universidad Nacional de Colombia, Sede Manizales, 2014)	64
Figura 16 Mapa de amenaza por deslizamiento para el área urbana de la ciudad de Manizales. Fuente: Sistema de información geográfica SIG Alcaldía de Manizales	65
Figura 17 Eventos registrados entre 1997 y 2017 por categoría y polígono localizados en mapa de Manizales. Fuente: (Valderrama Giraldo, 2019)	73
Figura 18 Superposición de eventos (color azul aguamarina o verde claro) por (Valderrama Giraldo, 2019) coincidentes con localización de los 12 rellenos (Magenta) en mapa de Manizales. Fuente: Propia	74
Figura 19 Zoom de Figura 18 Superposición de eventos sobre localización de los 12 rellenos en mapa de Manizales. Fuente: Propia.....	74
Figura 20 Superposición de eventos y perímetros de los 12 rellenos sobre mapa de amenaza por deslizamientos de Manizales. Fuente: Propia.....	76
Figura 21 Zoom de Figura 20 Superposición de eventos y perímetros de los 12 rellenos sobre mapa de amenaza por deslizamientos de Manizales. Fuente: Propia	76
Figura 22 Orthoimagen relleno Villacarmenza (Izquierda) -relleno El Paraíso (Derecho). 77	
Figura 23 Fotografía aérea de la Vertiente norte del río Chinchiná Año 1946. Área donde se localizan los 12 rellenos objeto de análisis (Osorio Sierra & Zuluaga Moreno, 2003).....	79
Figura 24 Fotografía aérea de la Vertiente norte del río Chinchiná Año 1964. Área donde se localizan los 12 rellenos objeto de análisis (Osorio Sierra & Zuluaga Moreno, 2003).....	80
Figura 25 Fotografía aérea No1 de la Vertiente norte del río Chinchiná Año 1975. Área donde se localizan los 12 rellenos objeto de análisis (Osorio Sierra & Zuluaga Moreno, 2003)	80
Figura 26 Fotografía aérea No2 de la Vertiente norte del río Chinchiná Año 1975. Área donde se localizan los 12 rellenos objeto de análisis (Osorio Sierra & Zuluaga Moreno, 2003)	81
Figura 27 Fotografía aérea No1 de la Vertiente norte del río Chinchiná Año 1987. Área donde se localizan los 12 rellenos objeto de análisis (Osorio Sierra & Zuluaga Moreno, 2003)	81

Figura 28 Fotografía aérea No2 de la Vertiente norte del rio Chinchiná Año 1987. Área donde se localizan los 12 rellenos objeto de análisis (Osorio Sierra & Zuluaga Moreno, 2003)	82
Figura 29 Fotografía aérea No1 de la Vertiente norte del rio Chinchiná Año 1993. Área donde se localizan los 12 rellenos objeto de análisis (Osorio Sierra & Zuluaga Moreno, 2003)	83
Figura 30 Fotografía aérea No2 de la Vertiente norte del rio Chinchiná Año 1993. Área donde se localizan los 12 rellenos objeto de análisis (Osorio Sierra & Zuluaga Moreno, 2003)	83
Figura 31 Ortofotografía aérea de la Vertiente norte del rio Chinchiná Año 2015. Área donde se localizan los 12 rellenos objeto de análisis. Fuente: CORPOCALDAS	84
Figura 32 Mapa de localización general por cada una de las 9 subzonas en las cuales se encuentran los diferentes rellenos mencionados en la Tabla 14. Fuente: (Osorio Sierra & Zuluaga Moreno, 2003)	87
Figura 33 Mapa Geológico estructural de Manizales. Fuente: (Duque Escobar, 2014)	90
Figura 34 Mapa geología local zona de estudio (Duque Escobar, 2014)	91
Figura 35 Mapa geológico de Manizales que incluye trazados de perfiles geológicos (Duque Escobar, 2014)	92
Figura 36 Perfil Geológico C-C´ de Manizales (Duque Escobar, 2014)	92
Figura 37 Perfil Geológico E-E´ de Manizales (Duque Escobar, 2014)	92
Figura 38 Perfil Geológico F-F´ de Manizales (Duque Escobar, 2014)	93
Figura 39 Fotografía de los flujos de escombros de la Formación casabianca (Naranjo Henao & Rios Alzate, 1989)	95
Figura 40 Curva experimental de retención de agua. Permeabilidad (m/s) vs Succión (kPa)	101
Figura 41 Curva experimental de retención de agua. Contenido de agua (m3/m3) vs Succión (kPa)	101
Figura 42 Esquema estático - Método de Morgenstern-Price: Fuente: Tutorial software Geo5	103
Figura 43 Función Half-sine (media onda sinusoidal). Fuente: Tutorial software Geo5	105
Figura 44 Representación de función de densidad de probabilidades de Q y R (Baecher & Christian, 2003)	111

Figura 45 Densidad de probabilidad (a) y probabilidad acumulada (b) para el margen (M) (Baecher & Christian, 2003).....	112
Figura 46 Diagrama de flujo para selección de rellenos.....	120
Figura 47 Localización de rellenos que digitalizados. Fuente: propia.....	124
Figura 48 Superposición de cartografías, año 2004 (reciente) sobre año1960 (antigua). Fuente: propia.....	126
Figura 49 Modelo TIN de cartografía del año 1960 de la zona de estudio. Fuente: propia	127
Figura 50 Modelo TIN de cartografía del año 2004 de la zona de estudio. Fuente: propia	127
Figura 51 Modelo raster de cartografía del año 1960 de la zona de estudio. Fuente: Propia	128
Figura 52 Modelo raster de cartografía del año 2004 de la zona de estudio. Fuente: Propia	129
Figura 53 Superposición de archivos raster de cartografía de la zona de estudio del año 2004 sobre año 1960 Fuente: propia	129
Figura 54 Alineamiento del Relleno tipo, El Nevado. (Izquierda: Raster año 1960 – Derecha: Orthoimagen año 2015)	131
Figura 55 Perfiles de algunos rellenos, cartografías 1960 y 2004, donde se observa incoherencia cartográfica.....	132
Figura 56 Localización de sondeos (Osorio Sierra & Zuluaga Moreno, 2003) (Puntos verdes). Localización de sondeos Aquaterra S.A (Puntos rojos).....	135
Figura 57 Curva de frecuencia o probabilidad acumulada de la variable cohesión (c') para el estrato de relleno antrópico.....	138
Figura 58 Curva de frecuencia o probabilidad acumulada de la variable ángulo de fricción (ϕ') para el estrato de relleno antrópico	138
Figura 59 Curva de frecuencia o probabilidad acumulada de la variable cohesión (c') para el estrato de la Formación Casabianca	139
Figura 60 Curva de frecuencia o probabilidad acumulada de la variable ángulo de fricción (ϕ') para el estrato de la Formación Casabianca	139
Figura 61 Vista de asignación de valores de permeabilidad (K_s) para los diferentes tipos de materiales. Fuente: Software Slide	148

Figura 62 Relación de precipitación diaria (mm) entre estación pluviométrica Agronomía vs El Carmen Fuente: propia.....	152
Figura 63 Relación de precipitación diaria (mm) entre estación pluviométrica Agronomía vs Hospital Fuente: propia.....	152
Figura 64 Relación de precipitación diaria (mm) entre estación pluviométrica El Carmen vs Hospital Fuente: propia.....	153
Figura 65 Curvas de lluvias antecedentes estación pluviométrica el Carmen. Fuente: propia	156
Figura 66 Curvas de amenaza aceleración máxima del terreno para Manizales. Fuente (Asociacion Colombiana de Ingenieria Sismica- AIS, 2009).....	165
Figura 67 Esquema de codificación de cada escenario por relleno. Fuente: propia	169
Figura 68 Exportar puntos de los perfiles geométricos desde software Arcgis a Excel. .	173
Figura 69 Modelo del relleno el Nevado en software autocad	174
Figura 70 Procedimiento para importar modelo dxf a software slide	174
Figura 71 Modelo en crudo del relleno el nevado software slide	175
Figura 72 Configuración del proyecto en software Slide.	175
Figura 73 Ajustes Modelo: Método de análisis de estabilidad utilizado. Morgenstern-Price	176
Figura 74 Ajustes Modelo: Método de análisis del flujo de agua. Análisis de elementos finitos FEA.	176
Figura 75 Ajustes Modelo: Numero de etapas o stages en que se quiere calcular el factor de seguridad.....	177
Figura 76 Asignación de las propiedades físicas, mecánicas y mecanismo de rotura o falla por estrato. Ejemplo: Valores promedio de cohesión y Angulo de fricción más unas desviación estándar.....	178
Figura 77 Asignación de las propiedades hidráulicas por estrato al software slide.	178
Figura 78 Discretización del modelo para análisis por elementos finitos del flujo de agua. 1500 elementos. Triángulos de 3 nodos	179
Figura 79 Ingreso de tasa de infiltración al software slide. Ejemplo para un periodo de retorno $T_r=50$ años	180
Figura 80 Modelo del relleno el Nevado previo a calcular su estabilidad.....	180
Figura 81 Asignación de la aceleración sísmica al modelo del relleno el nevado Ejemplo $T_r: 475$ años.....	181

Figura 82 Comando para iniciar cálculo del factor de seguridad en software slide.....	182
Figura 83 Resultado del análisis de flujo de agua entregado por software slide para el relleno tipo, el nevado.	183
Figura 84 Resultado del análisis de estabilidad entregado por software slide para el relleno tipo, el nevado.	184
Figura 85 Resultado modelo geotécnico FS= 1.328 Relleno La Isla escenario ISLcMfMI250s475	192
Figura 86 Resultado modelo de flujo de agua Relleno La Isla escenario ISLcMfMI250s475 FS= 1.328.....	193
Figura 87 Grafica presión de poros vs profundidad Relleno La Isla escenario ISLcMfMI250s475	195
Figura 88 Grafica Contenido volumétrico de agua vs profundidad Relleno La Isla escenario ISLcMfMI250s475	195
Figura 89 Resultado modelo geotécnico FS= 1.218 Relleno El Nevado escenario NEVcMfMI250s475	197
Figura 90 Resultado modelo de flujo de agua Relleno El Nevado escenario NEVcMfMI250s475 FS= 1.218.....	198
Figura 91 Grafica presión de poros vs profundidad Relleno El Nevado escenario NEVcMfMI250s475	200
Figura 92 Grafica Contenido volumétrico de agua vs profundidad Relleno El Nevado escenario NEVcMfMI250s475.....	200
Figura 93 Resultado modelo geotécnico FS= 1.635 Relleno Álamos escenario ALMcMfMI250s475	202
Figura 94 Resultado modelo de flujo de agua FS= 1.635 Relleno Álamos escenario ALMcMfMI250s475	203
Figura 95 Grafica presión de poros vs profundidad Relleno Álamos escenario ALMcMfMI250s475	205
Figura 96 Grafica Contenido volumétrico de agua vs profundidad Relleno Álamos (lado derecho) escenario ALMcMfMI250s475	205
Figura 97 Grafica Contenido volumétrico de agua vs profundidad Relleno Álamos (lado izquierdo) escenario ALMcMfMI250s475	206
Figura 98 Resultado modelo geotécnico FS= 1.344 Relleno El Palmar escenario PLMcMfMI250s475	208

Figura 99 Resultado modelo de flujo de agua FS= 1.344 Relleno El Palmar escenario PLMcMfMI250s475	209
Figura 100 Grafica presión de poros vs profundidad Relleno El Palmar escenario PLMcMfMI250s475	211
Figura 101 Grafica Contenido volumétrico de agua vs profundidad Relleno El Palmar escenario PLMcMfMI250s475.....	211
Figura 102 Resultado modelo geotécnico FS= 1.599 Relleno Alamos-Velez escenario AVLcMfMI250s475.....	213
Figura 103 Resultado modelo de flujo de agua FS= 1.599 Relleno Alamos-Velez escenario AVLcMfMI250s475.....	214
Figura 104 Grafica presión de poros vs profundidad Relleno Alamos-Velez escenario AVLcMfMI250s475.....	216
Figura 105 Grafica Contenido volumétrico de agua vs profundidad Relleno Álamos Vélez escenario AVLcMfMI250s475	216
Figura 106 Resultado modelo geotécnico FS= 1.221 Relleno Camino del Palmar escenario CPMcMfMI250s475	218
Figura 107 Resultado modelo de flujo de agua FS= 1.221 Relleno Camino del Palmar escenario CPMcMfMI250s475	219
Figura 108 Grafica presión de poros vs profundidad Relleno Camino del Palmar escenario CPMcMfMI250s475	221
Figura 109 Grafica Contenido volumétrico de agua vs profundidad Relleno Camino del Palmar escenario CPMcMfMI250s475	221
Figura 110 Resultado modelo geotécnico FS= 0.941 Relleno Villa Carmenza escenario VCMcMfMI250s475	223
Figura 111 Resultado modelo de flujo de agua FS= 0.941 Relleno Villa Carmenza escenario VCMcMfMI250s475	224
Figura 112 Grafica presión de poros vs profundidad Relleno Villa Carmenza escenario VCMcMfMI250s475	226
Figura 113 Grafica Contenido volumétrico de agua vs profundidad Relleno Villa Carmenza escenario VCMcMfMI250s475	227
Figura 114 Resultado modelo geotécnico FS= 1.496 Relleno Bajo Prado escenario BPDcMfMI250s475	229

Figura 115 Resultado modelo de flujo de agua FS= 1.496 Relleno Bajo Prado escenario BPDcMfMI250s475	230
Figura 116 Grafica presión de poros vs profundidad Relleno Bajo Prado escenario BPDcMfMI250s475	232
Figura 117 Grafica Contenido volumétrico de agua vs profundidad Relleno Bajo Prado escenario BPDcMfMI250s475.....	232
Figura 118 Resultado modelo geotécnico FS= 1.779 Relleno El Guamal escenario GMLcMfMI250s475.....	234
Figura 119 Resultado modelo de flujo de agua FS= 1.779 Relleno El Guamal escenario GMLcMfMI250s475.....	235
Figura 120 Grafica presión de poros vs profundidad Relleno El Guamal GMLcMfMI250s475	237
Figura 121 Grafica Contenido volumétrico de agua vs profundidad Relleno El Guamal escenario GMLcMfMI250s475	237
Figura 122 Resultado modelo geotécnico FS= 1.602 Relleno El Paraíso escenario PARcMfMI250s475	239
Figura 123 Resultado modelo de flujo de agua FS= 1.602 Relleno El Paraíso escenario PARcMfMI250s475	240
Figura 124 Grafica presión de poros vs profundidad Relleno El Paraíso PARcMfMI250s475	242
Figura 125 Grafica Contenido volumétrico de agua vs profundidad Relleno El Paraíso escenario PARcMfMI250s475.....	242
Figura 126 Resultado modelo geotécnico FS= 1.191 Relleno Campin-Persia escenario CPRcMfMI250s475.....	244
Figura 127 Resultado modelo de flujo de agua FS= 1.191 Relleno Campin-Persia escenario CPRcMfMI250s475.....	245
Figura 128 Grafica presión de poros vs profundidad Relleno Campin - Persia CPRcMfMI250s475.....	247
Figura 129 Grafica Contenido volumétrico de agua vs profundidad Relleno Campin-Persia escenario CPRcMfMI250s475.....	247
Figura 130 Resultado modelo geotécnico FS= 1.416 Relleno Bajo Prado Sector Centro Medico escenario BPCcMfMI250s475	249

Figura 131 Resultado modelo de flujo de agua FS= 1.416 Relleno Bajo Prado Sector Centro Medico escenario BPCcMfMI250s475	250
Figura 132 Grafica presión de poros vs profundidad Relleno Bajo Prado Sector Centro Medico BPCcMfMI250s475.....	252
Figura 133 Grafica Contenido volumétrico de agua vs profundidad Relleno Bajo Prado Sector Centro Medico escenario BPCcMfMI250s475.....	252
Figura 134 Ingreso de valores estadísticos al software Slide	259
Figura 135 Resultado de la probabilidad de falla calculada por el software slide para el Relleno el Nevado escenario NEVcMfMI002s31. Pf=0.....	260

ÍNDICE DE ANEXOS

Anexo 1 Resultados del Factor de Seguridad (FS) y probabilidad de falla por cada escenario del Relleno La Isla (ISL).....	275
Anexo 2 Resultados del Factor de Seguridad (FS) y probabilidad de falla por cada escenario del Relleno El Nevado (NEV).....	276
Anexo 3 Resultados del Factor de Seguridad (FS) y probabilidad de falla por cada escenario del Relleno El Nevado (NEV).....	277
Anexo 4 Resultados del Factor de Seguridad (FS) y probabilidad de falla por cada escenario del Relleno El Palmar (PLM).....	278
Anexo 5 Resultados del Factor de Seguridad (FS) y probabilidad de falla por cada escenario del Relleno Álamos - Vélez (AVL).....	279
Anexo 6 Resultados del Factor de Seguridad (FS) y probabilidad de falla por cada escenario del Relleno Camino del Palmar (CPM)	280
Anexo 7 Resultados del Factor de Seguridad (FS) y probabilidad de falla por cada escenario del Relleno Villa Carmenza (VCM).....	281
Anexo 8 Resultados del Factor de Seguridad (FS) y probabilidad de falla por cada escenario del Relleno Bajo Prado (BPD).....	282
Anexo 9 Resultados del Factor de Seguridad (FS) y probabilidad de falla por cada escenario del Relleno El Guamal (GML)	283
Anexo 10 Resultados del Factor de Seguridad (FS) y probabilidad de falla por cada escenario del Relleno El Paraíso (PAR).....	284
Anexo 11 Resultados del Factor de Seguridad (FS) y probabilidad de falla por cada escenario del Relleno Campin- Persia (CPR)	285
Anexo 12 Resultados del Factor de Seguridad (FS) y probabilidad de falla por cada escenario del Relleno Bajo Prado sector Centro Medico (BPC).....	286
Anexo 13 Eventos registrados entre 1997 y 2017 por categoría y polígono localizados en mapa de Manizales. Fuente: (Valderrama Giraldo, 2019). (Archivo digital PDF).....	287
Anexo 14 Mapas de localización general y de cada uno de los rellenos por subzona. Tomados de (Osorio Sierra & Zuluaga Moreno, 2003). Archivos digitales PDF.	288
Anexo 15 Datos para generación de curvas de retención de humedad basada en modelo de Van Genuchten. (Curvas experimentales). Archivo digital en PDF.....	289

Anexo 16 Proyecto en software argis donde se visualizan las siguientes capas o layers: Perímetros de los 12 rellenos, alineamiento en planta de los perfiles de los rellenos, modelos raster de las topografías de los años 1960 y 2004, orthoimagen zona de estudio año 2015, puntos de eventos de deslizamientos tomados de (Valderrama Giraldo, 2019), mapa de amenaza por deslizamiento vigente para la ciudad de Manizales (ALCALDIA DE MANIZALES, 2017). Archivo digital shape y sus extensiones.....	290
Anexo 17 Resultados de análisis de estabilidad y flujo de agua de los 960 escenarios correspondientes a los 12 rellenos corridos en software Slide de Rockscience. Archivos digitales extensión (.slim).....	291
Anexo 18 Mapa de amenaza por deslizamiento vigente para la ciudad de Manizales. (ALCALDIA DE MANIZALES, 2017). Archivo digital PDF.	292
Anexo 19 Registro original histórico de precipitaciones estaciones El Carmen, Hospital y Agronomía. Archivos digitales PDF.....	293

1. Introducción

El Municipio de Manizales, capital del departamento de Caldas, está ubicado en el centro-occidente de Colombia, en la región andina sobre la cordillera central.

Presenta características geográficas, geológicas, topográficas, hidrológicas y climáticas, tales que, desde su fundación, sus pobladores e infraestructura han estado expuestos a diferentes amenazas naturales como inundaciones, avalanchas, deslizamientos, sismos de magnitud alta, erupciones volcánicas e incendios que han afectado su área urbana y rural.

En los últimos años la amenaza natural que ha causado mayores daños, damnificados y pérdidas de vidas humanas en la ciudad de Manizales han sido los deslizamientos de tierra; estos se han generado luego de presentarse lluvias en la ciudad durante muchos días seguidos o debido a la ocurrencia de lluvias de alta intensidad en periodo de tiempo muy corto.

Ejemplo de esto es el fenómeno de la niña de los años 2010-2011, periodo en el cual se presentaron las lluvias más intensas y abundantes nunca antes registradas en el país, afectando notablemente la región caribe, andina y pacífica, y generando inundaciones y deslizamientos en todo el territorio nacional.

El municipio de Manizales no fue ajeno al fenómeno de la niña y se vio altamente afectado por la cantidad de deslizamientos presentados, los cuales afectaron directamente a la población más vulnerable.

Debido a la gran afectación nacional, tanto del territorio como de la población, el gobierno expidió la ley de gestión del riesgo de desastres, Ley 1523 de 2012, la cual menciona que todos los municipios del país deben realizar estudios de riesgos naturales como parte de sus planes de gobierno, encaminando esto al desarrollo seguro y a la gestión ambiental territorial sostenible.

La Corporación Autónoma Regional de Caldas (Corpocaldas), la Universidad Nacional de Colombia sede Manizales y el Municipio de Manizales, en conjunto, han desarrollado estudios relacionados con la gestión del riesgo en aras de identificar, reducir, manejar, y mitigar el riesgo de desastres.

En el año 2012 se firmaron varios contratos entre Corpocaldas y la Universidad Nacional de Colombia Sede Manizales, entre ellos el contrato interadministrativo No 240, con el objetivo de “Aunar esfuerzos para mejorar la gestión del riesgo en la planificación y toma de conciencia en el Municipio de Manizales fase 1”.

Considerando que en el área urbana de Manizales se han construido y se siguen construyendo viviendas y otras edificaciones sobre rellenos antrópicos, los cuales son depósitos heterogéneos recientes complejos de evaluar.

Además, estos rellenos son resultantes de movimientos de tierras, explanaciones y escombreras, y en ellos existe siempre amenaza por deslizamientos en periodos de lluvias intensas y prolongadas.

Este trabajo se desarrolla como aporte al sistema de alerta temprana de la ciudad de Manizales, en cuanto a la prevención del riesgo por deslizamientos en rellenos antrópicos.

También como un complemento al estudio adelantado por Correa Calle & García Orozco (2015) cuyo propósito fue determinar el factor de seguridad de un talud en función de la posición del nivel freático, conocidas previamente las propiedades del suelo y la geometría del talud analizado.

Esto porque en esta tesis se realiza un análisis probabilístico para unos rellenos antrópicos determinados en la ciudad de Manizales, y se calcula la probabilidad de falla por deslizamiento.

Con tal propósito, el trabajo de grado se basa en los rellenos estudiados del proyecto Osorio Sierra & Zuluaga Moreno (2003) titulado “Delimitación cartográfica y caracterización geomecánica de los llenos de cauce de la vertiente norte del río Chinchiná, entre la divisoria

oriental de la quebrada el Guamal y la estación Uribe, la avenida Santander y el río Chinchiná, de la ciudad de Manizales”.

Se pretende que los resultados de esta tesis sirvan como una herramienta para las autoridades competentes en gestión del riesgo en Manizales, ya que si se conocen las propiedades físicas y mecánicas del suelo de cualquier relleno antrópico y un valor de intensidad (mm/día), se podría conocer la probabilidad de falla por deslizamiento de este.

El objetivo principal de esta tesis es proponer curvas de amenaza por deslizamiento para rellenos antrópicos en la ciudad de Manizales-Colombia.

Estos rellenos están localizados en la vertiente norte del río Chinchiná, en la ciudad de Manizales, los cuales están denominados así por los nombres de los barrios que se construyeron sobre estos:

La Isla, El Nevado, Álamos, El Palmar, Alamos-Velez, Camino del Palmar, Villacarmenza, Bajo Prado, El Guamal, El Paraíso, Campin-Persia, Bajo Prado sector centro médico.

Para el desarrollo de esta tesis se ejecutaron las siguientes actividades:

Recopilación de información secundaria: Se consultó y recopiló la información relacionada con rellenos antrópicos en la ciudad de Manizales; como cartográfica digital, topografía, bases de datos con parámetros físicos y mecánicos de los materiales que componen estos depósitos.

Para esto se consultaron trabajos de grado, artículos, estudios de suelos, bibliotecas de empresas consultoras en la ciudad, información disponible en entidades públicas, entre otras.

Se consultaron todos los documentos técnicos y normativos vigentes en Colombia para aplicarlos en la metodología. Entre estos: La NSR-10, el estudio general de amenaza sísmica de Colombia del año 2009, la microzonificación sísmica de la ciudad de Manizales del 2002, entre otras.

Selección de rellenos: Los rellenos que serán analizados en esta tesis se seleccionaron con base en una síntesis de la información disponible, referente a propiedades de los materiales que los componen y a una cartografía coherente. Esta tesis se basa en los rellenos estudiados del proyecto de Osorio Sierra & Zuluaga Moreno (2003).

Digitalización cartográfica: Los rellenos localizados se digitalizaron con base en la cartografía antigua y reciente de la ciudad. Esto se realizó apoyado en las planchas del Igac relacionadas en la Tabla 15 y utilizando do el software Argis 10.0.

Delimitación de rellenos: Se superpuso la cartografía de Manizales, la actual sobre la antigua. Esto con el fin de evidenciar la altura de los rellenos través y poder determinar con más precisión la geometría de cada uno.

Definición perfiles geométricos: Con base en la superposición de las cartografías se determinaron los perfiles geométricos de los rellenos.

Estos perfiles se determinaron con base los alineamientos longitudinales horizontales trazados en la planta del relleno. La superficie inferior de cada relleno la determinan las elevaciones (mmsnm) de la cartografía antigua y la superficie superior las elevaciones (mmsnm) la cartografía más reciente.

Determinación de valores de propiedades mecánicas para cada estrato: De la información recopilada referente a parámetros físicos y mecánicos de los estratos que componen los modelos, se crearon unas series de datos con sus respectivos valores.

A las series de datos de la cohesión (c') y el ángulo de fricción (ϕ') se les aplicó la prueba de bondad de ajuste de Smirnof-Kolmogorov, con el fin de conocer qué tipo de distribución seguían estos datos.

Posteriormente se determinaron los valores promedio, máximo, mínimo y desviación estándar de estas dos variables.

Perfil Geotécnico: El perfil geológico geotécnico de cada relleno se definió con base en los perfiles geométricos y las propiedades geomecánicas definidas en las dos actividades anteriores. Adicionalmente considerando la geología local de la zona estudiada.

Determinación de valores de los detonantes: Se consideraron dos factores detonantes de los rellenos: Lluvias y sismos, de los cuales se pensó que podrían desencadenar la falla en los rellenos, es decir obtener factores de seguridad $FS \leq 1$.

El detonante lluvia se representó por una intensidad (mm/día), la cual ingresa a los rellenos por medio de tasa de infiltración vertical en la superficie de estos. Esta se determinó utilizando la información de los registros históricos de precipitaciones de las estaciones pluviométricas El Carmen, Hospital y Agronomía.

El detonante sismo se considera como una fuerza producida por una aceleración sísmica pico. Estas aceleraciones se determinaron con base en las curvas de amenaza sísmica para Manizales incluidas en el estudio general de amenaza sísmica de Colombia. (Asociación Colombiana de Ingeniería Sísmica- AIS, 2009).

Definición de escenarios de análisis: Combinando las variables peso unitario (γ), cohesión (c'), ángulo de fricción interna (ϕ'), detonante lluvia y detonante sismo, se determinaron los escenarios de análisis para cada uno de los rellenos, como se ilustra en la Tabla 2:

Tabla 2 Escenarios de análisis por cada relleno.

Variable	# Casos	Caso
Peso unitario (γ)	1	
Cohesión (c')	2	$c' + \sigma$
		$c' - \sigma$
Angulo Fricción (ϕ')	2	$\phi' + \sigma$
		$\phi' - \sigma$
Detonante lluvia (mm/día)	5	Tr: 2,33 años
		Tr: 10 años
		Tr: 50 años
		Tr: 100 años
		Tr: 250 años
Detonante sismo (g)	4	Tr: 31 años
		Tr: 225 años
		Tr: 475 años
		Sin sismo

# Escenarios por relleno	80
--------------------------	----

Elaboración y codificación de modelos digitales: Se elaboraron los modelos digitales de los rellenos, teniendo en cuenta todas las actividades anteriores. Esto se realizó en el software Slide.

Debido a que resultan 1020 archivos del software Slide, uno por escenario de análisis, se codificaron para su fácil identificación. Esto se explica en el numeral 4.7.

Cálculo de la estabilidad y obtención del Factor de Seguridad: El cálculo de la estabilidad y la obtención del factor de seguridad FS de todos los escenarios para los rellenos, se realizaron utilizando el software Slide versión V. 6.0 de la compañía Rockscience.

Se adoptó, para el análisis de estabilidad de cada relleno, el método riguroso de Morgenstern & Price. Este tiene en cuenta tanto fuerzas normales entre tajadas como las de corte obteniendo resultado de factor de seguridad FS más aproximado.

Cálculo de probabilidad de falla: La probabilidad de falla total anual de los rellenos se determinó mediante el producto de las siguientes tres probabilidades:

- La probabilidad de que el factor de seguridad $FS \leq 1$ para un escenario de sismo y lluvia determinado.
- La probabilidad de que se presente una lluvia determinada para un periodo de retorno, en un año.
- La probabilidad de excedencia de un sismo para un periodo de retorno, en un año.

El desarrollo de esta tesis se presenta en los siguientes capítulos:

Primer capítulo, Marco de Referencia: Descripción del marco conceptual en el cual se incluyen conceptos de la gestión del riesgo, y como están aplicados en el Plan Municipal de Gestión del Riesgo de Manizales; Marco de antecedentes: Se ilustran registros históricos de deslizamientos presentados en Manizales; Marco Geográfico: Se describen la localización del proyecto, la geología local y regional; Marco teórico: Se muestran todos los principios teóricos utilizados en el desarrollo de esta tesis.

Segundo capítulo, Metodología: Descripción del procedimiento utilizado en el desarrollo de la tesis. Definición de la geometría de los rellenos; asignación de propiedades físicas y mecánicas para cada estrato del relleno; elaboración del modelo digital; el análisis de respuesta hidrológica, el análisis de respuesta de sismo, la calibración de los modelos, el análisis de estabilidad, el cálculo de las probabilidades de falla. En este capítulo se ilustra con un relleno tipo cada uno de los procedimientos realizados en esta tesis.

Tercer capítulo, Resultados y Análisis de Resultados: Se incluyen todos los resultados de los análisis de estabilidad de los 12 rellenos y los resultados del cálculo de la probabilidad de falla del relleno El Nevado como ejemplo. Para los otros 11 se pueden consultar los anexos 1 al 12.

Cuarto capítulo, Conclusiones: Se menciona lo concluido luego del desarrollo de la tesis.

2. Objetivos

2.1 Objetivo General

- Establecer los niveles de amenaza por deslizamiento para rellenos antrópicos en la Ciudad de Manizales-Colombia.

2.2 Objetivos Específicos

- Determinar las propiedades mecánicas de 12 rellenos antrópicos localizados en la vertiente norte del río Chinchiná; entre la divisoria oriental de la quebrada el Guamal y la estación Uribe y entre la avenida Santander y el río Chinchiná en la ciudad de Manizales. Colombia.
- Definir los escenarios de análisis para los 12 rellenos antrópicos localizados en la vertiente norte del río Chinchiná; entre la divisoria oriental de la quebrada el Guamal y la estación Uribe y entre la avenida Santander y el río Chinchiná en la ciudad de Manizales. Colombia.
- Establecer la estabilidad de los 12 rellenos antrópicos para los diferentes escenarios de análisis definidos.
- Determinar la probabilidad de falla de los 12 rellenos para los diferentes escenarios de análisis definidos.
- Desarrollar curvas de amenaza.

3. Marco de Referencia

3.1 Marco Conceptual

3.1.1 Gestión del Riesgo

La política nacional de gestión de riesgo de desastres fue adoptada mediante la ley 1523 de 2012, en la cual se define gestión de riesgo como: Proceso social de planeación, ejecución, seguimiento y evaluación de políticas y acciones permanentes para el conocimiento del riesgo y promoción de una mayor conciencia del mismo, impedir o evitar que se genere, reducirlo o controlarlo cuando ya existe y para prepararse y manejar las situaciones de desastre, así como para la posterior recuperación, entiéndase: rehabilitación y reconstrucción. Estas acciones tienen el propósito explícito de contribuir a la seguridad, el bienestar y calidad de vida de las personas y al desarrollo sostenible.

El artículo 31 del proyecto de acuerdo del Plan de Ordenamiento Territorial de Manizales 2017 menciona que, la gestión del riesgo se concibe como un proceso de decisión y de planificación integral, que permite a los actores locales analizar el entorno, tomar decisiones de manera consciente, desarrollar una propuesta de intervención concertada para prevenir, mitigar o reducir el riesgo.

También para aumentar la resiliencia a los impactos adversos potenciales de los fenómenos naturales y antrópicos sobre las personas, la actividad económica, los servicios ambientales, sociales o culturales, y la infraestructura, y encaminar el municipio hacia el desarrollo sostenible.

Las siguientes definiciones hacen parte del componente riesgo y están incluidas en la Ley 1523 de 2012. Se transcriben textualmente:

3.1.1.1 Amenaza y análisis

Peligro latente de que un evento físico de origen natural, o causado, o inducido por la acción humana de manera accidental, se presente con una severidad suficiente para causar pérdida de vidas, lesiones u otros impactos en la salud, así como también daños y pérdidas en los bienes, la infraestructura, los medios de sustento, la prestación de servicios y los recursos ambientales.

El análisis de la amenaza comprende tres etapas: Definir un modelo geológico-geotécnico, plantear escenarios de amenaza y zonificar la amenaza, con el fin de obtener mapas de amenaza (Servicio Geológico Colombiano, 2016).

La definición del modelo geológico-geotécnico considera los factores condicionantes de inestabilidad prevalecientes en el área de estudio.

Estos configuran la predisposición del terreno a la inestabilidad y están directamente relacionados con las características geológicas, geomorfológicas y geotécnicas de las laderas, considerándose inherentes al área de estudio, dado que prácticamente no varían en el espacio o tiempo; debido a su compleja evaluación.

Los factores relacionados directamente con la intervención antrópica se incluyen como condicionantes, a pesar de que su variación espacio temporal puede ser frecuente.

Factores como la lluvia y los sismos, que pueden modificar las condiciones de estabilidad de una ladera, se consideran detonantes y se deben evaluar en términos probabilísticos para la definición de escenarios de amenazas actuales y potenciales que determinarán las posteriores etapas de análisis de riesgo (Servicio Geológico Colombiano, 2016).

3.1.1.2 Vulnerabilidad

Susceptibilidad o fragilidad física, económica, social, ambiental o institucional que tiene una comunidad de ser afectada o de sufrir efectos adversos en caso de que un evento físico peligroso se presente.

Corresponde a la predisposición a sufrir pérdidas o daños de los seres humanos y sus medios de subsistencia, así como de sus sistemas físicos, sociales, económicos y de apoyo que pueden ser afectados por eventos físicos peligrosos.

3.1.1.3 Riesgo de desastres

Corresponde a los daños o pérdidas potenciales que pueden presentarse debido a los eventos físicos peligrosos de origen natural, socio-natural tecnológico, biosanitario o humano no intencional, en un período de tiempo específico y que son determinados por la vulnerabilidad de los elementos expuestos.

Por consiguiente, el riesgo de desastres se deriva de la combinación de la amenaza y la vulnerabilidad.

3.1.2 Plan municipal de gestión del riesgo de desastres de Manizales (PMGRD)

La alcaldía de Manizales en conjunto con Corpocaldas y la Unidad de Gestión del Riesgo de Manizales crearon en el año 2016 un plan municipal de gestión del riesgo de desastres para el municipio por medio de la contratación de la empresa Ingeniar Cad/Cae Ltda.

Este plan se creó con el propósito de ser el instrumento legal para dar a conocer los objetivos y las metas por cumplir, teniendo en cuenta las diferentes estrategias y sus respectivos responsables para así dar cumplimiento a la política nacional de gestión del riesgo.

Es importante resaltar que el artículo 32 de la ley 1523 de 2012, obliga a los municipios a formular un plan municipal de gestión del riesgo de desastres con el fin de programar y ejecutar los procedimientos para reducir el riesgo de desastres.

El plan de gestión del riesgo se estructuró estando alineado con las cuatro prioridades suscritas en el marco de Sendai del año 2015. El marco de Sendai fue una conferencia mundial que se celebró en Sendai (Japón) el 18 de marzo de 2015 como instrumento para que las naciones y estados adopten medidas para potencializar las siguientes 4 prioridades (INGENIAR CAD/CAE LTDA, 2016):

- Comprender el riesgo de desastres.
- Fortalecer la gobernanza del riesgo de desastres para gestionar dicho riesgo.
- Invertir en la reducción del riesgo de desastres para la resiliencia.
- Aumentar la preparación para casos de desastre a fin de dar una respuesta eficaz y para “reconstruir mejor” en los ámbitos de la recuperación, la rehabilitación y la reconstrucción.

El gobierno nacional también desarrolló su plan nacional de gestión del riesgo de desastre (PNGRD), el cual fue aprobado mediante el decreto 308 de 2016, considerando 5 objetivos específicos o prioridades que también se encuentran alineadas con las prioridades de marco de Sendai y son las siguientes:

- Mejorar el conocimiento del riesgo de desastres en el territorio nacional.
- Reducir la construcción de nuevas condiciones de riesgo en el desarrollo territorial, sectorial y ambiental sostenible.
- Reducir las condiciones existentes de riesgo de desastres.
- Garantizar un oportuno, eficaz y adecuado manejo de desastres.

- Fortalecer la gobernanza, la educación y comunicación social en la gestión del riesgo con enfoque diferencial, de género y diversidad cultural

Los diagramas de la Figura 1 y Figura 2 ilustran cómo está alineada cada prioridad del plan municipal de gestión del riesgo con el marco de Sendai, de igual manera, como están alineados los planes nacional y municipal de gestión del riesgo:

Figura 1 Diagrama de alineación de los objetivos específicos del plan municipal de gestión del riesgo del Manizales con las prioridades del Marco de Sendai (INGENIAR CAD/CAE LTDA, 2016)

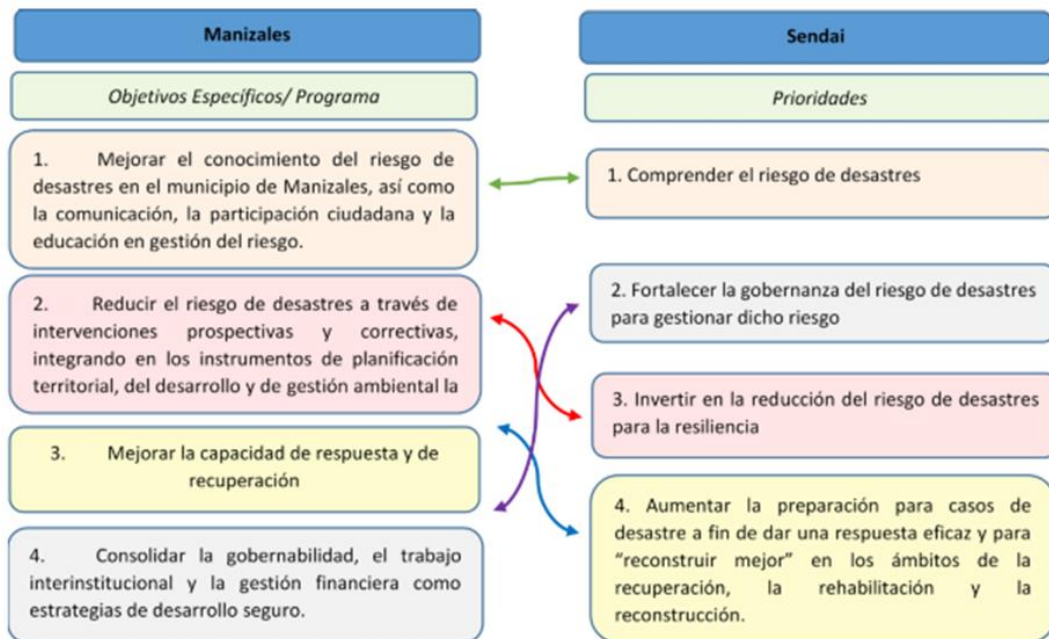
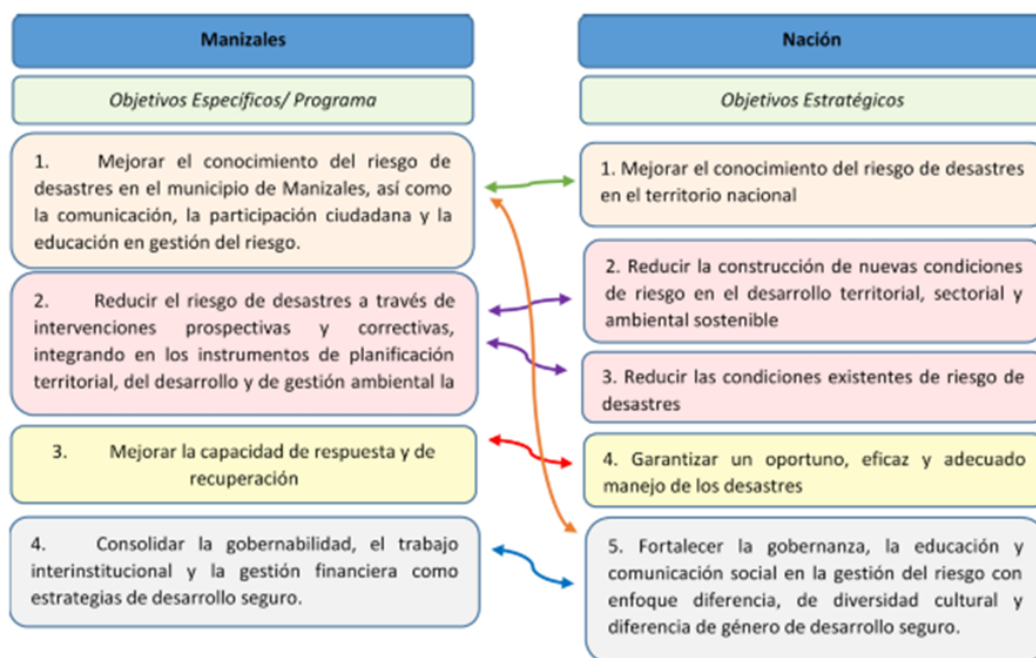


Figura 2 Diagrama de alineación de los objetivos específicos del plan municipal de gestión del riesgo de Manizales con el plan nacional de gestión del riesgo (INGENIAR CAD/CAE LTDA, 2016)



A cada objetivo específico, del plan municipal del riesgo de desastres, le corresponden unos subprogramas con unas acciones a ejecutar en un plazo determinado.

Dicha ejecución es responsabilidad de entidades como: La Unidad de Gestión del Riesgo Municipal (UGR), Corpocaldas, Bomberos, Unidad Departamental de Gestión del Riesgo (UDEGER), Aguas de Manizales, Ideam, Secretaria de Planeación Municipal, Chec, Servicio Geológico Colombiano.

La Tabla 3 ilustra los subprogramas con sus correspondientes acciones y responsables de ejecución:

Tabla 3 Programas, subprogramas y acciones a ejecutar relacionadas con gestión del riesgo en el Municipio de Manizales

PROGRAMA	SUBPROGRAMA	ACCIONES	RESPONSABLE LIDER	RESPONSABLE DE APOYO
1	1.2 Monitoreo de amenazas y pronostico	Continuar con el monitoreo detallado geotecnico en la ciudad (incluyendo relleno hidraulicos) (piezometros-freatimetros)	UGR, CORPOCALDAS, SGC	ACADEMIA, UDEGER, SEC. PLANEACION
1	1.3 Evaluacion y mapeo de amenazas	Actualizar la evaluacion y microzonificacion de amenazas naturales como deslizamientos, sismos, inundaciones y amenazas volcanicas.	UGR, CORPOCALDAS, SEC. AMBIENTE	UGR, COPORCALDAS, SGC, UDEGER, ACADEMIA, SEC. PLANEACION, SEC. AMBIENTE
1	1.5 Informacion publica y participacion comunitaria	Fortalecer la cobertura del programa guardianas de la ladera en sus aspectos de informacion a la comunidad, visitas a centros educativos y otros aspectos de sensibilizacion de la poblacion frente a deslizamientos	UGR, SEC. EDUCACION, OFIC. DE PRENSA, SEC DE DESARROLLO, CORPOCALDAS	AGUAS DE MANIZALES, EMAS, SEC OBRAS PUBLICAS
2	2.1 Integracion del riesgo en la definicion de usos del suelo y la planificacion urbana	Desarrollar un mecanismo legal para acoger las prescripciones de diseño y construccion con base en una microzonificacion de amenazas y hacer un seguimiento a su aplicación.	SEC. PLANEACION, UGR	CORPOCALDAS, SEC. DE OBRAS PUBLICAS
2	2.3 Implementacion de tecnicas de proteccion y control de fenomenos peligrosos	Actualizar la informacion sobre puntos criticos que requieren obras de proteccion.	SEC. DE OBRAS PUBLICAS, UGR, CORPOCALDAS	
		Implementar las obras en sitios criticos prioritarios		
		Mantener permanentemente las obras de proteccion en Manizales		AGUAS DE MANIZALES, EMAS

Se evidencia que el municipio de Manizales, desde el año 2016 hasta la actualidad, ha ejecutado acciones para identificar, controlar, prevenir y mitigar el riesgo de desastres generados por la amenaza deslizamiento.

Esta tesis, independientemente de los resultados, servirá como un instrumento para la ejecución de las siguientes acciones del plan municipal de gestión del riesgo (Tabla 3):

Monitoreo de amenazas y pronóstico: Uno de los propósitos de este subprograma, es hacer seguimiento geotécnico de los rellenos hidráulicos identificados en la ciudad. Esta tesis aporta en este subprograma, en cuanto al seguimiento, porque en el desarrollo de la misma se conocerá la probabilidad de falla de 12 rellenos, bien sea

porque su probabilidad de falla sea media o alta, o si por el contrario la probabilidad de falla es nula.

En el caso que los rellenos arrojen probabilidades de falla alta, este documento servirá como un instrumento de alerta temprana para las autoridades competentes en gestión del riesgo en la ciudad, y así, tomar las correspondientes medidas preventivas y correctivas.

Evaluación y mapeo de amenazas: El propósito de esta acción es actualizar constantemente la microzonificación de amenazas presentes en la ciudad, dentro de las cuales existen los deslizamientos.

Los resultados de esta tesis servirán para actualizar el mapa de amenaza por deslizamiento de la ciudad, ya que al final del desarrollo de la misma se conocerá la clasificación de amenaza por deslizamiento de cada uno de los 12 rellenos.

3.2 Marco de Antecedentes

3.2.1 Antecedentes de Investigación

Luego de revisar el estado del arte relacionado con el título de esta tesis, no se encontraron investigaciones ni documentos que hablaran sobre este tema, Tampoco para los 12 rellenos analizados en este estudio.

Sin embargo una de las variables involucradas en la evaluación de la amenaza por deslizamiento son las precipitaciones o lluvias. Por consiguiente es importante mencionar y hablar un poco de las investigaciones que se han desarrollado al respecto.

A partir del estudio realizado por Terlien (1997), cuyo propósito fue analizar la relación que existe entre la lluvia y deslizamientos en la ciudad de Manizales, un grupo de investigadores del Instituto de Estudios Ambientales (IDEA) de la Universidad Nacional de Colombia sede Manizales adoptaron un indicador de lluvias antecedentes de 25 días (A_{25}).

Este permite, como sistema de alerta temprana, determinar si existe la posibilidad de ocurrencia de deslizamientos en la ciudad.

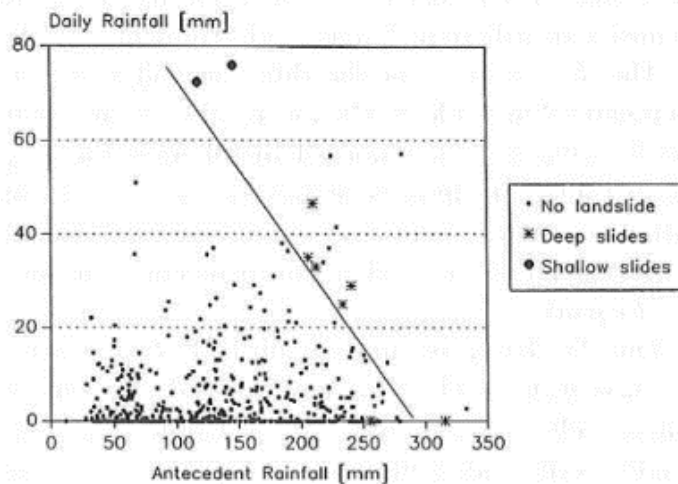
Estas alertas se clasifican de acuerdo con el acumulado de lluvias de 25 días (A_{25}) en milímetros (mm), así: Alerta amarilla cuando A_{25} llega a los 200mm y no supera los 300mm, naranja si supera los 300mm hasta 400mm y roja si se alcanzan los 400mm o se superan.

La investigación de Terlien (1997) tuvo en cuenta los deslizamientos ocurridos en la ciudad de Manizales en el año 1993 y evaluó las lluvias antecedentes para diferentes periodos de duración: 2, 5, 10, 15, 25, 30 días y concluyó que la duración que mejor logra diferenciar los eventos de lluvia de los que no, que generaron deslizamientos, es la de 25 días.

También concluye que los deslizamientos superficiales y profundos son generados por condiciones de lluvias diferentes. Los profundos, que él los clasifica como aquellos que tienen profundidad mayor a 1.5m son causados por una lluvia diaria de hasta 50mm y por una lluvia antecedente acumulada de 25 días de más de 200mm.

Los superficiales son detonados por lluvias diarias de 70mm. Esto se representa en la Figura 3:

Figura 3 Lluvia antecedente de 25 días y lluvia diaria con y sin deslizamientos del año 1993 (Terlien, 1997).



El indicador de lluvia antecedente (A_{25}) se consideró en la determinación de la tasa de infiltración vertical, la cual esta expresada como una intensidad (mm/día). Esto aplicado en la variable detonante lluvia.

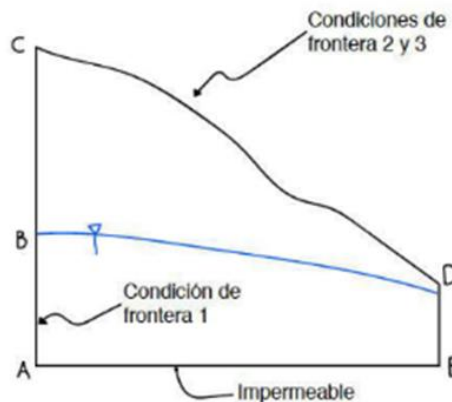
Arango Gartner (2000) refuerza lo determinado por Terlien (1997) y concluye que: Un valor aislado de las lluvias diarias no es un indicador adecuado y suficiente para explicar la ocurrencia de deslizamientos en un área de estudio y el criterio preponderante es el de las lluvias antecedentes de muchos días.

Valderrama Giraldo (2019) describe en su investigación, unas condiciones de frontera que les definió a los modelos elaborados en el software Slide.

Con estas condiciones de frontera se pretende conocer el comportamiento del modelo a través del tiempo, de acuerdo con el volumen de agua que le ingresa debido a la intensidad (mm/día).

Estas condiciones de frontera se ilustran en la Figura 4:

Figura 4 Condiciones de frontera para los 12 rellenos (Valderrama Giraldo, 2019).



Condición de frontera 1: Debido a que no se conoce con exactitud la profundidad del nivel freático de los rellenos se adopta la siguiente suposición: Si la ladera entrega sus aguas a una quebrada, se espera el nivel freático este al menos en la parte más baja de la ladera.

Condición de frontera 2: Los suelos que componen los rellenos normalmente tienen algo de humedad, es decir que están parcialmente saturados. Con el fin de representar esto, se definió ingresarles a los modelos un volumen de agua correspondiente a las lluvias de 365 días.

Para este momento los modelos se encuentran en su condición inicial antes de ingresarles la lluvia detonante.

Adicionalmente en esta condición se les ingresan a los modelos un volumen de agua correspondiente a la primera parte de las lluvias detonantes (25 días de lluvias acumuladas), considerando el indicador A_{25} de Terlien (1997).

Este volumen de agua se determina mediante una intensidad (mm/día), la cual ingresa a los modelos mediante una tasa de infiltración vertical uniforme en la superficie del talud, CD en la Figura 4.

Condición de frontera 3: En esta condición se les ingresan a los modelos un volumen de agua correspondiente a la segunda parte de las lluvias detonantes (1 día de lluvia acumulada). Este día de lluvia acumulada representa un aguacero evento.

Aguacero evento: Es una lluvia atípica que se ha presentado en la ciudad de una intensidad alta que puede oscilar entre los 120mm/día y 150 mm/día.

Este volumen de agua se determina mediante una intensidad (mm/día), la cual ingresa a los modelos mediante una tasa de infiltración vertical uniforme en la superficie del talud, CD en la Figura 4.

Los valores de estas intensidades que ingresan a los modelos, descritas en las condiciones de frontera 2 y 3 se incluyen en la Tabla 36 y se presenta un ejemplo en la Tabla 37 de como se le ingresa al software slide dichos valores para un modelo.

En su investigación Valderrama Giraldo (2019) menciona que la ocurrencia de deslizamientos en Manizales está dado por la variación de esfuerzos a corto y largo plazo, el cual está controlado, en una alta proporción por las características de las lluvias y los suelos, en especial por sus permeabilidades.

Correa Calle (2019) afirma que los principales mecanismos hidrológicos que controlan la ocurrencia de deslizamientos en Manizales están dados por:

- Saturación de los estratos superiores o más superficiales durante eventos de lluvia torrencial.
- Generación de niveles freáticos colgados en el estrato de cenizas volcánicas.
- Ascenso de niveles freáticos sobre el contacto suelo-roca o entre la interfase entre cenizas volcánicas y suelo residual.

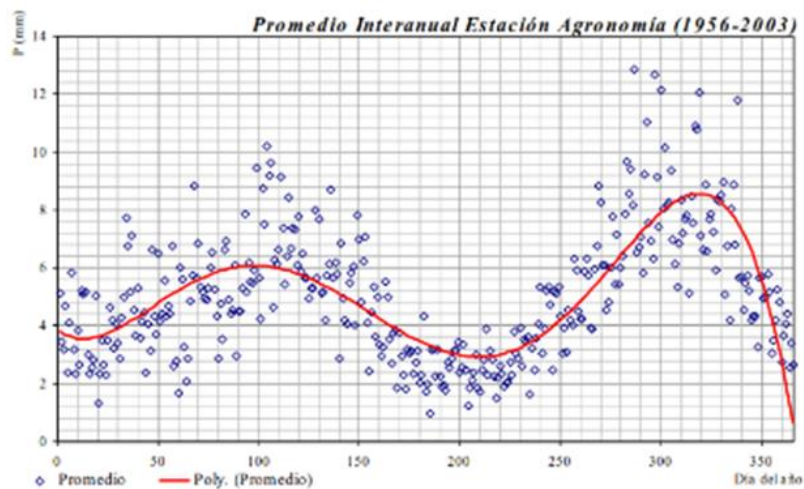
Por lo general, los rellenos antrópicos en Manizales están compuestos por cenizas volcánicas mezcladas con el suelo residual de la formación que los subyacen. Estos rellenos son provenientes de cortes y excavaciones de los estratos superficiales presentes en la ciudad.

La información disponible relacionada con las propiedades físicas y mecánicas de las cenizas volcánicas fue utilizada como complemento para definir las propiedades del estrato de relleno antrópico de todos los modelos.

El comportamiento de las lluvias en Manizales a lo largo del año es bimodal, presenta dos picos marcados, el primero entre los meses de abril y mayo y el segundo entre los meses de octubre y noviembre (Valderrama Giraldo, 2019).

En la Figura 5 se representan los picos de lluvias (mm) en un año, los cuales se presentan generalmente en los meses de abril y octubre.

Figura 5 Distribución de precipitaciones (promedios) en el año. Estación Agronomía. Fuente: (Londoño Linares, 2015)



Las lluvias en Manizales presentan una variabilidad espacial alta, es decir, el comportamiento de las lluvias no es igual en toda el área urbana de la ciudad.

En consecuencia, Correa Calle (2019) y Valderrama Giraldo (2019) en sus investigaciones respectivas utilizan unos polígonos de Thiesse para sectorizar las lluvias.

Estos tienen una división muy artificial, y siguen unas suposiciones como:

- La precipitación en toda el área de cada polígono es homogénea y está representada por los datos de la estación pluviométrica que se encuentra localizada en el polígono.
- Todos los deslizamientos registrados en el área del polígono fueron detonados por lluvia.

Valderrama Giraldo (2019) concluye que la lluvia en la ciudad se distribuye de manera heterogénea, ya que existe diferencia entre las constantes K, n y m presentadas en la Tabla 4 con lo cual se ratifica la variación espacial de las lluvias en toda la ciudad.

Dichas constantes hacen parte de la expresión $I = KT_r^m D^{-n}$ con la cual se ajustaron las curvas IDF. Son constantes de ajuste de las curvas intensidad duración frecuencia IDF tanto para el enfoque de ventanas móviles, como para el de eventos individuales.

Tabla 4 Relaciones IDF. Fuente: (Valderrama Giraldo, 2019)

Estación	IDF-Convencional			S-IDF		
	Ventanas móviles			Aguaceros		
	K	m	n	K	m	n
Alcázares	534.57	0.108	0.667	111	0.326	0.565
Aranjuez	322.25	0.139	0.566	107	0.281	0.52
Bosques del Norte	351.13	0.137	0.612	118	0.265	0.572
El Carmen	433.58	0.123	0.579	121	0.326	0.554
Emas	365.16	0.163	0.571	169	0.277	0.634
Hospital de Caldas	262.47	0.179	0.46	129	0.335	0.592
Ingeominas	427.69	0.117	0.572	91.7	0.254	0.397
La Nubia	411.35	0.16	0.676	127	0.318	0.665
La Palma	442.38	0.102	0.617	112	0.245	0.478
Milán Planta Niza	409.57	0.176	0.627	194	0.268	0.713
Posgrados	234.13	0.127	0.491	91.2	0.248	0.474
Q. Olivares El Popal	369.1	0.121	0.602	291	0.118	0.627
Q. Palogrande Ruta 30	227.03	0.173	0.452	117	0.233	0.497
Q. Tesorito	480.58	0.186	0.69	199	0.175	0.597
Villamaría Hospital	269.36	0.137	0.465	392	0.027	0.564
Yarumos	307.96	0.12	0.519	120	0.232	0.495

Valderrama Giraldo (2019) elabora la Tabla 5 comparando las intensidades calculadas de dos pares de estaciones para un evento de 10 minutos de duración y con un periodo de retorno de 100 años.

Tabla 5 Comparación de intensidades de evento. Fuente: (Valderrama Giraldo, 2019)

Par	Estación	Altitud msnm	Intensidad Ventanas móviles $\frac{mm}{h}$	Intensidad S-IDF $\frac{mm}{h}$
1	Alcázares	2057	187.24	135.62
	Ingeominas	2226	201.41	151.63
2	Posgrados	2179	135.66	95.94
	Q. Palogrande Ruta 30	2002	177.86	108.94

De la Tabla 5 se evidencia que las intensidades varían para las diferentes estaciones, presentándose diferencias mayores a la medida que aumenta la distancia entre estas.

Cotejando esta idea del comportamiento de las lluvias, se puede corroborar la no correlación de los datos de los registros históricos de precipitación de las estaciones pluviométricas el Carmen vs Agronomía y El Carmen vs Hospital. Figura 62 y Figura 63.

La investigación realizada por Londoño Linares (2015) sirvió para elaborar los modelos de susceptibilidad, amenaza, riesgo implícito y pérdidas esperadas para Manizales como insumo para el plan de ordenamiento territorial 2017 -2031 (POT) vigente.

Dicha investigación está relacionada directamente con el título y objeto de esta tesis. Por lo cual, a continuación se mencionan algunas ideas extraídas de la misma. Estas sirvieron como apoyo para el desarrollo de la metodología de esta tesis.

Londoño Linares (2015) menciona que a partir un inventario de deslizamientos con todos los datos de sus características y con factores de propensividad, como geología, topografía, usos del suelo; además incluyendo el análisis de los eventos detonantes, precipitaciones y sismos, es posible construir un modelo de amenaza por deslizamiento, que indique espacial y temporalmente la probabilidad de ocurrencia de nuevos eventos.

Los deslizamientos detonados por lluvia ocurren súbitamente en muchos entornos montañosos. Es por esto que se define umbral como el nivel de una cantidad necesaria de cierta variable para que un proceso tenga lugar (Londoño Linares, 2015).

En el caso de umbrales detonantes tiene relación con el nivel mínimo de cualquier variable relacionada con el proceso de precipitación, que, al ser superado, pueda generar un proceso de remoción en masa (Londoño Linares, 2015).

Londoño Linares (2015) contempló la inclusión de los factores detonantes de deslizamientos, precipitaciones y sismos, con el fin de tener un estimativo de la frecuencia de ocurrencia del evento asociada a la frecuencia de ocurrencia del detonante.

En la metodología del documento de dicha investigación no se deja explícito como realizó este procedimiento; es decir, no se evidenció que formulaciones, suposiciones y criterios consideró.

En la investigación mencionan dos formas de utilización del factor detonante:

La primera para la estimación de frecuencias de excedencia de un umbral acumulativo, a partir de las cuales, según criterios estadísticos, sería factible la ocurrencia de deslizamientos.

La segunda, definida a partir de las características de lluvias puntuales, que permitieran, mediante comparación en tiempo real, identificar momentos en los cuales es conveniente emitir señales de alerta temprana (Londoño Linares, 2015).

Se tomaron los registros pluviométricos de la estación automática denominada Postgrados, con la cual se obtuvieron las características de las lluvias generadoras de deslizamientos históricos (magnitud, intensidad, duración).

También se obtuvo el monto de precipitación acumulada, probando diferentes períodos de acumulación de lluvia diaria previa al evento de deslizamiento, con las cuales

valoraron las relaciones estadísticas posibles y establecieron umbrales sencillos de tipo Intensidad duración y lluvia antecedente acumulada (Londoño Linares, 2015).

Basándose en la lluvia diaria se calcularon las características de los aguaceros detonantes de deslizamiento en la ciudad y la lluvia antecedente acumulada de tres, siete, quince, veintiuno, veinticinco y treinta días. La Tabla 6 y la Tabla 7 muestran como agruparon los datos:

Tabla 6 Eventos de lluvia detonante investigación. Fuente: (Londoño Linares, 2015)

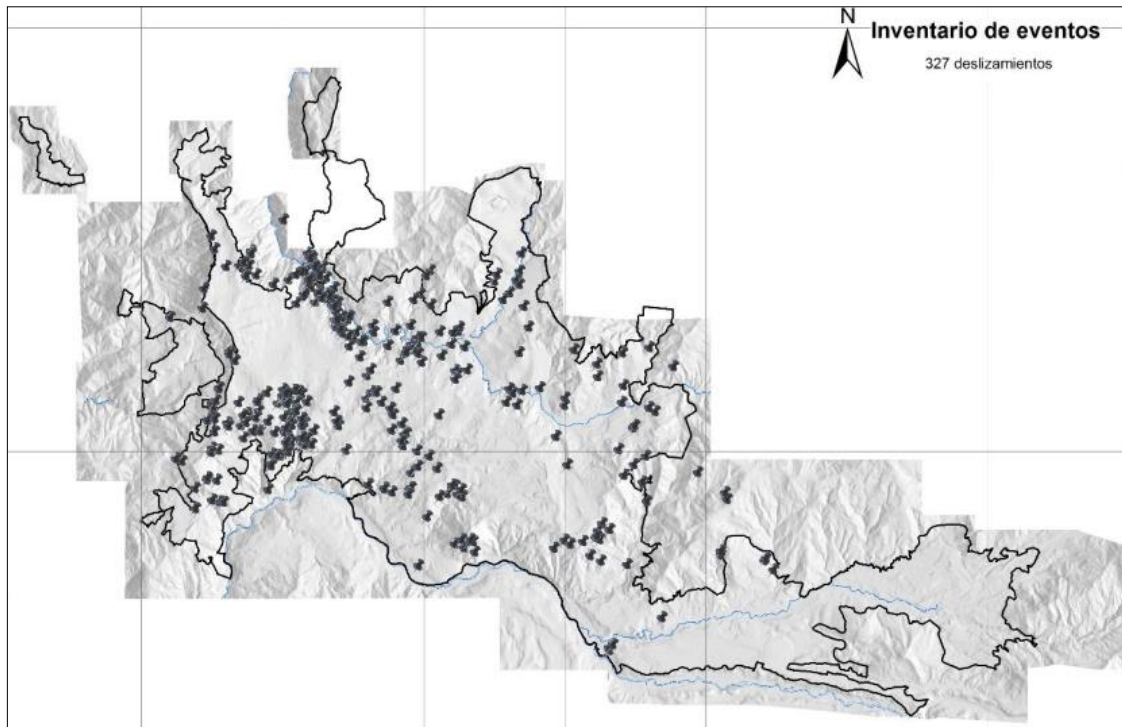
id	Evento de deslizamiento	Fecha evento detonante	Magnitud (mm)	Duracion(min)	Duracion(hora)	Intensidad(mm/hora)
1	31/01/2003	30/01/2003	9,12	50	0,83	10,94
2	18/02/2003	17/02/2003	36,07	255	4,25	8,49
3	18/03/2003	19/03/2003	80,74	340	5,67	14,25
4	02/04/2003	30/03/2003	9,64	130	2,17	4,45
5	10/04/2003	09/04/2003	18,51	135	2,25	8,23
6	12/04/2003	12/04/2003	34	200	3,33	10,20
7	22/04/2003	21/04/2003	30,2	250	4,17	7,25
8	01/05/2003	24/04/2003	21,82	90	1,50	14,55
9	17/06/2003	02/06/2003	7,01	285	4,75	1,48
10	30/08/2003	22/08/2003	18,76	145	2,42	7,76

Tabla 7 Lluvia antecedente para diferentes intervalos Fuente: (Londoño Linares, 2015)

id	Evento de deslizamiento	Fecha evento detonante	P01D	P03D	P07D	P15D	P21D	P25D	P30D
1	31/01/2003	30/01/2003	1,51	10,63	11,38	58,50	60,27	60,27	61,02
2	18/02/2003	17/02/2003	12,42	64,17	101,19	125,51	136,14	136,89	136,89
3	18/03/2003	19/03/2003	68,85	91,14	141,19	141,44	168,99	169,99	227,55
4	02/04/2003	30/03/2003	0,00	3,54	20,27	54,09	195,28	195,28	195,53
5	10/04/2003	09/04/2003	2,79	39,50	52,44	72,71	79,47	195,39	247,72
6	12/04/2003	12/04/2003	41,20	43,99	92,89	107,07	115,41	147,73	283,63
7	22/04/2003	21/04/2003	1,60	48,77	72,39	213,69	226,63	240,06	248,40
8	01/05/2003	24/04/2003	0,00	0,00	30,18	133,94	235,74	287,43	288,18
9	17/06/2003	02/06/2003	3,00	3,25	4,00	9,00	29,13	39,03	39,03
10	30/08/2003	22/08/2003	0,00	11,14	14,40	72,94	80,96	91,21	120,43

La investigación conto con un registro de datos de 327 deslizamientos distribuidos por toda la ciudad, como se muestra en la Figura 6. Se asumió que estos reflejaban la condición de máxima susceptibilidad.

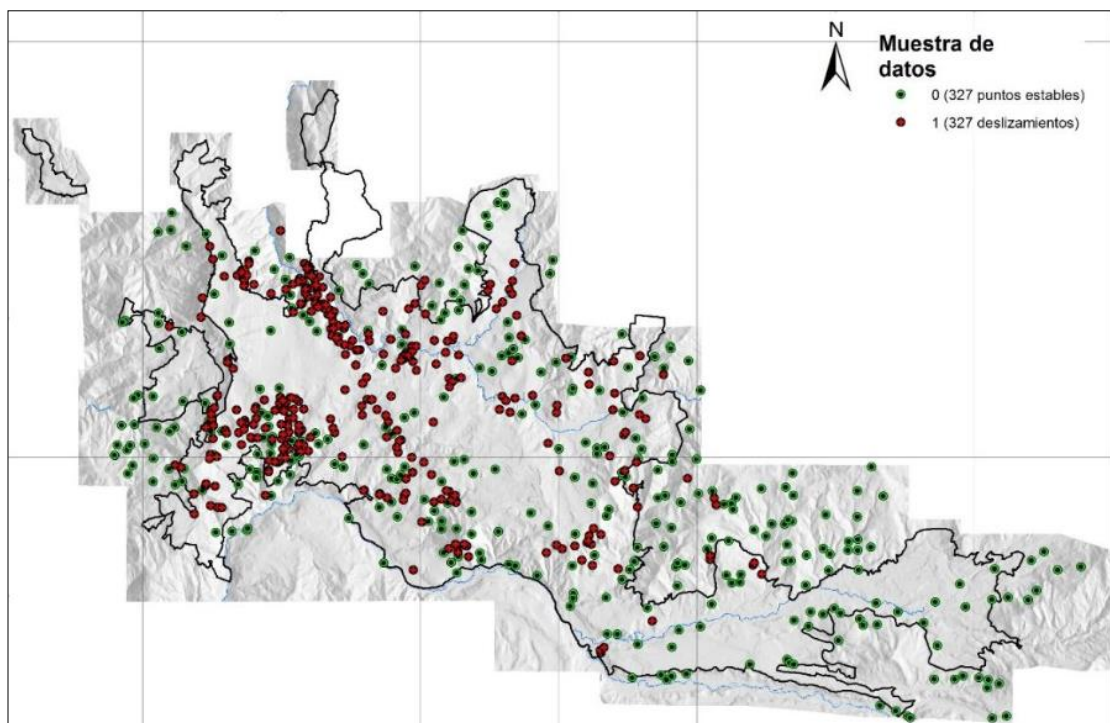
Figura 6 Inventario de eventos previos. Fuente: (Londoño Linares, 2015)



Londoño Linares (2015) hizo un muestreo aleatorio en las zonas donde no existen eventos registrados para extraer tales datos de zona estable y consideró una “zona de influencia” alrededor de cada punto de deslizamiento suponiendo que también es una zona afectable y por lo tanto no puede tomarse como “estable”.

Para este efecto se utilizó un buffer de 20m entorno a cada punto del inventario de deslizamientos, justificado en el hecho de que los datos históricos de eventos presentan un área inferior. De esta forma se obtuvo una muestra de análisis con $327 \times 2 = 654$ puntos en el terreno, entre estables e inestables Figura 7.

Figura 7 Muestra de análisis de la investigación. Fuente: (Londoño Linares, 2015)



Luego, Londoño Linares (2015) configuró una matriz de datos con 654 filas correspondientes a igual número de puntos en la muestra de análisis y 29 filas correspondientes a igual número de factores de propensividad. Adicionó dos columnas extras para tener en cuenta las coordenadas X, Y de cada punto, y una más para clasificar la condición de cada punto como estable (0) o inestable (1).

Le asignó un peso a cada uno de los factores de propensividad. En esta tesis nos interesan estos dos factores de propensividad: Las precipitaciones y los sismos.

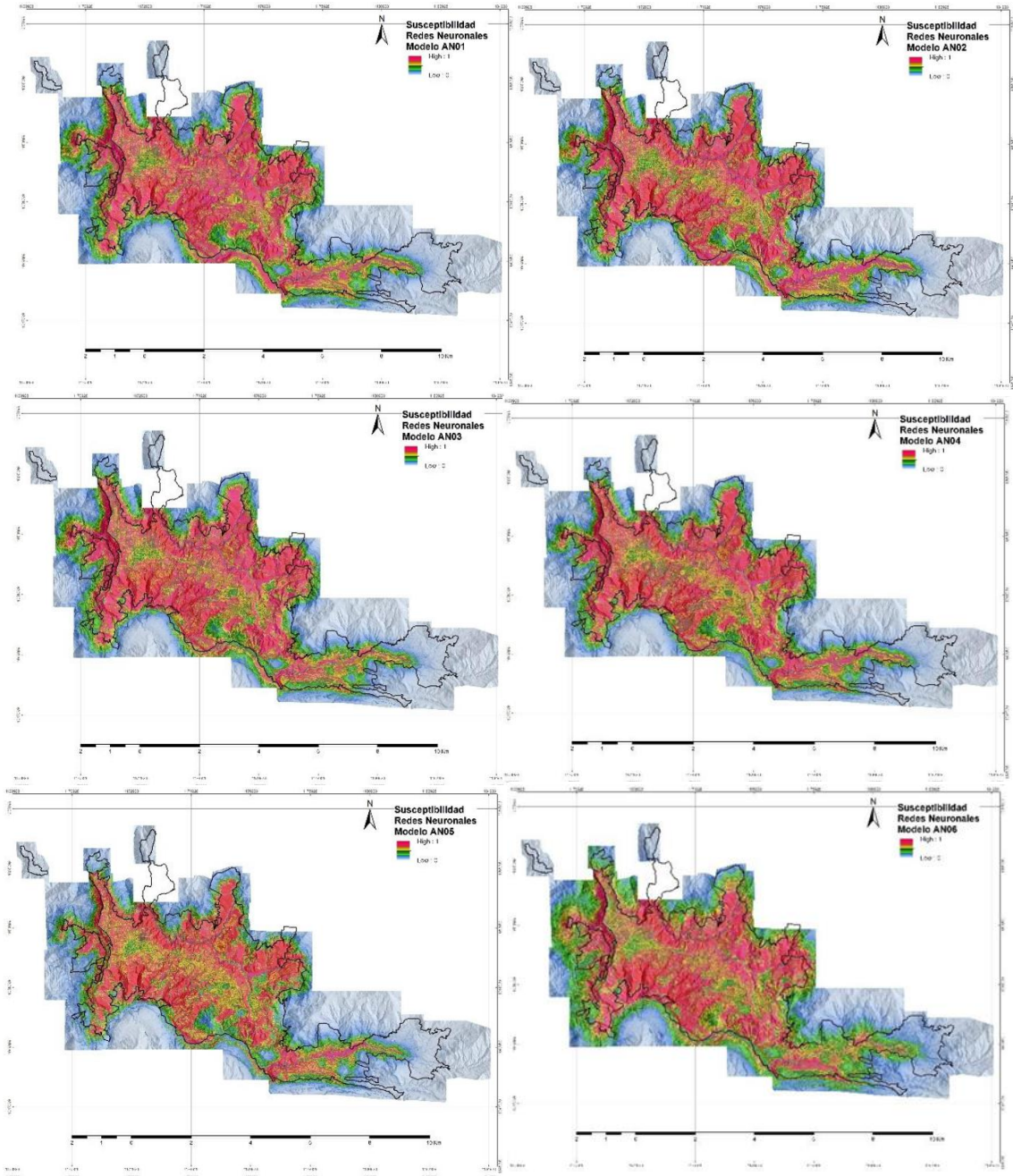
Una vista parcial de esta muestra de análisis se presenta en la Tabla 8.

Las columnas corresponden a los 29 factores de propensividad, con una columna extra que da cuenta del nivel de susceptibilidad del terreno (0, 1). En cuanto a número de filas, está constituida por los 327 datos provenientes del inventario de deslizamientos (1), más otros 327 datos seleccionados aleatoriamente del área estable (0) (Londoño Linares, 2015).

Tabla 8 Muestra de análisis para la elaboración de modelos de susceptibilidad. Fuente: (Londoño Linares, 2015)

X	Y	ACCA	ASPE	SINA	COSA	ATGE	COBE	CRPL	CRPR	CURV	DACU	DALC	DDRE	DEM	DFAL	DPBR	DPNE	DRIO	DVIA	DVNE	ESTR	FMSU	GEOL	GEOM	H50M	INSO	LCCA	RUGO	SE2P	SLOP	V50M	DESL	
1171961	1053432	0.00	0.27	1.00	0.43	0.00	0.10	0.88	0.34	0.78	0.00	0.00	0.06	0.32	0.24	0.00	0.00	0.38	0.00	0.00	1.00	0.70	0.83	0.20	0.21	0.99	0.00	1.00	0.28	0.69	0.28	0	
1178210	1048923	0.00	0.21	0.98	0.64	0.00	0.80	0.88	0.34	0.78	0.01	0.01	0.03	0.45	0.19	0.00	0.00	0.13	0.03	0.00	1.00	0.70	1.00	1.00	0.01	0.99	0.01	1.00	0.27	0.09	0.01	0	
1178493	1047884	0.00	0.51	0.46	0.00	0.00	0.80	0.88	0.34	0.78	0.00	0.00	0.06	0.32	0.24	0.00	0.00	0.38	0.00	0.00	1.00	0.60	0.75	0.60	0.00	0.98	0.00	1.00	0.27	0.09	0.00	0	
1179319	1050420	0.00	0.60	0.20	0.10	0.00	0.80	0.88	0.34	0.78	0.27	0.40	0.15	0.67	0.23	0.00	0.00	0.53	0.23	0.00	1.00	0.70	1.00	0.80	0.00	0.99	0.00	1.00	0.27	0.09	0.00	0	
1181107	1049753	0.00	0.25	1.00	0.52	0.00	0.80	0.88	0.34	0.78	0.21	0.17	0.20	0.55	0.19	0.00	0.00	0.20	0.20	0.00	1.00	0.70	1.00	1.00	0.00	0.99	0.00	0.94	0.28	0.10	0.00	0	
1183185	1049042	0.00	0.88	0.15	0.86	0.00	0.80	0.88	0.34	0.78	0.40	0.45	0.34	0.66	0.04	0.00	0.00	0.34	0.00	0.00	1.00	0.60	0.75	0.20	0.01	0.99	0.00	0.99	0.28	0.10	0.01	0	
1171153	1053027	0.00	0.69	0.03	0.32	0.00	0.80	0.88	0.34	0.78	0.02	0.03	0.03	0.34	0.07	0.11	0.15	0.41	0.02	0.13	1.00	0.50	0.63	1.00	0.12	0.99	0.01	1.00	0.28	0.10	0.13	0	
1172738	1051691	0.00	0.40	0.80	0.10	0.00	0.10	0.88	0.34	0.78	0.00	0.00	0.08	0.46	0.10	0.41	0.36	0.40	0.00	0.28	0.13	0.70	0.63	0.20	0.53	0.99	0.00	0.99	0.33	0.17	0.60	0	
1177322	1051311	0.00	0.98	0.43	0.99	0.00	0.80	0.88	0.34	0.78	0.03	0.03	0.04	0.48	0.07	0.00	0.00	0.07	0.03	0.00	1.00	1.00	0.38	0.20	0.53	0.99	0.00	0.99	0.33	0.17	0.60	0	
1180209	1049593	0.00	0.45	0.66	0.03	0.00	0.60	0.88	0.35	0.78	0.14	0.14	0.00	0.52	0.16	0.00	0.00	0.17	0.18	0.00	1.00	0.70	1.00	1.00	0.00	0.98	0.04	0.90	0.31	0.11	0.00	0	
1182369	1049009	0.00	0.73	0.00	0.44	0.00	0.80	0.88	0.34	0.78	0.15	0.22	0.06	0.59	0.01	0.00	0.00	0.06	0.09	0.00	1.00	0.60	0.75	1.00	0.00	0.99	0.00	1.00	0.31	0.11	0.00	0	
1174449	1050922	0.00	0.64	0.11	0.18	0.00	0.10	0.88	0.34	0.78	0.00	0.00	0.03	0.36	0.04	0.00	0.00	0.19	0.00	0.00	1.00	0.70	1.00	1.00	0.20	0.36	0.99	0.00	1.00	0.32	0.11	0.41	0
1174105	1053746	0.00	0.44	0.68	0.03	0.00	0.80	0.88	0.34	0.78	0.04	0.14	0.04	0.42	0.27	0.00	0.00	0.17	0.19	0.00	1.00	0.70	0.38	1.00	0.00	0.98	0.01	1.00	0.33	0.11	0.00	0	
1175572	1051063	0.00	0.03	0.59	0.99	0.00	0.80	0.88	0.34	0.78	0.04	0.01	0.03	0.46	0.06	0.00	0.00	0.31	0.04	0.00	1.00	0.70	1.00	0.20	0.16	0.86	0.00	0.99	0.34	0.12	0.00	0	
1172897	1052096	0.00	0.52	0.44	0.00	0.00	0.10	0.88	0.34	0.78	0.01	0.01	0.14	0.47	0.07	0.00	0.00	0.45	0.01	0.00	0.25	0.70	0.63	0.20	0.34	0.97	0.00	1.00	0.35	0.12	0.39	0	
1173700	1050998	0.00	0.51	0.48	0.00	0.00	0.10	0.88	0.34	0.78	0.00	0.00	0.03	0.34	0.09	0.00	0.00	0.17	0.02	0.00	1.00	1.00	0.20	0.54	0.97	0.01	1.00	0.35	0.12	0.47	0		
1178045	1051371	0.00	0.58	0.27	0.06	0.00	0.80	0.88	0.34	0.78	0.00	0.00	0.10	0.54	0.02	0.00	0.00	0.13	0.00	0.00	1.00	0.30	0.38	1.00	0.10	0.98	0.00	0.98	0.35	0.12	0.11	0	
1177146	1049133	0.00	0.74	0.00	0.46	0.00	0.80	0.88	0.34	0.78	0.03	0.02	0.03	0.39	0.14	0.00	0.00	0.10	0.10	0.00	1.00	0.50	1.00	1.00	0.00	0.99	0.00	0.97	0.36	0.12	0.00	0	
1176166	1054729	0.00	0.46	0.62	0.02	0.00	0.80	0.88	0.34	0.78	0.05	0.03	0.03	0.50	0.35	0.00	0.00	0.12	0.05	0.00	1.00	0.30	0.38	1.00	0.00	0.97	0.01	1.00	0.36	0.12	0.00	0	
1173034	1051216	0.00	0.21	0.98	0.63	0.00	0.80	0.88	0.34	0.78	0.04	0.03	0.01	0.35	0.04	0.00	0.00	0.21	0.02	0.00	0.00	0.50	0.63	1.00	0.02	0.95	0.00	0.99	0.85	0.34	0.01	1	
1173837	1052721	0.00	0.26	1.00	0.49	1.00	0.10	0.88	0.35	0.78	0.00	0.00	0.02	0.45	0.03	0.00	0.00	0.07	0.01	0.00	1.00	0.70	1.00	1.00	0.48	0.96	0.00	0.99	0.85	0.34	0.45	1	
1173753	1052760	0.00	0.82	0.04	0.71	0.00	0.10	0.89	0.34	0.78	0.01	0.00	0.03	0.45	0.06	0.00	0.00	0.08	0.03	0.00	0.13	0.70	1.00	1.00	0.51	0.95	0.00	0.99	0.85	0.34	0.49	1	
1173602	1053160	0.00	1.00	0.50	1.00	1.00	0.10	0.88	0.34	0.78	0.01	0.01	0.02	0.41	0.21	0.00	0.00	0.04	0.01	0.00	0.13	1.00	0.63	1.00	0.16	0.86	0.00	0.99	0.86	0.35	0.15	1	
1173400	1051630	0.00	0.41	0.77	0.08	0.00	0.10	0.88	0.34	0.79	0.01	0.01	0.01	0.44	0.04	0.00	0.00	0.43	0.02	0.00	0.00	0.50	0.63	0.20	0.09	0.89	0.00	0.97	0.86	0.35	0.12	1	
1173210	1051180	0.00	0.64	0.12	0.18	0.00	0.60	0.88	0.34	0.78	0.02	0.02	0.03	0.35	0.03	0.00	0.00	0.19	0.01	0.00	0.00	0.50	1.00	0.80	0.01	0.92	0.00	1.00	0.86	0.35	0.01	1	
1174060	1052650	0.00	0.29	0.99	0.39	0.00	0.10	0.88	0.34	0.78	0.01	0.03	0.01	0.40	0.06	0.00	0.00	0.04	0.04	0.00	0.00	0.50	1.00	1.00	0.21	0.95	0.00	0.99	0.87	0.35	0.20	1	
1174700	1052520	0.00	0.86	0.12	0.82	0.00	0.60	0.89	0.34	0.78	0.02	0.02	0.00	0.45	0.09	0.00	0.00	0.05	0.02	0.00	0.25	0.50	0.63	0.20	0.07	0.88	0.00	0.99	0.88	0.36	0.08	1	
1172155	1052500	0.00	0.58	0.26	0.06	1.00	0.80	0.88	0.35	0.78	0.01	0.01	0.01	0.48	0.05	0.00	0.00	0.51	0.01	0.00	1.00	1.00	0.63	0.20	0.07	0.88	0.00	0.99	0.88	0.36	0.08	1	
1172920	1051880	0.00	0.48	0.58	0.01	1.00	0.10	0.88	0.34	0.78	0.00	0.00	0.07	0.46	0.03	0.00	0.00	0.44	0.00	0.00	0.00	0.70	0.63	0.20	0.43	0.85	0.00	0.98	0.88	0.36	0.45	1	
1171970	1050680	0.00	0.25	1.00	0.50	0.00	0.10	0.88	0.34	0.78	0.01	0.01	0.04	0.39	0.25	0.00	0.00	0.24	0.00	0.00	1.00	0.50	0.63	0.60	0.14	0.95	0.00	0.99	0.88	0.36	0.16	1	
1175120	1051601	0.00	0.32	0.96	0.30	0.00	0.10	0.89	0.34	0.78	0.01	0.01	0.03	0.46	0.00	0.18	0.07	0.28	0.00	0.06	0.38	0.70	1.00	0.20	0.13	0.94	0.00	0.99	0.88	0.36	0.15	1	
1173264	1053893	0.00	0.69	0.04	0.31	0.00	0.60	0.88	0.34	0.78	0.00	0.00	0.02	0.38	0.06	0.00	0.00	0.05	0.04	0.00	1.00	0.10	0.38	1.00	0.00	0.94	0.00	0.99	0.89	0.37	0.00	1	
1173640	1051650	0.00	0.51	0.47	0.00	0.00	0.10	0.88	0.34	0.78	0.01	0.01	0.03	0.42	0.08	0.00	0.00	0.36	0.00	0.00	0.13	0.70	1.00	0.20	0.46	0.85	0.00	1.00	0.89	0.37	0.44	1	
1173250	1051270	0.00	0.71	0.02	0.37	0.00	0.10	0.89	0.34	0.78	0.00	0.01	0.05	0.39	0.05	0.00	0.00	0.22	0.00	0.00	0.00	0.50	1.00	0.20	0.27	0.95	0.00	0.99	0.89	0.37	0.22	1	
1177872	1051422	0.00	0.81	0.03	0.68	1.00	0.10	0.89	0.34	0.78	0.01	0.00	0.10	0.51	0.05	0.00	0.00	0.10	0.00	0.00	1.00	0.30	0.38	1.00	0.12	0.94	0.00	0.98	0.89	0.37	0.12	1	
1172500	1051370	0.00	0.34	0.92	0.23	0.00	0.10	0.88	0																								

Figura 8 Diferentes modelos de RNA (Redes Neuronales Artificiales) calculados. Fuente: (Londoño Linares, 2015).



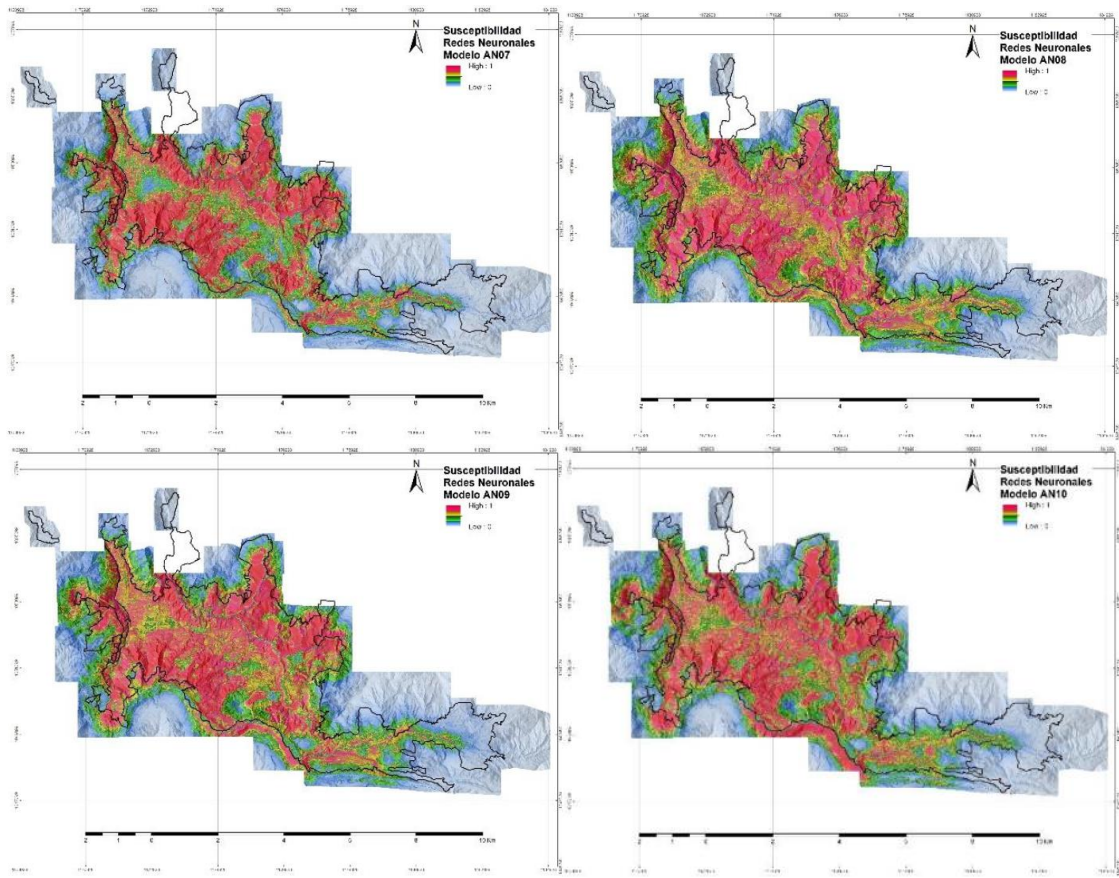
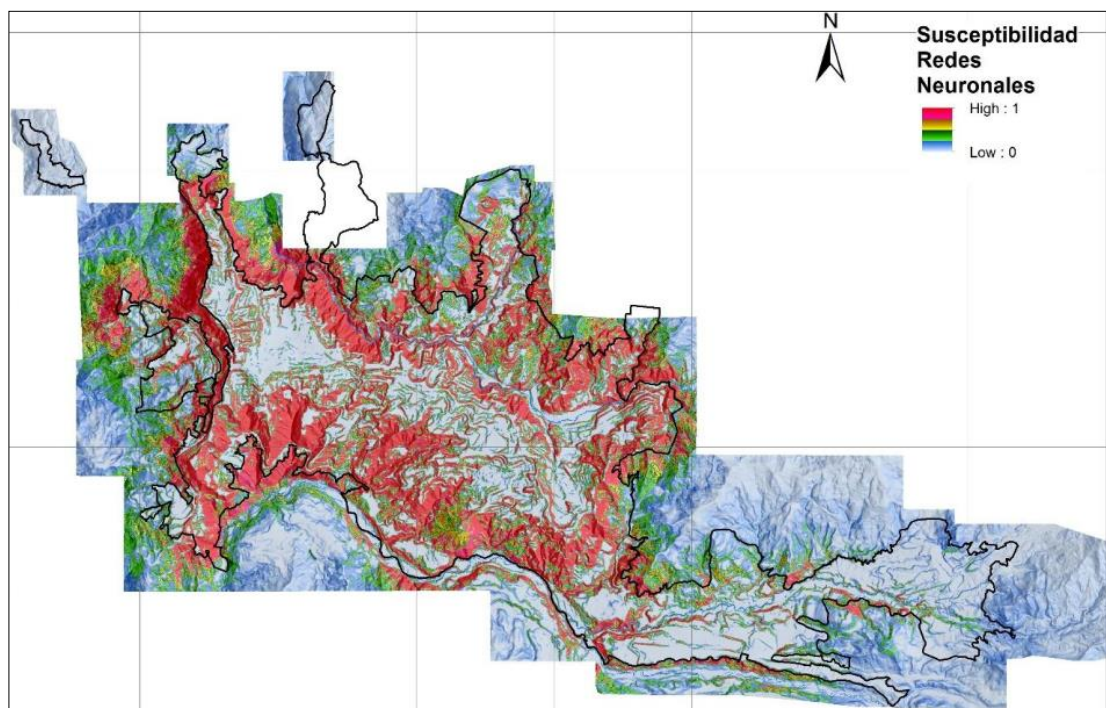


Figura 9 Mapa de susceptibilidad por el método de Redes Neuronales Artificiales Fuente: (Londoño Linares, 2015)



El modelo de susceptibilidad obtenido está representado por una función numérica continua acotada entre 0 y 1. Por lo tanto, se establecen unas series de categorías descriptivas de los niveles obtenidos lo cual se ilustra en Tabla 9.

Tabla 9 Criterios para categorizar la susceptibilidad. Fuente: (Londoño Linares, 2015)

Criterio		Rango	Descriptivo
Primer tercio	10% más bajo	0 – 0.10	Muy Baja
		0.10 – 0.33	Baja
Segundo tercio		0.33 – 0.66	Moderada
Tercer tercio	10% más alto	0.66 – 0.90	Alta
		0.90 - 1	Muy Alta

Con los criterios extraídos de la investigación de Londoño Linares (2015) es posible proponer un mapa con categorías definidas en términos cualitativos que den cuenta de la “gravedad” de la susceptibilidad.

En este mapa de susceptibilidad de la Figura 9 se hizo la superposición de los rellenos analizados en esta tesis y ninguno de estos presentó susceptibilidad de deslizamiento alta (valor asignado=1; color rojo). La clasificación de los rellenos se observa que están en los colores azules y verdes, es decir presentan susceptibilidad de deslizamiento baja a muy baja (valor asignado entre 0 y 0.5), Figura 10 y Figura 11.

Se aclara que la Figura 10 y la Figura 11 no son muy legibles ya que el mapa de susceptibilidad fue tomado del documento de la investigación en extensión jpg (imagen) y posteriormente se hizo la superposición de los 12 rellenos en el software Argis.

Con base en este mapa de susceptibilidad de la Figura 9 se elaboró el mapa de amenaza por deslizamiento para Manizales Figura 16, Figura 20, Figura 21.

Figura 10 Superposición de los 12 rellenos (Polylineas en color amarillo) en el Mapa de susceptibilidad por el método de Redes Neuronales Artificiales de (Londoño Linares, 2015). Fuente: Propia

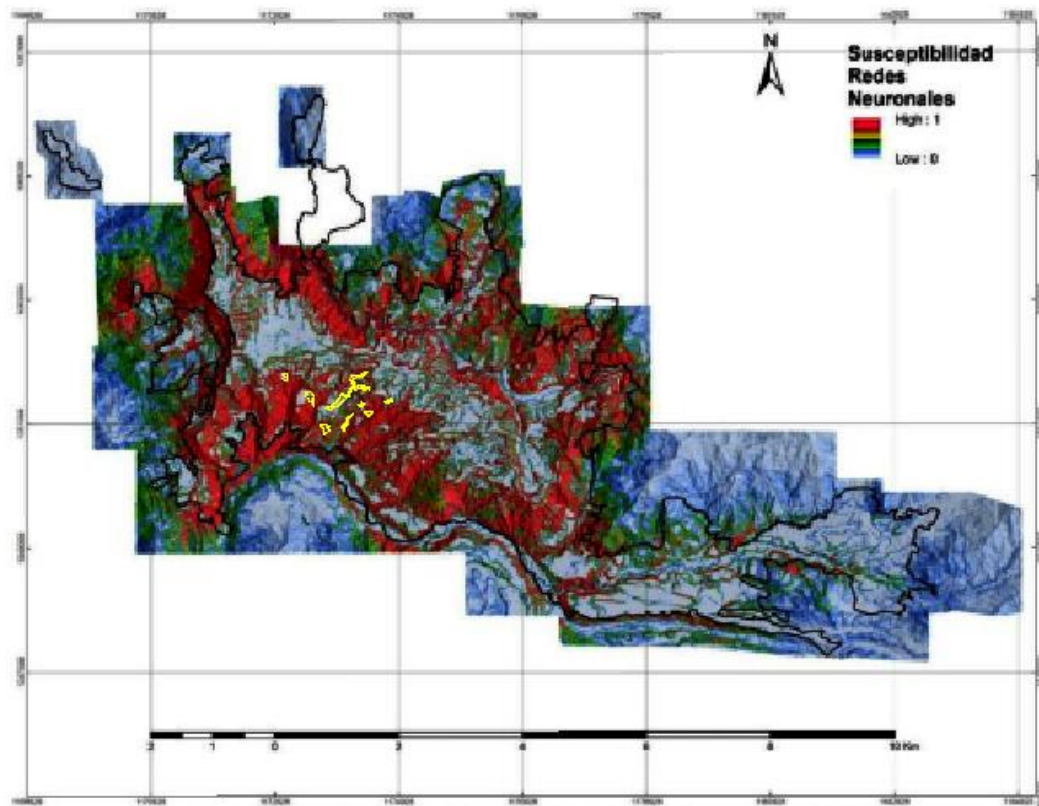
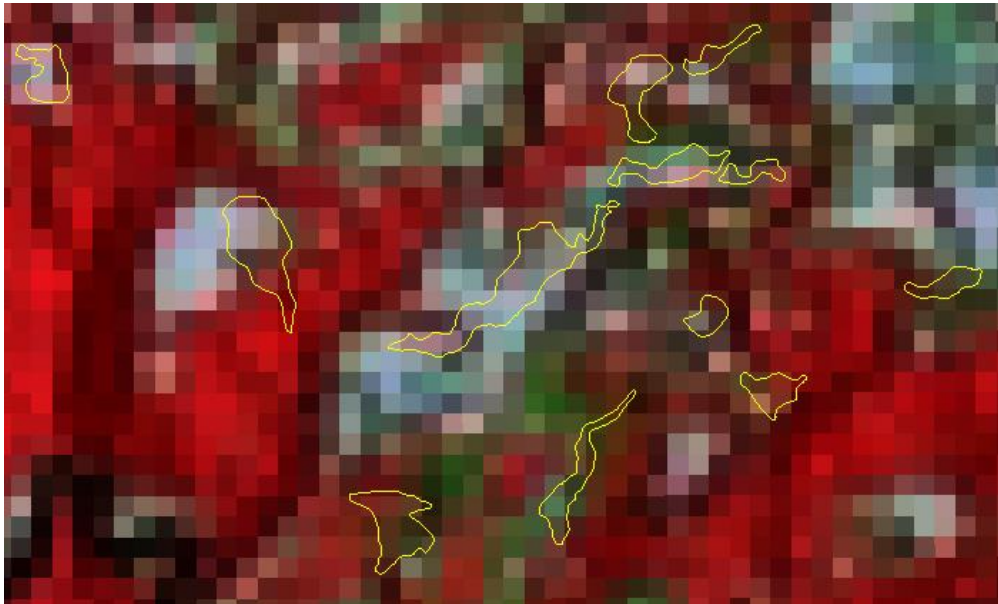


Figura 11 Zoom de la Figura 10 Superposición de los 12 rellenos en el Mapa de susceptibilidad por el método de Redes Neuronales Artificiales de (Londoño Linares, 2015). Fuente: Propia



Estos principios de la investigación de Londoño Linares (2015), mencionados en este capítulo, fueron aplicados en el desarrollo de un estudio realizado entre la Universidad Nacional de Colombia y Corpocaldas que tuvo como objeto: “Mejorar la gestión del riesgo en la planificación y la toma de conciencia en el Municipio de Manizales, Fase 1”.

Se observó en dicho estudio la aplicación de toda la metodología de Londoño Linares (2015). Sin embargo, en la elaboración del mapa de susceptibilidad por medio de redes neuronales, se aplicó la categorización ilustrada en la Tabla 9.

Además, se generaron los mapas de susceptibilidad con topografías de los años 2004 y 2010:

Figura 12 Modelo de susceptibilidad elaborado con topografía del año 2004. Fuente: (Contrato interadministrativo No.240.2012 suscrito entre Corpocaldas y la Universidad Nacional de Colombia, Sede Manizales, 2014)

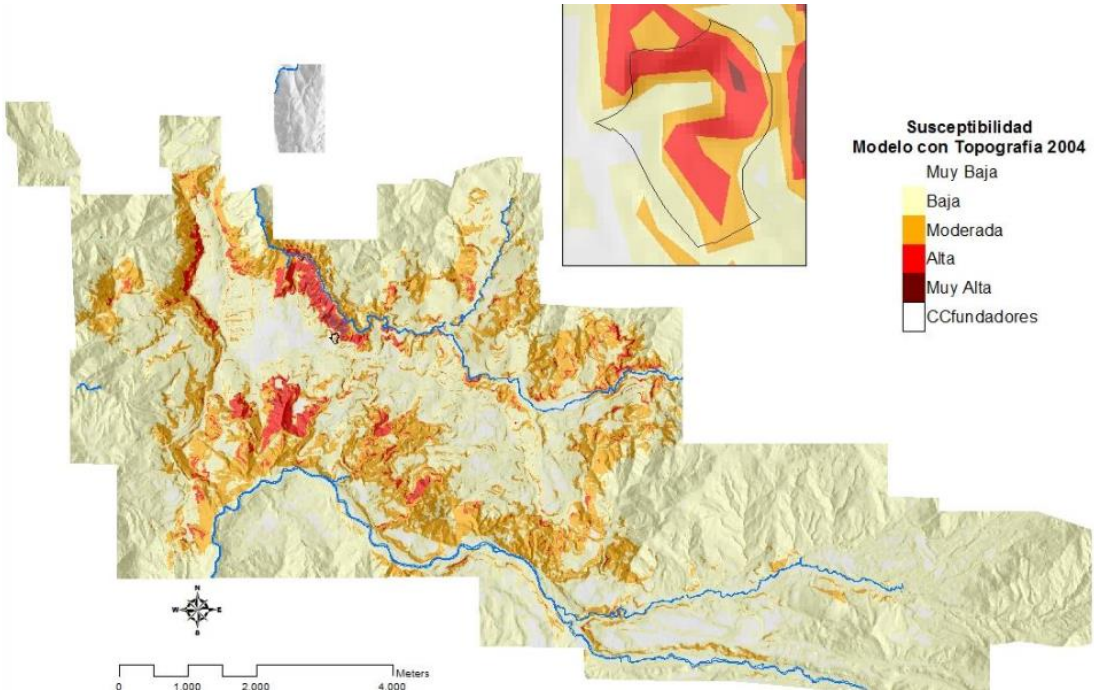
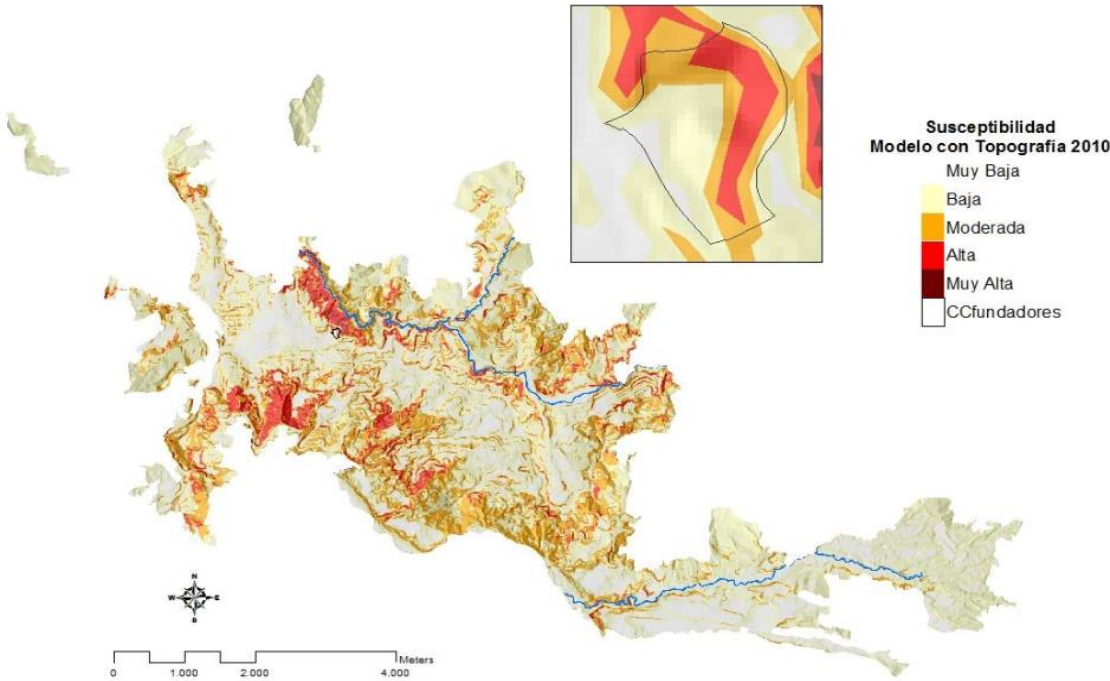


Figura 13 Modelo de susceptibilidad elaborado con topografía del año 2010. Fuente: (Contrato interadministrativo No.240.2012 suscrito entre Corpocaldas y la Universidad Nacional de Colombia, Sede Manizales, 2014)



En este estudio tomaron como insumo los datos de la Tabla 6 y la Tabla 7, los cuales corresponden al registro de lluvias de la estación Posgrados: Basándose en estos datos obtuvieron unas ecuaciones de los umbrales Intensidad / Duración con sus curvas correspondientes. Así:

Probabilidad de deslizamientos al exceder el umbral de 50%, indica que la probabilidad de encontrar deslizamientos con lluvias por debajo de esta curva es del 50%:

$$I = 14.642 D^{-0.5026}$$

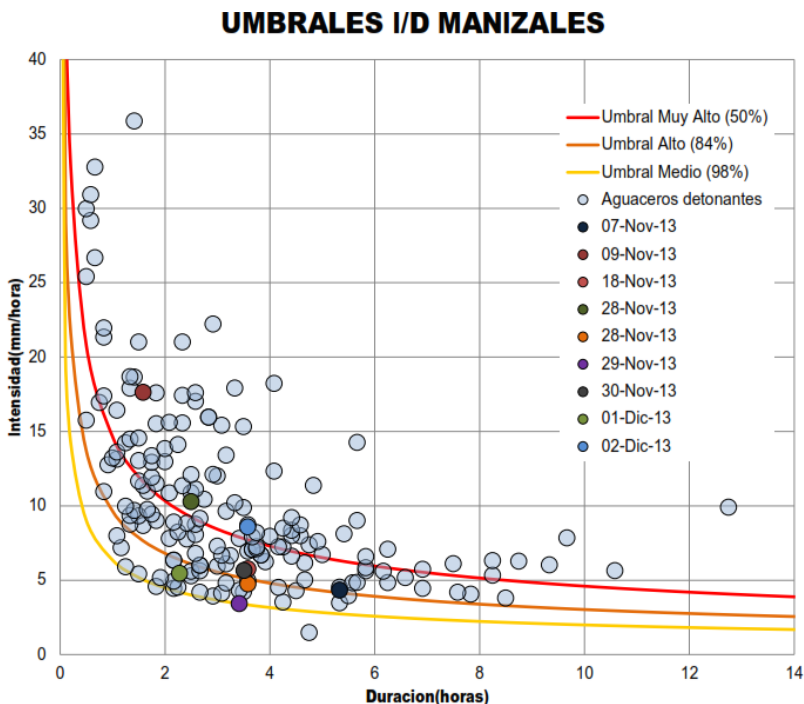
Probabilidad de deslizamientos al exceder el umbral de 84%, indica que la probabilidad de encontrar deslizamientos con lluvias por debajo de esta curva es del 16%:

$$I = 9.6434 D^{-0.5026}$$

Probabilidad de deslizamientos al exceder el umbral de 98%, indica que la probabilidad de encontrar deslizamientos con lluvias por debajo de esta curva es del 2%:

$$I = 6.3513 D^{-0.5026}$$

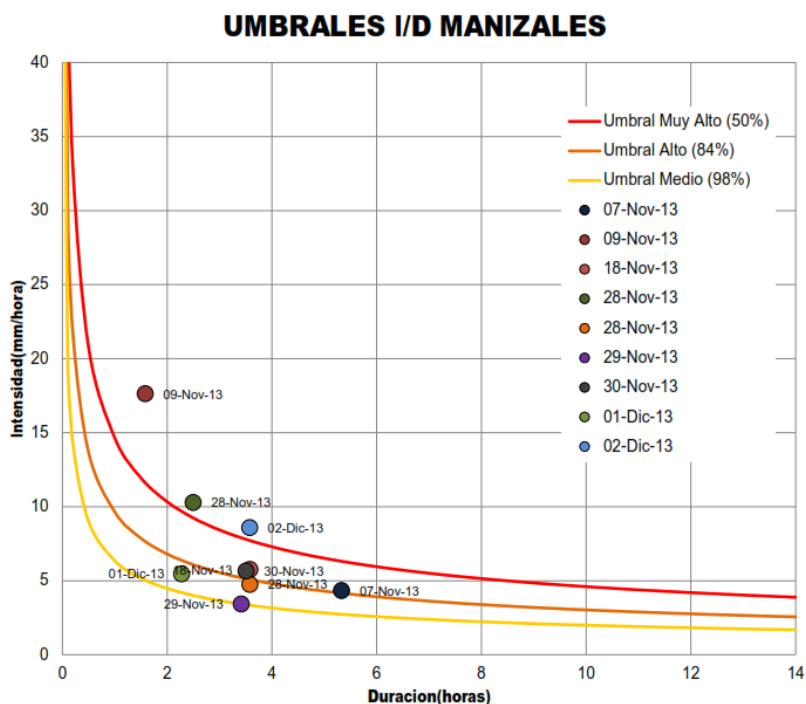
Figura 14 Umbrales ID propuestos para Manizales. Fuente: (Contrato interadministrativo No.240.2012 suscrito entre Corpocaldas y la Universidad Nacional de Colombia, Sede Manizales, 2014)



El estudio menciona que utiliza estos umbrales como instrumento de un sistema de alerta temprana, haciendo la confrontación de los valores en tiempo real de la intensidad y duración de los aguaceros, con los valores del umbral.

En la Figura 15 se ubicaron los datos de algunos aguaceros que produjeron deslizamientos durante el segundo semestre de 2013 en varios puntos de la ciudad.

Figura 15 Aguaceros del segundo periodo lluvioso del año 2013 que generaron deslizamientos. Fuente: (Contrato interadministrativo No.240.2012 suscrito entre Corpocaldas y la Universidad Nacional de Colombia, Sede Manizales, 2014)

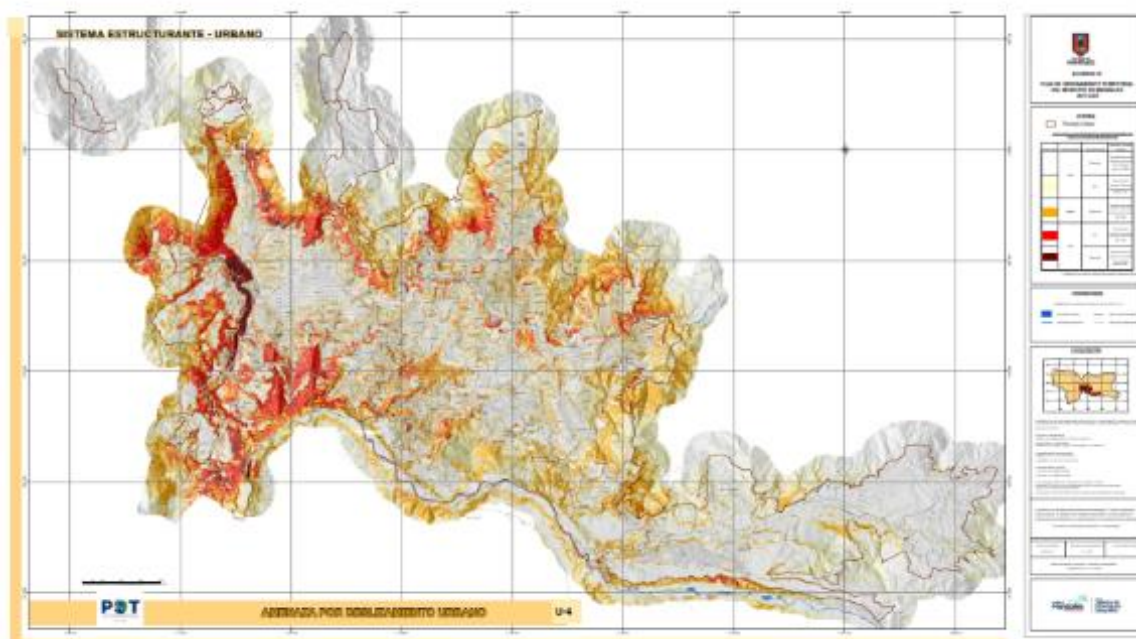


Se puede observar del gráfico que todos fueron predichos por el umbral propuesto.

En este estudio realizado entre la Universidad Nacional de Colombia y Corpocaldas se elabora un mapa de amenaza por deslizamiento, sin embargo la explicación de su elaboración no es lo suficientemente clara para incluirla en este documento.

Se muestra el mapa en la Figura 16. También se adjunta a este documento en el Anexo 18.

Figura 16 Mapa de amenaza por deslizamiento para el área urbana de la ciudad de Manizales. Fuente: Sistema de información geográfica SIG Alcaldía de Manizales



Es importante destacar que el mapa de la Figura 16 está incluido en el plan de ordenamiento territorial 2017-2031 y está vigente para Manizales.

Cualquier predio urbano que se desee intervenir para la construcción de edificaciones o de infraestructura deberá estar ubicado en las manchas de amenaza baja por deslizamiento.

En el caso que un predio se encuentre en amenaza alta por deslizamiento, se deberán realizar estudios geotécnicos detallados con el fin de proponer obras que mitiguen esta amenaza alta y que el predio pueda ser recategorizado a amenaza baja.

3.2.2 Antecedentes del Problema

Desde el año 1963 la presencia de invasiones (viviendas informales) hacen parte del perímetro urbano de Manizales, unido a un urbanismo improvisado y una arquitectura informal, que da como resultado el poblamiento de laderas poco propicias para la formación de barrios (Londoño Linares, 2015).

Hacia los años 1972 y 1973 se empiezan a ver las consecuencias del desordenado asentamiento en terrenos inapropiados con la ocurrencia de deslizamientos que dejan damnificados.

Se presentan deslizamientos persistentes en períodos lluviosos en Manizales. Según registros oficiales de la Oficina Municipal para la Prevención y Atención de Desastres OMPAD, que ahora es la oficina de Gestión del Riesgo Municipal, entre 1948 y 1962 se presentaron 25 deslizamientos, dejando una cifra de 45 muertos y 65 heridos.

El problema aumentó notoriamente con el incremento de las urbanizaciones y la presión poblacional; en el período 1963-1977 se presentaron 163 eventos, dejando una cifra de 170 muertos y 49 heridos.

Se empieza a evidenciar la fuerte relación existente entre necesidades de espacio, urbanización popular, adecuación de terrenos y deslizamientos (Londoño Linares, 2015).

El municipio de Manizales presenta por primera vez su plan de ordenamiento territorial en el año 2001 con lineamientos para el desarrollo futuro de la ciudad de los siguientes 9 años.

En el 2003 se hace una revisión del Plan de Ordenamiento Territorial y se plantea la actualización de la planimetría existente en la Alcaldía de la ciudad y se avanza de la mano de Corpocaldas en el estudio de las zonas de amenaza por deslizamiento y el inventario de las obras geotécnicas realizadas por esta entidad, debido principalmente

al aumento de las lluvias y sucesos de deslizamientos que llegan a 90 en 2003, con el índice más alto de muertos por año hasta ese momento, 41 muertos y más de 100 heridos (Londoño Linares, 2015).

Las amenazas principales de la ciudad de Manizales tienen que ver con fenómenos de actividad sísmica, actividad volcánica y movimientos en masa.

Las características geológicas y topográficas particulares, hacen que Manizales sea una zona susceptible a sufrir fuertes procesos denudativos y de flujos de escombros; siendo amplificada esta situación por la intervención antrópica a través de la adecuación de terrenos y las características físicas y mecánicas del suelo (Londoño Linares, 2015).

Los procesos de inestabilidad en la ciudad son provocados principalmente por erosión que tiene como causa principal la escorrentía superficial. Principalmente se trata de: erosión en surcos, erosión en cárcavas, escurrimiento laminar, socavación lateral, erosión acelerada o antrópica.

Generalmente se trata de reptación o deslizamientos ocasionados por la infiltración de aguas superficiales y la saturación del terreno. En general, es posible decir que la estabilidad de taludes y laderas en Manizales está gobernada por variables topográficas, geológicas, biológicas, climáticas y antrópicas (Londoño Linares, 2015).

Dentro de los factores que determinan la inestabilidad de los suelos, cabe destacar la acción del agua.

Los suelos de Manizales presentan exceso de humedad, generado por la alta pluviosidad, la permeabilidad de dichos suelos y las aguas subterráneas controladas por los contactos entre estratos.

Adicionalmente, la red natural de drenajes se ha visto alterada por los procesos urbanísticos, con mayor intensidad a partir de los años 70, al realizar llenos y cortes

para la adecuación de terrenos dentro de las cuencas, muchas veces sin considerar procedimientos técnicos adecuados.

Se presentan también zonas de alta infiltración y saturación por obras inadecuadas, producto del proceso acelerado de urbanización en los últimos años, como ejemplo, se mencionan los sitios de entrega de alcantarillados en la parte media de laderas pendientes, que generan procesos erosivos (Londoño Linares, 2015).

Se consultó la literatura y el estado del arte relacionado con deslizamientos que se hayan presentado a través del tiempo en los rellenos analizados en esta tesis pero solo encontraron inventarios de deslizamientos distribuidos en toda el área de Manizales.

Se consultaron estudios e investigaciones de las diferentes universidades, entidades gubernamentales como Corpocaldas, Secretaria de Planeación del Municipio de Manizales, Oficina de Gestión del Riesgo Municipal, entre otras.

La oficina de gestión del riesgo de Manizales, en su antigua página web www.gestiondelriesgomanizales.com, la cual ya no existe pero se logró consultar al momento de recopilar información para el desarrollo de esta tesis, presentaba un histórico de deslizamientos y avalanchas ocurridos en la ciudad desde aproximadamente el año 2001 hasta 2017, fecha de cierre de ese portal.

De allí se extrajeron las fechas en las cuales se generaron mayor número de deslizamientos en la ciudad con sus respectivas afectaciones tanto de viviendas como de habitantes. Esta información se incluye en la Tabla 10.

Tabla 10 Registro histórico de deslizamientos en Manizales. Fuente: Antigua página www.gestiondelriesgomanzales.com- Sistema Nacional para la Gestión del Riesgo de Desastres, SIGPAD.

FECHA	CANTIDAD	AFECCION PERSONAS	AFECCION VIVIENDAS E INFRAESTRUCTURA
17 de abril de 2002	1	2 Personas muertas, 3 Heridas, 30 Afectadas	2 viviendas destruidas, 4 viviendas averiadas.
18 de marzo de 2003	90	18 Personas muertas, 32 Heridas, 811 Damnificadas	74 viviendas destruidas, 104 viviendas afectadas. 635 viviendas evacuadas y 1700 viviendas quedaron en zona de riesgo
19 de marzo de 2003			
28 de octubre de 2003	23	5 Personas muertas, 16 Heridas 205 Afectadas, 41 familias afectadas y 243 familias evacuadas	9 viviendas destruidas y 6 averiadas.
11 de noviembre de 2003	2	15 personas afectadas, 3 familias afectadas	3 viviendas averiadas
4 de diciembre de 2003	1	16 Personas Muertas, 3 heridas, 70 afectadas	14 viviendas destruidas.
26 de abril de 2004	1		Afecta via manizales-Neira
29 de noviembre de 2004	1	5 Personas afectadas, 1 Familia afectada	1 vivienda destruida
10 de febrero de 2005	1	1 Persona muerta y 1 herida	
15 de mayo de 2005	1	2 Personas heridas	
10 de junio de 2005	5	9 Personas muertas, 2 heridas 120 familias afectadas	6 viviendas destruidas y 27 averiadas
15 de octubre de 2005	1	15 Persona afectas, 3 Familias afectadas	3 viviendas averiadas
8 de noviembre de 2005	1	1 Persona muerta, 10 personas afectadas, 2 familias afectadas	2 viviendas averiadas
23 de marzo de 2006	1	1 Persona muerta, 5 personas afectadas y 1 familia	1 vivienda destruida
24 de marzo de 2006	2	1 Persona muerta, Afectacion a personas de una institucion educativa	
4 de abril de 2006	1	1 Persona herida	Via manizales-chinchina (autopista del café)
14 de diciembre de 2006	1	55 Personas afectadas, 11 Familias afectadas	6 viviendas destruidas y 5 averiadas
7 de mayo de 2007	1	7 Personas heridas, 20 personas y 5 familias afectadas	3 viviendas destruidas
31 de octubre de 2007	1	1 Persona muerta, 1 desaparecido, 1355 personas afectadas, 271 familias afectadas, 60 familias evacuadas	10 viviendas destruidas y 60 averiadas
5 de noviembre de 2007	1	46 Personas afectadas, 17 familias afectadas	10 viviendas averiadas
6 de noviembre de 2007	1	15 Personas afectadas, 3 familias afectadas	1 vivienda destruida y 2 averiadas
23 de noviembre de 2007	1	4 personas afectadas, 1 familia afectada	1 vivienda destruida
19 de febrero de 2008	1	30 personas afectadas, 6 familias afectadas	1 vivienda destruida y 2 averiadas
26 de mayo de 2008	1	12 Personas afectada, 3 familias afectadas	3 viviendas averiadas
15 de noviembre de 2008	9	1 Persona muerta, 17 heridas, 1665 personas afectadas, 774 familias afectadas	15 viviendas destruidas y 488 averiadas, 4 vias afectadas
1 de agosto de 2010	1	3 Personas heridas, 20 personas afectadas, 4 familias afectadas	3 viviendas destruidas y 1 averiada
28 de octubre de 2010	3	120 Persona afectadas, 24 Familias afectadas	23 viviendas averiadas. Via alberto mendoza sector expoferias afectada
6 de diciembre de 2010	1	30 Personas afectadas, 6 familias afectadas	6 viviendas averiadas
3 de marzo de 2011	5	585 Personas afectadas, 117 familias afectadas	117 viviendas afectadas
20 de marzo de 2011	2		Afecta via panamericana sin mayores consecuencias
26 de marzo de 2011	1	85 personas afectadas, 17 familias afectadas	10 viviendas destruidas, Afecta avenida centenario
12 de abril de 2011	2	194 niños evacuados del colegio eduardo santos	
19 de octubre de 2011	2	10 Personas afectadas, 2 familias afectadas. 400.000 habitantes de la ciudad sin suministro del servicio de agua durante 1 mes.	2 viviendas averiadas. Planta de potabilizacion del acueducto de la ciudad afectada 100%.
5 de noviembre de 2011	1	48 Personas muertas, 14 heridas.	14 viviendas destruidas y 3 averiadas
21 de noviembre de 2011	1	2 Personas heridas	
6 de diciembre de 2011	1	50% de la poblacion de manizales sin servicio de agua, 15 personas afectadas, 3 familias afectadas	3 viviendas destruidas, 2 puentes vehiculares y 1 peatonal.
7 de febrero de 2012	1	2 Personas heridas	Via panamericana afectada (taponamiento)
19 de abril de 2017	Aprox 30	17 Personas Muertas, 31 heridas, 3126 Familias afectadas, 4600 Personas Afectadas	37 Barrios Afectados, Av. Kevin angel, Ruta 30 y varias vias urbanas

De la Tabla 10 se observa que el mayor número de deslizamientos se presentaron en los dos periodos predominantes de lluvia en la ciudad, que son del mes de marzo a mayo y del mes de septiembre al mes de noviembre.

También se evidencia que en el mes de marzo del año 2003 se presentaron 90 deslizamientos, 9 en el mes de noviembre del año 2008 y 8 en el mes de marzo de 2011.

El Instituto de Estudios Ambientales (IDEA) – sede Manizales, presentó en su boletín No 145 del mes de marzo del año 2018: “Sistema Integrado de Monitoreo Ambiental de Caldas – SIMAC Red de estaciones meteorológicas e hidrometeorológicas automáticas de Manizales Estaciones para la gestión del riesgo ante desastres por

deslizamientos - primera parte”, un histórico de desastres en la ciudad de Manizales el cual se muestra en la Tabla 11:

Tabla 11 Histórico de desastres en Manizales. Fuente: Instituto de estudios ambientales IDEA – Universidad Nacional de Colombia-Sede Manizales

Periodos	Deslizamientos	Hidrológico meteorológicos	Sismos	Erupciones volcánicas	Antrópico tecnológico	Total
1917-1962	25	37	6	0	0	68
1963-1977	163	9	6	0	2	180
1978-1982	85	13	1	0	5	104
1983-1989	78	10	0	2	13	103
1990-1994	149	7	0	0	5	161
1995-1998	195	10	1	0	2	208
2002-2007	277	27	1	0	12	317
Total	972	113	15	2	39	1141
Porcentaje de eventos de este tipo sobre el total	85.2%	9.9%	1.3%	0.2%	3.4%	100%

Se puede observar de la Tabla 11 que de los 1141 eventos desastrosos registrados entre 1917 y 2007 en Manizales, el 85.2% de los eventos: 972 eventos, corresponden a deslizamientos.

También se puede evidenciar que el mayor número de deslizamientos se registraron entre los años 2002 a 2007 con un total de 277 eventos.

Cabe mencionar que la fuente de la cual se tomó la tabla no describe ni el lugar ni fecha exacta de los deslizamientos, tampoco damnificados ni personas heridas ni fallecidas.

El sistema de información del Servicio Geológico Colombiano tiene un inventario de movimientos en masa registrados desde el año 1969 al año 2012. En este se clasifican el tipo de movimiento, la fecha de ocurrencia y la localización.

En la Tabla 12 se observa la información:

Tabla 12 Reporte de registros de movimientos en masa para la ciudad de Manizales. Fuente Servicio Geológico Colombiano SGC.

◆ Filtros de Búsqueda

Dentro del departamento: CALDAS
 Dentro del municipio: MANIZALES
 Anteriores a las fecha [AAAA-MM-DD]: 2019-11-05

◆ Resultados:

Tipo movimiento del primer movimiento	Fecha evento	Departamento	Municipio	Veeda
Flujo	01/10/2012	CALDAS	MANIZALES	MANIZALES
Flujo	01/10/2012	CALDAS	MANIZALES	MANIZALES
Deslizamiento	01/10/2012	CALDAS	MANIZALES	MANIZALES
Caída	05/11/2011	CALDAS	MANIZALES	MANIZALES
Caída	17/10/2011	CALDAS	MANIZALES	MANIZALES
Caída	01/10/2009	CALDAS	MANIZALES	EL TABLAZO
Caída	01/10/2009	CALDAS	MANIZALES	MANIZALES
Caída	01/10/2009	CALDAS	MANIZALES	MANIZALES
Flujo	01/10/2009	CALDAS	MANIZALES	MANIZALES
Deslizamiento	01/10/2009	CALDAS	MANIZALES	MANIZALES
Deslizamiento	01/10/2009	CALDAS	MANIZALES	MANIZALES
Caída	24/08/2009	CALDAS	MANIZALES	MANIZALES
Flujo	20/05/2009	CALDAS	MANIZALES	MANIZALES
Flujo	20/05/2009	CALDAS	MANIZALES	MANIZALES
Flujo	15/04/2009	CALDAS	MANIZALES	MANIZALES
Flujo	22/11/2006	CALDAS	MANIZALES	MANIZALES
Flujo	07/10/2000	CALDAS	MANIZALES	MANIZALES
Deslizamiento	15/11/1999	CALDAS	MANIZALES	MANIZALES
Deslizamiento	15/11/1999	CALDAS	MANIZALES	EL TABLAZO
Deslizamiento	15/12/1993	CALDAS	MANIZALES	MANIZALES
Deslizamiento	01/01/1990	CALDAS	MANIZALES	MANIZALES
Deslizamiento	01/01/1990	CALDAS	MANIZALES	MANIZALES
Volcamiento	01/06/1989	CALDAS	MANIZALES	MANIZALES
Deslizamiento	15/04/1975	CALDAS	MANIZALES	MANIZALES
Flujo	15/03/1969	CALDAS	MANIZALES	MANIZALES
Deslizamiento	01/01/1969	CALDAS	MANIZALES	MANIZALES

Se compara la información reportada por el servicio geológico colombiano con la reportada en la anterior página web www.gestiondelriesgomanizales.com y se deduce que no coinciden ni es similar la información.

Cotejando la información reportada en la Tabla 10, donde el mayor número de deslizamientos se presentaron los días 18 y 19 de marzo del año 2003, con la información reportada en la Tabla 11, donde el mayor número de deslizamientos se presentaron entre los años 2002 y 2007, se diría que la información está relacionada entre sí.

Debido a que la información de la Tabla 10 tiene fechas exactas y presenta correlación con otra fuente de información, esta será utilizada como insumo en el capítulo de la metodología.

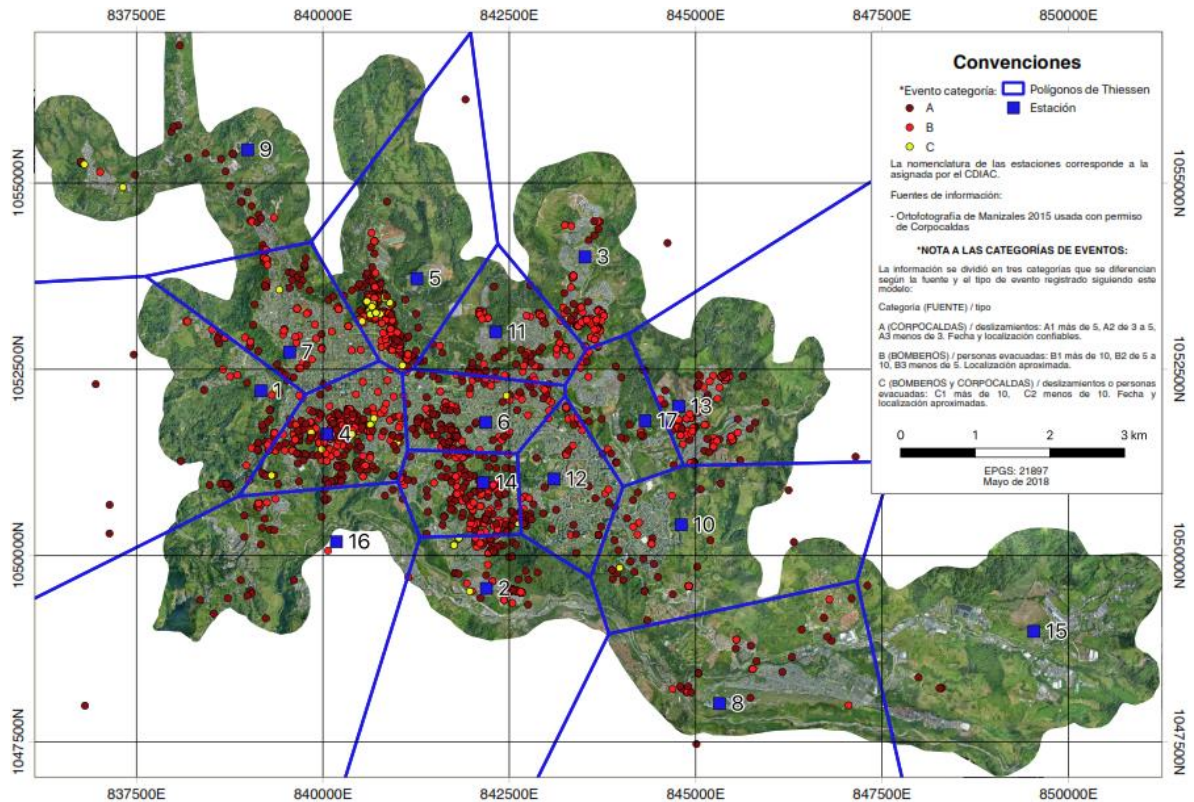
Valderrama Giraldo (2019) en su investigación incluye un mapa de Manizales donde se localizaron, por medio de puntos, deslizamientos ocurridos y registrados por Corpocaldas y el cuerpo oficial de bomberos de la ciudad.

También en este mismo mapa están localizados, por medio de puntos, los sitios donde se ejecutaron evacuaciones de personas debido a inminentes deslizamientos. Dichas evacuaciones las realizó el Cuerpo de Bomberos Municipal.

En el mapa se pueden observar los polígonos de Thiessen de los cuales se habló en el numeral 3.2.1, delimitados o demarcados y su respectiva estación pluviométrica.

En la Figura 17 se muestra el mapa, adicionalmente se adjunta a este documento en el Anexo 13:

Figura 17 Eventos registrados entre 1997 y 2017 por categoría y polígono localizados en mapa de Manizales. Fuente: (Valderrama Giraldo, 2019)



Se hizo la superposición de los rellenos (color magenta) en este mapa Figura 18, con el fin de revisar si coincidía la localización de los rellenos con la localización de algunos de estos eventos (puntos color azul aguamarina o verde claro). Esto se ilustra en la Figura 18 y Figura 19.

Se observa que dentro del área que abarca cada uno de los 12 rellenos no existen puntos azules aguamarina, lo que indica que no se registran antecedentes de eventos de deslizamiento en estos rellenos.

También se evidencia que en las laderas aledañas a los rellenos se han presentado eventos de deslizamiento o evacuación de personas ante deslizamientos inminentes.

Figura 18 Superposición de eventos (color azul aguamarina o verde claro) por (Valderrama Giraldo, 2019) coincidentes con localización de los 12 rellenos (Magenta) en mapa de Manizales. Fuente: Propia

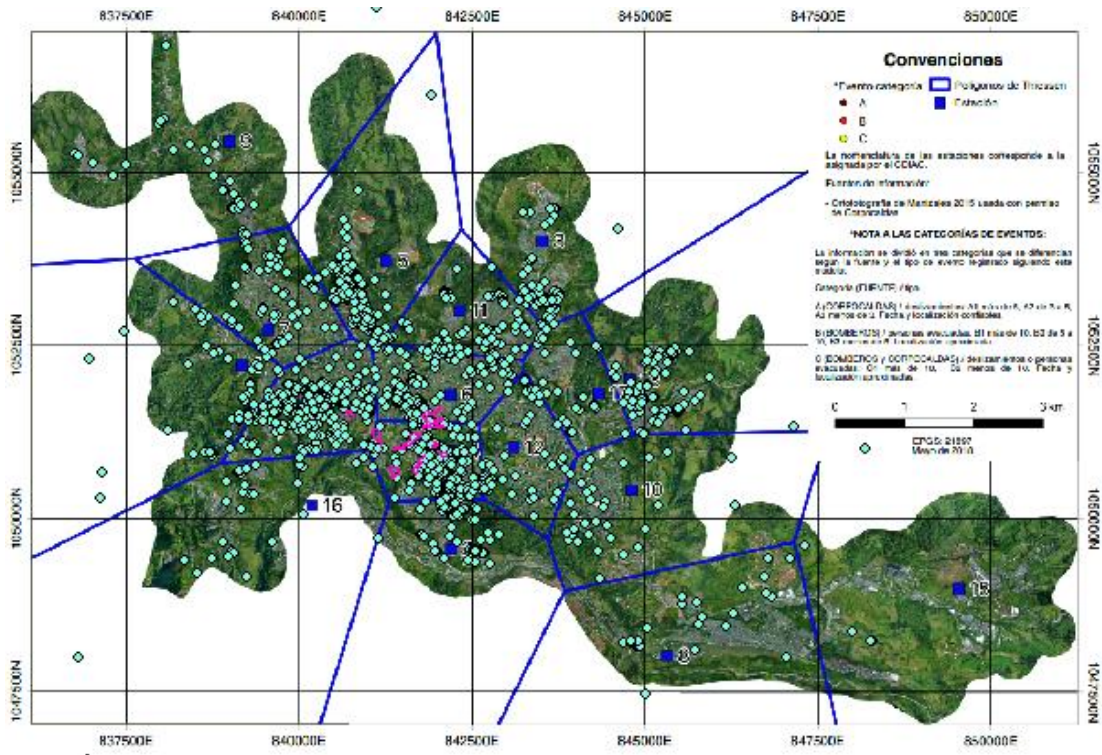
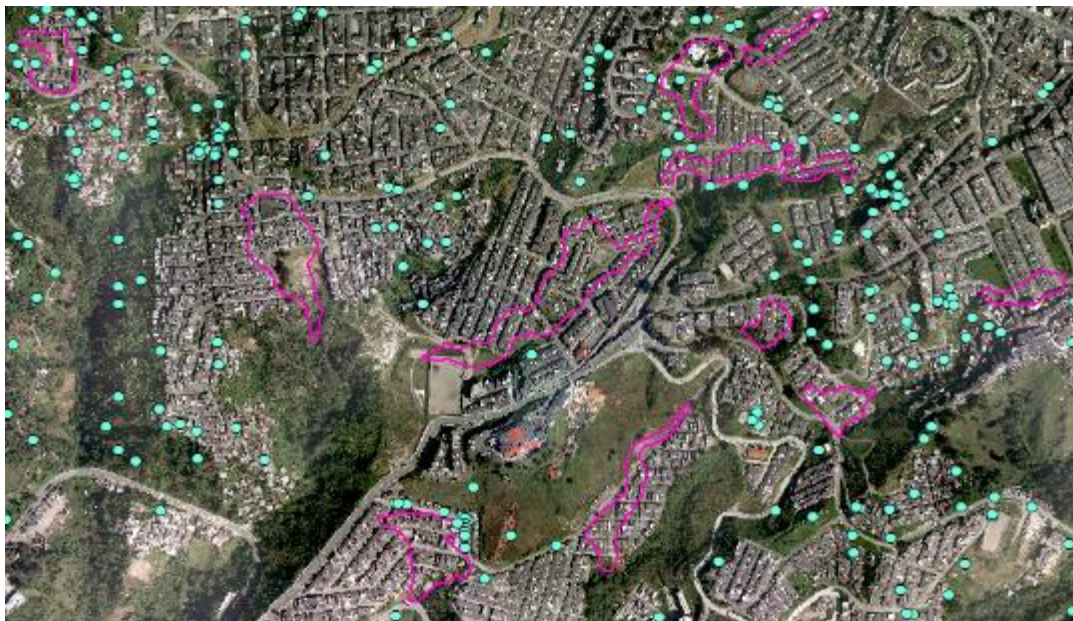






Figura 19 Zoom de Figura 18 Superposición de eventos sobre localización de los 12 rellenos en mapa de Manizales. Fuente: Propia



Se realizó además la superposición de los rellenos sobre el mapa de amenaza por deslizamiento vigente para Manizales. Esto con el fin de verificar la tasa anual de ocurrencia que tenían estos asociada a lluvia, considerando la calificación que se incluye en las leyendas y manchetas del mapa. Figura 20, Figura 21.

Se aclara que la Figura 20 y la Figura 21 no son muy legibles debido a la escala del mapa. Se tomó de la fuente en extensión jpg (imagen) y posteriormente se hizo la superposición de los 12 rellenos en el software Argis.

Tabla 13 Tasa anual de ocurrencia de deslizamientos para la ciudad de Manizales. Fuente: (ALCALDIA DE MANIZALES, 2017)

Convención	Nivel (3 clases)	Nivel (5 clases)	Amenaza* asociada a lluvia
	Bajo	Muy bajo	Inestabilidad muy remota, tasa anual de ocurrencia menor a 0.25‰
		Bajo	Inestabilidad remota, tasa anual de ocurrencia entre 0.25‰ y 1‰
	Medio	Moderado	Inestabilidad poco factible, tasa anual de ocurrencia entre 1‰ y 2‰
	Alto	Alto	Inestabilidad factible, tasa anual de ocurrencia entre 2‰ y 3‰
		Muy alto	Inestabilidad muy factible, tasa anual de ocurrencia mayor a 3‰

* debida a eventos predominantes traslacionales

Figura 20 Superposición de eventos y perímetros de los 12 rellenos sobre mapa de amenaza por deslizamientos de Manizales. Fuente: Propia

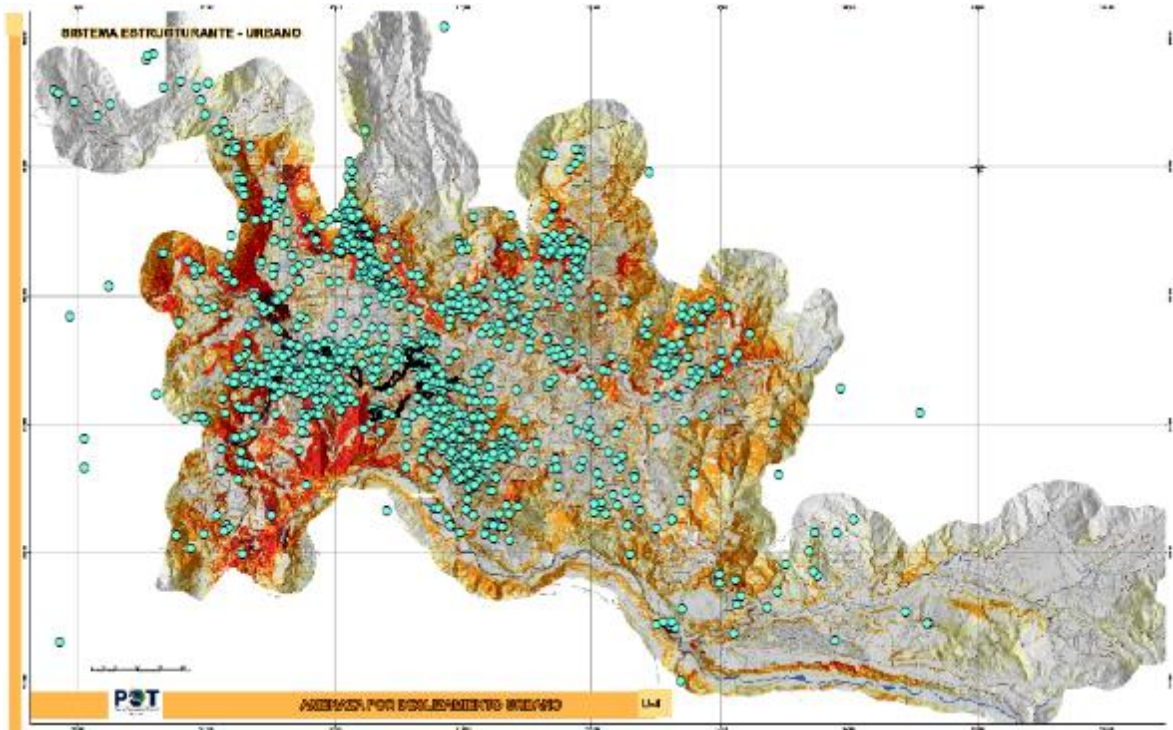
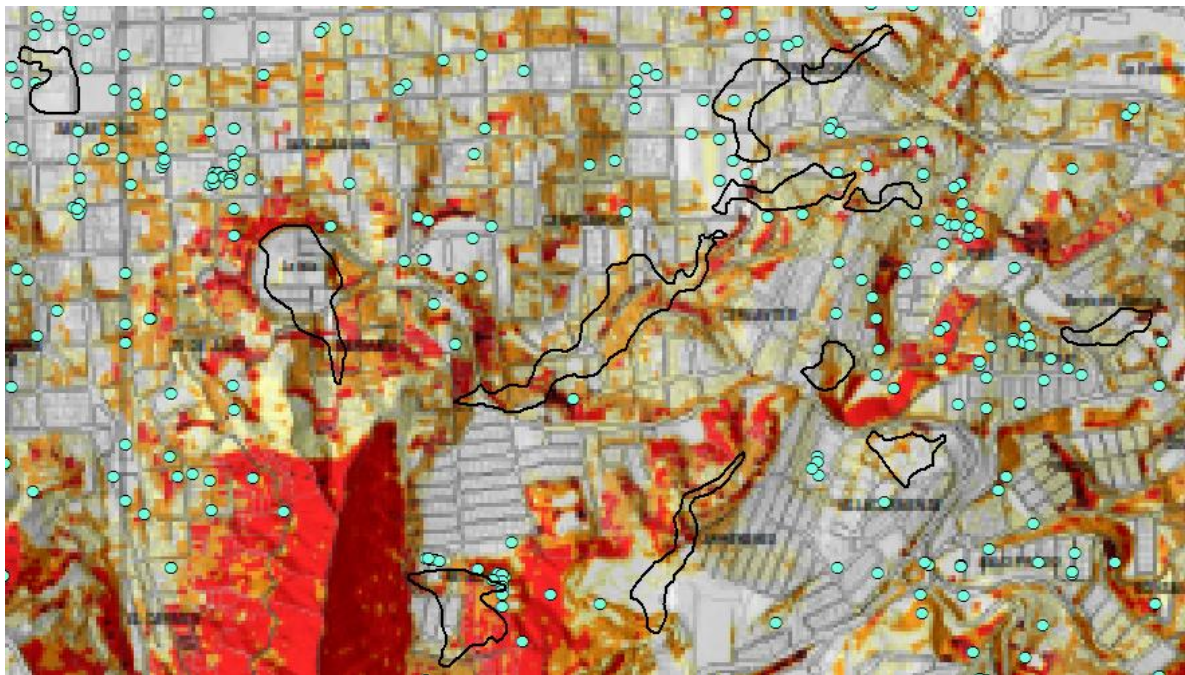


Figura 21 Zoom de Figura 20 Superposición de eventos y perímetros de los 12 rellenos sobre mapa de amenaza por deslizamientos de Manizales. Fuente: Propia



La tasa anual de ocurrencia de deslizamientos para los rellenos localizados en el mapa de amenaza Figura 20, muestra que están entre 0.25% y 1%.

Sin embargo los perímetros de los rellenos Villa Carmenza (VCM) y El Paraíso (PAR), abarcan unas áreas pequeñas de color café claro y roja respectivamente, lo que indicaría de acuerdo a la Tabla 13, una tasa anual de ocurrencia de deslizamientos entre 1% y 2% y entre 2% y 3% respectivamente.

Figura 22 Orthoimagen relleno Villacarmenza (Izquierda) -relleno El Paraíso (Derecho)



3.3 Marco Geográfico

3.3.1 Descripción del sitio de estudio

La ciudad de Manizales presenta una topografía pendiente y abrupta y a través del tiempo ha experimentado muchas intervenciones antrópicas con el fin de poder expandirse territorialmente en aras de su desarrollo y del beneficio de sus pobladores.

Estas intervenciones antrópicas han generado una cantidad de rellenos que actualmente no se puede determinar si se realizaron con buenas técnicas constructivas.

Para ese entonces no se contaba aun con una normatividad que rigiera estos temas.

Sólo hasta el año 1991 se presenta un código de construcciones para Manizales. En este se incluyeron los análisis geológicos-geotécnicos y la normatividad para realizar movimientos de tierra para la construcción de nuevas urbanizaciones.

En el año 1998 se elaboró el primer plan de ordenamiento territorial (POT) para la ciudad en aras de proyectar un crecimiento físico organizado y controlado (Osorio Sierra & Zuluaga Moreno, 2003).

La expansión territorial de la ciudad para los años noventa (90s) se dio hacia sus laderas Norte y Sur.

La ladera Sur de la Ciudad, es la misma vertiente Norte del río Chinchiná, en la cual se encuentran asentados una gran cantidad de barrios y esto se dio gracias a la adecuación de terrenos que generaron cortes y por ende rellenos antrópicos.

Esta tesis se basa en los rellenos antrópicos existentes en la vertiente norte del Río Chinchiná, entre la divisoria oriental de la quebrada el Guamal y la estación Uribe, y entre la avenida Santander y el río Chinchiná, ya que pueden ser barrios que se encuentren en amenaza por deslizamiento actualmente.

Las imágenes que a continuación se muestran, pretende ilustrar el área donde se localizan los rellenos y mostrar la secuencia cronológica de las intervenciones antrópicas que se realizaron a partir de 1946 hasta la actualidad.

En la fotografía aérea del año 1946 se observa el área donde se localizarían los rellenos casi sin intervenciones Figura 23. Para esta época se construyeron los rellenos del barrio San Joaquín y del Barrio Versalles. Para esto se intervinieron un afluente de la quebrada Marmato y la quebrada el Guamal, respectivamente (Osorio Sierra & Zuluaga Moreno, 2003).

Figura 23 Fotografía aérea de la Vertiente norte del río Chinchiná Año 1946. Área donde se localizan los 12 rellenos objeto de análisis (Osorio Sierra & Zuluaga Moreno, 2003)

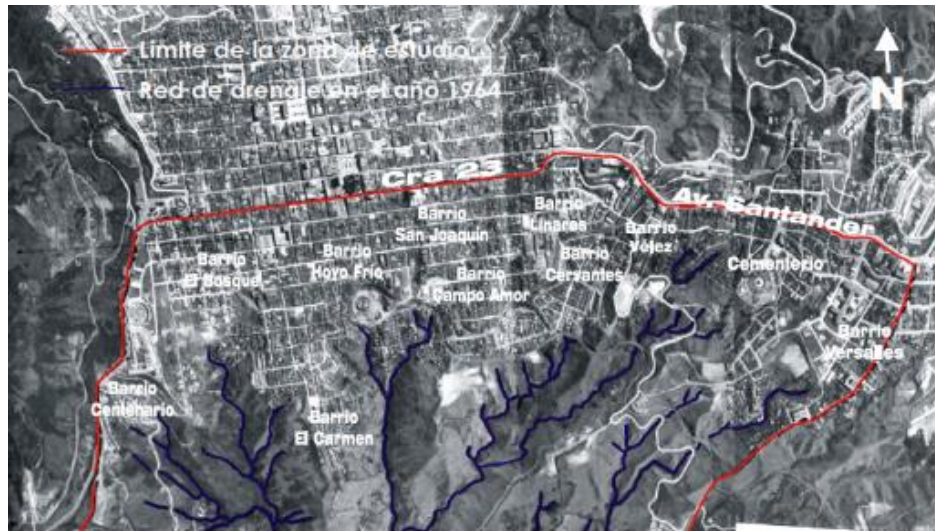


En la fotografía aérea del año 1964 se observa que en este periodo de casi 20 años se intervinieron otros cauces para la construcción de otros rellenos Figura 24.

Algunos de los cauces intervenidos fueron Centenario, Marmato, La Diana, Cervantes y La Única para que se construyeran los barrios Centenario, Hoyo Frio, San Joaquín, Campo amor, Cervantes.

Se iniciaba la construcción de los rellenos de los barrios El Bosque, El Nevado, La Isla, Camino del Palmar (Osorio Sierra & Zuluaga Moreno, 2003).

Figura 24 Fotografía aérea de la Vertiente norte del río Chinchiná Año 1964. Área donde se localizan los 12 rellenos objeto de análisis (Osorio Sierra & Zuluaga Moreno, 2003)



Para 1975 se detiene un poco la intervención de más cauces y la construcción de nuevos rellenos, pero si se urbanizan los rellenos que ya existían para esta época como lo fueron, El Bosque, Barrios Unidos, La Isla, El Nevado y Cementerio.

Para esta época se inicia la construcción del lleno del barrio Bajo prado en el sector del centro de salud (Osorio Sierra & Zuluaga Moreno, 2003).

Figura 25 Fotografía aérea No1 de la Vertiente norte del río Chinchiná Año 1975. Área donde se localizan los 12 rellenos objeto de análisis (Osorio Sierra & Zuluaga Moreno, 2003)



Figura 26 Fotografía aérea No2 de la Vertiente norte del río Chinchiná Año 1975. Área donde se localizan los 12 rellenos objeto de análisis (Osorio Sierra & Zuluaga Moreno, 2003)



En la fotografía aérea del año 1987, Figura 27, se observa una expansión acelerada del casco urbano de la ciudad para este sector. Se construyeron y urbanizaron los rellenos de los barrios Los Nogales, Bajo Cervantes, El Palmar, Álamos, El Guamal, Bajo Prado y Campin-Persia (Osorio Sierra & Zuluaga Moreno, 2003).

Figura 27 Fotografía aérea No1 de la Vertiente norte del río Chinchiná Año 1987. Área donde se localizan los 12 rellenos objeto de análisis (Osorio Sierra & Zuluaga Moreno, 2003)



En la fotografía aérea del año 1987, se observa que el sector más occidental del área de estudio, que en 1975 estaba sin alguna intervención, fue intervenido el cauce y construidos los rellenos e inicio de urbanización de estos Figura 28.

En este periodo de 1975-1987 se construyó y urbanizó el relleno Estambul I y se inició la construcción del relleno de Estambul II (Osorio Sierra & Zuluaga Moreno, 2003).

Figura 28 Fotografía aérea No2 de la Vertiente norte del río Chinchiná Año 1987. Área donde se localizan los 12 rellenos objeto de análisis (Osorio Sierra & Zuluaga Moreno, 2003)



En la fotografía aérea del año 1993 se observa que se construyeron y urbanizaron los rellenos de los barrios el Paraíso y se inicia la construcción del Barrio Villacarmenza. El relleno de la iglesia espíritu santo sigue en proceso Figura 29.

También se observa el inicio la urbanización de los rellenos de los barrios Conjunto cerrado la Montaña y Estambul II, barrios que se encuentran al extremo occidente de la zona de estudio (Osorio Sierra & Zuluaga Moreno, 2003) Figura 30.

Figura 29 Fotografía aérea No1 de la Vertiente norte del río Chinchiná Año 1993. Área donde se localizan los 12 rellenos objeto de análisis (Osorio Sierra & Zuluaga Moreno, 2003)



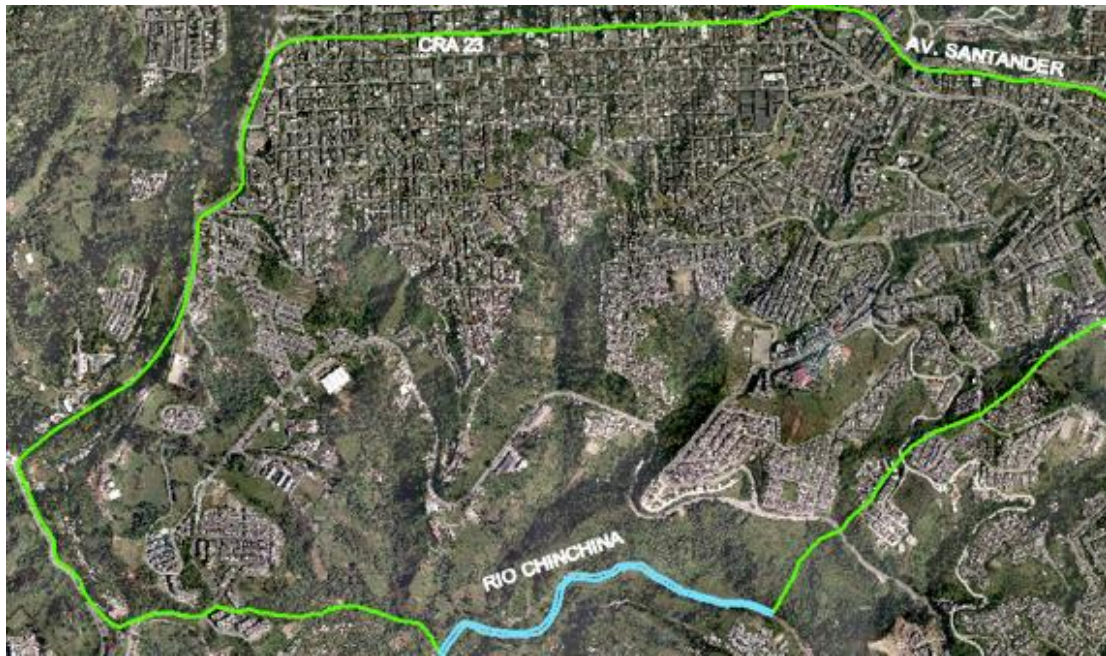
Figura 30 Fotografía aérea No2 de la Vertiente norte del río Chinchiná Año 1993. Área donde se localizan los 12 rellenos objeto de análisis (Osorio Sierra & Zuluaga Moreno, 2003)



Luego del año 1993 se terminaron de urbanizar todos los barrios correspondientes a los últimos rellenos construidos. La ciudad en este sector no ha tenido más expansión.

En la ortho fotografía del año 2015 se observan los barrios existentes sobre los rellenos localizados en el área de estudio. Se observan los barrios Conjunto Cerrado la Montaña y Estambul II urbanizados totalmente Figura 31.

Figura 31 Ortofotografía aérea de la Vertiente norte del río Chinchiná Año 2015. Área donde se localizan los 12 rellenos objeto de análisis. Fuente: CORPOCALDAS



El resultado de todas las intervenciones a los drenajes naturales de la vertiente norte del río Chinchiná, entre los años 1946 y 1993, y que se ilustraron en las fotografías aéreas, son unos rellenos antrópicos de cauce. Estos son producto de procesos de explanación y disposición de material en los cauces ya canalizados.

La localización y el área de estos rellenos estudiados por Osorio Sierra & Zuluaga Moreno (2003) fueron la base para el desarrollo de esta tesis. Se nombran y se incluyen en la Tabla 14.

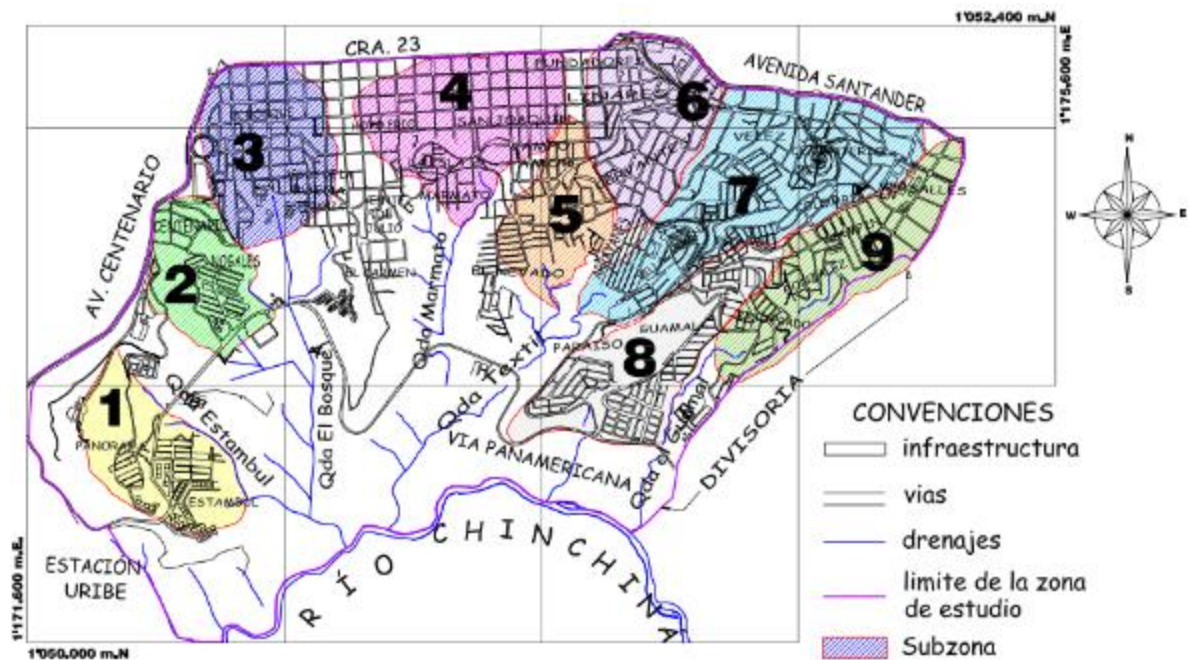
El Anexo 14 incluye los mapas de localización general y de cada uno de ellos por subzona.

Tabla 14 Listado y nombre de rellenos que hacen parte de documento base de este estudio (Osorio Sierra & Zuluaga Moreno, 2003).

No RELLENO	NOMBRE DE RELLENO	CAUCE INTERVENIDO	ESPESOR MAX (m) PERFILES	ESPESOR (m) DETERMINADO POR SONDEO	FORMACIÓN O DEPOSITO SUBSUPERFICIAL
SUBZONA No1					
1	Estambul I Etapa	Afluente de la quebrada estambul	5.0	No se determino por presencia de bloques en la perforación manual	ND
2	Estambul II Etapa	Afluente de la quebrada estambul	13.0	7.50	Formación Casabianca (Tscb)
3	Conjunto cerrado la montaña	Afluente de la quebrada estambul	6.0	4.00	Formación Casabianca (Tscb)
SUBZONA No2					
4	Centenario	Quebrada Centenario	ND	7.60	Formación Casabianca (Tscb)
5	Nogales	Quebrada Centenario y afluentes	12.0	No se determino por presencia de bloques en la perforación manual	ND
SUBZONA No3					
6	El Bosque	Quebrada el Bosque y Afluentes	ND	6,80-7,70	Depositos de caída piroclástica (Qcp) y Formación Casabianca (Tscb)
SUBZONA No4					
7	Hoyo Frio	Quebrada Marmato	ND	4.70	Formación Casabianca (Tscb)
8	San Joaquin	Afluentes de la quebrada Marmato	ND	2,20 a 4,10	Formación Casabianca (Tscb)
9	Campoamor sector la chec	Afluentes de la quebrada Marmato	ND	8.90	Formación Casabianca (Tscb)
10	La Isla	Quebrada Marmato	10.0	No se determino por presencia de bloques en la perforación manual	ND
SUBZONA No5					
11	Campoamor sector centro educativo	Afluente de la quebrada la unica	ND	11.0	ND
12	Cervantes sector convento perpetuo socorro	Afluente de la quebrada la unica	ND	4.50	Capa organica de 1m, seguida de la Formación Casabianca (Tscb)
13	Cervantes	Afluente de la quebrada la unica	ND	3.20	Formación Casabianca Alterada (Tscb)
14	Bajo Cervantes	Afluente de la quebrada la unica	6.00	2.40	ND
15	El Nevado	Afluente de la quebrada la unica	12.0	12.0	Formación Casabianca (Tscb)

SUBZONA No6					
16	Linares	Quebrada Cervantes	ND	8,0 a 12,0	ND
17	Cervantes (entre Carreras 26A-32A y Calles 36A,37,37A)	Quebrada Cervantes	ND	2,50 a 3,80	Formación Casabianca (Tscb)
18	Estación general de policia-cervantes sector iglesia	Quebrada la Unica	ND	5,50. No se pudo determinar espesor exacto debido a que se taponó la perforación.	Formación Casabianca (Tscb)
SUBZONA No7					
19	Cementerio (Barrio Colombia)	Quebrada Cementerio	ND	6,80. No se pudo avanzar mas en la perforación manual debido a la compactación del material.	ND
20	Alamos	Quebrada Cementerio	5.0	4.50	Formación Casabianca (Tscb)
21	El Palmar	Quebrada Cementerio	10.0	6,60. No se pudo avanzar mas en la perforación manual debido a presencia de bloques	ND
22	Alamos-Velez	Quebrada Textil	6.80	7.00	Formación Casabianca Alterada (Tscb)
23	Camino del Palmar	Quebrada Textil	14.0	No se determino debido a la alta saturacion del material presente en la perforación manual	ND
24	Villa Carmenza	Quebrada Textil	12.0	6,30. No se pudo avanzar mas en la perforación manual debido a presencia de bloques	ND
SUBZONA No8					
25	Bajo Prado	Afluente de la Quebrada el Guamal	5.0	5.0	ND
26	El Guamal	Afluente de la Quebrada el Guamal	8.0	7.0	Formación Casabianca (Tscb)
27	El Paraiso	Pequeño afluente del rio Chinchina	7.50	6.40	ND
SUBZONA No9					
28	Versalles	Quebrada el Guamal	ND	9.0	ND
29	Campin-Persia	Quebrada el Guamal	10.0	No se determino por presencia de bloques en la perforación manual	ND
30	Bajo Prado sector centro medico	Quebrada el Guamal	10.0	6.50	ND
31	Iglesia Espiritu Santo	Quebrada el Guamal	10.0	No se determino por presencia de bloques en la perforación manual	ND

Figura 32 Mapa de localización general por cada una de las 9 subzonas en las cuales se encuentran los diferentes rellenos mencionados en la Tabla 14. Fuente: (Osorio Sierra & Zuluaga Moreno, 2003)



3.3.2 Geología Regional

Manizales se encuentra localizada sobre el flanco occidental de la cordillera central colombiana, al sur del Departamento de Caldas.

Se encuentra sobre una paleozona donde convergen un sistema de placas litosféricas, la cual está caracterizada por gran actividad tectónica del sistema de fallas de Romeral (Naranjo Henao & Ríos Alzate, 1989, pág. 9).

Las unidades geológicas de la más antigua a la más reciente presentes en la ciudad de Manizales, de acuerdo a lo mencionado por Naranjo Henao & Ríos Alzate (1989), que se pueden encontrar en el área donde se localizan los rellenos son:

- Formación o Complejo Quebradagrande.
- Formación Manizales
- Formación Casabianca

- Depósitos de lluvia piroclástica

Duque Escobar (2014) realizó un estudio complementario con el fin de obtener un mapa geológico de Manizales. Para esto se identificaron, ajustaron y complementaron cada una de las litologías mencionadas por Naranjo Henao & Ríos Álzate (1989).

Duque Escobar (2014) también menciona unas unidades geológicas adicionales. A continuación se relacionan:

- Unidad de Gabros
- Rocas ígneas de tipo volcánico

3.3.3 Geología Estructural

Duque Escobar (2104) menciona que en la zona urbana de Manizales se presentan cuatro sistemas de estructuras o fallas, los cuales se mencionan a continuación:

- 1- Un Sistema de baja densidad con dirección E-W, el cual está representado por una falla que controla el río Chinchiná y paralela al eje de la pista del aeropuerto La Nubia. Esta aproximadamente a 300 metros al sur de ésta.
- 2- Un sistema con dirección N-S, asociado o perteneciente al Sistema de Fallas de Romeral (S.F.R.). A este pertenecen la Falla Manizales –Neira, la Falla del Perro y la Falla de Chipre entre otras.

Las fallas satélites pertenecientes a este sistema son las que mayor longitud o continuidad presentan en el área urbana de Manizales.

El origen de este sistema está asociado con el carácter compresivo que genera la subducción de la placa del pacífico bajo la placa suramericana.

- 3- Un sistema con la mayor densidad, el cual presenta dirección NE-SW. Está conformado por fallas que controlan los cursos de las quebradas La Camelia, San Luis y La única.

Las estructuras pertenecientes a este sistema se evidencian por la presencia de drenajes con cursos rectilíneos con las direcciones mencionadas.

- 4- Un sistema con dirección NW-SE, asociado a la falla que cruza los barrios La Francia, Alcázares y en línea recta controla la parte del río Chinchiná que separa el sector de los Cámbulos - Aranjuez de los barrios del norte del Municipio de Villamaría.

Estos 4 sistemas de fallas se encuentran ilustrados en el mapa de la Figura 33.

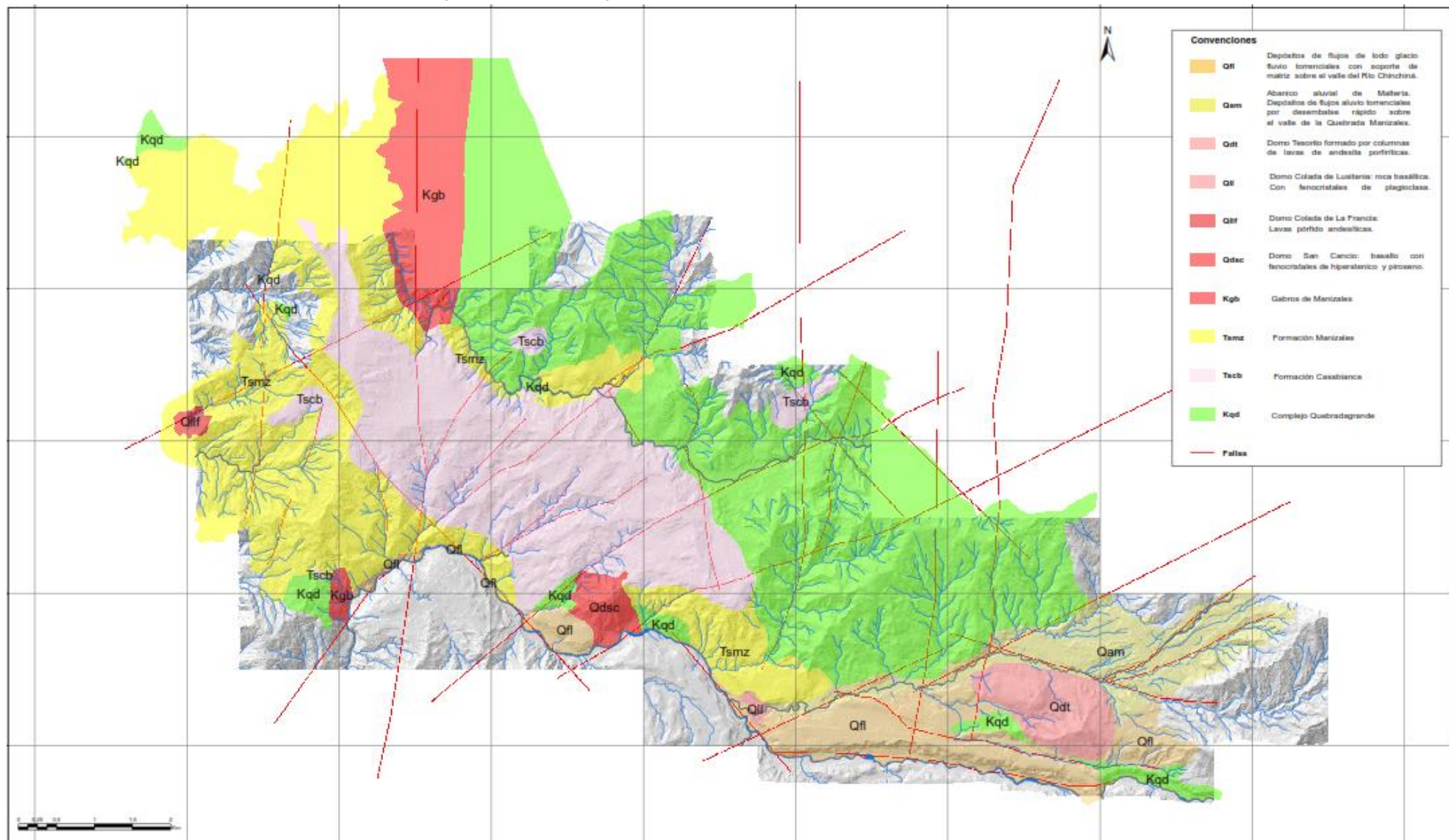
3.3.4 Geología Local

Las unidades geológicas presentes en el área donde se localizan los rellenos, de la más reciente a la más antigua son las siguientes:

- Los depósitos de lluvia piroclástica.
- Formación Casabianca
- Formación Manizales.

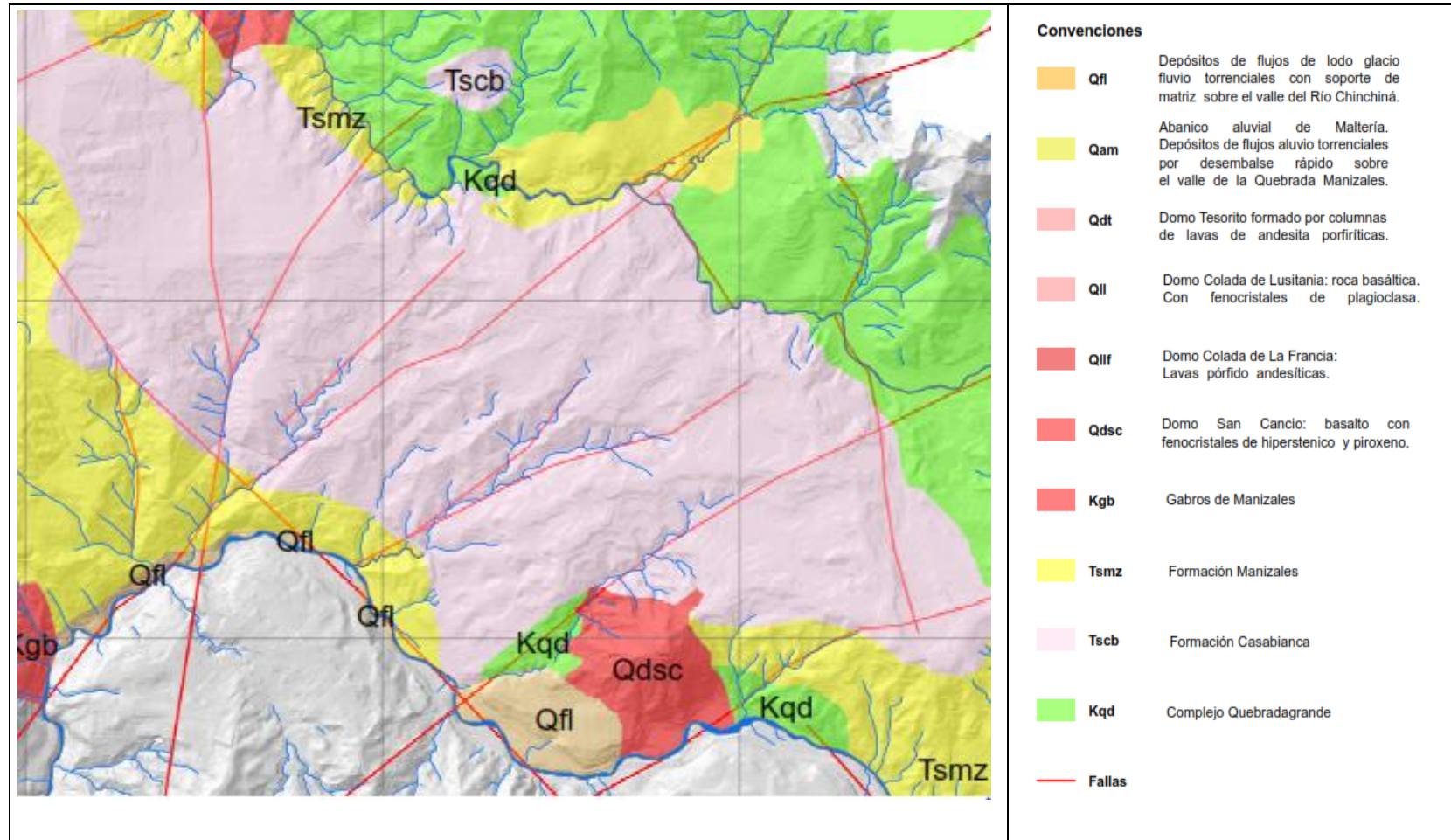
Esta consideración se hace basada en lo descrito e ilustrado en los mapas geológicos elaborados por Duque Escobar (2014), que se muestran Figura 33 y Figura 34.

Figura 33 Mapa Geológico estructural de Manizales. Fuente: (Duque Escobar, 2014)



Se hace un zoom al área donde se localizan los rellenos y se evidencia la disposición de la formación Casabianca (color rosado claro) suprayaciendo a la formación Manizales (color amarillo).

Figura 34 Mapa geología local zona de estudio (Duque Escobar, 2014).



Duque Escobar (2014) también elabora unos perfiles longitudinales y unos transversales donde se evidencia lo anteriormente expuesto, la formación Casabianca suprayaciendo la formación Manizales.

Figura 35 Mapa geológico de Manizales que incluye trazados de perfiles geológicos (Duque Escobar, 2014).

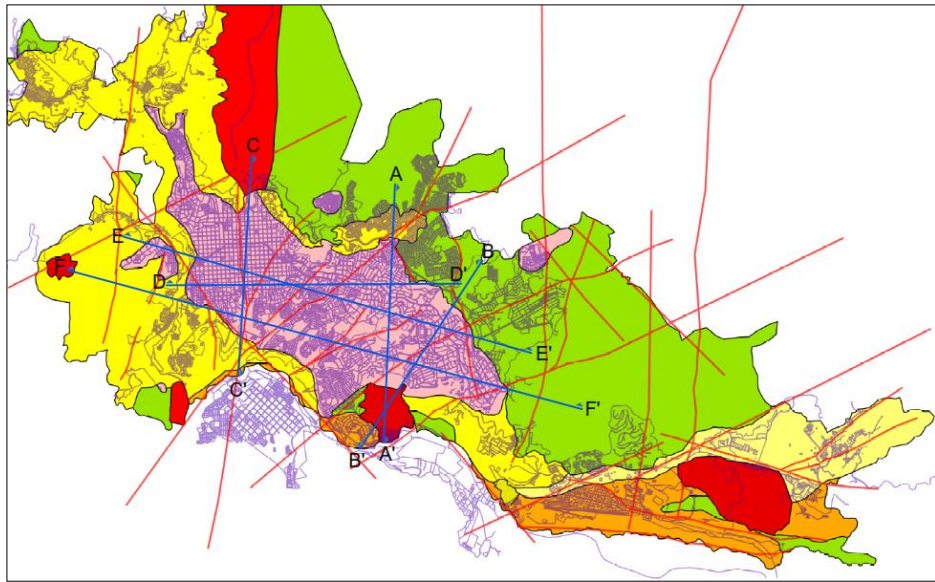


Figura 36 Perfil Geológico C-C' de Manizales (Duque Escobar, 2014).

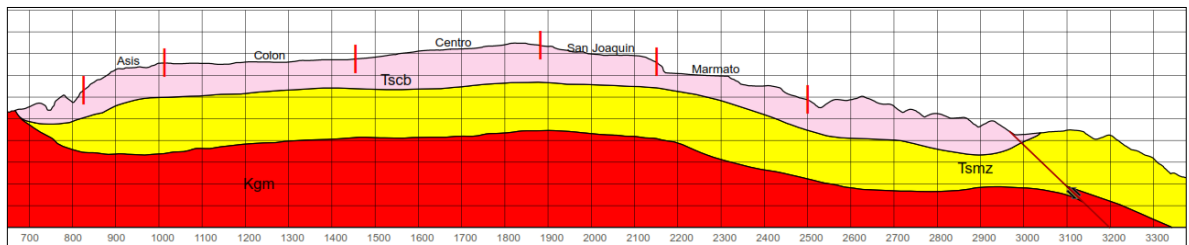


Figura 37 Perfil Geológico E-E' de Manizales (Duque Escobar, 2014).

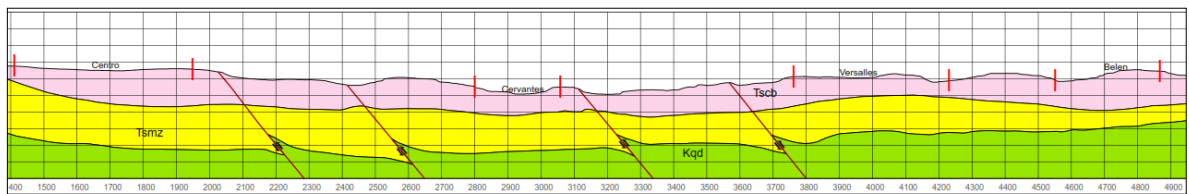
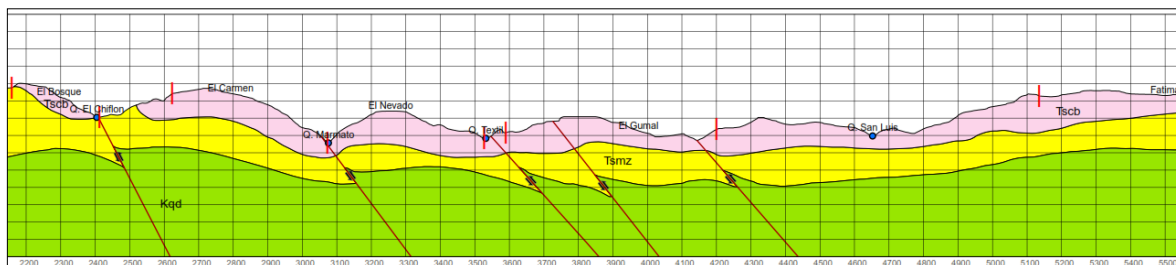


Figura 38 Perfil Geológico F-F' de Manizales (Duque Escobar, 2014).



Cabe aclarar que los colores asignados a las unidades geológicas ilustradas en los mapas y perfiles de la Figura 33 a la Figura 38, elaborados por Duque Escobar (2014), fueron seleccionados por el autor. Esto fue confirmado por el autor en el transcurso del desarrollo de esta tesis.

Esto se menciona porque se conoce que existen unos colores y tonalidades definidos para cada una de las unidades geológicas, dependiendo del tipo de roca que las conforman: Ígneas, metamórficas o sedimentarias; así como por su edad de formación.

Los rellenos antrópicos de Manizales generalmente están conformados por materiales provenientes de cenizas volcánicas y Formación Casabianca. Por esto a continuación se presenta una breve descripción de estas formaciones:

3.3.4.1 Formación Casabianca

Formación conformada por sedimentos volcanogénicos de grano grueso y, en menor proporción, ignimbritas, tobas, y sedimentos volcánicos reabajados de grano fino.

Producidos como resultado de una gran acumulación en cauces fluviales inducidos por el volcanismo de la cadena Ruiz-Cerro Bravo y localizados en los flancos este y oeste de la parte media de la cordillera central (Naranjo Henao & Rios Alzate, 1989, pág. 33).

La mayor parte de la formación Casabianca se formó como resultado de depósitos de acreción lateral en ríos de sinuosidad media generando litofacies de grava estratificada con estratificación cruzada de artesa, planar e inclinada de bajo ángulo (Naranjo Henao & Rios Alzate, 1989, págs. 31,33).

Debido a la gran carga de material proveniente de las erupciones y a la poca capacidad de los ríos, se formaron los flujos de escombros, que se depositaron en el pie de monte de Manizales.

Estos flujos formaron las siguientes litofacies características de la formación Casabianca en la ciudad de Manizales (Naranjo Henao & Rios Alzate, 1989, págs. 31,35):

- Grava masiva clasto soportada,
- Grava masiva o crudamente estratificada. Abundante matriz arenosa, clastosoportada, pobremente sorteada, clastos subangulares a subredondeados.
- Grava estratificada.

En Manizales, esta formación reposa discordantemente sobre la formación Manizales y está suprayacida por los depósitos de lluvia piroclástica (Naranjo Henao & Rios Alzate, 1989, pág. 33).

El espesor promedio de la formación en el área de Manizales es de 50m y de los flujos de escombros entre 0.5m-15m. Esta se localiza principalmente en el sureste y occidente de la ciudad (Naranjo Henao & Rios Alzate, 1989, pág. 35).

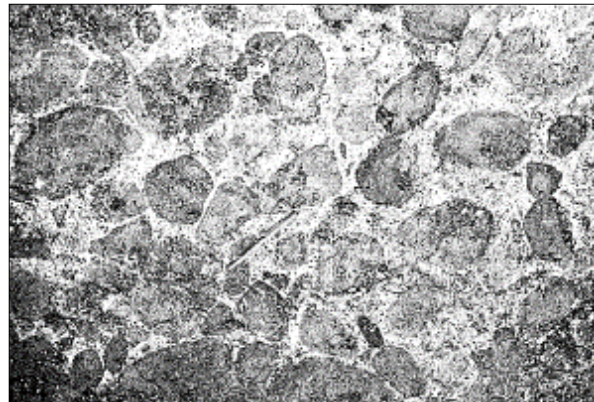
La formación Casabianca, litológicamente está compuesta por clastos volcánicos porfiríticos y son predominantemente andesíticos - dacíticos y la matriz que rodea los fenocristales es de color rojo a gris.

Sólo entre el 5-10% de los clastos son plutónicos del Stock de Manizales y metamórficos, cuya mayoría son esquistos micáceos del Grupo Cajamarca (Naranjo Henao & Rios Alzate, 1989, pág. 35).

La edad de la formación Casabianca se puede relacionar con el impacto del vulcanismo Plioceno-Pleistocénico sobre un sistema fluvial en un ambiente tropical en la partes bajas, a semi-árido en las partes altas (Naranjo Henao & Rios Alzate, 1989, pág. 35).

En la Figura 39 se ilustran los depósitos de flujos de escombros de la formación Casabianca, donde se observan los clastos de diferentes tamaños, composición y redondez, embebidos en una matriz de origen volcánico.

Figura 39 Fotografía de los flujos de escombros de la Formación casabianca (Naranjo Henao & Rios Alzate, 1989).



3.3.4.1.1 Depósitos de Flujos de Lodo de la Formación Casabianca

Es un depósito compuesto por conglomerados matriz soportados, con texturas y composiciones similares a los de la Formación Manizales.

Los bloques de estos flujos de la Formación Casabianca se podrían diferenciar de los de la Formación Manizales porque los primeros, en general se encuentran en avanzado estado de descomposición, en saprólito (Duque Escobar, 2014, pág. 24).

Este saprólito es de textura arcillosa y poco permeable.

Los materiales que suprayacen este estrato, que generalmente son depósitos de caída piroclástica, presentan problemas de estabilidad ya que se saturan por estar sellados en la superficie de contacto con el saprólito (Duque Escobar, 2014, pág. 24).

Los afloramientos de estos depósitos se pueden observar en varios barrios de la ciudad como Villa Carmenza, Palermo, Sector de San Rafael, Villa Pilar, Liborio, Sector de Los Cambulos, Alcázares, entre otros (Duque Escobar, 2014, pág. 24).

3.3.4.2 Depósitos de lluvia piroclástica:

Estos depósitos son depósitos recientes y se relacionan con las últimas manifestaciones de actividad volcánica explosiva del complejo Ruiz-Tolima.

Los depósitos se presentan en forma de mantos delgados, los cuales están sobre las demás litologías mencionadas anteriormente. Tienen un espesor variable entre 10 y 20m y son constantes en toda la ciudad (Naranjo Henao & Rios Alzate, 1989, pág. 37).

Están compuestos por fragmentos de pómez y escorias de composición dacítica, fragmentos de rocas dacíticas y andesíticas porfíricas de diferente tamaño, que forman niveles de cenizas y lapilli (Naranjo Henao & Rios Alzate, 1989, pág. 37).

3.3.4.3 Rellenos Antrópicos

Depósitos recientes creados por la intervención o acción humana. Están conformados por una mezcla de suelos provenientes los depósitos de lluvia piroclástica, cenizas volcánicas y suelo residual de la formación casabianca.

3.4 Marco Teórico

3.4.1 Permeabilidad en suelos

La permeabilidad en suelos se da por la capacidad de este de permitir que fluya agua a través de sus espacios vacíos o poros.

En la ingeniería geotécnica y mecánica de suelos se debe conocer que volumen de agua fluye en el suelo en determinado tiempo con el fin de poder concebir y realizar diseños muy precisos que permitan optimizar recursos y que al momento de construirlos perduren en el tiempo.

La ley del ingeniero francés Henry Darcy ha constituido la base fundamental de la teoría del flujo a través de un modelo permeable y ha sido aplicada en materiales de diferentes texturas, granulometrías, y propiedades físicas y mineralógicas hace bastante tiempo.

En geotecnia el concepto permeabilidad es llamado comúnmente como conductividad hidráulica o coeficiente de permeabilidad, el cual se define como la velocidad de descarga de agua en unas condiciones de flujo laminar a través de un área transversal unitaria de un medio permeable bajo un gradiente hidráulico unitario y en condiciones estándar de temperatura (Romaña García, 2014)

La permeabilidad está definida por la expresión general de la Ley de Darcy que se muestra a continuación:

$$Q = \frac{k * \Delta h * A}{L}$$

Donde:

Q : Caudal

k : Coeficiente de permeabilidad

Δh : Diferencia de cabeza de presión

L : Longitud

Por lo tanto permeabilidad sería:

$$k = \frac{Q * L}{\Delta h * A}$$

Este principio de permeabilidad será considerado en el desarrollo de la metodología, numeral 4.4.2, donde se determinan los valores de permeabilidad que se aginan a cada uno de los dos estratos que constituyen el modelo geotécnico.

3.4.2 Modelo de retención de Van Genuchten

Para conocer el comportamiento que sigue el contenido volumétrico de agua que ingresa a la estructura del suelo del relleno antrópico, que resulta del detonante precipitaciones o lluvia, se aplicó, en el en capítulo de la metodología, el modelo de retención de Van Genuchten.

Las funciones hidráulicas dependen de parámetros que para ser calibrados requieren de las propiedades hidráulicas como tal. Estas se determinan a través de ensayos bien sea de campo o laboratorio, los cuales en su medición presentan restricciones debido a la no linealidad de la función conductividad - succión y humedad - succión (Reyna, 2008).

El modelo empírico y matemático de Van Genuchten (1980) aplica para solucionar dichas restricciones.

Van Genuchten (1980) mediante funciones determina una curva de retención de humedad del suelo, la cual representa el comportamiento del flujo de agua en el suelo.

Van Genuchten (1980) creó una ecuación para el cálculo del grado de saturación efectiva, en la cual relaciona el potencial de succión (h) y el contenido de humedad normalizada o efectiva (Se) (Van Genuchten, 1980).

Modelo de Humedad:

$$Se = \frac{1}{[1 + (\alpha h)^n]^m}$$

Donde:

α, n, m : Constantes empíricas.

h : Cabeza de presión positiva

La ecuación de Van Genuchten (1980) con $m=1$ fue usada por Ahuja y Swartzendruber (1972), Edelman y otros (1974) y Varallyay y Mironenko (1979).

La ecuación tiene como límite la expresión de Brooks y Corey con $\lambda = mn$, así mismo tiene como restricciones que $m = 1 - \frac{1}{n}$ y $m = 1 - \frac{2}{n}$. Se obtienen resultados mejores cuando se utilizan las restricciones para una serie de datos incompleta.

Modelo de Conductividad:

El modelo de Van Genuchten (1980) tiene un adecuado ajuste a las curvas de datos experimentales.

Van Genuchten desarrolló además de una curva característica de humedad del suelo, también una curva para la conductividad hidráulica utilizando el modelo de Mualem (1976a).

Esta curva está dada por las siguientes expresiones (Vogel, Van Genuchten, & Cislserova, 2001):

$$S_e = \frac{\theta(h) - \theta_r}{\theta_s - \theta_r}$$

$$\theta(h) = \theta_r + \frac{(\theta_s - \theta_r)}{[1 + (\alpha h)^n]^m}, \quad h < 0$$

$$\theta(h) = \theta_s, \quad h \geq 0$$

$$K(h) = K_s K_r(h) \quad h < 0$$

$$K(h) = K_s, \quad h \geq 0$$

$$K_r(S_e) = S_e^l \left[1 - (1 - S_e^{l/m})^m \right]^2$$

Donde:

α, n, m : Parámetros de ajuste

$$m = 1 - \frac{1}{n}$$

θ : Contenido de humedad volumétrico

θ_r : Contenido de humedad residual

θ_s : Contenido de humedad saturado

$l = 0.5$ Parámetro de la conectividad de poros estimado por Mualem (1976a)

Con las anteriores formulaciones se elaboraron unas curvas experimentales con valores de succión hasta 3000 kPa para el estrato de relleno antrópico. Esto considerando las propiedades hidráulicas de los materiales que lo componen. Figura 40 y Figura 41.

Estas curvas se incluyeron a los modelos con el fin de representar el comportamiento del volumen de agua que ingresa a los rellenos. El procedimiento se puede visualizar en el capítulo de la metodología.

Los datos con los que se construyeron estas curvas se encuentran en el Anexo 15.

Figura 40 Curva experimental de retención de agua. Permeabilidad (m/s) vs Succión (kPa)

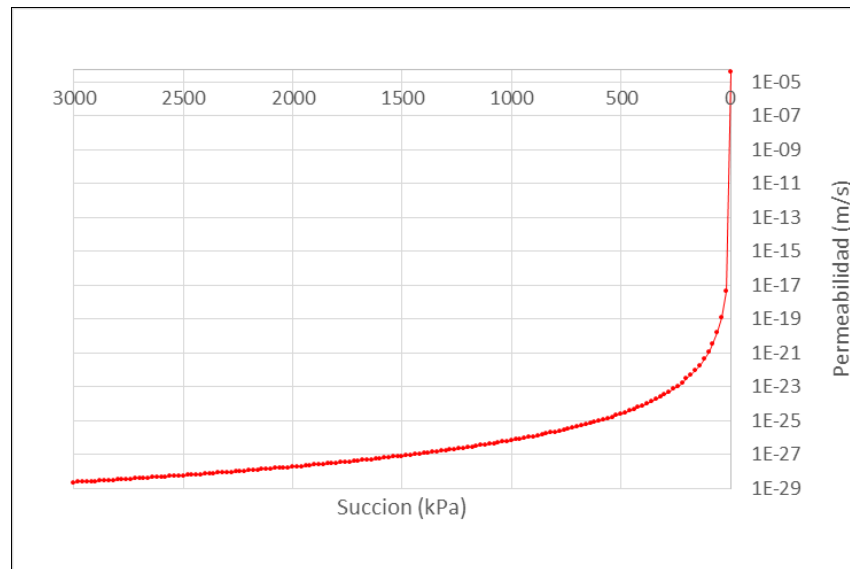
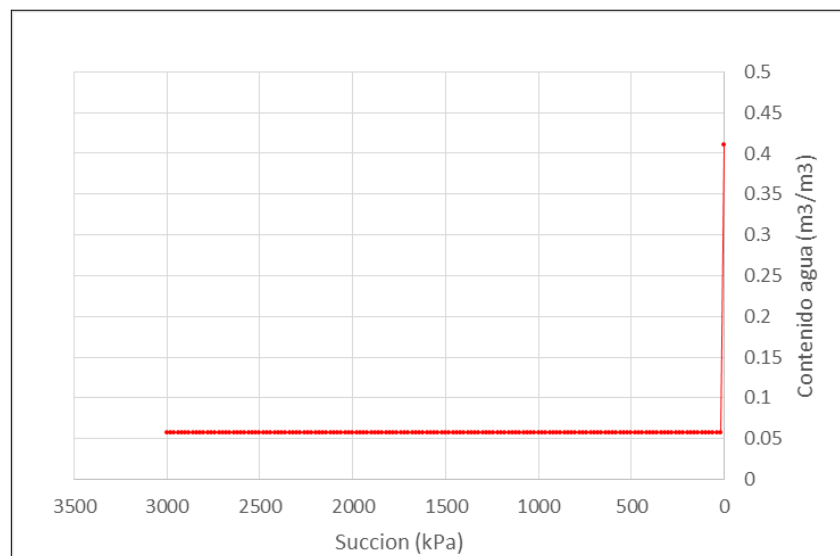


Figura 41 Curva experimental de retención de agua. Contenido de agua (m³/m³) vs Succión (kPa)



3.4.3 Equilibrio Límite: Método de Dovelas

Existen varios métodos de análisis de taludes en suelo y roca. Estos se pueden agrupar, unos en el concepto de equilibrio límite y otros en métodos de elementos finitos.

En esta tesis se decidió adoptar un método riguroso basado en equilibrio límite para hacer el análisis de estabilidad y así obtener un valor de factor de seguridad (FS) para cada uno de los rellenos, en los escenarios correspondientes mencionados en el numeral 4.6.

Los análisis de estabilidad de taludes preliminarmente resultan indeterminados, pero para su resolución se deben considerar una serie de suposiciones o hipótesis de partida diferentes de acuerdo al método utilizado.

Para esto se crean las ecuaciones de equilibrio entre las fuerzas actuantes o que inducen deslizamiento y las resistentes. El resultado es un factor de seguridad del talud para la superficie analizada referida al equilibrio estricto o límite entre las fuerzas que actúan (SANHUEZA PLAZA & RODRIGUEZ CIFUENTES, 2013).

Luego de obtener el factor de seguridad FS de la superficie analizada, se debe hacer este procedimiento de análisis para otras superficies de rotura hasta encontrar aquella que arroje el menor factor de seguridad (FS).

Este método tiene en cuenta las siguientes hipótesis:

- El factor de seguridad FS de cualquier talud se considera constante para toda la superficie de falla.
- La resistencia al corte del suelo del talud analizado satisface el criterio de Morh Coulomb.
- Al momento de la Falla la resistencia al corte del suelo se desarrolla con una magnitud constante en toda la superficie de falla.

- Estos métodos de dovelas son usados cuando la superficie de falla es circular.

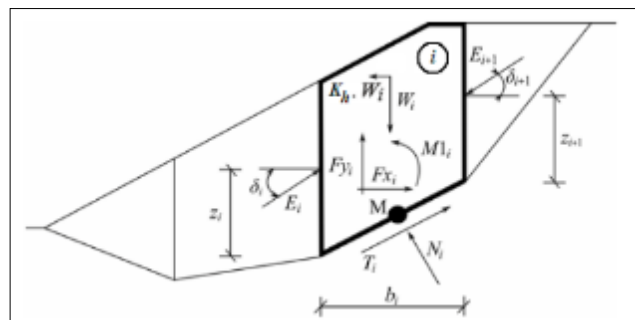
Esto permite que el análisis de equilibrio se haga bidimensionalmente puesto que se toma una sección transversal representativa del talud y se divide en franjas o dovelas del mismo tamaño y a cada una de estas se le hace el análisis de estabilidad lo que permite determinar la estabilidad global del talud.

3.4.3.1 Método de Morgenstern - Price

Es un método riguroso en el cual se tienen en cuenta todas fuerzas entre tajadas o dovelas.

Se deben satisfacer todas las condiciones de equilibrio; tanto entre fuerzas como entre momentos en cada una de las tajadas. Es un método que puede ser aplicado en superficies de falla circulares y no circulares (Morgenstern & Price, 1965).

Figura 42 Esquema estático - Método de Morgenstern-Price: Fuente: Tutorial software Geo5



Donde:

W_i : Peso de la dovela i , incluyendo material de sobrecarga que tenga el carácter del peso incluyendo la influencia del coeficiente vertical de sismo K_v .

$K_h \cdot W_i$: Fuerza de inercia horizontal representando el efecto del sismo K_h , es factor de aceleración horizontal durante el sismo.

N_i : Fuerza Normal actuando en la superficie de falla.

T_i : Fuerza de corte actuando en la superficie de falla.

E_i, E_{i+1} : Fuerza ejercidas por dovelas seguidas o vecinas, inclinadas desde el plano horizontal por el ángulo δ .

F_{xi}, F_{yi} : Otra fuerza horizontal y vertical actuando en el bloque i .

M_{1i} : Momento de Fuerzas F_{xi}, F_{yi} rotando alrededor del punto M , el cual es el centro del segmento i de la superficie de falla.

U_i : Presión de poros resultante en el segmento i de la superficie de falla.

Para calcular el equilibrio límite de fuerzas y de momentos del método en este se hacen las siguientes suposiciones (www.finesoftware.eu, 2019):

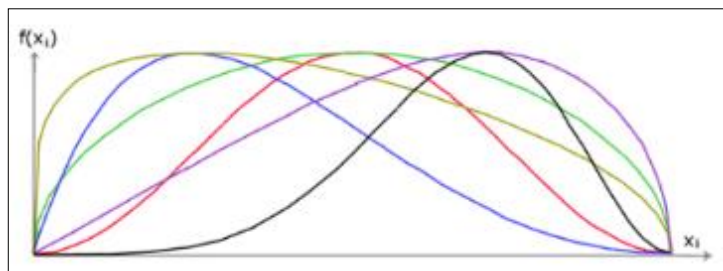
- La división de los planos entre bloques es siempre vertical.
- La línea de acción del peso de la dovela W_i pasa a través del centro del segmento de la superficie de falla por el punto M .
- La fuerza normal N_i está activa en el centro de la dovela i de la superficie de falla, en el punto M
- La inclinación de las fuerzas E_i que actúan entre las dovelas es diferente en cada dovela (δ_i) al punto extremo de la superficie de deslizamiento $\delta = 0$

La elección de los ángulos de inclinación δ_i de las fuerzas E_i actuando entre las dovelas se realiza con la ayuda de la función half-sine (media onda sinusoidal), Figura 43, la cual es elegida en forma automática.

La elección de la forma de la función tiene una influencia mínima en el resultado final, pero una elección adecuada puede mejorar la convergencia del método.

El valor funcional de la función half-sine (media onda sinusoidal) $f(x_i)$ en el punto límite x_i multiplicado por el parámetro λ da como resultado el valor de la inclinación del ángulo δ_i (www.finesoftware.eu, 2019).

Figura 43 Función Half-sine (media onda sinusoidal). Fuente: Tutorial software Geo5



De la solución de equilibrio, teniendo en cuenta fuerzas y momentos, se adoptan las siguientes expresiones:

Relación entre el valor de la tensión efectiva y tensión total de la fuerza normal actuando en la superficie de deslizamiento

$$N = N'_i + U_i$$

(1)

Condición de Mohr-Coulomb representa la relación entre la fuerza normal y la fuerza de corte en una dovela dada de la superficie de falla (N_i a T_i)

$$T_i = (N_i - U_i) \tan \varphi_i + c_i \frac{b_i}{\cos \alpha_i} = N'_i \tan \varphi_i + c_i \frac{b_i}{\cos \alpha_i}$$

(2)

Fuerza de la ecuación de equilibrio en la dirección normal de la dovela i de la superficie de falla

$$N'_i + U_i - W_i \cdot \cos \alpha_i + K_h \cdot W_i \cdot \sin \alpha_i + F_{yi} \cdot \cos \alpha_i - F_{xi} \cdot \sin \alpha_i + E_{i+1} \cdot \sin(\alpha_i - \delta_{i+1}) - E_i \cdot \sin(\alpha_i - \delta_i) = 0$$

(3)

Fuerza de la ecuación de equilibrio a lo largo de la dovela i de la superficie de falla

$$N_i' \cdot \frac{\tan \varphi_i}{FS} + \frac{c_i}{FS} \cdot \frac{b_i}{\cos \alpha_i} - W_i \cdot \sin \alpha_i - K_h \cdot W_i \cos \alpha_i + F_{yi} \sin \alpha_i + F_{xi} \cos \alpha_i - E_{i+1} \cdot \cos(\alpha_i - \delta_{i+1}) + E_i \cdot \cos(\alpha_i - \delta_i) = 0$$

(4)

Momento de la ecuación de equilibrio sobre el punto M

$$E_{i+1} \cdot \cos \delta_{i+1} \left(Z_{i+1} - \frac{b_i}{2} \tan \alpha_i \right) - E_{i+1} \cdot \sin \delta_{i+1} \cdot \frac{b_i}{2} - E_i \left(Z_i - \frac{b_i}{2} \tan \alpha_i \right) - E_i \cdot \sin \delta_i \cdot \frac{b_i}{2} + M1_i - K_h \cdot W_i (y_M - y_{gi}) = 0$$

(5)

De (3) y (4) se obtiene la siguiente expresión:

$$E_{i+1} = \frac{[(W_i - F_{yi}) \cdot \cos \alpha_i - (K_h \cdot W_i - F_{xi}) \cdot \sin \alpha_i - U_i + E_i \cdot \sin(\alpha_i - \delta_i)] \cdot \frac{\tan \varphi_i + c_i}{FS} \cdot \frac{b_i}{FS \cdot \cos \alpha_i} - (W_i - F_{yi}) \cdot \sin \alpha_i - (K_h \cdot W_i - F_{xi}) \cdot \cos \alpha_i + E_i \cdot \cos(\alpha_i - \delta_i)}{\sin(\alpha_i - \delta_{i+1}) \cdot \frac{\tan \varphi_i}{FS} + \cos(\alpha_i - \delta_{i+1})}$$

(6)

Con la expresión (6) se pueden calcular todas las fuerzas actuantes entre dovelas E_i para un valor dado de δ_i y FS. Adicionalmente se asume que en el origen de la superficie de falla, el valor de E es conocido e igual a $E_1 = 0$.

De la ecuación (5) se obtiene la siguiente expresión con la cual se pueden calcular todos los brazos Z_i de las fuerzas actuantes entre dovelas para un valor dado de δ_i , conocido el valor del lado izquierdo en el origen de la superficie de falla donde $Z_1 = 0$.

$$Z_{i+1} = \frac{\frac{b_i}{2} [E_{i+1} (\sin \delta_{i+1} - \cos \delta_{i+1} \cdot \tan \alpha_i) + E_i (\sin \delta_i - \cos \delta_i \cdot \tan \alpha_i)] + E_i \cdot Z_i \cdot \cos \delta_i - M1_i + K_h \cdot W_i (y_M - y_{gi})}{E_{i+1} \cdot \cos \delta_{i+1}}$$

(7)

El factor de seguridad FS se determina mediante un proceso de iteración, aplicando las formulas (1) a (7), las cuales son resueltas más rápido por los softwares.

Se menciona a continuación el procedimiento del cálculo (www.finesoftware.eu, 2019):

1- Los valores iniciales de los ángulos δ_i se determinan según la función half-sine, que tiene como forma media onda sinusoidal ($\delta_i = \lambda * f(X_i)$).

2- El factor de seguridad FS para los valores dados de δ_i se deduce de la expresión (6), asumiendo el valor de $E_{n+1} = 0$ en el extremo de la superficie de falla.

3- El valor δ_i está dado por la ecuación (7) utilizando los valores de E_i determinados en el paso previo con el fin de tener el momento en el último bloque igual a cero.

Los valores funcionales de $f(X_i)$, son los mismos todo el tiempo durante la iteración, solo se itera el parámetro λ . La ecuación (7) no provee el valor de Z_{n+1} ya que éste es igual a cero. Este valor se satisface con la ecuación de momento de equilibrio (5).

4- El paso 2 y 3 se repiten hasta que el valor de δ_i (parámetro λ) no cambia.

Se deben evitar las soluciones indeterminadas para que el proceso de iteración sea exitoso.

Estas indeterminaciones ocurren cuando se da la división por cero en las ecuaciones (6) y (7).

En la ecuación (7) dividir por cero se da porque $\delta_i = \pi/2$ o $\delta_i = -\pi/2$. Por lo que, el valor del ángulo δ_i debe ser encontrado dentro del intervalo $(-\pi/2 ; \pi/2)$ (Morgenstern & Price, 1965).

En el Anexo 17 se incluyen los resultados entregados por el software Slide, con el cual se realizaron los análisis de estabilidad, y se obtuvieron los valores de los factores de seguridad FS, para los rellenos en todos los escenarios analizados.

3.4.4 Confiabilidad

Los análisis de estabilidad de taludes se pueden realizar por medio de métodos determinísticos como equilibrio límite como el descrito en el numeral anterior.

Sin embargo estos métodos no tienen en cuenta el grado de incertidumbre de las variables analizadas. Es por esto que existen otros métodos para este análisis de estabilidad de taludes los cuales podrían ser complemento de los análisis determinísticos que normalmente son usados en ingeniería geotécnica.

Es común utilizar el mismo valor de factor de seguridad (FS) para un determinado tipo de aplicación, como la estabilidad de taludes a largo plazo, sin tener en cuenta el grado de incertidumbre involucrado en su cálculo.

También es tradicional que el mismo valor del factor de seguridad sea aplicado a condiciones que involucran ampliamente diversos grados de incertidumbre lo que es ilógico.

Los cálculos de confiabilidad proporcionan un medio para evaluar los efectos combinados de incertidumbres y un medio para distinguir entre condiciones donde las incertidumbres son particularmente alto o bajo (Duncan, 2000).

Ni los análisis deterministas ni de confiabilidad son precisos, ambos tienen gran valor y cada uno aumenta el valor del otro. Es conveniente que el factor de seguridad y confiabilidad deban usarse en conjunto, como medidas complementarias de diseño aceptable (Duncan, 2000).

El análisis de confiabilidad se ocupa de la relación entre las cargas que un sistema debe transportar y su capacidad de transportar esas cargas.

Tanto las cargas como la resistencia pueden ser inciertas, por lo que el resultado de su interacción también es incierto. Hoy en día, es común expresar confiabilidad en la forma de un índice de confiabilidad, que puede estar relacionado con una probabilidad de falla.

Debería ser entendido en este contexto que "falla" incluye no sólo una falla catastrófica, como en el caso de un deslizamiento de tierra, sino también, como lo menciona en la frase de Leonards (1975), cualquier "diferencia inaceptable entre rendimiento esperado y observado " (Baecher & Christian, 2003).

3.4.4.1 Índice de confiabilidad y probabilidad de falla

La carga a la que está expuesto un sistema de ingeniería es Q . La resistencia disponible es R .

En este contexto, "carga" y "resistencia" deben tomarse en su sentido más amplio; es decir, incluyen no sólo fuerzas y tensiones, sino también filtraciones, asentamientos y cualquier otro fenómeno que podrían convertirse en consideraciones de diseño.

Los valores de R y Q son inciertos, por lo que estas variables tienen valores medios, variaciones y covarianzas, así como otros descriptores estadísticos que serán ignorados por el momento (Baecher & Christian, 2003).

El margen de seguridad, M , es la diferencia entre la resistencia y la carga:

$$M = R - Q$$

De las definiciones elementales de media y varianza, se deduce que independientemente de las distribuciones de probabilidad de R y Q , el valor medio de M es:

$$\mu_M = \mu_R - \mu_Q$$

Y la varianza de M es:

$$\sigma_M^2 = \sigma_R^2 + \sigma_Q^2 - 2\rho_{RQ}\sigma_R\sigma_Q$$

El índice de confiabilidad β está definido como:

$$\beta = \frac{\mu_M}{\sigma_M} = \frac{\mu_R - \mu_Q}{\sqrt{\sigma_R^2 + \sigma_Q^2 - 2\rho_{RQ}\sigma_R\sigma_Q}}$$

El índice de confiabilidad β expresa la distancia del margen medio de seguridad desde su valor crítico ($M = 0$) en unidades de desviación estándar.

Si la carga y la resistencia no están correlacionadas, el coeficiente de la correlación es cero, por lo tanto, el valor del índice se calcularía como:

$$\beta = \frac{\mu_M}{\sigma_M} = \frac{\mu_R - \mu_Q}{\sqrt{\sigma_R^2 + \sigma_Q^2}}$$

Donde:

μ_R, μ_Q : Valores medios de R y Q .

$E[R], E[Q]$: Valores esperados de R y Q .

σ_R, σ_Q : Desviación estándar de R y Q .

$\Omega = \frac{\sigma}{\mu}$ Coeficiente de variación.

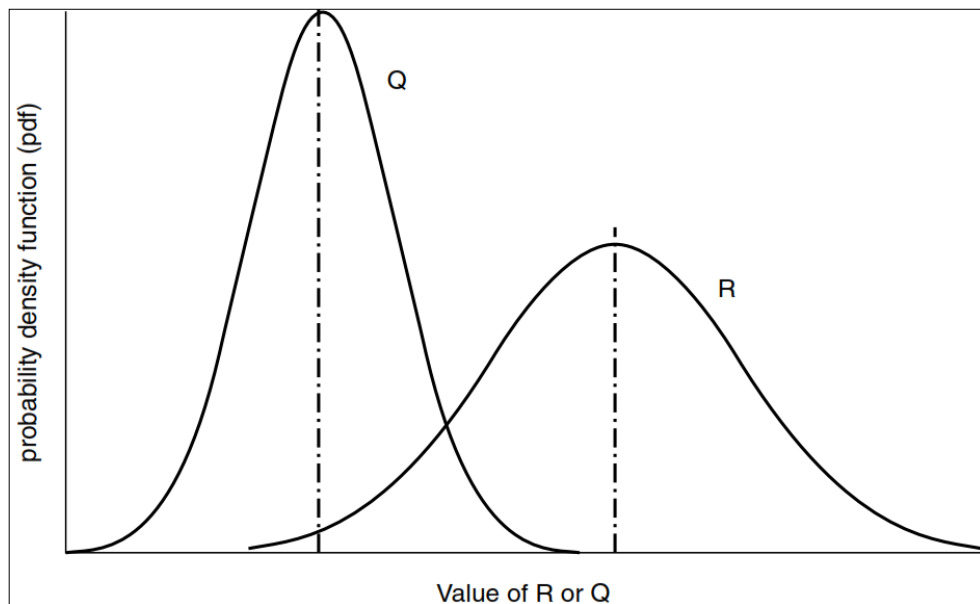
σ_R^2, σ_Q^2 : Varianzas de R y Q. También denotadas $Var[R], Var[Q]$.

ρ_{RQ} : Coeficiente de correlación ente R y Q.

$Cov[R, Q] = \rho_{RQ}\sigma_R\sigma_Q$ Covarianza de R y Q.

La Figura 44 muestra las gráficas de distribuciones de probabilidad típicas de R y Q:

Figura 44 Representación de función de densidad de probabilidades de Q y R (Baecher & Christian, 2003)



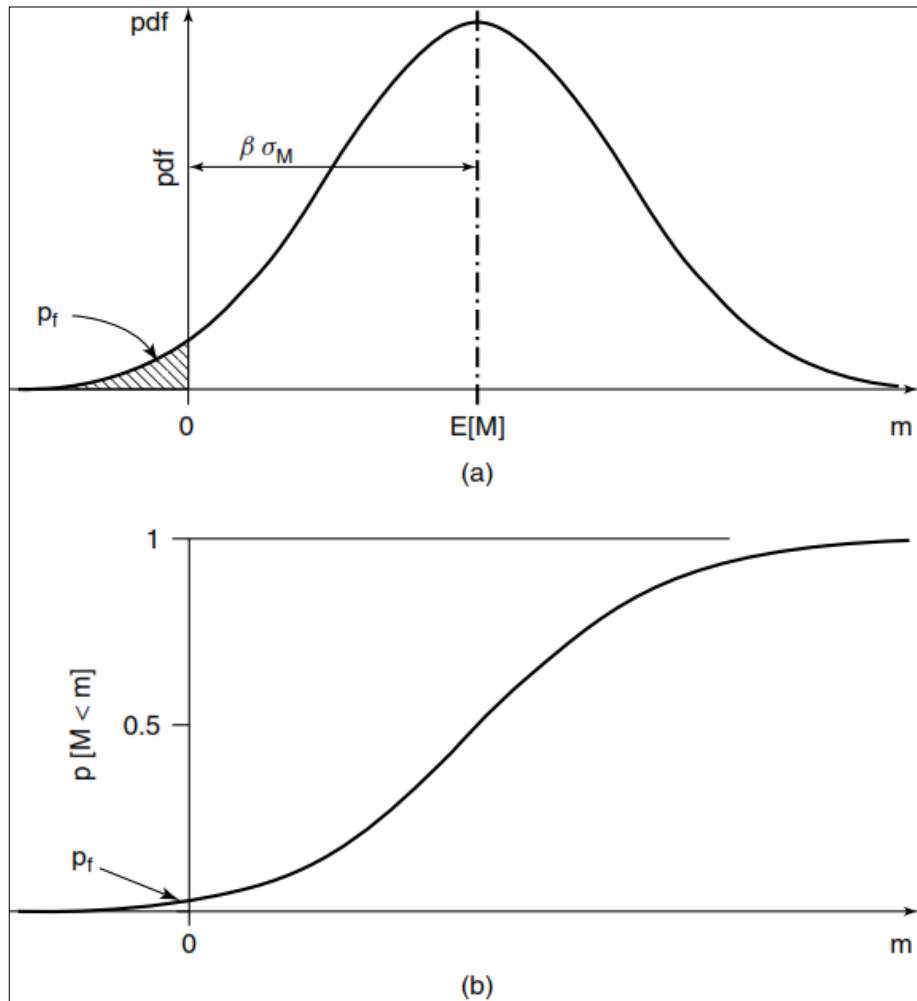
La Figura 45 muestra la distribución de probabilidad resultante de M. La probabilidad de falla debe ser que M sea menor que 0, que es el área sombreada.

Nótese que el área debajo de la curva y a la izquierda del eje en (a) es la probabilidad de falla identificada en (b).

La Figura 45 (b) ilustra la distribución acumulada de la distribución de la función de la Figura 45 (a).

La probabilidad de falla es el intercepto de la curva función acumulada con el eje de las ordenadas cuando $M=0$.

Figura 45 Densidad de probabilidad (a) y probabilidad acumulada (b) para el margen (M) (Baecher & Christian, 2003).



Si para R y Q sean distribuciones normales o sus datos estén normalmente distribuidos, entonces M está normalmente distribuido.

Por lo tanto el índice de confiabilidad β el cual normaliza M con respecto a su desviación estándar, es una variable normal estándar, con una media igual a cero y una desviación estándar igual a la unidad, frecuentemente representada con letra Z .

La distribución normal estándar Z , está ampliamente tabulada por (Bramowitz and Stegun 1964; Burington and May 1970) y modernas hojas de cálculo la incluyen como una función.

Por lo general, la tabulación expresa la integral de la distribución normal estandarizada para los valores entre $-\infty$ y los valores positivos del parámetro Z .

Como se requiere conocer la probabilidad de falla P_f , la cual es la integral ϕ entre $-\infty$ y los valores del parámetro Z ubicados debajo del valor medio, es decir, valores negativos de Z .

Debido a la simetría de la distribución normal, $P_f = 1 - \Phi(\beta) = \Phi(-\beta)$

La falla ocurre cuando $FS=1$ y el índice de confiabilidad está dado por

$$\beta = \frac{E[FS] - 1}{\sigma_{FS}}$$

De acuerdo con Beacher & Christian (2003), los pasos que se deben seguir para hacer un análisis de confiabilidad son los siguientes:

- 1- Establecer el modelo para calcular el margen de seguridad, factor de seguridad u otra forma de medir la función de comportamiento.
- 2- Estimar los descriptores estadísticos de los parámetros que forman parte de la función de comportamiento.
Para nuestro caso son cohesión (c') y ángulo de fricción (ϕ') del depósito de relleno antrópico los cuales son la media, desviación estándar, varianza y coeficiente de correlación.
- 3- Cálculo de los momentos estadísticos de la función de comportamiento.
El procedimiento para obtener la solución exacta de estos descriptores (media, desviación estándar, etc.) se basa en encontrar la función de distribución acumulada y la función de densidad de probabilidad de la función de comportamiento analizada (Rodríguez, 2009).

- 4- Calcular el índice de confiabilidad.
- 5- Calcular la probabilidad de falla.

3.4.4.2 Método probabilístico estimativos puntuales

Existen diferentes métodos probabilísticos de simulación para la determinación de los estadísticos de una función de desempeño aplicado a los análisis de estabilidad de taludes, los cuales varían uno del otro por las suposiciones o supuestos que se hacen en el método.

Se tienen métodos aproximados como lo son: Primer Orden Segundo Momento (FOSM), estimativos puntuales, Hasofer-Lind, entre otros y los métodos de simulación como lo es el de Monte Carlo.

Los métodos aproximados permiten la estimación de la media y la varianza del factor de seguridad, pero no proveen la forma de la función de densidad de probabilidad, así que la probabilidad de falla sólo puede ser obtenida asumiendo una distribución probabilística paramétrica del factor de seguridad, normalmente normal o lognormal (Cruz Zelaya, 2012).

El problema matemático básico en el que se basa el método es que se tiene una variable o variables aleatorias X con una función de distribución de probabilidad (pdf) $f_x(X)$ y otra variable Y , la cual es una función determinista de X , $Y = g(X)$.

Suponiendo que $g(X)$ se comporta bien y que los momentos de orden m de $f_x(X)$ existen, la pregunta entonces es cómo aproximar los momentos de orden inferior de $f_y(Y)$ usando sólo el momentos de orden inferior de $f_x(X)$ y la función $g(X)$.

Rosenblueth (1975) planteo la solución a este cuestionamiento reemplazando la variable aleatoria continua X con una variable aleatoria discreta cuya función de masa de probabilidad (pmf) $P_x(X)$ tuviera los mismos momentos de orden m que $f_x(X)$.

Él transformó $P_x(X)$ mediante $Y = g(X)$ para obtener otra función discreta con un pmf denotado $P_y(y)$. Luego usó este pmf para calcular los momentos centrales media, varianza cuya raíz cuadrada es la desviación estándar.

Rosenblueth (1975) expone 3 casos, de los cuales, para esta tesis se adoptó el tercer caso. Este se basa en lo siguiente: Y es una función de n variables X_1, X_2, \dots, X_n , cuyas distribuciones son simétricas y las cuales pueden estar correlacionadas.

El procedimiento escoge 2^n puntos seleccionados para que el valor de cada variable sea una desviación estándar por encima o por debajo de su media.

Estos puntos se conocen como puntos de muestreo. Si las variables no se correlacionan, la función Y es evaluada en cada uno de los 4 puntos y el peso para cada punto es 0.25 (Baecher & Christian, 2003).

Conociendo la media μ_{x_i} y la desviación estándar σ_{x_i} de las variables aleatorias, la localización de los puntos de muestreo se puede calcular con las siguientes expresiones (Cruz Zelaya, 2012):

$$X_{i+} = \mu_{x_i} + \xi_{x_{i+}} \sigma_{x_i}$$

$$X_{i-} = \mu_{x_i} + \xi_{x_{i-}} \sigma_{x_i}$$

Donde las desviaciones estándar unitarias $\xi_{x_{i+}}$ y $\xi_{x_{i-}}$ se calculan teniendo en cuenta los coeficientes de asimetría v_{x_i} de las variables aleatorias así:

$$\xi_{X_{i+}} = \frac{v_{Xi}}{2} + \sqrt{1 + \left(\frac{v_{Xi}}{2}\right)^2}$$

$$\xi_{X_{i-}} = \frac{v_{Xi}}{2} - \sqrt{1 + \left(\frac{v_{Xi}}{2}\right)^2}$$

Si hay n variables aleatorias, entonces 2^n son escogidas para ser tenidos en cuenta en todas las combinaciones posibles con cada variable aleatoria, una desviación estándar por encima o por debajo de su media.

Los pesos P_i conocidos como concentraciones de probabilidad deben ser calculados para tomar en cuenta la contribución de la correlación entre variables aleatorias. Esto se resuelve con la siguiente expresión:

$$P_{(s_1 s_2 \dots s_n)} = \frac{1}{2^n} \left[1 + \sum_{i=1}^{n-1} \sum_{j=i+1}^n (S_i)(S_j)\rho_{ij} \right]$$

Donde S es +1 cuando el valor de la variable es una desviación estándar por arriba de la media. S es -1 cuando esté por debajo de la media.

Finalmente los tres primeros momentos centrales de la función de comportamiento se calculan de la siguiente manera:

$$\mu_{Y(X_i)} = \sum_{i=1}^{2^n} P_i Y(X_i = x_i)$$

$$\sigma^2_{Y(X_i)} = \sum_{i=1}^{2^n} P_i (Y(X_i = x_i) - \mu_{Y(X_i)})^2$$

$$v_{Y(X_i)} = \frac{1}{\sigma^3_{Y(X_i)}} \sum_{i=1}^{2^n} P_i (Y(X_i = x_i) - \mu_{Y(X_i)})^3$$

La probabilidad total de falla, combinando los escenarios de análisis, se puede calcular con la siguiente expresión:

$$P_{ft} = 1 - (1 - p_{f1})(1 - p_{f2}) \dots \dots (1 - p_{fn})$$

Donde:

P_{ft} : Probabilidad de falla total

P_{fi} : Probabilidad de falla para el escenario i. Este escenario se define por las combinaciones de lluvia y sismo.

4. Metodología

4.1 Recopilación de información

Se consultó y recopiló la información relacionada con rellenos antrópicos en la ciudad de Manizales; como cartográfica digital, topografía, bases de datos con parámetros físicos y mecánicos de los materiales que componen estos depósitos.

Para esto se consultaron trabajos de grado, artículos, estudios de suelos, bibliotecas de empresas consultoras en la ciudad, información disponible en entidades públicas, entre otras.

Se consultaron todos los documentos técnicos y normativos vigentes en Colombia para aplicarlos en la metodología. Entre estos: La NSR-10, el estudio general de amenaza sísmica de Colombia del año 2009, la microzonificación sísmica de la ciudad de Manizales del 2002, entre otras.

La tesis se basó en los rellenos antrópicos estudiados en el proyecto de Osorio Sierra & Zuluaga Moreno (2003) titulado “Delimitación cartográfica y caracterización geomecánica de los llenos de cauce de la vertiente norte del río Chinchiná, entre la divisoria oriental de la quebrada el Guamal y estación La Uribe, la avenida Santander y el río Chinchiná, de la ciudad de Manizales”.

La cartografía de Manizales utilizada fue la de los años 1960, 1977 y 2004 escala 1:2000. Esta fue suministrada por el Instituto geográfico Agustín Codazzi mediante planchas en físico.

También se utilizó un segmento de la ortho fotografía del año 2015 suministrada por Corpocaldas.

Los valores utilizados para definir las propiedades físicas y mecánicas, de los materiales que componen los estratos de los rellenos, fueron extraídos de Osorio Sierra & Zuluaga Moreno (2003) y de los informes de estudios de empresas consultoras de la ciudad.

La información geológica del área donde se localizan los rellenos fue tomada de lo descrito por Naranjo Henao & Ríos Álzate (1989) y Duque Escobar (2014).

Los registros históricos de las precipitaciones fueron tomados de las estaciones pluviométricas No8 (El Carmen) y No10 (Hospital de Caldas). Estas estaciones están localizadas en el área donde se localizan los rellenos o muy cerca de estos.

Las estaciones No8 (El Carmen) y No10 (Hospital de Caldas) están a cargo del Instituto de estudios ambientales (IDEA), de la Universidad Nacional de Colombia Sede Manizales, entidad dueña de la información.

También se utilizaron registros históricos de las precipitaciones de la estación Agronomía de la ciudad de Manizales, la cual está a cargo Centro Nacional de Investigaciones de Café (Cenicafé).

Esta estación no está cerca del área donde se localizan los rellenos. Sin embargo, es la que tiene un registro de datos más amplio, desde el año 1960.

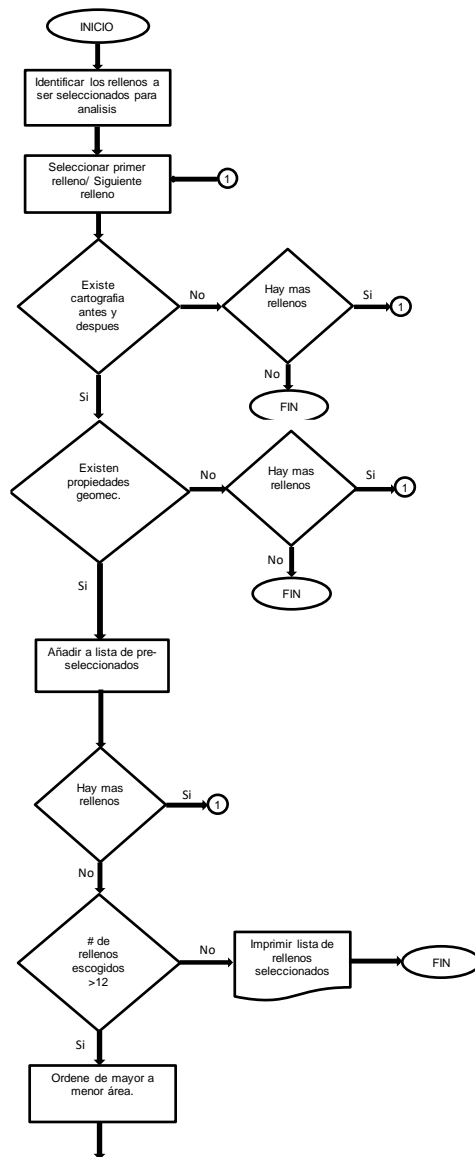
Los valores de aceleración sísmica, para el cálculo de la estabilidad de los rellenos, fueron determinados con base en lo descrito por: La Asociación Colombiana de Ingeniería Sísmica (2009), en el estudio general de amenaza sísmica de Colombia; y por la Universidad de los Andes (2002), en el estudio de la microzonificación sísmica para la ciudad de Manizales. También se consultó la NSR-10.

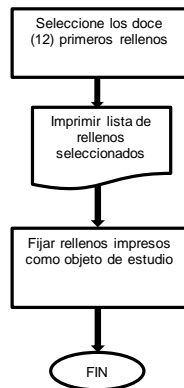
Se consultó la guía metodológica para estudios de amenaza, vulnerabilidad y riesgo por movimientos en masa del Servicio Geológico Colombiana (SGC). Se siguió lo sugerido aquí para realizar la evaluación de la amenaza.

4.2 Selección de rellenos

La selección de los 12 rellenos evaluados en esta tesis, de los 31 rellenos estudiados en el proyecto de Osorio Sierra & Zuluaga Moreno (2003) Tabla 14, siguió el procedimiento representado en el siguiente diagrama de flujo Figura 46:

Figura 46 Diagrama de flujo para selección de rellenos.





La interpretación del diagrama de flujo se puede hacer en los siguientes pasos:

Primero: Se consideraron los rellenos construidos entre los años 1945-1993 del área de estudio, es decir los estudiados por Osorio Sierra y Zuluaga Moreno (2003) Tabla 14.

Segundo: Primer filtro. Se preseleccionaron los rellenos para los cuales existiera cartografía de los años 1960 o 1977 y del año 2004. Esta cartografía fue suministrada en planchas físicas por la fuente de consulta. Por esto se revisó su estado para la posterior digitalización.

Tercero: Segundo Filtro. Se preseleccionaron los rellenos de los cuales se tuviera información referente a valores de propiedades físicas y mecánicas de los materiales que los componen.

Cuarto: Si el número de rellenos preseleccionados fue menor o igual a 12, estos fueron los rellenos seleccionados para su evaluación de la amenaza por deslizamiento.

Quinto: Si el número de rellenos preseleccionados fue mayor o igual a 12, se ordenaron de mayor a menor área (m^2) y se seleccionaron los primeros 12 rellenos para hacer la de evaluación de la amenaza.

Sexto: Los 12 rellenos resultantes de esta selección fueron los que se fijaron para desarrollar esta tesis.

4.3 Digitalización cartográfica

Los rellenos localizados se digitalizaron con base en la cartografía antigua (años 1960 y 1977) y reciente (año 2004) de la ciudad. Esto se realizó apoyado en las planchas del Igac relacionadas en la Tabla 15 y utilizando do el software Argis 10.0.

Cabe mencionar que estas planchas se debieron digitalizar en software Argis ya que la fuente de consulta las suministró en físico.

Las planchas e imágenes utilizadas en esta tesis se relacionan en la Tabla 15 .

Tabla 15 Cartografía y Ortofotografías utilizada en el desarrollo del estudio

CARTOGRAFIA ANTIGUA E 1:2000		
AÑO	No DE PLANCHA	FUENTE
1960	3-4-5-7-8-9-11	IGAC
1977	5-6-9-10-11-15-16	IGAC
CARTOGRAFIA RECIENTE E 1:2000		
AÑO	No DE PLANCHA	FUENTE
2004	18-19-20-24-25-26-30- 31-32	IGAC
IMAGEN LIDAR (ORTOFOTO)		
AÑO	No DE PLANCHA	FUENTE
2015		CORPOCALDAS

4.3.1 Digitalización y delimitación de rellenos

La digitalización y delimitación de los rellenos se realizó sobre la cartografía mencionada en la Tabla 15 y utilizando el software Arcgis (Arc map 10.2.2).

Se inició dibujando los 31 rellenos estudiados en el proyecto de Osorio Sierra & Zuluaga Moreno (2003) Tabla 14, con las mismas dimensiones en cuanto al área y al perímetro.

Esto se hizo sobre la cartografía digitalizada de los años 1960 y 2004, evidenciando que algunos de estos no aparecían en la cartografía del año 1960.

Estos rellenos fueron los siguientes: Estambul I Etapa, Estambul II Etapa, Conjunto Cerrado la Montaña, Centenario, Nogales.

Debido a esto se verificó si sobre la cartografía del año 1977 dichos rellenos se podían dibujar. Se evidenció que las planchas físicas del 1977 donde se pretendían dibujar estos rellenos estaban en muy mal estado en cuanto a legibilidad lo que impidió que fueran digitalizadas.

Por tanto, dichos rellenos no se pudieron dibujar. En consecuencia se descartaron y no quedaron en la selección final de los 12 rellenos.

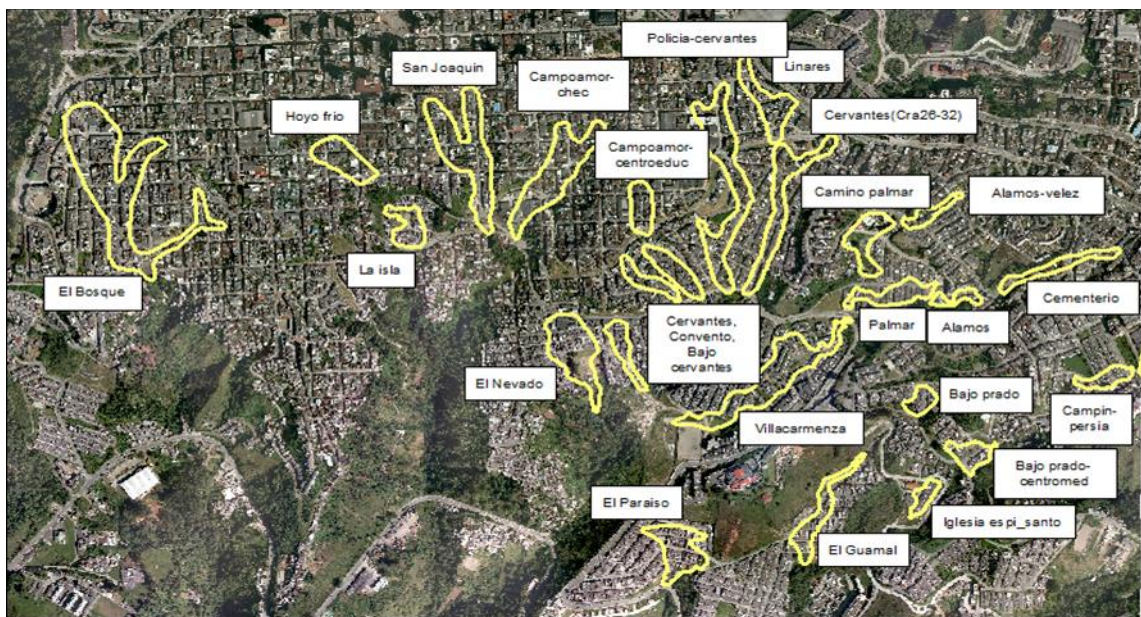
A continuación, se nombran los rellenos que quedaron luego realizar este primer filtro.

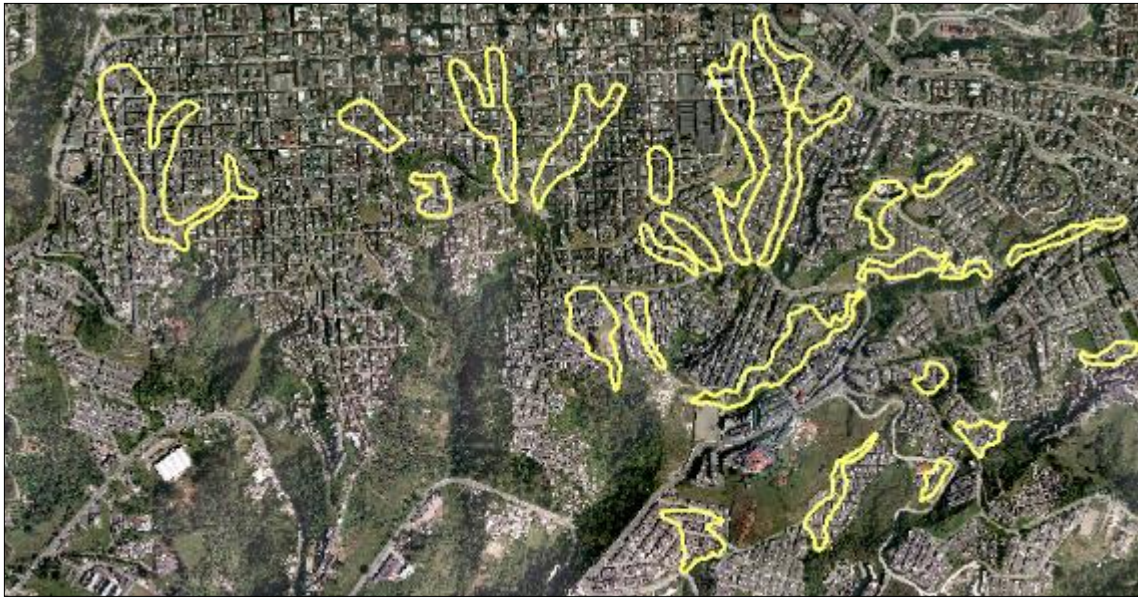
Se ilustran en la Figura 47:

- El Bosque
- Hoyo frio
- San Joaquín
- Campoamor la Chec
- La isla
- Campoamor sector centro educativo
- Cervantes sector convento perpetuo socorro
- Cervantes
- Bajo cervantes
- El nevado
- Linares
- Cervantes (entre Carreras 26^a-32^a y Calles 36^a, 37, 37^a)

- Estación general de policía-cervantes sector iglesia
- Cementerio (Barrio Colombia)
- Álamos
- El Palmar
- Álamos - Vélez
- Camino del Palmar
- Villa Carmenza
- Bajo Prado
- El Guamal
- El paraíso
- Versalles
- Campin-Persia
- Bajo Prado sector medico
- Iglesia Espíritu Santo

Figura 47 Localización de rellenos que digitalizados. Fuente: propia





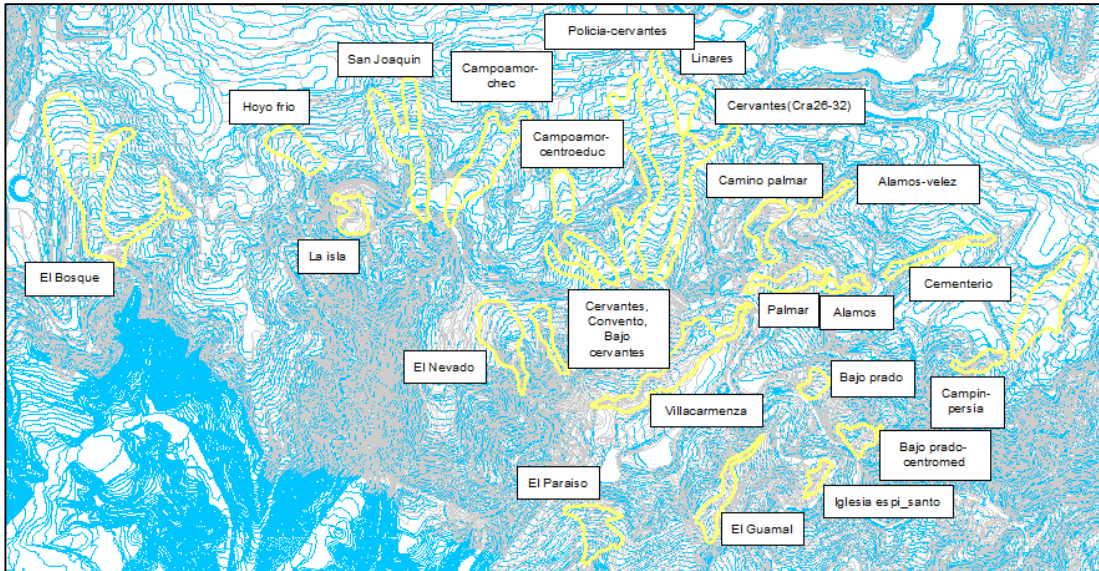
4.3.2 Superposición de cartografías

Se realizó la superposición de la cartografía del año 2004 sobre la cartografía del año 1960. Cabe mencionar que a las curvas de nivel de ambas cartografías, se les asignó su elevación en el proceso de digitalización.

Este procedimiento se realizó en el software Arcgis y se ilustra en la Figura 48.

En la Figura 48, las curvas de nivel de color azul corresponden a la cartografía del año 2004 y las de color gris corresponden a la cartografía del año 1960.

Figura 48 Superposición de cartografías, año 2004 (reciente) sobre año 1960 (antigua). Fuente: propia



Se generan los modelos TIN para cada una de las cartografías, años 2004 y 1960.

Estos modelos TIN se generaron con base en una red de triángulos y representan la topografía de las dos épocas, año 1960 y año 2004, del área donde están localizados los rellenos.

En las Figura 49 y Figura 50 se ilustran los modelos TIN de las dos épocas para la ciudad de Manizales:

Figura 49 Modelo TIN de cartografía del año 1960 de la zona de estudio. Fuente: propia

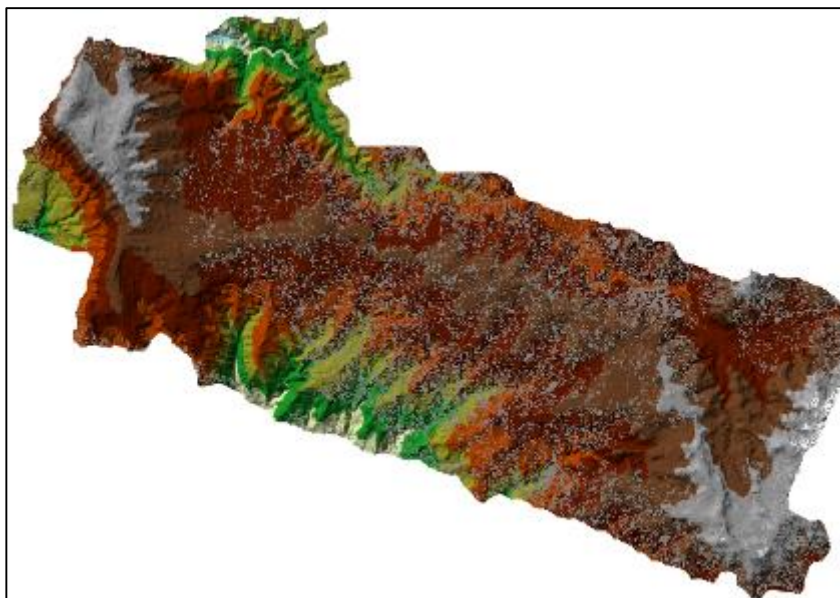


Figura 50 Modelo TIN de cartografía del año 2004 de la zona de estudio. Fuente: propia



Posteriormente se generaron los modelos raster de la cartografía de cada año, 1960 y 2004.

Estos se generan a partir de una matriz de celdas o píxeles organizados en filas y columnas, es decir una cuadrícula, en la cual cada celda contiene un valor de alguna información. Para el caso la celda contiene la elevación medida en metros sobre nivel medio del mar (msnm).

Un modelo raster se asemeja a la radiografía del terreno, es decir, los píxeles con las tonalidades más oscuras (colores negros) corresponden a las elevaciones menores y los píxeles con las tonalidades más claras (colores blancos) corresponden a las elevaciones más altas.

La Figura 51, la Figura 52 y la Figura 53 ilustran los modelos raster de las cartografías de las dos épocas, años 1960 y 2004:

Figura 51 Modelo raster de cartografía del año 1960 de la zona de estudio. Fuente: Propia

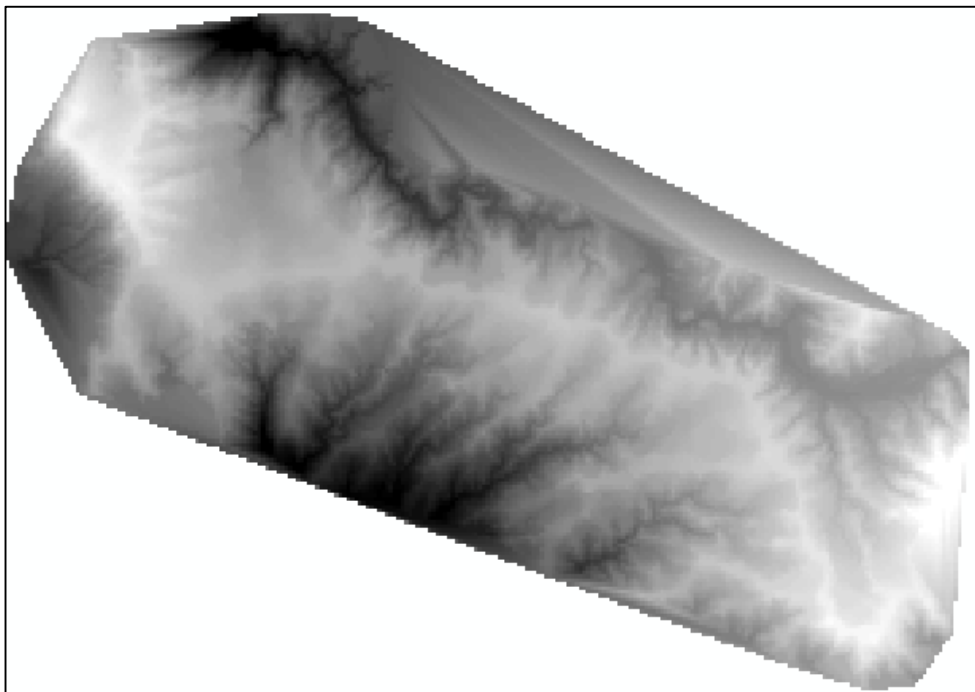


Figura 52 Modelo raster de cartografía del año 2004 de la zona de estudio. Fuente: Propia

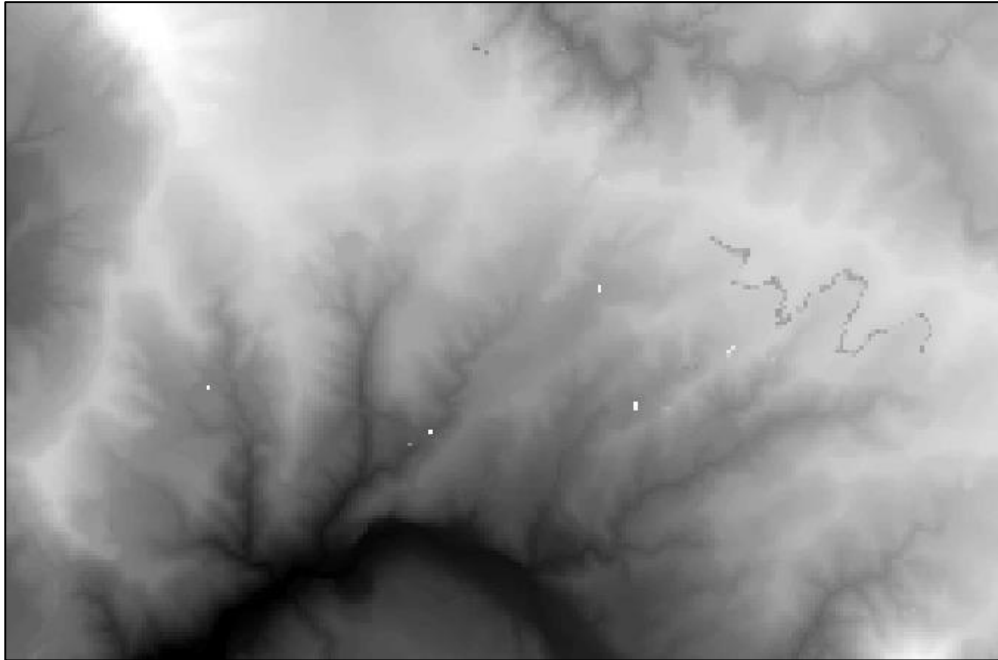
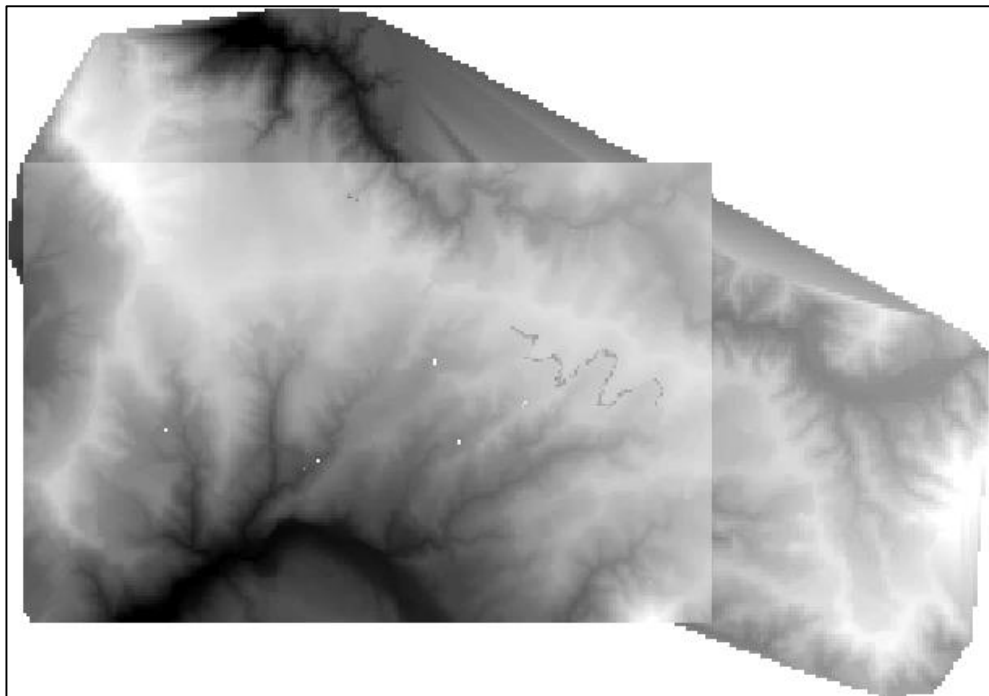


Figura 53 Superposición de archivos raster de cartografía de la zona de estudio del año 2004 sobre año 1960 Fuente: propia.



4.3.3 Perfiles longitudinal y geométrico

La superposición de los dos modelos de las dos épocas años 1960 y 2004 Figura 53, generó una capa (software Arcgis). Sobre dicha capa se dibujaron los alineamientos de cada relleno.

Esto se realizó por medio de una polylinea por relleno trazada sobre los pixeles con tonalidades más oscuras (menos elevación) en los modelos de las dos épocas.

La polylinea trazada sobre el modelo raster del año 1960, representó el cauce natural original sin intervención alguna. La polylinea trazada sobre el modelo raster del año 2004, representó la superficie del relleno luego de su construcción.

El software Arcgis les asignó las elevaciones (mmsnm) de los pixeles a las dos polylineas por donde fueron trazadas.

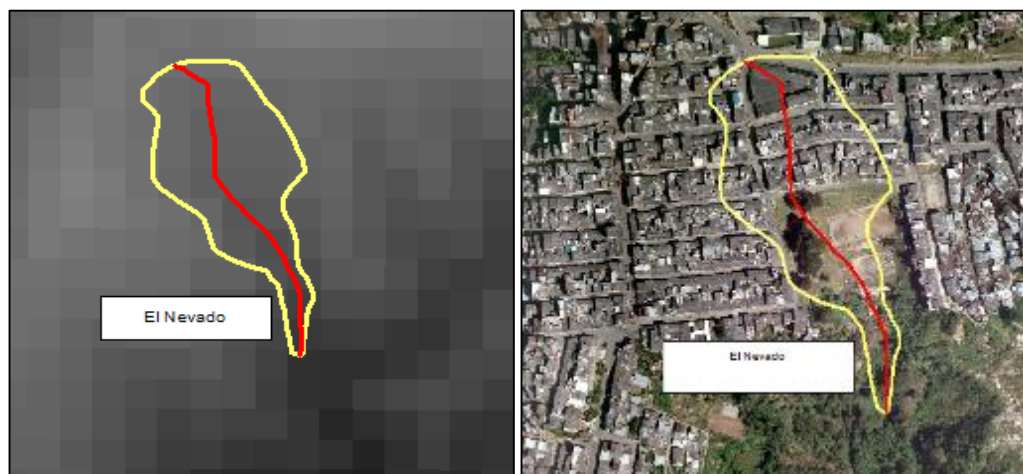
Las dos polylineas, por relleno, al dibujarlas en un perfil simultáneamente, generaron los perfiles geométricos de los correspondientes rellenos.

Considerando que en el filtro anterior se descartaron unos rellenos, se generaron 24 perfiles geométricos correspondes al mismo número de rellenos.

La Figura 54 ilustra el procedimiento. Las polylineas trazadas sobre los modelos raster del relleno El Nevado (NEV).

Este relleno se tomó como el tipo para ilustrar la metodología del estudio. Para los demás rellenos se hizo el mismo procedimiento y esto se puede observar en el Anexo 16.

Figura 54 Alineamiento del Relleno tipo, El Nevado. (Izquierda: Raster año 1960 – Derecha: Orthoimagen año 2015)

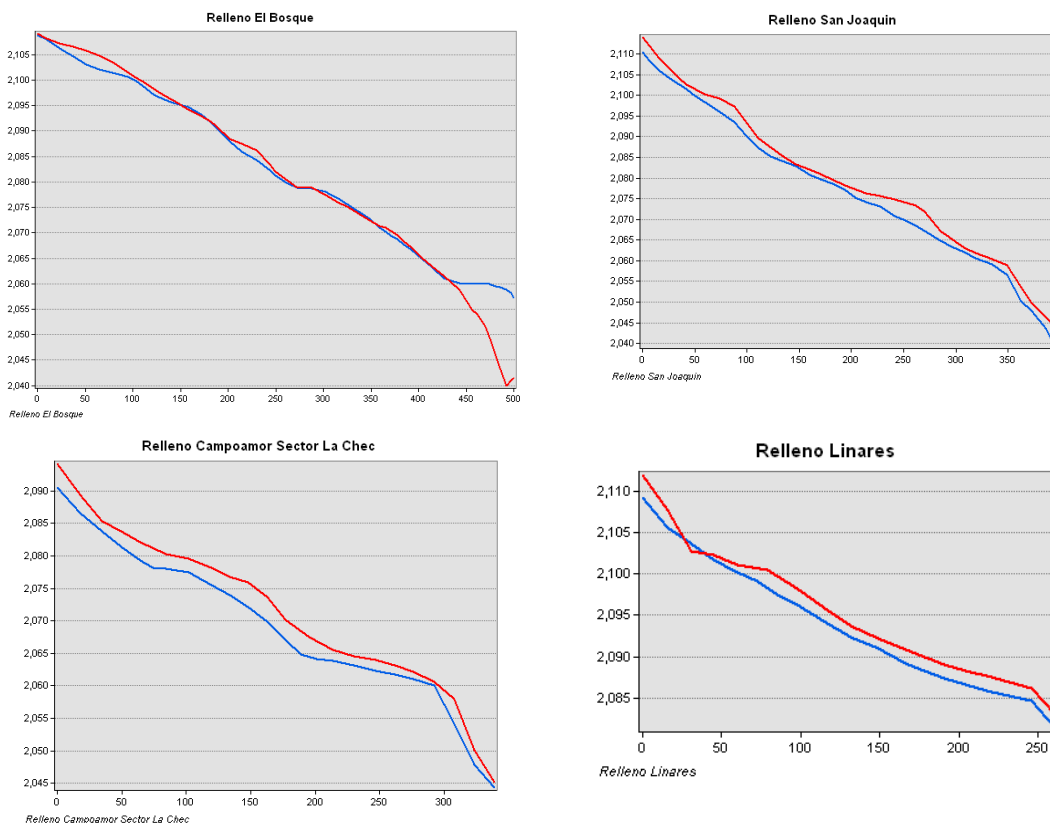


Al graficar los perfiles geométricos de todos los rellenos se observaron incoherencias en algunos, tales como que el perfil del año 1960 tenía elevaciones superiores con respecto al perfil del año 2004.

En la Figura 55 se ilustran los perfiles de algunos rellenos en las dos épocas 1960 y 2004, donde se observa la incoherencia mencionada.

Los perfiles en color rojo corresponden al año 1960 y los perfiles en color azul corresponden al año 2004.

Figura 55 Perfiles de algunos rellenos, cartografías 1960 y 2004, donde se observa incoherencia cartográfica.



Los rellenos que no cumplieron con los criterios de selección, descritos en el numeral 4.2, no fueron seleccionados para realizarle su respectiva evaluación de la amenaza por deslizamiento.

Se mencionan a continuación las razones por las cuales los rellenos descartados de la Tabla 14, no cumplieron con los requerimientos para ser seleccionados:

- No existe cartografía del año 1960 para la *subzona No 1* (Rellenos Estambul I, II etapas, conjunto cerrado la montaña) y subzona No2 (Rellenos Centenario y Nogales).
- Para la *subzona No3* (Relleno El Bosque): La superposición de las cartografías no mostró variaciones considerables en el perfil geométrico, además algunos tramos del perfil geométrico mostraron incoherencia, ya que la cartografía de 1960 estaba por encima de la 2004.

- En la *subzona No4*, los perfiles geométricos de los rellenos Campoamor-Chec, Hoyo Frio y san Joaquín, mostraron incoherencia, ya que la cartografía de 1960 estaba por encima de la 2004.
- En la *subzona No5*, los perfiles de los rellenos Cervantes, cervantes-convento, Campoamor-centro educativo, y bajo cervantes mostraron incoherencia, ya que la cartografía de 1960 estaba por encima de la 2004.
- En la *subzona No6* (Rellenos Cervantes Cra26a32, Policía-cervantes, lineares), todos los perfiles mostraron incoherencia, ya que la cartografía de 1960 estaba por encima de la 2004.
- En la *subzona No7* (Rellenos Cementerio, El palmar, Álamos, Alamos-Velez, Camino del palmar, Villacarmenza), todos los perfiles fueron coherentes en que la cartografía del 2004 está por encima de 1960, excepto Cementerio. Por lo anterior se seleccionan todos descartando únicamente cementerio.
- En la *subzona No8* (Rellenos Bajo prado, El Guamal, El Paraíso), la superposición de todos los perfiles en las dos épocas es coherente, ya que da por encima la de 2004 sobre 1960. Por lo anterior todos se seleccionan.
- En la *subzona No9* (Rellenos Iglesia espíritu santo, bajo prado centro médico, campin Persia, Versailles), todos los perfiles fueron coherentes en que la cartografía del 2004 está por encima de 1960, excepto Versailles y Espíritu santo. Por lo anterior todos se seleccionan descartando únicamente Versailles y Espíritu Santo.

En la Tabla 16 se relacionan los 12 rellenos seleccionados para la evaluación de amenaza por deslizamiento, así mismo los descartados.

Tabla 16 Listado de los 12 rellenos seleccionados para el estudio.

No RELLENO	NOMBRE DE RELLENO	EXISTE CARTOGRAFIA ANTES Y DESPUES	CONDICIÓN
SUBZONA No1			
1	Estambul I Etapa	NO	Descartado
2	Estambul II Etapa	NO	Descartado
3	Conjunto cerrado la montaña	NO	Descartado
SUBZONA No2			
4	Centenario	NO	Descartado
5	Nogales	NO	Descartado
SUBZONA No3			
6	El Bosque	NO	Descartado
SUBZONA No4			
7	Hoyo Frio	NO	Descartado
8	San Joaquin	NO	Descartado
9	Campoamor sector la chec	NO	Descartado
10	La Isla	SI	Preseleccionado
SUBZONA No5			
11	Campoamor sector centro educativo	NO	Descartado
12	Cervantes sector convento perpetuo socorro	NO	Descartado
13	Cervantes	NO	Descartado
14	Bajo Cervantes	NO	Descartado
15	El Nevado	SI	Preseleccionado
SUBZONA No6			
16	Linares	NO	Descartado
17	Cervantes (entre Carreras 26A-32A y Calles 36A,37,37A)	NO	Descartado
18	Estación general de policia-cervantes sector iglesia	NO	Descartado
SUBZONA No7			
19	Cementerio (Barrio Colombia)	NO	Descartado
20	Alamos	SI	Preseleccionado
21	El Palmar	SI	Preseleccionado
22	Alamos-Velez	SI	Preseleccionado
23	Camino del Palmar	SI	Preseleccionado
24	Villa Carmenza	SI	Preseleccionado
SUBZONA No8			
25	Bajo Prado	SI	Preseleccionado
26	El Guamal	SI	Preseleccionado
27	El Paraiso	SI	Preseleccionado
SUBZONA No9			
28	Versalles	NO	Descartado
29	Campin-Persia	SI	Preseleccionado
30	Bajo Prado sector centro medico	SI	Preseleccionado
31	Iglesia Espiritu Santo	SI	Descartado

4.4 Perfil geológico-geotécnico para la modelación

Se definió un perfil geológico-geotécnico para todos los rellenos. A cada estrato del perfil se les incluyeron sus propiedades físicas, mecánicas e hidráulicas.

Para la definición de este perfil se consideró la geología local descrita por Duque Escobar (2014) y Naranjo Henao & Ríos Álzate (1989).

También se consideró la información de los resultados de los ensayos de laboratorio incluidos en el proyecto de Osorio Sierra & Zuluaga Moreno (2003).

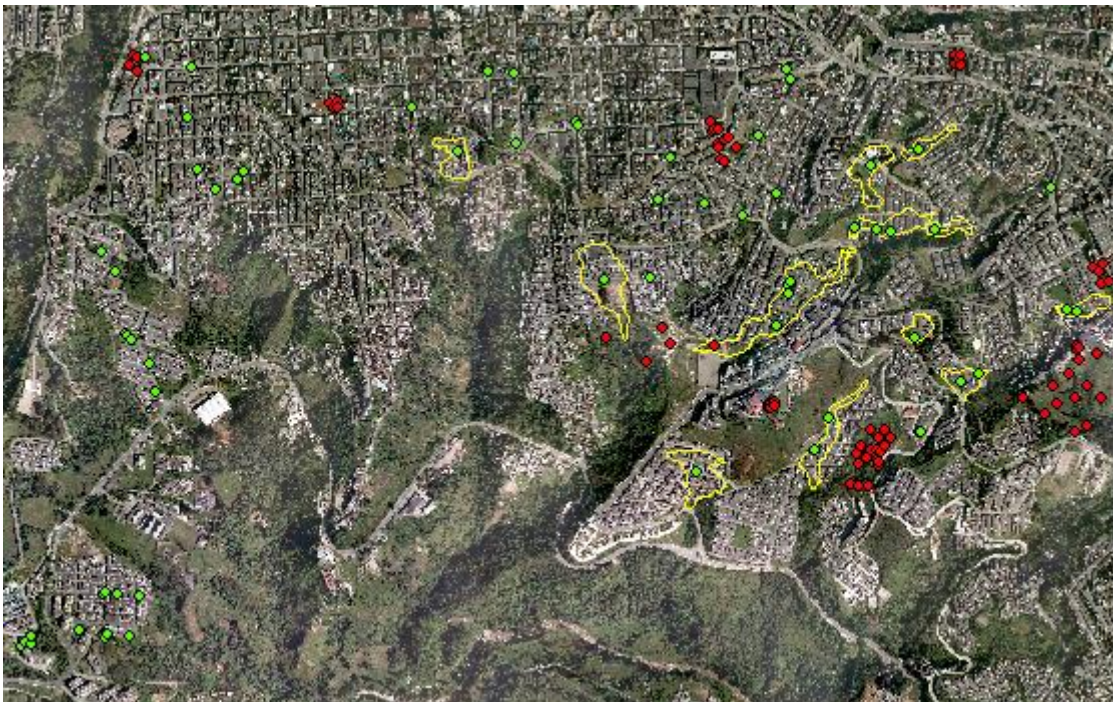
Estos resultados de los ensayos de laboratorio fueron producto de una campaña de exploración geotécnica que se realizó, por medio de barrenos manuales, donde se localizan los rellenos, en proyecto de Osorio Sierra & Zuluaga Moreno (2003).

En la Figura 56 se muestran la localización de los sondeos (puntos color verde).

Del mismo modo, con el fin de tener la mayor cantidad de datos posible, se tuvieron en cuenta los resultados de los ensayos de laboratorio e informes de los estudios de suelos realizados por empresas consultoras de la ciudad.

La campaña de exploración geotécnica de estos estudios se realizó mediante sondeos manuales, semi - mecánicos y mecánicos. Se localizan e ilustran en la Figura 56.

Figura 56 Localización de sondeos (Osorio Sierra & Zuluaga Moreno, 2003) (Puntos verdes). Localización de sondeos Aquaterra S.A (Puntos rojos)



El perfil geológico-geotécnico definido para los modelos de los respectivos rellenos es el siguiente:

Tabla 17 Perfil geológico - geotécnico definido para la modelación de estabilidad de los 12 rellenos. Fuente: Propia

Estrato No1 : Relleno Antropico
Estrato No2: Formación Casabianca

Se definió el espesor de cada uno de los dos estratos así:

Estrato No1: Se define de acuerdo con la superposición de cartografías de acuerdo con lo descrito en el numeral 4.3.2 y numeral 4.3.3.

Estrato No2: Se revisaron los perfiles geológicos e ilustrados por Duque Escobar (2014). De igual manera, de la descripción geológica mencionada en el numeral 3.3.4.1, se vio que la Formación Casabianca tiene aproximadamente 50m de espesor máximo.

En consideración se definió para el estrato No2, Formación Casabianca, un espesor de entre 15 a 20m.

Los ensayos realizados a las muestras para determinar las propiedades físicas y mecánicas de los materiales de los dos estratos son los siguientes:

- Granulometría - clasificación
- Peso Unitario húmedo y seco
- Humedad Natural
- Límites de consistencia
- Compresión inconfiada
- Ensayo de corte directo (UU, CU,CD)
- Consolidación Unidimensional

4.4.1 Propiedades físicas y mecánicas por estrato

Los valores de cohesión (c') y ángulo de fricción (ϕ') asignados a los dos estratos del perfil geológico-geotécnico Tabla 17, se definieron así:

Se generó una serie de datos, producto de unir los datos extraídos del proyecto de Osorio Sierra & Zuluaga Moreno (2003) y los datos extraídos de los estudios de las empresas consultoras de la ciudad.

Esta serie de datos incluyó los valores de propiedades mecánicas y físicas de los dos estratos; cohesión (c') y ángulo de fricción (ϕ') y peso unitario (γ) respectivamente.

A las series de datos de cohesión (c') y ángulo de fricción (ϕ') de cada estrato, se les realizó una prueba de bondad de ajuste de Smirnov – Kolmogorov.

Con esta prueba de bondad se verificó, que las series de datos de los valores de cohesión (c') y los valores de ángulo de fricción (ϕ') siguen ambas distribuciones normales para los dos estratos.

También se definieron los momentos estadísticos de cada función: Media, desviación estándar, valores máximos y mínimos.

La Figura 57, la Figura 58, la Figura 59, la Figura 60 muestran, por medio de graficas de frecuencia o probabilidad acumulada, que ambas variables siguen distribuciones normales para cada uno de los dos estratos.

Figura 57 Curva de frecuencia o probabilidad acumulada de la variable cohesión (c') para el estrato de relleno antrópico

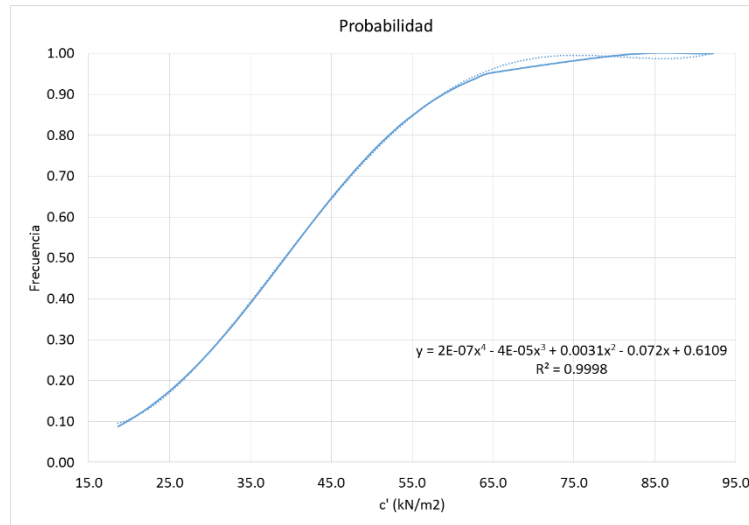


Figura 58 Curva de frecuencia o probabilidad acumulada de la variable ángulo de fricción (ϕ') para el estrato de relleno antrópico

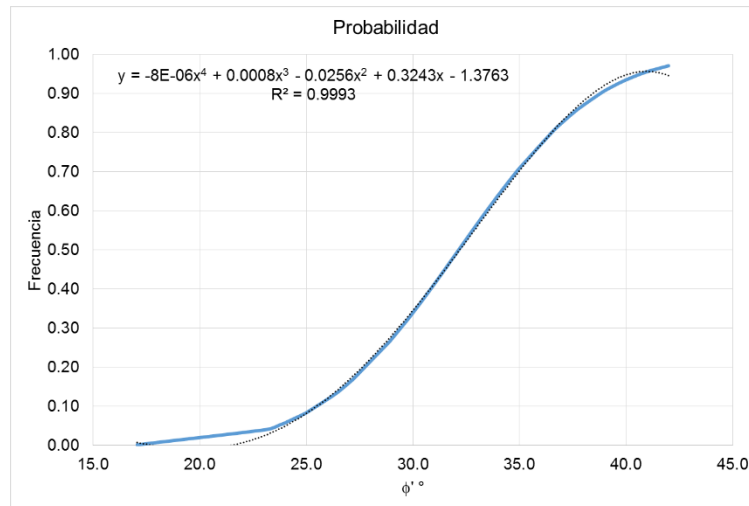


Figura 59 Curva de frecuencia o probabilidad acumulada de la variable cohesión (c') para el estrato de la Formación Casabianca

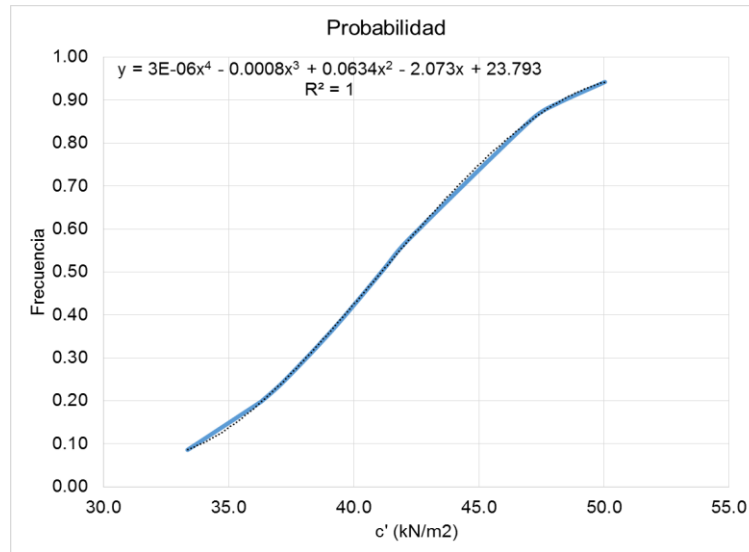
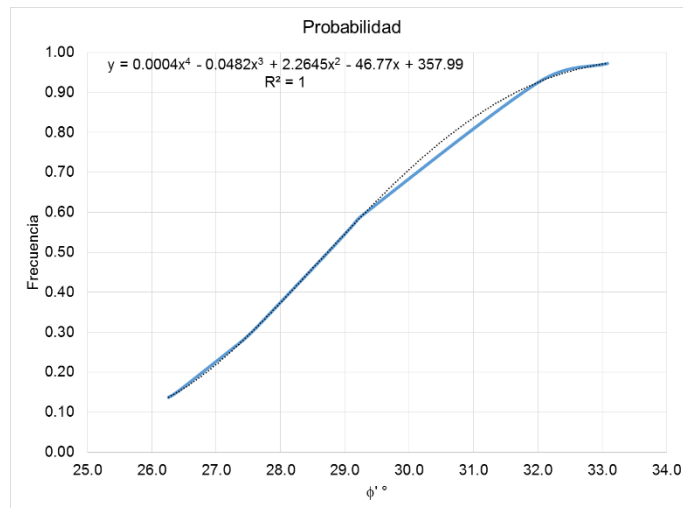


Figura 60 Curva de frecuencia o probabilidad acumulada de la variable ángulo de fricción (ϕ') para el estrato de la Formación Casabianca



Los valores del peso unitario (γ), de la cohesión (c') y del ángulo de fricción (ϕ') de los dos estratos del perfil geológico geotécnico, se definieron así:

Estrato No1 Relleno Antrópico: Valor promedio del peso unitario (γ); valores promedio de la cohesión (c') y del ángulo de fricción (ϕ') más o menos (+/-) su correspondiente desviación estándar.

Estrato No2 Formación Casabianca: Valor promedio del peso unitario (γ); valores promedio de la cohesión (c') y del ángulo de fricción (ϕ').

La Tabla 18 muestra los valores asignados para cada estrato de los rellenos. Esta se elaboró con base en los datos de las tablas 19 a la tabla 21.

Tabla 18 Parámetros físicos y mecánicos estratos modelo geotécnico. Fuente: Propia

MATERIAL	P.U.H (kN/m3)	c (kN/m2)	Desviacion Estandar (σ)	ϕ (°)	Desviacion Estandar (σ)
RELLENO	16.480	39.28	15.25	32.14	5.17
RESIDUAL FORMACIÓN CASABIANCA	15.740	41.10	5.67	28.74	2.27

La Tabla 19, la Tabla 20, la Tabla 21, la Tabla 22, la Tabla 23, la Tabla 24, Tabla 25 muestran un resumen de los valores del peso unitario (γ), de la cohesión (c'), del ángulo de fricción (ϕ') y de la clasificación SUCS de cada uno de los dos estratos. Esto fue extraído de las fuentes consultadas como se ha indicado con anterioridad.

Tabla 19 Propiedades físicas y mecánicas para el estrato de relleno antrópico del perfil geotécnico. Fuente: Aquaterra S.A

RELLENO ANTROPICO (VALORES PROMEDIO)					
No Estudio	P.U.H (ton/m3)	c (kg/cm2)	ϕ (°)	qu ton/m2	SUCS
3070					
2954	1,876	0,26	32,14	11,41	SC
2853	1,638	0,43	29,77	6,65	
2824	1,69	0,28	30,84	7,22	SM
2759 y 2227	1,486	0,2	25	6,85	MH
2753	1,723	0,49	30,78	8,91	SM,SC y CH
2639 y 2648	1,755			7,78	SC y SM
2612					
2349	1,673	0,253	30,51	9,32	CH y MH
aledaños a 2349	1,697	0,35	33,43	7,61	
2223	1,734	0,51	29,86	6,66	SC y ML
1986	1,607			6,44	SM y SC
1885	1,602			11,88	SM
1882					
1824	1,764			6,55	SC
1798					
1779	1,719			10,65	SM
I-15-118					
I-15-64	1,781	0,45	26,86	11,25	CH
I-16-30					
1-16-90					

Tabla 20 Clasificación SUCS por muestra y por estudio para estrato de relleno antrópico del perfil geotécnico. Fuente: Aquaterra S.A

RELLENO ANTROPICO CLASIFICACION SUCS											
No Estudio	SM	SC	MH	ML	CH	CL	SW	SP	GW	GC	TOTAL
3070	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0
2954	2	8	0	0	1	0	0	0	0	0	11
2853	2	8	0	0	1	0	0	0	0	0	11
2824	3	0	1	0	1	2	0	0	0	0	7
2759 y 2227	0	1	3	0	0	0	0	0	0	0	4
2753	2	2	1	0	2	1	0	0	0	0	8
2639 y 2648	0	1	4	0	5	0	0	0	0	0	10
2612											0
2349	2	1	7	2	9	0	0	0	0	0	21
2223											0
1986	2	2	1	0	0	0	0	0	0	0	5
1885	3	0	0	0	0	0	0	0	0	0	3
1882											0
1824	0	1	0	0	0	0	0	0	0	0	1
1798											0
1779	1	0	0	0	0	0	0	0	0	0	1
I-15-118											0
I-15-64	2	3	3	2	5	2	0	0	0	0	17
I-16-30	1										1
I-16-90											
TOTAL	20	27	20	4	24	5	0	0	0	0	100
%	20,00%	27,00%	20,00%	4,00%	24,00%	5,00%	0,00%	0,00%	0,00%	0,00%	100%

La Tabla 21 y la Tabla 22 muestran un resumen de los valores del peso unitario (γ), de la cohesión (c'), del ángulo de fricción (ϕ') y de la clasificación SUCS de los suelos derivados de Cenizas Volcánicas.

Los rellenos antrópicos, de acuerdo a la definición mencionada en el numeral 3.3.4.3, están constituidos, generalmente, por una mezcla de varios tipos de suelos. Entre estos están los suelos derivados de cenizas volcánicas.

Los valores de las propiedades de las cenizas volcánicas se consideraron en la elaboración de las series de datos.

Tabla 21 Propiedades físicas y mecánicas para el estrato de cenizas volcánicas. Fuente: Aquaterra S.A

DEPOSITO DE CENIZAS (VALORES PROMEDIO)					
No Estudio	P.U.H (ton/m3)	c (kg/cm2)	ϕ (°)	qu ton/m2	SUCS
3070	1,669	0,37	30,7	15,92	SC Y MH
2954					
2853					
2824	1,704	0,37	30,7	12,53	SC y SM
2759 y 2227					
2753					
2639 y 2648					
2612	1,721			13,95	SC y ML
2349					
aledaño a 2349	1,573	0,35	30,68	10,15	
2223	1,503	0,49	30,22	9,44	CH y CL
1986	1,68	0,39	32,21	10,1	SM
1885	1,622			9,09	MH
1882	1,639			11,81	SC
1824	1,714			11,34	SC
1798	1,644			12,06	SC y MH
1779	1,766			13,99	SC y SM
I-15-118	1,7	0,27	32,26	10,68	SC
I-15-64	1,783	0,25	31,38	11,25	CH
I-16-30	1,564			13,95	SC y SM
1-16-90	1,609	0,94	23,73	13,1	SC, MH y CH

Tabla 22 Clasificación SUCS por muestra y por estudio para estrato de cenizas volcánicas. Fuente: Aquaterra S.A

DEPOSITO DE CENIZAS CLASIFICACION SUCS											
No Estudio	SM	SC	MH	ML	CH	CL	SW	SP	GW	GC	TOTAL
3070	0	2	2	0	0	0	0	0	0	0	4
2954											0
2853											0
2824	7	9	6	0	4	3	0	0	0	0	29
2759 y 2227											0
2753											0
2639 y 2648											0
2612	0	4	0	3	2	0	0	0	0	0	9
2349											0
2223											0
1986	9	4	3								16
1885	1	0	2	0	0	0	0	0	0	0	3
1882	1	5	3	1	0	0	0	0	0	0	10
1824	3	4	2	0	0	0	0	0	0	0	9
1798	1	2	2	0	0	0	0	0	0	0	5
1779	5	4	0	0	0	0	0	0	0	0	9
I-15-118	2	22	7	0	6	0	0	0	0	0	37
I-15-64	4	7	5	0	0	4	0	0	0	0	20
I-16-30	3	4	1	0	2	0	0	0	0	0	10
1-16-90	0	3	3	0	3	0	0	0	0	0	9
TOTAL	36	70	36	4	17	7	0	0	0	0	170
%	21,18%	41,18%	21,18%	2,35%	10,00%	4,12%	0,00%	0,00%	0,00%	0,00%	100%

Tabla 23 Propiedades físicas y mecánicas para el estrato de Formación Casabianca del perfil Geotécnico. Fuente: Aquaterra S.A

RESIDUAL FORMACIÓN CASABIANCA (VALORES PROMEDIO)					
No Estudio	P.U.H (ton/m3)	c (kg/cm2)	ϕ (°)	qu ton/m2	SUCS
3070	1,482	0,51	29,26	17,55	MH
2954	1,813	0,49	32,01	5,87	ML y CL
2853					
2824	1,682	0,4	27,42	14,89	CH
2759 y 2227	1,522	0,43	26,26	13,24	MH y CH
2753	1,717			13,05	MH y CH
2639 y 2648					
2612	1,655			11,87	CH y CL
2349	1,563	0,42	27,45		MH y SC
aledaño a 2349	1,555	0,37	33,08	15,34	
2223	1,726			23,05	SC
1986	1,61			13,11	MH
1885					
1882	1,528			20,44	MH
1824	1,519			18,41	MH
1798	1,514			12,42	CH
1779	1,517			17,12	
I-15-118	1,619	0,34	28,74	14,46	CH
I-15-64	1,755	0,37	26,4	14,99	CH, CL y MH
I-16-30	1,482	0,38	29,13	16,62	MH y CH
1-16-90	1,635	0,48	27,63	16,69	MH

Tabla 24 Clasificación SUCS por muestra y por estudio para estrato de Formación Casabianca del perfil geotécnico. Fuente: Aquaterra S.A

FORMACION CASABIANCA CLASIFICACION SUCS											
No Estudio	SM	SC	MH	ML	CH	CL	SW	SP	GW	GC	TOTAL
3070	0	1	21	0	9	0	0	0	0	0	31
2954	0	0	0	1		1					2
2853	0	0	0	1		1					2
2824	1	1	1	1	11	4	0	0	0	0	19
2759 y 2227	1	2	11	1	9	0	0	0	0	0	24
2753	0	1	4	0	5	0	0	0	0	0	10
2639 y 2648											0
2612	0	0	0	0	1	2	0	0	0	0	3
2349		3	3		2	1					9
2223											0
1986			12	1	9						22
1885											0
1882	1	0	11	1	5	0	0	0	0	0	18
1824	0	0	19	0	3	0	0	0	0	0	22
1798	0	0	0	0	2	0	0	0	0	0	2
1779	0	1	16	0	3	0	0	0	0	0	20
I-15-118	2	0	11	1	28	0	0	0	0	0	42
I-15-64	1	9	18	10	19	17	0	0	0	0	74
I-16-30	0	0	8	0	7	0	0	0	0	0	15
1-16-90	1	0	32	0	8	0	0	0	0	0	41
TOTAL	7	18	167	17	121	26	0	0	0	0	356
%	1,97%	5,06%	46,91%	4,78%	33,99%	7,30%	0,00%	0,00%	0,00%	0,00%	100%

Tabla 25 Propiedades físicas y mecánicas para el estrato de relleno antrópico del perfil Geotécnico.
Fuente: (Osorio Sierra & Zuluaga Moreno, 2003)

RELLENO ANTROPICO (VALORES PROMEDIO)			
P.U.H (ton/m3)	c (kg/cm2)	φ (°)	SUCS
1,753	0,53	33,87	ML
			SM
1,837	0,22	34,24	MH
1,758	0,28	31,5	SM
	0,55	33,25	ML
1,751	0,605	33,68	MH
	0,29	37,41	ML
1,618	0,19	36,97	MH
1,732	0,39	30,41	ML
1,71	0,28	33,92	MH
1,711	0,64	28,9	MH-CH
1,674	0,38	34,41	MH
1,723	0,205	37,13	SM
1,804			ML
			MH
	0,22	40,98	SM
1,71			MH
			SM
1,75			CH-MH
	0,34	36,97	SM
1,779	0,26	36,55	SM
1,727	0,39	32,85	SM
1,488	0,33	33,42	MH
1,66	0,3	40,65	SM
1,809	0,37	37,18	SM
1,73	0,41	27,2	ML
	0,41	24,02	MH
1,78	0,36	31,2	ML
	0,3	39,35	SC
1,619	0,51	23,13	MH
	0,35	34,99	SM
			MH
	0,31	41,99	SM
1,67	0,47	29,81	MH
1,65	0,52	24,02	MH
1,772	0,23	41,12	SM
1,871	0,465	37,82	SM
1,754			ML
1,626			MH
1,687	0,83	28,94	MH
1,635	0,36	26,3	MH
1,082	0,255	34,8	ML
1,706			SM
1,584			MH
1,7	0,6	27,15	MH
	0,58	17,07	SM
			MH
1,652	0,62	34,77	SM
1,842	0,465	24,93	MH
1,408	0,21	39,95	MH
1,719	0,345	38,84	SM
1,609			ML
1,827	0,54	34,66	SM
1,743	0,66	26,83	MH
1,8			SM

4.4.2 Propiedades hidráulicas

Los valores de permeabilidad o conductividad hidráulica (k) asignados a los dos estratos que conforman el perfil geológico-geotécnico definido Tabla 17, se precisaron considerando lo siguiente:

- Al momento de recopilar la información para el desarrollo de esta tesis no se tuvieron disponibles resultados de ensayos de laboratorio de permeabilidad de los materiales que conforman el perfil geológico – geotécnico definido para los rellenos.
- Se consultó un estudio contratado por Corpocaldas en el cual se realizaron ensayos de permeabilidad en un relleno antrópico localizado en el área urbana de Manizales, diferente al sitio donde se localizaron los rellenos evaluados en esta tesis.

La Tabla 26 incluye los resultados de conductividad hidráulica o permeabilidad K_{sat} :

Tabla 26 Valores de conductividad hidráulica o permeabilidad K_{sat} (m/d). Fuente: Corpocaldas

CONTRATANTE:	CORPOCALDAS		
CONTRATISTA:	UNIVERSIDAD NACIONAL DE COLOMBIA SEDE MANIZALES		
PROYECTO:	GESTIÓN DEL RIESGO EN MANIZALES		
REALIZÓ:	GEOSUB - Hidrología Ambiental		
RESPONSABLE:	OSCAR CORREA CALLE		
CONTIENE:	CONDUCTIVIDAD HIDRÁULICA SATURADA DE RELLENOS - MANIZALES		
TIPO EVALUACIÓN:	SLUG/BAIL		
MÉTODO:	HVORSLEV		
	ID POZO	FECHA	K_{sat} (m/d)
	EST-01	08/07/2015	1.22E-02
	EST-02	08/07/2015	7.46E-02
	EST-03	10/07/2015	1.76E-02
	EST-04	10/07/2015	1.33E-02
	EST-05	08/07/2015	1.85E-02
	PAL-01	09/07/2015	3.10E-03
	PAL-04	09/07/2015	2.25E-03

	PAL-05	07/07/2015	5.91E-03
	PAL-06	07/07/2015	6.20E-03
	PAL-EST	10/07/2015	2.65E-02

El valor promedio de Ksat para este relleno antrópico es de 3.373 (m/día), equivalente a 3.904×10^{-05} (m/seg).

En este estudio de Corpocaldas no se realizaron ni presentaron valores de permeabilidad para el estrato de la Formación Casabianca.

- Se consultó la literatura y se extrajeron dos tablas, en las cuales exponen los valores de permeabilidad para los diferentes materiales de acuerdo con su textura y correspondiente clasificación SUCS:

Tabla 27 Valores de permeabilidad K. Fuente: (Bowles, 1997)

Tabla 2-3 Valores de permeabilidad K, basado en la descripción del suelo y por el sistema de clasificación unificado de suelos				
10^0	10^{-2}	10^{-5}	10^{-9}	10^{-11}
	Grava limpia GW,GP	Grava Limpia y arenas	Arenas- limos, Arenas	Arcillas

Tabla 28 Rangos de conductividad hidráulica. Fuente: (Das, 2007)

Tabla 1.9 Rangos de conductividad hidráulica para varios suelos	
Tipo de suelo	Conductividad hidráulica, k
Grava media a gruesa	$> 10^{-1}$
Arena fina a gruesa	10^{-1} a 10^{-3}
Arena fina, arena limosa	10^{-3} a 10^{-5}
Limo, Limo arcilloso, arcilla limosa	10^{-4} a 10^{-6}
Arcillas	$< 10^{-7}$

- La clasificación textural SUCS, representativa para el estrato de relleno antrópico es: SM, ML, MH. Esto de acuerdo con lo ilustrado en la Tabla 20 y la Tabla 25.

De este modo le corresponderían, a los rellenos antrópicos, valores de permeabilidad de 10^{-05} a 10^{-09} m/seg (Tabla 27) y 10^{-04} a 10^{-06} cm/seg (Tabla 28).

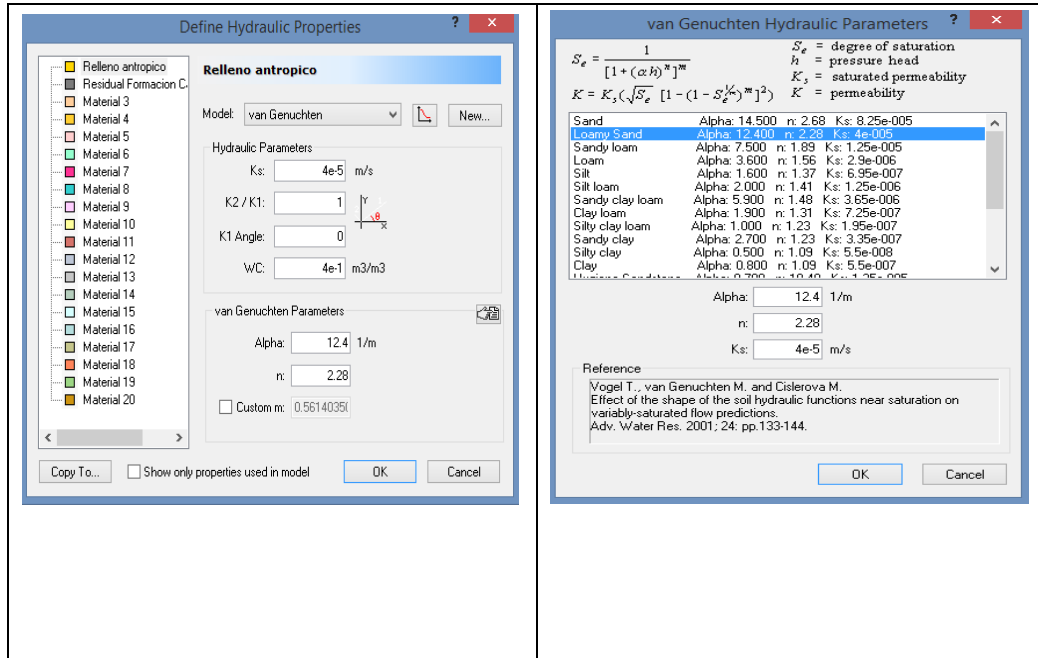
- La clasificación textural SUCS, representativa para el estrato de la Formación Casabianca es: CH y MH. Esto de acuerdo con lo ilustrado en la Tabla 24.

De este modo le corresponderían, a la Formación Casabianca, valores de permeabilidad de 10^{-09} a 10^{-11} m/seg (Tabla 27) y 10^{-07} cm/seg y menores (Tabla 28).

- Los valores de permeabilidad propuestos por Arango Gartner (2000), para los Rellenos Antrópicos, están entre **1.736×10^{-06} y 9.837×10^{-06} (m/seg)** y para la Formación Casabianca entre **2.314×10^{-06} y 5.787×10^{-07} (m/seg)**.
- También se consideraron los valores de permeabilidad predeterminados y asignados por el software Slide para las diferentes clasificaciones texturales de los suelos.

La Figura 61 ilustra los valores de permeabilidad (Ks) asignados a cada tipo de material, de acuerdo con su correspondiente clasificación textural:

Figura 61 Vista de asignación de valores de permeabilidad (Ks) para los diferentes tipos de materiales.
Fuente: Software Slide



Al cotejar los diferentes valores de permeabilidad, sugeridos por las fuentes consultadas y mencionadas en las anteriores consideraciones, permitieron definir unos únicos valores para cada uno de los dos estratos.

Se les asignaron los sugeridos por el software Slide. Esto porque, al compararlos con los demás considerados, se evidenció que se asemejaban y estaban en el mismo rango de valores.

Los valores se muestran en la Tabla 29:

Tabla 29 Valores de permeabilidad Ks (m/seg) para cada estrato del modelo relleno el Nevado

MATERIAL	Ks (m/seg)
RELLENO	4 e -005
RESIDUAL FORMACIÓN CASABIANCA	1,95 e -007

Se compararon los valores del peso unitario (γ), de la cohesión (c'), del ángulo de fricción (ϕ') y de la permeabilidad (Ks) definidos para los estratos Relleno Antrópico y Formación Casabianca, con los valores definidos e incluidos en las siguientes tablas por Arango Gartner (2000).

Esto con el fin de tener un punto de referencia para verificar los valores definidos en esta tesis.

Tabla 30 Rangos de valores de propiedades físicas y mecánicas típicos para materiales que componen rellenos (ARANGO GARTNER, 2000)

PARAMETRO GEOTECNICO	GRUPO 1	GRUPO 2
RELACIONES GRAVIMETRICAS Y VOLUMETRICAS		
Peso unitario húmedo (ton/m ³)	1.5– 2.0 (1.7)	1.5 – 1.7 (1.6)
Peso unitario seco (ton/m ³)	1.0 – 1.5 (1.2)	0.9 – 1.1 (1.0)
Humedad natural (%)	25 – 55 (40)	55 – 65 (60)
Grado de saturación (%)	70 – 90	90 – 100
Gravedad específica	2.59-2.85 (2.67)	2.59-2.85 (2.67)
Relación de vacíos	1.0 – 2.0	2.0 – 4.0
PROPIEDADES GRANULOMETRICAS Y DE PLASTICIDAD		
Porcentaje pasa tamiz No. 200 (%)	30 – 70 (50)	50 – 90 (70)
Límite líquido (%)	30 – 60 (45)	70 – 100 (80)
Límite plástico (%)	20 – 45 (35)	20 – 50
Indice plástico (%)	5 – 25 (15)	25 – 50
SUCS	SM, ML (MH,SP)	MH
PROPIEDADES DE RESISTENCIA AL CORTE Y FLUJO DE AGUA		
Cohesión efectiva (t/m ²)	1 – 5 (3.5)	4 – 6 (5)
Angulo de fricción interna efectivo (°)	25 – 40 (32)	24 – 29 (27)
Compresión inconfinaada (t/m ²)	3 – 15 (9.0)	8 – 15 (12)
Permeabilidad (cm/día)	15 – 85 (50)	2 – 15 (6)

Tabla 31 Rangos de valores de propiedades físicas y mecánicas típicos para materiales de la formación Casabianca (ARANGO GARTNER, 2000)

PARAMETRO	GRUPO 1	GRUPO 2	GRUPO 3
RELACIONES VOLUMETRICAS Y GRAVIMETRICAS			
Peso unitario húmedo (ton/m ³)	1.5 - 1.7	1.7 - 1.8	1.6 - 1.9
Peso unitario seco (ton/m ³)	0.9 - 1.1 (1.0)	1.1 - 1.4	0.9 - 1.4
Humedad natural (%)	55 - 65	30 - 80 (60)	30 - 70
Grado de saturación (%)	90 - 100	75 - 100	75 - 100
Gravedad específica	2.6 - 2.85	2.5 - 2.8	2.5 - 2.8
Relación de vacíos	> 2.0. Máximo: 4.0	1.0 - 1.3	0.8 - 1.0
PROPIEDADES GRANULOMETRICAS Y DE PLASTICIDAD			
Porc. Pasa el tamiz No. 200 (%)	50 - 100	40-75 (60-65)	5 - 50 (< 35)
Límite líquido (%)	70-100(80- 85)	30-70 (50 - 55)	N.P
Límite plástico (%)	20 - 55	25 - 40	N.P
Índice plástico (%)	25 - 50	9 - 30	N.P.
SUCS	MH	ML (SM, MH)	SM (SW)
PROPIEDADES DE RESISTENCIA AL CORTE Y DE FLUJO DE AGUA			
Cohesión efectiva (ton/m ²)	> 4 (6)	0.3 - 2.5 (1.5)	0 - 3
Ángulo de fricción interna efectivo (°)	24 - 30 (27)	28 - 32 (30)	30 - 35
Compresión inconfiada (ton/m ²)	8 - 15 (12)	0.5 - 10 (3)	1 - 9 (< 6)
Permeabilidad (cm/día)	< 20	< 20	< 5

Se encontraron similares los valores definidos en esta tesis (Tabla 18, Tabla 29) con los sugeridos por Arango Gartner (2000) en su estudio. Tal como se analiza a continuación:

- El peso unitario definido para el estrato de relleno, con valor de 16.48 kN/m³ está dentro del rango de 1.5-2.0 ton/m³.
- La cohesión definida para el estrato de relleno, con valor de 39.28 kN/m² está dentro del rango de 1-5 t/m².
- El ángulo de fricción interna del suelo definido para el relleno, con valor de 32.14° está dentro del rango 25°-40°.
- El peso unitario definido para la formación Casabianca, con valor de 15.74 kN/m³ está dentro del rango de 1.5-1.7 ton/m³.
- La cohesión definida para la formación Casabianca, con valor de 41.10 kN/m² está dentro del rango de valores mayores a 4 t/m².
- El ángulo de fricción interna del suelo definido para la formación Casabianca, con valor de 28.74° está dentro del rango 24°-30°.

4.5 Detonantes en la modelación

La estabilidad de los rellenos está influenciada, generalmente, por factores detonantes externos como lo son las lluvias y los sismos. Es por esto que para el análisis de estabilidad y el correspondiente cálculo del factor de seguridad (FS) de los rellenos, se definieron estos dos detonantes que “desestabilizarían o llevarían a la falla” a los mismos.

4.5.1 Detonante Lluvia

El detonante lluvia, en esta tesis, se representó por medio de una tasa de infiltración vertical, que a su vez, estuvo dada por valores de intensidades, medidas en unidades de milímetros por día (mm/día).

Para determinar los valores de estas intensidades, se tomaron los datos de los registros históricos de lluvia diaria (mm), de las estaciones pluviométricas ubicadas cerca de donde se localizan los rellenos.

Estas estaciones fueron: Estación el Carmen y Estación Hospital de Caldas, las cuales cuentan con registros de precipitación diaria (mm) desde el año 2005.

También se tomaron los datos del registro histórico de lluvia diaria (mm) de la Estación Agronomía, que aunque no es cerca de donde se localizan los rellenos, es la estación pluviométrica de la ciudad, que cuenta con mayor número de años de registro de las precipitaciones diarias, aproximadamente desde el año 1956.

La finalidad de utilizar los datos de la Estación Agronomía, fue revisar si existía alguna correlación de estos, con los datos de las estaciones el Carmen y Hospital de Caldas, que cuentan con información sólo desde el año 2012.

Y así poder extrapolar los datos de la Estación Agronomía y poder completar los datos de las estaciones El Carmen y Hospital y tener un mayor número de años de registro.

Figura 62 Relación de precipitación diaria (mm) entre estación pluviométrica Agronomía vs El Carmen
Fuente: propia

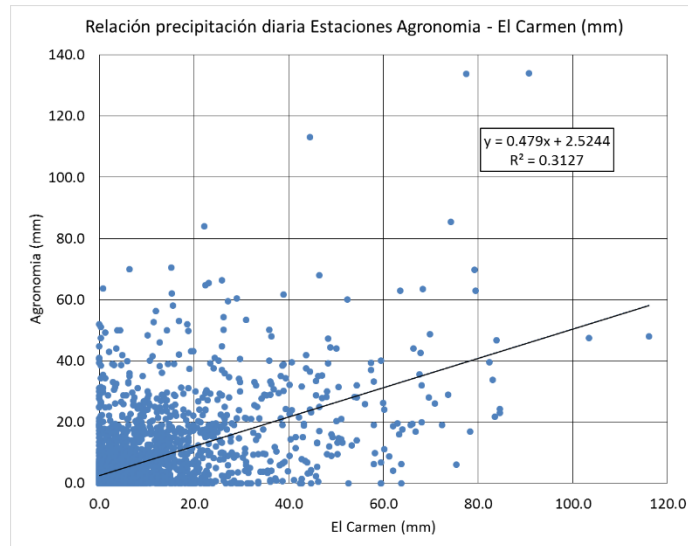
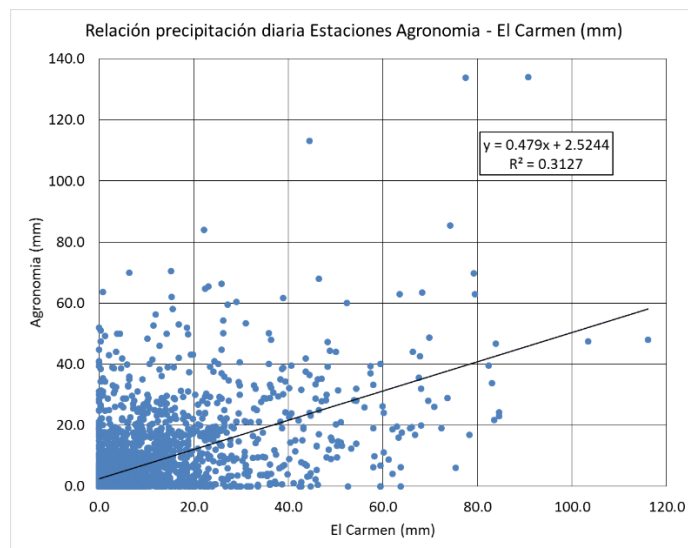


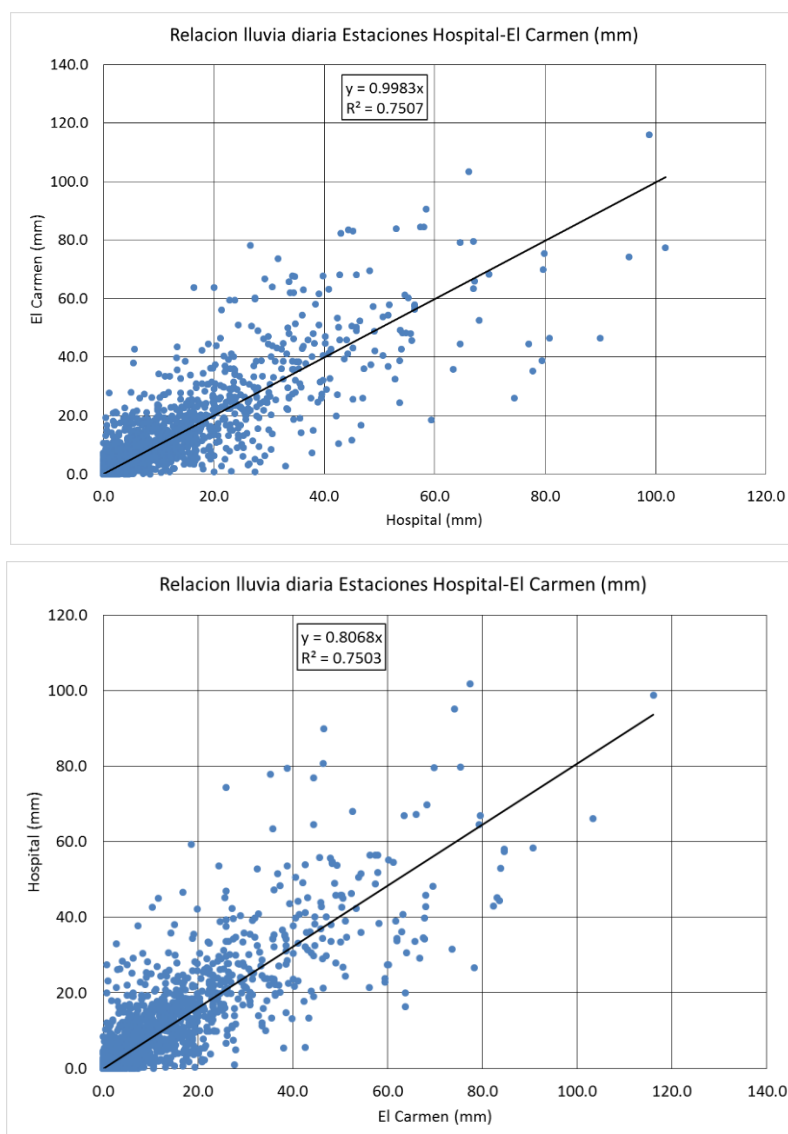
Figura 63 Relación de precipitación diaria (mm) entre estación pluviométrica Agronomía vs Hospital
Fuente: propia



Observando las gráficas (Figura 62 y Figura 63) se concluyó que no habían unas correlaciones confiables entre la Estación Agronomía y las estaciones El Carmen y Hospital de Caldas respectivamente.

Por lo tanto, se definió utilizar únicamente la información registrada en las estaciones El Carmen y Hospital de Caldas y determinar una posible correlación entre las mismas y así se poder hacer el llenado de datos faltantes en cada una de estas dos estaciones.

Figura 64 Relación de precipitación diaria (mm) entre estación pluviométrica El Carmen vs Hospital
Fuente: propia



Las gráficas de la Figura 64 mostraron valores de coeficientes de correlación $R^2 = 0.7503$ y 0.7507 . Este valor, cercano a 1, permitió concluir que existía una correlación confiable entre las dos estaciones, Carmen y Hospital.

Se hizo el llenado de datos para las estaciones El Carmen y Hospital.

Se eligió el registro de datos completo de la estación el Carmen para definir los valores de las intensidades (mm/día) que representaron la tasa de infiltración. Esto porque es la estación que está en donde se localizan los rellenos.

En consideración se utilizó un registro histórico de lluvias de 12 años. Tiempo desde que entró en funcionamiento la estación El Carmen, hasta cuando inició el desarrollo de esta tesis.

Se seleccionaron los valores de precipitación (mm) máximos acumulados de 1, 5, 10, 15, 20, 25, 30 días por cada año del registro, es decir del año 2005 al 2016. En la Tabla 32 se muestran dichos valores:

Tabla 32 Precipitaciones máximas acumuladas de periodos de 1, 5, 10, 15, 20, 25, 30 días de la serie de datos de la estación completa el Carmen. Fuente: propia

Año	Precipitación Máxima (mm) en acumulado 1 día	Precipitación Máxima (mm) en acumulado 5 días	Precipitación Máxima (mm) en acumulado 10 días	Precipitación Máxima (mm) en acumulado 15 días	Precipitación Máxima (mm) en acumulado 20 días	Precipitación Máxima (mm) en acumulado 25 días	Precipitación Máxima (mm) en acumulado 30 días
2005	149,86	197,36	306,58	330,2	376,68	427,96	493,52
2006	98,56	234,45	290,32	354,08	418,08	475,48	526,03
2007	72,39	189,74	277,62	375,16	492,5	561,84	632,97
2008	90,68	235,46	385,06	452,12	622,04	662,94	678,69
2009	103,38	167,39	268,99	311,15	340,11	401,07	448,06
2010	73,67	157,98	266,47	330,22	436,36	485,69	568,22
2011	74,17	207,78	269,79	381,53	499,65	551,49	661,21
2012	61,21	138,43	226,31	321,81	347,21	414,77	463,28
2013	116,08	253,74	364,24	458,22	475,74	520,19	601,48
2014	50,04	115,31	181,36	235,97	273,81	296,16	319,78
2015	83,56	208,53	267,97	311,40	362,71	402,08	437,39
2016	67,81	103,38	137,66	185,42	196,46	198,62	279,65
media aritmetica (\bar{X})	86,78	184,13	270,20	337,27	403,45	449,86	509,19
Desviacion estandar S_x	27,27	48,32	68,24	77,76	113,09	123,68	127,66

A partir de los datos de la Tabla 32 se calcularon los valores de las precipitaciones proyectadas para cada uno de los periodos de retorno considerados en esta tesis (Tr: 2.33, 10, 50, 100, 250 años), correspondientes con los diferentes periodos de lluvias acumuladas (1, 5, 10, 15, 20, 25, 30 días). Esto se presenta en la Tabla 33.

Esto se realizó por medio de una distribución de Gumbel, ya que es bastante utilizada para las variables precipitaciones y caudales por su ajuste a valores extremos.

Tabla 33 Precipitaciones (mm) proyectadas para los diferentes periodos de retorno Tr correspondientes con los diferentes periodos de lluvias acumuladas. Fuente: Propia

	precipitacion (mm)	precipitacion (mm)	precipitacion (mm)	precipitacion (mm)	precipitacion (mm)	precipitacion (mm)	precipitacion (mm)
	1	5	10	15	20	25	30
Tr: 2.33 años	88,87	187,82	275,41	343,21	412,08	459,30	518,94
Tr: 10 años	135,23	269,97	391,43	475,41	604,36	669,59	735,98
Tr: 50 años	181,03	351,13	506,05	606,01	794,31	877,33	950,39
Tr: 100 años	200,39	385,44	554,51	661,22	874,62	965,16	1041,04
Tr: 250 años	225,88	430,62	618,31	733,92	980,35	1080,79	1160,38

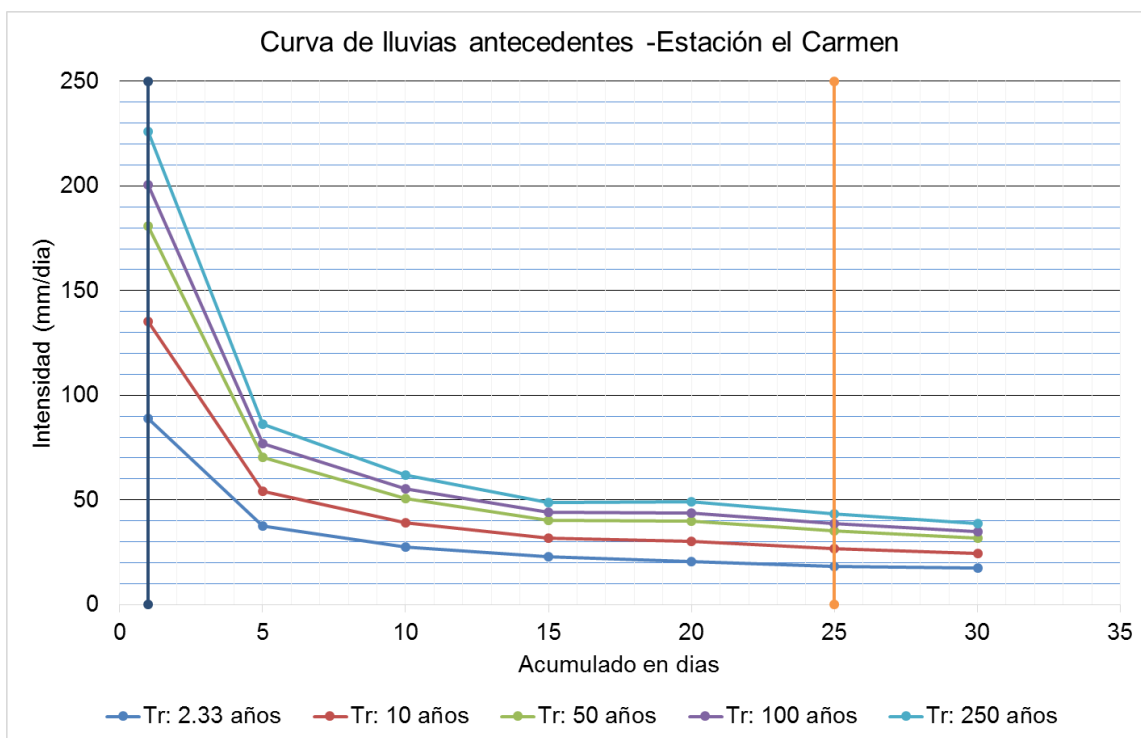
De los datos de la Tabla 33 se calcularon los valores de las intensidades proyectadas para cada uno de los periodos de retorno considerados en esta tesis (Tr: 2.33, 10, 50, 100, 250 años), correspondientes con los diferentes periodos de lluvias acumuladas (1, 5, 10, 15, 20, 25, 30 días). Esto se presenta en la Tabla 34.

Tabla 34 Intensidades (mm/día) proyectadas para los diferentes periodos de retorno Tr correspondientes con los diferentes periodos de lluvias acumuladas. Fuente: Propia

Duracion	Intensidad (mm/dia)	Intensidad (mm/dia)	Intensidad (mm/dia)	Intensidad (mm/dia)	Intensidad (mm/dia)	Intensidad (mm/dia)	Intensidad (mm/dia)
	1	5	10	15	20	25	30
Tr: 2.33 años	88,87	37,56	27,54	22,88	20,60	18,37	17,30
Tr: 10 años	135,23	53,99	39,14	31,69	30,22	26,78	24,53
Tr: 50 años	181,03	70,23	50,61	40,40	39,72	35,09	31,68
Tr: 100 años	200,39	77,09	55,45	44,08	43,73	38,61	34,70
Tr: 250 años	225,88	86,12	61,83	48,93	49,02	43,23	38,68

Las intensidades de la Tabla 34 fueron representadas en el siguiente gráfico:

Figura 65 Curvas IDF para la estación El Carmen. Fuente: propia



Los valores de las intensidades de la Tabla 34, constituyeron una parte de la tasa de infiltración vertical que se definió como el detonante lluvia, para todos los rellenos en sus diferentes escenarios de análisis.

La otra parte de la tasa de infiltración vertical fue constituida por las lluvias diarias promedio por mes. Esto para cada año del registro de la estación El Carmen. Se muestran los valores en la Tabla 35:

Tabla 35 Precipitaciones (mm) diarias promedio por mes para cada año del registro histórico de la estación el Carmen. Fuente: Propia

Precipitación promedio diaria (mm)													Promedio	Maximo
	Enero	Febrero	Marzo	Abril	Mayo	Junio	Julio	Agosto	Septiembre	Octubre	Noviembre	Diciembre		
2005		2.3	8.9	6.3	9.2	11.0	2.8	4.0	5.1	10.9	15.0	6.4	7.4	15.0
2006	12.3	5.1	8.7	12.6	5.9	7.6	1.8	2.8	5.9	15.1	6.5	9.5	7.8	15.1
2007	5.6	2.6	7.7	9.4	10.6	3.4	3.2	4.0	5.4	19.9	13.0	10.0	7.9	19.9
2008	8.9	7.7	14.1	10.3	17.8	7.1	5.2	10.2	5.4	7.0	22.6	12.7	10.7	22.6
2009	7.5	7.7	9.0	6.6	5.3	9.2	1.0	3.0	2.6	10.2	9.6	5.2	6.4	10.2
2010	1.2	1.9	3.7	8.8	7.7	8.4	8.4	7.1	8.5	14.1	15.4	13.2	8.2	15.4
2011	3.2	12.3	10.4	10.3	6.1	4.4	5.0	4.7	8.2	14.1	19.7	9.4	9.0	19.7
2012	3.2	5.1	4.8	13.0	7.3	5.1	2.5	4.9	2.5	10.2	6.3	3.2	5.7	13.0
2013	1.5	14.5	9.3	3.9	6.7	4.4	2.4	3.0	6.5	4.1	18.6	6.2	6.8	18.6
2014	4.5	6.6	7.4	3.8	7.0	2.3	0.8	3.4	4.0	4.5	8.6	4.4	4.8	8.6
2015	1.5	4.7	14.2	6.1	3.2	0.6	2.0	2.2	2.2	7.4	4.0	0.8	4.1	14.2
2016	0.7	2.9	5.5	5.3	6.1	1.7	2.3	3.2	4.6				3.6	6.1
Promedio	4.6	6.1	8.6	8.0	7.8	5.4	3.1	4.4	5.1	10.7	12.7	7.4		
Maximo	12.3	14.5	14.2	13.0	17.8	11.0	8.4	10.2	8.5	19.9	22.6	13.2		

La tasa de infiltración vertical que se le ingresó a los rellenos, se definió con el propósito de representar dos momentos:

El antes: Se asumió que los rellenos estaban parcialmente saturados antes de que se infiltrara el volumen de agua correspondiente a las lluvias acumuladas de 25 días (A_{25}).

Por lo tanto, los rellenos tienen un contenido volumétrico de agua (m^3/m^3) en su masa de suelo.

Este contenido volumétrico correspondió a una tasa de infiltración para 365 días, la cual se definió a partir de los valores de precipitaciones promedio diarias por mes de la Tabla 35.

La fecha que se definió como el día 365, momento en el que los rellenos estaban parcialmente saturados, pero aun no les había ingresado las lluvias detonantes, fue el 15 de Marzo de 2011.

Se determinó esta fecha por que está directamente relacionada con el mes en que más han ocurrido eventos de deslizamientos, de acuerdo con la Tabla 10.

El después: A partir de la condición anterior, se les ingresó a los rellenos un contenido volumétrico de agua (m^3/m^3) correspondiente a la intensidad de las lluvias acumuladas de 25 días (A_{25}), aplicando el principio de Terlien (1997).

Adicionalmente, también se les ingresó otro contenido volumétrico de agua (m^3/m^3) correspondiente a la intensidad de las lluvias acumuladas de 1 días (A_1), simulando el “aguacero evento”.

La sumatoria de estas dos intensidades (mm/día) representó el valor de la infiltración vertical correspondiente al detonante lluvias.

Tabla 36 Intensidad de lluvias antecedentes de 25 días (mm/día) y aguacero evento (mm) por cada periodo de retorno Tr

Tr (años)	A ₂₅ (mm/día)	Evento A ₁ (mm/día)
2.33	18.37	88.87
10	26.78	135.23
50	35.09	181.03
100	38.61	200.39
250	43.23	225.88

Ejemplo:

Ilustración de la tasa de infiltración vertical del detonante lluvia, proyectada para un periodo de retorno Tr: 50años.

- 1- Con el fin de simular el estado inicial del relleno (15 marzo 2011), se tomaron los valores de las lluvias promedio diarias (mm) para cada mes de un año (365 días) anterior al 15 de Marzo de 2011. (Tabla 35).

Por lo tanto se le asignaron los siguientes valores de precipitación (mm) para todos los días de cada mes del mencionado año:

Marzo 2010 (3.7mm); Abril 2010 (8.8mm); Mayo 2010 (7.7mm); Junio 2010 (8.4mm); Julio 2010 (8.4mm); Agosto 2010 (7.1mm); Septiembre 2010 (8.5mm);

Octubre 2010 (14.1mm); Noviembre 2010 (15.4mm); Diciembre 2010 (13.2mm); Enero 2011 (3.2mm); Febrero 2011 (12.3mm); Marzo 2011 (10.4mm).

- 2- A partir del 15 de marzo de 2011, en aras de definir una parte o proporción de la lluvia detonante se ingresaron a los rellenos, la intensidad de la lluvia acumulada de 25 días proyectada para un periodo de retorno Tr : 50 años.

De acuerdo con la Tabla 36, la intensidad fue 35.09 mm/día.

- 3- Por último se le ingresaron a los rellenos, la otra parte o proporción de la lluvia detonante. Esta, está representada por un “aguacero evento” de un solo día, proyectado para un periodo de retorno de Tr : 50 años.

De acuerdo con la Tabla 36, la intensidad fue 181 mm/día.

Este ejemplo se ilustra en la Tabla 37.

De la misma manera se determinan las tasas de infiltración vertical para los otros periodos de retorno.

Tabla 37 Ejemplo de los valores de intensidades que se le ingresaron a un relleno (Tr: 50 años). Incluye lluvias condición inicial de 365 días + lluvias detonantes (25 días A₂₅ + aguacero evento A₁). El procedimiento para su cálculo se presenta en el texto.

Día	Fecha	Precip (mm)	Día	Fecha	Precip (mm)	Día	Fecha	Precip (mm)
1	16/03/2010	3,7	51	05/05/2010	7,7	101	24/06/2010	8,4
2	17/03/2010	3,7	52	06/05/2010	7,7	102	25/06/2010	8,4
3	18/03/2010	3,7	53	07/05/2010	7,7	103	26/06/2010	8,4
4	19/03/2010	3,7	54	08/05/2010	7,7	104	27/06/2010	8,4
5	20/03/2010	3,7	55	09/05/2010	7,7	105	28/06/2010	8,4
6	21/03/2010	3,7	56	10/05/2010	7,7	106	29/06/2010	8,4
7	22/03/2010	3,7	57	11/05/2010	7,7	107	30/06/2010	8,4
8	23/03/2010	3,7	58	12/05/2010	7,7	108	01/07/2010	8,4
9	24/03/2010	3,7	59	13/05/2010	7,7	109	02/07/2010	8,4
10	25/03/2010	3,7	60	14/05/2010	7,7	110	03/07/2010	8,4
11	26/03/2010	3,7	61	15/05/2010	7,7	111	04/07/2010	8,4
12	27/03/2010	3,7	62	16/05/2010	7,7	112	05/07/2010	8,4
13	28/03/2010	3,7	63	17/05/2010	7,7	113	06/07/2010	8,4
14	29/03/2010	3,7	64	18/05/2010	7,7	114	07/07/2010	8,4
15	30/03/2010	3,7	65	19/05/2010	7,7	115	08/07/2010	8,4
16	31/03/2010	3,7	66	20/05/2010	7,7	116	09/07/2010	8,4
17	01/04/2010	8,8	67	21/05/2010	7,7	117	10/07/2010	8,4
18	02/04/2010	8,8	68	22/05/2010	7,7	118	11/07/2010	8,4
19	03/04/2010	8,8	69	23/05/2010	7,7	119	12/07/2010	8,4
20	04/04/2010	8,8	70	24/05/2010	7,7	120	13/07/2010	8,4
21	05/04/2010	8,8	71	25/05/2010	7,7	121	14/07/2010	8,4
22	06/04/2010	8,8	72	26/05/2010	7,7	122	15/07/2010	8,4
23	07/04/2010	8,8	73	27/05/2010	7,7	123	16/07/2010	8,4
24	08/04/2010	8,8	74	28/05/2010	7,7	124	17/07/2010	8,4
25	09/04/2010	8,8	75	29/05/2010	7,7	125	18/07/2010	8,4
26	10/04/2010	8,8	76	30/05/2010	7,7	126	19/07/2010	8,4
27	11/04/2010	8,8	77	31/05/2010	7,7	127	20/07/2010	8,4
28	12/04/2010	8,8	78	01/06/2010	8,4	128	21/07/2010	8,4
29	13/04/2010	8,8	79	02/06/2010	8,4	129	22/07/2010	8,4
30	14/04/2010	8,8	80	03/06/2010	8,4	130	23/07/2010	8,4
31	15/04/2010	8,8	81	04/06/2010	8,4	131	24/07/2010	8,4
32	16/04/2010	8,8	82	05/06/2010	8,4	132	25/07/2010	8,4
33	17/04/2010	8,8	83	06/06/2010	8,4	133	26/07/2010	8,4
34	18/04/2010	8,8	84	07/06/2010	8,4	134	27/07/2010	8,4
35	19/04/2010	8,8	85	08/06/2010	8,4	135	28/07/2010	8,4
36	20/04/2010	8,8	86	09/06/2010	8,4	136	29/07/2010	8,4
37	21/04/2010	8,8	87	10/06/2010	8,4	137	30/07/2010	8,4
38	22/04/2010	8,8	88	11/06/2010	8,4	138	31/07/2010	8,4
39	23/04/2010	8,8	89	12/06/2010	8,4	139	01/08/2010	7,1
40	24/04/2010	8,8	90	13/06/2010	8,4	140	02/08/2010	7,1
41	25/04/2010	8,8	91	14/06/2010	8,4	141	03/08/2010	7,1
42	26/04/2010	8,8	92	15/06/2010	8,4	142	04/08/2010	7,1
43	27/04/2010	8,8	93	16/06/2010	8,4	143	05/08/2010	7,1
44	28/04/2010	8,8	94	17/06/2010	8,4	144	06/08/2010	7,1
45	29/04/2010	8,8	95	18/06/2010	8,4	145	07/08/2010	7,1
46	30/04/2010	8,8	96	19/06/2010	8,4	146	08/08/2010	7,1
47	01/05/2010	7,7	97	20/06/2010	8,4	147	09/08/2010	7,1
48	02/05/2010	7,7	98	21/06/2010	8,4	148	10/08/2010	7,1
49	03/05/2010	7,7	99	22/06/2010	8,4	149	11/08/2010	7,1
50	04/05/2010	7,7	100	23/06/2010	8,4	150	12/08/2010	7,1

Dia	Fecha	Precip (mm)	Dia	Fecha	Precip (mm)	Dia	Fecha	Precip (mm)
151	13/08/2010	7,1	201	02/10/2010	14,1	251	21/11/2010	15,4
152	14/08/2010	7,1	202	03/10/2010	14,1	252	22/11/2010	15,4
153	15/08/2010	7,1	203	04/10/2010	14,1	253	23/11/2010	15,4
154	16/08/2010	7,1	204	05/10/2010	14,1	254	24/11/2010	15,4
155	17/08/2010	7,1	205	06/10/2010	14,1	255	25/11/2010	15,4
156	18/08/2010	7,1	206	07/10/2010	14,1	256	26/11/2010	15,4
157	19/08/2010	7,1	207	08/10/2010	14,1	257	27/11/2010	15,4
158	20/08/2010	7,1	208	09/10/2010	14,1	258	28/11/2010	15,4
159	21/08/2010	7,1	209	10/10/2010	14,1	259	29/11/2010	15,4
160	22/08/2010	7,1	210	11/10/2010	14,1	260	30/11/2010	15,4
161	23/08/2010	7,1	211	12/10/2010	14,1	261	01/12/2010	13,2
162	24/08/2010	7,1	212	13/10/2010	14,1	262	02/12/2010	13,2
163	25/08/2010	7,1	213	14/10/2010	14,1	263	03/12/2010	13,2
164	26/08/2010	7,1	214	15/10/2010	14,1	264	04/12/2010	13,2
165	27/08/2010	7,1	215	16/10/2010	14,1	265	05/12/2010	13,2
166	28/08/2010	7,1	216	17/10/2010	14,1	266	06/12/2010	13,2
167	29/08/2010	7,1	217	18/10/2010	14,1	267	07/12/2010	13,2
168	30/08/2010	7,1	218	19/10/2010	14,1	268	08/12/2010	13,2
169	31/08/2010	7,1	219	20/10/2010	14,1	269	09/12/2010	13,2
170	01/09/2010	8,5	220	21/10/2010	14,1	270	10/12/2010	13,2
171	02/09/2010	8,5	221	22/10/2010	14,1	271	11/12/2010	13,2
172	03/09/2010	8,5	222	23/10/2010	14,1	272	12/12/2010	13,2
173	04/09/2010	8,5	223	24/10/2010	14,1	273	13/12/2010	13,2
174	05/09/2010	8,5	224	25/10/2010	14,1	274	14/12/2010	13,2
175	06/09/2010	8,5	225	26/10/2010	14,1	275	15/12/2010	13,2
176	07/09/2010	8,5	226	27/10/2010	14,1	276	16/12/2010	13,2
177	08/09/2010	8,5	227	28/10/2010	14,1	277	17/12/2010	13,2
178	09/09/2010	8,5	228	29/10/2010	14,1	278	18/12/2010	13,2
179	10/09/2010	8,5	229	30/10/2010	14,1	279	19/12/2010	13,2
180	11/09/2010	8,5	230	31/10/2010	14,1	280	20/12/2010	13,2
181	12/09/2010	8,5	231	01/11/2010	15,4	281	21/12/2010	13,2
182	13/09/2010	8,5	232	02/11/2010	15,4	282	22/12/2010	13,2
183	14/09/2010	8,5	233	03/11/2010	15,4	283	23/12/2010	13,2
184	15/09/2010	8,5	234	04/11/2010	15,4	284	24/12/2010	13,2
185	16/09/2010	8,5	235	05/11/2010	15,4	285	25/12/2010	13,2
186	17/09/2010	8,5	236	06/11/2010	15,4	286	26/12/2010	13,2
187	18/09/2010	8,5	237	07/11/2010	15,4	287	27/12/2010	13,2
188	19/09/2010	8,5	238	08/11/2010	15,4	288	28/12/2010	13,2
189	20/09/2010	8,5	239	09/11/2010	15,4	289	29/12/2010	13,2
190	21/09/2010	8,5	240	10/11/2010	15,4	290	30/12/2010	13,2
191	22/09/2010	8,5	241	11/11/2010	15,4	291	31/12/2010	13,2
192	23/09/2010	8,5	242	12/11/2010	15,4	292	01/01/2011	3,2
193	24/09/2010	8,5	243	13/11/2010	15,4	293	02/01/2011	3,2
194	25/09/2010	8,5	244	14/11/2010	15,4	294	03/01/2011	3,2
195	26/09/2010	8,5	245	15/11/2010	15,4	295	04/01/2011	3,2
196	27/09/2010	8,5	246	16/11/2010	15,4	296	05/01/2011	3,2
197	28/09/2010	8,5	247	17/11/2010	15,4	297	06/01/2011	3,2
198	29/09/2010	8,5	248	18/11/2010	15,4	298	07/01/2011	3,2
199	30/09/2010	8,5	249	19/11/2010	15,4	299	08/01/2011	3,2
200	01/10/2010	14,1	250	20/11/2010	15,4	300	09/01/2011	3,2

Dia	Fecha	Precip (mm)	Dia	Fecha	Precip (mm)
301	10/01/2011	3,2	351	01/03/2011	10,4
302	11/01/2011	3,2	352	02/03/2011	10,4
303	12/01/2011	3,2	353	03/03/2011	10,4
304	13/01/2011	3,2	354	04/03/2011	10,4
305	14/01/2011	3,2	355	05/03/2011	10,4
306	15/01/2011	3,2	356	06/03/2011	10,4
307	16/01/2011	3,2	357	07/03/2011	10,4
308	17/01/2011	3,2	358	08/03/2011	10,4
309	18/01/2011	3,2	359	09/03/2011	10,4
310	19/01/2011	3,2	360	10/03/2011	10,4
311	20/01/2011	3,2	361	11/03/2011	10,4
312	21/01/2011	3,2	362	12/03/2011	10,4
313	22/01/2011	3,2	363	13/03/2011	10,4
314	23/01/2011	3,2	364	14/03/2011	10,4
315	24/01/2011	3,2	365	15/03/2011	10,4
316	25/01/2011	3,2	366	16/03/2011	35,09
317	26/01/2011	3,2	367	17/03/2011	35,09
318	27/01/2011	3,2	368	18/03/2011	35,09
319	28/01/2011	3,2	369	19/03/2011	35,09
320	29/01/2011	3,2	370	20/03/2011	35,09
321	30/01/2011	3,2	371	21/03/2011	35,09
322	31/01/2011	3,2	372	22/03/2011	35,09
323	01/02/2011	12,3	373	23/03/2011	35,09
324	02/02/2011	12,3	374	24/03/2011	35,09
325	03/02/2011	12,3	375	25/03/2011	35,09
326	04/02/2011	12,3	376	26/03/2011	35,09
327	05/02/2011	12,3	377	27/03/2011	35,09
328	06/02/2011	12,3	378	28/03/2011	35,09
329	07/02/2011	12,3	379	29/03/2011	35,09
330	08/02/2011	12,3	380	30/03/2011	35,09
331	09/02/2011	12,3	381	31/03/2011	35,09
332	10/02/2011	12,3	382	01/04/2011	35,09
333	11/02/2011	12,3	383	02/04/2011	35,09
334	12/02/2011	12,3	384	03/04/2011	35,09
335	13/02/2011	12,3	385	04/04/2011	35,09
336	14/02/2011	12,3	386	05/04/2011	35,09
337	15/02/2011	12,3	387	06/04/2011	35,09
338	16/02/2011	12,3	388	07/04/2011	35,09
339	17/02/2011	12,3	389	08/04/2011	35,09
340	18/02/2011	12,3	390	09/04/2011	35,09
341	19/02/2011	12,3	391	10/04/2011	181,03
342	20/02/2011	12,3			
343	21/02/2011	12,3			
344	22/02/2011	12,3			
345	23/02/2011	12,3			
346	24/02/2011	12,3			
347	25/02/2011	12,3			
348	26/02/2011	12,3			
349	27/02/2011	12,3			
350	28/02/2011	12,3			

4.5.2 Detonante sismo

Se consideró el sismo o la aceleración sísmica como un detonante en la estabilidad de los rellenos evaluados en esta tesis. Dichas aceleraciones correspondientes a cada uno de los periodos de retorno mencionados en la NSR-10, es decir Tr: 31 años, Tr: 225 años y Tr: 475 años.

Se consultó la microzonificación sísmica para la ciudad de Manizales realizada por la universidad de los Andes en el año 2002, con el fin de revisar el mapa y las curvas de amenaza sísmica, y definir la aceleración sísmica a partir de la tasa de excedencia para cada periodo de retorno.

En vista que no se tenía, para Manizales un mapa o curvas de amenaza sísmica actualizada, con fecha superior a la NSR-10, se definió trabajar con la curva de amenaza sísmica para Manizales incluida en el estudio general de amenaza sísmica de Colombia año 2009, realizado por la asociación colombiana de ingeniería sísmica.

El estudio de la Asociación Colombiana de Ingeniería Sísmica (2009) define la probabilidad de excedencia, como la probabilidad de que un nivel específico de amenaza o riesgo sísmico sea excedido en un lugar o región durante un lapso determinado.

Igualmente se menciona lo siguiente:

“El sismo de diseño se encuentra establecido para que el nivel de la amenaza tenga una probabilidad de excedencia del 10% en una vida útil de la estructura de 50 años; el sismo de seguridad limitada tiene asociada una probabilidad de excedencia del 20% en 50 años; y el sismo de umbral de daño tiene una probabilidad de excedencia del 80% en 50 años (Asociación Colombiana de Ingeniería Sísmica- AIS, 2009)”

La probabilidad de excedencia está relacionada con el periodo de retorno de acuerdo con la siguiente expresión:

$$\bar{T} = \frac{1}{q}$$

La probabilidad de que se tenga como mínimo un evento que tenga una aceleración mayor o igual a a_0 (aceleración horizontal de terreno), se puede expresar así (Asociación Colombiana de Ingeniería Sísmica- AIS, 2009):

$$q_0 = 1 - \left(1 - \frac{1}{\bar{T}}\right)^t$$

Donde t es el tiempo de exposición.

De la anterior expresión se despejó el periodo de retorno T, teniendo en cuenta la probabilidad de excedencia y el tiempo de exposición y se obtuvieron los siguientes periodos de retorno:

Sismo de seguridad limitada: $q_0=0.20$ y $t= 50$ años ----- $T= 225$ años

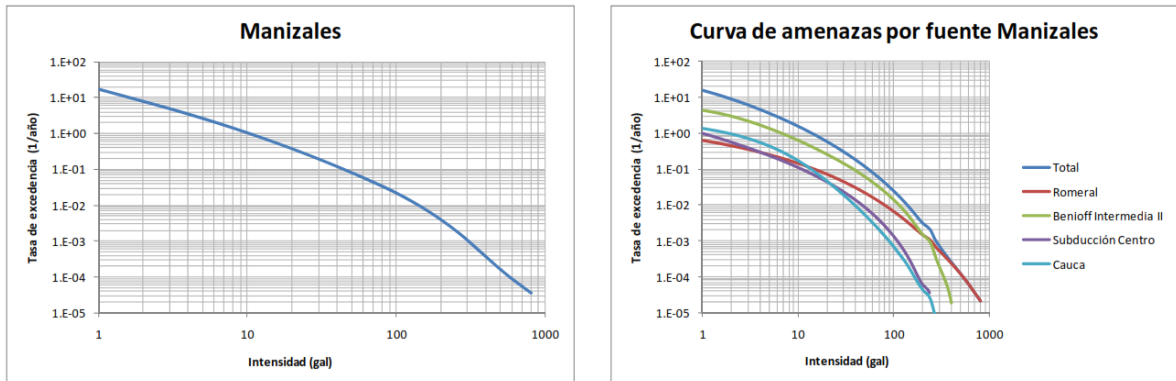
Sismo de diseño: $q_0=0.10$ y $t= 50$ años ----- $T= 475$ años

Sismo de umbral de daño: $q_0=0.80$ y $t= 50$ años ----- $T= 31$ años

Definidos los periodos de retorno T y extrayendo las curvas de amenaza para la ciudad de Manizales del estudio de la Asociación Colombiana de Ingeniería Sísmica (2009), se calculó la tasa de excedencia para cada periodo de retorno.

Dichas curvas se ilustran a continuación:

Figura 66 Curvas de amenaza aceleración máxima del terreno para Manizales. Fuente (Asociación Colombiana de Ingeniería Sísmica- AIS, 2009)



La está dada por: Tasa de excedencia=1/año

Para 475 años: $1/475 = 0.0021$, con este valor se ingresó en las ordenadas de la gráfica de la izquierda de Figura 66, se interceptó la curva azul y se leyó en las abscisas, la intensidad en gales, 250 gales, es decir **0.25g**.

Igualmente se hizo para los otros dos periodos de retorno:

Para 225 años: $1/225 = 0.0044$ equivale en la gráfica a 190 gales, es decir **0.19g**.

Para 31 años: $1/31 = 0.0322$, equivale en la gráfica a 85 gales, es decir **0.085g**.

Con las anteriores aceleraciones sísmicas definidas y con las siguientes consideraciones, se calcularon las aceleraciones máximas:

- Amenaza sísmica para Manizales: **ALTA** (Tabla A.2.3-2 NSR-10)
- Perfil del suelo: **Tipo D** de acuerdo a tabla A.2.4-1 NSR-10 100 kPa (1 kg/cm²) > Su > 50 kPa (0.5 kg/cm²).
- Coeficiente Fa, para la zona de periodos cortos del espectro de acuerdo con tabla A.2.4-3 de NSR-10:
Para 0.25, **Fa=1.3**

Para 0.19, **Fa= 1.42**

Para 0.085, **Fa=1.6**

- Coeficiente Fv, para la zona de periodos intermedios del espectro de acuerdo a tabla A.2.4-4 de NSR-10:

Para 0.25, **Fv=1.9**

Para 0.19, **Fv= 2.04**

Para 0.085, **Fv=2.4**

- Grupo de uso: I Coeficiente de importancia: **1** (estructuras de ocupación normal Tabla A.2.5-1 NSR-10).

- De acuerdo con el numeral H.5.2.5, en el caso de análisis y diseño de taludes por métodos pseudoestaticos, se estableció un valor de KST/a_{max} igual a 0.80 según tabla H.5.2-1.

Para 0.25, $KST= 0.80*0.25*1.3*1=$ **0.26**

Para 0.19, $KST= 0.80*0.19*1.42*1=$ **0.215**

Para 0.085, $KST= 0.80*0.085*1.6*1=$ **0.108**

Considerando lo anterior, el detonante sismo fue representado por las siguientes aceleraciones máximas correspondientes a cada periodo de retorno:

	Componente horizontal:	Componente vertical:
Para Tr: 475años	0.260g	0.0260g
Para Tr: 225años	0.215g	0.0215g
Para Tr 31años	0.108g	0.0108g

4.6 Escenarios de análisis

Los escenarios de análisis definidos para cada relleno, resultaron de todas las posibles combinaciones de las 5 variables mostradas en la Tabla 2 y descritas en la metodología de esta tesis:

Variable	# Casos	Caso
Peso unitario (γ)	1	
Cohesión (c')	2	$c' + \sigma$
		$c' - \sigma$
Angulo Fricción (ϕ')	2	$\phi' + \sigma$
		$\phi' - \sigma$
Detonante lluvia (mm/día)	5	Tr: 2,33 años
		Tr: 10 años
		Tr: 50 años
		Tr: 100 años
		Tr: 250 años
Detonante sismo (g)	4	Tr: 31 años
		Tr: 225 años
		Tr: 475 años
		Sin sismo
# Escenarios por relleno		80

El perfil geológico geotécnico definido para los rellenos e ilustrado en la Tabla 17, se constituyó por dos estratos con sus respectivas propiedades mecánicas (c' , ϕ') y físicas (γ). Los valores de estas propiedades se pueden ver en la Tabla 18:

MATERIAL	P.U.H (kN/m ³)	c (kN/m ²)	Desviacion Estandar (σ)	ϕ (°)	Desviacion Estandar (σ)
RELLENO	16.480	39.28	15.25	32.14	5.17
RESIDUAL FORMACIÓN CASABIANCA	15.740	41.10	5.67	28.74	2.27

El detonante lluvia se definió por una intensidad (mm/día), proyectada para los diferentes periodos de retorno. Se presentó en la Tabla 36:

Tr (años)	A ₂₅ (mm/día)	Evento A ₁ (mm/día)
2.33	18.37	88.87
10	26.78	135.23
50	35.09	181.03
100	38.61	200.39
250	43.23	225.88

El detonante sismo se definió como unas aceleraciones máximas para cada periodo de retorno, así:

	Componente horizontal:	Componente vertical:
Para Tr: 475años	0.260g	0.0260g
Para Tr: 225años	0.215g	0.0215g
Para Tr 31años	0.108g	0.0108g

4.7 Codificación escenarios

Se codificaron todos los escenarios posibles por relleno. Esto se realizó ya que resultaron 960 archivos correspondientes a los 960 escenarios de análisis.

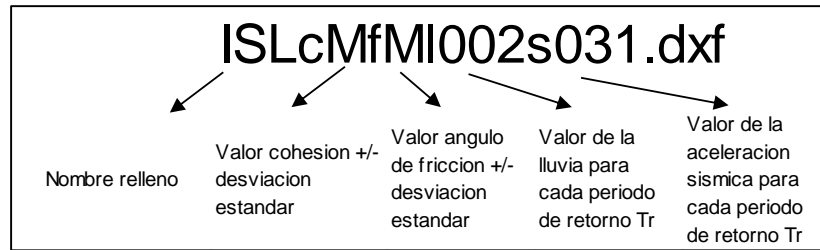
Lo anterior para una fácil identificación y realización del análisis de los resultados.

La codificación se realizó generando un código alfanumérico, en el cual las letras y números representan lo siguiente:

- El nombre del relleno.
- El valor de la variable cohesión (c') y del ángulo de fricción del suelo (ϕ'), más o menos (+/-) su correspondiente desviación estándar.
- El valor intensidad de la lluvia detonante lluvia (L) para cada uno de los periodos de retorno analizados.
- El valor de la aceleración sísmica (S) para cada uno de los periodos de retorno analizados.

La Figura 67 ilustra un ejemplo de cómo se visualizaría un código:

Figura 67 Esquema de codificación de cada escenario por relleno. Fuente: propia



Las letras que acompañan la c (cohesión) y la f (fricción), es decir para este ejemplo M y M respectivamente, significan el valor de la variable, +/- su respectiva desviación estándar, entonces se define lo siguiente:

“M”: Minus (Negativo)

“P”: Plus (Positivo)

Cabe anotar que los escenarios en los que se hace el análisis sin sismo, no apareció, en el código, la letra S, ni los números que representan su respectivo el periodo de retorno.

La Tabla 38 presenta las letras que identifican cada uno de los 12 rellenos a los que se les evaluara la amenaza por deslizamiento:

Tabla 38 Identificación ID de los 12 rellenos seleccionados

No RELLENO	NOMBRE RELLENO	ID
10	La Isla	ISL
15	El Nevado	NEV
20	Alamos	ALM
21	El Palmar	PLM
22	Alamos-Velez	AVL
23	Camino del Palmar	CPM
24	Villa Carmenza	VCM
25	Bajo Prado	BPD
26	El Guamal	GML
27	El Paraiso	PAR
29	Campin-Persia	CPR
30	Bajo Prado sector centro medico	BPC

Se generaron un total de 1020 escenarios, a los cuales se les realizó sus respectivos análisis de estabilidad con ayuda del software Slide V6.0, discriminados así:

- 960 escenarios, ya que son 12 rellenos, cada uno con 80 escenarios.
- Si la probabilidad de falla de los 960 rellenos es 0 o muy cercana a 0, se tendrían en cuenta 60 escenarios adicionales.

A estos escenarios se les calculó la aceleración sísmica con la que el modelo tiene un Factor de seguridad (FS) ≤ 1 .

Este análisis se realizó con valores de propiedades mecánicas (c' , ϕ'), promedio, para cada uno de los periodos de retorno T_r de la lluvia.

4.8 Calibración de un relleno tipo

Antes de realizar el análisis de estabilidad en condición estática y pseudo estática de los rellenos, en todos los escenarios mencionados en Tabla 2, se calibró un modelo tipo, con el fin de que representará al máximo las condiciones reales del terreno.

Se definieron unas condiciones de frontera, tanto para el estado inicial del modelo, como para las diferentes etapas de análisis (stages) con flujo de agua.

Esto se realizó haciendo pruebas ensayo-error, variando valores de propiedades mecánicas, físicas e hidráulicas de los dos estratos que componen el relleno, hasta llegar a un modelo coherente que representará la realidad.

Se escogió el relleno el Nevado (NEV) para la calibración.

En la Tabla 39 se presentan las pruebas ensayo error realizadas al modelo hasta calibrarlo.

Tabla 39 Tabla de pruebas ensayo-error para calibración de modelo.

PRUEBA ENSAYO- ERROR No	DESCRIPCION DE LA ACCION	RESULTADOS	ELECCION CONDICIONES DEL MODELO (SI/NO)
1	<ul style="list-style-type: none"> * Se asume que el NAF este en la superficie de contacto entre los dos estratos * Se induce el NAF por medio de condicion de cabeza total (m) en el software * Se asignan para cada estrato las propiedades hidraulicas predeterminados por el software, de acuerdo a la textura del material y siguiente el modelo de Van Genuchten * Se asignan valores muy altos de cohesion, angulo de friccion y peso unitario al estrato de la formacion casabianca. 	<ul style="list-style-type: none"> * Factores de seguridad muy altos * El flujo de agua no representa comportamiento real 	NO
2	<ul style="list-style-type: none"> * Se dejan las mismas condiciones de la prueba anterior, pero se asignan al estrato de formacion Casabianca las propiedades fisicas y mecanicas descritas en la tabla 18 	<ul style="list-style-type: none"> * En el estado inicial del modelo el FS es menor a 1. Esta fallado, lo que no es cierto * Nivel freatico en los 3 Stages en la superficie. Lo que no es cierto. El agua no corre por la cara del relleno. 	NO
3	<ul style="list-style-type: none"> * No se le aplica al modelo condiciones de frontera 	<ul style="list-style-type: none"> * Se presentan valores de succion muy altos en toda la altura del modelo. Al modelo no le ingreso agua en ninguno de los 3 satges. 	NO
4	<ul style="list-style-type: none"> * Se elabora curva de permeabilidad y contenido volumetrico de agua de acuerdo al modelo de van genuchten, que abaquen valores de succiones hasta 3000 kPA. Esto para el estrato de relleno antropico. Se incluyen al modelo * Se asignan nuevamente las condiciones de frontera de la prueba No1 	<ul style="list-style-type: none"> * En el estado inicial del modelo el FS es menor a 1. Esta fallado, lo que no es cierto * Superficies de falla muy profundas, que abarcan los dos estratos. 	NO
5	<ul style="list-style-type: none"> * Se vuelven a asignar valores mucho mas altos de cohesion, angulo de friccion y peso unitario al estrato de la formacion casabianca,comparados con los de la tabla 18 * Se incluyen las curvas de retencion de agua experimentales elaboradas en la prueba 4. 	<ul style="list-style-type: none"> * No se presentan succiones altas. * Se ve variar coherentemente el NAF en los 3 stages * Factor de seguridad muy alto, comparado con la tasa de infiltracion que se le esta modelando 	NO
6	<ul style="list-style-type: none"> * Continuan los mismos parametros mecanico, fisicos e hidraulicos de la pueba No5 para los dos estratos. * Se varia la condicion de frontera de la superficie de contacto de los dos estratos, pasa de cabeza total a presion igual a 0. en el stage de flujo estable (steady state groundwater). * Se deja sin condicion de frontera esta superficie en el stage de flujo transitorio (transcient groundwater) 	<ul style="list-style-type: none"> * Varian minimamente los factores de seguridad * Desde el primer stage el NAF asciende casi hasta la superfiie del modelo, en algunas partes el agua corre por la superficie. 	NO
7	<ul style="list-style-type: none"> * En esta prueba no se tienen en cuenta las lluvias antecedentes de los 365 dias, unicamente la de 25 dias y el aguacero evento. * La propiedades fisicas, mecanicas e hidraulicas se conservan para los dos estratos de la que se tenía en la prueba inmediatamente anterior. 	<ul style="list-style-type: none"> * No hay cambios representativos ni significativos con la prueba inmediatamente anterior 	NO
8	<ul style="list-style-type: none"> * En esta prueba no se tienen en cuenta las lluvias antecedentes de los 365 dias, unicamente la de 25 dias y el aguacero evento. * Se varian las condiciones de frontera, suprimiendo las condiciones de frontera de cabeza total laterales (entrada y salida del modelo). * Se deja la condicion de frontera de la superficie de contacto de los dos estratos en presion igual a 0. en el stage de flujo estable (steady state groundwater). * Se deja sin condicion de frontera esta superficie en el stage de flujo transitorio (transcient groundwater) 	<ul style="list-style-type: none"> * No hay cambios representativos ni significativos con la prueba inmediatamente anterior * Valores de FS similares, presiones de poros y posicion del NAF similares a prueba anterior 	NO
9	<ul style="list-style-type: none"> * Se vuelven a tener en cuenta las lluvias antecedentes de los 365 dias, ademas de las lluvias acumuladas de 25 dias y el aguacero evento. * Las propiedades fisicas, mecanicas e hidraulicas se conservan. * Se vuelven a poner las condiciones de frontera laterales de cabeza total y se suprime la condicion de frontera en la superficie de contacto entre los dos estratos, tanto en el flujo estable como en el transitorio. 	<ul style="list-style-type: none"> * Se evidencia la variacion del NAF, haciende hacia la superficie y varia en los 3 satges. * Valores similares de FS y de presiones de poros. 	NO
10	<ul style="list-style-type: none"> * Se asignan nuevamente los valores de los parametros fisicos y mecanicos de la formacion casabiana, y se dejan los de la tabla 18. * Los limites del modelo se varian, se cambia de toda la longitud del modelo a solo la longitud del relleno. 	<ul style="list-style-type: none"> * Se evidencian valores de factor de seguridad acordeas a la realidad para la condicion inicial y los 3 stages. * Superficie de falla por el contacto entre los dos estratos. 	NO
11	<ul style="list-style-type: none"> * Se conservan todas los parametros de la prueba anterior pero se suprimen nuevamente las condiciones de fromntera laterales de cabeza total, tanto en flujo estable como en transitorio. 	<ul style="list-style-type: none"> * Superficie de falla en la condicion inicial que abarca todo el modelo y FS muy alto. * En los 3 stages se observan succiones muy altas en el estrato de la formacion casabianca. * Se genera un NAF colgado cerca a la superficie del modelo. 	NO
12	<ul style="list-style-type: none"> * Se le ingresan al modelo lluvias antecedentes de los 365 dias, pero 6 veces mas para aumentar considerablemente la tasa de infiltracion. Ademas de la lluvia antecedente de 25 dias y el aguacero evento 	<ul style="list-style-type: none"> * Varia la posicion del NAF. Avanza el frente humedo en profundidad. Al parecer se infiltra mas agua * Se conservan valores de succiones muy altos * Los FS no varian sustancialmente. 	NO
13	<ul style="list-style-type: none"> * Se dejan las mismas condiciones de la prueba anterior, pero se asignan nuvamente las condiciones de frontera de cabeza totoa laterales pero con una cota inferior a la cota de la base del modelo. 	<ul style="list-style-type: none"> * Se observa que el modelo queda casi completamente saturado. * Factores de seguridad aterrizados y acordeos a la realidad 	NO
14	<ul style="list-style-type: none"> * Se dejan las mismas condiciones de la prueba anterior, pero se asignan una cota 100m menor a las condiciones de frontera laterales de la prueba No13 * Se vuelve y se amplia el limite de analisis, y se pasa de la longitud del relleno a la longitud de todo el modelo. 	<ul style="list-style-type: none"> * Las lluvias antecedentes de los 6 años solo logran infiltrar la parte superficial del modelo en el estrato de relleno antropico. * Se presentansucciones en la formacion casabianca, pero ya no con valores muya altos. 	NO
15	<ul style="list-style-type: none"> * Se vuelven a tener en cuenta las lluvias antecedentes de los 365 dias, ademas de las lluvias acumuladas de 25 dias y el aguacero evento. * Las condiciones de frontera laterales se conservan como cabeza total a la cota de la anterior prueba No14 	<ul style="list-style-type: none"> * No se presentan cambios sustanciales en el modelo 	NO
16	<ul style="list-style-type: none"> * Se modifican las cotas de las condiciones de frontera laterales. Se ponen algo superiores a la cota de la base del modelo. * Los demas parametros iguales a como vienen de la anterior prueba 	<ul style="list-style-type: none"> * NAF en la condicion inicial se localiza aproximadamente a la mitad de la altura del modelo. * Se presenta un FS acorde con la realidad. * En los 3 stages se observan que el NAF avanza hasta la superficie y el modelo queda casi completamente saturado. * En los 3 stages se observan FS menores a 1. * Superficie de falla de radio grande y abarca los dos estratos. 	NO
17	<ul style="list-style-type: none"> * Se modifican las cotas de las condiciones de frontera laterales. Se ponen exactamente al valor de la cota mas alta de la parte derecha del modelo (salida del Modelo), para ambas fornteras laterales 	<ul style="list-style-type: none"> * Se observa un FS adecuado y acorde a la realidad * Las lluvias infiltradas parece que se quedan focalizadas en el estrato de relleno antropico, generando un NAF colgado. * Se presentan succiones con valores normales en esi estrato de formacion casabianca * Se presentan succiones con valores normales en esi estrato de formacion casabianca 	SI

La condición de frontera en la entrada y salida del modelo (lado izquierdo y derecho del modelo), fue definida como de cabeza total a una cota igual a la cota de la parte más baja del lado derecho del modelo.

4.9 Análisis de estabilidad de modelo tipo

Los análisis de estabilidad y los correspondientes resultados de los factores de seguridad (FS) para todos los rellenos en todos sus escenarios, se realizaron por medio del software Slide.

En este capítulo se presentaron el procedimiento y los resultados de uno de los rellenos: El modelo del relleno el Nevado, definido anteriormente como relleno tipo.

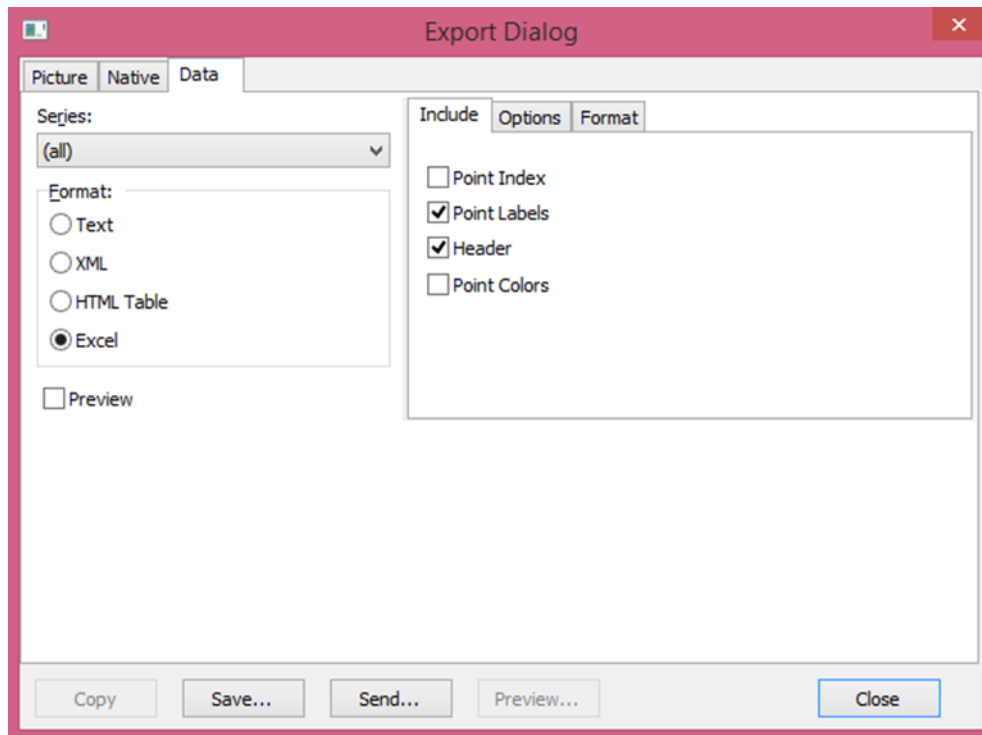
El Anexo 17 presenta todos los resultados de los otros 11 rellenos.

A continuación, se describe y se ilustra el procedimiento.

4.9.1 Relleno el Nevado (NEV)

- Los perfiles geométricos generados en el software Arcgis y definidos en el numeral 4.3.3, se exportaron como puntos, de este software, a un archivo de Excel.

Figura 68 Exportar puntos de los perfiles geométricos desde software Arcgis a Excel.



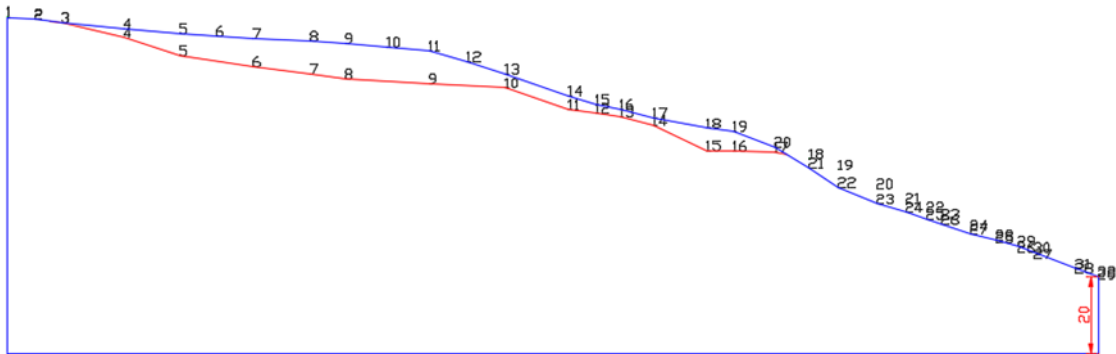
- A partir de los puntos del archivo de Excel, se crearon las polylíneas que constituyeron el modelo. Esto se realizó en un archivo de autocad.

Se asumió un espesor de entre 15-20m del estrato de la Formación Casabianca. Figura 66.

Este archivo se elaboró con dos capas o layers: El primero, llamado External, correspondiente al perímetro del modelo (polylínea azul); el segundo, llamado Material, correspondiente a la superficie que divide los dos estratos del modelo (polylínea roja).Figura 69.

Este archivo fue grabado en extensión dxf para luego ser importado desde el software Slide.

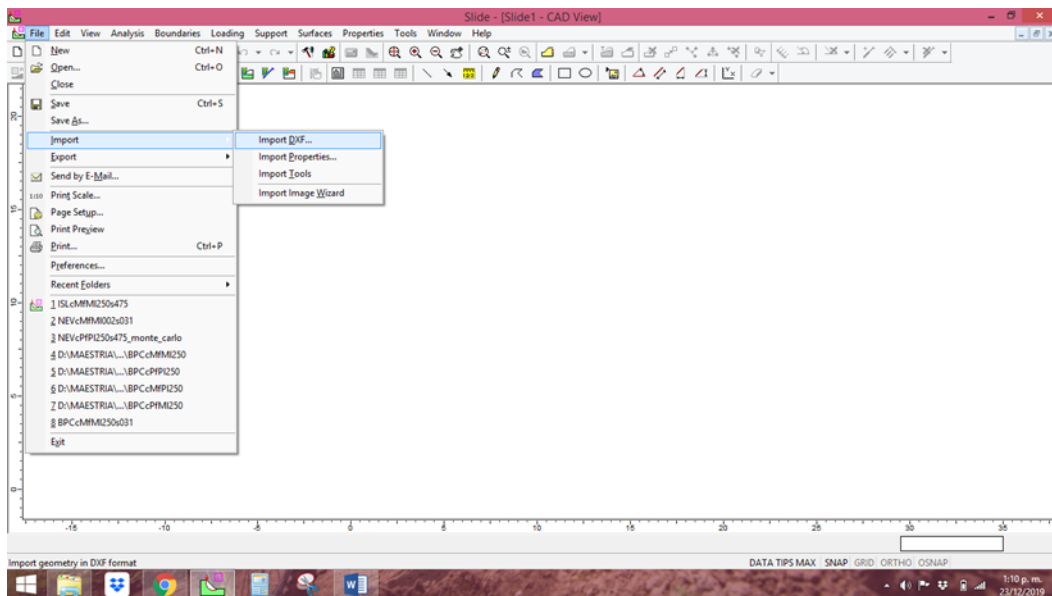
Figura 69 Modelo del relleno el Nevado en software autocad



- Se importó el archivo grabado en extensión dxf desde en el software Slide.

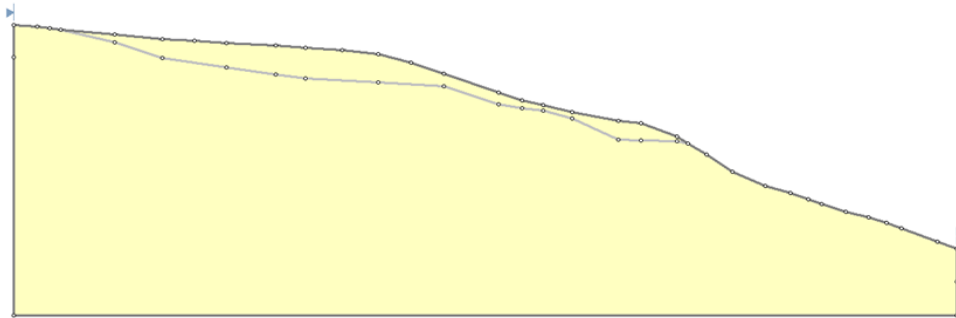
Se importaron por separado, la polyline correspondiente al perímetro externo del modelo (external boundary) y la polyline correspondiente a la superficie que separa los dos estratos (material boundary). Figura 70.

Figura 70 Procedimiento para importar modelo dxf a software slide



- Se generó el modelo en Slide original.

Figura 71 Modelo en crudo del relleno el nevado software slide



- Se configuró el proyecto, es decir el modelo. Aquí se definieron: El sistema de unidades; el método de equilibrio límite; el método de modelación del flujo de agua; el número de etapas o stages en las cuales se quiso que se calculara el factor de seguridad. Figura 72, Figura 73, Figura 74, Figura 75.

Para el cálculo de la probabilidad de falla, solo se tuvo en cuenta el resultado del factor de seguridad (FS) en la etapa o stage 3, Es decir, cuando al modelo ya se le ha ingresado el total de las lluvias detonantes.

Figura 72 Configuración del proyecto en software Slide.

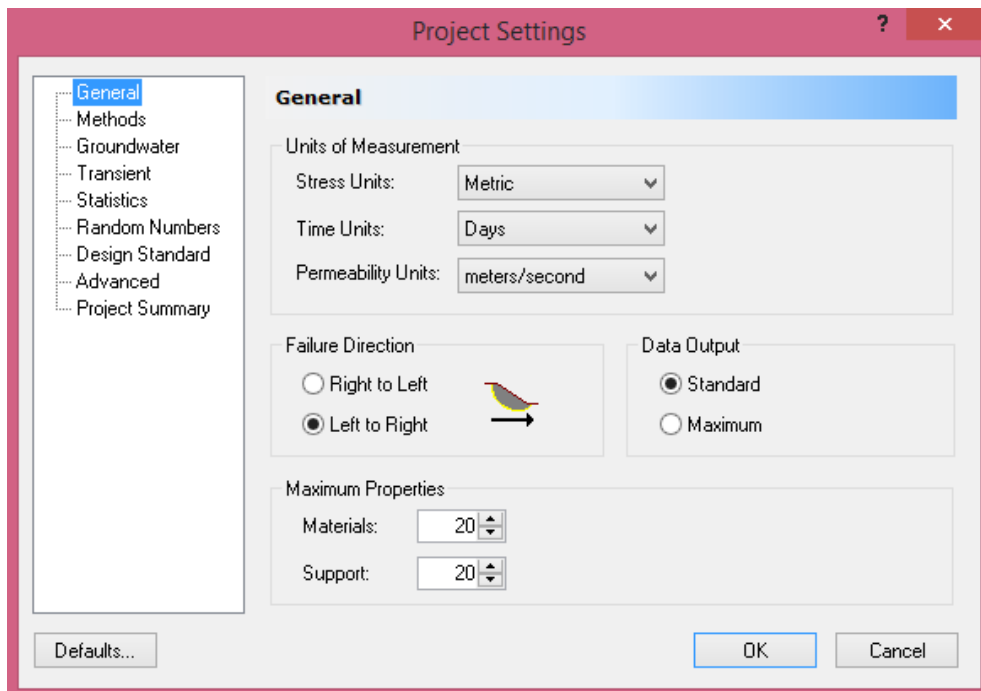


Figura 73 Ajustes Modelo: Método de análisis de estabilidad utilizado. Morgenstern-Price

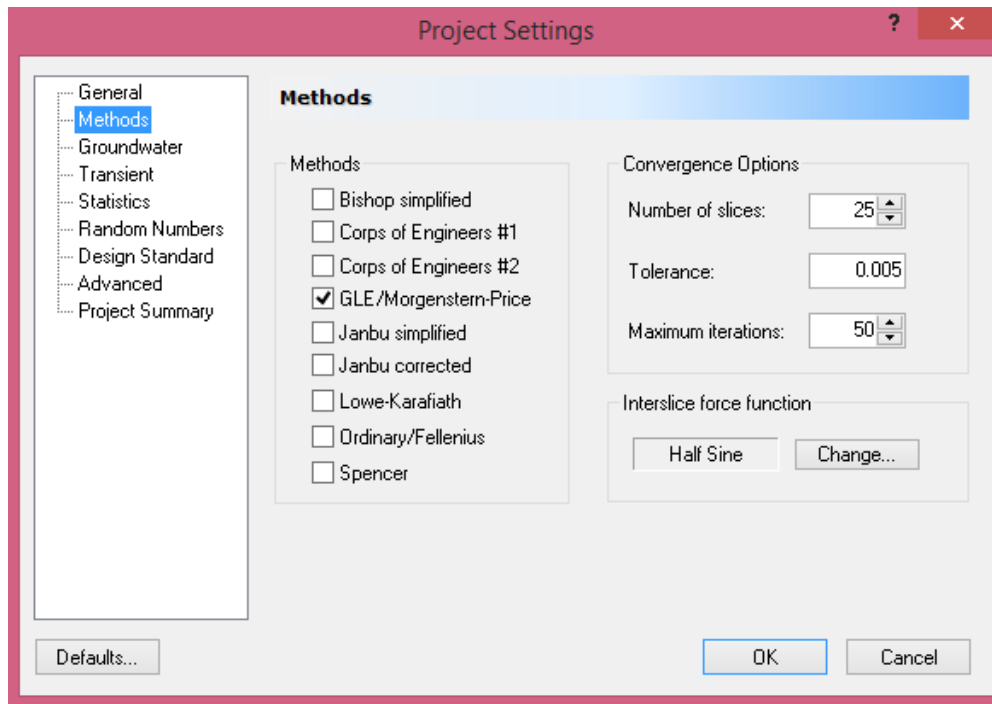


Figura 74 Ajustes Modelo: Método de análisis del flujo de agua. Análisis de elementos finitos FEA.

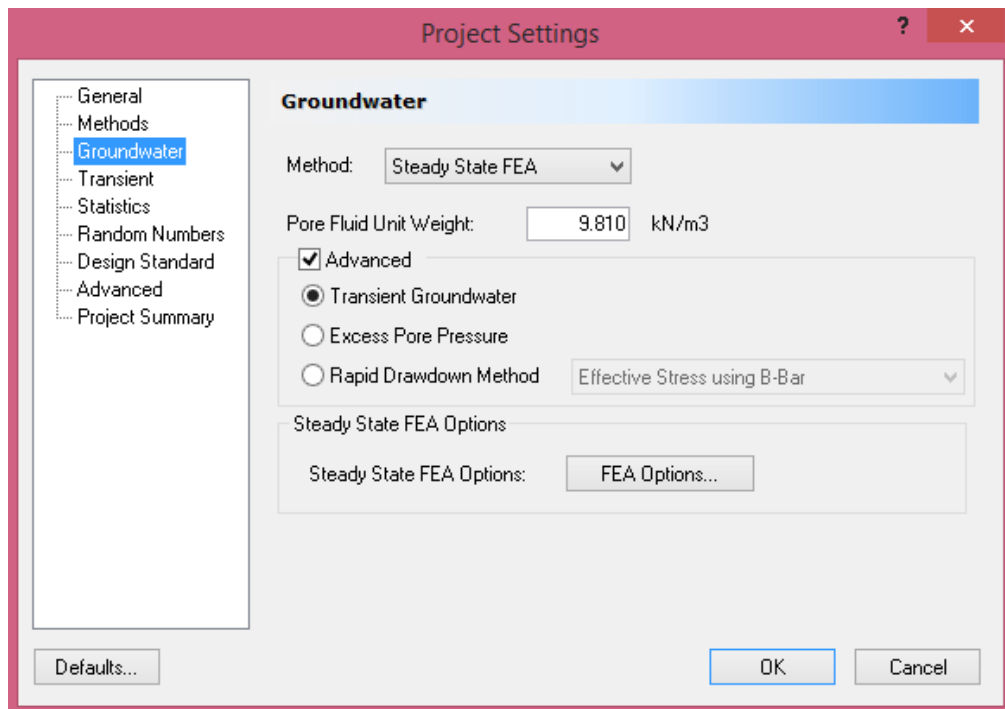
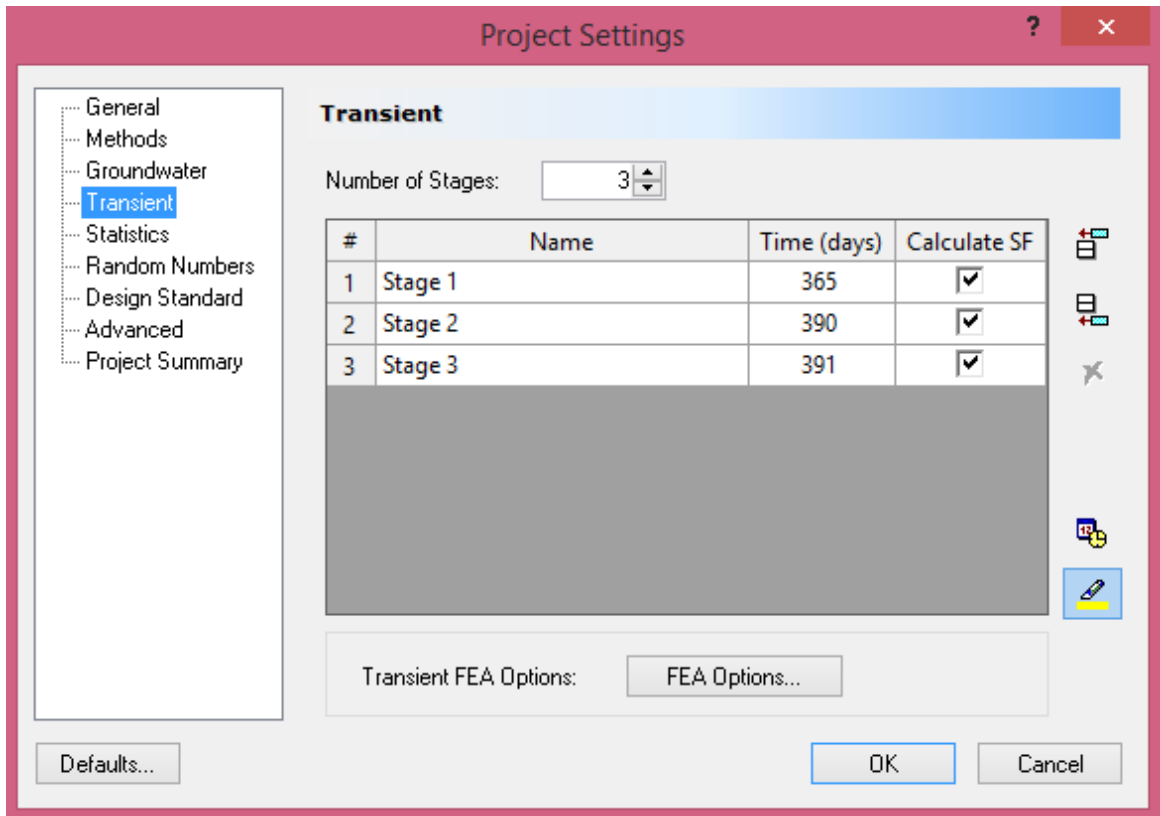


Figura 75 Ajustes Modelo: Numero de etapas o stages en que se quiere calcular el factor de seguridad



- Se le asignaron las propiedades físicas, mecánicas, e hidráulicas definidas en la Tabla 18 y la Tabla 29 respectivamente, a cada estrato del modelo en crudo de la Figura 71 .
- Se definió adoptar el mecanismo de falla o rotura de Mohr Coulomb para ambos estratos del modelo.
- Además de las propiedades hidráulicas de la Tabla 29 que se le ingresaron al modelo, también se le asignaron: El contenido volumétrico de agua y la permeabilidad, de acuerdo con la curva de retención de agua elaborada de acuerdo con el modelo de Van Genuchten y definida e ilustrada en el numeral 3.4.2 y Figura 40 y Figura 41. Esto se observa en la Figura 77.

Figura 76 Asignación de las propiedades físicas, mecánicas y mecanismo de rotura o falla por estrato.
Ejemplo: Valores promedio de cohesión y Angulo de fricción más unas desviación estándar.

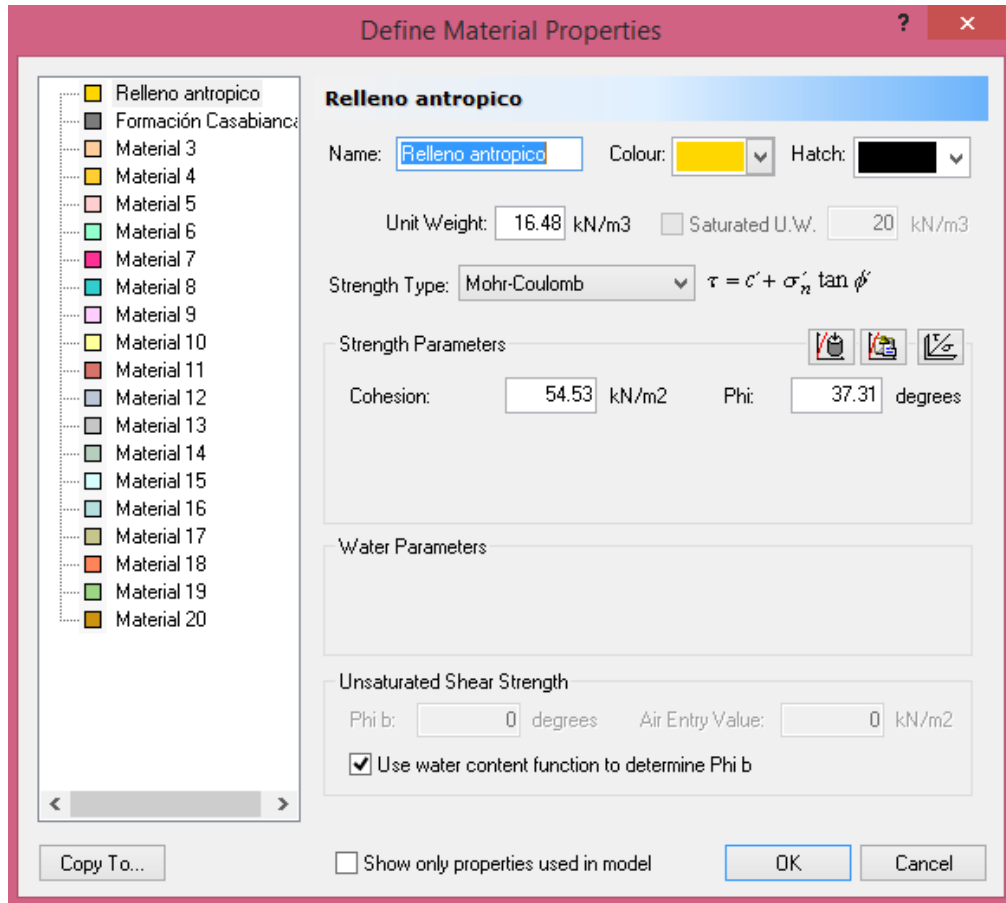
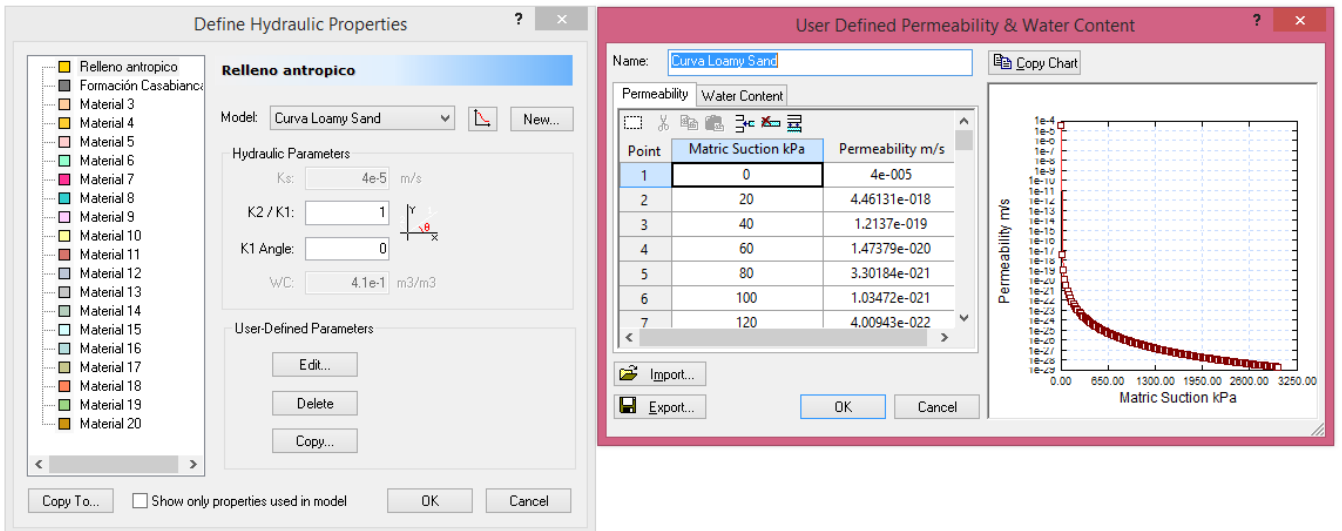
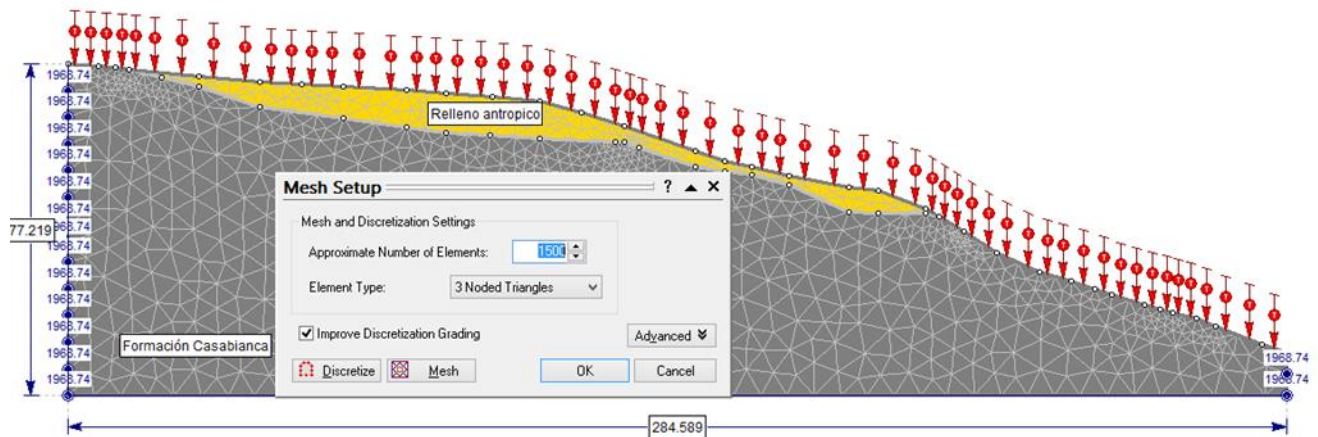


Figura 77 Asignación de las propiedades hidráulicas por estrato al software slide.



- Se discretizó el modelo en 1500 elementos triangulares conformados por 3 nodos. Esto se debió a que el análisis de flujo estable (steady state groundwater) y flujo transitorio de agua (transient groundwater) que realiza el software Slide, lo hace a partir de un análisis de elementos finitos.

Figura 78 Discretización del modelo para análisis por elementos finitos del flujo de agua. 1500 elementos. Triángulos de 3 nodos



- Se le ingresó al modelo el detonante lluvia, representado por la tasa de infiltración vertical de acuerdo con lo expuesto y el ejemplo del numeral 4.5.1. Figura 79 y Figura 80.

Se asumió que esta tasa de infiltración vertical se distribuyó de una manera uniforme por toda la superficie del modelo.

Se recuerda que esta tasa de infiltración vertical es diferente para cada uno de los escenarios evaluados, de acuerdo con el periodo de retorno de lluvia correspondiente que se esté analizando. Se debieron considerar los valores incluidos en la Tabla 36 y la Tabla 37.

Figura 79 Ingreso de tasa de infiltración al software slide. Ejemplo para un periodo de retorno $Tr=50$ años

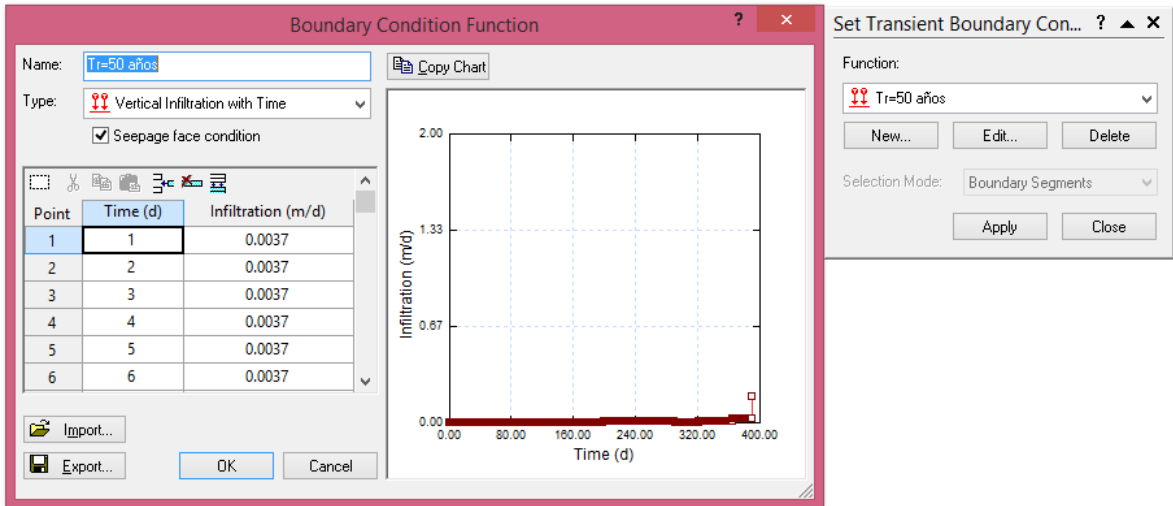
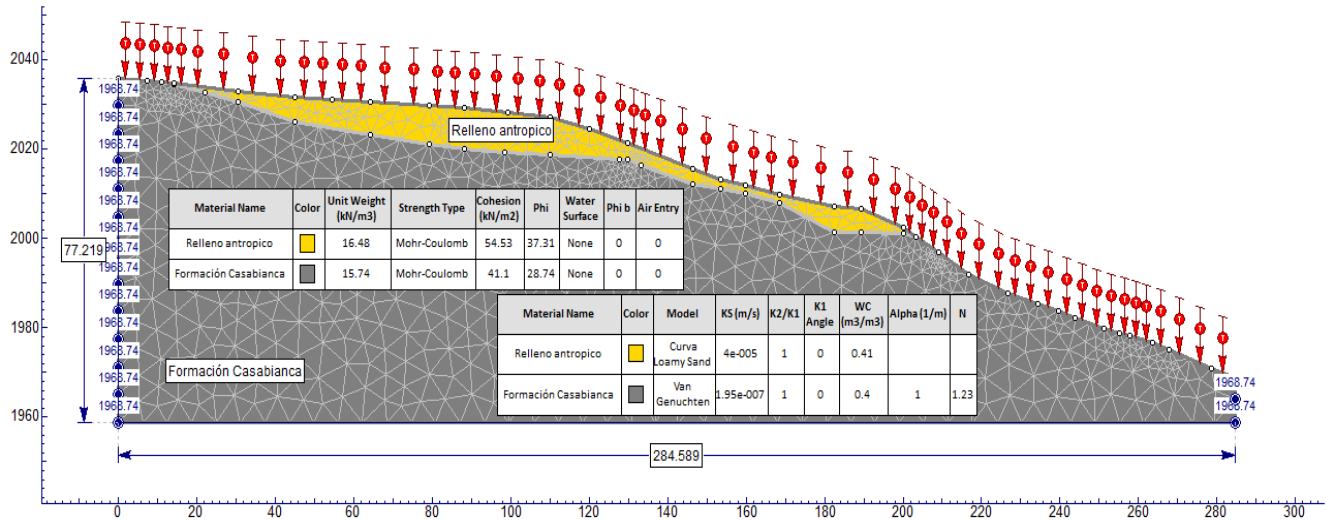


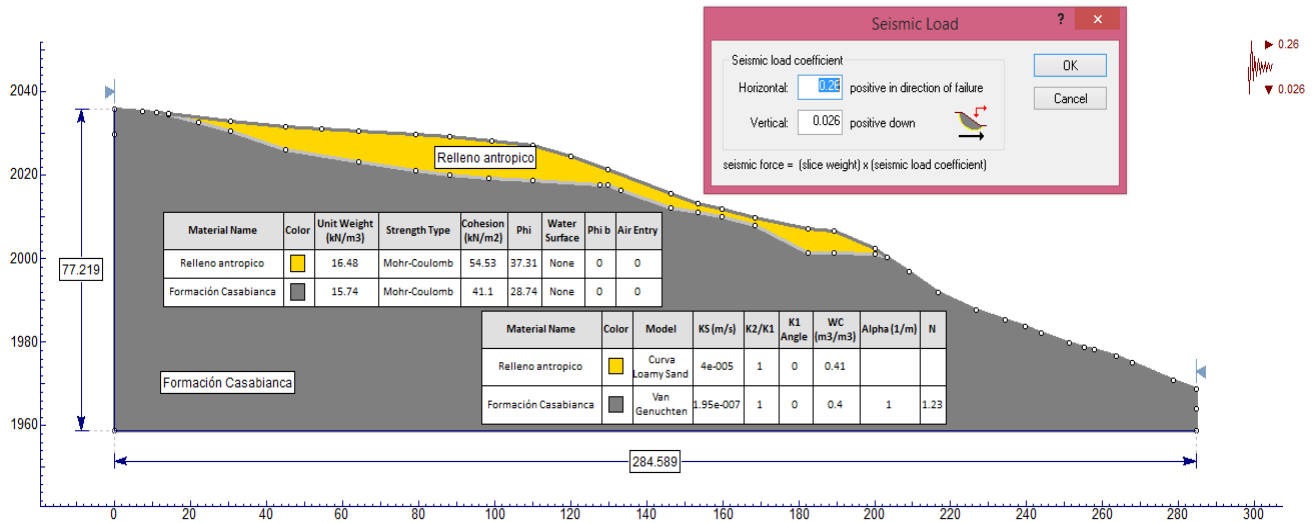
Figura 80 Modelo del relleno el Nevado previo a calcular su estabilidad.



- Se le asignó al modelo el detonante sismo, representado por una aceleración sísmica máxima de acuerdo con lo expuesto en el numeral 4.5.2. Figura 81.

Se asumió que el valor de la aceleración sísmica vertical fuera el 10% del valor de la aceleración horizontal.

Figura 81 Asignación de la aceleración sísmica al modelo del relleno el nevado Ejemplo Tr: 475años



El software Slide permitió calcular el factor de seguridad para diferentes etapas o stages las cuales se describen a continuación y como se ilustró en Figura 75:

Inicial: Es el momento en el cual el modelo tiene una altura de nivel freático asumida por las condiciones de frontera descritas en el numeral 4.8. En este stage aún no hay flujo transitorio de agua.

Stage 1 (365 días): Para este momento se asume que el relleno está parcialmente saturado, antes de que le ingresarle la tasa de infiltración que representa el detonante lluvias. Para el relleno tipo se ingresaron lluvias de acuerdo con los valores relacionados en el ejemplo de la Tabla 37.

Stage 2 (390 días): Para este momento al modelo le ingresa una parte del detonante lluvias, representado por un contenido volumétrico de agua (m³/m³) correspondiente a la intensidad de las lluvias acumuladas de 25 días (A_{25}), aplicando el principio de Terlien (1997).

Lo anterior igualmente de acuerdo con los valores relacionados en el ejemplo de la Tabla 37.

Stage 3 (391 días): Para este momento al modelo le ingresa la otra parte del detonante lluvias, representado por otro contenido volumétrico de agua (m^3/m^3) correspondiente a la intensidad de las lluvias acumuladas de 1 días (A_1), simulando el “aguacero evento”.

La sumatoria de estas dos intensidades (mm/día) representó el valor de la infiltración vertical correspondiente al detonante lluvias.

- Se calculó el factor de seguridad, por medio del comando compute. Por medio de este comando, el programa inicia el cálculo del factor de seguridad Figura 82.

Se aclara que el orden de computo del software Slide para correr el modelo es: Primero se inicia con el análisis de flujo transitorio (Transient Groundwater) y luego el análisis de estabilidad del talud (slope stability).

Figura 82 Comando para iniciar cálculo del factor de seguridad en software slide



Los resultados del análisis de flujo de agua y del análisis de estabilidad con su respectivo valor del factor de seguridad (FS) del relleno tipo, El Nevado, fueron entregados por el software Slide, como se observa en la Figura 83 y la Figura 84.

Figura 83 Resultado del análisis de flujo de agua entregado por software slide para el relleno tipo, el nevado.

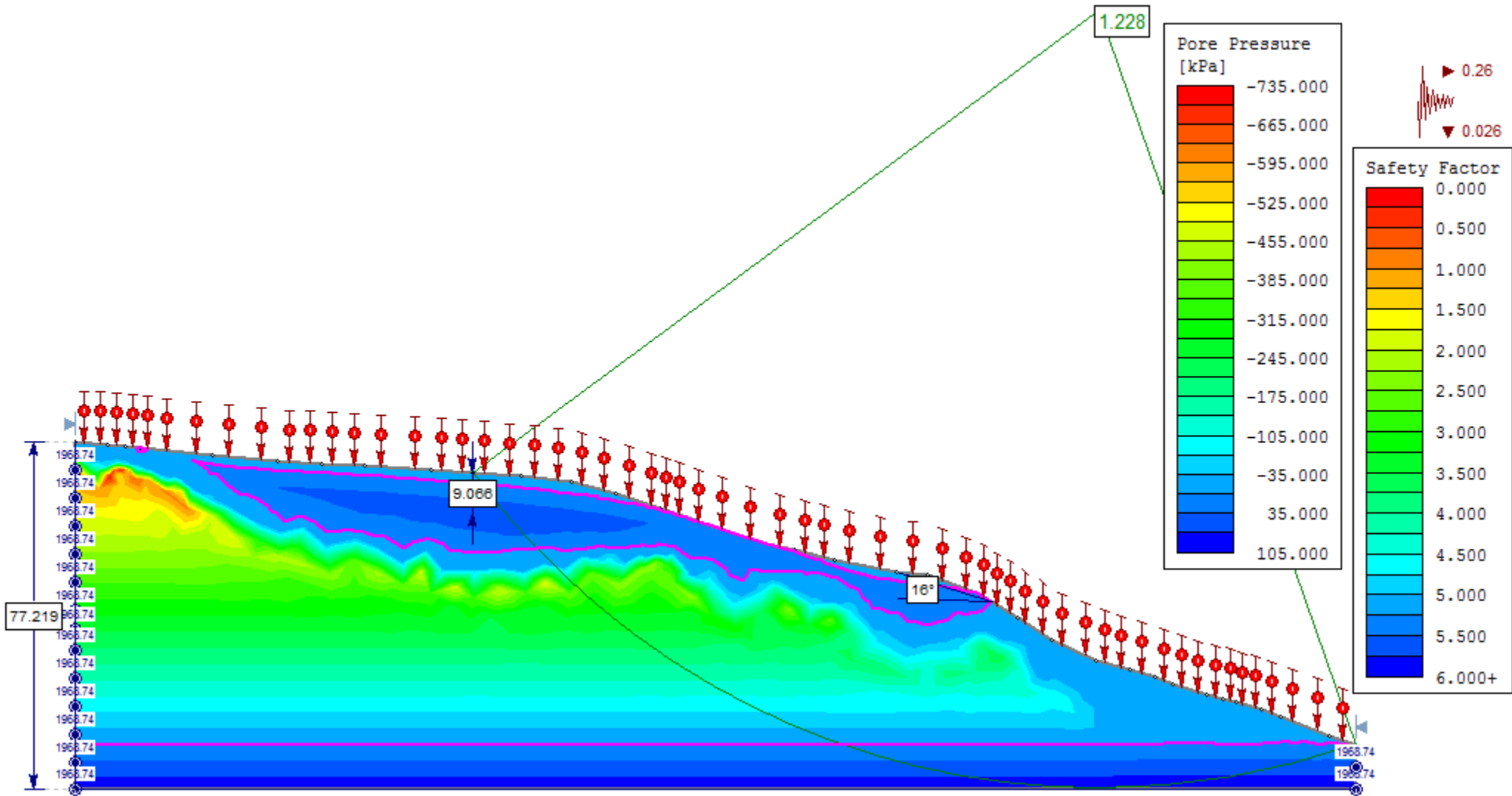
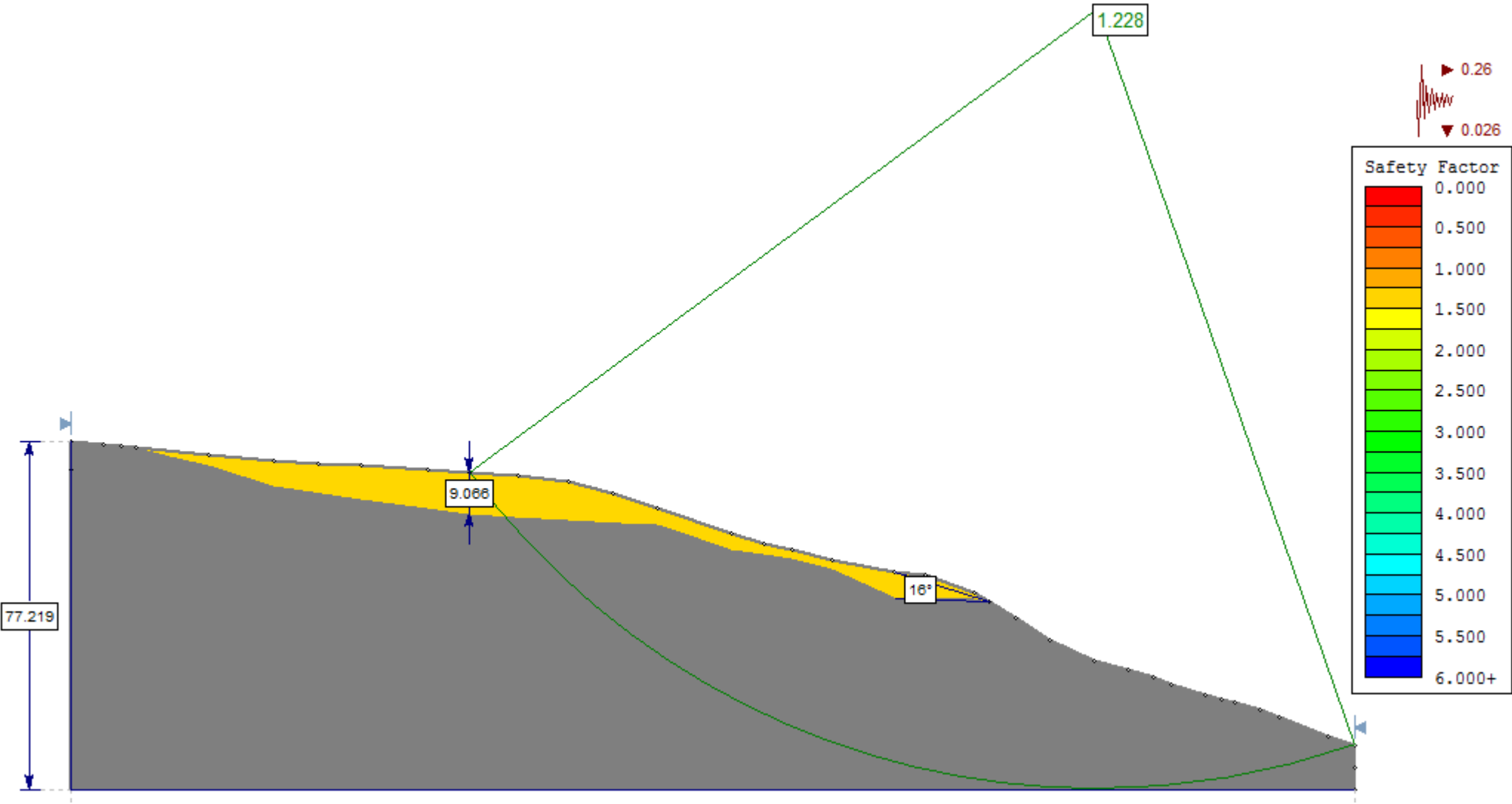


Figura 84 Resultado del análisis de estabilidad entregado por software slide para el relleno tipo, el nevado.



4.10 Probabilidad de Falla y Evaluación de la amenaza

Se calculó la probabilidad de falla para cada uno de los rellenos. Esto a partir de los valores de los factores de seguridad (FS) obtenidos para cada uno de los escenarios de análisis de los 12 rellenos.

Además considerando que este es el dato discriminante para establecer las categorías de la amenaza de acuerdo con lo que se menciona en la Guía Metodológica para estudios de Amenaza, Vulnerabilidad y Riesgo por Movimientos en Masa del Servicio Geológico Colombiano (2016).

Este análisis permitió considerar la incertidumbre en los parámetros de resistencia del suelo, cohesión y ángulo de fricción del estrato de relleno antrópico, y la probabilidad de ocurrencia de los factores detonantes, lluvia y sismo.

La calificación o evaluación de la amenaza por deslizamiento está determinada de acuerdo con la escala en que se esté realizando el estudio.

Es decir, si se tiene una escala de 1:5.000 la evaluación de la amenaza está basada en un análisis determinístico y se califica en tres categorías de acuerdo con el valor del factor de seguridad.

Tabla 40 Calificación de la amenaza basada en el valor del factor de seguridad FS

Factor de Seguridad (FS)	FS > 1.5	1.1 < FS < 1.5	FS < 1.1
Calificación o zonificación de la amenaza	BAJA	MEDIA	ALTA

Pero, si el estudio se está realizando a una escala detalle, es decir 1:2000, esta evaluación de la amenaza se basa en un análisis probabilístico y se califica también en tres categorías, pero de acuerdo al valor de la probabilidad de falla anual (Servicio Geológico Colombiano, 2016).

Tabla 41 Calificación de la amenaza basada en el valor de la probabilidad de falla anual

Probabilidad de falla anual	< 0.001	0.001 - 0.16	> 0.16
Calificación o zonificación de la amenaza	BAJA	MEDIA	ALTA

Los rellenos localizados y evaluados en esta tesis estuvieron basados con una escala a detalle. Por lo tanto, la evaluación de la amenaza que se les realizó estuvo basada en un análisis probabilístico.

El procedimiento que se siguió para el cálculo de la probabilidad de falla anual y posterior calificación o evaluación de la amenaza es el que se describe a continuación:

- 1- Se calculó la probabilidad de que el factor de seguridad sea menor a 1, considerando lo expuesto sobre el método de estimativos puntuales descrito en 3.4.4.2.
 - Se calcularon la esperanza o media, la desviación estándar y la varianza de los valores de los factores de seguridad de un escenario determinado.
 - Se calculó el índice de confiabilidad β .
 - A partir de este índice de confiabilidad β se determinó la probabilidad de no falla Φ (β).

Esta se calculó como la función inversa de la función Z (función de probabilidad acumulada normal estándar).

- Se obtuvo la probabilidad del factor de seguridad que es igual a la unidad menos la probabilidad de no falla Φ (β).

$$P_{fs} = 1 - \Phi (\beta).$$

- 2- Se calculó la probabilidad de que se presente u ocurra una lluvia determinada para un periodo de retorno, en un año, de acuerdo a la siguiente expresión:

$$P_{ll} = \left(1 - \left(1 - \frac{1}{T_r}\right)^L\right)$$

Donde:

Tr es el periodo de retorno de la lluvia en años.

L es el periodo de exposición, en este caso 1 año.

- 3- Se calculó la probabilidad de excedencia de un sismo para un periodo de retorno, en un año, de acuerdo a la siguiente expresión:

$$P_s = \left(1 - (e)^{\frac{-L}{T_r}}\right)$$

Donde:

Tr es el periodo de retorno del sismo en años.

L es el periodo de exposición, en este caso 1 año.

El cálculo de la probabilidad de ocurrencia y excedencia de las variables detonantes lluvias y sismos respectivamente se realizó para periodos de retorno ilustrados en la Tabla 42:

Tabla 42 Periodos de retorno de lluvia y sismo para el cálculo de la probabilidad de falla

Detonante lluvia (mm/día)	5	Tr. 2,33 años
		Tr. 10 años
		Tr. 50 años
		Tr. 100 años
		Tr. 250 años
Detonante sismo (g)	3	Tr. 31 años
		Tr. 225 años
		Tr. 475 años

- 4- Se calculó la probabilidad de falla anual de acuerdo a la siguiente expresión:

$$P_f = p(FS \leq 1.0|h_w|k)p(h_w)p(k)$$

Esta expresión significa que, la probabilidad de falla anual está dada por la probabilidad de que el factor de seguridad sea menor o igual a 1 para un escenario de sismo y lluvia determinado, multiplicado por la probabilidad de que presente esa lluvia multiplicado por la probabilidad de que ocurra ese sismo.

Esta probabilidad de falla considera el factor de seguridad como una variable aleatoria, al igual que la variabilidad de los parámetros del suelo para varios escenarios de amenaza definidos con la combinación de los diferentes escenarios de los detonantes lluvias y sismos.

La probabilidad de falla total anual se determinó restándole a la unidad (1) el valor de la probabilidad total calculada en el paso anterior, así:

$$P_{ft} = 1 - (1 - p_{f1})(1 - p_{f2}) \dots \dots (1 - p_{fn})$$

Donde:

P_{ft} : Probabilidad de falla total.

P_{fi} : Probabilidad de falla para el escenario i. Este escenario se define por las combinaciones de lluvia y sismo.

Esta probabilidad de falla total anual se calculó para todas las combinaciones posibles de las variables:

Lluvia; Sismo, cohesión (c') más o menos (+/-) su respectiva desviación estándar; ángulo de fricción (ϕ') más o menos (+/-) su respectiva desviación estándar.

La Tabla 43 presenta los valores asignados a las variables cohesión (c') y ángulo de fricción (ϕ') para el cálculo de la probabilidad de falla del factor de seguridad (FS).

Tabla 43 Valores asignados a las variables cohesión (c') y ángulo de fricción (ϕ') para el cálculo de la probabilidad de falla del factor de seguridad (FS).

Propiedades físicas y mecánicas para el estrato de relleno								
Peso unitario (γ) kN/m ²	Cohesión c' (kN/m ²)	Desv. Estd (σ)	$c' + \sigma$ (kN/m ²)	$c' - \sigma$ (kN/m ²)	Ángulo de fricción (ϕ') ^o	Desv. Estd (σ)	$\phi' + \sigma$ (^o)	$\phi' - \sigma$ (^o)
16,48	39,28	15,25	54,53	24,03	32,14	5,173	37,31	26,97

Finalmente, el cálculo de la probabilidad de falla o probabilidad total, es el valor resultante del producto o multiplicación entre probabilidad de ocurrencia del factor de seguridad, probabilidad de ocurrencia del periodo de retorno de lluvias y probabilidad de excedencia del periodo de retorno de sismo.

5. Resultados y Análisis de Resultados

Se presentaron y analizaron los resultados por separado.

En el numeral 5.1 los resultados y análisis de los factores de seguridad (FS) obtenidos para cada relleno. En el numeral 5.2 los resultados y análisis de resultados de la probabilidad de falla y evaluación de la amenaza para cada relleno.

5.1 Resultados del Factor de Seguridad y análisis de resultados

Se realizó un análisis de los resultados obtenidos para cada relleno. Cabe mencionar que los resultados y los comportamientos de los 12 rellenos fueron muy similares.

Se incluyeron las imágenes de los rellenos que muestran los resultados de los factores de seguridad obtenidos para una condición pseudoestática. En condición estática fueron mayores, por este motivo no se incluyeron estas imágenes.

Se mostraron dos imágenes por relleno así: Una ilustró el resultado del factor de seguridad y su correspondiente superficie de falla crítica; la otra ilustró el resultado del análisis del flujo del agua.

En esta última imagen se pudieron ver la variación de los valores de las presiones de poros con la profundidad, el avance en profundidad del frente húmedo, ente otras.

Se presentaron las imágenes y resultados de las modelaciones de los rellenos evaluados en las condiciones más desfavorables.

Es decir, para cuando al estrato de relleno antrópico se le asignaron los valores de cohesión y ángulo de fricción iguales a sus valores promedio menos sus respectivas desviaciones estándar. También una tasa de la infiltración vertical proyectada para un periodo de retorno

de lluvia de Tr: 250 años y una aceleración sísmica correspondiente a un periodo de retorno de sismo de Tr: 475 años.

El Anexo 17 incluyó los archivos correspondientes a los resultados de todos rellenos en cada escenario analizado. Estos se pueden ver con el software Slide.

Por otra parte, del Anexo 1 al Anexo 12 se presentaron los valores de los factores de seguridad obtenidos para cada relleno en sus diferentes escenarios de análisis.

5.1.1 Relleno La Isla (ISL)

Figura 85 Resultado modelo geotécnico FS= 1.328 Relleno La Isla escenario ISLcMfMI250s475

Material Name	Color	Unit Weight (kN/m3)	Strength Type	Cohesion (kN/m2)	Phi	Water Surface	Phi b	Air Entry
Relleno antropico	■	16.48	Mohr-Coulomb	24.03	26.97	None	0	0
Formación Casabianca	■	15.74	Mohr-Coulomb	41.1	28.74	None	0	0

Material Name	Color	Model	KS (m/s)	K2/K1	K1 Angle	WC (m3/m3)	Alpha (1/m)	N
Relleno antropico	■	curva experimental	4e-005	1	0	0.41		
Formación Casabianca	■	Van Genuchten	1.95e-007	1	0	0.4	1	1.23

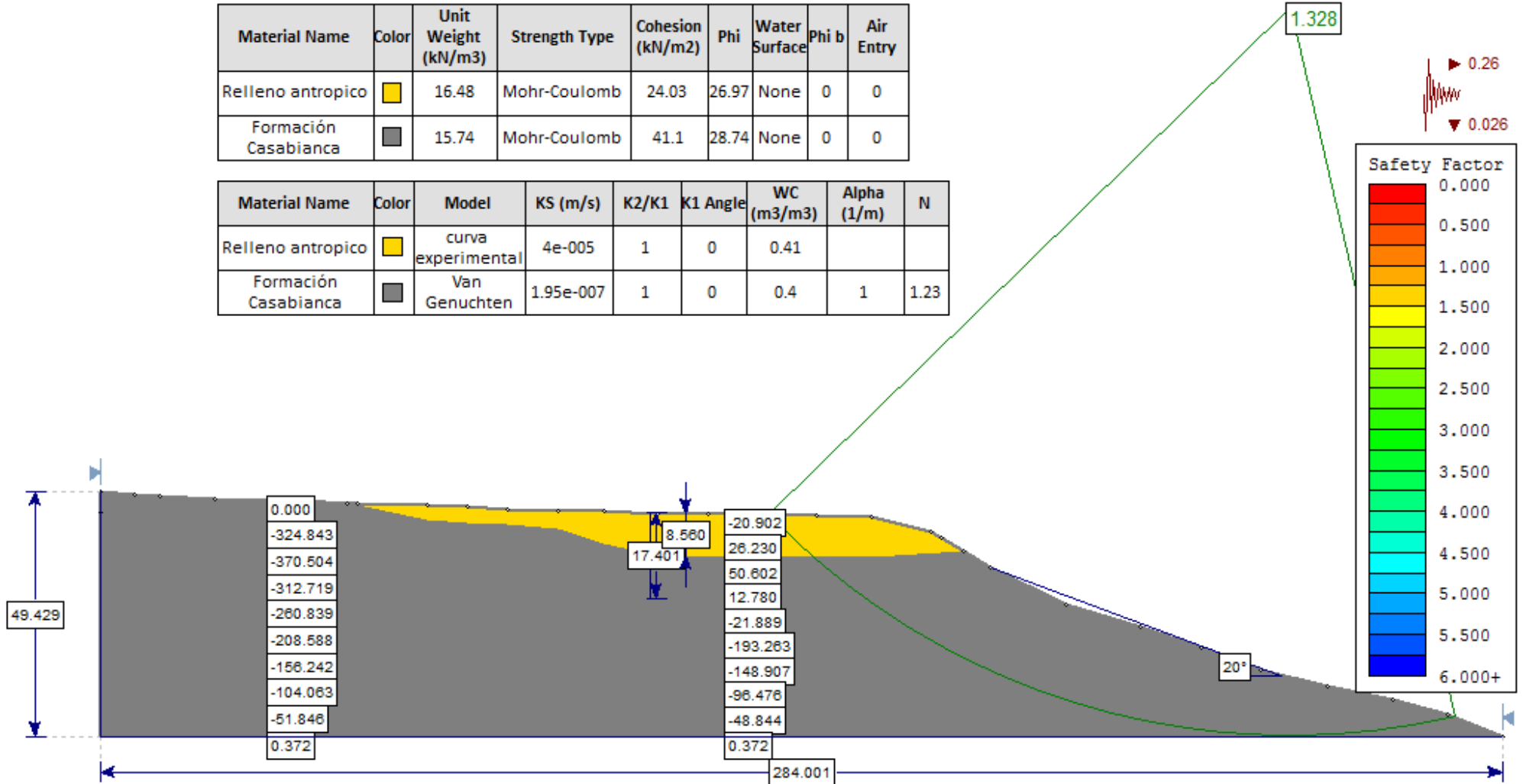
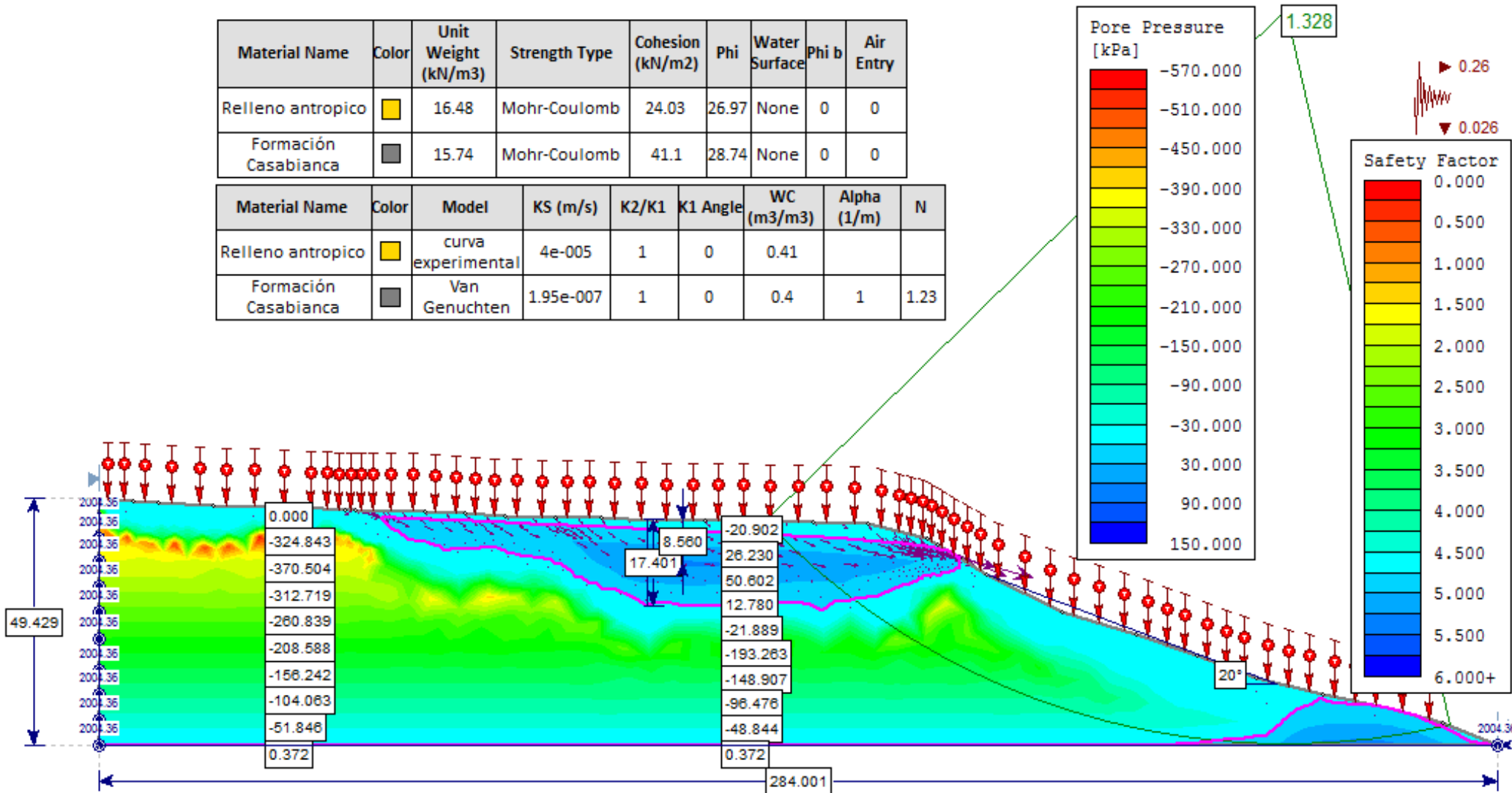


Figura 86 Resultado modelo de flujo de agua Relleno La Isla escenario ISLcMfMI250s475 FS= 1.328

Material Name	Color	Unit Weight (kN/m ³)	Strength Type	Cohesion (kN/m ²)	Phi	Water Surface	Phi b	Air Entry
Relleno antropico	■	16.48	Mohr-Coulomb	24.03	26.97	None	0	0
Formación Casabianca	■	15.74	Mohr-Coulomb	41.1	28.74	None	0	0

Material Name	Color	Model	KS (m/s)	K2/K1	K1 Angle	WC (m ³ /m ³)	Alpha (1/m)	N
Relleno antropico	■	curva experimental	4e-005	1	0	0.41		
Formación Casabianca	■	Van Genuchten	1.95e-007	1	0	0.4	1	1.23



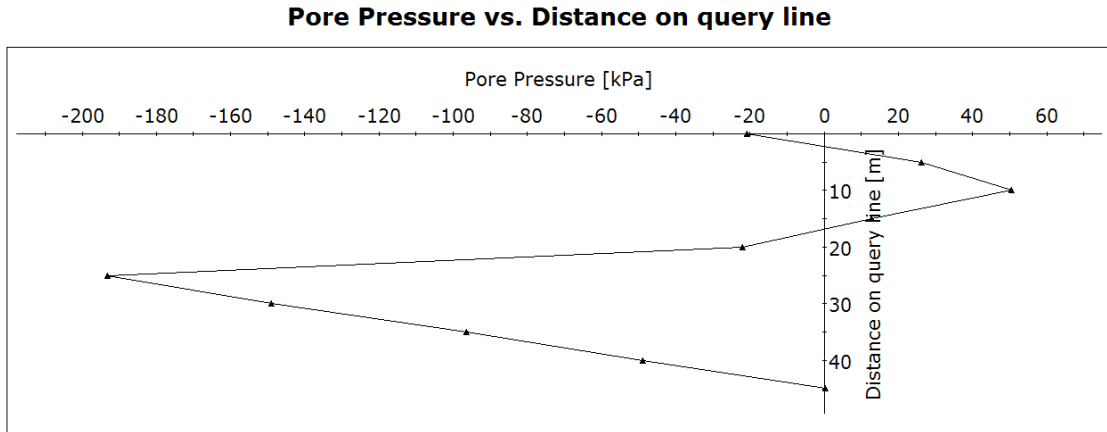
El rango de los valores de los factores de seguridad obtenidos para los 60 escenarios de este relleno, se muestran a continuación:

Rango de valores Factor de Seguridad Relleno La Isla			
FS Menor	Tr sismo: 475 años	FS Mayor	Tr sismo: 31 años
1.327	Tr lluvia: 50 años	1.863	Tr lluvia: 100 años
	$c' \text{ y } \phi' \text{ (prom - } \sigma \text{)}$		$c' \text{ y } \phi' \text{ (prom + } \sigma \text{)}$

- Los resultados de la modelación llevaron a que el relleno continúe estable.
- Los resultados de los factores de seguridad obtenidos, están relacionados con la pendiente de 20° (aprox.) que tiene el relleno en su parte más pronunciada.
- También están relacionados con el espesor del estrato de los materiales de relleno (relleno antrópico). Este estrato solo tiene 8.5m de espesor comparado con la altura total del relleno que es de 49m.
- El factor de seguridad promedio obtenido, en condición estática, fue de 2.47.
- El relleno presentó succiones en un tramo del espesor del estrato de la Formación Casabianca, con valores hasta de 193 kPa.
- El estrato de materiales de relleno presentó presiones de poros positivas en todos los escenarios. Sin embargo, no quedó totalmente sumergido por que se evidenciaron succiones en la superficie del relleno.

Esto se puede visualizar en la Figura 87: A una profundidad de 0m se observó una succión de 20 kPa.

Figura 87 Grafica presión de poros vs profundidad Relleno La Isla escenario ISLcMfMI250s475

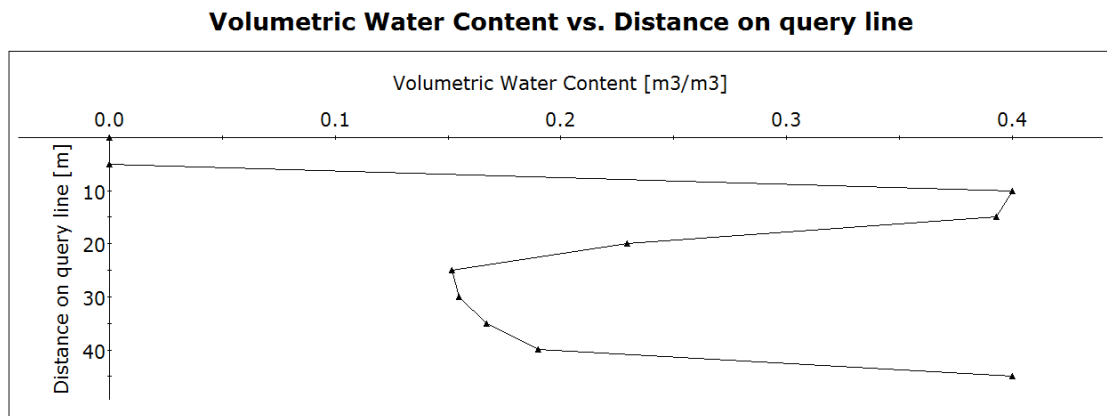


- La Figura 87 muestra que se generó una superficie impermeable entre los dos estratos del relleno. Esto se afirma por la variación de los valores de la presión de poros con la profundidad.

Iniciaron valores de presiones de poros positivas y aproximadamente a 17m de profundidad se presentaron succiones.

Esto pudo estar asociado a la diferencia de texturas de ambos estratos, las cuales a su vez determinaron sus respectivas permeabilidades.

Figura 88 Grafica Contenido volumétrico de agua vs profundidad Relleno La Isla escenario ISLcMfMI250s475



- El contenido volumétrico de agua disminuyó después de los materiales de relleno antrópico. Es decir, a los 17.4m de profundidad se generó un nivel de aguas freáticas NAF colgado. Figura 88.

- El frente húmedo sobrepasó todo el espesor de los materiales de relleno antrópico que fue de aproximadamente 8.5m y avanzó 8.9m adicionales en el estrato de la formación casabianca, es decir llegó hasta los 17.4m de profundidad. Figura 86.

- La superficie de falla, correspondiente al valor del factor de seguridad (FS) más bajo, se presentó en la zona más pendiente del relleno. La longitud de esta superficie abarcó los dos estratos del relleno.

- Los vectores del flujo mostraron que el contenido volumétrico de agua se infiltró por la superficie correspondiente al estrato de los materiales de relleno.

Avanzó hasta la superficie impermeable de la que ya se habló, saturó estos materiales y posteriormente tomó dirección hacia la salida del relleno, es decir el agua empezó a correr por la superficie más pendiente del relleno.

- La probabilidad de falla para todos los escenarios de este relleno arrojaron unos valores cercanos a cero.

Esto se debió a que los factores de seguridad obtenidos para cada uno de los escenarios evaluados en este relleno fueron mayores a 1, variando entre 1.327 y 1.863, y la probabilidad de falla está directamente relacionada con el valor del factor de seguridad.

- La aceleración sísmica máxima que se tendría que presentar para que este relleno llegue a un factor de seguridad igual a 1, sería de 0.44.

Siempre y cuando se conserven las mismas tasas de infiltración de cada escenario y se tengan en cuenta valores promedio de c y f_i para ambos estratos del relleno.

5.1.2 Relleno el Nevado (NEV)

Figura 89 Resultado modelo geotécnico FS= 1.218 Relleno El Nevado escenario NEVcMfMI250s475

Material Name	Color	Unit Weight (kN/m ³)	Strength Type	Cohesion (kN/m ²)	Phi	Water Surface	Phi _b	Air Entry
Relleno antropico	■	16.48	Mohr-Coulomb	24.03	26.97	None	0	0
Formación Casabianca	■	15.74	Mohr-Coulomb	41.1	28.74	None	0	0

Material Name	Color	Model	KS (m/s)	K2/K1	K1 Angle	WC (m ³ /m ³)	Alpha (1/m)	N
Relleno antropico	■	Curva Loamy Sand	4e-005	1	0	0.41		
Formación Casabianca	■	Van Genuchten	1.95e-007	1	0	0.4	1	1.23

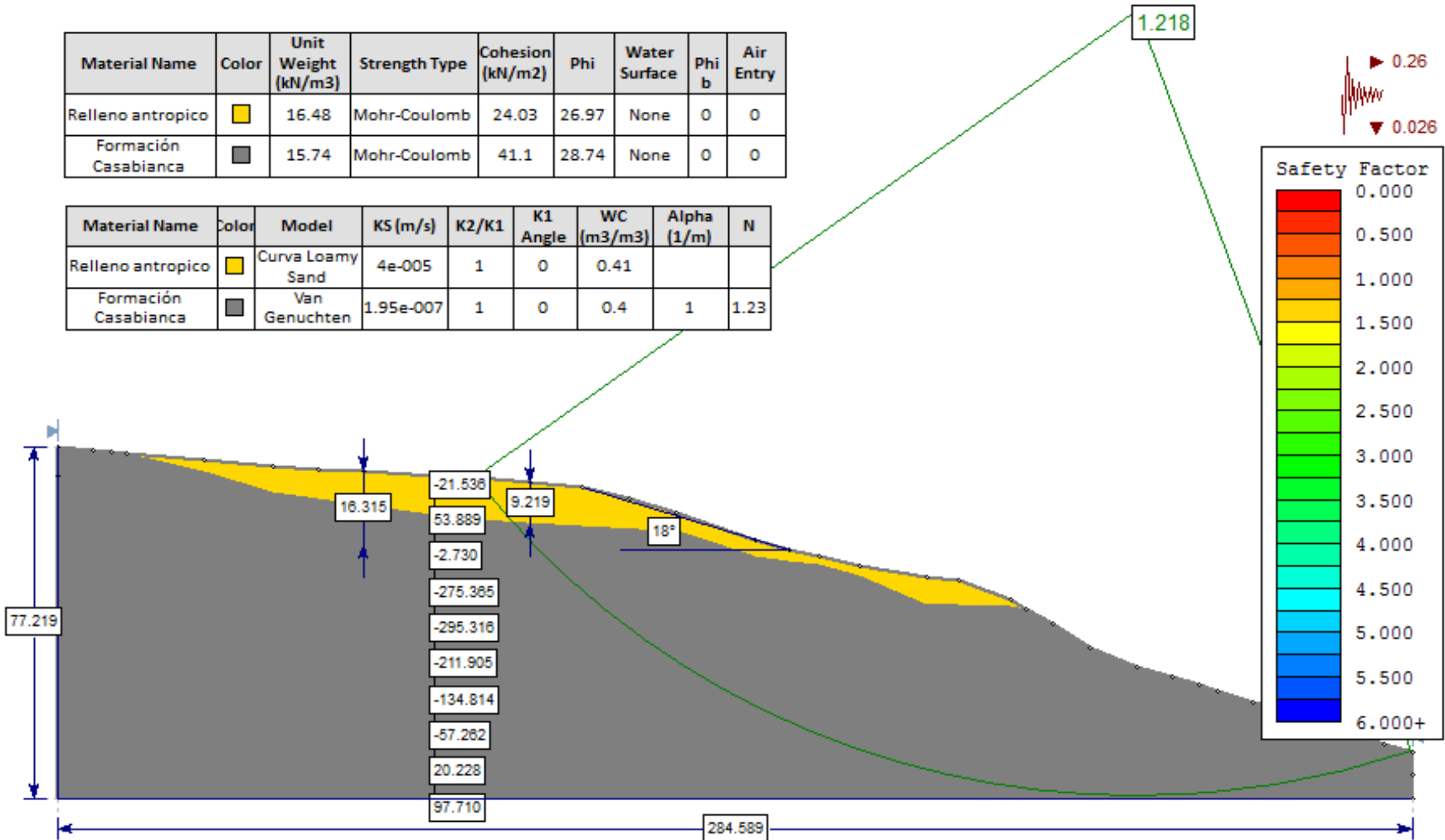
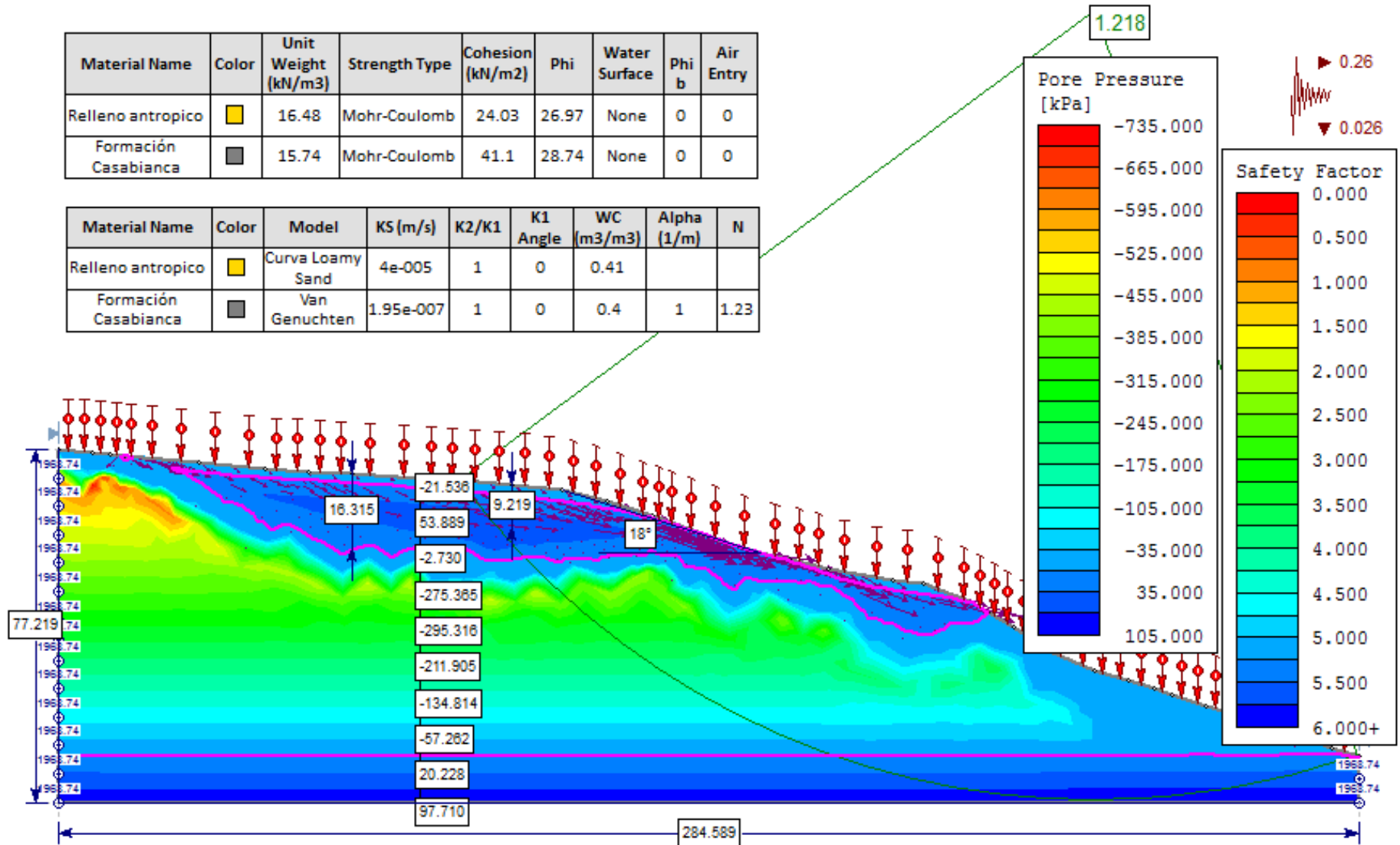


Figura 90 Resultado modelo de flujo de agua Relleno El Nevado escenario NEVcMfMI250s475 FS= 1.218



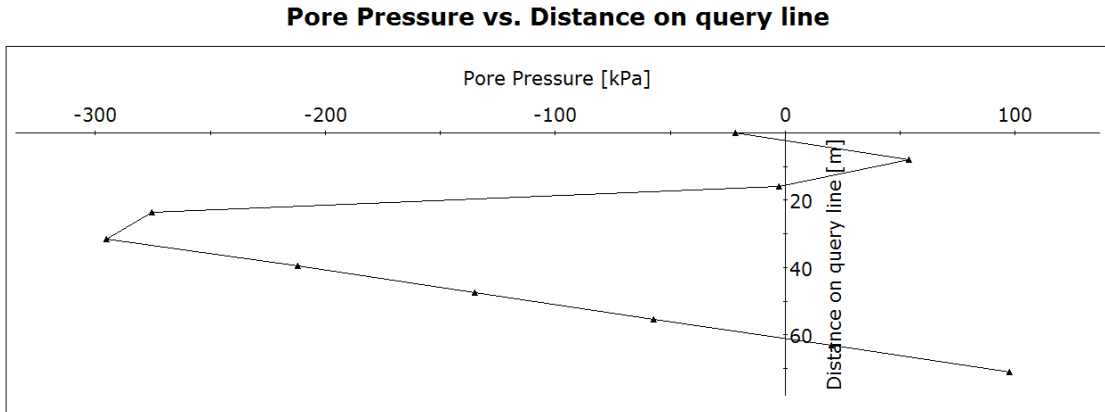
- El rango de los valores de los factores de seguridad obtenidos para los 60 escenarios de este relleno, se muestran a continuación:

Rango de valores Factor de Seguridad Relleno El Nevado			
FS Menor	Tr sismo: 475 años	FS Mayor	Tr sismo: 31 años
1.218	Tr lluvia: 250 años	1.697	Tr lluvia: 10 años
	$c' \text{ y } \phi' \text{ (prom - } \sigma)$		$c' \text{ y } \phi' \text{ (prom + } \sigma)$

- Los resultados de la modelación llevaron a que el relleno continúe estable.
- Los resultados de los factores de seguridad obtenidos, están relacionados con la pendiente de 18° (aprox.) que tiene el relleno en su parte más pronunciada.
- También están relacionados con el espesor del estrato de los materiales de relleno (relleno antrópico). Este estrato solo tiene 9.2m de espesor comparado con la altura total del relleno que es de 77m.
- El factor de seguridad promedio obtenido, en condición estática, fue de 2.24.
- El relleno presentó succiones en un tramo del espesor del estrato de la Formación Casabianca, con valores hasta de 295 kPa.
- El estrato de materiales de relleno presentó presiones de poros positivas en todos los escenarios. Sin embargo, no quedó totalmente sumergido por que se evidenciaron succiones en la superficie del relleno.

Esto se puede visualizar en la Figura 91: A una profundidad de 0m se observó una succión de 21 kPa.

Figura 91 Grafica presión de poros vs profundidad Relleno El Nevado escenario NEVcMfMI250s475

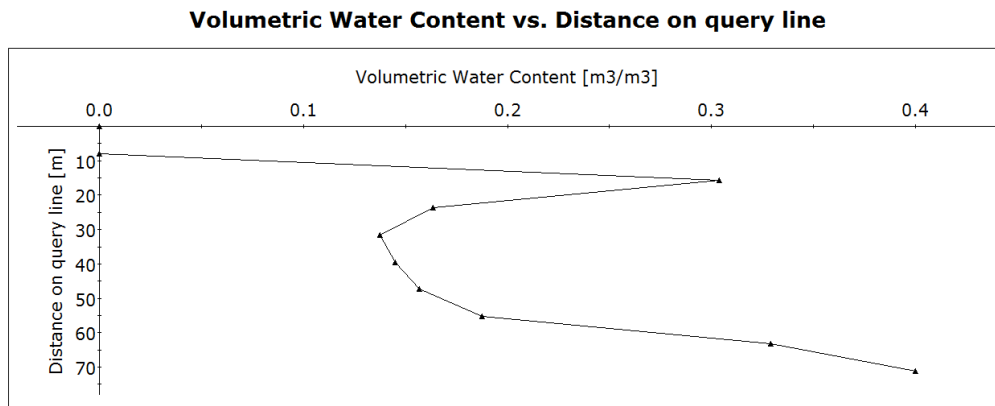


- La Figura 91 muestra que se generó una superficie impermeable entre los dos estratos del relleno. Esto se afirma por la variación de los valores de la presión de poros con la profundidad.

Iniciaron valores de presiones de poros positivas y aproximadamente a 16.5m de profundidad se presentaron succiones.

Esto pudo estar asociado a la diferencia de texturas de ambos estratos, las cuales a su vez determinaron sus respectivas permeabilidades.

Figura 92 Grafica Contenido volumétrico de agua vs profundidad Relleno El Nevado escenario NEVcMfMI250s475



- El contenido volumétrico del agua disminuyó cuando se sobrepasaron los materiales de relleno. Es decir, a los 16.5m de profundidad se generó un nivel de aguas freáticas NAF colgado. Figura 91.

- El frente húmedo sobrepasó todo el espesor de los materiales de relleno antrópico que fue de aproximadamente 9.2m y avanzó 7.1m adicionales en el estrato de la formación casabianca, es decir llegó hasta los 16.3m de profundidad. Figura 90.

- La longitud de la superficie de falla, correspondiente al valor del factor de seguridad (FS) más bajo, se presentó en la zona más pendiente del relleno. Esta longitud abarcó los dos estratos del relleno.

- Los vectores de flujo mostraron que el contenido volumétrico de agua se infiltró por la superficie correspondiente al estrato de los materiales de relleno.

Avanzó hasta la superficie impermeable de la que ya se habló, saturó estos materiales y posteriormente tomó dirección hacia la salida del modelo. No se evidenció que el agua corriera libremente por la cara del talud.

- La probabilidad de falla para todos los escenarios de este relleno arrojaron unos valores cercanos a cero.

Esto se debió a que los factores de seguridad obtenidos para cada uno de los escenarios evaluados en este relleno fueron mayores a 1, variando entre 1.218 y 1.697, y la probabilidad de falla está directamente relacionada con el valor del factor de seguridad.

- La aceleración sísmica máxima que se tendría que presentar para que este relleno llegue a un factor de seguridad igual a 1, sería de 0.38.

Siempre y cuando se conserven las mismas tasas de infiltración de cada escenario y se tengan en cuenta valores promedio de c y f_i para ambos estratos del relleno.

5.1.3 Relleno Álamos (ALM)

Figura 93 Resultado modelo geotécnico FS= 1.635 Relleno Álamos escenario ALMcMfMI250s475

Material Name	Color	Unit Weight (kN/m ³)	Strength Type	Cohesion (kN/m ²)	Phi	Water Surface	Phi b	Air Entry
Relleno antropico	■	16.48	Mohr-Coulomb	24.03	26.97	None	0	0
Formacion Casabianca	■	15.74	Mohr-Coulomb	41.1	28.74	None	0	0

Material Name	Color	Model	KS (m/s)	K2/K1	K1 Angle	WC (m ³ /m ³)	Alpha (1/m)	N
Relleno antropico	■	Curva Experimental	4e-005	1	0	0.41		
Formacion Casabianca	■	Van Genuchten	1.95e-007	1	0	0.4	1	1.23

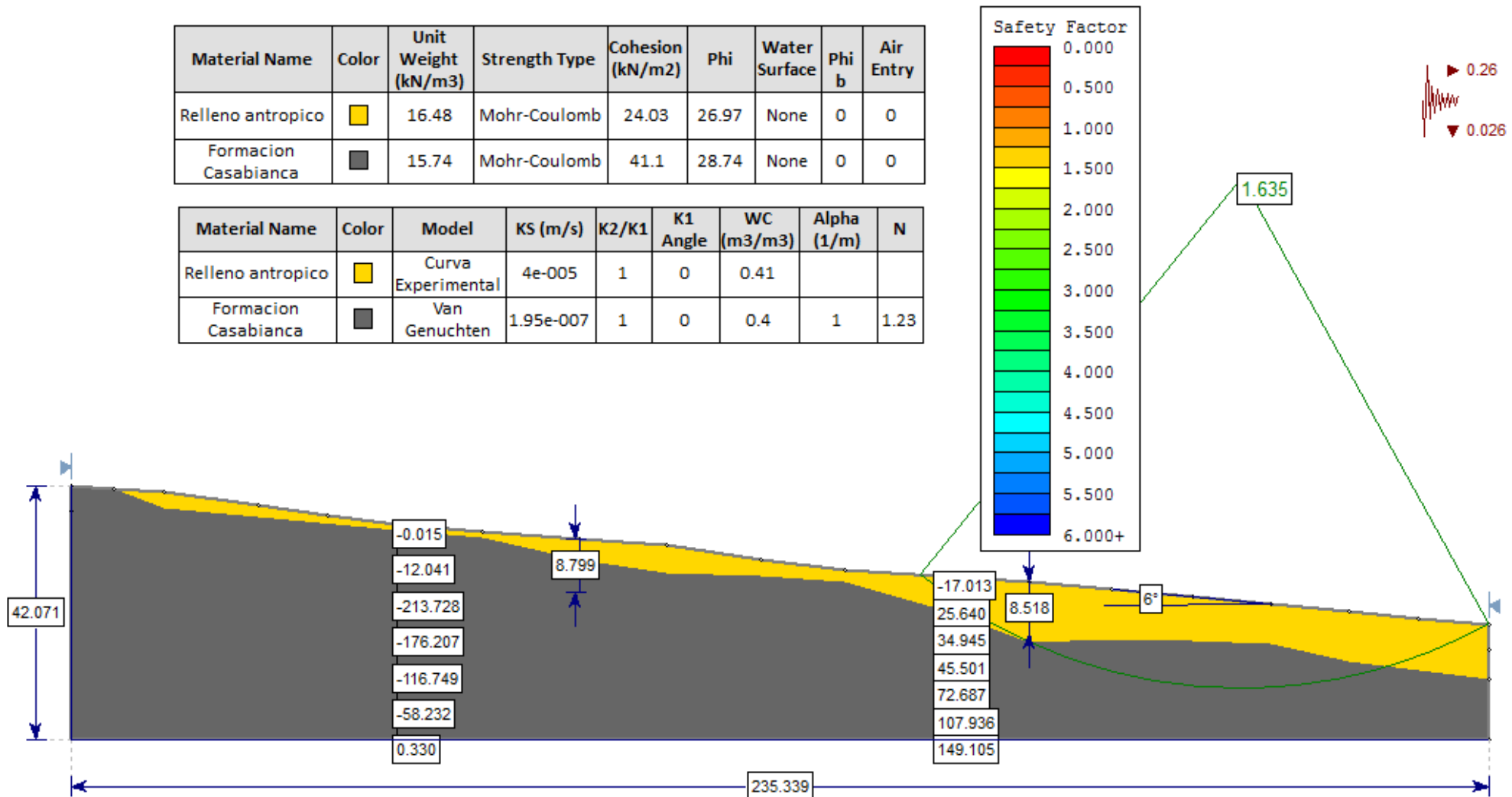
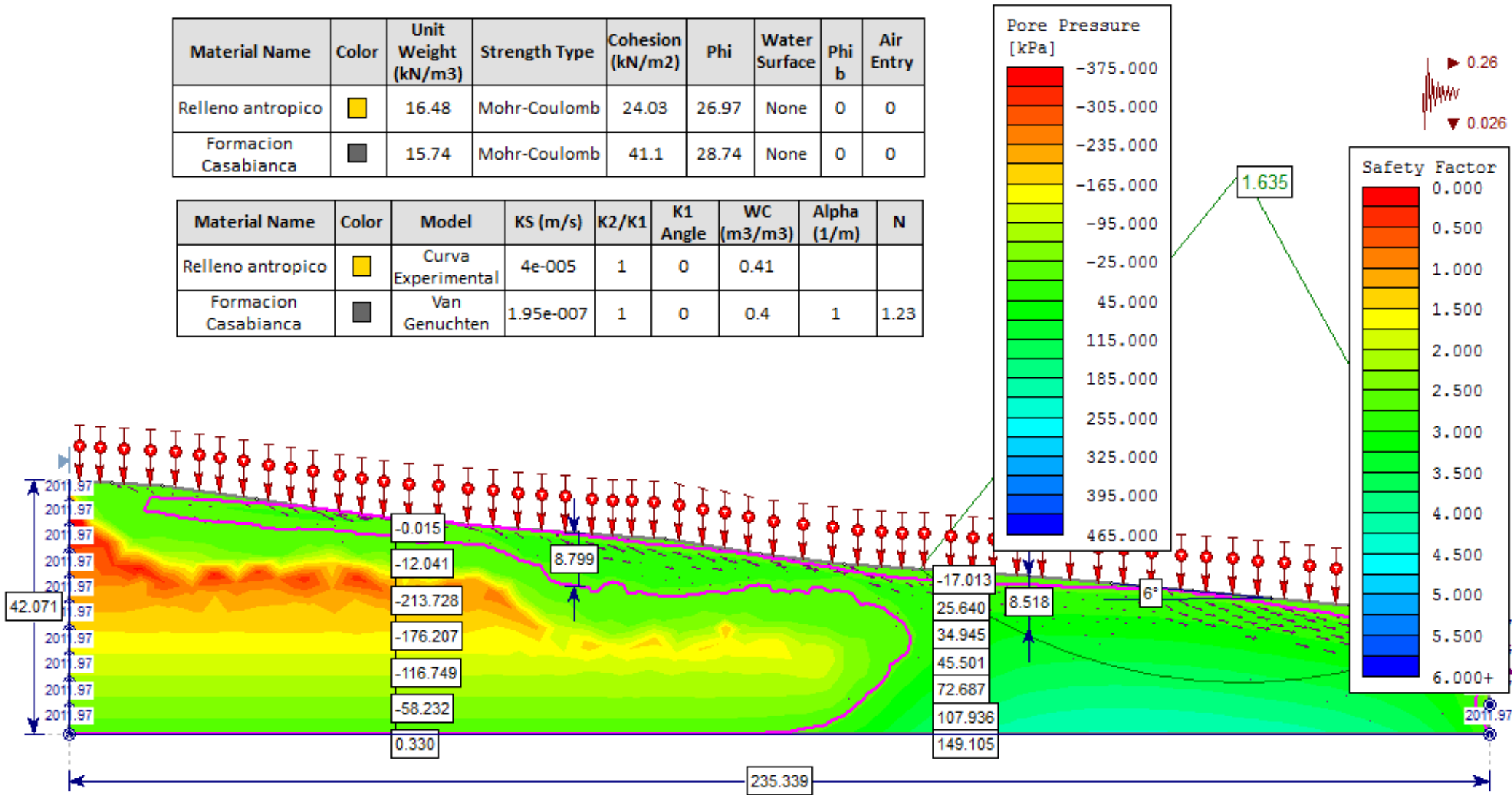


Figura 94 Resultado modelo de flujo de agua FS= 1.635 Relleno Álamos escenario ALMcMfMI250s475

Material Name	Color	Unit Weight (kN/m3)	Strength Type	Cohesion (kN/m2)	Phi	Water Surface	Phi b	Air Entry
Relleno antropico	■	16.48	Mohr-Coulomb	24.03	26.97	None	0	0
Formacion Casabianca	■	15.74	Mohr-Coulomb	41.1	28.74	None	0	0

Material Name	Color	Model	KS (m/s)	K2/K1	K1 Angle	WC (m3/m3)	Alpha (1/m)	N
Relleno antropico	■	Curva Experimental	4e-005	1	0	0.41		
Formacion Casabianca	■	Van Genuchten	1.95e-007	1	0	0.4	1	1.23

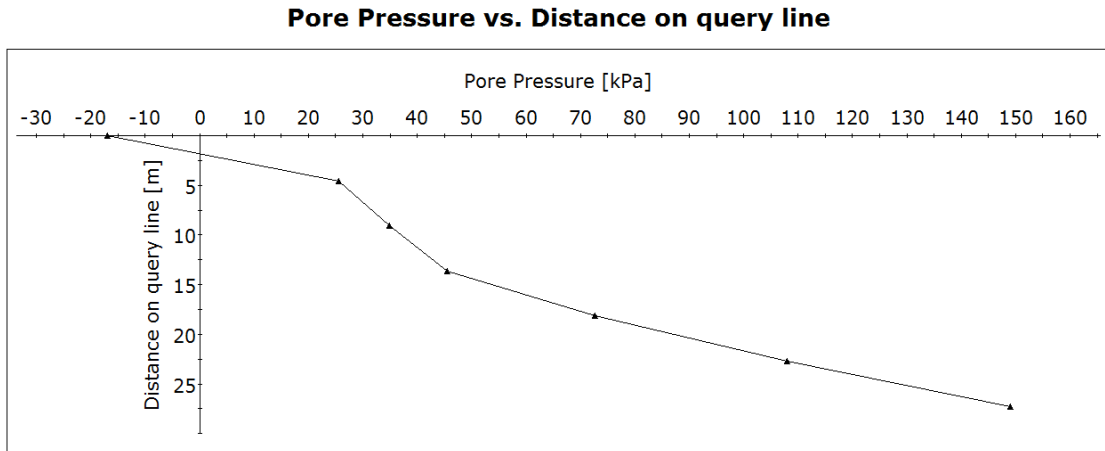


- El rango de los valores de los factores de seguridad obtenidos para los 60 escenarios de este relleno, se muestran a continuación:

Rango de valores Factor de Seguridad Relleno Alamos			
FS Menor	Tr sismo: 475 años	FS Mayor	Tr sismo: 31 años
1.635	Tr lluvia: 250 años	3.232	Tr lluvia: 2.33 años
	$c' \text{ y } \phi'$ (prom - σ)		$c' \text{ y } \phi'$ (prom + σ)

- Los resultados de la modelación llevaron a que el relleno continúe estable.
 - Los resultados de los factores de seguridad obtenidos, están relacionados con la pendiente de 6° (aprox.) que tiene el relleno en su parte más pronunciada.
 - También están relacionados con el espesor del estrato de los materiales de relleno (relleno antrópico). Este estrato solo tiene 8.5m de espesor comparado con la altura total del relleno que es de 42m.
 - El factor de seguridad promedio obtenido, en condición estática, fue de 6.23.
 - El relleno presentó succiones al lado izquierdo de su perfil, en el estrato de la Formación Casabianca, con valores hasta de 213 kPa.
 - El relleno, por el lado derecho de su perfil, presentó presiones de poros positivas en todo su espesor y en todos los escenarios. Sin embargo, no quedó totalmente sumergido por que se evidenciaron succiones en la superficie del relleno.
- Esto se puede visualizar en la Figura 95: A una profundidad de 0m se observó una succión de 17 kPa.

Figura 95 Grafica presión de poros vs profundidad Relleno Álamos escenario ALMcMfMI250s475



- En el relleno se generó, por el lado izquierdo de su perfil, una superficie impermeable entre los dos estratos del relleno. Esto se afirma por la variación de los valores de la presión de poros con la profundidad.

Iniciaron valores de presiones de poros positivas y aproximadamente a 8m de profundidad se presentaron succiones.

Esto pudo estar asociado a la diferencia de texturas de ambos estratos, las cuales a su vez determinaron sus respectivas permeabilidades.

Figura 96 Grafica Contenido volumétrico de agua vs profundidad Relleno Álamos (lado derecho) escenario ALMcMfMI250s475

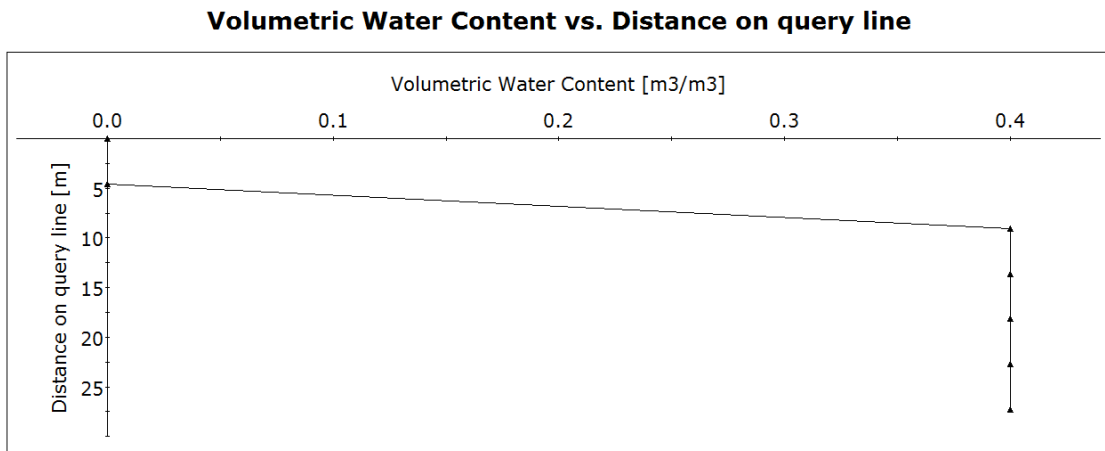
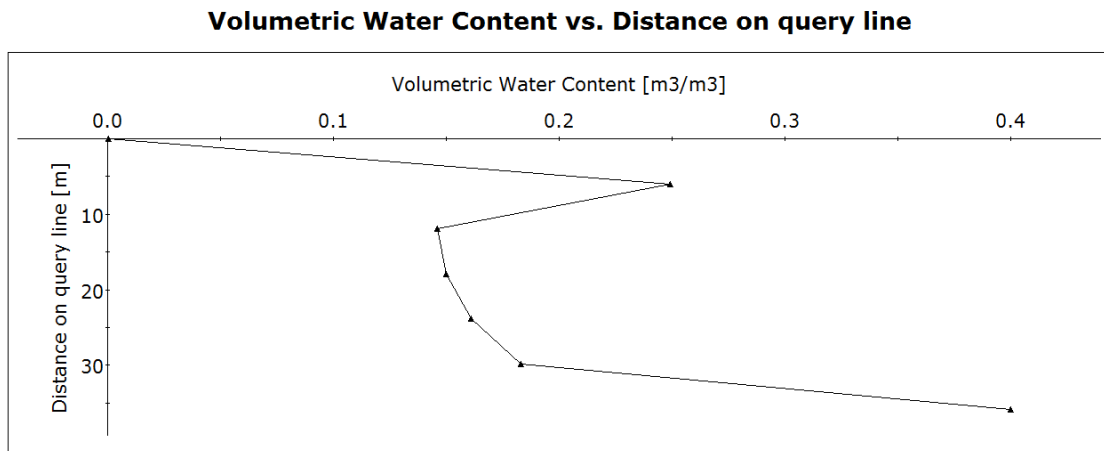


Figura 97 Grafica Contenido volumétrico de agua vs profundidad Relleno Álamos (lado Izquierdo) escenario ALMcMfMI250s475



- El contenido volumétrico de agua disminuyó al sobrepasar el estrato de materiales de relleno (lado izquierdo del perfil del relleno). Es decir, a los 8.8m de profundidad se generó un nivel de aguas freáticas NAF colgado. Figura 94.

- El frente húmedo, por el lado izquierdo del perfil del relleno, sobrepasó todo el espesor de los materiales de relleno antrópico que fue de 8.8.m. Por el lado derecho los dos estratos del relleno quedan casi sumergidos. Figura 94.

- La longitud de la superficie de falla, correspondiente al valor del factor de seguridad (FS) más bajo, se presentó en la zona más pendiente del relleno, al lado derecho del perfil. Esta longitud de la superficie abarcó los dos estratos del relleno.

- Los vectores de flujo mostraron que el contenido volumétrico del agua se infiltró por la superficie correspondiente al estrato de los materiales de relleno. Sin embargo, se saturó la parte derecha del perfil del relleno.

No se evidencio que el agua corriera libremente por la cara del talud.

- La probabilidad de falla para todos los escenarios de este relleno arrojaron unos valores cercanos a cero.

- Esto se debió a que los factores de seguridad obtenidos para cada uno de los escenarios evaluados en este relleno fueron mayores a 1, variando entre 1.635 y 3.232, y la probabilidad de falla está directamente relacionada con el valor del factor de seguridad.

- La aceleración sísmica máxima que se tendría que presentar para que este relleno llegue a un factor de seguridad igual a 1, sería de 0.55.

Siempre y cuando se conserven las mismas tasas de infiltración de cada escenario y se tengan en cuenta valores promedio de c y f_i para ambos estratos del relleno.

5.1.4 Relleno EI Palmar (PLM)

Figura 98 Resultado modelo geotécnico FS= 1.344 Relleno EI Palmar escenario PLMcMfMI250s475

Material Name	Color	Unit Weight (kN/m3)	Strength Type	Cohesion (kN/m2)	Phi	Water Surface	Phi b	Air Entry
Relleno antropico	■	16.48	Mohr-Coulomb	24.03	26.97	None	0	0
Formacion Casabianca	■	15.74	Mohr-Coulomb	41.1	28.74	None	0	0

Material Name	Color	Model	KS (m/s)	K2/K1	K1 Angle	WC (m3/m3)	Alpha (1/m)	N
Relleno antropico	■	Curva Experimental	4e-005	1	0	0.41		
Formacion Casabianca	■	Van Genuchten	1.95e-007	1	0	0.4	1	1.23

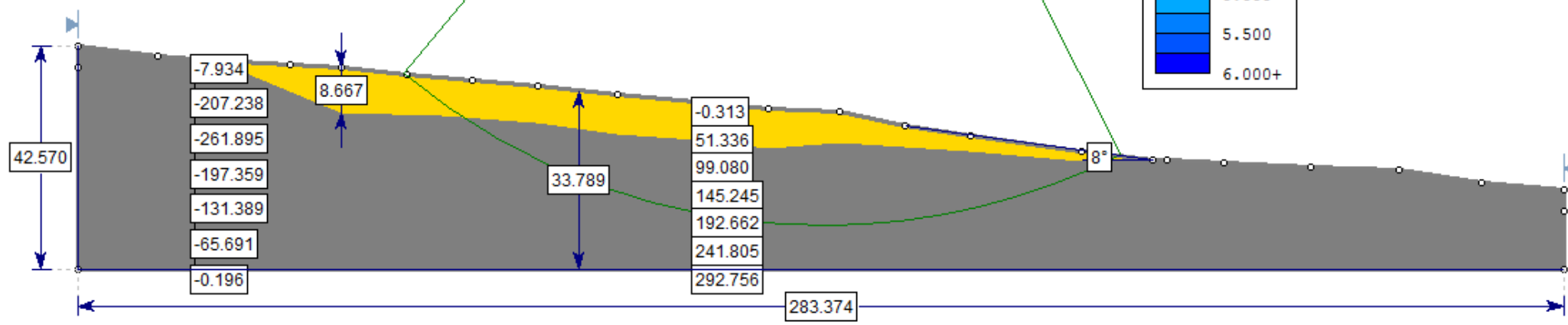
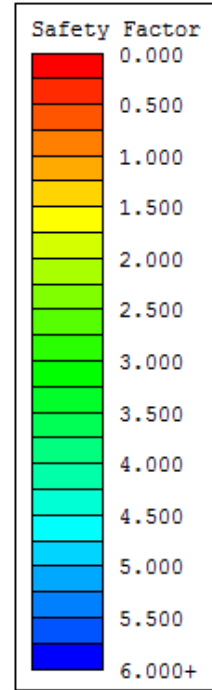
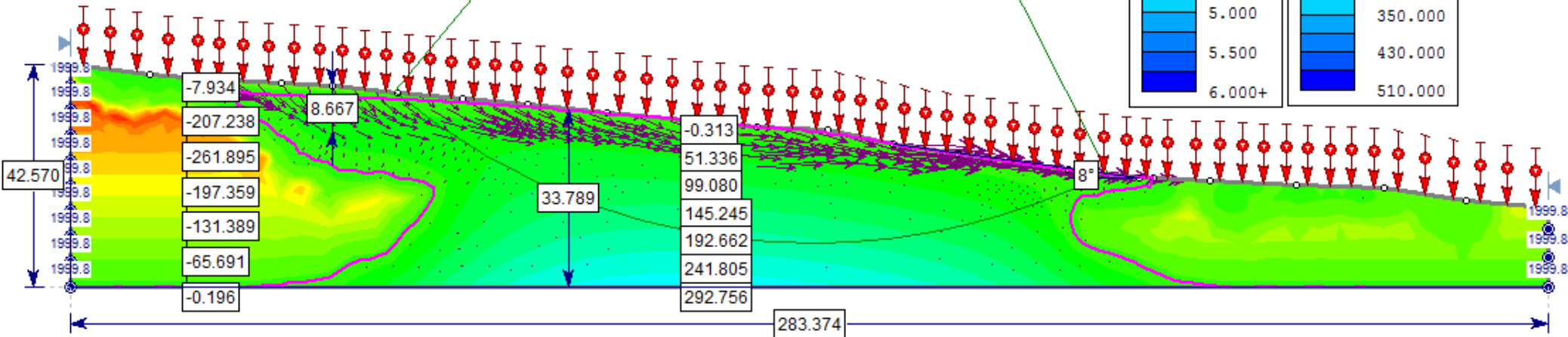
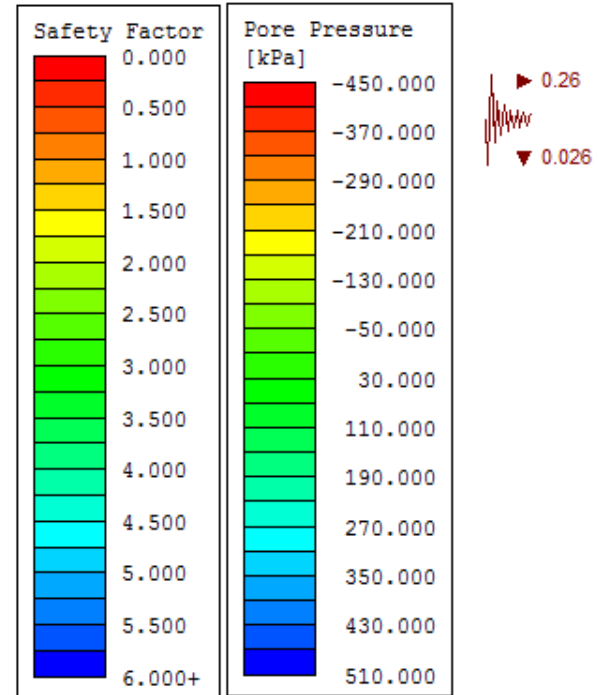


Figura 99 Resultado modelo de flujo de agua FS= 1.344 Relleno EI Palmar escenario PLMcMfMI250s475

Material Name	Color	Unit Weight (kN/m ³)	Strength Type	Cohesion (kN/m ²)	Phi	Water Surface	Phi b	Air Entry
Relleno antropico	■	16.48	Mohr-Coulomb	24.03	26.97	None	0	0
Formacion Casabianca	■	15.74	Mohr-Coulomb	41.1	28.74	None	0	0

Material Name	Color	Model	KS (m/s)	K2/K1	K1 Angle	WC (m ³ /m ³)	Alpha (1/m)	N
Relleno antropico	■	Curva Experimental	4e-005	1	0	0.41		
Formacion Casabianca	■	Van Genuchten	1.95e-007	1	0	0.4	1	1.23

1.344



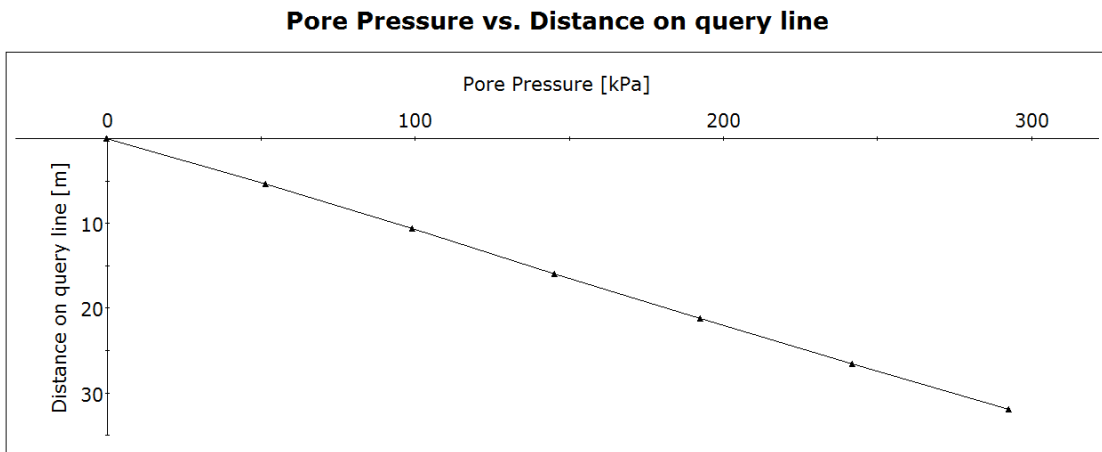
- El rango de los valores de los factores de seguridad obtenidos para los 60 escenarios de este relleno, se muestran a continuación:

Rango de valores Factor de Seguridad Relleno El Palmar			
FS Menor	Tr sismo: 475 años	FS Mayor	Tr sismo: 31 años
1.344	Tr lluvia: 250 años	2.297	Tr lluvia: 10 años
	$c' \text{ y } \phi' \text{ (prom - } \sigma)$		$c' \text{ y } \phi' \text{ (prom + } \sigma)$

- Los resultados de la modelación llevaron a que el relleno continúe estable.
- Los resultados de los factores de seguridad obtenidos, están relacionados con la pendiente de 8° (aprox.) que tiene el relleno en su parte más pronunciada.
- También están relacionados con el espesor del estrato de los materiales de relleno (relleno antrópico). Este estrato solo tiene 8.6m de espesor comparado con la altura del relleno que es de 42.5m.
- El factor de seguridad promedio obtenido, en condición estática, fue de 4.28.
- El relleno presentó succiones al lado izquierdo y derecho de su perfil, en el estrato de la Formación Casabianca, con valores hasta de 261 kPa.
- El relleno, por la parte central de su perfil, presentó presiones de poros positivas en todo su espesor y en todos los escenarios. Quedó totalmente sumergido.

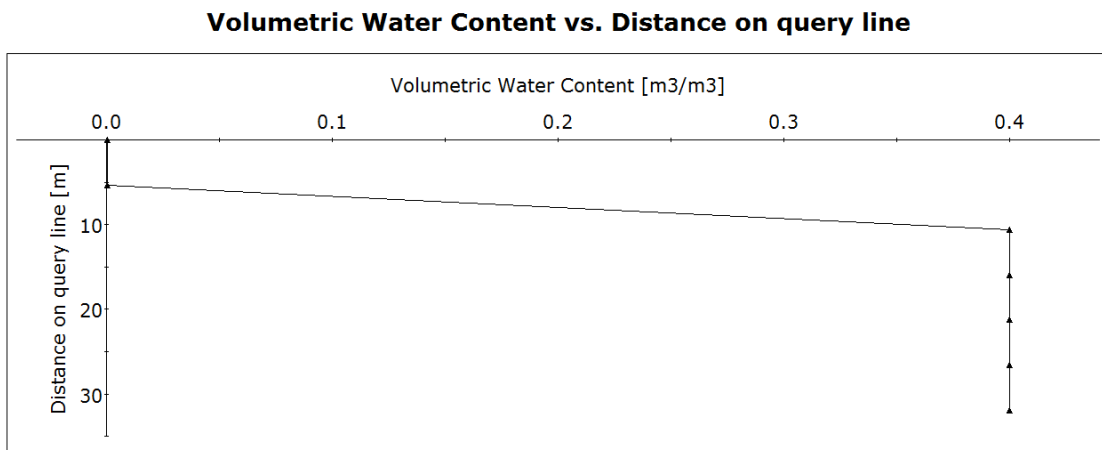
Esto se puede visualizar en la Figura 100.

Figura 100 Grafica presión de poros vs profundidad Relleno El Palmar escenario PLMcMfMI250s475



- No se evidenció que se generara una superficie impermeable entre los dos estratos del relleno.
- El contenido volumétrico de agua aumentó con la profundidad. Figura 101.

Figura 101 Grafica Contenido volumétrico de agua vs profundidad Relleno El Palmar escenario PLMcMfMI250s475



- El frente húmedo avanzó por la parte central del perfil del relleno, hasta saturar todo el relleno. Por otra parte, a los lados, derecho e izquierdo del perfil del relleno, se presentaron succiones. Figura 99.

- La longitud de la superficie de falla, correspondiente al valor del factor de seguridad (FS) más bajo, se presentó en casi toda la longitud del estrato de los materiales de relleno. Esta longitud abarcó los dos estratos del relleno.

- Los vectores de flujo mostraron que el contenido volumétrico del agua se infiltró por la superficie correspondiente al estrato de los materiales de relleno. Sin embargo, se saturó solo la parte central del perfil del relleno.

No se evidencio que el agua corriera libremente por la cara del talud.

- La probabilidad de falla para todos los escenarios de este relleno arrojaron unos valores cercanos a cero.

Esto se debió a que los factores de seguridad obtenidos para cada uno de los escenarios evaluados en este relleno fueron mayores a 1, variando entre 1.344 y 2.297, y la probabilidad de falla está directamente relacionada con el valor del factor de seguridad.

- La aceleración sísmica máxima que se tendría que presentar para que este relleno llegue a un factor de seguridad igual a 1, sería de 0.40.

Siempre y cuando se conserven las mismas tasas de infiltración de cada escenario y se tengan en cuenta valores promedio de c y f_i para ambos estratos del relleno.

5.1.5 Relleno Alamos-Velez (AVL)

Figura 102 Resultado modelo geotécnico FS= 1.599 Relleno Alamos-Velez escenario AVLcMfMI250s475

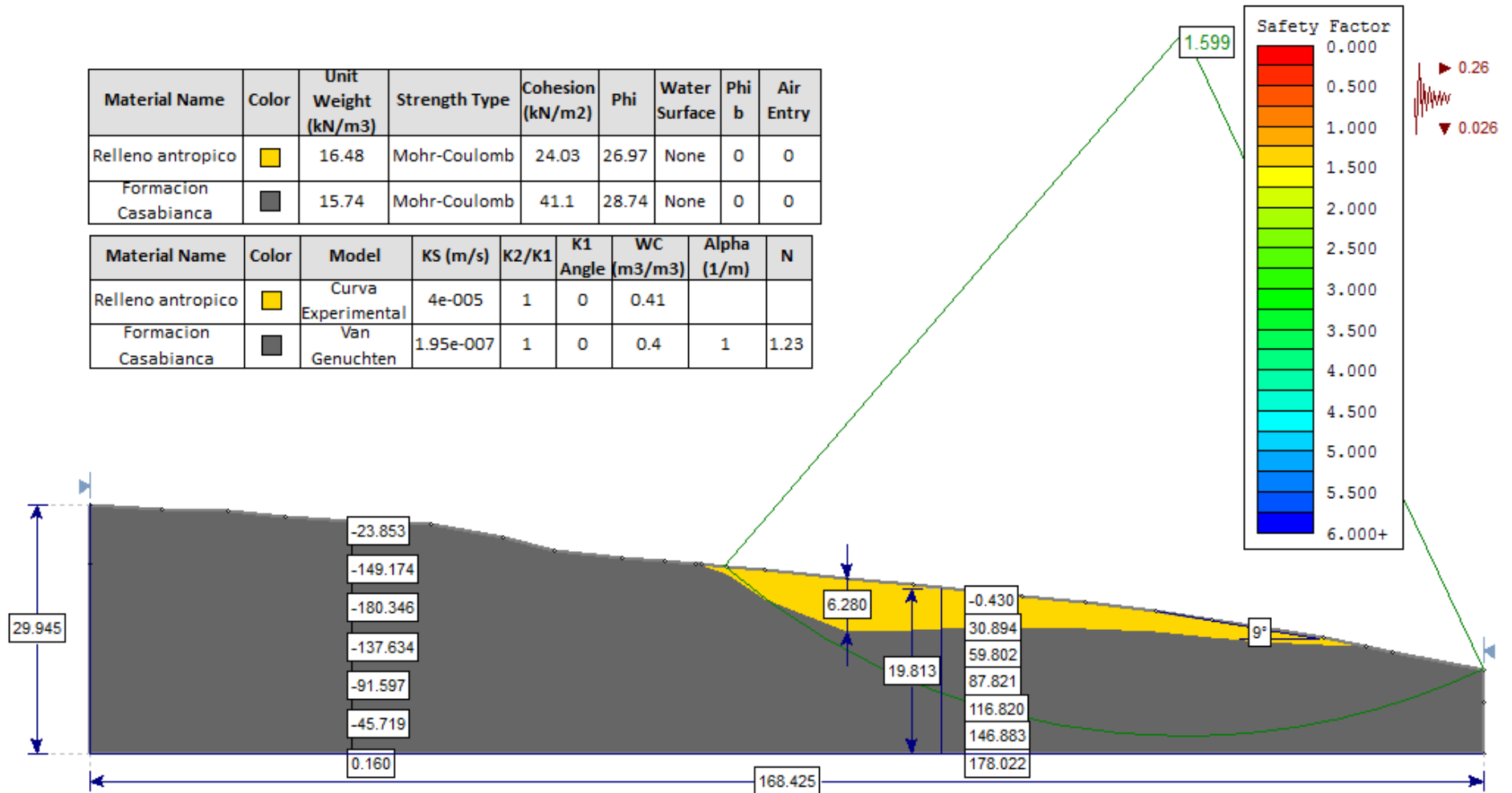
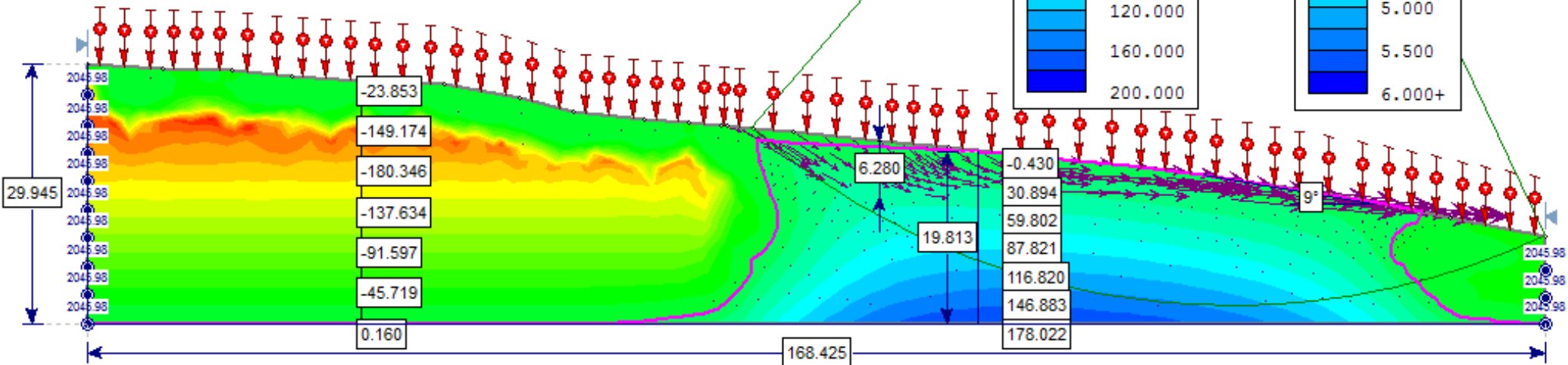
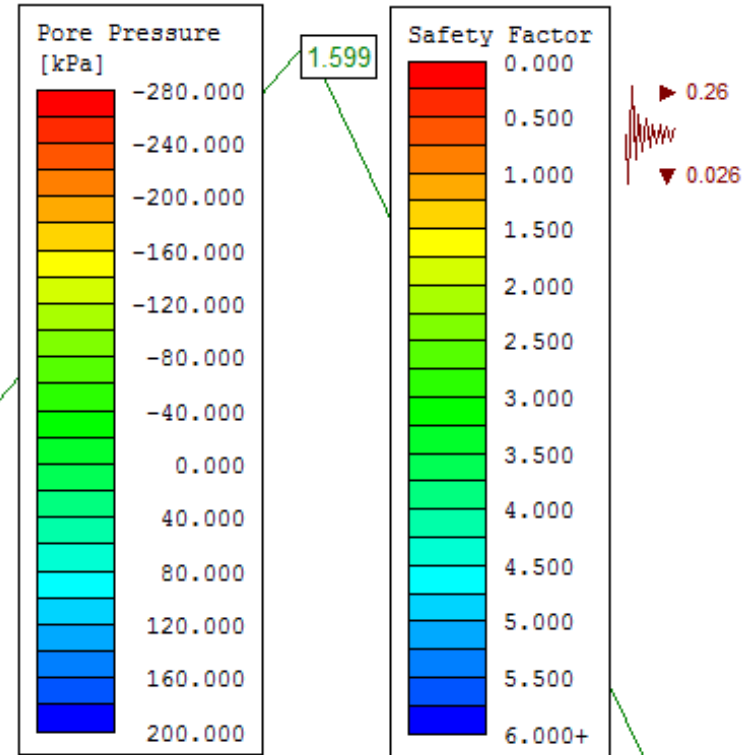


Figura 103 Resultado modelo de flujo de agua FS= 1.599 Relleno Alamos-Velez escenario AVLcMfMI250s475

Material Name	Color	Unit Weight (kN/m ³)	Strength Type	Cohesion (kN/m ²)	Phi	Water Surface	Phi b	Air Entry
Relleno antropico	■	16.48	Mohr-Coulomb	24.03	26.97	None	0	0
Formacion Casabianca	■	15.74	Mohr-Coulomb	41.1	28.74	None	0	0

Material Name	Color	Model	KS (m/s)	K2/K1	K1 Angle	WC (m ³ /m ³)	Alpha (1/m)	N
Relleno antropico	■	Curva Experimental	4e-005	1	0	0.41		
Formacion Casabianca	■	Van Genuchten	1.95e-007	1	0	0.4	1	1.23



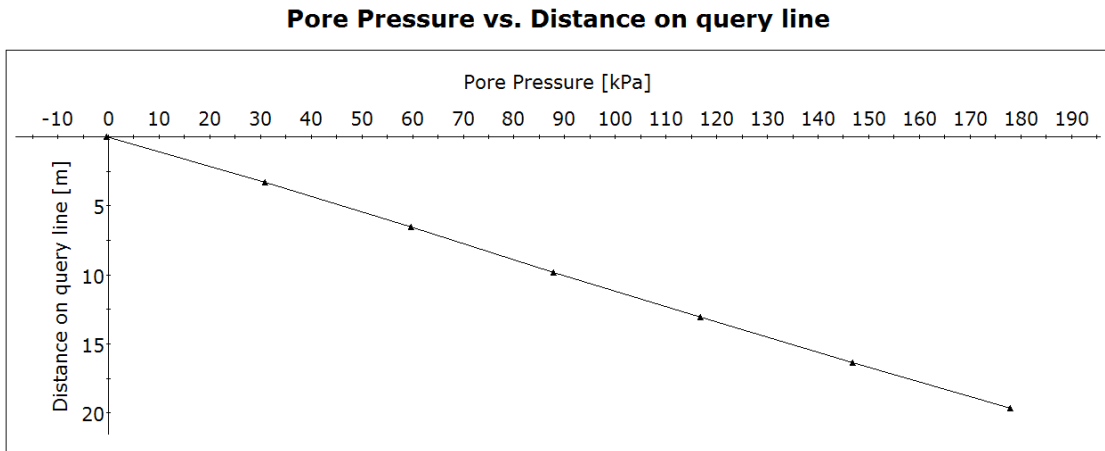
- El rango de los valores de los factores de seguridad obtenidos para los 60 escenarios de este relleno, se muestran a continuación:

Rango de valores Factor de Seguridad Relleno Alamos-Velez			
FS Menor	Tr sismo: 475 años	FS Mayor	Tr sismo: 31 años
1.599	Tr lluvia: 250 años	2.642	Tr lluvia: 2.33 años
	$c' \text{ y } \phi' \text{ (prom - } \sigma \text{)}$		$c' \text{ y } \phi' \text{ (prom + } \sigma \text{)}$

- Los resultados de la modelación llevaron a que el relleno continúe estable.
- Los resultados de los factores de seguridad obtenidos, están relacionados con la pendiente de 9° (aprox.) que tiene el relleno en su parte más pronunciada.
- También están relacionados con el espesor del estrato de los materiales de relleno (relleno antrópico). Este estrato solo tiene 6.2m de espesor comparado con la altura del relleno que es de 30m.
- El factor de seguridad promedio obtenido, en condición estática, fue de 4.63.
- El relleno presentó succiones al lado izquierdo de su perfil, en el estrato de la Formación Casabianca, con valores hasta de 180 kPa.
- El relleno, por la parte derecha de su perfil, presentó presiones de poros positivas en todo su espesor y en todos los escenarios. Quedó totalmente sumergido.

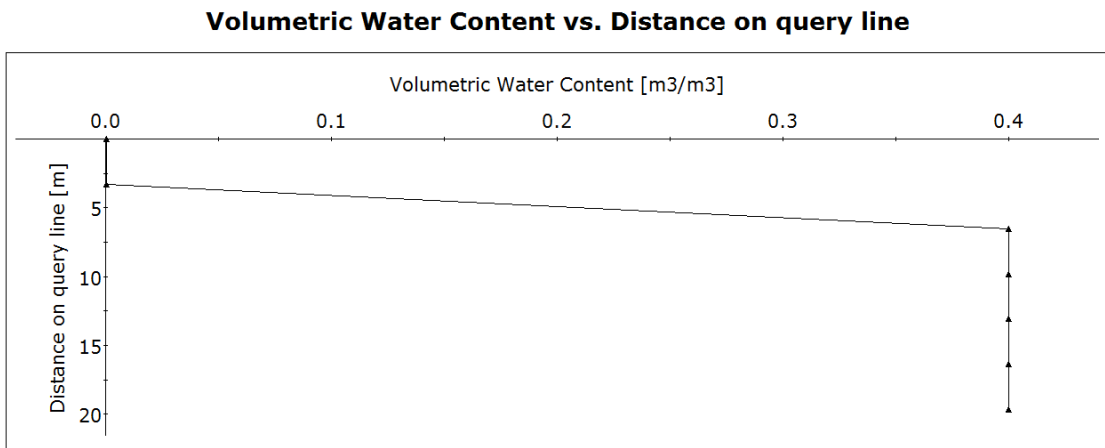
Esto se puede visualizar en la Figura 104.

Figura 104 Grafica presión de poros vs profundidad Relleno Alamos-Velez escenario AVLcMfMI250s475



- No se evidenció que se generara una superficie impermeable entre los dos estratos del relleno.
- El contenido volumétrico de agua aumentó con la profundidad. Figura 105.

Figura 105 Grafica Contenido volumétrico de agua vs profundidad Relleno Álamos Vélez escenario AVLcMfMI250s475



- El frente húmedo avanzó por el estrato correspondiente a los materiales de relleno (lado derecho del perfil), hasta saturar todo el relleno. Por otra parte, el lado izquierdo del perfil del relleno, permaneció seco, presentando succiones. Figura 103.

- La longitud de la superficie de falla, correspondiente al valor del factor de seguridad (FS) más bajo, se presentó en casi toda la longitud del estrato de los materiales de relleno. Dicha longitud abarcó los dos estratos del relleno.

- Los vectores de flujo mostraron que el contenido volumétrico del agua se infiltró por la superficie correspondiente al estrato de los materiales de relleno (lado derecho del perfil) saturándose todo el relleno en esta zona.

Posteriormente el agua tomó dirección hacia la salida del relleno, es decir el agua empezó a correr por la cara del talud del relleno.

- La probabilidad de falla para todos los escenarios de este relleno arrojaron unos valores cercanos a cero.

Esto se debió a que los factores de seguridad obtenidos para cada uno de los escenarios evaluados en este relleno fueron mayores a 1, variando entre 1.599 y 2.642, y la probabilidad de falla está directamente relacionada con el valor del factor de seguridad.

- La aceleración sísmica máxima que se tendría que presentar para que este relleno llegue a un factor de seguridad igual a 1, sería de 0.52.

Siempre y cuando se conserven las mismas tasas de infiltración de cada escenario y se tengan en cuenta valores promedio de c y f_i para ambos estratos del relleno.

5.1.6 Relleno Camino del Palmar (CPM)

Figura 106 Resultado modelo geotécnico FS= 1.221 Relleno Camino del Palmar escenario CPMcMfMI250s475

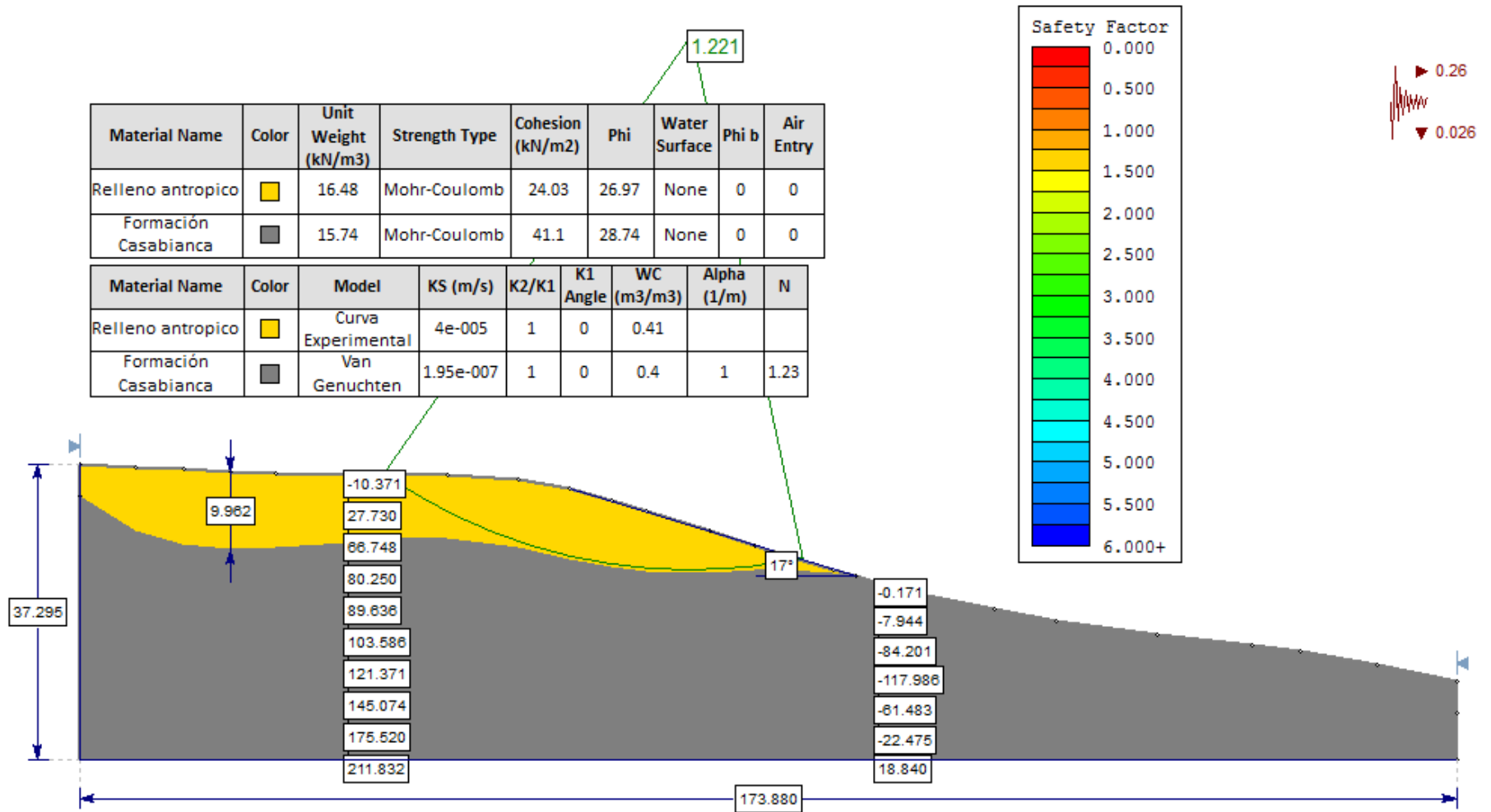
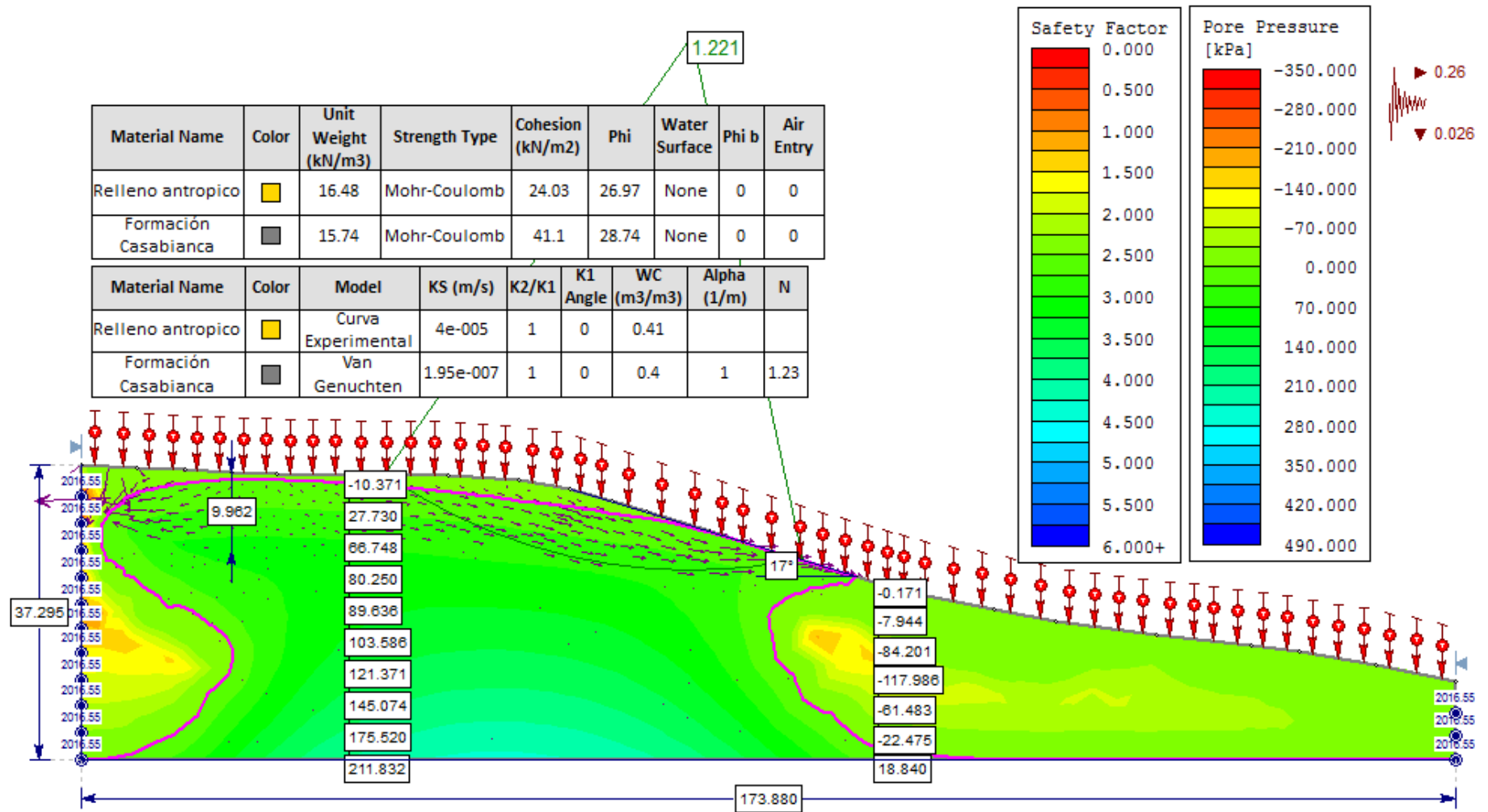


Figura 107 Resultado modelo de flujo de agua FS= 1.221 Relleno Camino del Palmar escenario CPMcMfMI250s475



- El rango de los valores de los factores de seguridad obtenidos para los 60 escenarios de este relleno, se muestran a continuación:

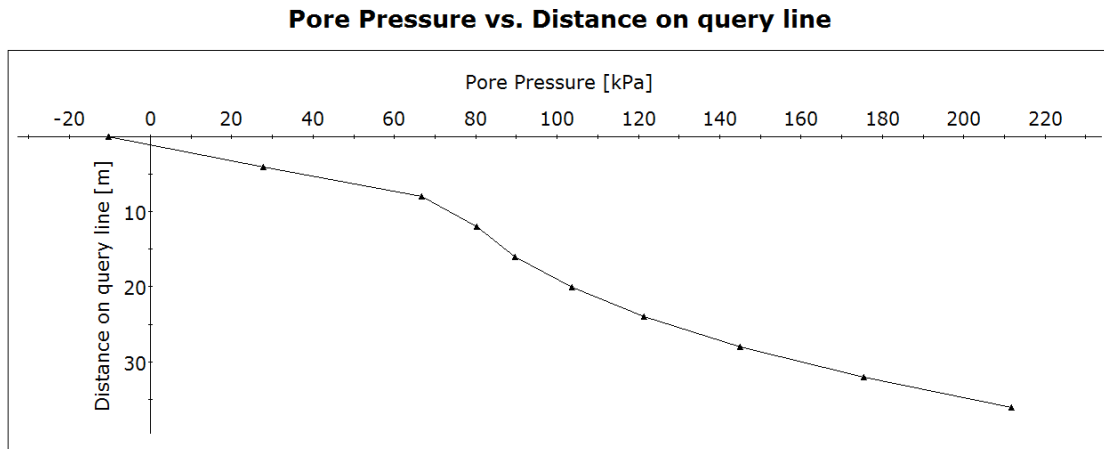
Rango de valores Factor de Seguridad Relleno Camino del Palmar			
FS Menor	Tr sismo: 475 años	FS Mayor	Tr sismo: 31 años
1.219	Tr lluvia: 100 años	2.221	Tr lluvia: 10 años
	$c' \text{ y } \phi' \text{ (prom - } \sigma \text{)}$		$c' \text{ y } \phi' \text{ (prom + } \sigma \text{)}$

- Los resultados de la modelación llevaron a que el relleno continúe estable.
- Los resultados de los factores de seguridad obtenidos, están relacionados con la pendiente de 17° (aprox.) que tiene el relleno en su parte más pronunciada.
- También están relacionados con el espesor del estrato de los materiales de relleno (relleno antrópico). Este estrato solo tiene 10m de espesor comparado con la altura del relleno que es de 37m.
- El factor de seguridad promedio obtenido, en condición estática, fue de 3.01.
- El relleno presentó succiones al lado derecho de su perfil, en el estrato de la Formación Casabianca, con valores hasta de 117 kPa.
- El relleno, en parte izquierda de su perfil, presentó presiones de poros positivas en todo su espesor y en todos los escenarios.

Sin embargo no quedó totalmente sumergido ya que en la superficie se evidenciaron valores de succiones de 10 kPa.

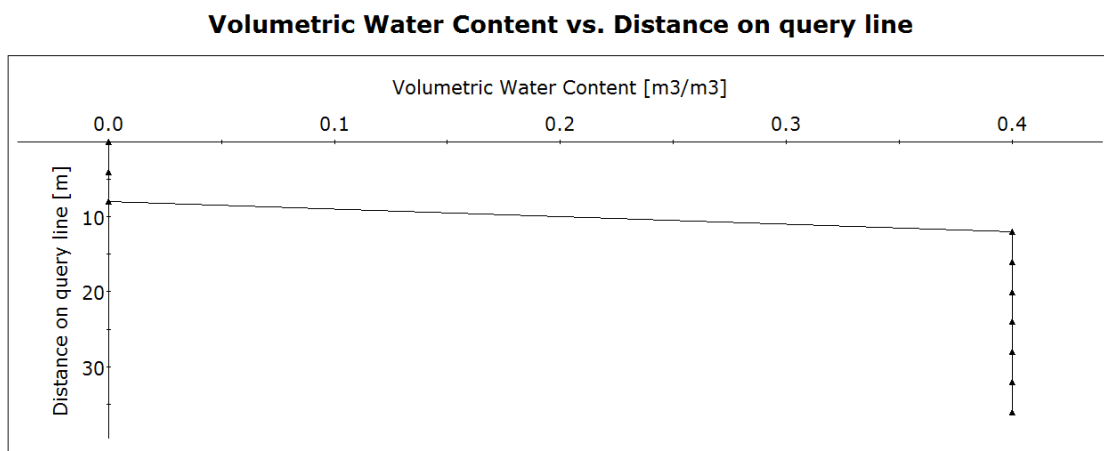
Esto se puede visualizar en la Figura 108.

Figura 108 Grafica presión de poros vs profundidad Relleno Camino del Palmar escenario CPMcMfMI250s475



- No se evidenció que se generara una superficie impermeable entre los dos estratos del relleno.
- El contenido volumétrico de agua aumentó con la profundidad. Figura 109.

Figura 109 Grafica Contenido volumétrico de agua vs profundidad Relleno Camino del Palmar escenario CPMcMfMI250s475



- El frente húmedo avanzó por el estrato de materiales de relleno (lado izquierdo del perfil), hasta saturar todo el relleno. Por otra parte, el lado derecho del perfil del relleno, presentó succiones. Figura 107.

- La longitud de la superficie de falla, correspondiente al valor del factor de seguridad (FS) más bajo, se presentó en aproximadamente la mitad de toda la longitud del estrato de los materiales de relleno.

Esta superficie abarcó únicamente el estrato correspondiente al de materiales de relleno.

- Los vectores de flujo mostraron que el contenido volumétrico del agua se infiltró por la superficie correspondiente al estrato de los materiales de relleno (lado izquierdo del perfil) saturándose todo el relleno en esta zona.

Posteriormente el agua tomó dirección hacia la salida del relleno, es decir el agua empezó a correr por la cara del talud del relleno.

- La probabilidad de falla para todos los escenarios de este relleno arrojaron unos valores cercanos a cero.

Esto se debió a que los factores de seguridad obtenidos para cada uno de los escenarios evaluados en este relleno fueron mayores a 1, variando entre 1.219 y 2.221, y la probabilidad de falla está directamente relacionada con el valor del factor de seguridad.

- La aceleración sísmica máxima que se tendría que presentar para que este relleno llegue a un factor de seguridad igual a 1, sería de 0.47.

Siempre y cuando se conserven las mismas tasas de infiltración de cada escenario y se tengan en cuenta valores promedio de c y f_i para ambos estratos del relleno.

5.1.7 Relleno Villa Carmenza (VCM)

Figura 110 Resultado modelo geotécnico FS= 0.941 Relleno Villa Carmenza escenario VCMcMfMI250s475

Material Name	Color	Unit Weight (kN/m3)	Strength Type	Cohesion (kN/m2)	Phi	Water Surface	Phi b	Air Entry
Relleno antropico	■	16.48	Mohr-Coulomb	24.03	26.97	None	0	0
Formación Casabianca	■	15.74	Mohr-Coulomb	41.1	28.74	None	0	0

Material Name	Color	Model	KS (m/s)	K2/K1	K1 Angle	WC (m3/m3)	Alpha (1/m)	N
Relleno antropico	■	Curva Experimental	4e-005	1	0	0.41		
Formación Casabianca	■	Van Genuchten	1.95e-007	1	0	0.4	1	1.23

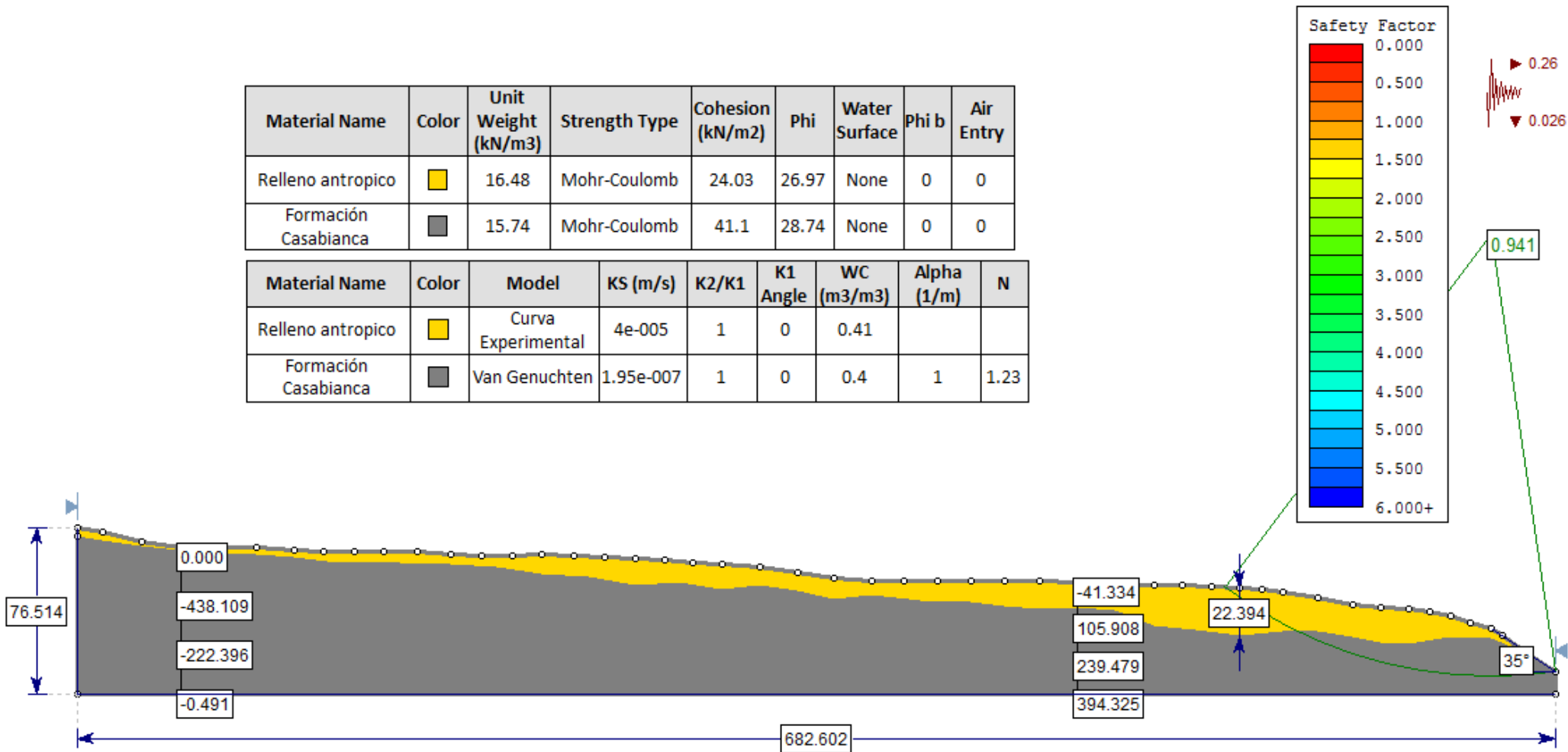
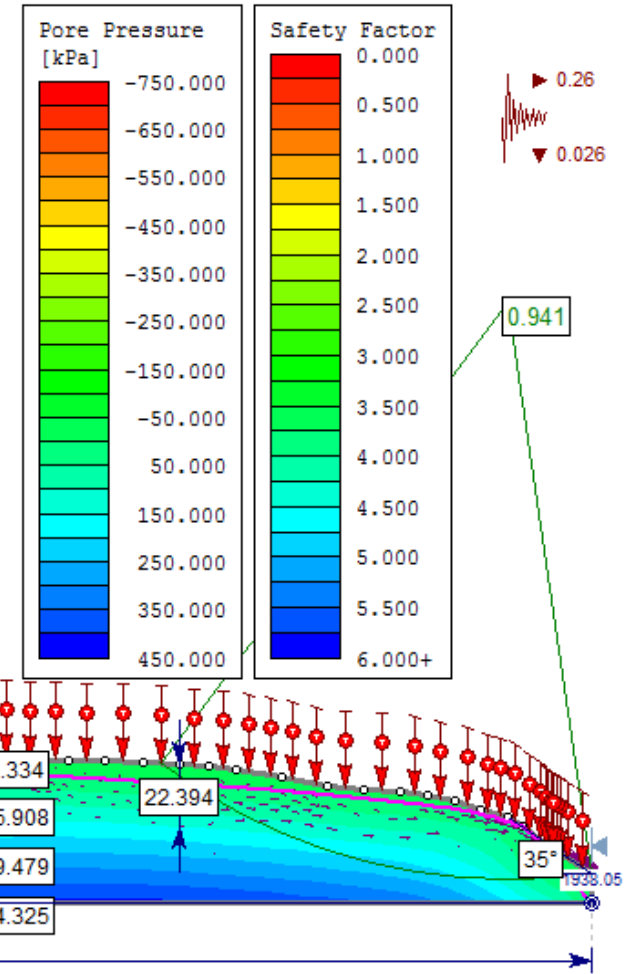


Figura 111 Resultado modelo de flujo de agua FS= 0.941 Relleno Villa Carmenza escenario VCMcMfMI250s475

Material Name	Color	Unit Weight (kN/m3)	Strength Type	Cohesion (kN/m2)	Phi	Water Surface	Phi b	Air Entry
Relleno antropico	■	16.48	Mohr-Coulomb	24.03	26.97	None	0	0
Formación Casabianca	■	15.74	Mohr-Coulomb	41.1	28.74	None	0	0

Material Name	Color	Model	KS (m/s)	K2/K1	K1 Angle	WC (m3/m3)	Alpha (1/m)	N
Relleno antropico	■	Curva Experimental	4e-005	1	0	0.41		
Formación Casabianca	■	Van Genuchten	1.95e-007	1	0	0.4	1	1.23



- El rango de los valores de los factores de seguridad obtenidos para los 60 escenarios de este relleno, se muestran a continuación:

Rango de valores Factor de Seguridad Relleno Villacarmenza			
FS Menor	Tr sismo: 475 años	FS Mayor	Tr sismo: 31 años
0.937	Tr lluvia: 100 años	1.117	Tr lluvia: 2.33 años
	c' y ϕ' (prom - σ)		c' y ϕ' (prom + σ)

- Los resultados de la modelación llevaron a que el relleno presentara inestabilidad en los escenarios a los que se les asignó el detonante sismo para un periodo de retorno (Tr) de 475 años. A este periodo de retorno correspondió una aceleración sísmica máxima de 0.26g.

Los valores de los factores de seguridad obtenidos para estos escenarios fueron ligeramente inferiores a 1.

- Sin embargo, para el resto de escenarios de este relleno, se obtuvieron valores de factores de seguridad ligeramente superiores a 1.

Esto indicó, que en general, la modelación llevo a que el relleno presentara inestabilidad en todos sus escenarios.

- Los resultados de los factores de seguridad obtenidos, están relacionados con la pendiente alta de 35° (aprox.) que tiene el relleno en la cara del talud, que es donde se presentó la superficie de falla.

- También están relacionados con el espesor del estrato de los materiales de relleno (relleno antrópico). Este estrato tiene 22m de espesor comparado con la altura del relleno que es de 76m.

- El factor de seguridad promedio obtenido, en condición estática, fue de 1.62.

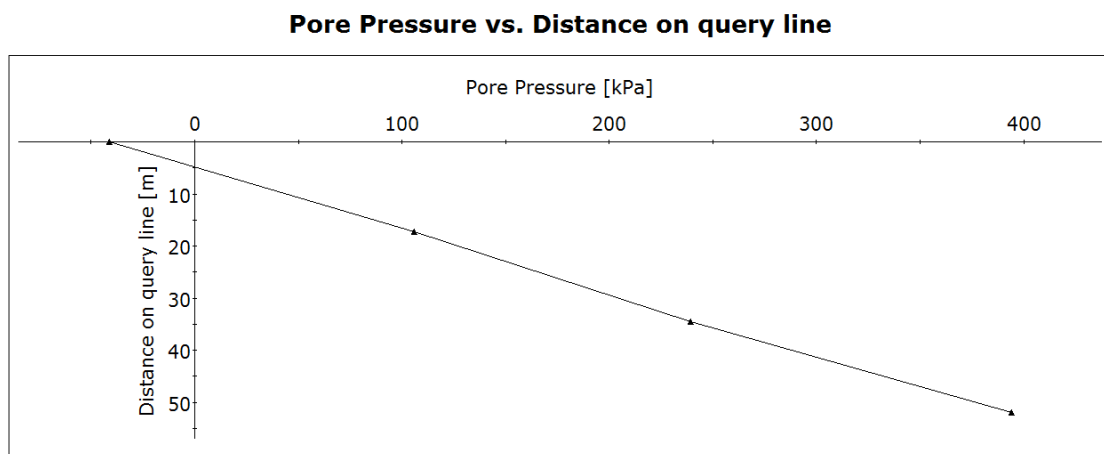
- El relleno presentó succiones al lado izquierdo de su perfil, en el estrato de la Formación Casabianca, con valores hasta de 438 kPa. Figura 111.

- El relleno, en parte derecha de su perfil, presentó presiones de poros positivas en todo su espesor y en todos los escenarios. Figura 112.

Sin embargo no quedó totalmente sumergido ya que en la superficie se evidenciaron valores de succiones de 41 kPa.

Esto se puede visualizar en la Figura 112.

Figura 112 Grafica presión de poros vs profundidad Relleno Villa Carmenza escenario VCMcMfMI250s475

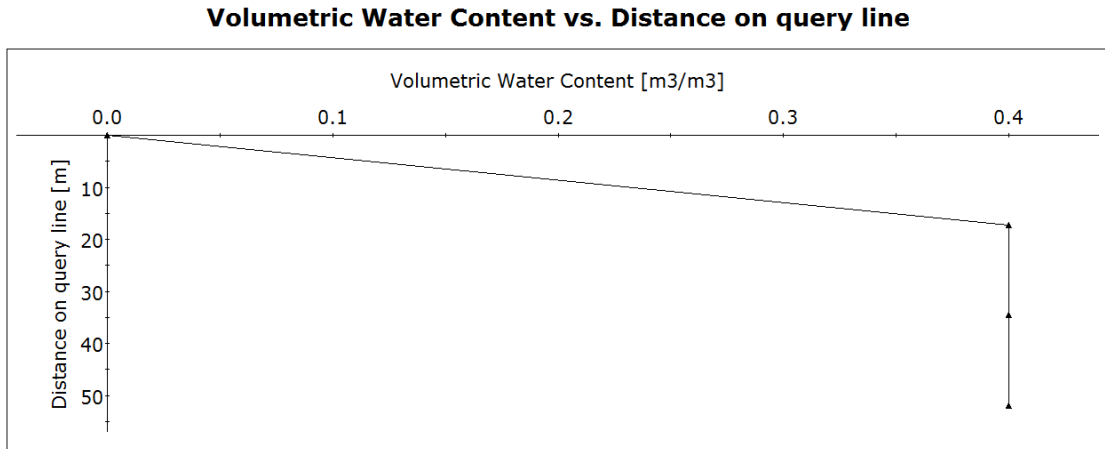


- En el relleno se generó, por el lado izquierdo de su perfil, una superficie impermeable entre los dos estratos del relleno.

Esto pudo estar asociado a la diferencia de texturas de ambos estratos, las cuales a su vez determinaron sus respectivas permeabilidades.

- El contenido volumétrico de agua, por el lado derecho del perfil del relleno, aumentó con la profundidad. Figura 111.

Figura 113 Grafica Contenido volumétrico de agua vs profundidad Relleno Villa Carmenza escenario VCMcMfMI250s475



- Se generó un nivel de aguas freáticas NAF colgado en el lado izquierdo del perfil del relleno).Figura 111.

- El frente húmedo, por el lado derecho, avanzó hasta que los dos estratos del relleno quedaron casi sumergidos. Figura 111.

- La longitud de la superficie de falla, correspondiente al valor del factor de seguridad (FS) más bajo, se presentó en la zona más pendiente del relleno, al lado derecho del perfil. Esta longitud de la superficie abarcó los dos estratos del relleno.

- Los vectores de flujo mostraron que el contenido volumétrico del agua se infiltró por la superficie correspondiente al estrato de los materiales de relleno. Sin embargo, se saturó la parte derecha del perfil del relleno.

Se evidenció que el agua corrió por la cara del talud, luego de saturar los dos estratos del relleno.

- La probabilidad de falla para todos los escenarios de este relleno arrojaron unos valores mínimamente superiores a cero.

- Esto se debió a que los factores de seguridad obtenidos para cada uno de los escenarios evaluados en este relleno, variaron entre 0.937 y 1.117, y la probabilidad de falla está directamente relacionada con el valor del factor de seguridad.

5.1.8 Relleno Bajo Prado (BPD)

Figura 114 Resultado modelo geotécnico FS= 1.496 Relleno Bajo Prado escenario BPDcMfMI250s475

Material Name	Color	Unit Weight (kN/m3)	Strength Type	Cohesion (kN/m2)	Phi	Water Surface	Phi b	Air Entry
Relleno antropico	■	16.48	Mohr-Coulomb	24.03	26.97	None	0	0
Formacion Casabianca	■	15.74	Mohr-Coulomb	41.1	28.74	None	0	0

Material Name	Color	Model	KS (m/s)	K2/K1	K1 Angle	WC (m3/m3)	Alpha (1/m)	N
Relleno antropico	■	Curva Experimental	4e-005	1	0	0.41		
Formacion Casabianca	■	Van Genuchten	1.95e-007	1	0	0.4	1	1.23

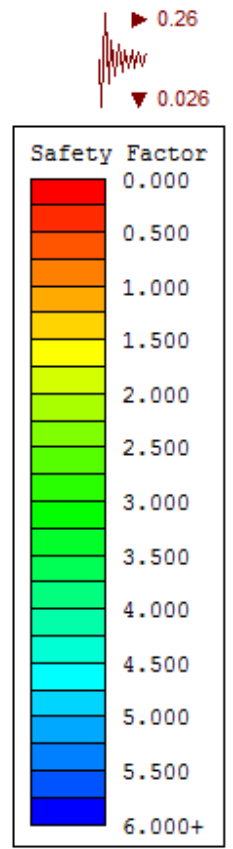
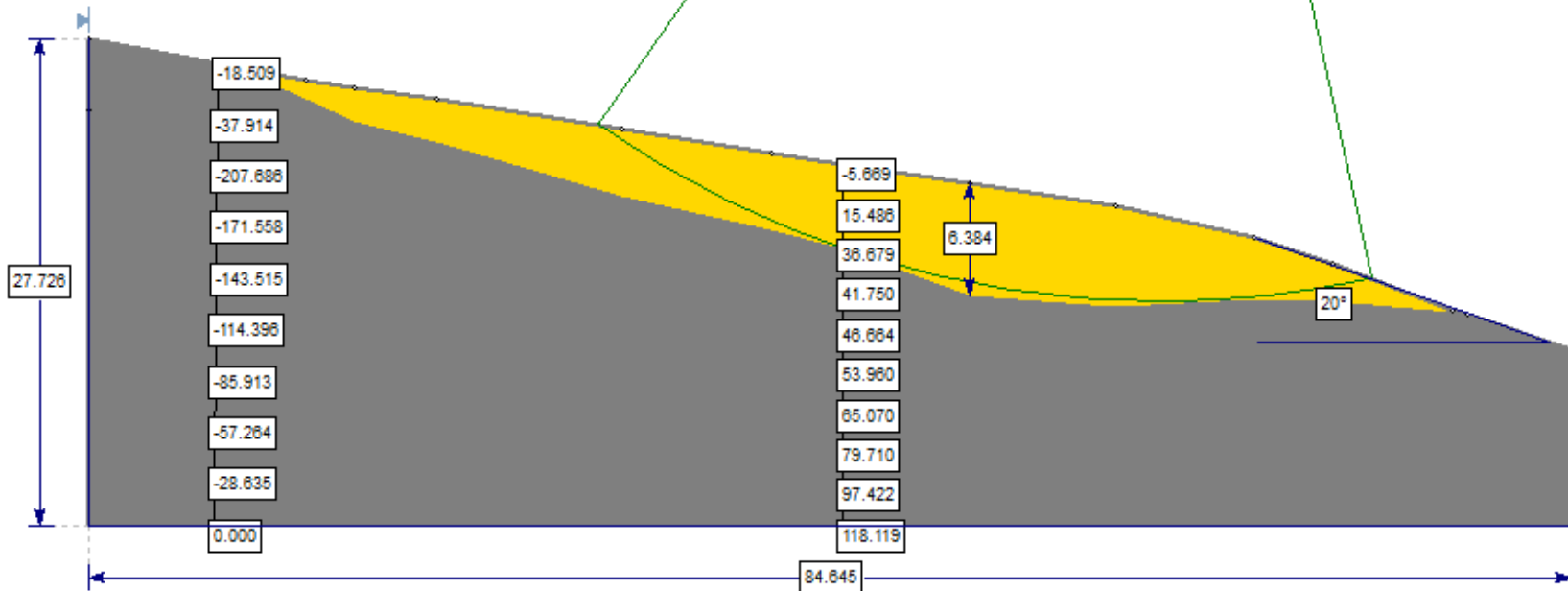
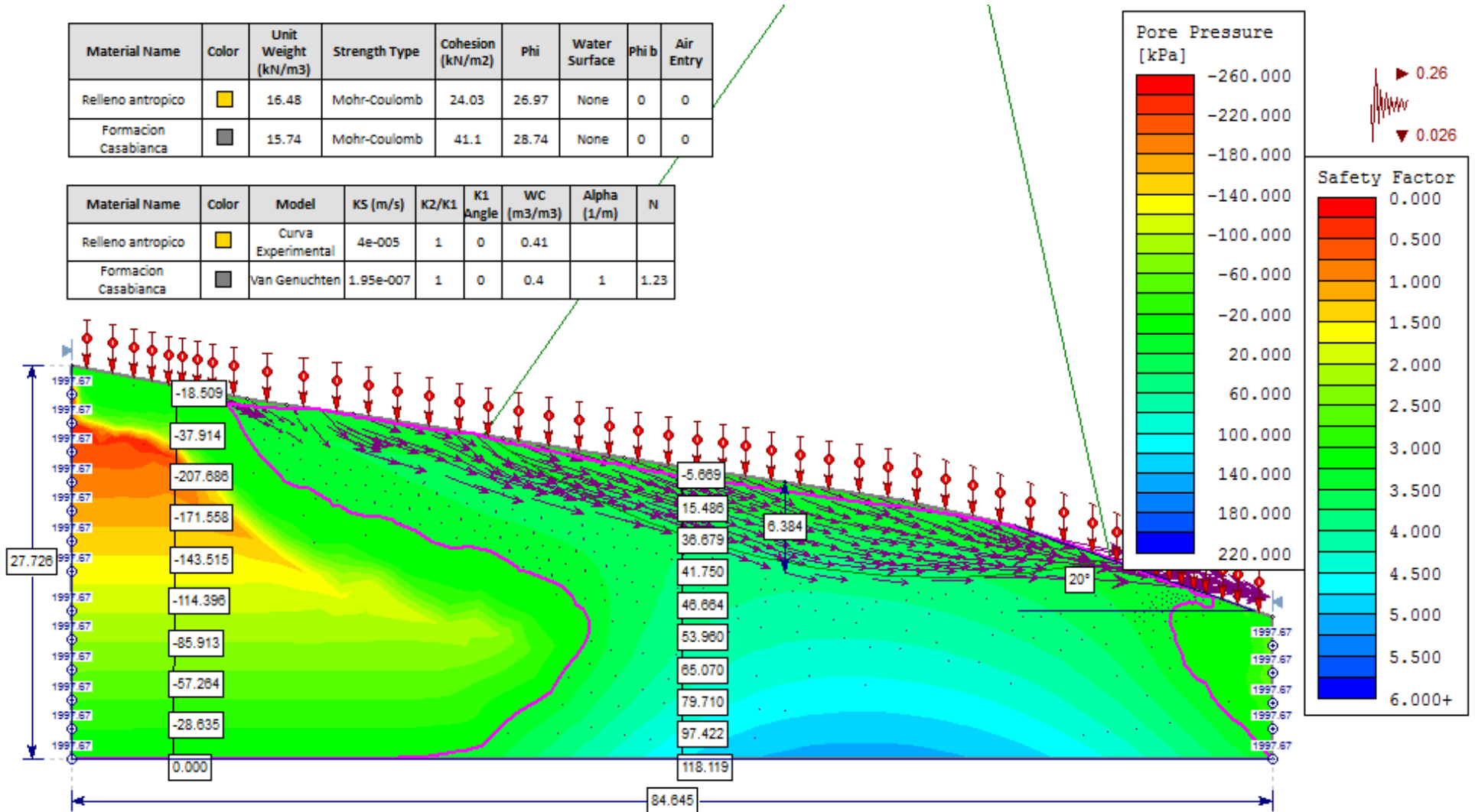


Figura 115 Resultado modelo de flujo de agua FS= 1.496 Relleno Bajo Prado escenario BPDcMfMI250s475



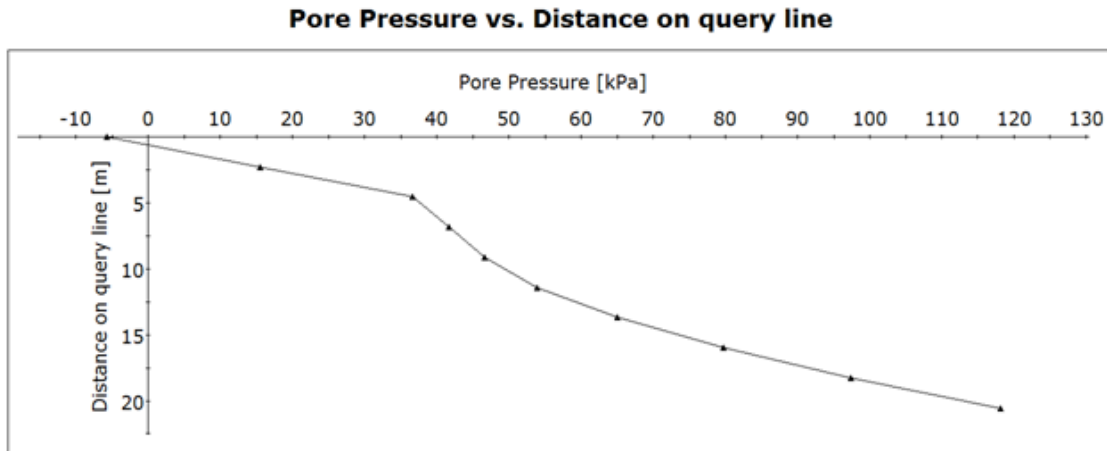
- El rango de los valores de los factores de seguridad de los 60 escenarios de este relleno se muestran a continuación:

Rango de valores Factor de Seguridad Relleno Bajo Prado			
FS Menor	Tr sismo: 475 años	FS Mayor	Tr sismo: 31 años
1.496	Tr lluvia: 250 años	2.531	Tr lluvia: 10 años
	c' y ϕ' (prom - σ)		c' y ϕ' (prom + σ)

- Los resultados de la modelación llevaron a que el relleno continúe estable.
- Los resultados de los factores de seguridad obtenidos, están relacionados con la pendiente de 20° (aprox.) que tiene el relleno en su parte más pronunciada.
- También están relacionados con el espesor del estrato de los materiales de relleno (relleno antrópico). Este estrato solo tiene 6.3m de espesor comparado con la altura total del relleno que es de 27m.
- El factor de seguridad promedio obtenido, en condición estática, fue de 3.51.
- El relleno, en el lado izquierdo de su perfil, presentó succiones en el estrato de la Formación Casabianca, con valores hasta de 207 kPa.
- El estrato de materiales de relleno presentó presiones de poros positivas en todos los escenarios. Sin embargo, no quedó totalmente sumergido por que se evidenciaron succiones en la superficie del relleno.

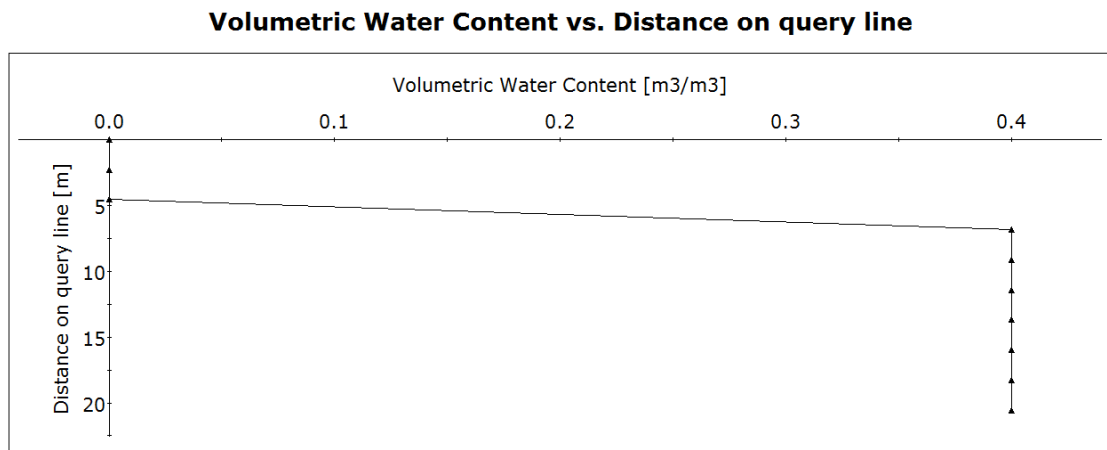
Esto se puede visualizar en la Figura 116: A una profundidad de 0m se observó una succión de 5 kPa.

Figura 116 Grafica presión de poros vs profundidad Relleno Bajo Prado escenario BPDcMfMI250s475



- No se evidenció que se generara una superficie impermeable entre los dos estratos del relleno.
- El contenido volumétrico de agua aumentó con la profundidad. Figura 117.

Figura 117 Grafica Contenido volumétrico de agua vs profundidad Relleno Bajo Prado escenario BPDcMfMI250s475



- El frente húmedo avanzó por el estrato correspondiente a los materiales de relleno (lado central y derecho del perfil), hasta saturar todo el relleno. Por otra parte, el lado izquierdo del perfil del relleno, permaneció seco, presentando succiones. Figura 115.

- La longitud de la superficie de falla, correspondiente al valor del factor de seguridad (FS) más bajo, se presentó en casi toda la longitud del estrato de los materiales de relleno, en la parte más pendiente del relleno. Dicha longitud abarcó únicamente el estrato de materiales de relleno.

- Los vectores de flujo mostraron que el contenido volumétrico del agua se infiltró por la superficie correspondiente al estrato de los materiales de relleno (lado central y derecho del perfil) saturándose todo el relleno en esta zona.

Posteriormente el agua tomó dirección hacia la salida del relleno, es decir el agua empezó a correr por la cara del talud del relleno.

- La probabilidad de falla para todos los escenarios de este relleno arrojaron unos valores cercanos a cero.

Esto se debió a que los factores de seguridad obtenidos para cada uno de los escenarios evaluados en este relleno fueron mayores a 1, variando entre 1.496 y 2.531, y la probabilidad de falla está directamente relacionada con el valor del factor de seguridad.

- La aceleración sísmica máxima que se tendría que presentar para que este relleno llegue a un factor de seguridad igual a 1, sería de 0.58.

Siempre y cuando se conserven las mismas tasas de infiltración de cada escenario y se tengan en cuenta valores promedio de c y f_i para ambos estratos del relleno.

5.1.9 Relleno El Guamal (GML)

Figura 118 Resultado modelo geotécnico FS= 1.779 Relleno El Guamal escenario GMLcMfM250s475

Material Name	Color	Unit Weight (kN/m ³)	Strength Type	Cohesion (kN/m ²)	Phi	Water Surface	Phi b	Air Entry
Relleno antropico	■	16.48	Mohr-Coulomb	24.03	26.97	None	0	0
Formacion Casabianca	■	15.74	Mohr-Coulomb	41.1	28.74	None	0	0

Material Name	Color	Model	KS (m/s)	K2/K1	K1 Angle	WC (m ³ /m ³)	Alpha (1/m)	N
Relleno antropico	■	Curva Experimental	4e-005	1	0	0.41		
Formacion Casabianca	■	Van Genuchten	1.95e-007	1	0	0.4	1	1.23

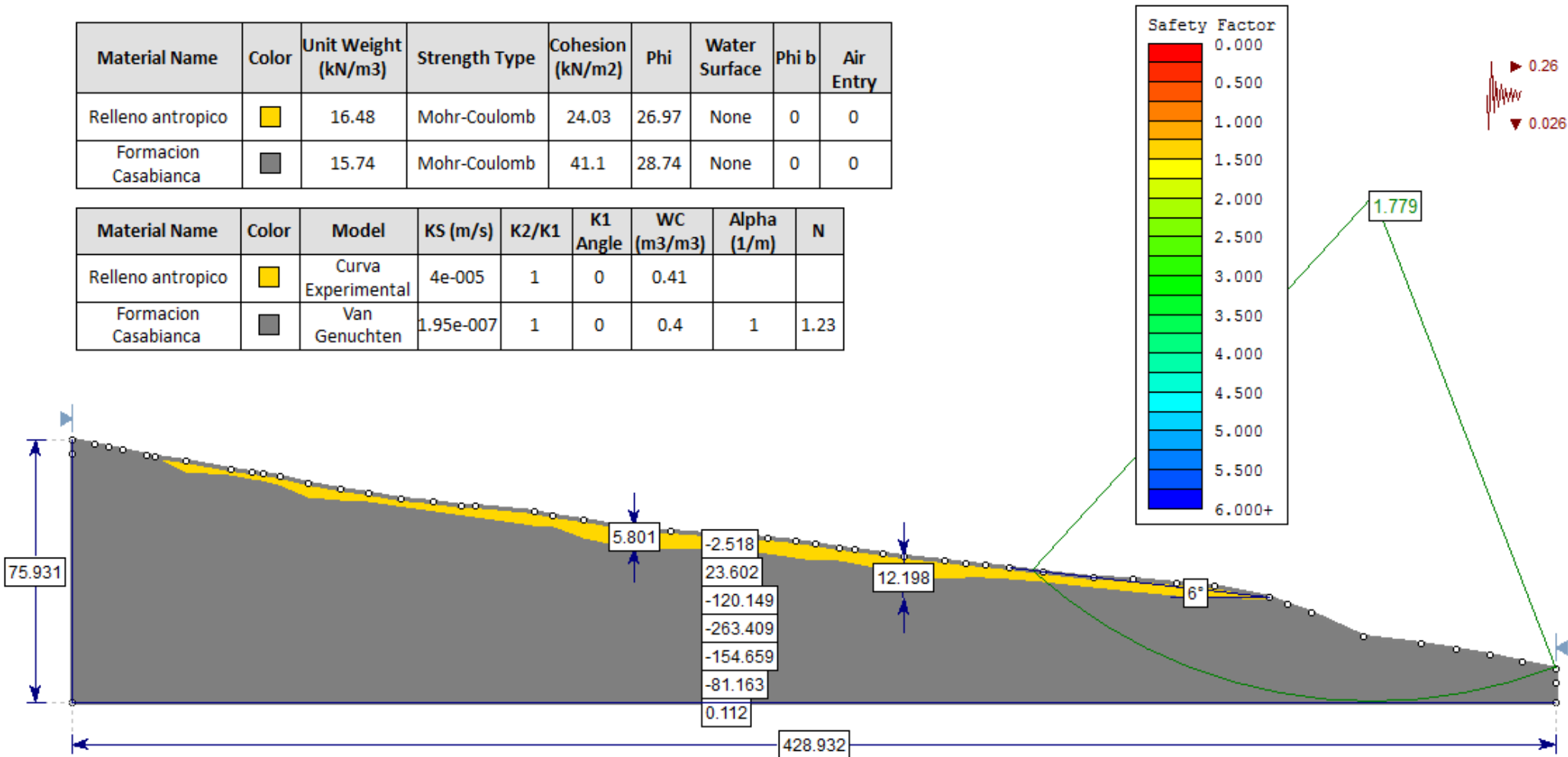
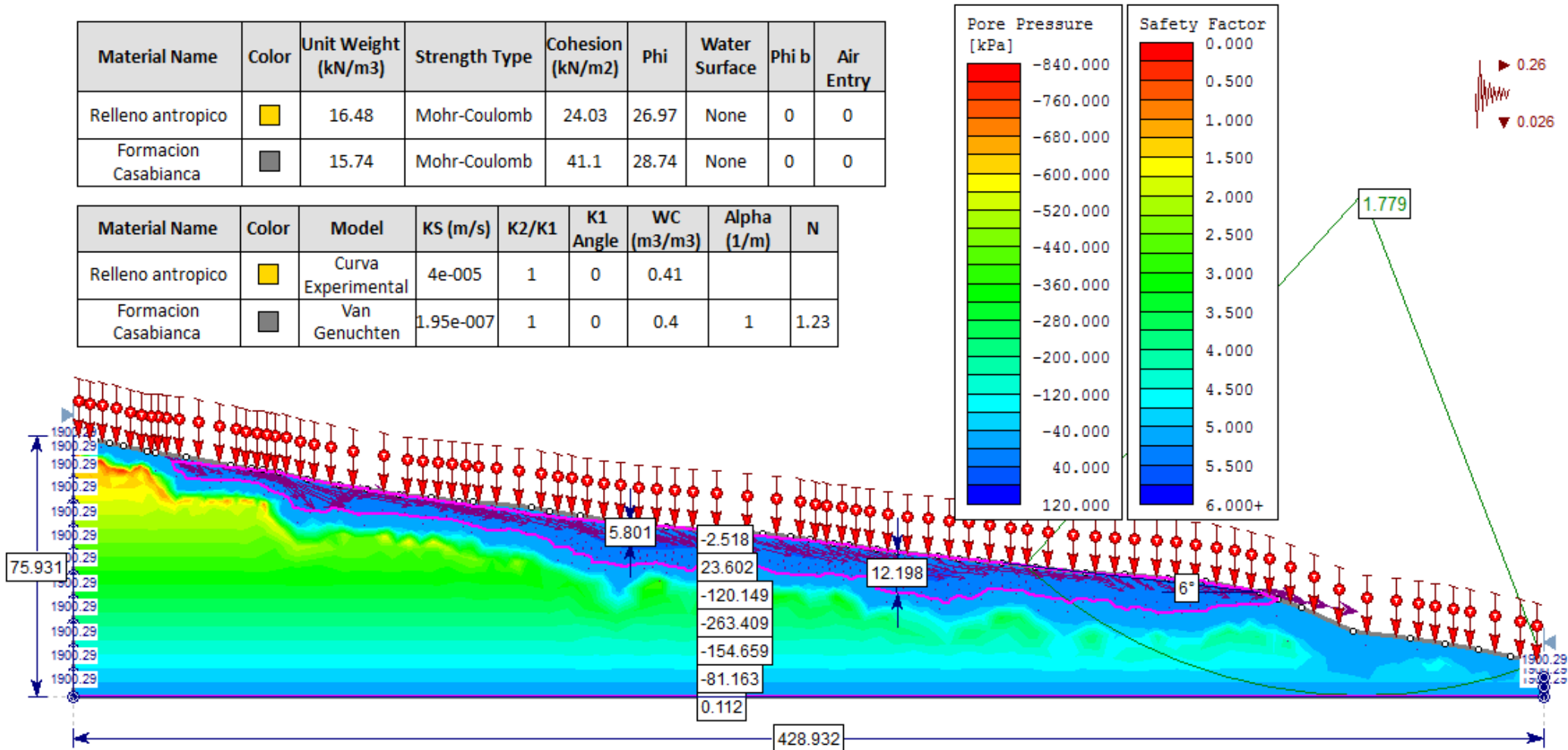


Figura 119 Resultado modelo de flujo de agua FS= 1.779 Relleno El Guamal escenario GMLcMfMI250s475

Material Name	Color	Unit Weight (kN/m ³)	Strength Type	Cohesion (kN/m ²)	Phi	Water Surface	Phi b	Air Entry
Relleno antropico	■	16.48	Mohr-Coulomb	24.03	26.97	None	0	0
Formacion Casabianca	■	15.74	Mohr-Coulomb	41.1	28.74	None	0	0

Material Name	Color	Model	KS (m/s)	K2/K1	K1 Angle	WC (m ³ /m ³)	Alpha (1/m)	N
Relleno antropico	■	Curva Experimental	4e-005	1	0	0.41		
Formacion Casabianca	■	Van Genuchten	1.95e-007	1	0	0.4	1	1.23



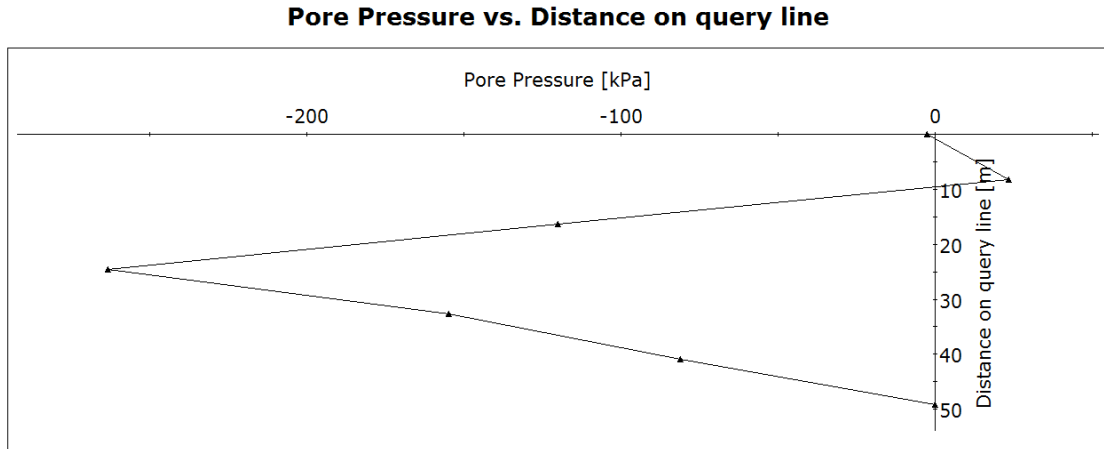
- El rango de los valores de los factores de seguridad de los 60 escenarios de este relleno se muestran a continuación:

Rango de valores Factor de Seguridad Relleno El Guamal			
FS Menor	Tr sismo: 475 años	FS Mayor	Tr sismo: 31 años
1.776	Tr lluvia: 2.33 años	2.647	Tr lluvia: 50 años
	$c' \text{ y } \phi' \text{ (prom - } \sigma)$		$c' \text{ y } \phi' \text{ (prom + } \sigma)$

- Los resultados de la modelación llevaron a que el relleno continúe estable.
- Los resultados de los factores de seguridad obtenidos, están relacionados con la pendiente de 6° (aprox.) que tiene el relleno en su parte más pronunciada.
- También están relacionados con el espesor del estrato de los materiales de relleno (relleno antrópico). Este estrato solo tiene 5.8m de espesor comparado con la altura total del relleno que es de 75.9m.
- El factor de seguridad promedio obtenido, en condición estática, fue de 3.53.
- El relleno, presentó succiones en el estrato de la Formación Casabianca, con valores hasta de 263 kPa.
- El estrato de materiales de relleno presentó presiones de poros positivas en todos los escenarios. Sin embargo, no quedó totalmente sumergido por que se evidenciaron succiones en la superficie del relleno.

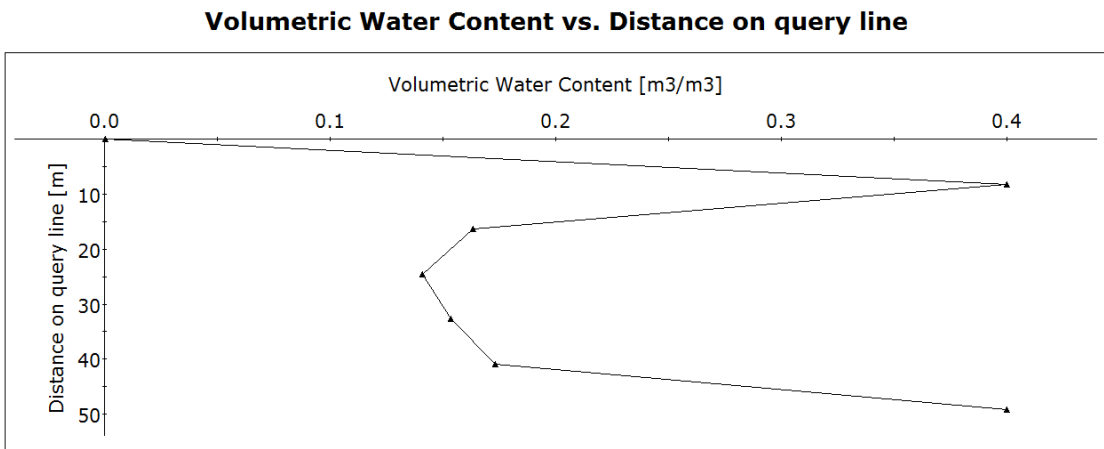
Esto se puede visualizar en la Figura 120: A una profundidad de 0m se observó una succión de 2.5 kPa.

Figura 120 Grafica presión de poros vs profundidad Relleno El Guamal GMLcMfMI250s475



- La Figura 120 muestra que se generó una superficie impermeable entre los dos estratos del relleno. Esto se afirma por la variación de los valores de la presión de poros con la profundidad.
- Iniciaron valores de presiones de poros positivas y aproximadamente a 12m de profundidad se presentaron succiones.
- Esto pudo estar asociado a la diferencia de texturas de ambos estratos, las cuales a su vez determinaron sus respectivas permeabilidades.

Figura 121 Grafica Contenido volumétrico de agua vs profundidad Relleno El Guamal escenario GMLcMfMI250s475



- El contenido volumétrico de agua disminuyó después de los materiales de relleno antrópico. Es decir, a los 12.2m de profundidad se generó un nivel de aguas freáticas NAF colgado. Figura 121.

- El frente húmedo sobrepasó todo el espesor de los materiales de relleno antrópico que fue de aproximadamente 5.8m y avanzó 6.4m adicionales en el estrato de la formación casabianca, es decir llegó hasta los 12.2m de profundidad. Figura 119.

- La superficie de falla, correspondiente al valor del factor de seguridad (FS) más bajo, se presentó en la zona más pendiente del relleno. La longitud de esta superficie abarcó los dos estratos del relleno.

- Los vectores del flujo mostraron que el contenido volumétrico de agua se infiltró por la superficie correspondiente al estrato de los materiales de relleno.

Avanzó hasta la superficie impermeable de la que ya se habló, saturó estos materiales y posteriormente tomó dirección hacia la salida del relleno, es decir el agua empezó a correr por la superficie más pendiente del relleno.

- La probabilidad de falla para todos los escenarios de este relleno arrojaron unos valores cercanos a cero.

Esto se debió a que los factores de seguridad obtenidos para cada uno de los escenarios evaluados en este relleno fueron mayores a 1, variando entre 1.776 y 2.647, y la probabilidad de falla está directamente relacionada con el valor del factor de seguridad.

- La aceleración sísmica máxima que se tendría que presentar para que este relleno llegue a un factor de seguridad igual a 1, sería de 0.59.

Siempre y cuando se conserven las mismas tasas de infiltración de cada escenario y se tengan en cuenta valores promedio de c y f_i para ambos estratos del relleno

5.1.10 Relleno El Paraíso (PAR)

Figura 122 Resultado modelo geotécnico FS= 1.602 Relleno El Paraíso escenario PARcMfMI250s475

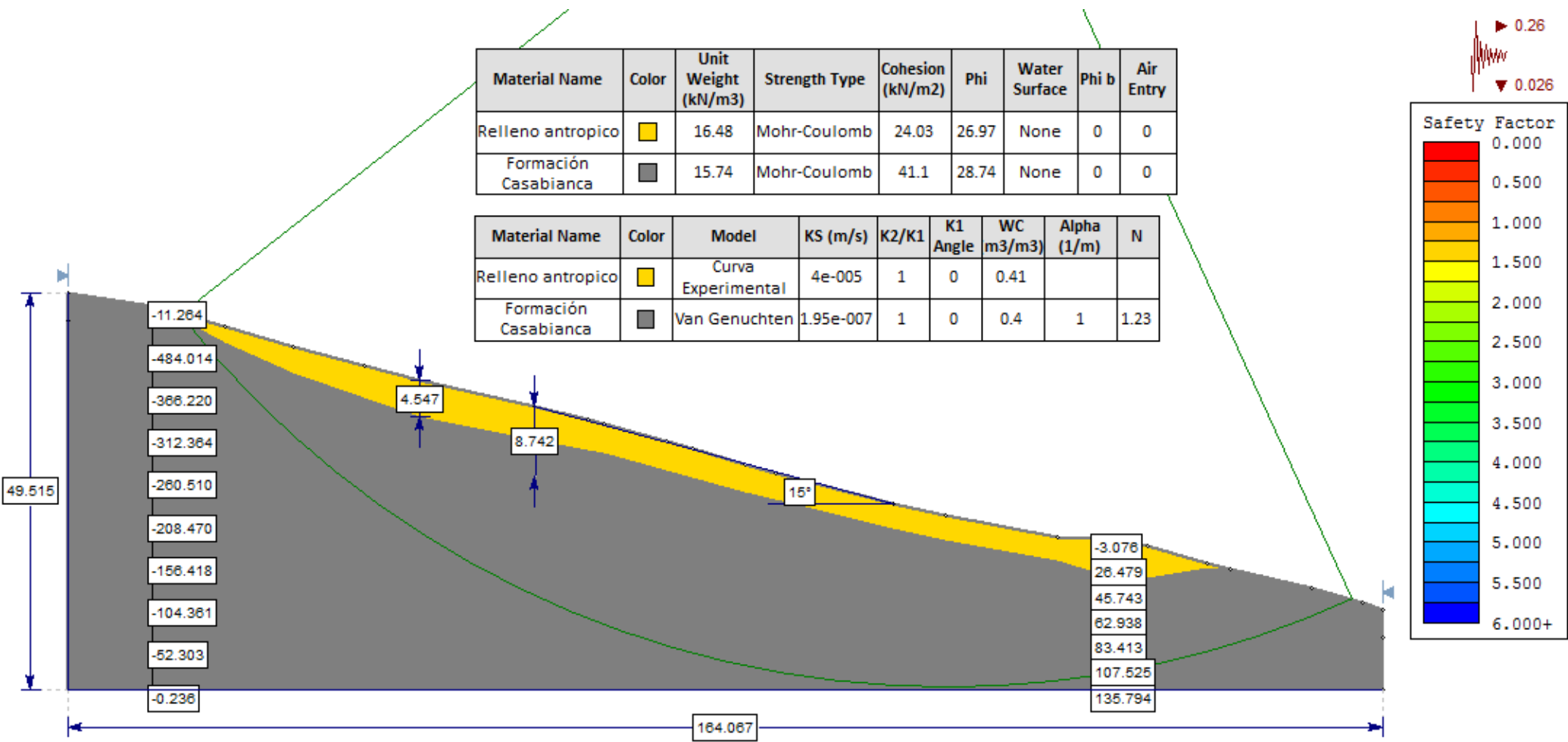
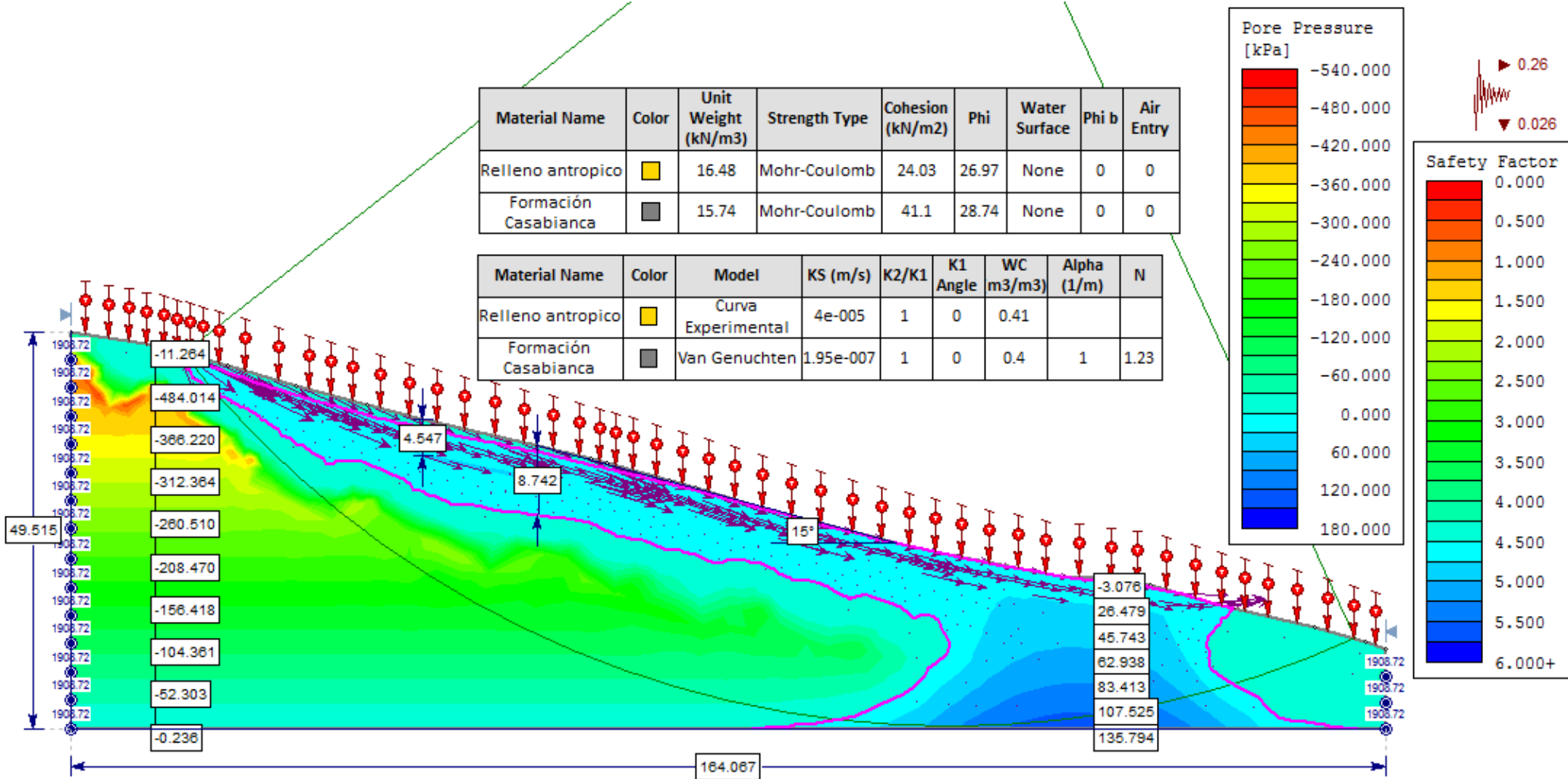


Figura 123 Resultado modelo de flujo de agua FS= 1.602 Relleno El Paraíso escenario PARcMfMI250s475



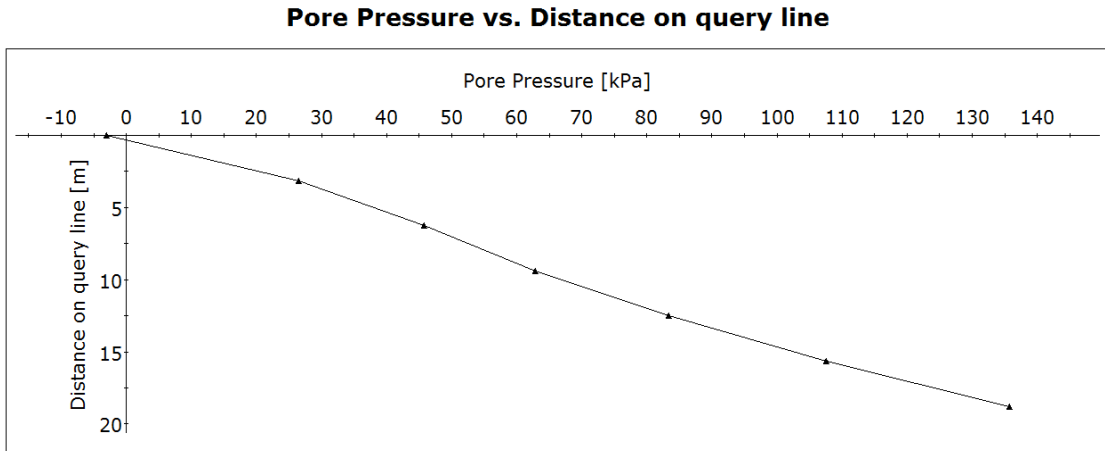
- El rango de los valores de los factores de seguridad de los 60 escenarios de este relleno se muestran a continuación:

Rango de valores Factor de Seguridad Relleno El Paraiso			
FS Menor	Tr sismo: 475 años	FS Mayor	Tr sismo: 31 años
1.597	Tr lluvia: 100 años	2.336	Tr lluvia: 250 años
	c' (prom - σ) y ϕ' (prom + σ)		c' y ϕ' (prom - σ)

- Los resultados de la modelación llevaron a que el relleno continúe estable.
- Los resultados de los factores de seguridad obtenidos, están relacionados con la pendiente de 15° (aprox.) que tiene el relleno en su parte más pronunciada.
- También están relacionados con el espesor del estrato de los materiales de relleno (relleno antrópico). Este estrato solo tiene 4.5m de espesor comparado con la altura total del relleno que es de 49m.
- El factor de seguridad promedio obtenido, en condición estática, fue de 3.43.
- El relleno, en el lado izquierdo de su perfil, presentó succiones en el estrato de la Formación Casabianca, con valores hasta de 484 kPa.
- El estrato de materiales de relleno presentó presiones de poros positivas en todos los escenarios. Sin embargo, no quedó totalmente sumergido por que se evidenciaron succiones en la superficie del relleno.

Esto se puede visualizar en la Figura 124: A una profundidad de 0m se observó una succión de 3 kPa.

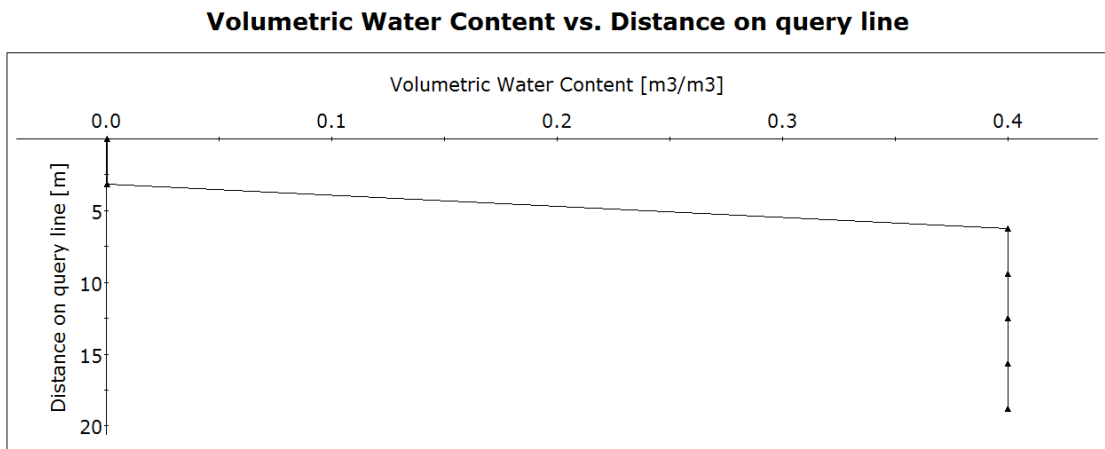
Figura 124 Grafica presión de poros vs profundidad Relleno El Paraíso PARcMfMI250s475



- Se generó una superficie impermeable entre los dos estratos del relleno, presentándose saturación en el estrato de los materiales de relleno, pero succiones en el estrato de la formación casabianca. Esto en el lado izquierdo y el centro del relleno.

- En el lado derecho del modelo se saturan los dos estratos.

Figura 125 Grafica Contenido volumétrico de agua vs profundidad Relleno El Paraíso escenario PARcMfMI250s475



- El contenido volumétrico de agua disminuyó después de los materiales de relleno antrópico. Es decir, a los 12.2m de profundidad se generó un nivel de aguas freáticas NAF colgado. Figura 123.

- El frente húmedo sobrepasó todo el espesor de los materiales de relleno antrópico que fue de aproximadamente 4.5m y avanzó 4m adicionales en el estrato de la formación casabianca, es decir llegó hasta los 8.5m de profundidad. Figura 123.

- La superficie de falla, correspondiente al valor del factor de seguridad (FS) más bajo, se presentó en la zona más pendiente del relleno. La longitud de esta superficie abarcó los dos estratos del relleno.

- Los vectores del flujo mostraron que el contenido volumétrico de agua se infiltró por la superficie correspondiente al estrato de los materiales de relleno.

Avanzó hasta la superficie impermeable de la que ya se habló, saturó estos materiales y posteriormente tomó dirección hacia la salida del relleno, es decir el agua empezó a correr por la superficie más pendiente del relleno.

- La probabilidad de falla para todos los escenarios de este relleno arrojaron unos valores cercanos a cero.

Esto se debió a que los factores de seguridad obtenidos para cada uno de los escenarios evaluados en este relleno fueron mayores a 1, variando entre 1.597 y 2.336, y la probabilidad de falla está directamente relacionada con el valor del factor de seguridad.

- La aceleración sísmica máxima que se tendría que presentar para que este relleno llegue a un factor de seguridad igual a 1, sería de 0.55.

Siempre y cuando se conserven las mismas tasas de infiltración de cada escenario y se tengan en cuenta valores promedio de c y f_i para ambos estratos del relleno

5.1.11 Relleno Campin – Persia (CPR)

Figura 126 Resultado modelo geotécnico FS= 1.191 Relleno Campin-Persia escenario CPRcMfMI250s475

Material Name	Color	Unit Weight (kN/m3)	Strength Type	Cohesion (kN/m2)	Phi	Water Surface	Phi b	Air Entry
Relleno antropico	Yellow	16.48	Mohr-Coulomb	24.03	26.97	None	0	0
Formación Casabianca	Grey	15.74	Mohr-Coulomb	41.1	28.74	None	0	0

Material Name	Color	Model	KS (m/s)	K2/K1	K1 Angle	WC (m3/m3)	Alpha (1/m)	N
Relleno antropico	Yellow	Curva Experimental	4e-005	1	0	0.41		
Formación Casabianca	Grey	Van Genuchten	1.95e-007	1	0	0.4	1	1.23

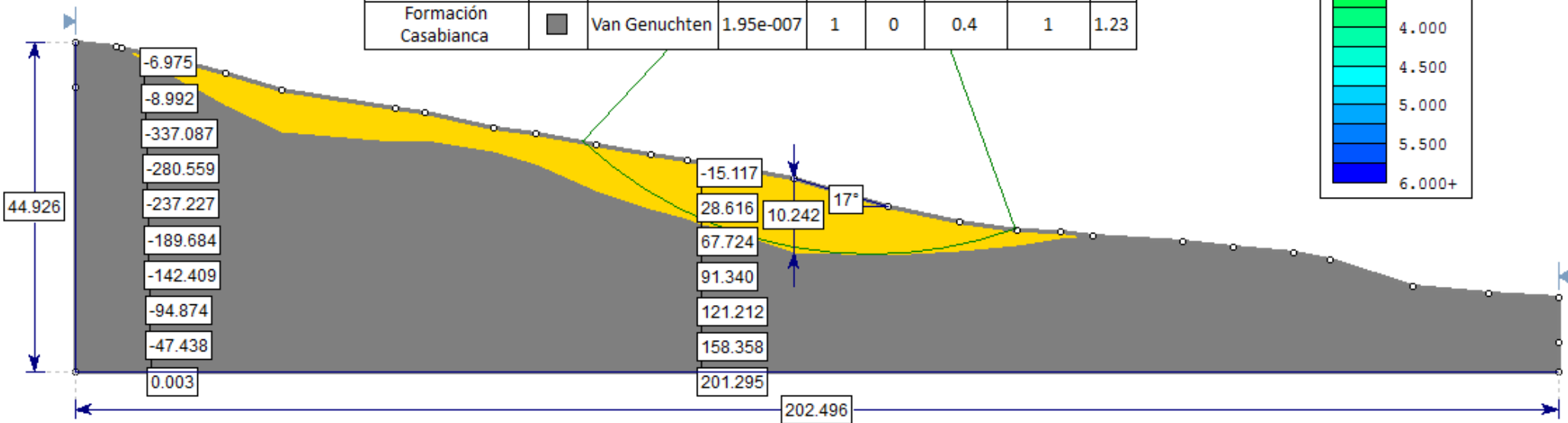
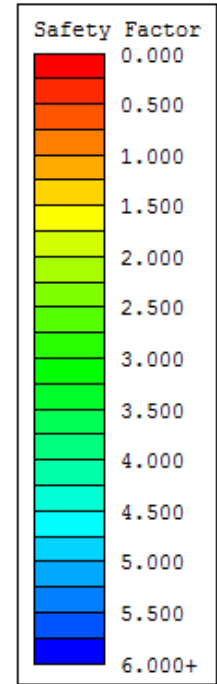
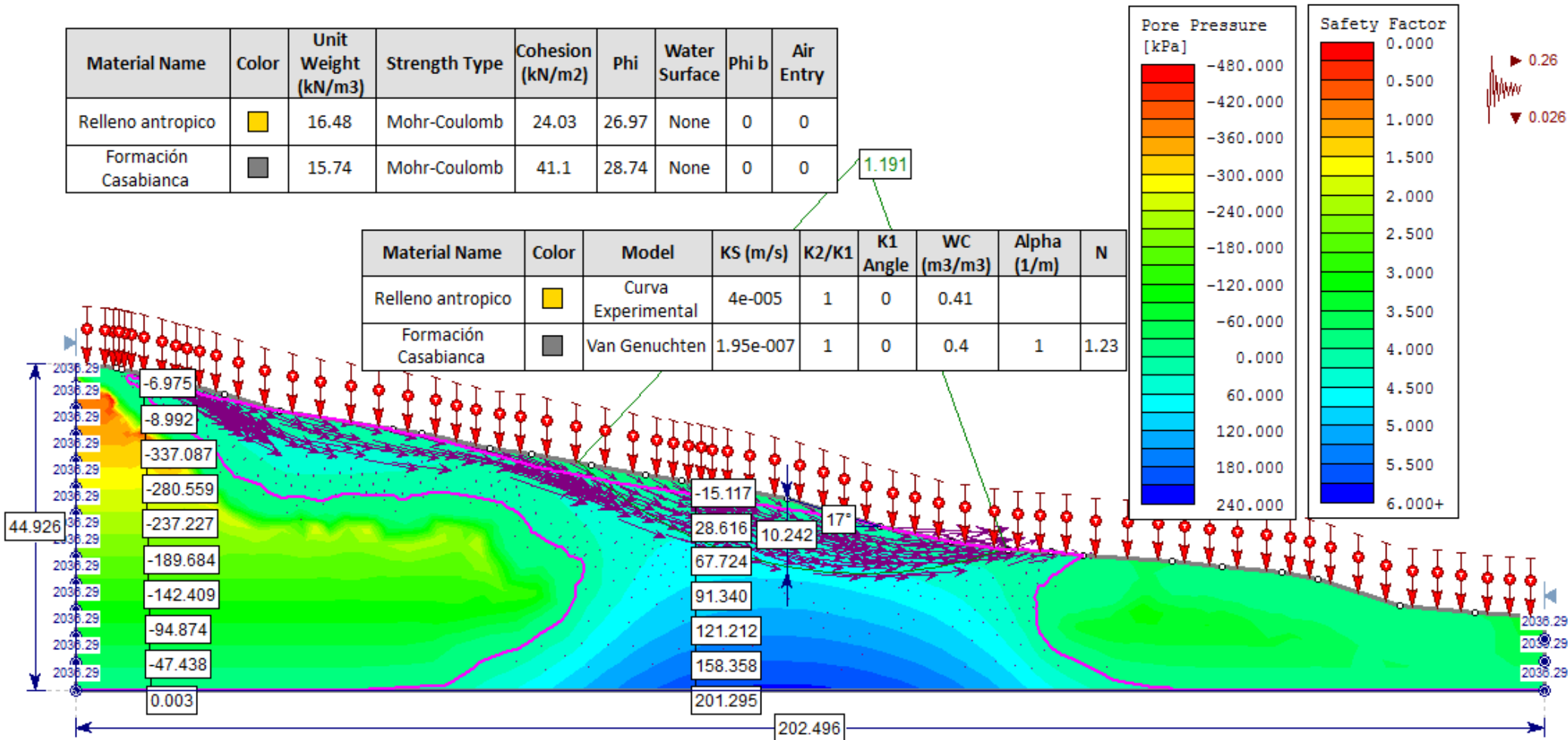


Figura 127 Resultado modelo de flujo de agua FS= 1.191 Relleno Campin-Persia escenario CPRcMfMI250s475



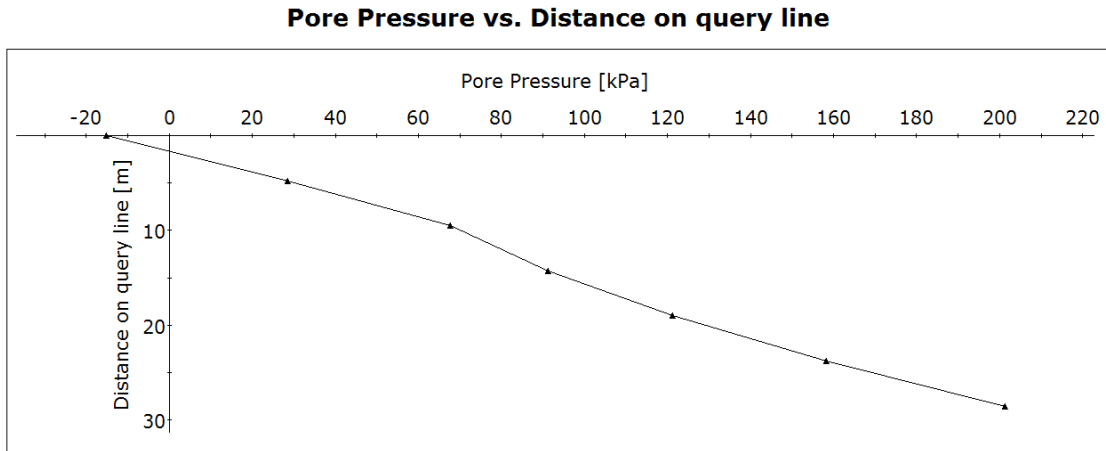
- El rango de los valores de los factores de seguridad de los 60 escenarios de este relleno se muestran a continuación:

Rango de valores Factor de Seguridad Relleno Campin-Persia			
FS Menor	Tr sismo: 475 años	FS Mayor	Tr sismo: 31 años
1.191	Tr lluvia: 250 años	2.337	Tr lluvia: 10 años
	c' y ϕ' (prom - σ)		c' y ϕ' (prom + σ)

- Los resultados de la modelación llevaron a que el relleno continúe estable.
- Los resultados de los factores de seguridad obtenidos, están relacionados con la pendiente de 17° (aprox.) que tiene el relleno en su parte más pronunciada.
- También están relacionados con el espesor del estrato de los materiales de relleno (relleno antrópico). Este estrato solo tiene 10m de espesor comparado con la altura del relleno que es de 45m.
- El factor de seguridad promedio obtenido, en condición estática, fue de 3.32.
- El relleno presentó succiones al lado izquierdo y derecho de su perfil, en el estrato de la Formación Casabianca, con valores hasta de 337 kPa.
- El estrato de materiales de relleno presentó presiones de poros positivas en todos los escenarios. Sin embargo, no quedó totalmente sumergido por que se evidenciaron succiones en la superficie del relleno.

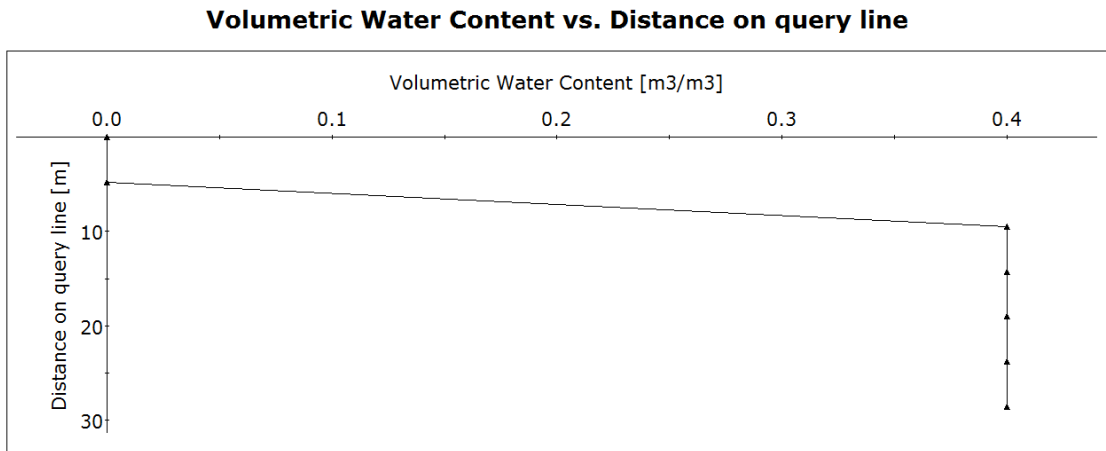
Esto se puede visualizar en la Figura 128: A una profundidad de 0m se observó una succión de 15 kPa.

Figura 128 Grafica presión de poros vs profundidad Relleno Campin - Persia CPRcMfMI250s475



- Se generó una superficie impermeable entre los dos estratos del relleno, al lado izquierdo del mismo. En el centro del relleno se saturan los dos estratos y en el lado derecho se presentan succiones en el estrato de Formación Casabianca.

Figura 129 Grafica Contenido volumétrico de agua vs profundidad Relleno Campin-Persia escenario CPRcMfMI250s475



- El frente húmedo avanzó por la parte central del perfil del relleno, hasta saturar todo el relleno. Por otra parte, a los lados, derecho e izquierdo del perfil del relleno, se presentaron succiones. Figura 127.

- La longitud de la superficie de falla, correspondiente al valor del factor de seguridad (FS) más bajo, se presentó en una parte de la longitud del estrato de los materiales de relleno. Esta longitud abarcó los solo el estrato de materiales de relleno.

- Los vectores de flujo mostraron que el contenido volumétrico del agua se infiltró por la superficie correspondiente al estrato de los materiales de relleno. Sin embargo, se saturó solo la parte central del perfil del relleno.

Se evidencio que el agua corrió por la cara del talud, luego de saturar los dos estratos del relleno, en la parte central del perfil.

- La probabilidad de falla para todos los escenarios de este relleno arrojaron unos valores cercanos a cero.

Esto se debió a que los factores de seguridad obtenidos para cada uno de los escenarios evaluados en este relleno fueron mayores a 1, variando entre 1.191 y 2.337, y la probabilidad de falla está directamente relacionada con el valor del factor de seguridad.

- La aceleración sísmica máxima que se tendría que presentar para que este relleno llegue a un factor de seguridad igual a 1, sería de 0.50.

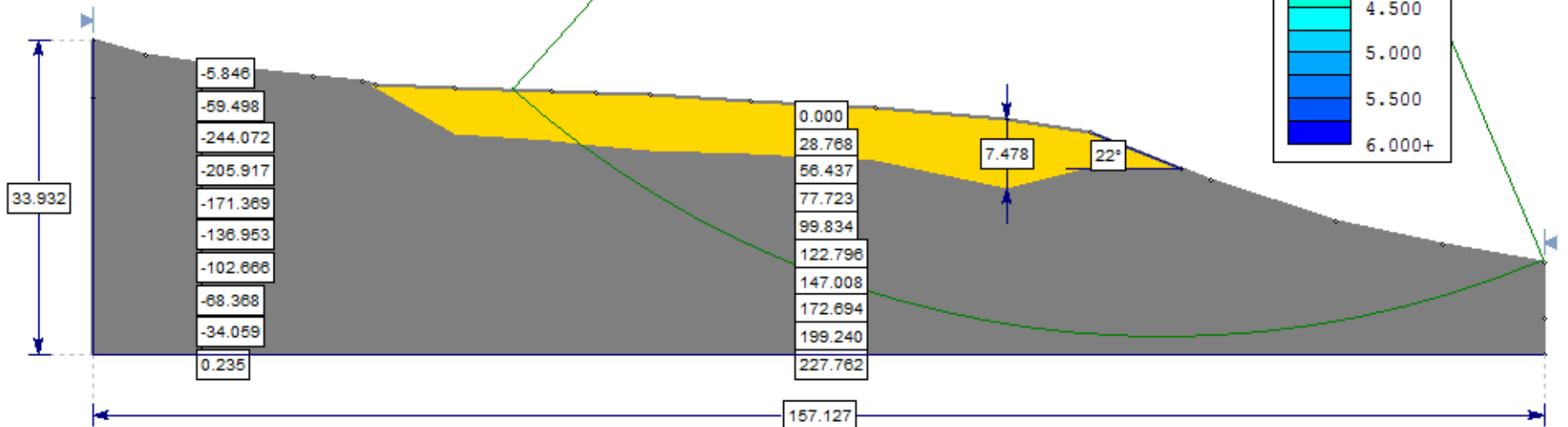
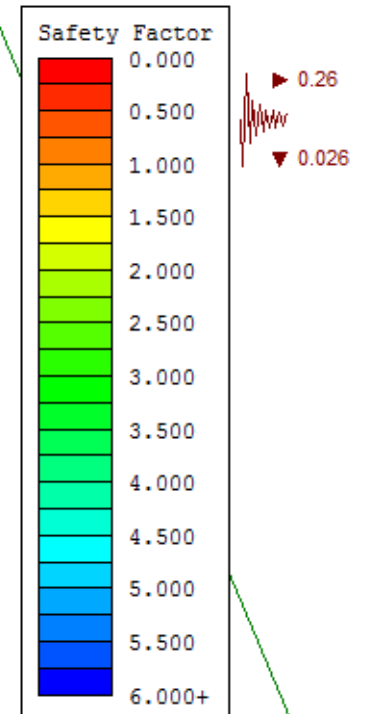
Siempre y cuando se conserven las mismas tasas de infiltración de cada escenario y se tengan en cuenta valores promedio de c y f_i para ambos estratos del relleno.

5.1.12 Relleno Bajo Prado Sector Centro Medico (BPC)

Figura 130 Resultado modelo geotécnico FS= 1.416 Relleno Bajo Prado Sector Centro Medico escenario BPCcMfMI250s475

Material Name	Color	Unit Weight (kN/m ³)	Strength Type	Cohesion (kN/m ²)	Phi	Water Surface	Phi b	Air Entry
Relleno antropico	■	16.48	Mohr-Coulomb	24.03	26.97	None	0	0
Formación Casabianca	■	15.74	Mohr-Coulomb	41.1	28.74	None	0	0

Material Name	Color	Model	KS (m/s)	K2/K1	K1 Angle	WC (m ³ /m ³)	Alpha (1/m)	N
Relleno antropico	■	Curva Experimental	4e-005	1	0	0.41		
Formación Casabianca	■	Van Genuchten	1.95e-007	1	0	0.4	1	1.23



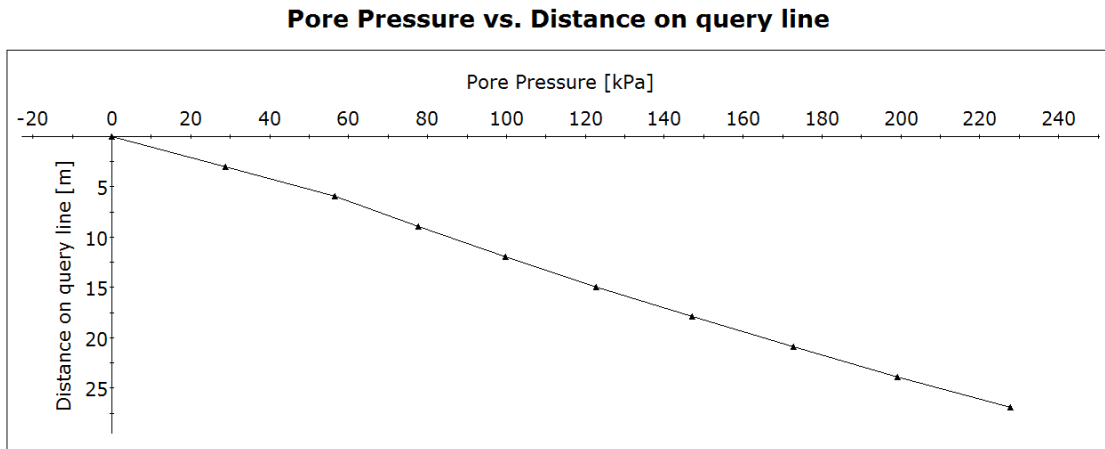
- El rango de los valores de los factores de seguridad de los 60 escenarios de este relleno se muestran a continuación:

Rango de valores Factor de Seguridad Relleno Bajo Prado Sector Centro Medico			
FS Menor	Tr sismo: 475 años	FS Mayor	Tr sismo: 31 años
1.414	Tr lluvia: 100 años	2.337	Tr lluvia: 2.33 años
	c' y ϕ' (prom - σ)		c' y ϕ' (prom + σ)

- Los resultados de la modelación llevaron a que el relleno continúe estable.
- Los resultados de los factores de seguridad obtenidos, están relacionados con la pendiente de 22° (aprox.) que tiene el relleno en su parte más pronunciada.
- También están relacionados con el espesor del estrato de los materiales de relleno (relleno antrópico). Este estrato solo tiene 7.5m de espesor comparado con la altura del relleno que es de 34m.
- El factor de seguridad promedio obtenido, en condición estática, fue de 3.14.
- El relleno presentó succiones al lado izquierdo y derecho de su perfil, en el estrato de la Formación Casabianca, con valores hasta de 244 kPa.
- El estrato de materiales de relleno presentó presiones de poros positivas en todos los escenarios.

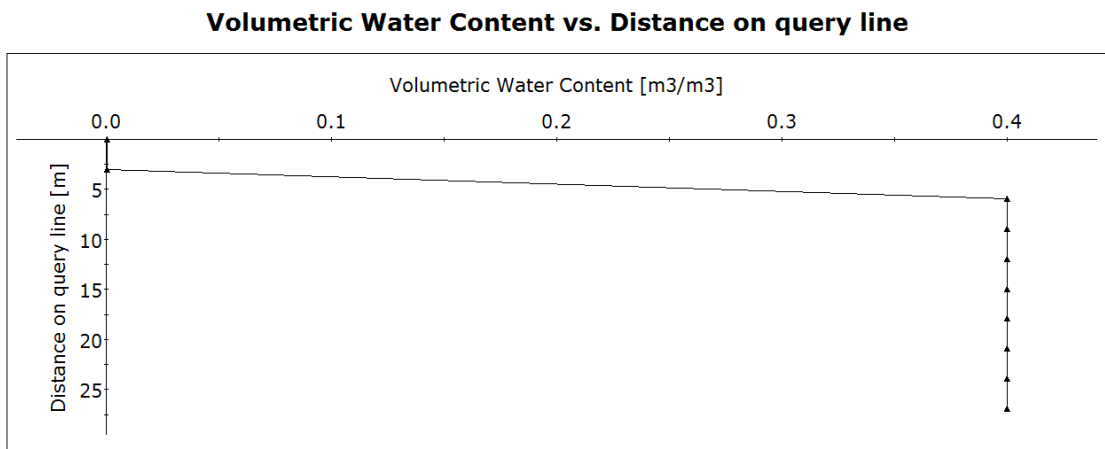
Esto se puede visualizar en la Figura 132:

Figura 132 Grafica presión de poros vs profundidad Relleno Bajo Prado Sector Centro Medico BPCcMfMI250s475



- No se evidenció que se generara una superficie impermeable entre los dos estratos del relleno.
- El contenido volumétrico de agua aumentó con la profundidad. Figura 133.

Figura 133 Grafica Contenido volumétrico de agua vs profundidad Relleno Bajo Prado Sector Centro Medico escenario BPCcMfMI250s475



- El frente húmedo avanzó por la parte central del perfil del relleno, hasta saturar todo el relleno. Por otra parte, a los lados, derecho e izquierdo del perfil del relleno, se presentaron succiones. Figura 131.

- La longitud de la superficie de falla, correspondiente al valor del factor de seguridad (FS) más bajo, se presentó en una parte de la longitud del estrato de los materiales de relleno. Esta longitud abarcó solo el estrato de materiales de relleno.

- Los vectores de flujo mostraron que el contenido volumétrico del agua se infiltró por la superficie correspondiente al estrato de los materiales de relleno. Sin embargo, se saturó solo la parte central del perfil del relleno.

Se evidencio que el agua corrió por la cara del talud, luego de saturar los dos estratos del relleno, en la parte central del perfil.

- La probabilidad de falla para todos los escenarios de este relleno arrojaron unos valores cercanos a cero.

Esto se debió a que los factores de seguridad obtenidos para cada uno de los escenarios evaluados en este relleno fueron mayores a 1, variando entre 1.414 y 2.337, y la probabilidad de falla está directamente relacionada con el valor del factor de seguridad.

- La aceleración sísmica máxima que se tendría que presentar para que este relleno llegue a un factor de seguridad igual a 1, sería de 0.46.

Siempre y cuando se conserven las mismas tasas de infiltración de cada escenario y se tengan en cuenta valores promedio de c y f_i para ambos estratos del relleno.

5.2 Resultados de la probabilidad de falla y análisis de resultados

Se realizó el cálculo de la probabilidad de falla para cada relleno, de acuerdo con lo expuesto en el numeral 4.10, y considerando los valores de los factores de seguridad obtenidos en el numeral anterior.

Se describieron los cálculos solo para el relleno definido anteriormente como tipo, relleno El Nevado, ya que el procedimiento es el mismo para los otros 11 rellenos.

La Tabla 48 incluye los resultados del relleno tipo El Nevado (NEV). Los resultados de los 12 rellenos se encuentran en el Anexo 1 al Anexo 12.

5.2.1 Relleno El Nevado (NEV)

Se calculó la probabilidad de que el factor de seguridad (FS día 391) fuera menor que 1, por medio del método probabilístico estimativos puntuales, el cual se describió con su formulación en el numeral 3.4.4.2.

Para esto se debieron calcular la esperanza o media, la desviación estándar y la varianza de los valores del factor de seguridad obtenidos de un escenario determinado.

Para este caso se tomó el siguiente escenario del relleno El Nevado:

Detonante lluvia para un periodo de retorno (T_r): 2.33años

Detonante sismo para un periodo de retorno (T_r): 31 años

Las cuatro combinaciones para (c') y (ϕ') de acuerdo a estimativos puntuales:

(-, -); (+, -); (-, +); (+, +)

Los resultados se muestran en la Tabla 44:

Tabla 44 Valores de momentos estadísticos del factor de seguridad FS, del relleno el Nevado para Tr lluvia: 2.33 años y Tr sismo: 31 años.

No Escenario	Id Relleno	c'	Φ'	LI	S	Archivo Slide	FS (día 391)	ESPERANZA (FS) (día 391)	$E(FS^2)$ (día 391)	VARIANZA (FS) (día 391)	σ (FS) (día 391)
61	NEV	M	M	002	031	NEVcMfMI002s031.slim	1.684				
62	NEV	P	M	002	031	NEVcPfMI002s031.slim	1.694				
63	NEV	M	P	002	031	NEVcMfPI002s031.slim	1.686				
64	NEV	P	P	002	031	NEVcPfPI002s031.slim	1.696	1.6900000	2.8561260	0.0000260	0.00509902

Se calculó el índice de confiabilidad β . Tabla 45

Tabla 45 Valor del índice de confiabilidad del factor de seguridad FS, del relleno el Nevado para Tr lluvia: 2.33 años y Tr sismo: 31 años.

No Escenario	Id Relleno	c'	Φ'	LI	S	Archivo Slide	FS (día 391)	β
61	NEV	M	M	002	031	NEVcMfMI002s031.slim	1.684	
62	NEV	P	M	002	031	NEVcPfMI002s031.slim	1.694	
63	NEV	M	P	002	031	NEVcMfPI002s031.slim	1.686	
64	NEV	P	P	002	031	NEVcPfPI002s031.slim	1.696	135.320133

Con este índice de confiabilidad β se determinó la probabilidad de no falla $\Phi(\beta)$. Tabla 46.

Se calculó como la función inversa de la función Z (función de probabilidad acumulada normal estándar).

Tabla 46 Valor de la NO probabilidad de falla del factor de seguridad FS, del relleno el Nevado para Tr lluvia: 2.33 años y Tr sismo: 31 años.

No Escenario	Id Relleno	c'	Φ'	LI	S	Archivo Slide	FS (día 391)	$\Phi(\beta)$
61	NEV	M	M	002	031	NEVcMfMI002s031.slim	1.684	
62	NEV	P	M	002	031	NEVcPfMI002s031.slim	1.694	
63	NEV	M	P	002	031	NEVcMfPI002s031.slim	1.686	
64	NEV	P	P	002	031	NEVcPfPI002s031.slim	1.696	1.0000000000

Se calculó la probabilidad de que el factor de seguridad fuera menor a 1 ($FS < 1$), la cual está dada por 1- la probabilidad de no falla $\Phi(\beta)$. Tabla 47.

Tabla 47 Valor de la probabilidad de falla del factor de seguridad FS, del relleno el Nevado para Tr lluvia: 2.33 años y Tr sismo: 31 años.

No Escenario	Id Relleno	c'	Φ'	LI	S	Archivo Slide	FS (día 391)	Pf (FS)
61	NEV	M	M	002	031	NEVcMfMI002s031.slim	1.684	
62	NEV	P	M	002	031	NEVcPfMI002s031.slim	1.694	
63	NEV	M	P	002	031	NEVcMfPI002s031.slim	1.686	
64	NEV	P	P	002	031	NEVcPfPI002s031.slim	1.696	0.0000000000000000

Para este escenario evaluado del relleno El Nevado, la probabilidad de falla del factor de seguridad fue cero (0). Tabla 47.

Luego se calculó la probabilidad de ocurrencia de la lluvia para cada uno de los periodos de retorno mencionados en la Tabla 2 y con la formulación descrita en el numeral 4.10.

El periodo de exposición para el cual se calculó la probabilidad de falla fue de 1 año.

$$P_{lluvia\ 2.33\ años} = \left(1 - \left(1 - \frac{1}{2.33}\right)^1\right) = 0.42918454$$

$$P_{lluvia\ 10\ años} = \left(1 - \left(1 - \frac{1}{10}\right)^1\right) = 0.10$$

$$P_{lluvia\ 50\ años} = \left(1 - \left(1 - \frac{1}{50}\right)^1\right) = 0.02$$

$$P_{lluvia\ 100\ años} = \left(1 - \left(1 - \frac{1}{100}\right)^1\right) = 0.01$$

$$P_{lluvia\ 250\ años} = \left(1 - \left(1 - \frac{1}{250}\right)^1\right) = 0.004$$

Igualmente se calculó la probabilidad de excedencia del sismo para cada uno de los periodos de retorno mencionados en la Tabla 2 y con la formulación descrita en el numeral 4.10

El periodo de exposición para el cual se está calculando la probabilidad de falla fue de 1 año.

$$P_{s\ 31\ \text{años}} = \left(1 - (e)^{\frac{-1}{31}}\right) = 0.0317433$$

$$P_{s\ 225\ \text{años}} = \left(1 - (e)^{\frac{-1}{225}}\right) = 0.00443458$$

$$P_{s\ 225\ \text{años}} = \left(1 - (e)^{\frac{-1}{225}}\right) = 0.00210304$$

Finalmente se calculó la probabilidad de falla anual, la cual está dada por la probabilidad de que el factor de seguridad sea menor o igual a 1 para los escenarios de lluvia T_r : 2.33 años y sismo T_r : 31 años, multiplicado por la probabilidad de que se presente esta lluvia multiplicada por la probabilidad de que ocurra el sismo.

$$P_f = 0 * 0.429184 * 0.0317433 = 0$$

Se evidenció que, debido a que la probabilidad de que el factor de seguridad $FS < 1$, fue cero, el resultado de la probabilidad de falla total, fue cero. Esto considerando las probabilidades de ocurrencia de esa lluvia y probabilidad de excedencia de ese sismo.

Por lo tanto la calificación de amenaza para este escenario es BAJA, teniendo en cuenta lo descrito en la Tabla 41.

De igual manera se calculó la probabilidad de falla total para los otros 59 escenarios del relleno El Nevado y para los 660 escenarios correspondientes a los otros 11 rellenos.

La Tabla 48 muestra los resultados del relleno tipo el Nevado (NEV).

Los resultados de los 12 rellenos se encuentran en el Anexo 1 al Anexo 12.

Tabla 48 Resultados de probabilidad de falla del Relleno El Nevado (NEV)

No Escenario	Id Relleno	c'	Φ'	LI	S	Archivo geometria	Archivo Slide	FS (dia 365)	FS (dia 390)	FS (dia 391)	ESPERANZA (FS) (dia 391)	E (FS ²) (dia 391)	VARIANZA (FS) (dia 391)	σ (FS) (dia 391)	β	Φ (β)	Pf (FS)	Pf (lluvia)	Pf (sismo)	Pf (total)
61	NEV	M	M	002	031	NEVcMMI002s031.dxf	NEVcMMI002s031.slim	1.695	1.684	1.684										
62	NEV	P	M	002	031	NEVcPMI002s031.dxf	NEVcPMI002s031.slim	1.702	1.695	1.694										
63	NEV	M	P	002	031	NEVcMMP1002s031.dxf	NEVcMMP1002s031.slim	1.696	1.687	1.686										
64	NEV	P	P	002	031	NEVcPIP1002s031.dxf	NEVcPIP1002s031.slim	1.706	1.696	1.696	1.6900000	2.8561260	0.0000260	0.00509902	135.320133	1.0000000000	0.0000000000000000	0.42918455	0.03174332	0.0000000000000000
65	NEV	M	M	010	031	NEVcMMI100s031.dxf	NEVcMMI100s031.slim	1.695	1.686	1.685										
66	NEV	P	M	010	031	NEVcPMI100s031.dxf	NEVcPMI100s031.slim	1.702	1.696	1.696										
67	NEV	M	P	010	031	NEVcMMP1100s031.dxf	NEVcMMP1100s031.slim	1.695	1.688	1.688										
68	NEV	P	P	010	031	NEVcPIP1100s031.dxf	NEVcPIP1100s031.slim	1.706	1.697	1.697	1.6915000	2.8611985	0.0000262	0.005123475	134.96698	1.0000000000	0.0000000000000000	0.1	0.03174332	0.0000000000000000
69	NEV	M	M	050	031	NEVcMMI500s031.dxf	NEVcMMI500s031.slim	1.695	1.684	1.684										
70	NEV	P	M	050	031	NEVcPMI500s031.dxf	NEVcPMI500s031.slim	1.702	1.695	1.695										
71	NEV	M	P	050	031	NEVcMMP1500s031.dxf	NEVcMMP1500s031.slim	1.695	1.686	1.686										
72	NEV	P	P	050	031	NEVcPIP1500s031.dxf	NEVcPIP1500s031.slim	1.706	1.695	1.695	1.6900000	2.8561255	0.0000255	0.005049752	136.640361	1.0000000000	0.0000000000000000	0.02	0.03174332	0.0000000000000000
73	NEV	M	M	100	031	NEVcMMI1000s031.dxf	NEVcMMI1000s031.slim	1.695	1.683	1.683										
74	NEV	P	M	100	031	NEVcPMI1000s031.dxf	NEVcPMI1000s031.slim	1.702	1.694	1.694										
75	NEV	M	P	100	031	NEVcMMP11000s031.dxf	NEVcMMP11000s031.slim	1.695	1.685	1.685										
76	NEV	P	P	100	031	NEVcPIP11000s031.dxf	NEVcPIP11000s031.slim	1.706	1.695	1.695	1.6892500	2.8535938	0.0000282	0.00530919	129.82206	1.0000000000	0.0000000000000000	0.01	0.03174332	0.0000000000000000
77	NEV	M	M	250	031	NEVcMMI2500s031.dxf	NEVcMMI2500s031.slim	1.695	1.682	1.682										
78	NEV	P	M	250	031	NEVcPMI2500s031.dxf	NEVcPMI2500s031.slim	1.702	1.693	1.693										
79	NEV	M	P	250	031	NEVcMMP12500s031.dxf	NEVcMMP12500s031.slim	1.695	1.684	1.684										
80	NEV	P	P	250	031	NEVcPIP12500s031.dxf	NEVcPIP12500s031.slim	1.706	1.694	1.694	1.6882500	2.8502163	0.0000282	0.00530919	129.633707	1.0000000000	0.0000000000000000	0.004	0.03174332	0.0000000000000000
81	NEV	M	M	002	225	NEVcMMI002s225.dxf	NEVcMMI002s225.slim	1.337	1.329	1.329										
82	NEV	P	M	002	225	NEVcPMI002s225.dxf	NEVcPMI002s225.slim	1.344	1.336	1.336										
83	NEV	M	P	002	225	NEVcMMP1002s225.dxf	NEVcMMP1002s225.slim	1.337	1.330	1.330										
84	NEV	P	P	002	225	NEVcPIP1002s225.dxf	NEVcPIP1002s225.slim	1.343	1.336	1.336	1.3327500	1.7762333	0.0000107	0.003269174	101.784114	1.0000000000	0.0000000000000000	0.42918455	0.00443458	0.0000000000000000
85	NEV	M	M	010	225	NEVcMMI100s225.dxf	NEVcMMI100s225.slim	1.337	1.330	1.330										
86	NEV	P	M	010	225	NEVcPMI100s225.dxf	NEVcPMI100s225.slim	1.344	1.337	1.336										
87	NEV	M	P	010	225	NEVcMMP1100s225.dxf	NEVcMMP1100s225.slim	1.337	1.331	1.331										
88	NEV	P	P	010	225	NEVcPIP1100s225.dxf	NEVcPIP1100s225.slim	1.343	1.337	1.337	1.3335000	1.7782315	0.0000092	0.003041381	109.654125	1.0000000000	0.0000000000000000	0.1	0.00443458	0.0000000000000000
89	NEV	M	M	050	225	NEVcMMI500s225.dxf	NEVcMMI500s225.slim	1.337	1.329	1.329										
90	NEV	P	M	050	225	NEVcPMI500s225.dxf	NEVcPMI500s225.slim	1.344	1.336	1.336										
91	NEV	M	P	050	225	NEVcMMP1500s225.dxf	NEVcMMP1500s225.slim	1.337	1.330	1.330										
92	NEV	P	P	050	225	NEVcPIP1500s225.dxf	NEVcPIP1500s225.slim	1.343	1.336	1.336	1.3327500	1.7762333	0.0000107	0.003269174	101.784114	1.0000000000	0.0000000000000000	0.02	0.00443458	0.0000000000000000
93	NEV	M	M	100	225	NEVcMMI1000s225.dxf	NEVcMMI1000s225.slim	1.337	1.328	1.328										
94	NEV	P	M	100	225	NEVcPMI1000s225.dxf	NEVcPMI1000s225.slim	1.344	1.336	1.336										
95	NEV	M	P	100	225	NEVcMMP11000s225.dxf	NEVcMMP11000s225.slim	1.337	1.330	1.329										
96	NEV	P	P	100	225	NEVcPIP11000s225.dxf	NEVcPIP11000s225.slim	1.343	1.336	1.336	1.3322500	1.7749043	0.0000142	0.00376663	88.2088281	1.0000000000	0.0000000000000000	0.01	0.00443458	0.0000000000000000
97	NEV	M	M	250	225	NEVcMMI2500s225.dxf	NEVcMMI2500s225.slim	1.337	1.327	1.327										
98	NEV	P	M	250	225	NEVcPMI2500s225.dxf	NEVcPMI2500s225.slim	1.344	1.335	1.335										
99	NEV	M	P	250	225	NEVcMMP12500s225.dxf	NEVcMMP12500s225.slim	1.337	1.329	1.328										
100	NEV	P	P	250	225	NEVcPIP12500s225.dxf	NEVcPIP12500s225.slim	1.343	1.335	1.335	1.3312500	1.7722408	0.0000142	0.00376663	87.9433388	1.0000000000	0.0000000000000000	0.004	0.00443458	0.0000000000000000
101	NEV	M	M	002	475	NEVcMMI002s475.dxf	NEVcMMI002s475.slim	1.226	1.222	1.219										
102	NEV	P	M	002	475	NEVcPMI002s475.dxf	NEVcPMI002s475.slim	1.232	1.226	1.226										
103	NEV	M	P	002	475	NEVcMMP1002s475.dxf	NEVcMMP1002s475.slim	1.228	1.222	1.221										
104	NEV	P	P	002	475	NEVcPIP1002s475.dxf	NEVcPIP1002s475.slim	1.232	1.228	1.228	1.2235000	1.4969655	0.0000132	0.003640055	61.4001721	1.0000000000	0.0000000000000000	0.42918455	0.00210305	0.0000000000000000
105	NEV	M	M	010	475	NEVcMMI100s475.dxf	NEVcMMI100s475.slim	1.226	1.224	1.223										
106	NEV	P	M	010	475	NEVcPMI100s475.dxf	NEVcPMI100s475.slim	1.232	1.230	1.230										
107	NEV	M	P	010	475	NEVcMMP1100s475.dxf	NEVcMMP1100s475.slim	1.228	1.221	1.221										
108	NEV	P	P	010	475	NEVcPIP1100s475.dxf	NEVcPIP1100s475.slim	1.232	1.230	1.230	1.2260000	1.5030925	0.0000165	0.004062019	55.6373539	1.0000000000	0.0000000000000000	0.1	0.00210305	0.0000000000000000
109	NEV	M	M	050	475	NEVcMMI500s475.dxf	NEVcMMI500s475.slim	1.226	1.221	1.219										
110	NEV	P	M	050	475	NEVcPMI500s475.dxf	NEVcPMI500s475.slim	1.232	1.228	1.227										
111	NEV	M	P	050	475	NEVcMMP1500s475.dxf	NEVcMMP1500s475.slim	1.228	1.221	1.221										
112	NEV	P	P	050	475	NEVcPIP1500s475.dxf	NEVcPIP1500s475.slim	1.232	1.228	1.228	1.2237500	1.4975788	0.0000147	0.003832427	58.3833625	1.0000000000	0.0000000000000000	0.02	0.00210305	0.0000000000000000
113	NEV	M	M	100	475	NEVcMMI1000s475.dxf	NEVcMMI1000s475.slim	1.226	1.220	1.219										
114	NEV	P	M	100	475	NEVcPMI1000s475.dxf	NEVcPMI1000s475.slim	1.232	1.227	1.227										
115	NEV	M	P	100	475	NEVcMMP11000s475.dxf	NEVcMMP11000s475.slim	1.228	1.221	1.221										
116	NEV	P	P	100	475	NEVcPIP11000s475.dxf	NEVcPIP11000s475.slim	1.232	1.227	1.227	1.2235000	1.4969650	0.0000128	0.003570714	62.5925198	1.0000000000	0.0000000000000000	0.01	0.00210305	0.0000000000000000
117	NEV	M	M	250	475	NEVcMMI2500s475.dxf	NEVcMMI2500s475.slim	1.226	1.219	1.218										
118	NEV	P	M	250	475	NEVcPMI2500s475.dxf	NEVcPMI2500s475.slim	1.232	1.226	1.225										
119	NEV	M	P	250	475	NEVcMMP12500s475.dxf	NEVcMMP12500s475.slim	1.228	1.220	1.220										
120	NEV	P	P	250	475	NEVcPIP12500s475.dxf	NEVcPIP12500s475.slim	1.232	1.226	1.225	1.2220000	1.4932935	0.0000095	0.003082207	72.026311	1.0000000000	0.0000000000000000	0.004	0.00210305	0.0000000000000000

Se realizó un chequeo del resultado de la probabilidad de falla obtenida del escenario analizado del relleno El Nevado en el numeral 5.2.1. Este chequeo se realizó en el software Slide con el fin de ratificar o no dicho resultado.

El software hizo el cálculo de la probabilidad de falla por medio del método probabilístico de Montecarlo.

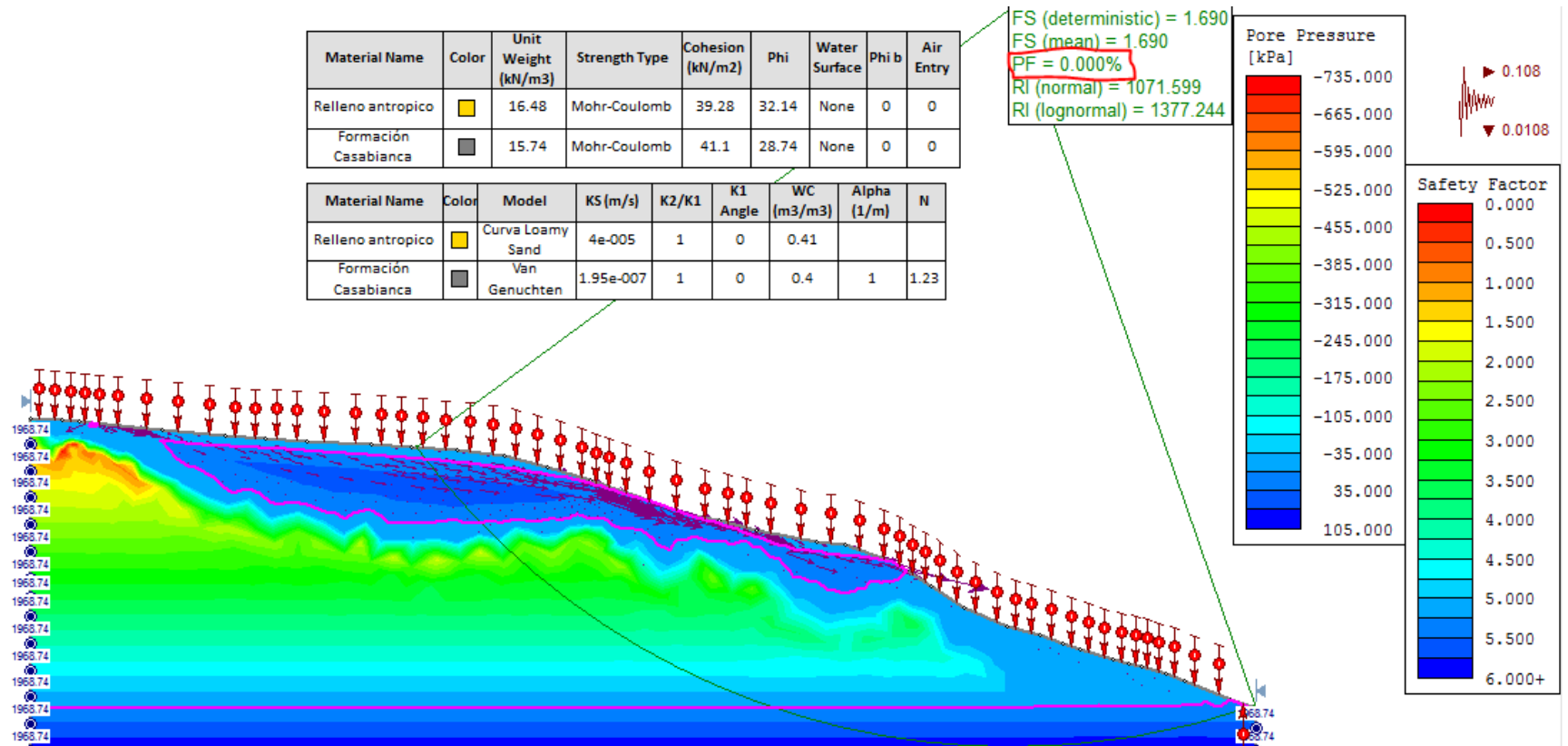
Al software Slide se le debieron ingresar los valores de la media y la desviación estándar de los parámetros mecánicos c' y ϕ' del estrato del relleno antrópico en la opción, estadística de los materiales (Material Statistics) Figura 134.

Figura 134 Ingreso de valores estadísticos al software Slide

#	Material Name	Property	Distribution	Mean	Std. Dev.	Rel. Min	Rel. Max
1	Relleno antropico	Cohesion	Normal	39.28	15.25	3	3
2	Relleno antropico	Phi	Normal	32.14	5.173	3	3

El resultado del cálculo de la probabilidad de falla para el escenario analizado del relleno el Nevado (NEVcMfMI002s31) se muestra en la Figura 135.

Figura 135 Resultado de la probabilidad de falla calculada por el software slide para el Relleno el Nevado escenario NEVcMfMI002s31. Pf=0



Se pudo cotejar, en la Figura 135, que la probabilidad de falla calculada por el método probabilístico de Montecarlo utilizando el software slide también arrojó un valor de cero (Pf=0).

Por lo tanto, esto ratifica y corrobora los resultados obtenidos realizando todo el procedimiento ilustrado en este numeral 5.2.1.

5.3 Cálculo de aceleraciones sísmicas para FS=1

Debido a que todos los rellenos presentaron probabilidad de falla total anual nula, considerando los detonantes lluvias y sismos, se calcularon las aceleraciones sísmicas máximas y sus respectivos periodos de retorno del sismo, con las cuales los rellenos llegarían a su falla (FS=1).

Esto se realizó para cada relleno, considerando el detonante lluvia en cada uno de los periodos de retorno. Así mismo los valores de cohesión y ángulo de fricción promedio para el estrato de materiales de relleno.

Estas aceleraciones fueron determinadas en el software Slide.

La Tabla 49 muestra los resultados:

Tabla 49 Aceleraciones sísmicas máximas con las que los 12 rellenos llega a la falla. Factor de seguridad FS=1

No Escenario	Id Relleno	c'	Φ'	LI	Archivo Slide	FS (día 365)	FS (día 390)	FS (día 391)	Aa	Gales	Tasa de Excedencia	Tr
1	ISL	PROM	PROM	002	ISLI002.slim	1.007	1.008	1.008	0.44	440	0.00022	4545
2	ISL	PROM	PROM	010	ISLI10.slim	1.007	1.000	1.000	0.44	440	0.00022	4545
3	ISL	PROM	PROM	050	ISLI50.slim	1.007	0.999	0.999	0.44	440	0.00022	4545
4	ISL	PROM	PROM	100	ISLI100.slim	1.007	0.999	0.999	0.44	440	0.00022	4545
5	ISL	PROM	PROM	250	ISLI250.slim	1.007	0.999	0.999	0.44	440	0.00022	4545
6	NEV	PROM	PROM	002	NEVI002.slim	1.009	1.006	1.006	0.38	380	0.0005	2000
7	NEV	PROM	PROM	010	NEVI10.slim	1.009	1.007	1.007	0.38	380	0.0005	2000
8	NEV	PROM	PROM	050	NEVI50.slim	1.009	1.005	1.005	0.38	380	0.0005	2000
9	NEV	PROM	PROM	100	NEVI100.slim	1.009	1.005	1.005	0.38	380	0.0005	2000
10	NEV	PROM	PROM	250	NEVI250.slim	1.009	1.004	1.004	0.38	380	0.0005	2000
11	ALM	PROM	PROM	002	ALMI002.slim	1.000	1.010	1.010	0.55	550	0.0001	10000
12	ALM	PROM	PROM	010	ALMI10.slim	1.000	1.008	1.010	0.55	550	0.0001	10000
13	ALM	PROM	PROM	050	ALMI50.slim	1.000	1.009	1.007	0.55	550	0.0001	10000
14	ALM	PROM	PROM	100	ALMI100.slim	1.000	1.007	1.008	0.55	550	0.0001	10000
15	ALM	PROM	PROM	250	ALMI250.slim	1.000	1.006	1.007	0.55	550	0.0001	10000
16	PLM	PROM	PROM	002	PLMI002.slim	1.031	1.015	1.015	0.40	400	0.00035	2857
17	PLM	PROM	PROM	010	PLMI10.slim	1.031	1.017	1.017	0.40	400	0.00035	2857
18	PLM	PROM	PROM	050	PLMI50.slim	1.031	1.015	1.011	0.40	400	0.00035	2857
19	PLM	PROM	PROM	100	PLMI100.slim	1.031	1.012	1.012	0.40	400	0.00035	2857
20	PLM	PROM	PROM	250	PLMI250.slim	1.031	1.011	1.011	0.40	400	0.00035	2857
21	AVL	PROM	PROM	002	AVLI002.slim	1.014	1.006	1.002	0.52	520	0.00012	8333
22	AVL	PROM	PROM	010	AVLI10.slim	1.014	1.003	0.998	0.52	520	0.00012	8333
23	AVL	PROM	PROM	050	AVLI50.slim	1.014	0.998	1	0.52	520	0.00012	8333
24	AVL	PROM	PROM	100	AVLI100.slim	1.014	0.998	1	0.52	520	0.00012	8333
25	AVL	PROM	PROM	250	AVLI250.slim	1.014	1.000	0.999	0.52	520	0.00012	8333
26	CPM	PROM	PROM	002	CPMI002.slim	1.032	1.007	1.009	0.47	470	0.0002	5000
27	CPM	PROM	PROM	010	CPMI10.slim	1.032	1.012	1.012	0.47	470	0.0002	5000
28	CPM	PROM	PROM	050	CPMI50.slim	1.032	1.006	1.008	0.47	470	0.0002	5000
29	CPM	PROM	PROM	100	CPMI100.slim	1.032	1.007	1.008	0.47	470	0.0002	5000
30	CPM	PROM	PROM	250	CPMI250.slim	1.032	1.008	1.006	0.47	470	0.0002	5000
31	VCM	PROM	PROM	002	VCMi002.slim	1.008	0.991	0.986	0.25	250	0.0021	476
32	VCM	PROM	PROM	010	VCMi10.slim	1.008	0.991	0.985	0.25	250	0.0021	476
33	VCM	PROM	PROM	050	VCMi50.slim	1.008	0.987	0.987	0.25	250	0.0021	476
34	VCM	PROM	PROM	100	VCMi100.slim	1.008	0.989	0.985	0.25	250	0.0021	476
35	VCM	PROM	PROM	250	VCMi250.slim	1.008	0.992	0.991	0.25	250	0.0021	476
36	BPD	PROM	PROM	002	BPDI002.slim	1.026	0.999	0.998	0.58	580	0.000095	10526
37	BPD	PROM	PROM	010	BPDI10.slim	1.026	0.995	0.994	0.58	580	0.000095	10526
38	BPD	PROM	PROM	050	BPDI50.slim	1.026	0.993	0.992	0.58	580	0.000095	10526
39	BPD	PROM	PROM	100	BPDI100.slim	1.026	0.990	0.989	0.58	580	0.000095	10526
40	BPD	PROM	PROM	250	BPDI250.slim	1.026	0.993	0.991	0.58	580	0.000095	10526
41	GML	PROM	PROM	002	GMLi002.slim	1.015	1.010	1.010	0.59	590	0.00009	11111
42	GML	PROM	PROM	010	GMLi10.slim	1.015	1.012	1.012	0.59	590	0.00009	11111
43	GML	PROM	PROM	050	GMLi50.slim	1.015	1.016	1.016	0.59	590	0.00009	11111
44	GML	PROM	PROM	100	GMLi100.slim	1.015	1.003	1.002	0.59	590	0.00009	11111
45	GML	PROM	PROM	250	GMLi250.slim	1.015	1.006	1.007	0.59	590	0.00009	11111
46	PAR	PROM	PROM	002	PARI002.slim	1.016	0.998	1.000	0.55	550	0.0001	10000
47	PAR	PROM	PROM	010	PARI10.slim	1.016	0.999	1.000	0.55	550	0.0001	10000
48	PAR	PROM	PROM	050	PARI50.slim	1.016	1.001	0.997	0.55	550	0.0001	10000
49	PAR	PROM	PROM	100	PARI100.slim	1.016	1.000	1.000	0.55	550	0.0001	10000
50	PAR	PROM	PROM	250	PARI250.slim	1.016	1.000	1.001	0.55	550	0.0001	10000
51	CPR	PROM	PROM	002	CPRI002.slim	0.991	1.018	1.019	0.50	500	0.00016	6250
52	CPR	PROM	PROM	010	CPRI10.slim	0.991	1.016	1.017	0.50	500	0.00016	6250
53	CPR	PROM	PROM	050	CPRI50.slim	0.991	1.015	1.016	0.50	500	0.00016	6250
54	CPR	PROM	PROM	100	CPRI100.slim	0.991	1.014	1.015	0.50	500	0.00016	6250
55	CPR	PROM	PROM	250	CPRI250.slim	0.991	1.013	1.013	0.50	500	0.00016	6250
56	BPC	PROM	PROM	002	BPCI002.slim	1.021	0.998	0.997	0.46	460	0.00025	4000
57	BPC	PROM	PROM	010	BPCI10.slim	1.021	0.993	0.994	0.46	460	0.00025	4000
58	BPC	PROM	PROM	050	BPCI50.slim	1.021	0.996	0.993	0.46	460	0.00025	4000
59	BPC	PROM	PROM	100	BPCI100.slim	1.021	0.997	0.995	0.46	460	0.00025	4000
60	BPC	PROM	PROM	250	BPCI250.slim	1.021	1.003	0.994	0.46	460	0.00025	4000

Se consultaron los registros históricos de sismos que incluyeran los datos del mismo, como localización, epicentro, magnitudes y aceleraciones máximas registradas.

Esto con el fin de visualizar si las aceleraciones máximas con las que los rellenos tendrían un factor de seguridad $FS \leq 1$ (Tabla 49) se han registrado en alguno de los sismos de los registros históricos disponibles.

La Tabla 50 presenta un resumen de los sismos históricos más importantes de los que se tiene algún tipo de reporte para la zona del eje cafetero. Estos sismos han producido históricamente los mayores daños.

Han sido eventos de profundidad intermedia (70-180km), con intensidades \geq VII. Las magnitudes han sido del orden de 5.5-7.5 Ms.

Tabla 50 Catalogo de sismos históricos importantes del Viejo Caldas Fuente: (Alcaldía de Manizales - CIMOC Universidad de los Andes, 2002)

FECHA			EPICENTRO	LAT N	LONG W	PROFUNDIDAD	INTENSIDAD	MAGNITUD
AÑO	MES	DIA						
1785	Julio	12	Páramo de Chingaza (Cund.)	4.7	73.8	30	IX	7.0
1827	Noviembre	16	Queb. Santa Ana (Caquetá)	2.0	75.9	10	X	7.7
1875	Mayo	19	Cúcuta (Norte de Sntander)	7.9	72.5	20	X	7.7
1878	Febrero	9	Parque Nacional de los Nevados	4.8	75.5	25	VII	-----
1878	Septiembre	9	Parque Nacional de los Nevados	4.8	75.5	-----	VIII	-----
1885	Mayo	25	N-E Popaván (Cauca)	2.5	76.5	20	IX	-----
1906	Enero	31	O. Pacífico (lim Col-Ecua)	2.4	79.3	25	X	8.6
1917	Agosto	31	Páramo de Sumapaz (Cund.)	4.3	74.2	40	IX	7.3
1923	Diciembre	22	Miraflores (Boyacá)	5.2	73.2	20	IX	-----
1924	Enero	10	Cartago	4.7	76.1	-----	VI	-----
1925	Junio	7	Yotoco (Valle)	3.9	76.4	170	VII-VIII	-----
1938	Febrero	4	Neira - Aranzazu - Filadelfia	5.4	75.6	90	VIII	-----
1961	Diciembre	20	Ansermanuevo - Balboa	4.8	76.0	40	VII	-----
1962	Julio	30	Pereira - Cartago	4.8	75.7	69	VIII	-----
1967	Febrero	9	Vegalarza (Huila)	2.9	74.8	26	IX	-----
1973	Abril	3	Finlandia	4.7	75.7	146	VII	-----
1973	Abril	24	Santa Rosa de Cabal	4.9	73.6	19	VII	-----
1979	Noviembre	23	El Cairo (Valle)	4.8	76.2	105	VIII	5.5
1986	Noviembre	29	San José del Palmar (Chocó)	5.1	76.7	90	V-VI	5.5
1990	Noviembre	23	Pijao - Roncesvalles	4.3	75.4	129	V	-----
1991	Noviembre	19	Desembocadura del Río San Juan (Chocó)	4.5	77.5	104	IX	-----
1992	Octubre	18	Murindó (Chocó)	7.1	76.8	33	X	7.3
1995	Febrero	8	Calima (Valle)	4.1	76.7	100	VII	6.6
1995	Agosto	19	Apia	4.6	75.4	118	VI	4.7
1999	Enero	25	Córdoba (Quindío)	4.3	75.6	35	VIII	6.2

La Tabla 51 muestra algunos sismos importantes ocurridos entre los años 1993 y 2000, que tuvieron inferencia en Manizales.

Tabla 51 Sismos relevantes con registros acelerográficos de la RSNC en la zona del Eje Cafetero. Fuente: (Alcaldía de Manizales - CIMOC Universidad de los Andes, 2002)

Fecha	Hora	Epicentro	Coordenadas Epicentro		Magnitud ML	Profundidad (Km)	Numero de Registros	Aceleración Máxima		
			Lat. N	Long. E				Estacion	g	Componente
18/11/93	14:55:13	Yali (Antioquia)	6.73	-74.77	4.7	17	1	CPENS	0.0056	N-S
26/02/94	11:52:57	Nido de B/manga	6.81	-73.1	5.6	160	1	CPENS	0.0054	N-S
28/02/94	04:55:14	Pueblo Rico (Risaralda)	5.08	-76.18	4.7	20	1	CANSE	0.0115	N-S
28/02/94	13:40:08	Pueblo Rico (Risaralda)	5.09	-76.11	4.9	120	2	CANSE	0.0115	N-S
28/03/94	19:27:33	Nido de B/manga	6.74	-73.05	5.5	160	1	CPENS	0.0039	E-W
10/12/94	15:24:22	Nido de B/manga	6.77	-73.25	6.0	150	3	CNORC	0.0088	N-S
08/02/95	18:40:26	Calima (Valle)	4.13	-76.74	6.6	102	24	CTRUJ	0.0938	E-W
15/03/95	06:30:22	Nido de B/manga	6.92	-73.08	5.1	155	1	CNORC	0.0045	N-S
12/04/95	03:09:15	Santa Cecilia (Risaralda)	5.25	-76.19	3.6	0	2	CANSE	0.0035	N-S
04/06/95	17:39:35	Rioseco (Cund.)	4.87	-74.61	4.8	8	7	CNORC	0.0221	N-S
19/8/95	21:43:34	Risaralda (Caldas)	5.11	-75.71	6.6	110	23	CNORC	0.0376	N-S
17/11/96	18:44:15	El Dovio (Valle)	4.50	-76.39	5.1	110	13	CANSE	0.0102	N-S
2/19/97	18:25:14	Sipi (Choco)	4.54	-76.52	6.1	120	33	CPENS	0.012	N-S
2/9/97	12:13:21	Génova (Quindío)	3.96	-75.97	6.8	230	70	CMAN1	0.061	N-S
10/12/97	20:12:16	Argelia (Valle)	4.72	-76.27	5.0	100	8	CMAN1	0.005	E-O
11/12/97	7:56:28	Génova (Quindío)	4.00	-76.05	6.6	220	7	CMAN1	0.07	N-S
25/1/99	13:19:52	Cordoba (Quindio)	4.44	-75.70	6.3	35	5	UQUINDIO	0.59	N-S
19/7/99	16:13:16	Trujillo (Valle)	4.27	-76.48	5.6	130	7	CMAN1	0.0062	N-S
05/02/00	21:52:20	Nido de B/manga	6.77	-73.31	6.0	160	14	CPENS	0.011	N-S
28/03/00	19:23:00	El Bagre Antioquia)	7.72	-74.54	5.3	*	4	CPENS	0.004	N-S
12/10/00	10:54:00	Nido de B/manga	6.76	-73.18	5.9	160	9	CPENS	0.01	N-S
17/12/99	06:13:00	Nido de B/manga	6.77	-72.97	5.8	153	7	CNORC	0.008	N-S

El sismo más destacado de Tabla 51, por los daños que generó en las tres ciudades capitales del Eje Cafetero, además de víctimas mortales, fue el del 25 de Enero del año 1999, cuyo epicentro fue en el municipio de Córdoba (Quindío), a una profundidad de 35km y una magnitud registrada de 6.3.

La aceleración máxima registrada por la estación acelerográfica de la Universidad del Quindío, para este sismo fue de 0.59g (Tabla 51).

Cotejando esta aceleración con las aceleraciones con las que los rellenos tendrían un factor de seguridad $FS \leq 1$ (Tabla 49), esta es mayor o igual.

La Tabla 52 presenta los registros acelerográficos disponibles registrados durante el sismo de Armenia del 25 de Enero de 1999:

Tabla 52 Registros disponibles del sismo de Armenia del 25 de Enero de 1999. Fuente: (Alcaldía de Manizales - CIMOC Universidad de los Andes, 2002)

Estación	Distancia al Epicentro (Km)	Tipo de Suelos En la Estación	Efectos Topográficos	Aceleración Máxima
Mazperea	44	Relleno	Depresión	0.30 g
LaRosa- Dosquebradas	46	Fluvio-lacustre	Plano	0.19 g
STRC-Hospital	53	Ceniza-Conglom	Semiplano	0.27 g
Castañares	47	Relleno	Semiplano	0.22 g
Bocatoma	42	Roca	Semiplano	0.087 g
Uniquindío	17	Ceniza	Plano	0.60 g

Las aceleraciones máximas registradas por estas estaciones son similares en magnitud a las de la Tabla 49.

La red de acelerógrafos de la ciudad de Manizales, instalada desde el año 1990 ha registrado algunos eventos con sus respectivas aceleraciones máximas, las cuales se incluyen en la siguiente tabla y se muestran para contextualizar.

Tabla 53 Eventos registrados por la red de acelerógrafos de la ciudad de Manizales. Fuente: (Alcaldía de Manizales - CIMOC Universidad de los Andes, 2002)

No.	Fecha dd/mm/aa	Localización	Prof. (Km)	Lat. N	Long. E	Magnitud M_L	No. Registros	Aceleración Máxima		
								Estación	cm/s ²	Componente
1	13/04/75	Pereira (Risaralda)	144	4.85	-75.71	4.9	1	*	4.97	*
2	18/05/76	La Tebaida (Quindío)	157	4.49	-75.76	5.9	1	*	48.60	*
3	22/03/77	Umpala (Santander)	164	6.77	-73.02	5.3	1	*	7.28	*
4	31/08/77	Dabeiba (Antioquia)	33	7.38	-76.21	5.6	1	*	6.62	*
5	25/06/80	Versalles (Valle)	154	4.61	-76.19	5.6	1	*	34.70	*
6	15/08/92	Belalcázar (Caldas)	127	5.10	-75.60	5.7	4	A	65.3	E-O
7	17/10/92	Murindó (Antioquia)	30	6.84	-76.82	6.9	4	A	27.3	N-S
8	18/10/92	Murindó (Antioquia)	30	6.99	-76.70	7.2	4	*	*	*
9	18/10/92	Murindó (Antioquia)	30	6.84	-76.82	7.0	4	A	62.3	E-O
10	06/06/94	Toribío (Cauca)	1	2.86	-76.08	6.4	4	A	38.4	E-O
11	19/01/95	Tauramena (Casanare)	25	5.01	-72.96	6.5	2	E	146	E-O
12	08/02/95	Calima (Valle)	100	4.13	-76.74	6.6	6	E	222	E-O
13	19/08/95	Risaralda (Caldas)	108	5.11	-75.71	6.5	6	CMAN1	22.97	VERTICAL

Se observa que la aceleración máxima registrada corresponde al sismo del 8 de febrero de 1995 con localización en Calima (Valle), con una magnitud de 6.6 y una profundidad de 100 km.

5.4 Curvas de Amenaza

El objetivo esta tesis fue establecer el nivel de amenaza por deslizamiento para rellenos antrópicos en la Ciudad de Manizales-Colombia, sin embargo considerando los resultados obtenidos, a pesar de obtener las probabilidades de falla no fue posible generar curvas de amenaza, dado que los resultados mostraron que la probabilidad de falla de los 12 rellenos estudiados dio cero o demasiado cercana a cero.

6. Conclusiones

6.1 Conclusiones

De la presente tesis se concluyó lo siguiente:

- Los 12 rellenos a los cuales se les realizó la evaluación de amenaza por deslizamiento presentaron un nivel de amenaza baja en todos los escenarios analizados, ya que sus probabilidades de falla total fueron menores a 0.0016, de acuerdo con lo ilustrado en la Tabla 41.
- Se estableció el nivel de amenaza por deslizamiento de doce rellenos en la ciudad de Manizales, a través del cálculo de la probabilidad de falla total. No se pudieron generar curvas de amenaza dado que en la mayoría de los escenarios la probabilidad de falla total dio cero o muy cercana a cero.
- Se determinaron las propiedades mecánicas: Cohesión (c') y ángulo de fricción (ϕ') de igual modo para los 12 rellenos. Así:

Se generó una serie de datos, producto de unir los datos extraídos del proyecto de Osorio Sierra & Zuluaga Moreno (2003) y los datos extraídos de los estudios de las empresas consultoras de la ciudad.

Esta serie de datos incluyó los valores de propiedades mecánicas y físicas de los dos estratos; cohesión (c') y ángulo de fricción (ϕ') y peso unitario (γ) respectivamente.

A las series de datos de cohesión (c') y ángulo de fricción (ϕ') de cada estrato, se les realizó una prueba de bondad de ajuste de Smirnov – Kolmogorov.

Con esta prueba de bondad se verificó, que las series de datos de los valores de cohesión (c') y los valores de ángulo de fricción (ϕ') seguían ambas distribuciones normales para los dos estratos.

Finalmente se determinaron los valores de cohesión (c'), ángulo de fricción (ϕ') y peso unitario (γ) para cada estrato de los rellenos y fueron incluidos en la Tabla 18.

- Se definieron 60 escenarios de análisis en condición pseudoestática y 20 en condición estática para cada uno de los 12 rellenos.

Dichos escenarios de análisis definidos para cada relleno, resultaron de todas las posibles combinaciones de las siguientes 5 variables mostradas en la Tabla 2:

Las dos variables, cohesión (c') y ángulo de fricción (ϕ'), más y menos (+/-) su respectiva su desviación estándar.

La variable detonante lluvia, la cual fue definida como una intensidad (mm/día) proyectada para los periodos de retorno Tr: 2.33 años, Tr: 10 años, Tr: 50 años, Tr: 100 años, Tr: 250 años.

La variable detonante sismo, la cual fue definida como una aceleración máxima para cada periodo los periodos de retorno Tr: 31 años, Tr: 225 años, Tr: 475 años

- Se ejecutaron 960 análisis de estabilidad correspondientes a 960 escenarios (80 por relleno) por medio del software Slide, distribuidos así: 720 en condición pseudoestática y 240 en condición estática.

- Solo 20 escenarios correspondientes al relleno Villa Carmenza (VCM), de los 720 analizados en condición pseudoestática, arrojaron resultados de factores de seguridad FS ligeramente menores que 1. Dicho escenario correspondió a un análisis con la aceleración sísmica respectiva para un Tr: 475 años.

Los otros 700 escenarios arrojaron valores de factor de seguridad FS entre 1.05 y 3.183.

- Se determinó la probabilidad de falla total anual para cada uno de los 12 rellenos, y se concluyó que todos presentaron probabilidad de falla igual a cero.
- Los resultados de los factores de seguridad (FS) obtenidos pudieron estar condicionados por la pendiente longitudinal y el espesor del relleno. Lo anterior se afirma apoyado en los datos incluidos en la Tabla 54, la cual se elaboró con base en lo observado en cada uno de los rellenos.

La Tabla 54 muestra que el relleno Villa Carmenza (VCM) es el que tiene mayor espesor y mayor pendiente, comparado con los demás, 22.3 m, 35° respectivamente. También es el que obtuvo en un escenario de análisis el factor de seguridad más bajo FS = 0.937.

Tabla 54 Factor de seguridad mínimo FS obtenido por relleno comparado con la geometría del estrato de relleno

NOMBRE RELLENO	ID	PENDIENTE MAX (°)	ESPESOR MAXIMO DEL ESTRATO RELLENO ANTROPICO (m)	ALTURA MAXIMA DEL MODELO (m)	LONGITUD EN LA BASE DEL MODELO (m)	FACTOR DE SEGURIDAD MINIMO EN STAGE DIA 391 EN EL ESCENARIO MAS DESFAVORABLE
La Isla	ISL	20°	8.5	49	275	1.327
El Nevado	NEV	18°	9.2	77	285	1.218
Alamos	ALM	6°	8.5	42	240	1.635
El Palmar	PLM	8°	8.6	42	285	1.344
Alamos-Velez	AVL	9°	6.3	30	170	1.599
Camino del Palmar	CPM	17°	10	37	174	1.219
Villa Carmenza	VCM	35°	22.3	76.5	685	0.937
Bajo Prado	BPD	20°	6.4	27.7	85	1.496
El Guamal	GML	6°	5.8	76	430	1.776
El Paraiso	PAR	15°	4.5	49.5	164	1.597
Campin-Persia	CPR	17°	10.2	44.9	210	1.191
Bajo Prado sector centro medico	BPC	22°	7.5	33.9	158	1.414

- Caso contrario ocurre con rellenos como Álamos (ALM) y El Guamal (GML), que con pendientes máximas de 6° y espesores 8.5m y 5.6 respectivamente, obtuvieron los valores más altos de factor de seguridad 1.635 y 1.776.
- Considerando lo observado en los resultados incluidos en la Tabla 54, se concluyó que los rellenos en Manizales que tengan pendientes longitudinales máximas hasta 20°, se podrían comportar estables y su probabilidad de falla seria baja.

Esto en un escenario que combine una aceleración sísmica para un Tr: 475 años y una lluvia con intensidad correspondiente a un Tr: 250 años, de acuerdo con los valores mencionados en este estudio.

- En los modelos con altura mayor a 45m, exceptuando el relleno Villa Carmenza (VCM), se observó que se creó una superficie impermeable entre los dos estratos, materiales de relleno y formación Casabianca. Esto generó un nivel freático NAF colgado, desde la condición inicial del modelo hasta la condición final (stages 391 días).

Por lo tanto, en el estrato de la formación casabianca se generaron succiones.

- En los modelos con altura menor a 45m, el volumen de agua logró ingresar y saturar los dos estratos. Esto ocurrió únicamente en la longitud que abarcó el estrato de relleno antrópico.

Por lo tanto, en dicha longitud se presentaron presiones de poros positivas en toda la altura del modelo, es decir tanto en el estrato de materiales de relleno como en la Formación casabianca.

- La calificación de la amenaza BAJA, obtenida para los 12 rellenos, es coherente con lo ilustrado en el mapa de amenaza por deslizamiento de Manizales, incluido en el POT vigente para la ciudad, y luego de haber realizado la superposición de los perímetros de cada uno de los rellenos sobre este mapa, el cual se muestra en la Figura 16 y se adjunta en el Anexo 18.

Cabe aclarar que este mapa de amenaza incluido en el POT vigente para Manizales, fue creado con posterioridad a la fecha de inicio del desarrollo de esta tesis.

Sin embargo los perímetros de los rellenos Villa Carmenza (VCM) y El Paraíso (PAR), en el mapa de amenaza por deslizamiento para Manizales, Anexo 18 y Figura 16, abarcaron unas áreas pequeñas de color café claro y roja respectivamente, lo que indicaría de acuerdo

a la Tabla 13, una tasa anual de ocurrencia de deslizamientos entre 1% y 2% y entre 2% y 3% respectivamente.

- La hipótesis de considerar como cierto que los depósitos de rellenos antrópicos en Manizales presentan amenaza por deslizamiento alta, en épocas de precipitaciones altas con mínimo 25 días de lluvias acumuladas antecedentes y adicionarle un aguacero intenso de un solo día, se podría descartar de acuerdo con los resultados de este estudio.

Esto concuerda con lo revisado en la literatura, medios de comunicación y diferentes tesis, donde no se evidenciaron antecedentes que demuestren que alguno los rellenos analizados se hayan desestabilizado desde su construcción.

Por el contrario los barrios que están asentados sobre estos aún continúan allí, en estado normal.

- El motivo por el cual se generarían los deslizamientos en la ciudad, considerando los detonantes incluidos en esta tesis y las demás consideraciones, sería que las aguas de escorrentía producto de las lluvias, son mal manejadas y corren libremente por las caras de los taludes generando erosión y desencadenando deslizamientos superficiales y flujos de volumen pequeño.

7. Referencias

- Alcaldía de Manizales - CIMOC Universidad de los Andes. (2002). *Microzonificación Sísmica de la Ciudad de Manizales*. Bogotá.
- ALCALDIA DE MANIZALES. (2017). *Componente General Documento Técnico de Soporte PLAN DE ORDENAMIENTO TERRITORIAL DE MANIZALES 2017-2031*. Manizales.
- ARANGO GARTNER, J. D. (2000). *Relación lluvias-deslizamientos y zonificación geotécnica en la comuna dos de la ciudad de Manizales*. Medellín.
- Asociación Colombiana de Ingeniería Sísmica- AIS. (2009). *Estudio General de Amenaza sísmica de Colombia*. Bogotá D.C.
- Baecher, G., & Christian, J. (2003). *Reliability and Statistics in Geotechnical Engineering*. Chichester, Inglaterra: John Wiley & Sons Ltd.
- Bowles, J. E. (1997). *Foundation Analysis and Design* (5th ed.). Peoria, Illinois, Estados Unidos: McGraw-Hill Companies.
- Canavos, G. (1998). *PROBABILIDAD Y ESTADÍSTICA Aplicación y métodos*. México D.F.: MCGRAW-HILL.
- Carvajal Gomez, A. C. (2014). *Estimación de Caudales Máximos en Contexto de Cambio Climático*. Universidad Nacional de Colombia Facultad de Minas, Escuela de Geociencias y medio Ambiente, Medellín, Colombia.
- Contrato interadministrativo No.240.2012 suscrito entre Corpocaldas y la Universidad Nacional de Colombia, Sede Manizales. (2014). *Zonificación de susceptibilidad y amenaza por deslizamientos y umbrales de lluvia detonante*. Bogotá.
- Correa Calle, O. (2019). *Desarrollo Metodológico para la Implementación de Sistemas Automáticos de Alerta Temprana Regional de Deslizamientos Desencadenados por Lluvia*. Universidad Nacional-Sede Manizales, Manizales.
- Correa Calle, O., & García Orozco, F. J. (2015). Informe sobre la modelación numérica de sensibilización de variables críticas por inestabilidad potencial de laderas y taludes en Manizales, para evaluación del riesgo.
- Cruz Zelaya, L. J. (2012). *Análisis Probabilístico de Fallas Superficiales en Taludes Debido a Procesos de Infiltración*. Pontificia Universidad Javeriana, Bogotá.
- Das, B. M. (2007). *Principles of Foundation Engineering*. Stanford, California, Estados Unidos: Cengage Learning.

- Duncan, J. (2000). Factors of Safety and Reliability in Geotechnical Engineering. *Journal of Geotechnical and Geoenvironmental Engineering*, 307-316.
- Duque Escobar, E. (2014). *Investigación geotécnica con fines de estimación de amenaza- MAPA GEOLÓGICO DE MANIZALES*. Manizales: Universidad Nacional de Colombia-Corpocaldas.
- <http://desktop.arcgis.com/es/arcmap/10.3/manage-data/tin/fundamentals-of-tin-surfaces.htm>. (s.f.).
- INGENIAR CAD/CAE LTDA. (2016). *PLAN MUNICIPAL DE GESTION DEL RIESGO DE DESASTRES DE MANIZALES*. Manizales.
- Londoño Linares, J. P. (2015). *Modelización de Problemas Ambientales en Entornos Urbanos. Deslizamientos de Tierra en Ciudades Andinas*. Universitat Politècnica de Catalunya, Barcelona.
- MANIZALES, A. D. (2017). *Proyecto de acuerdo PLAN DE ORDENAMIENTO TERRITORIAL DE MANIZALES 2017-2031*. Manizales.
- Morgenstern, N. R., & Price, V. (1965). The Analysis of the Stability Of General Slip Surfaces. En N. R. Morgenstern, & V. Price, *The Analysis of the Stability Of General Slip Surfaces* (págs. 79-93). Londres, Gran Bretaña: William Clowes and Sons, Limited London and Beccles.
- Naranjo Henao, J. L., & Rios Alzate, P. A. (1989). Geología de Manizales y sus alrededores y su influencia en los riesgos geológicos. *Revista Universidad de Caldas*, 9-37.
- Osorio Sierra, P. A., & Zuluaga Moreno, S. M. (2003). *Delimitación cartográfica y caracterización geomecánica de los llenos de cauce de la vertiente norte del río chinchiná, entre la divisoria oriental de la quebrada el guamal y estación la uribe, la avenida santander y el río chinchiná, de la ciudad de Mzle*. Manizales: Universidad de Caldas-Facultad de ciencias exactas y naturales-Programa de geología y minas.
- Reyna, T. M. (2008). *ACOPLAMIENTO DE LOS PROCESOS DE ESCURRIMIENTO SUPERFICIAL E INFILTRACION*. UNIVERSIDAD NACIONAL DE CORDOBA, Cordoba. Argentina.
- Romaña Garcia, J. F. (2014). *Los límites de la ley de Darcy*. Medellín.
- SANHUEZA PLAZA , C., & RODRIGUEZ CIFUENTES, L. (2013). ANALISIS COMPARATIVO DE METODOS DE CALCULO DE ESTABILIDAD DE TALUDES FINITOS APLICADOS A LADERAS NATURALES. *REVISTA DE LA CONSTRUCCION , VOLUMEN 12 No1-2013*.

- Servicio Geologico Colombiano. (2016). *Guía Metodológica para estudios de amenaza, vulnerabilidad y riesgo por movimientos en masa*. Bogota D.C.
- Terlien, M. T. (1997). Hydrological landslide triggering in ash-covered slopes of Manizales (Colombia). *Geomorphology* (20), 165-175.
- Universidad Nacional de Colombia-Corpocaldas. (2014). *Investigacion geotécnica con fines de estimacion de amenaza-MAPA GEOLÓGICO DE MANIZALES*. Manizales.
- Valderrama Giraldo, J. S. (2019). *Estudio de la relacion lluvia-deslizamientos en la ciudad de Manizales*. Bogota: Universidad Nacional de Colombia. Facultad de Ingenieria. Departamento de Ingeniera Civil y Agricola.
- Van Genuchten, M. (1980). A Closed-form Equation for Predicting the Hydraulic Conductivity of Unsaturated Soils.
- Vogel, T., Van Genuchten, M., & Cislerova, M. (2001). Effect of the shape of the soil hydraulic functions near saturation on variably-saturated flow predictions. *Advances in Water Resources*, 133-144.
- Walpole , R., Myers, R., & Myers, S. (1999). *Probabilidad y estadística para ingenieros 6a. ed.* Naucalpan de Juarez, Edo. de Mexico: PRENTICE-HALL HISPANOAMERICA S.A.
- www.finesoftware.eu*. (3 de 12 de 2019). Recuperado el 3 de Diciembre de 2019, de *www.finesoftware.eu*: <https://www.finesoftware.eu/help/geo5/es/morgenstern-price-01/>

8. Anexos

Anexo 1 Resultados del Factor de Seguridad (FS) y probabilidad de falla por cada escenario del Relleno La Isla (ISL)

No Escenario	Id Relleno	c'	Φ'	LI	S	Archivo geometria	Archivo Slide	FS (dia 391)	ESPERANZA (FS) (dia 391)	E(FS ²) (dia 391)	VARIANZA (FS) (dia 391)	σ (FS) (dia 391)	β	Φ (β)	Pf (FS)	Pf (lluvia)	PF (sismo)	Pf (total)	CALIFICACION
1	ISL	M	M	002	031	ISLcMMI002s031.dxf	ISLcMMI002s031.slim	1.814											
2	ISL	P	M	002	031	ISLcPMI002s031.dxf	ISLcPMI002s031.slim	1.844											
3	ISL	M	P	002	031	ISLcMFI002s031.dxf	ISLcMFI002s031.slim	1.822											
4	ISL	P	P	002	031	ISLcPFI002s031.dxf	ISLcPFI002s031.slim	1.850	1.8325000	3.3582790	0.0002228	0.014924812	55.7795987	1.0000000000	0.0000000000	0.42918455	0.03225806	0.0000000000	BAJA
5	ISL	M	M	010	031	ISLcMMI10s031.dxf	ISLcMMI10s031.slim	1.827											
6	ISL	P	M	010	031	ISLcPMI10s031.dxf	ISLcPMI10s031.slim	1.857											
7	ISL	M	P	010	031	ISLcMFI10s031.dxf	ISLcMFI10s031.slim	1.834											
8	ISL	P	P	010	031	ISLcPFI10s031.dxf	ISLcPFI10s031.slim	1.862	1.8450000	3.4042445	0.0002195	0.014815532	57.0347374	1.0000000000	0.0000000000	0.1	0.03225806	0.0000000000	BAJA
9	ISL	M	M	050	031	ISLcMMI50s031.dxf	ISLcMMI50s031.slim	1.814											
10	ISL	P	M	050	031	ISLcPMI50s031.dxf	ISLcPMI50s031.slim	1.844											
11	ISL	M	P	050	031	ISLcMFI50s031.dxf	ISLcMFI50s031.slim	1.822											
12	ISL	P	P	050	031	ISLcPFI50s031.dxf	ISLcPFI50s031.slim	1.850	1.8325000	3.3582790	0.0002228	0.014924812	55.7795987	1.0000000000	0.0000000000	0.02	0.03225806	0.0000000000	BAJA
13	ISL	M	M	100	031	ISLcMMI100s031.dxf	ISLcMMI100s031.slim	1.829											
14	ISL	P	M	100	031	ISLcPMI100s031.dxf	ISLcPMI100s031.slim	1.858											
15	ISL	M	P	100	031	ISLcMFI100s031.dxf	ISLcMFI100s031.slim	1.838											
16	ISL	P	P	100	031	ISLcPFI100s031.dxf	ISLcPFI100s031.slim	1.863	1.8470000	3.4116045	0.0001955	0.013982131	60.5773163	1.0000000000	0.0000000000	0.01	0.03225806	0.0000000000	BAJA
17	ISL	M	M	250	031	ISLcMMI250s031.dxf	ISLcMMI250s031.slim	1.815											
18	ISL	P	M	250	031	ISLcPMI250s031.dxf	ISLcPMI250s031.slim	1.845											
19	ISL	M	P	250	031	ISLcMFI250s031.dxf	ISLcMFI250s031.slim	1.822											
20	ISL	P	P	250	031	ISLcPFI250s031.dxf	ISLcPFI250s031.slim	1.850	1.8330000	3.3601085	0.0002195	0.014815532	56.2247767	1.0000000000	0.0000000000	0.004	0.03225806	0.0000000000	BAJA
21	ISL	M	M	002	225	ISLcMMI002s225.dxf	ISLcMMI002s225.slim	1.444											
22	ISL	P	M	002	225	ISLcPMI002s225.dxf	ISLcPMI002s225.slim	1.464											
23	ISL	M	P	002	225	ISLcMFI002s225.dxf	ISLcMFI002s225.slim	1.449											
24	ISL	P	P	002	225	ISLcPFI002s225.dxf	ISLcPFI002s225.slim	1.466	1.4557500	2.1192973	0.0000892	0.009443913	48.2585959	1.0000000000	0.0000000000	0.42918455	0.00444444	0.0000000000	BAJA
25	ISL	M	M	010	225	ISLcMMI10s225.dxf	ISLcMMI10s225.slim	1.455											
26	ISL	P	M	010	225	ISLcPMI10s225.dxf	ISLcPMI10s225.slim	1.475											
27	ISL	M	P	010	225	ISLcMFI10s225.dxf	ISLcMFI10s225.slim	1.459											
28	ISL	P	P	010	225	ISLcPFI10s225.dxf	ISLcPFI10s225.slim	1.477	1.4665000	2.1507150	0.0000927	0.00963068	48.4389465	1.0000000000	0.0000000000	0.1	0.00444444	0.0000000000	BAJA
29	ISL	M	M	050	225	ISLcMMI50s225.dxf	ISLcMMI50s225.slim	1.444											
30	ISL	P	M	050	225	ISLcPMI50s225.dxf	ISLcPMI50s225.slim	1.464											
31	ISL	M	P	050	225	ISLcMFI50s225.dxf	ISLcMFI50s225.slim	1.448											
32	ISL	P	P	050	225	ISLcPFI50s225.dxf	ISLcPFI50s225.slim	1.468	1.4560000	2.1200400	0.0001040	0.010198039	44.7144788	1.0000000000	0.0000000000	0.02	0.00444444	0.0000000000	BAJA
33	ISL	M	M	100	225	ISLcMMI100s225.dxf	ISLcMMI100s225.slim	1.453											
34	ISL	P	M	100	225	ISLcPMI100s225.dxf	ISLcPMI100s225.slim	1.472											
35	ISL	M	P	100	225	ISLcMFI100s225.dxf	ISLcMFI100s225.slim	1.457											
36	ISL	P	P	100	225	ISLcPFI100s225.dxf	ISLcPFI100s225.slim	1.477	1.4647500	2.1455928	0.0001002	0.010009371	46.4314909	1.0000000000	0.0000000000	0.01	0.00444444	0.0000000000	BAJA
37	ISL	M	M	250	225	ISLcMMI250s225.dxf	ISLcMMI250s225.slim	1.445											
38	ISL	P	M	250	225	ISLcPMI250s225.dxf	ISLcPMI250s225.slim	1.465											
39	ISL	M	P	250	225	ISLcMFI250s225.dxf	ISLcMFI250s225.slim	1.449											
40	ISL	P	P	250	225	ISLcPFI250s225.dxf	ISLcPFI250s225.slim	1.467	1.4565000	2.1214850	0.0000927	0.00963068	47.4005982	1.0000000000	0.0000000000	0.004	0.00444444	0.0000000000	BAJA
41	ISL	M	M	002	475	ISLcMMI002s475.dxf	ISLcMMI002s475.slim	1.328											
42	ISL	P	M	002	475	ISLcPMI002s475.dxf	ISLcPMI002s475.slim	1.345											
43	ISL	M	P	002	475	ISLcMFI002s475.dxf	ISLcMFI002s475.slim	1.331											
44	ISL	P	P	002	475	ISLcPFI002s475.dxf	ISLcPFI002s475.slim	1.348	1.3380000	1.7903185	0.0000745	0.008631338	39.1596286	1.0000000000	0.0000000000	0.42918455	0.00210526	0.0000000000	BAJA
45	ISL	M	M	010	475	ISLcMMI10s475.dxf	ISLcMMI10s475.slim	1.337											
46	ISL	P	M	010	475	ISLcPMI10s475.dxf	ISLcPMI10s475.slim	1.355											
47	ISL	M	P	010	475	ISLcMFI10s475.dxf	ISLcMFI10s475.slim	1.340											
48	ISL	P	P	010	475	ISLcPFI10s475.dxf	ISLcPFI10s475.slim	1.358	1.3475000	1.8158395	0.0000832	0.009124144	38.0857654	1.0000000000	0.0000000000	0.1	0.00210526	0.0000000000	BAJA
49	ISL	M	M	050	475	ISLcMMI50s475.dxf	ISLcMMI50s475.slim	1.327											
50	ISL	P	M	050	475	ISLcPMI50s475.dxf	ISLcPMI50s475.slim	1.345											
51	ISL	M	P	050	475	ISLcMFI50s475.dxf	ISLcMFI50s475.slim	1.330											
52	ISL	P	P	050	475	ISLcPFI50s475.dxf	ISLcPFI50s475.slim	1.348	1.3375000	1.7889895	0.0000833	0.009124144	36.9897721	1.0000000000	0.0000000000	0.02	0.00210526	0.0000000000	BAJA
53	ISL	M	M	100	475	ISLcMMI100s475.dxf	ISLcMMI100s475.slim	1.331											
54	ISL	P	M	100	475	ISLcPMI100s475.dxf	ISLcPMI100s475.slim	1.353											
55	ISL	M	P	100	475	ISLcMFI100s475.dxf	ISLcMFI100s475.slim	1.336											
56	ISL	P	P	100	475	ISLcPFI100s475.dxf	ISLcPFI100s475.slim	1.356	1.3440000	1.8064505	0.0001145	0.010700467	32.1481288	1.0000000000	0.0000000000	0.01	0.00210526	0.0000000000	BAJA
57	ISL	M	M	250	475	ISLcMMI250s475.dxf	ISLcMMI250s475.slim	1.328											
58	ISL	P	M	250	475	ISLcPMI250s475.dxf	ISLcPMI250s475.slim	1.346											
59	ISL	M	P	250	475	ISLcMFI250s475.dxf	ISLcMFI250s475.slim	1.331											
60	ISL	P	P	250	475	ISLcPFI250s475.dxf	ISLcPFI250s475.slim	1.348	1.3382500	1.7909913	0.0000782	0.00884237	38.2533207	1.0000000000	0.0000000000	0.004	0.00210526	0.0000000000	BAJA

Anexo 2 Resultados del Factor de Seguridad (FS) y probabilidad de falla por cada escenario del Relleno El Nevado (NEV)

No Escenario	Id Relleno	c'	Φ'	LI	S	Archivo geometria	Archivo Slide	FS (dia 391)	ESPERANZA (FS) (dia 391)	E(FS ²) (dia 391)	VARIANZA (FS) (dia 391)	σ (FS) (dia 391)	β	Φ (β)	Pf (FS)	Pf (lluvia)	PF (sismo)	Pf (total)	CALIFICACION
61	NEV	M	M	002	031	NEVcMMI002s031.dxf	NEVcMMI002s031.slim	1.684											
62	NEV	P	M	002	031	NEVcPMI002s031.dxf	NEVcPMI002s031.slim	1.694											
63	NEV	M	P	002	031	NEVcMPI002s031.dxf	NEVcMPI002s031.slim	1.686											
64	NEV	P	P	002	031	NEVcPPI002s031.dxf	NEVcPPI002s031.slim	1.696	1.6900000	2.8561260	0.0000260	0.00509902	135.320133	1.0000000000	0.0000000000	0.42918455	0.03174332	0.0000000000	BAJA
65	NEV	M	M	010	031	NEVcMMI10s031.dxf	NEVcMMI10s031.slim	1.685											
66	NEV	P	M	010	031	NEVcPMI10s031.dxf	NEVcPMI10s031.slim	1.696											
67	NEV	M	P	010	031	NEVcMPI10s031.dxf	NEVcMPI10s031.slim	1.688											
68	NEV	P	P	010	031	NEVcPPI10s031.dxf	NEVcPPI10s031.slim	1.697	1.6915000	2.8611985	0.0000262	0.005123475	134.96698	1.0000000000	0.0000000000	0.1	0.03174332	0.0000000000	BAJA
69	NEV	M	M	050	031	NEVcMMI50s031.dxf	NEVcMMI50s031.slim	1.684											
70	NEV	P	M	050	031	NEVcPMI50s031.dxf	NEVcPMI50s031.slim	1.695											
71	NEV	M	P	050	031	NEVcMPI50s031.dxf	NEVcMPI50s031.slim	1.686											
72	NEV	P	P	050	031	NEVcPPI50s031.dxf	NEVcPPI50s031.slim	1.695	1.6900000	2.8561255	0.0000255	0.005049752	136.640361	1.0000000000	0.0000000000	0.02	0.03174332	0.0000000000	BAJA
73	NEV	M	M	100	031	NEVcMMI100s031.dxf	NEVcMMI100s031.slim	1.683											
74	NEV	P	M	100	031	NEVcPMI100s031.dxf	NEVcPMI100s031.slim	1.694											
75	NEV	M	P	100	031	NEVcMPI100s031.dxf	NEVcMPI100s031.slim	1.685											
76	NEV	P	P	100	031	NEVcPPI100s031.dxf	NEVcPPI100s031.slim	1.695	1.6892500	2.8535938	0.0000282	0.00530919	129.82206	1.0000000000	0.0000000000	0.01	0.03174332	0.0000000000	BAJA
77	NEV	M	M	250	031	NEVcMMI250s031.dxf	NEVcMMI250s031.slim	1.682											
78	NEV	P	M	250	031	NEVcPMI250s031.dxf	NEVcPMI250s031.slim	1.693											
79	NEV	M	P	250	031	NEVcMPI250s031.dxf	NEVcMPI250s031.slim	1.684											
80	NEV	P	P	250	031	NEVcPPI250s031.dxf	NEVcPPI250s031.slim	1.694	1.6882500	2.8502163	0.0000282	0.00530919	129.633707	1.0000000000	0.0000000000	0.004	0.03174332	0.0000000000	BAJA
81	NEV	M	M	002	225	NEVcMMI002s225.dxf	NEVcMMI002s225.slim	1.329											
82	NEV	P	M	002	225	NEVcPMI002s225.dxf	NEVcPMI002s225.slim	1.336											
83	NEV	M	P	002	225	NEVcMPI002s225.dxf	NEVcMPI002s225.slim	1.330											
84	NEV	P	P	002	225	NEVcPPI002s225.dxf	NEVcPPI002s225.slim	1.336	1.3327500	1.7762333	0.0000107	0.003269174	101.784114	1.0000000000	0.0000000000	0.42918455	0.00443458	0.0000000000	BAJA
85	NEV	M	M	010	225	NEVcMMI10s225.dxf	NEVcMMI10s225.slim	1.330											
86	NEV	P	M	010	225	NEVcPMI10s225.dxf	NEVcPMI10s225.slim	1.336											
87	NEV	M	P	010	225	NEVcMPI10s225.dxf	NEVcMPI10s225.slim	1.331											
88	NEV	P	P	010	225	NEVcPPI10s225.dxf	NEVcPPI10s225.slim	1.337	1.3335000	1.7782315	0.0000092	0.003041381	109.654125	1.0000000000	0.0000000000	0.1	0.00443458	0.0000000000	BAJA
89	NEV	M	M	050	225	NEVcMMI50s225.dxf	NEVcMMI50s225.slim	1.329											
90	NEV	P	M	050	225	NEVcPMI50s225.dxf	NEVcPMI50s225.slim	1.336											
91	NEV	M	P	050	225	NEVcMPI50s225.dxf	NEVcMPI50s225.slim	1.330											
92	NEV	P	P	050	225	NEVcPPI50s225.dxf	NEVcPPI50s225.slim	1.336	1.3327500	1.7762333	0.0000107	0.003269174	101.784114	1.0000000000	0.0000000000	0.02	0.00443458	0.0000000000	BAJA
93	NEV	M	M	100	225	NEVcMMI100s225.dxf	NEVcMMI100s225.slim	1.328											
94	NEV	P	M	100	225	NEVcPMI100s225.dxf	NEVcPMI100s225.slim	1.336											
95	NEV	M	P	100	225	NEVcMPI100s225.dxf	NEVcMPI100s225.slim	1.329											
96	NEV	P	P	100	225	NEVcPPI100s225.dxf	NEVcPPI100s225.slim	1.336	1.3322500	1.7749043	0.0000142	0.00376663	88.2088281	1.0000000000	0.0000000000	0.01	0.00443458	0.0000000000	BAJA
97	NEV	M	M	250	225	NEVcMMI250s225.dxf	NEVcMMI250s225.slim	1.327											
98	NEV	P	M	250	225	NEVcPMI250s225.dxf	NEVcPMI250s225.slim	1.335											
99	NEV	M	P	250	225	NEVcMPI250s225.dxf	NEVcMPI250s225.slim	1.328											
100	NEV	P	P	250	225	NEVcPPI250s225.dxf	NEVcPPI250s225.slim	1.335	1.3312500	1.7722408	0.0000142	0.00376663	87.9433388	1.0000000000	0.0000000000	0.004	0.00443458	0.0000000000	BAJA
101	NEV	M	M	002	475	NEVcMMI002s475.dxf	NEVcMMI002s475.slim	1.219											
102	NEV	P	M	002	475	NEVcPMI002s475.dxf	NEVcPMI002s475.slim	1.226											
103	NEV	M	P	002	475	NEVcMPI002s475.dxf	NEVcMPI002s475.slim	1.221											
104	NEV	P	P	002	475	NEVcPPI002s475.dxf	NEVcPPI002s475.slim	1.228	1.2235000	1.4969655	0.0000132	0.003640055	61.4001721	1.0000000000	0.0000000000	0.42918455	0.00210305	0.0000000000	BAJA
105	NEV	M	M	010	475	NEVcMMI10s475.dxf	NEVcMMI10s475.slim	1.223											
106	NEV	P	M	010	475	NEVcPMI10s475.dxf	NEVcPMI10s475.slim	1.230											
107	NEV	M	P	010	475	NEVcMPI10s475.dxf	NEVcMPI10s475.slim	1.221											
108	NEV	P	P	010	475	NEVcPPI10s475.dxf	NEVcPPI10s475.slim	1.230	1.2260000	1.5030925	0.0000165	0.004062019	55.6373539	1.0000000000	0.0000000000	0.1	0.00210305	0.0000000000	BAJA
109	NEV	M	M	050	475	NEVcMMI50s475.dxf	NEVcMMI50s475.slim	1.219											
110	NEV	P	M	050	475	NEVcPMI50s475.dxf	NEVcPMI50s475.slim	1.227											
111	NEV	M	P	050	475	NEVcMPI50s475.dxf	NEVcMPI50s475.slim	1.221											
112	NEV	P	P	050	475	NEVcPPI50s475.dxf	NEVcPPI50s475.slim	1.228	1.2237500	1.4975788	0.0000147	0.003832427	58.3833625	1.0000000000	0.0000000000	0.02	0.00210305	0.0000000000	BAJA
113	NEV	M	M	100	475	NEVcMMI100s475.dxf	NEVcMMI100s475.slim	1.219											
114	NEV	P	M	100	475	NEVcPMI100s475.dxf	NEVcPMI100s475.slim	1.227											
115	NEV	M	P	100	475	NEVcMPI100s475.dxf	NEVcMPI100s475.slim	1.221											
116	NEV	P	P	100	475	NEVcPPI100s475.dxf	NEVcPPI100s475.slim	1.227	1.2235000	1.4969650	0.0000128	0.003570714	62.5925198	1.0000000000	0.0000000000	0.01	0.00210305	0.0000000000	BAJA
117	NEV	M	M	250	475	NEVcMMI250s475.dxf	NEVcMMI250s475.slim	1.218											
118	NEV	P	M	250	475	NEVcPMI250s475.dxf	NEVcPMI250s475.slim	1.225											
119	NEV	M	P	250	475	NEVcMPI250s475.dxf	NEVcMPI250s475.slim	1.220											
120	NEV	P	P	250	475	NEVcPPI250s475.dxf	NEVcPPI250s475.slim	1.225	1.2220000	1.4932935	0.0000095	0.003082207	72.026311	1.0000000000	0.0000000000	0.004	0.00210305	0.0000000000	BAJA

Anexo 3 Resultados del Factor de Seguridad (FS) y probabilidad de falla por cada escenario del Relleno El Nevado (NEV)

No Escenario	Id Relleno	c'	Φ'	LI	S	Archivo geometria	Archivo Slide	FS (dia 391)	ESPERANZA (FS) (dia 391)	E (FS ²) (dia 391)	VARIANZA (FS) (dia 391)	σ (FS) (dia 391)	β	Φ (β)	Pf (FS)	Pf (lluvia)	PF (sismo)	Pf (total)	CALIFICACION
121	ALM	M	M	002	031	ALMcMMI002s031.dxf	ALMcMMI002s031.slim	2.873											
122	ALM	P	M	002	031	ALMcPMI002s031.dxf	ALMcPMI002s031.slim	3.116											
123	ALM	M	P	002	031	ALMcMIP1002s031.dxf	ALMcMIP1002s031.slim	3.028											
124	ALM	P	P	002	031	ALMcPIP1002s031.dxf	ALMcPIP1002s031.slim	3.232	3.0622500	9.3945483	0.0171732	0.131046509	15.7367794	1.0000000000	0.0000000000	0.42918455	0.03174332	0.0000000000	BAJA
125	ALM	M	M	010	031	ALMcMMI10s031.dxf	ALMcMMI10s031.slim	2.865											
126	ALM	P	M	010	031	ALMcPMI10s031.dxf	ALMcPMI10s031.slim	3.109											
127	ALM	M	P	010	031	ALMcMIP10s031.dxf	ALMcMIP10s031.slim	3.022											
128	ALM	P	P	010	031	ALMcPIP10s031.dxf	ALMcPIP10s031.slim	3.230	3.0565000	9.3598725	0.0176802	0.132967101	15.4662317	1.0000000000	0.0000000000	0.1	0.03174332	0.0000000000	BAJA
129	ALM	M	M	050	031	ALMcMMI50s031.dxf	ALMcMMI50s031.slim	2.858											
130	ALM	P	M	050	031	ALMcPMI50s031.dxf	ALMcPMI50s031.slim	3.103											
131	ALM	M	P	050	031	ALMcMIP150s031.dxf	ALMcMIP150s031.slim	3.016											
132	ALM	P	P	050	031	ALMcPIP150s031.dxf	ALMcPIP150s031.slim	3.227	3.0510000	9.3266395	0.0180385	0.134307483	15.2709287	1.0000000000	0.0000000000	0.02	0.03174332	0.0000000000	BAJA
133	ALM	M	M	100	031	ALMcMMI100s031.dxf	ALMcMMI100s031.slim	2.860											
134	ALM	P	M	100	031	ALMcPMI100s031.dxf	ALMcPMI100s031.slim	3.104											
135	ALM	M	P	100	031	ALMcMIP100s031.dxf	ALMcMIP100s031.slim	3.017											
136	ALM	P	P	100	031	ALMcPIP100s031.dxf	ALMcPIP100s031.slim	3.228	3.0522500	9.3341723	0.0179422	0.133948451	15.3211925	1.0000000000	0.0000000000	0.01	0.03174332	0.0000000000	BAJA
137	ALM	M	M	250	031	ALMcMMI250s031.dxf	ALMcMMI250s031.slim	2.855											
138	ALM	P	M	250	031	ALMcPMI250s031.dxf	ALMcPMI250s031.slim	3.100											
139	ALM	M	P	250	031	ALMcMIP1250s031.dxf	ALMcMIP1250s031.slim	3.012											
140	ALM	P	P	250	031	ALMcPIP1250s031.dxf	ALMcPIP1250s031.slim	3.196	3.0407500	9.2618963	0.0157357	0.125441969	16.2684787	1.0000000000	0.0000000000	0.004	0.03174332	0.0000000000	BAJA
141	ALM	M	M	002	225	ALMcMMI002s225.dxf	ALMcMMI002s225.slim	1.878											
142	ALM	P	M	002	225	ALMcPMI002s225.dxf	ALMcPMI002s225.slim	2.044											
143	ALM	M	P	002	225	ALMcMIP1002s225.dxf	ALMcMIP1002s225.slim	1.997											
144	ALM	P	P	002	225	ALMcPIP1002s225.dxf	ALMcPIP1002s225.slim	2.117	2.0090000	4.0436295	0.0075485	0.086882104	11.6134388	1.0000000000	0.0000000000	0.42918455	0.00443458	0.0000000000	BAJA
145	ALM	M	M	010	225	ALMcMMI10s225.dxf	ALMcMMI10s225.slim	1.873											
146	ALM	P	M	010	225	ALMcPMI10s225.dxf	ALMcPMI10s225.slim	2.039											
147	ALM	M	P	010	225	ALMcMIP10s225.dxf	ALMcMIP10s225.slim	1.991											
148	ALM	P	P	010	225	ALMcPIP10s225.dxf	ALMcPIP10s225.slim	2.115	2.0045000	4.0257390	0.0077187	0.087856417	11.4334278	1.0000000000	0.0000000000	0.1	0.00443458	0.0000000000	BAJA
149	ALM	M	M	050	225	ALMcMMI50s225.dxf	ALMcMMI50s225.slim	1.869											
150	ALM	P	M	050	225	ALMcPMI50s225.dxf	ALMcPMI50s225.slim	2.036											
151	ALM	M	P	050	225	ALMcMIP150s225.dxf	ALMcMIP150s225.slim	1.986											
152	ALM	P	P	050	225	ALMcPIP150s225.dxf	ALMcPIP150s225.slim	2.107	1.9995000	4.0055255	0.0075253	0.086748199	11.5218531	1.0000000000	0.0000000000	0.02	0.00443458	0.0000000000	BAJA
153	ALM	M	M	100	225	ALMcMMI100s225.dxf	ALMcMMI100s225.slim	1.870											
154	ALM	P	M	100	225	ALMcPMI100s225.dxf	ALMcPMI100s225.slim	2.037											
155	ALM	M	P	100	225	ALMcMIP100s225.dxf	ALMcMIP100s225.slim	1.987											
156	ALM	P	P	100	225	ALMcPIP100s225.dxf	ALMcPIP100s225.slim	2.108	2.0005000	4.0095255	0.0075252	0.086748199	11.5333807	1.0000000000	0.0000000000	0.01	0.00443458	0.0000000000	BAJA
157	ALM	M	M	250	225	ALMcMMI250s225.dxf	ALMcMMI250s225.slim	1.867											
158	ALM	P	M	250	225	ALMcPMI250s225.dxf	ALMcPMI250s225.slim	2.034											
159	ALM	M	P	250	225	ALMcMIP1250s225.dxf	ALMcMIP1250s225.slim	1.983											
160	ALM	P	P	250	225	ALMcPIP1250s225.dxf	ALMcPIP1250s225.slim	2.108	1.9980000	3.9996995	0.0076955	0.087723999	11.3765903	1.0000000000	0.0000000000	0.004	0.00443458	0.0000000000	BAJA
161	ALM	M	M	002	475	ALMcMMI002s475.dxf	ALMcMMI002s475.slim	1.645											
162	ALM	P	M	002	475	ALMcPMI002s475.dxf	ALMcPMI002s475.slim	1.787											
163	ALM	M	P	002	475	ALMcMIP1002s475.dxf	ALMcMIP1002s475.slim	1.752											
164	ALM	P	P	002	475	ALMcPIP1002s475.dxf	ALMcPIP1002s475.slim	1.852	1.7590000	3.0997005	0.0056195	0.074963324	10.1249512	1.0000000000	0.0000000000	0.42918455	0.00210305	0.0000000000	BAJA
165	ALM	M	M	010	475	ALMcMMI10s475.dxf	ALMcMMI10s475.slim	1.641											
166	ALM	P	M	010	475	ALMcPMI10s475.dxf	ALMcPMI10s475.slim	1.785											
167	ALM	M	P	010	475	ALMcMIP10s475.dxf	ALMcMIP10s475.slim	1.746											
168	ALM	P	P	010	475	ALMcPIP10s475.dxf	ALMcPIP10s475.slim	1.851	1.7557500	3.0884558	0.0057977	0.076142547	9.92546254	1.0000000000	0.0000000000	0.1	0.00210305	0.0000000000	BAJA
169	ALM	M	M	050	475	ALMcMMI50s475.dxf	ALMcMMI50s475.slim	1.637											
170	ALM	P	M	050	475	ALMcPMI50s475.dxf	ALMcPMI50s475.slim	1.782											
171	ALM	M	P	050	475	ALMcMIP150s475.dxf	ALMcMIP150s475.slim	1.746											
172	ALM	P	P	050	475	ALMcPIP150s475.dxf	ALMcPIP150s475.slim	1.849	1.7535000	3.0806525	0.0058902	0.076747964	9.81785	1.0000000000	0.0000000000	0.02	0.00210305	0.0000000000	BAJA
173	ALM	M	M	100	475	ALMcMMI100s475.dxf	ALMcMMI100s475.slim	1.638											
174	ALM	P	M	100	475	ALMcPMI100s475.dxf	ALMcPMI100s475.slim	1.780											
175	ALM	M	P	100	475	ALMcMIP100s475.dxf	ALMcMIP100s475.slim	1.743											
176	ALM	P	P	100	475	ALMcPIP100s475.dxf	ALMcPIP100s475.slim	1.849	1.7525000	3.0770735	0.0058172	0.076270899	9.86614832	1.0000000000	0.0000000000	0.01	0.00210305	0.0000000000	BAJA
177	ALM	M	M	250	475	ALMcMMI250s475.dxf	ALMcMMI250s475.slim	1.635											
178	ALM	P	M	250	475	ALMcPMI250s475.dxf	ALMcPMI250s475.slim	1.778											
179	ALM	M	P	250	475	ALMcMIP1250s475.dxf	ALMcMIP1250s475.slim	1.740											
180	ALM	P	P	250	475	ALMcPIP1250s475.dxf	ALMcPIP1250s475.slim	1.844	1.7492500	3.0656113	0.0057357	0.075734322	9.89313672	1.0000000000	0.0000000000	0.004	0.00210305	0.0000000000	BAJA

Anexo 4 Resultados del Factor de Seguridad (FS) y probabilidad de falla por cada escenario del Relleno El Palmar (PLM)

No Escenario	Id Relleno	c'	Φ'	LI	S	Archivo geometria	Archivo Slide	FS (dia 391)	ESPERANZA (FS) (dia 391)	E(FS ²) (dia 391)	VARIANZA (FS) (dia 391)	σ (FS) (dia 391)	β	Φ (β)	Pf (FS)	Pf (lluvia)	PF (sismo)	Pf (total)	CALIFICACION
181	PLM	M	M	002	031	PLMcMMI002s031.dxf	PLMcMMI002s031.slim	2.237											
182	PLM	P	M	002	031	PLMcPMI002s031.dxf	PLMcPMI002s031.slim	2.286											
183	PLM	M	P	002	031	PLMcMPI002s031.dxf	PLMcMPI002s031.slim	2.248											
184	PLM	P	P	002	031	PLMcPII002s031.dxf	PLMcPII002s031.slim	2.294	2.2662500	5.1364763	0.0005872	0.024231952	52.2553857	1.0000000000	0.0000000000	0.42918455	0.03174332	0.0000000000	BAJA
185	PLM	M	M	010	031	PLMcMMI100s031.dxf	PLMcMMI100s031.slim	2.235											
186	PLM	P	M	010	031	PLMcPMI100s031.dxf	PLMcPMI100s031.slim	2.286											
187	PLM	M	P	010	031	PLMcMPI100s031.dxf	PLMcMPI100s031.slim	2.246											
188	PLM	P	P	010	031	PLMcPII100s031.dxf	PLMcPII100s031.slim	2.297	2.2660000	5.1354365	0.0006805	0.026086395	48.5310448	1.0000000000	0.0000000000	0.1	0.03174332	0.0000000000	BAJA
189	PLM	M	M	050	031	PLMcMMI50s031.dxf	PLMcMMI50s031.slim	2.226											
190	PLM	P	M	050	031	PLMcPMI50s031.dxf	PLMcPMI50s031.slim	2.280											
191	PLM	M	P	050	031	PLMcMPI50s031.dxf	PLMcMPI50s031.slim	2.239											
192	PLM	P	P	050	031	PLMcPII50s031.dxf	PLMcPII50s031.slim	2.286	2.2577500	5.0980983	0.0006632	0.025752427	48.8400568	1.0000000000	0.0000000000	0.02	0.03174332	0.0000000000	BAJA
193	PLM	M	M	100	031	PLMcMMI100s031.dxf	PLMcMMI100s031.slim	2.230											
194	PLM	P	M	100	031	PLMcPMI100s031.dxf	PLMcPMI100s031.slim	2.281											
195	PLM	M	P	100	031	PLMcMPI100s031.dxf	PLMcMPI100s031.slim	2.240											
196	PLM	P	P	100	031	PLMcPII100s031.dxf	PLMcPII100s031.slim	2.287	2.2595000	5.1059575	0.0006173	0.024844516	50.6952913	1.0000000000	0.0000000000	0.01	0.03174332	0.0000000000	BAJA
197	PLM	M	M	250	031	PLMcMMI250s031.dxf	PLMcMMI250s031.slim	2.228											
198	PLM	P	M	250	031	PLMcPMI250s031.dxf	PLMcPMI250s031.slim	2.280											
199	PLM	M	P	250	031	PLMcMPI250s031.dxf	PLMcMPI250s031.slim	2.238											
200	PLM	P	P	250	031	PLMcPII250s031.dxf	PLMcPII250s031.slim	2.286	2.2580000	5.0992060	0.0006420	0.025337719	49.6492997	1.0000000000	0.0000000000	0.004	0.03174332	0.0000000000	BAJA
201	PLM	M	M	002	225	PLMcMMI002s225.dxf	PLMcMMI002s225.slim	1.525											
202	PLM	P	M	002	225	PLMcPMI002s225.dxf	PLMcPMI002s225.slim	1.564											
203	PLM	M	P	002	225	PLMcMPI002s225.dxf	PLMcMPI002s225.slim	1.531											
204	PLM	P	P	002	225	PLMcPII002s225.dxf	PLMcPII002s225.slim	1.564	1.5460000	2.3904445	0.0003285	0.018124569	30.1248543	1.0000000000	0.0000000000	0.42918455	0.00443458	0.0000000000	BAJA
205	PLM	M	M	010	225	PLMcMMI10s225.dxf	PLMcMMI10s225.slim	1.525											
206	PLM	P	M	010	225	PLMcPMI10s225.dxf	PLMcPMI10s225.slim	1.563											
207	PLM	M	P	010	225	PLMcMPI10s225.dxf	PLMcMPI10s225.slim	1.531											
208	PLM	P	P	010	225	PLMcPII10s225.dxf	PLMcPII10s225.slim	1.565	1.5460000	2.3904450	0.0003290	0.018138357	30.1019544	1.0000000000	0.0000000000	0.1	0.00443458	0.0000000000	BAJA
209	PLM	M	M	050	225	PLMcMMI50s225.dxf	PLMcMMI50s225.slim	1.520											
210	PLM	P	M	050	225	PLMcPMI50s225.dxf	PLMcPMI50s225.slim	1.560											
211	PLM	M	P	050	225	PLMcMPI50s225.dxf	PLMcMPI50s225.slim	1.526											
212	PLM	P	P	050	225	PLMcPII50s225.dxf	PLMcPII50s225.slim	1.560	1.5415000	2.3765690	0.0003467	0.018621224	29.0797204	1.0000000000	0.0000000000	0.02	0.00443458	0.0000000000	BAJA
213	PLM	M	M	100	225	PLMcMMI100s225.dxf	PLMcMMI100s225.slim	1.521											
214	PLM	P	M	100	225	PLMcPMI100s225.dxf	PLMcPMI100s225.slim	1.560											
215	PLM	M	P	100	225	PLMcMPI100s225.dxf	PLMcMPI100s225.slim	1.527											
216	PLM	P	P	100	225	PLMcPII100s225.dxf	PLMcPII100s225.slim	1.561	1.5422500	2.3788728	0.0003377	0.018376275	29.5081558	1.0000000000	0.0000000000	0.01	0.00443458	0.0000000000	BAJA
217	PLM	M	M	250	225	PLMcMMI250s225.dxf	PLMcMMI250s225.slim	1.520											
218	PLM	P	M	250	225	PLMcPMI250s225.dxf	PLMcPMI250s225.slim	1.559											
219	PLM	M	P	250	225	PLMcMPI250s225.dxf	PLMcMPI250s225.slim	1.526											
220	PLM	P	P	250	225	PLMcPII250s225.dxf	PLMcPII250s225.slim	1.560	1.5412500	2.3757893	0.0003377	0.018376275	29.4537378	1.0000000000	0.0000000000	0.004	0.00443458	0.0000000000	BAJA
221	PLM	M	M	002	475	PLMcMMI002s475.dxf	PLMcMMI002s475.slim	1.348											
222	PLM	P	M	002	475	PLMcPMI002s475.dxf	PLMcPMI002s475.slim	1.381											
223	PLM	M	P	002	475	PLMcMPI002s475.dxf	PLMcMPI002s475.slim	1.353											
224	PLM	P	P	002	475	PLMcPII002s475.dxf	PLMcPII002s475.slim	1.383	1.3662500	1.8668908	0.0002517	0.015864662	23.0859	1.0000000000	0.0000000000	0.42918455	0.00210305	0.0000000000	BAJA
225	PLM	M	M	010	475	PLMcMMI10s475.dxf	PLMcMMI10s475.slim	1.348											
226	PLM	P	M	010	475	PLMcPMI10s475.dxf	PLMcPMI10s475.slim	1.382											
227	PLM	M	P	010	475	PLMcMPI10s475.dxf	PLMcMPI10s475.slim	1.354											
228	PLM	P	P	010	475	PLMcPII10s475.dxf	PLMcPII10s475.slim	1.383	1.3667500	1.8682583	0.0002527	0.015896147	23.0716281	1.0000000000	0.0000000000	0.1	0.00210305	0.0000000000	BAJA
229	PLM	M	M	050	475	PLMcMMI50s475.dxf	PLMcMMI50s475.slim	1.344											
230	PLM	P	M	050	475	PLMcPMI50s475.dxf	PLMcPMI50s475.slim	1.378											
231	PLM	M	P	050	475	PLMcMPI50s475.dxf	PLMcMPI50s475.slim	1.349											
232	PLM	P	P	050	475	PLMcPII50s475.dxf	PLMcPII50s475.slim	1.379	1.3625000	1.8566655	0.0002593	0.016101242	22.5137909	1.0000000000	0.0000000000	0.02	0.00210305	0.0000000000	BAJA
233	PLM	M	M	100	475	PLMcMMI100s475.dxf	PLMcMMI100s475.slim	1.345											
234	PLM	P	M	100	475	PLMcPMI100s475.dxf	PLMcPMI100s475.slim	1.379											
235	PLM	M	P	100	475	PLMcMPI100s475.dxf	PLMcMPI100s475.slim	1.350											
236	PLM	P	P	100	475	PLMcPII100s475.dxf	PLMcPII100s475.slim	1.380	1.3635000	1.8593915	0.0002593	0.016101242	22.5758979	1.0000000000	0.0000000000	0.01	0.00210305	0.0000000000	BAJA
237	PLM	M	M	250	475	PLMcMMI250s475.dxf	PLMcMMI250s475.slim	1.344											
238	PLM	P	M	250	475	PLMcPMI250s475.dxf	PLMcPMI250s475.slim	1.378											
239	PLM	M	P	250	475	PLMcMPI250s475.dxf	PLMcMPI250s475.slim	1.349											
240	PLM	P	P	250	475	PLMcPII250s475.dxf	PLMcPII250s475.slim	1.379	1.3625000	1.8566655	0.0002593	0.016101242	22.5137909	1.0000000000	0.0000000000	0.004	0.00210305	0.0000000000	BAJA

Anexo 5 Resultados del Factor de Seguridad (FS) y probabilidad de falla por cada escenario del Relleno Álamos - Vélez (AVL)

No Escenario	Id Relleno	c'	Φ	Li	S	Archivo geometria	Archivo Slide	FS (dia 391)	ESPERANZA (FS) (dia 391)	E(FS ²) (dia 391)	VARIANZA (FS) (dia 391)	σ (FS) (dia 391)	β	Φ (β)	Pf (FS)	Pf (lluvia)	PF (sismo)	Pf (total)	CALIFICACION
241	AVL	M	M	002	031	AVLcMMI002s031.dxf	AVLcMMI002s031.slim	2.595											
242	AVL	P	M	002	031	AVLcPMI002s031.dxf	AVLcPMI002s031.slim	2.641											
243	AVL	M	P	002	031	AVLcMPI002s031.dxf	AVLcMPI002s031.slim	2.606											
244	AVL	P	P	002	031	AVLcPPI002s031.dxf	AVLcPPI002s031.slim	2.642	2.6210000	6.8700765	0.0004355	0.020868637	77.6763724	1.0000000000	0.0000000000	0.42918455	0.03174332	0.0000000000	BAJA
245	AVL	M	M	010	031	AVLcMMI10s031.dxf	AVLcMMI10s031.slim	2.585											
246	AVL	P	M	010	031	AVLcPMI10s031.dxf	AVLcPMI10s031.slim	2.629											
247	AVL	M	P	010	031	AVLcMPI10s031.dxf	AVLcMPI10s031.slim	2.595											
248	AVL	P	P	010	031	AVLcPPI10s031.dxf	AVLcPPI10s031.slim	2.628	2.6092500	6.8085688	0.0003832	0.019575176	82.2087133	1.0000000000	0.0000000000	0.1	0.03174332	0.0000000000	BAJA
249	AVL	M	M	050	031	AVLcMMI50s031.dxf	AVLcMMI50s031.slim	2.580											
250	AVL	P	M	050	031	AVLcPMI50s031.dxf	AVLcPMI50s031.slim	2.623											
251	AVL	M	P	050	031	AVLcMPI50s031.dxf	AVLcMPI50s031.slim	2.590											
252	AVL	P	P	050	031	AVLcPPI50s031.dxf	AVLcPPI50s031.slim	2.623	2.6040000	6.7811895	0.0003735	0.019326148	82.9963629	1.0000000000	0.0000000000	0.02	0.03174332	0.0000000000	BAJA
253	AVL	M	M	100	031	AVLcMMI100s031.dxf	AVLcMMI100s031.slim	2.578											
254	AVL	P	M	100	031	AVLcPMI100s031.dxf	AVLcPMI100s031.slim	2.621											
255	AVL	M	P	100	031	AVLcMPI100s031.dxf	AVLcMPI100s031.slim	2.588											
256	AVL	P	P	100	031	AVLcPPI100s031.dxf	AVLcPPI100s031.slim	2.621	2.6020000	6.7707775	0.0003735	0.019326148	82.8928761	1.0000000000	0.0000000000	0.01	0.03174332	0.0000000000	BAJA
257	AVL	M	M	250	031	AVLcMMI250s031.dxf	AVLcMMI250s031.slim	2.579											
258	AVL	P	M	250	031	AVLcPMI250s031.dxf	AVLcPMI250s031.slim	2.620											
259	AVL	M	P	250	031	AVLcMPI250s031.dxf	AVLcMPI250s031.slim	2.587											
260	AVL	P	P	250	031	AVLcPPI250s031.dxf	AVLcPPI250s031.slim	2.621	2.6017500	6.7694628	0.0003597	0.018965429	84.4563017	1.0000000000	0.0000000000	0.004	0.03174332	0.0000000000	BAJA
261	AVL	M	M	002	225	AVLcMMI002s225.dxf	AVLcMMI002s225.slim	1.818											
262	AVL	P	M	002	225	AVLcPMI002s225.dxf	AVLcPMI002s225.slim	1.838											
263	AVL	M	P	002	225	AVLcMPI002s225.dxf	AVLcMPI002s225.slim	1.822											
264	AVL	P	P	002	225	AVLcPPI002s225.dxf	AVLcPPI002s225.slim	1.836	1.8285000	3.3434870	0.0000748	0.008645808	95.8267842	1.0000000000	0.0000000000	0.42918455	0.00443458	0.0000000000	BAJA
265	AVL	M	M	010	225	AVLcMMI10s225.dxf	AVLcMMI10s225.slim	1.809											
266	AVL	P	M	010	225	AVLcPMI10s225.dxf	AVLcPMI10s225.slim	1.832											
267	AVL	M	P	010	225	AVLcMPI10s225.dxf	AVLcMPI10s225.slim	1.813											
268	AVL	P	P	010	225	AVLcPPI10s225.dxf	AVLcPPI10s225.slim	1.831	1.8212500	3.3170588	0.0001072	0.01035314	79.3237636	1.0000000000	0.0000000000	0.1	0.00443458	0.0000000000	BAJA
269	AVL	M	M	050	225	AVLcMMI50s225.dxf	AVLcMMI50s225.slim	1.804											
270	AVL	P	M	050	225	AVLcPMI50s225.dxf	AVLcPMI50s225.slim	1.826											
271	AVL	M	P	050	225	AVLcMPI50s225.dxf	AVLcMPI50s225.slim	1.809											
272	AVL	P	P	050	225	AVLcPPI50s225.dxf	AVLcPPI50s225.slim	1.821	1.8150000	3.2943035	0.0000785	0.008860023	91.9862216	1.0000000000	0.0000000000	0.02	0.00443458	0.0000000000	BAJA
273	AVL	M	M	100	225	AVLcMMI100s225.dxf	AVLcMMI100s225.slim	1.803											
274	AVL	P	M	100	225	AVLcPMI100s225.dxf	AVLcPMI100s225.slim	1.825											
275	AVL	M	P	100	225	AVLcMPI100s225.dxf	AVLcMPI100s225.slim	1.808											
276	AVL	P	P	100	225	AVLcPPI100s225.dxf	AVLcPPI100s225.slim	1.821	1.8142500	3.2915848	0.0000817	0.009038114	90.0907007	1.0000000000	0.0000000000	0.01	0.00443458	0.0000000000	BAJA
277	AVL	M	M	250	225	AVLcMMI250s225.dxf	AVLcMMI250s225.slim	1.803											
278	AVL	P	M	250	225	AVLcPMI250s225.dxf	AVLcPMI250s225.slim	1.820											
279	AVL	M	P	250	225	AVLcMPI250s225.dxf	AVLcMPI250s225.slim	1.808											
280	AVL	P	P	250	225	AVLcPPI250s225.dxf	AVLcPPI250s225.slim	1.822	1.8132500	3.2879393	0.0000637	0.007980445	101.905347	1.0000000000	0.0000000000	0.004	0.00443458	0.0000000000	BAJA
281	AVL	M	M	002	475	AVLcMMI002s475.dxf	AVLcMMI002s475.slim	1.612											
282	AVL	P	M	002	475	AVLcPMI002s475.dxf	AVLcPMI002s475.slim	1.632											
283	AVL	M	P	002	475	AVLcMPI002s475.dxf	AVLcMPI002s475.slim	1.618											
284	AVL	P	P	002	475	AVLcPPI002s475.dxf	AVLcPPI002s475.slim	1.629	1.6227500	2.6333833	0.0000657	0.008104783	76.8373484	1.0000000000	0.0000000000	0.42918455	0.00210305	0.0000000000	BAJA
285	AVL	M	M	010	475	AVLcMMI10s475.dxf	AVLcMMI10s475.slim	1.604											
286	AVL	P	M	010	475	AVLcPMI10s475.dxf	AVLcPMI10s475.slim	1.626											
287	AVL	M	P	010	475	AVLcMPI10s475.dxf	AVLcMPI10s475.slim	1.610											
288	AVL	P	P	010	475	AVLcPPI10s475.dxf	AVLcPPI10s475.slim	1.622	1.6155000	2.6099190	0.0000788	0.00887412	69.3589925	1.0000000000	0.0000000000	0.1	0.00210305	0.0000000000	BAJA
289	AVL	M	M	050	475	AVLcMMI50s475.dxf	AVLcMMI50s475.slim	1.601											
290	AVL	P	M	050	475	AVLcPMI50s475.dxf	AVLcPMI50s475.slim	1.621											
291	AVL	M	P	050	475	AVLcMPI50s475.dxf	AVLcMPI50s475.slim	1.603											
292	AVL	P	P	050	475	AVLcPPI50s475.dxf	AVLcPPI50s475.slim	1.621	1.6115000	2.5970230	0.0000908	0.009526279	64.1908527	1.0000000000	0.0000000000	0.02	0.00210305	0.0000000000	BAJA
293	AVL	M	M	100	475	AVLcMMI100s475.dxf	AVLcMMI100s475.slim	1.600											
294	AVL	P	M	100	475	AVLcPMI100s475.dxf	AVLcPMI100s475.slim	1.620											
295	AVL	M	P	100	475	AVLcMPI100s475.dxf	AVLcMPI100s475.slim	1.602											
296	AVL	P	P	100	475	AVLcPPI100s475.dxf	AVLcPPI100s475.slim	1.616	1.6095000	2.5905650	0.0000748	0.008645808	70.4965902	1.0000000000	0.0000000000	0.01	0.00210305	0.0000000000	BAJA
297	AVL	M	M	250	475	AVLcMMI250s475.dxf	AVLcMMI250s475.slim	1.599											
298	AVL	P	M	250	475	AVLcPMI250s475.dxf	AVLcPMI250s475.slim	1.620											
299	AVL	M	P	250	475	AVLcMPI250s475.dxf	AVLcMPI250s475.slim	1.602											
300	AVL	P	P	250	475	AVLcPPI250s475.dxf	AVLcPPI250s475.slim	1.616	1.6092500	2.5897653	0.0000797	0.008926786	68.2496513	1.0000000000	0.0000000000	0.004	0.00210305	0.0000000000	BAJA

Anexo 6 Resultados del Factor de Seguridad (FS) y probabilidad de falla por cada escenario del Relleno Camino del Palmar (CPM)

No Escenario	Id Relleno	c'	Φ'	LI	S	Archivo geometria	Archivo Slide	FS (dia 391)	ESPERANZA (FS) (dia 391)	E(FS ²) (dia 391)	VARIANZA (FS) (dia 391)	σ (FS) (dia 391)	β	Φ (β)	Pf (FS)	Pf (lluvia)	PF (sismo)	Pf (total)	CALIFICACION
301	CPM	M	M	002	031	CPMcMMI002s031.dxf	CPMcMMI002s031.slim	1.779											
302	CPM	P	M	002	031	CPMcPMI002s031.dxf	CPMcPMI002s031.slim	2.206											
303	CPM	M	P	002	031	CPMcMPI002s031.dxf	CPMcMPI002s031.slim	2.173											
304	CPM	P	P	002	031	CPMcPII002s031.dxf	CPMcPII002s031.slim	2.210	2.0920000	4.4093265	0.0328625	0.18128017	6.02382489	0.9999999991	0.0000000009	0.42918455	0.03174332	0.0000000001	BAJA
305	CPM	M	M	010	031	CPMcMMI100s031.dxf	CPMcMMI100s031.slim	1.776											
306	CPM	P	M	010	031	CPMcPMI100s031.dxf	CPMcPMI100s031.slim	2.218											
307	CPM	M	P	010	031	CPMcMPI100s031.dxf	CPMcMPI100s031.slim	2.190											
308	CPM	P	P	010	031	CPMcPII100s031.dxf	CPMcPII100s031.slim	2.221	2.1012500	4.4506603	0.0354087	0.188171963	5.85235964	0.9999999976	0.0000000024	0.1	0.03174332	0.0000000001	BAJA
309	CPM	M	M	050	031	CPMcMMI50s031.dxf	CPMcMMI50s031.slim	1.765											
310	CPM	P	M	050	031	CPMcPMI50s031.dxf	CPMcPMI50s031.slim	2.215											
311	CPM	M	P	050	031	CPMcMPI50s031.dxf	CPMcMPI50s031.slim	2.183											
312	CPM	P	P	050	031	CPMcPII50s031.dxf	CPMcPII50s031.slim	2.216	2.0947500	4.4243988	0.0364212	0.190843359	5.73637987	0.9999999952	0.0000000048	0.02	0.03174332	0.0000000000	BAJA
313	CPM	M	M	100	031	CPMcMMI100s031.dxf	CPMcMMI100s031.slim	1.767											
314	CPM	P	M	100	031	CPMcPMI100s031.dxf	CPMcPMI100s031.slim	2.211											
315	CPM	M	P	100	031	CPMcMPI100s031.dxf	CPMcMPI100s031.slim	2.177											
316	CPM	P	P	100	031	CPMcPII100s031.dxf	CPMcPII100s031.slim	2.216	2.0927500	4.4151988	0.0355962	0.188669519	5.79187356	0.9999999965	0.0000000035	0.01	0.03174332	0.0000000000	BAJA
317	CPM	M	M	250	031	CPMcMMI250s031.dxf	CPMcMMI250s031.slim	1.764											
318	CPM	P	M	250	031	CPMcPMI250s031.dxf	CPMcPMI250s031.slim	2.212											
319	CPM	M	P	250	031	CPMcMPI250s031.dxf	CPMcMPI250s031.slim	2.178											
320	CPM	P	P	250	031	CPMcPII250s031.dxf	CPMcPII250s031.slim	2.215	2.0922500	4.4136373	0.0361272	0.190071533	5.74652072	0.9999999954	0.0000000046	0.004	0.03174332	0.0000000000	BAJA
321	CPM	M	M	002	225	CPMcMMI002s225.dxf	CPMcMMI002s225.slim	1.358											
322	CPM	P	M	002	225	CPMcPMI002s225.dxf	CPMcPMI002s225.slim	1.631											
323	CPM	M	P	002	225	CPMcMPI002s225.dxf	CPMcMPI002s225.slim	1.618											
324	CPM	P	P	002	225	CPMcPII002s225.dxf	CPMcPII002s225.slim	1.633	1.5600000	2.4472345	0.0136345	0.116768682	4.79588123	0.999991902	0.0000008098	0.42918455	0.00443458	0.0000000154	BAJA
325	CPM	M	M	010	225	CPMcMMI10s225.dxf	CPMcMMI10s225.slim	1.358											
326	CPM	P	M	010	225	CPMcPMI10s225.dxf	CPMcPMI10s225.slim	1.634											
327	CPM	M	P	010	225	CPMcMPI10s225.dxf	CPMcMPI10s225.slim	1.617											
328	CPM	P	P	010	225	CPMcPII10s225.dxf	CPMcPII10s225.slim	1.637	1.5615000	2.4521445	0.0138622	0.117738057	4.76906122	0.9999990746	0.0000009254	0.1	0.00443458	0.0000000041	BAJA
329	CPM	M	M	050	225	CPMcMMI50s225.dxf	CPMcMMI50s225.slim	1.350											
330	CPM	P	M	050	225	CPMcPMI50s225.dxf	CPMcPMI50s225.slim	1.634											
331	CPM	M	P	050	225	CPMcMPI50s225.dxf	CPMcMPI50s225.slim	1.612											
332	CPM	P	P	050	225	CPMcPII50s225.dxf	CPMcPII50s225.slim	1.637	1.5582500	2.4426923	0.0145492	0.120620013	4.62817062	0.9999981554	0.0000018446	0.02	0.00443458	0.0000000016	BAJA
333	CPM	M	M	100	225	CPMcMMI100s225.dxf	CPMcMMI100s225.slim	1.351											
334	CPM	P	M	100	225	CPMcPMI100s225.dxf	CPMcPMI100s225.slim	1.635											
335	CPM	M	P	100	225	CPMcMPI100s225.dxf	CPMcMPI100s225.slim	1.622											
336	CPM	P	P	100	225	CPMcPII100s225.dxf	CPMcPII100s225.slim	1.637	1.5612500	2.4522698	0.0147682	0.121524432	4.61841288	0.9999980666	0.0000019334	0.01	0.00443458	0.0000000009	BAJA
337	CPM	M	M	250	225	CPMcMMI250s225.dxf	CPMcMMI250s225.slim	1.347											
338	CPM	P	M	250	225	CPMcPMI250s225.dxf	CPMcPMI250s225.slim	1.635											
339	CPM	M	P	250	225	CPMcMPI250s225.dxf	CPMcMPI250s225.slim	1.624											
340	CPM	P	P	250	225	CPMcPII250s225.dxf	CPMcPII250s225.slim	1.637	1.5607500	2.4511948	0.0152542	0.123507844	4.54019747	0.9999971899	0.0000028101	0.004	0.00443458	0.0000000005	BAJA
341	CPM	M	M	002	475	CPMcMMI002s475.dxf	CPMcMMI002s475.slim	1.227											
342	CPM	P	M	002	475	CPMcPMI002s475.dxf	CPMcPMI002s475.slim	1.467											
343	CPM	M	P	002	475	CPMcMPI002s475.dxf	CPMcMPI002s475.slim	1.460											
344	CPM	P	P	002	475	CPMcPII002s475.dxf	CPMcPII002s475.slim	1.467	1.4052500	1.9853268	0.0105992	0.102952355	3.93628682	0.9999586240	0.0000413760	0.42918455	0.00210305	0.00000003735	BAJA
345	CPM	M	M	010	475	CPMcMMI10s475.dxf	CPMcMMI10s475.slim	1.225											
346	CPM	P	M	010	475	CPMcPMI10s475.dxf	CPMcPMI10s475.slim	1.474											
347	CPM	M	P	010	475	CPMcMPI10s475.dxf	CPMcMPI10s475.slim	1.455											
348	CPM	P	P	010	475	CPMcPII10s475.dxf	CPMcPII10s475.slim	1.480	1.4085000	1.9951815	0.0113092	0.106344958	3.84127287	0.9999388010	0.0000611990	0.1	0.00210305	0.00000001287	BAJA
349	CPM	M	M	050	475	CPMcMMI50s475.dxf	CPMcMMI50s475.slim	1.219											
350	CPM	P	M	050	475	CPMcPMI50s475.dxf	CPMcPMI50s475.slim	1.468											
351	CPM	M	P	050	475	CPMcMPI50s475.dxf	CPMcMPI50s475.slim	1.455											
352	CPM	P	P	050	475	CPMcPII50s475.dxf	CPMcPII50s475.slim	1.47	1.4030000	1.9797275	0.0113185	0.106388439	3.78800557	0.9999240693	0.0000759307	0.02	0.00210305	0.00000000319	BAJA
353	CPM	M	M	100	475	CPMcMMI100s475.dxf	CPMcMMI100s475.slim	1.219											
354	CPM	P	M	100	475	CPMcPMI100s475.dxf	CPMcPMI100s475.slim	1.468											
355	CPM	M	P	100	475	CPMcMPI100s475.dxf	CPMcMPI100s475.slim	1.465											
356	CPM	P	P	100	475	CPMcPII100s475.dxf	CPMcPII100s475.slim	1.472	1.4060000	1.9884985	0.0116625	0.107993055	3.759501	0.9999148737	0.0000851263	0.01	0.00210305	0.00000000179	BAJA
357	CPM	M	M	250	475	CPMcMMI250s475.dxf	CPMcMMI250s475.slim	1.221											
358	CPM	P	M	250	475	CPMcPMI250s475.dxf	CPMcPMI250s475.slim	1.471											
359	CPM	M	P	250	475	CPMcMPI250s475.dxf	CPMcMPI250s475.slim	1.466											
360	CPM	P	P	250	475	CPMcPII250s475.dxf	CPMcPII250s475.slim	1.477	1.4087500	1.9963418	0.0117652	0.108467449	3.76841166	0.9999178552	0.0000821448	0.004	0.00210305	0.00000000069	BAJA

Anexo 7 Resultados del Factor de Seguridad (FS) y probabilidad de falla por cada escenario del Relleno Villa Carmenza (VCM)

No Escenario	Id Relleno	c'	Φ	Li	S	Archivo geometria	Archivo Slide	FS (dia 391)	ESPERANZA (FS) (dia 391)	E(FS ²) (dia 391)	VARIANZA (FS) (dia 391)	σ (FS) (dia 391)	β	Φ (β)	Pf (FS)	Pf (lluvia)	PF (sismo)	Pf (total)	CALIFICACION
361	VCM	M	M	002	031	VCMcMMI002s031.dxf	VCMcMMI002s031.slim	1.051											
362	VCM	P	M	002	031	VCMcPMI002s031.dxf	VCMcPMI002s031.slim	1.117											
363	VCM	M	P	002	031	VCMcMIP1002s031.dxf	VCMcMIP1002s031.slim	1.060											
364	VCM	P	P	002	031	VCMcPPI1002s031.dxf	VCMcPPI1002s031.slim	1.117	1.0862500	1.1808948	0.0009557	0.030914196	2.78998039	0.9973644383	0.0026355617	0.42918455	0.03174332	0.00003590622	BAJA
365	VCM	M	M	010	031	VCMcMMI100s031.dxf	VCMcMMI100s031.slim	1.050											
366	VCM	P	M	010	031	VCMcPMI100s031.dxf	VCMcPMI100s031.slim	1.115											
367	VCM	M	P	010	031	VCMcMIP1100s031.dxf	VCMcMIP1100s031.slim	1.059											
368	VCM	P	P	010	031	VCMcPPI1100s031.dxf	VCMcPPI1100s031.slim	1.116	1.0850000	1.1781655	0.0009405	0.030667572	2.77165727	0.9972114138	0.0027885862	0.1	0.03174332	0.00000885190	BAJA
369	VCM	M	M	050	031	VCMcMMI50s031.dxf	VCMcMMI50s031.slim	1.048											
370	VCM	P	M	050	031	VCMcPMI50s031.dxf	VCMcPMI50s031.slim	1.114											
371	VCM	M	P	050	031	VCMcMIP150s031.dxf	VCMcMIP150s031.slim	1.057											
372	VCM	P	P	050	031	VCMcPPI150s031.dxf	VCMcPPI150s031.slim	1.114	1.0832500	1.1743863	0.0009557	0.030914196	2.69293759	0.9964587238	0.0035412762	0.02	0.03174332	0.00000224824	BAJA
373	VCM	M	M	100	031	VCMcMMI100s031.dxf	VCMcMMI100s031.slim	1.048											
374	VCM	P	M	100	031	VCMcPMI100s031.dxf	VCMcPMI100s031.slim	1.113											
375	VCM	M	P	100	031	VCMcMIP1100s031.dxf	VCMcMIP1100s031.slim	1.056											
376	VCM	P	P	100	031	VCMcPPI1100s031.dxf	VCMcPPI1100s031.slim	1.113	1.0825000	1.1727445	0.0009383	0.030630867	2.69336159	0.9964632246	0.0035367754	0.01	0.03174332	0.00000112269	BAJA
377	VCM	M	M	250	031	VCMcMMI250s031.dxf	VCMcMMI250s031.slim	1.047											
378	VCM	P	M	250	031	VCMcPMI250s031.dxf	VCMcPMI250s031.slim	1.113											
379	VCM	M	P	250	031	VCMcMIP1250s031.dxf	VCMcMIP1250s031.slim	1.055											
380	VCM	P	P	250	031	VCMcPPI250s031.dxf	VCMcPPI250s031.slim	1.112	1.0817500	1.1711368	0.0009537	0.030881831	2.64718758	0.9959417841	0.0040582159	0.004	0.03174332	0.00000051529	BAJA
381	VCM	M	M	002	225	VCMcMMI002s225.dxf	VCMcMMI002s225.slim	1.008											
382	VCM	P	M	002	225	VCMcPMI002s225.dxf	VCMcPMI002s225.slim	1.078											
383	VCM	M	P	002	225	VCMcMIP1002s225.dxf	VCMcMIP1002s225.slim	1.049											
384	VCM	P	P	002	225	VCMcPPI1002s225.dxf	VCMcPPI1002s225.slim	1.099	1.0585000	1.1215875	0.0011652	0.034135758	1.71374543	0.9567122555	0.0432877445	0.42918455	0.00443458	0.00008238759	BAJA
385	VCM	M	M	010	225	VCMcMMI10s225.dxf	VCMcMMI10s225.slim	1.007											
386	VCM	P	M	010	225	VCMcPMI10s225.dxf	VCMcPMI10s225.slim	1.077											
387	VCM	M	P	010	225	VCMcMIP110s225.dxf	VCMcMIP110s225.slim	1.048											
388	VCM	P	P	010	225	VCMcPPI110s225.dxf	VCMcPPI110s225.slim	1.099	1.0577500	1.1200208	0.0011857	0.034433813	1.67713054	0.9532415212	0.0467584788	0.1	0.00443458	0.00002073543	BAJA
389	VCM	M	M	050	225	VCMcMMI50s225.dxf	VCMcMMI50s225.slim	1.006											
390	VCM	P	M	050	225	VCMcPMI50s225.dxf	VCMcPMI50s225.slim	1.076											
391	VCM	M	P	050	225	VCMcMIP150s225.dxf	VCMcMIP150s225.slim	1.047											
392	VCM	P	P	050	225	VCMcPPI150s225.dxf	VCMcPPI150s225.slim	1.098	1.0567500	1.1179063	0.0011857	0.034433813	1.64808932	0.9503328283	0.0496671717	0.02	0.00443458	0.00000440506	BAJA
393	VCM	M	M	100	225	VCMcMMI100s225.dxf	VCMcMMI100s225.slim	1.005											
394	VCM	P	M	100	225	VCMcPMI100s225.dxf	VCMcPMI100s225.slim	1.075											
395	VCM	M	P	100	225	VCMcMIP1100s225.dxf	VCMcMIP1100s225.slim	1.046											
396	VCM	P	P	100	225	VCMcPPI1100s225.dxf	VCMcPPI1100s225.slim	1.097	1.0557500	1.1157938	0.0011857	0.034433813	1.6190481	0.9472815427	0.0527184573	0.01	0.00443458	0.00000233784	BAJA
397	VCM	M	M	250	225	VCMcMMI250s225.dxf	VCMcMMI250s225.slim	1.008											
398	VCM	P	M	250	225	VCMcPMI250s225.dxf	VCMcPMI250s225.slim	1.077											
399	VCM	M	P	250	225	VCMcMIP1250s225.dxf	VCMcMIP1250s225.slim	1.047											
400	VCM	P	P	250	225	VCMcPPI1250s225.dxf	VCMcPPI1250s225.slim	1.099	1.0577500	1.1200008	0.0011657	0.034142166	1.69145683	0.9546252072	0.0453747928	0.004	0.00443458	0.00000080487	BAJA
401	VCM	M	M	002	475	VCMcMMI002s475.dxf	VCMcMMI002s475.slim	0.940											
402	VCM	P	M	002	475	VCMcPMI002s475.dxf	VCMcPMI002s475.slim	0.977											
403	VCM	M	P	002	475	VCMcMIP1002s475.dxf	VCMcMIP1002s475.slim	0.965											
404	VCM	P	P	002	475	VCMcPPI1002s475.dxf	VCMcPPI1002s475.slim	0.996	0.9695000	0.9403425	0.0004123	0.020303941	-1.50217146	0.0665264164	0.9334735836	0.42918455	0.00210305	0.00084254951	BAJA
405	VCM	M	M	010	475	VCMcMMI10s475.dxf	VCMcMMI10s475.slim	0.939											
406	VCM	P	M	010	475	VCMcPMI10s475.dxf	VCMcPMI10s475.slim	0.977											
407	VCM	M	P	010	475	VCMcMIP110s475.dxf	VCMcMIP110s475.slim	0.964											
408	VCM	P	P	010	475	VCMcPPI110s475.dxf	VCMcPPI110s475.slim	0.996	0.9690000	0.9393905	0.0004295	0.020724382	-1.49582267	0.0673499366	0.9326500634	0.1	0.00210305	0.00019614085	BAJA
409	VCM	M	M	050	475	VCMcMMI50s475.dxf	VCMcMMI50s475.slim	0.938											
410	VCM	P	M	050	475	VCMcPMI50s475.dxf	VCMcPMI50s475.slim	0.976											
411	VCM	M	P	050	475	VCMcMIP150s475.dxf	VCMcMIP150s475.slim	0.963											
412	VCM	P	P	050	475	VCMcPPI150s475.dxf	VCMcPPI150s475.slim	0.995	0.9680000	0.9374535	0.0004295	0.020724382	-1.54407501	0.0612850810	0.9387149190	0.02	0.00210305	0.00003948326	BAJA
413	VCM	M	M	100	475	VCMcMMI100s475.dxf	VCMcMMI100s475.slim	0.937											
414	VCM	P	M	100	475	VCMcPMI100s475.dxf	VCMcPMI100s475.slim	0.975											
415	VCM	M	P	100	475	VCMcMIP1100s475.dxf	VCMcMIP1100s475.slim	0.962											
416	VCM	P	P	100	475	VCMcPPI1100s475.dxf	VCMcPPI1100s475.slim	0.995	0.9672500	0.9360158	0.0004432	0.021052019	-1.55567027	0.0598932594	0.9401067406	0.01	0.00210305	0.00001977090	BAJA
417	VCM	M	M	250	475	VCMcMMI250s475.dxf	VCMcMMI250s475.slim	0.941											
418	VCM	P	M	250	475	VCMcPMI250s475.dxf	VCMcPMI250s475.slim	0.976											
419	VCM	M	P	250	475	VCMcMIP1250s475.dxf	VCMcMIP1250s475.slim	0.964											
420	VCM	P	P	250	475	VCMcPPI1250s475.dxf	VCMcPPI1250s475.slim	0.996	0.9692500	0.9398423	0.0003967	0.019917015	-1.54390603	0.0613055500	0.9386944500	0.004	0.00210305	0.00000789648	BAJA

Anexo 8 Resultados del Factor de Seguridad (FS) y probabilidad de falla por cada escenario del Relleno Bajo Prado (BPD)

No Escenario	Id Relleno	c'	Φ	LI	S	Archivo geometria	Archivo Slide	FS (dia 391)	ESPERANZA (FS) (dia 391)	E(FS ²) (dia 391)	VARIANZA (FS) (dia 391)	σ (FS) (dia 391)	β	Φ (β)	Pf (FS)	Pf (lluvia)	PF (sismo)	Pf (total)	CALIFICACION
421	BPD	M	M	002	031	BPDcMMI002s031.dxf	BPDcMMI002s031.slim	2.413											
422	BPD	P	M	002	031	BPDcPMI002s031.dxf	BPDcPMI002s031.slim	2.524											
423	BPD	M	P	002	031	BPDcMPI002s031.dxf	BPDcMPI002s031.slim	2.438											
424	BPD	P	P	002	031	BPDcPIPI002s031.dxf	BPDcPIPI002s031.slim	2.530	2.4762500	6.1344723	0.0026582	0.051557613	28.6330166	1.0000000000	0.0000000000	0.42918455	0.03174332	0.0000000000	BAJA
425	BPD	M	M	010	031	BPDcMMI10s031.dxf	BPDcMMI10s031.slim	2.413											
426	BPD	P	M	010	031	BPDcPMI10s031.dxf	BPDcPMI10s031.slim	2.526											
427	BPD	M	P	010	031	BPDcMPI10s031.dxf	BPDcMPI10s031.slim	2.440											
428	BPD	P	P	010	031	BPDcPIPI10s031.dxf	BPDcPIPI10s031.slim	2.531	2.4775000	6.1407015	0.0026952	0.051915797	28.4595456	1.0000000000	0.0000000000	0.1	0.03174332	0.0000000000	BAJA
429	BPD	M	M	050	031	BPDcMMI50s031.dxf	BPDcMMI50s031.slim	2.410											
430	BPD	P	M	050	031	BPDcPMI50s031.dxf	BPDcPMI50s031.slim	2.525											
431	BPD	M	P	050	031	BPDcMPI50s031.dxf	BPDcMPI50s031.slim	2.437											
432	BPD	P	P	050	031	BPDcPIPI50s031.dxf	BPDcPIPI50s031.slim	2.531	2.4757500	6.1321638	0.0028257	0.053157196	27.7619985	1.0000000000	0.0000000000	0.02	0.03174332	0.0000000000	BAJA
433	BPD	M	M	100	031	BPDcMMI100s031.dxf	BPDcMMI100s031.slim	2.383											
434	BPD	P	M	100	031	BPDcPMI100s031.dxf	BPDcPMI100s031.slim	2.487											
435	BPD	M	P	100	031	BPDcMPI100s031.dxf	BPDcMPI100s031.slim	2.403											
436	BPD	P	P	100	031	BPDcPIPI100s031.dxf	BPDcPIPI100s031.slim	2.489	2.4405000	5.9583470	0.0023067	0.048028637	29.9925228	1.0000000000	0.0000000000	0.01	0.03174332	0.0000000000	BAJA
437	BPD	M	M	250	031	BPDcMMI250s031.dxf	BPDcMMI250s031.slim	2.397											
438	BPD	P	M	250	031	BPDcPMI250s031.dxf	BPDcPMI250s031.slim	2.510											
439	BPD	M	P	250	031	BPDcMPI250s031.dxf	BPDcMPI250s031.slim	2.422											
440	BPD	P	P	250	031	BPDcPIPI250s031.dxf	BPDcPIPI250s031.slim	2.514	2.4607500	6.0579973	0.0027067	0.052025835	28.0773966	1.0000000000	0.0000000000	0.004	0.03174332	0.0000000000	BAJA
441	BPD	M	M	002	225	BPDcMMI002s225.dxf	BPDcMMI002s225.slim	1.702											
442	BPD	P	M	002	225	BPDcPMI002s225.dxf	BPDcPMI002s225.slim	1.875											
443	BPD	M	P	002	225	BPDcMPI002s225.dxf	BPDcMPI002s225.slim	1.811											
444	BPD	P	P	002	225	BPDcPIPI002s225.dxf	BPDcPIPI002s225.slim	1.871	1.8147500	3.2981978	0.0048802	0.069858339	11.6628883	1.0000000000	0.0000000000	0.42918455	0.00443458	0.0000000000	BAJA
445	BPD	M	M	010	225	BPDcMMI10s225.dxf	BPDcMMI10s225.slim	1.690											
446	BPD	P	M	010	225	BPDcPMI10s225.dxf	BPDcPMI10s225.slim	1.868											
447	BPD	M	P	010	225	BPDcMPI10s225.dxf	BPDcMPI10s225.slim	1.803											
448	BPD	P	P	010	225	BPDcPIPI10s225.dxf	BPDcPIPI10s225.slim	1.863	1.8060000	3.2667755	0.0051395	0.071690306	11.2428031	1.0000000000	0.0000000000	0.1	0.00443458	0.0000000000	BAJA
449	BPD	M	M	050	225	BPDcMMI50s225.dxf	BPDcMMI50s225.slim	1.679											
450	BPD	P	M	050	225	BPDcPMI50s225.dxf	BPDcPMI50s225.slim	1.864											
451	BPD	M	P	050	225	BPDcMPI50s225.dxf	BPDcMPI50s225.slim	1.799											
452	BPD	P	P	050	225	BPDcPIPI50s225.dxf	BPDcPIPI50s225.slim	1.860	1.8005000	3.2473845	0.0055842	0.07472784	10.7122059	1.0000000000	0.0000000000	0.02	0.00443458	0.0000000000	BAJA
453	BPD	M	M	100	225	BPDcMMI100s225.dxf	BPDcMMI100s225.slim	1.675											
454	BPD	P	M	100	225	BPDcPMI100s225.dxf	BPDcPMI100s225.slim	1.857											
455	BPD	M	P	100	225	BPDcMPI100s225.dxf	BPDcMPI100s225.slim	1.793											
456	BPD	P	P	100	225	BPDcPIPI100s225.dxf	BPDcPIPI100s225.slim	1.853	1.7945000	3.2256330	0.0054028	0.073503401	10.8090236	1.0000000000	0.0000000000	0.01	0.00443458	0.0000000000	BAJA
457	BPD	M	M	250	225	BPDcMMI250s225.dxf	BPDcMMI250s225.slim	1.67											
458	BPD	P	M	250	225	BPDcPMI250s225.dxf	BPDcPMI250s225.slim	1.862											
459	BPD	M	P	250	225	BPDcMPI250s225.dxf	BPDcMPI250s225.slim	1.795											
460	BPD	P	P	250	225	BPDcPIPI250s225.dxf	BPDcPIPI250s225.slim	1.857	1.7960000	3.2316045	0.0059885	0.077385399	10.2861781	1.0000000000	0.0000000000	0.004	0.00443458	0.0000000000	BAJA
461	BPD	M	M	002	475	BPDcMMI002s475.dxf	BPDcMMI002s475.slim	1.525											
462	BPD	P	M	002	475	BPDcPMI002s475.dxf	BPDcPMI002s475.slim	1.700											
463	BPD	M	P	002	475	BPDcMPI002s475.dxf	BPDcMPI002s475.slim	1.639											
464	BPD	P	P	002	475	BPDcPIPI002s475.dxf	BPDcPIPI002s475.slim	1.696	1.6400000	2.6945905	0.0049905	0.070643471	9.05957749	1.0000000000	0.0000000000	0.42918455	0.00210305	0.0000000000	BAJA
465	BPD	M	M	010	475	BPDcMMI10s475.dxf	BPDcMMI10s475.slim	1.515											
466	BPD	P	M	010	475	BPDcPMI10s475.dxf	BPDcPMI10s475.slim	1.693											
467	BPD	M	P	010	475	BPDcMPI10s475.dxf	BPDcMPI10s475.slim	1.632											
468	BPD	P	P	010	475	BPDcPIPI10s475.dxf	BPDcPIPI10s475.slim	1.689	1.6322500	2.6694048	0.0051647	0.07186576	8.7976527	1.0000000000	0.0000000000	0.1	0.00210305	0.0000000000	BAJA
469	BPD	M	M	050	475	BPDcMMI50s475.dxf	BPDcMMI50s475.slim	1.505											
470	BPD	P	M	050	475	BPDcPMI50s475.dxf	BPDcPMI50s475.slim	1.690											
471	BPD	M	P	050	475	BPDcMPI50s475.dxf	BPDcMPI50s475.slim	1.628											
472	BPD	P	P	050	475	BPDcPIPI50s475.dxf	BPDcPIPI50s475.slim	1.686	1.6272500	2.6535263	0.0055837	0.074724076	8.39421557	1.0000000000	0.0000000000	0.02	0.00210305	0.0000000000	BAJA
473	BPD	M	M	100	475	BPDcMMI100s475.dxf	BPDcMMI100s475.slim	1.501											
474	BPD	P	M	100	475	BPDcPMI100s475.dxf	BPDcPMI100s475.slim	1.684											
475	BPD	M	P	100	475	BPDcMPI100s475.dxf	BPDcMPI100s475.slim	1.623											
476	BPD	P	P	100	475	BPDcPIPI100s475.dxf	BPDcPIPI100s475.slim	1.68	1.6220000	2.6363465	0.0054625	0.073908727	8.41578554	1.0000000000	0.0000000000	0.01	0.00210305	0.0000000000	BAJA
477	BPD	M	M	250	475	BPDcMMI250s475.dxf	BPDcMMI250s475.slim	1.496											
478	BPD	P	M	250	475	BPDcPMI250s475.dxf	BPDcPMI250s475.slim	1.688											
479	BPD	M	P	250	475	BPDcMPI250s475.dxf	BPDcMPI250s475.slim	1.625											
480	BPD	P	P	250	475	BPDcPIPI250s475.dxf	BPDcPIPI250s475.slim	1.683	1.6230000	2.6401185	0.0059895	0.07739186	8.0499422	1.0000000000	0.0000000000	0.004	0.00210305	0.0000000000	BAJA

Anexo 9 Resultados del Factor de Seguridad (FS) y probabilidad de falla por cada escenario del Relleno El Guamal (GML)

No Escenario	Id Relleno	c'	Φ	Li	S	Archivo geometria	Archivo Slide	FS (dia 391)	ESPERANZA (FS) (dia 391)	E(FS ²) (dia 391)	VARIANZA (FS) (dia 391)	σ (FS) (dia 391)	β	Φ (β)	Pf (FS)	Pf (lluvia)	PF (sismo)	Pf (total)	CALIFICACION
481	GML	M	M	002	031	GMLcMIMI002s031.dxf	GMLcMIMI002s031.slim	2.621											
482	GML	P	M	002	031	GMLcPMI002s031.dxf	GMLcPMI002s031.slim	2.637											
483	GML	M	P	002	031	GMLcMIP1002s031.dxf	GMLcMIP1002s031.slim	2.621											
484	GML	P	P	002	031	GMLcPPI1002s031.dxf	GMLcPPI1002s031.slim	2.636	2.6287500	6.9103868	0.0000602	0.00775806	209.942941	1.0000000000	0.0000000000	0.42918455	0.03174332	0.0000000000	BAJA
485	GML	M	M	010	031	GMLcMIMI10s031.dxf	GMLcMIMI10s031.slim	2.630											
486	GML	P	M	010	031	GMLcPMI10s031.dxf	GMLcPMI10s031.slim	2.647											
487	GML	M	P	010	031	GMLcMIP110s031.dxf	GMLcMIP110s031.slim	2.629											
488	GML	P	P	010	031	GMLcPPI110s031.dxf	GMLcPPI110s031.slim	2.646	2.6380000	6.9591165	0.0000725	0.008514693	192.373344	1.0000000000	0.0000000000	0.1	0.03174332	0.0000000000	BAJA
489	GML	M	M	050	031	GMLcMIMI50s031.dxf	GMLcMIMI50s031.slim	2.631											
490	GML	P	M	050	031	GMLcPMI50s031.dxf	GMLcPMI50s031.slim	2.647											
491	GML	M	P	050	031	GMLcMIP150s031.dxf	GMLcMIP150s031.slim	2.634											
492	GML	P	P	050	031	GMLcPPI150s031.dxf	GMLcPPI150s031.slim	2.646	2.6395000	6.9670105	0.0000503	0.007088723	231.282827	1.0000000000	0.0000000000	0.02	0.03174332	0.0000000000	BAJA
493	GML	M	M	100	031	GMLcMIMI100s031.dxf	GMLcMIMI100s031.slim	2.616											
494	GML	P	M	100	031	GMLcPMI100s031.dxf	GMLcPMI100s031.slim	2.632											
495	GML	M	P	100	031	GMLcMIP1100s031.dxf	GMLcMIP1100s031.slim	2.613											
496	GML	P	P	100	031	GMLcPPI1100s031.dxf	GMLcPPI1100s031.slim	2.628	2.6222500	6.8762583	0.0000632	0.007949057	204.080823	1.0000000000	0.0000000000	0.01	0.03174332	0.0000000000	BAJA
497	GML	M	M	250	031	GMLcMIMI250s031.dxf	GMLcMIMI250s031.slim	2.616											
498	GML	P	M	250	031	GMLcPMI250s031.dxf	GMLcPMI250s031.slim	2.635											
499	GML	M	P	250	031	GMLcMIP1250s031.dxf	GMLcMIP1250s031.slim	2.618											
500	GML	P	P	250	031	GMLcPPI250s031.dxf	GMLcPPI250s031.slim	2.634	2.6257500	6.8946403	0.0000772	0.008785642	185.046244	1.0000000000	0.0000000000	0.004	0.03174332	0.0000000000	BAJA
501	GML	M	M	002	225	GMLcMIMI002s225.dxf	GMLcMIMI002s225.slim	1.968											
502	GML	P	M	002	225	GMLcPMI002s225.dxf	GMLcPMI002s225.slim	1.977											
503	GML	M	P	002	225	GMLcMIP1002s225.dxf	GMLcMIP1002s225.slim	1.968											
504	GML	P	P	002	225	GMLcPPI1002s225.dxf	GMLcPPI1002s225.slim	1.976	1.9722500	3.8897883	0.0000182	0.004264681	227.977217	1.0000000000	0.0000000000	0.42918455	0.00443458	0.0000000000	BAJA
505	GML	M	M	010	225	GMLcMIMI10s225.dxf	GMLcMIMI10s225.slim	1.973											
506	GML	P	M	010	225	GMLcPMI10s225.dxf	GMLcPMI10s225.slim	1.982											
507	GML	M	P	010	225	GMLcMIP110s225.dxf	GMLcMIP110s225.slim	1.973											
508	GML	P	P	010	225	GMLcPPI110s225.dxf	GMLcPPI110s225.slim	1.981	1.9772500	3.9095358	0.0000182	0.004264681	229.149638	1.0000000000	0.0000000000	0.1	0.00443458	0.0000000000	BAJA
509	GML	M	M	050	225	GMLcMIMI50s225.dxf	GMLcMIMI50s225.slim	1.972											
510	GML	P	M	050	225	GMLcPMI50s225.dxf	GMLcPMI50s225.slim	1.981											
511	GML	M	P	050	225	GMLcMIP150s225.dxf	GMLcMIP150s225.slim	1.972											
512	GML	P	P	050	225	GMLcPPI150s225.dxf	GMLcPPI150s225.slim	1.981	1.9765000	3.9065725	0.0000202	0.0045	217	1.0000000000	0.0000000000	0.02	0.00443458	0.0000000000	BAJA
513	GML	M	M	100	225	GMLcMIMI100s225.dxf	GMLcMIMI100s225.slim	1.970											
514	GML	P	M	100	225	GMLcPMI100s225.dxf	GMLcPMI100s225.slim	1.979											
515	GML	M	P	100	225	GMLcMIP1100s225.dxf	GMLcMIP1100s225.slim	1.970											
516	GML	P	P	100	225	GMLcPPI1100s225.dxf	GMLcPPI1100s225.slim	1.978	1.9742500	3.8976813	0.0000182	0.004264681	228.446186	1.0000000000	0.0000000000	0.01	0.00443458	0.0000000000	BAJA
517	GML	M	M	250	225	GMLcMIMI250s225.dxf	GMLcMIMI250s225.slim	1.970											
518	GML	P	M	250	225	GMLcPMI250s225.dxf	GMLcPMI250s225.slim	1.979											
519	GML	M	P	250	225	GMLcMIP1250s225.dxf	GMLcMIP1250s225.slim	1.971											
520	GML	P	P	250	225	GMLcPPI250s225.dxf	GMLcPPI250s225.slim	1.978	1.9745000	3.8986665	0.0000163	0.004031129	241.743698	1.0000000000	0.0000000000	0.004	0.00443458	0.0000000000	BAJA
521	GML	M	M	002	475	GMLcMIMI002s475.dxf	GMLcMIMI002s475.slim	1.776											
522	GML	P	M	002	475	GMLcPMI002s475.dxf	GMLcPMI002s475.slim	1.784											
523	GML	M	P	002	475	GMLcMIP1002s475.dxf	GMLcMIP1002s475.slim	1.776											
524	GML	P	P	002	475	GMLcPPI1002s475.dxf	GMLcPPI1002s475.slim	1.783	1.7797500	3.1675243	0.0000142	0.00376663	207.015301	1.0000000000	0.0000000000	0.42918455	0.00210305	0.0000000000	BAJA
525	GML	M	M	010	475	GMLcMIMI10s475.dxf	GMLcMIMI10s475.slim	1.781											
526	GML	P	M	010	475	GMLcPMI10s475.dxf	GMLcPMI10s475.slim	1.789											
527	GML	M	P	010	475	GMLcMIP110s475.dxf	GMLcMIP110s475.slim	1.781											
528	GML	P	P	010	475	GMLcPPI110s475.dxf	GMLcPPI110s475.slim	1.788	1.7847500	3.1853468	0.0000142	0.00376663	208.342748	1.0000000000	0.0000000000	0.1	0.00210305	0.0000000000	BAJA
529	GML	M	M	050	475	GMLcMIMI50s475.dxf	GMLcMIMI50s475.slim	1.780											
530	GML	P	M	050	475	GMLcPMI50s475.dxf	GMLcPMI50s475.slim	1.788											
531	GML	M	P	050	475	GMLcMIP150s475.dxf	GMLcMIP150s475.slim	1.780											
532	GML	P	P	050	475	GMLcPPI150s475.dxf	GMLcPPI150s475.slim	1.787	1.7837500	3.1817783	0.0000142	0.00376663	208.077258	1.0000000000	0.0000000000	0.02	0.00210305	0.0000000000	BAJA
533	GML	M	M	100	475	GMLcMIMI100s475.dxf	GMLcMIMI100s475.slim	1.788											
534	GML	P	M	100	475	GMLcPMI100s475.dxf	GMLcPMI100s475.slim	1.786											
535	GML	M	P	100	475	GMLcMIP1100s475.dxf	GMLcMIP1100s475.slim	1.778											
536	GML	P	P	100	475	GMLcPPI1100s475.dxf	GMLcPPI1100s475.slim	1.785	1.7842500	3.1835623	0.0000142	0.00376663	208.210003	1.0000000000	0.0000000000	0.01	0.00210305	0.0000000000	BAJA
537	GML	M	M	250	475	GMLcMIMI250s475.dxf	GMLcMIMI250s475.slim	1.779											
538	GML	P	M	250	475	GMLcPMI250s475.dxf	GMLcPMI250s475.slim	1.786											
539	GML	M	P	250	475	GMLcMIP1250s475.dxf	GMLcMIP1250s475.slim	1.778											
540	GML	P	P	250	475	GMLcPPI250s475.dxf	GMLcPPI250s475.slim	1.786	1.7822500	3.1764293	0.0000142	0.00376663	207.679024	1.0000000000	0.0000000000	0.004	0.00210305	0.0000000000	BAJA

Anexo 10 Resultados del Factor de Seguridad (FS) y probabilidad de falla por cada escenario del Relleno El Paraíso (PAR)

No Escenario	Id Relleno	Φ'	Li	S	Archivo geometria	Archivo Slide	FS (dia 391)	ESPERANZA (FS) (dia 391)	E(FS ²) (dia 391)	VARIANZA (FS) (dia 391)	σ (FS) (dia 391)	β	Φ (β)	Pf (FS)	Pf (lluvia)	PF (sismo)	Pf (total)	CALIFICACION	
541	PAR	M	M	002	031	PARcMMI002s031.dxf	PARcMMI002s031.slim	2.327											
542	PAR	P	M	002	031	PARcPMI002s031.dxf	PARcPMI002s031.slim	2.331											
543	PAR	M	P	002	031	PARcMPI002s031.dxf	PARcMPI002s031.slim	2.326											
544	PAR	P	P	002	031	PARcPPI002s031.dxf	PARcPPI002s031.slim	2.330	2.3285000	5.4219165	0.0000042	0.002061553	644.417156	1.0000000000	0.0000000000	0.42918455	0.03174332	0.0000000000	BAJA
545	PAR	M	M	010	031	PARcMMI10s031.dxf	PARcMMI10s031.slim	2.325											
546	PAR	P	M	010	031	PARcPMI10s031.dxf	PARcPMI10s031.slim	2.330											
547	PAR	M	P	010	031	PARcMPI10s031.dxf	PARcMPI10s031.slim	2.325											
548	PAR	P	P	010	031	PARcPPI10s031.dxf	PARcPPI10s031.slim	2.328	2.3270000	5.4149335	0.0000045	0.00212132	625.553799	1.0000000000	0.0000000000	0.1	0.03174332	0.0000000000	BAJA
549	PAR	M	M	050	031	PARcMMI50s031.dxf	PARcMMI50s031.slim	2.333											
550	PAR	P	M	050	031	PARcPMI50s031.dxf	PARcPMI50s031.slim	2.330											
551	PAR	M	P	050	031	PARcMPI50s031.dxf	PARcMPI50s031.slim	2.325											
552	PAR	P	P	050	031	PARcPPI50s031.dxf	PARcPPI50s031.slim	2.329	2.3292500	5.4254138	0.0000082	0.002861381	464.548447	1.0000000000	0.0000000000	0.02	0.03174332	0.0000000000	BAJA
553	PAR	M	M	100	031	PARcMMI100s031.dxf	PARcMMI100s031.slim	2.324											
554	PAR	P	M	100	031	PARcPMI100s031.dxf	PARcPMI100s031.slim	2.329											
555	PAR	M	P	100	031	PARcMPI100s031.dxf	PARcMPI100s031.slim	2.325											
556	PAR	P	P	100	031	PARcPPI100s031.dxf	PARcPPI100s031.slim	2.329	2.3267500	5.4137708	0.0000052	0.002277608	582.518928	1.0000000000	0.0000000000	0.01	0.03174332	0.0000000000	BAJA
557	PAR	M	M	250	031	PARcMMI250s031.dxf	PARcMMI250s031.slim	2.336											
558	PAR	P	M	250	031	PARcPMI250s031.dxf	PARcPMI250s031.slim	2.330											
559	PAR	M	P	250	031	PARcMPI250s031.dxf	PARcMPI250s031.slim	2.326											
560	PAR	P	P	250	031	PARcPPI250s031.dxf	PARcPPI250s031.slim	2.329	2.3302500	5.4300783	0.0000132	0.00363146	366.312747	1.0000000000	0.0000000000	0.004	0.03174332	0.0000000000	BAJA
561	PAR	M	M	002	225	PARcMMI002s225.dxf	PARcMMI002s225.slim	1.767											
562	PAR	P	M	002	225	PARcPMI002s225.dxf	PARcPMI002s225.slim	1.764											
563	PAR	M	P	002	225	PARcMPI002s225.dxf	PARcMPI002s225.slim	1.769											
564	PAR	P	P	002	225	PARcPPI002s225.dxf	PARcPPI002s225.slim	1.764	1.7660000	3.1187605	0.0000045	0.00212132	361.095863	1.0000000000	0.0000000000	0.42918455	0.00443458	0.0000000000	BAJA
565	PAR	M	M	010	225	PARcMMI10s225.dxf	PARcMMI10s225.slim	1.762											
566	PAR	P	M	010	225	PARcPMI10s225.dxf	PARcPMI10s225.slim	1.762											
567	PAR	M	P	010	225	PARcMPI10s225.dxf	PARcMPI10s225.slim	1.766											
568	PAR	P	P	010	225	PARcPPI10s225.dxf	PARcPPI10s225.slim	1.764	1.7635000	3.1099350	0.0000027	0.001658312	460.407823	1.0000000000	0.0000000000	0.1	0.00443458	0.0000000000	BAJA
569	PAR	M	M	050	225	PARcMMI50s225.dxf	PARcMMI50s225.slim	1.761											
570	PAR	P	M	050	225	PARcPMI50s225.dxf	PARcPMI50s225.slim	1.762											
571	PAR	M	P	050	225	PARcMPI50s225.dxf	PARcMPI50s225.slim	1.763											
572	PAR	P	P	050	225	PARcPPI50s225.dxf	PARcPPI50s225.slim	1.762	1.7620000	3.1046445	0.0000005	0.000707107	1077.63073	1.0000000000	0.0000000000	0.02	0.00443458	0.0000000000	BAJA
573	PAR	M	M	100	225	PARcMMI100s225.dxf	PARcMMI100s225.slim	1.765											
574	PAR	P	M	100	225	PARcPMI100s225.dxf	PARcPMI100s225.slim	1.762											
575	PAR	M	P	100	225	PARcMPI100s225.dxf	PARcMPI100s225.slim	1.767											
576	PAR	P	P	100	225	PARcPPI100s225.dxf	PARcPPI100s225.slim	1.762	1.7640000	3.1117005	0.0000045	0.00212132	360.153054	1.0000000000	0.0000000000	0.01	0.00443458	0.0000000000	BAJA
577	PAR	M	M	250	225	PARcMMI250s225.dxf	PARcMMI250s225.slim	1.767											
578	PAR	P	M	250	225	PARcPMI250s225.dxf	PARcPMI250s225.slim	1.763											
579	PAR	M	P	250	225	PARcMPI250s225.dxf	PARcMPI250s225.slim	1.767											
580	PAR	P	P	250	225	PARcPPI250s225.dxf	PARcPPI250s225.slim	1.766	1.7657500	3.1178758	0.0000027	0.00163936	467.103121	1.0000000000	0.0000000000	0.004	0.00443458	0.0000000000	BAJA
581	PAR	M	M	002	475	PARcMMI002s475.dxf	PARcMMI002s475.slim	1.598											
582	PAR	P	M	002	475	PARcPMI002s475.dxf	PARcPMI002s475.slim	1.599											
583	PAR	M	P	002	475	PARcMPI002s475.dxf	PARcMPI002s475.slim	1.601											
584	PAR	P	P	002	475	PARcPPI002s475.dxf	PARcPPI002s475.slim	1.599	1.5992500	2.5576018	0.0000012	0.001089725	549.909514	1.0000000000	0.0000000000	0.42918455	0.00210305	0.0000000000	BAJA
585	PAR	M	M	010	475	PARcMMI10s475.dxf	PARcMMI10s475.slim	1.604											
586	PAR	P	M	010	475	PARcPMI10s475.dxf	PARcPMI10s475.slim	1.603											
587	PAR	M	P	010	475	PARcMPI10s475.dxf	PARcMPI10s475.slim	1.604											
588	PAR	P	P	010	475	PARcPPI10s475.dxf	PARcPPI10s475.slim	1.599	1.6025000	2.5680105	0.0000042	0.002061553	292.255428	1.0000000000	0.0000000000	0.1	0.00210305	0.0000000000	BAJA
589	PAR	M	M	050	475	PARcMMI50s475.dxf	PARcMMI50s475.slim	1.602											
590	PAR	P	M	050	475	PARcPMI50s475.dxf	PARcPMI50s475.slim	1.599											
591	PAR	M	P	050	475	PARcMPI50s475.dxf	PARcMPI50s475.slim	1.600											
592	PAR	P	P	050	475	PARcPPI50s475.dxf	PARcPPI50s475.slim	1.598	1.5997500	2.5592023	0.0000022	0.00147902	405.505011	1.0000000000	0.0000000000	0.02	0.00210305	0.0000000000	BAJA
593	PAR	M	M	100	475	PARcMMI100s475.dxf	PARcMMI100s475.slim	1.602											
594	PAR	P	M	100	475	PARcPMI100s475.dxf	PARcPMI100s475.slim	1.598											
595	PAR	M	P	100	475	PARcMPI100s475.dxf	PARcMPI100s475.slim	1.597											
596	PAR	P	P	100	475	PARcPPI100s475.dxf	PARcPPI100s475.slim	1.600	1.5992500	2.5576043	0.0000037	0.001920286	312.06282	1.0000000000	0.0000000000	0.01	0.00210305	0.0000000000	BAJA
597	PAR	M	M	250	475	PARcMMI250s475.dxf	PARcMMI250s475.slim	1.602											
598	PAR	P	M	250	475	PARcPMI250s475.dxf	PARcPMI250s475.slim	1.599											
599	PAR	M	P	250	475	PARcMPI250s475.dxf	PARcMPI250s475.slim	1.602											
600	PAR	P	P	250	475	PARcPPI250s475.dxf	PARcPPI250s475.slim	1.599	1.6005000	2.5616025	0.0000023	0.0015	400.333333	1.0000000000	0.0000000000	0.004	0.00210305	0.0000000000	BAJA

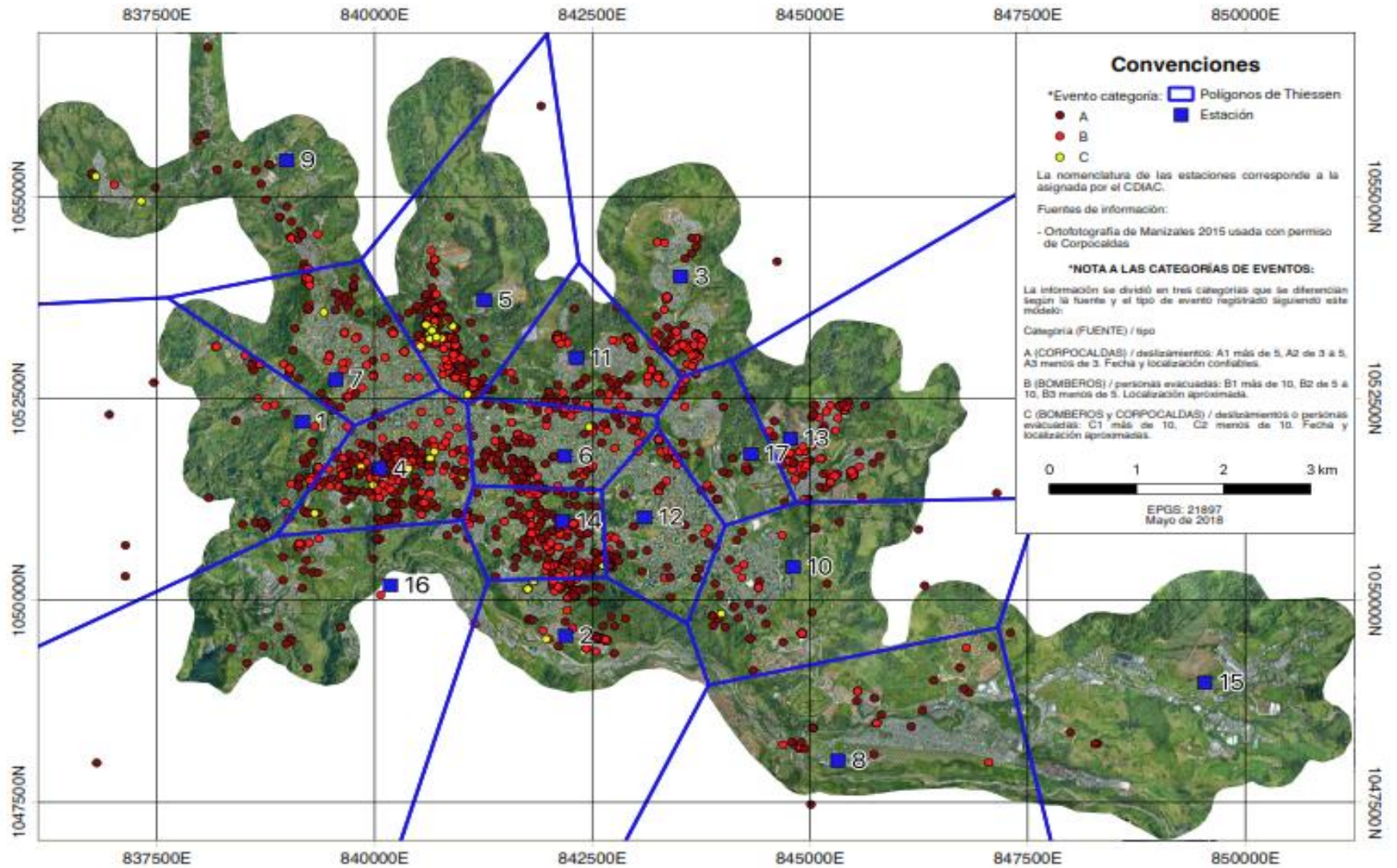
Anexo 11 Resultados del Factor de Seguridad (FS) y probabilidad de falla por cada escenario del Relleno Campin- Persia (CPR)

No Escenario	Id Relleno	C'	Φ	Li	S	Archivo geometria	Archivo Slide	FS (dia 391)	ESPERANZA (FS) (dia 391)	E(FS ²) (dia 391)	VARIANZA (FS) (dia 391)	σ (FS) (dia 391)	β	Φ (β)	Pf (FS)	Pf (lluvia)	PF (sismo)	Pf (total)	CALIFICACION
601	CPR	M	M	002	031	CP RcMMI002s031.dxf	CP RcMMI002s031.slim	1.777											
602	CPR	P	M	002	031	CP RcPMI002s031.dxf	CP RcPMI002s031.slim	2.239											
603	CPR	M	P	002	031	CP RcMPI002s031.dxf	CP RcMPI002s031.slim	2.172											
604	CPR	P	P	002	031	CP RcPPI002s031.dxf	CP RcPPI002s031.slim	2.242	2.1075000	4.4787495	0.0371932	0.192855516	5.74264104	0.9999999953	0.0000000047	0.42918455	0.03174332	0.00000000006	BAJA
605	CPR	M	M	010	031	CP RcMMI10s031.dxf	CP RcMMI10s031.slim	1.775											
606	CPR	P	M	010	031	CP RcPMI10s031.dxf	CP RcPMI10s031.slim	2.332											
607	CPR	M	P	010	031	CP RcMPI10s031.dxf	CP RcMPI10s031.slim	2.212											
608	CPR	P	P	010	031	CP RcPPI10s031.dxf	CP RcPPI10s031.slim	2.337	2.1640000	4.7358405	0.0529445	0.230096719	5.05874228	0.999997890	0.0000002110	0.1	0.03174332	0.00000000067	BAJA
609	CPR	M	M	050	031	CP RcMMI50s031.dxf	CP RcMMI50s031.slim	1.769											
610	CPR	P	M	050	031	CP RcPMI50s031.dxf	CP RcPMI50s031.slim	2.330											
611	CPR	M	P	050	031	CP RcMPI50s031.dxf	CP RcMPI50s031.slim	2.203											
612	CPR	P	P	050	031	CP RcPPI50s031.dxf	CP RcPPI50s031.slim	2.335	2.1592500	4.7159238	0.0535632	0.231437222	5.00891772	0.999997263	0.0000002737	0.02	0.03174332	0.00000000017	BAJA
613	CPR	M	M	100	031	CP RcMMI100s031.dxf	CP RcMMI100s031.slim	1.766											
614	CPR	P	M	100	031	CP RcPMI100s031.dxf	CP RcPMI100s031.slim	2.327											
615	CPR	M	P	100	031	CP RcMPI100s031.dxf	CP RcMPI100s031.slim	2.199											
616	CPR	P	P	100	031	CP RcPPI100s031.dxf	CP RcPPI100s031.slim	2.332	2.1560000	4.7018775	0.0535415	0.231390363	4.99588654	0.999997072	0.0000002928	0.01	0.03174332	0.00000000009	BAJA
617	CPR	M	M	250	031	CP RcMMI250s031.dxf	CP RcMMI250s031.slim	1.762											
618	CPR	P	M	250	031	CP RcPMI250s031.dxf	CP RcPMI250s031.slim	2.323											
619	CPR	M	P	250	031	CP RcMPI250s031.dxf	CP RcMPI250s031.slim	2.193											
620	CPR	P	P	250	031	CP RcPPI250s031.dxf	CP RcPPI250s031.slim	2.327	2.1512500	4.6812878	0.0534112	0.231108605	4.9814242	0.999996844	0.0000003156	0.004	0.03174332	0.00000000004	BAJA
621	CPR	M	M	002	225	CP RcMMI002s225.dxf	CP RcMMI002s225.slim	1.332											
622	CPR	P	M	002	225	CP RcPMI002s225.dxf	CP RcPMI002s225.slim	1.731											
623	CPR	M	P	002	225	CP RcMPI002s225.dxf	CP RcMPI002s225.slim	1.656											
624	CPR	P	P	002	225	CP RcPPI002s225.dxf	CP RcPPI002s225.slim	1.731	1.6125000	2.6273205	0.0271643	0.164815806	3.71626978	0.9998989072	0.0001010928	0.42918455	0.00443458	0.00000019241	BAJA
625	CPR	M	M	010	225	CP RcMMI10s225.dxf	CP RcMMI10s225.slim	1.327											
626	CPR	P	M	010	225	CP RcPMI10s225.dxf	CP RcPMI10s225.slim	1.729											
627	CPR	M	P	010	225	CP RcMPI10s225.dxf	CP RcMPI10s225.slim	1.649											
628	CPR	P	P	010	225	CP RcPPI10s225.dxf	CP RcPPI10s225.slim	1.73	1.6087500	2.6156178	0.0275412	0.165955378	3.6681547	0.9998778463	0.0001221537	0.1	0.00443458	0.00000005417	BAJA
629	CPR	M	M	050	225	CP RcMMI50s225.dxf	CP RcMMI50s225.slim	1.323											
630	CPR	P	M	050	225	CP RcPMI50s225.dxf	CP RcPMI50s225.slim	1.728											
631	CPR	M	P	050	225	CP RcMPI50s225.dxf	CP RcMPI50s225.slim	1.642											
632	CPR	P	P	050	225	CP RcPPI50s225.dxf	CP RcPPI50s225.slim	1.729	1.6055000	2.6054795	0.0278492	0.166880946	3.62833515	0.9998573726	0.0001426274	0.02	0.00443458	0.00000001265	BAJA
633	CPR	M	M	100	225	CP RcMMI100s225.dxf	CP RcMMI100s225.slim	1.321											
634	CPR	P	M	100	225	CP RcPMI100s225.dxf	CP RcPMI100s225.slim	1.726											
635	CPR	M	P	100	225	CP RcMPI100s225.dxf	CP RcMPI100s225.slim	1.639											
636	CPR	P	P	100	225	CP RcPPI100s225.dxf	CP RcPPI100s225.slim	1.727	1.6032500	2.5982418	0.0278312	0.166826819	3.61602531	0.9998504194	0.0001495806	0.01	0.00443458	0.00000000663	BAJA
637	CPR	M	M	250	225	CP RcMMI250s225.dxf	CP RcMMI250s225.slim	1.318											
638	CPR	P	M	250	225	CP RcPMI250s225.dxf	CP RcPMI250s225.slim	1.723											
639	CPR	M	P	250	225	CP RcMPI250s225.dxf	CP RcMPI250s225.slim	1.635											
640	CPR	P	P	250	225	CP RcPPI250s225.dxf	CP RcPPI250s225.slim	1.723	1.5997500	2.5869518	0.0277517	0.166588377	3.60019114	0.9998410083	0.0001589917	0.004	0.00443458	0.00000000282	BAJA
641	CPR	M	M	002	475	CP RcMMI002s475.dxf	CP RcMMI002s475.slim	1.204											
642	CPR	P	M	002	475	CP RcPMI002s475.dxf	CP RcPMI002s475.slim	1.562											
643	CPR	M	P	002	475	CP RcMPI002s475.dxf	CP RcMPI002s475.slim	1.498											
644	CPR	P	P	002	475	CP RcPPI002s475.dxf	CP RcPPI002s475.slim	1.573	1.4592500	2.1519483	0.0225377	0.150125572	3.05910574	0.9988900061	0.0011099939	0.42918455	0.00210305	0.00000100188	BAJA
645	CPR	M	M	010	475	CP RcMMI10s475.dxf	CP RcMMI10s475.slim	1.199											
646	CPR	P	M	010	475	CP RcPMI10s475.dxf	CP RcPMI10s475.slim	1.561											
647	CPR	M	P	010	475	CP RcMPI10s475.dxf	CP RcMPI10s475.slim	1.492											
648	CPR	P	P	010	475	CP RcPPI10s475.dxf	CP RcPPI10s475.slim	1.573	1.4562500	2.1436788	0.0230147	0.151705924	3.0074633	0.9986828103	0.0013171897	0.1	0.00210305	0.00000027701	BAJA
649	CPR	M	M	050	475	CP RcMMI50s475.dxf	CP RcMMI50s475.slim	1.195											
650	CPR	P	M	050	475	CP RcPMI50s475.dxf	CP RcPMI50s475.slim	1.56											
651	CPR	M	P	050	475	CP RcMPI50s475.dxf	CP RcMPI50s475.slim	1.491											
652	CPR	P	P	050	475	CP RcPPI50s475.dxf	CP RcPPI50s475.slim	1.575	1.4552500	2.1413328	0.0235802	0.153558417	2.96466979	0.9984849601	0.0015150399	0.02	0.00210305	0.00000006372	BAJA
653	CPR	M	M	100	475	CP RcMMI100s475.dxf	CP RcMMI100s475.slim	1.193											
654	CPR	P	M	100	475	CP RcPMI100s475.dxf	CP RcPMI100s475.slim	1.559											
655	CPR	M	P	100	475	CP RcMPI100s475.dxf	CP RcMPI100s475.slim	1.483											
656	CPR	P	P	100	475	CP RcPPI100s475.dxf	CP RcPPI100s475.slim	1.573	1.4520000	2.1318370	0.0235330	0.153404694	2.94645483	0.9983928032	0.0016071968	0.01	0.00210305	0.00000003380	BAJA
657	CPR	M	M	250	475	CP RcMMI250s475.dxf	CP RcMMI250s475.slim	1.191											
658	CPR	P	M	250	475	CP RcPMI250s475.dxf	CP RcPMI250s475.slim	1.556											
659	CPR	M	P	250	475	CP RcMPI250s475.dxf	CP RcMPI250s475.slim	1.479											
660	CPR	P	P	250	475	CP RcPPI250s475.dxf	CP RcPPI250s475.slim	1.555	1.4452500	2.1112708	0.0225232	0.150077272	2.966805	0.9984954413	0.0015045587	0.004	0.00210305	0.00000001266	BAJA

Anexo 12 Resultados del Factor de Seguridad (FS) y probabilidad de falla por cada escenario del Relleno Bajo Prado sector Centro Medico (BPC)

No Escenario	Id Relleno	c'	Φ'	LI	S	Archivo geometria	Archivo Slide	FS (dia 391)	ESPERANZA (FS) (dia 391)	E (FS ²) (dia 391)	VARIANZA (FS) (dia 391)	σ (FS) (dia 391)	β	Φ (β)	Pf (FS)	Pf (Iluvia)	PF (sismo)	Pf (total)	CALIFICACION
661	BPC	M	M	002	031	BPCcMMI002s031.dxf	BPCcMMI002s031.slim	2.265											
662	BPC	P	M	002	031	BPCcPMI002s031.dxf	BPCcPMI002s031.slim	2.303											
663	BPC	M	P	002	031	BPCcMIPi002s031.dxf	BPCcMIPi002s031.slim	2.268											
664	BPC	P	P	002	031	BPCcPIPI002s031.dxf	BPCcPIPI002s031.slim	2.303	2.2847500	5.2204168	0.0003342	0.018280796	70.2786686	1.0000000000	0.0000000000	0.42918455	0.03174332	0.0000000000	BAJA
665	BPC	M	M	010	031	BPCcMMI10s031.dxf	BPCcMMI10s031.slim	2.106											
666	BPC	P	M	010	031	BPCcPMI10s031.dxf	BPCcPMI10s031.slim	2.141											
667	BPC	M	P	010	031	BPCcMIPi10s031.dxf	BPCcMIPi10s031.slim	2.109											
668	BPC	P	P	010	031	BPCcPIPI10s031.dxf	BPCcPIPI10s031.slim	2.141	2.1242500	4.5127198	0.0002817	0.016783548	66.9852386	1.0000000000	0.0000000000	0.1	0.03174332	0.0000000000	BAJA
669	BPC	M	M	050	031	BPCcMMI50s031.dxf	BPCcMMI50s031.slim	2.103											
670	BPC	P	M	050	031	BPCcPMI50s031.dxf	BPCcPMI50s031.slim	2.138											
671	BPC	M	P	050	031	BPCcMIPi50s031.dxf	BPCcMIPi50s031.slim	2.105											
672	BPC	P	P	050	031	BPCcPIPI50s031.dxf	BPCcPIPI50s031.slim	2.137	2.1207500	4.4978618	0.0002812	0.016768646	66.8360449	1.0000000000	0.0000000000	0.02	0.03174332	0.0000000000	BAJA
673	BPC	M	M	100	031	BPCcMMI100s031.dxf	BPCcMMI100s031.slim	2.102											
674	BPC	P	M	100	031	BPCcPMI100s031.dxf	BPCcPMI100s031.slim	2.136											
675	BPC	M	P	100	031	BPCcMIPi100s031.dxf	BPCcMIPi100s031.slim	2.105											
676	BPC	P	P	100	031	BPCcPIPI100s031.dxf	BPCcPIPI100s031.slim	2.136	2.1197500	4.4936053	0.0002652	0.016284579	68.7613741	1.0000000000	0.0000000000	0.01	0.03174332	0.0000000000	BAJA
677	BPC	M	M	250	031	BPCcMMI250s031.dxf	BPCcMMI250s031.slim	2.101											
678	BPC	P	M	250	031	BPCcPMI250s031.dxf	BPCcPMI250s031.slim	2.141											
679	BPC	M	P	250	031	BPCcMIPi250s031.dxf	BPCcMIPi250s031.slim	2.108											
680	BPC	P	P	250	031	BPCcPIPI250s031.dxf	BPCcPIPI250s031.slim	2.139	2.1222500	4.5042668	0.0003217	0.017935649	62.5709172	1.0000000000	0.0000000000	0.004	0.03174332	0.0000000000	BAJA
681	BPC	M	M	002	225	BPCcMMI002s225.dxf	BPCcMMI002s225.slim	1.573											
682	BPC	P	M	002	225	BPCcPMI002s225.dxf	BPCcPMI002s225.slim	1.598											
683	BPC	M	P	002	225	BPCcMIPi002s225.dxf	BPCcMIPi002s225.slim	1.576											
684	BPC	P	P	002	225	BPCcPIPI002s225.dxf	BPCcPIPI002s225.slim	1.599	1.5865000	2.5171275	0.0001453	0.012051971	48.6642401	1.0000000000	0.0000000000	0.42918455	0.00443458	0.0000000000	BAJA
685	BPC	M	M	010	225	BPCcMMI10s225.dxf	BPCcMMI10s225.slim	1.572											
686	BPC	P	M	010	225	BPCcPMI10s225.dxf	BPCcPMI10s225.slim	1.597											
687	BPC	M	P	010	225	BPCcMIPi10s225.dxf	BPCcMIPi10s225.slim	1.574											
688	BPC	P	P	010	225	BPCcPIPI10s225.dxf	BPCcPIPI10s225.slim	1.597	1.5850000	2.5123695	0.0001445	0.012020815	48.6655844	1.0000000000	0.0000000000	0.1	0.00443458	0.0000000000	BAJA
689	BPC	M	M	050	225	BPCcMMI50s225.dxf	BPCcMMI50s225.slim	1.569											
690	BPC	P	M	050	225	BPCcPMI50s225.dxf	BPCcPMI50s225.slim	1.595											
691	BPC	M	P	050	225	BPCcMIPi50s225.dxf	BPCcMIPi50s225.slim	1.573											
692	BPC	P	P	050	225	BPCcPIPI50s225.dxf	BPCcPIPI50s225.slim	1.596	1.5832500	2.5068328	0.0001522	0.01233643	47.2786706	1.0000000000	0.0000000000	0.02	0.00443458	0.0000000000	BAJA
693	BPC	M	M	100	225	BPCcMMI100s225.dxf	BPCcMMI100s225.slim	1.570											
694	BPC	P	M	100	225	BPCcPMI100s225.dxf	BPCcPMI100s225.slim	1.595											
695	BPC	M	P	100	225	BPCcMIPi100s225.dxf	BPCcMIPi100s225.slim	1.573											
696	BPC	P	P	100	225	BPCcPIPI100s225.dxf	BPCcPIPI100s225.slim	1.596	1.5835000	2.5076175	0.0001453	0.012051971	48.4153181	1.0000000000	0.0000000000	0.01	0.00443458	0.0000000000	BAJA
697	BPC	M	M	250	225	BPCcMMI250s225.dxf	BPCcMMI250s225.slim	1.572											
698	BPC	P	M	250	225	BPCcPMI250s225.dxf	BPCcPMI250s225.slim	1.598											
699	BPC	M	P	250	225	BPCcMIPi250s225.dxf	BPCcMIPi250s225.slim	1.575											
700	BPC	P	P	250	225	BPCcPIPI250s225.dxf	BPCcPIPI250s225.slim	1.599	1.5860000	2.5155535	0.0001575	0.0125499	46.6935977	1.0000000000	0.0000000000	0.004	0.00443458	0.0000000000	BAJA
701	BPC	M	M	002	475	BPCcMMI002s475.dxf	BPCcMMI002s475.slim	1.417											
702	BPC	P	M	002	475	BPCcPMI002s475.dxf	BPCcPMI002s475.slim	1.438											
703	BPC	M	P	002	475	BPCcMIPi002s475.dxf	BPCcMIPi002s475.slim	1.419											
704	BPC	P	P	002	475	BPCcPIPI002s475.dxf	BPCcPIPI002s475.slim	1.438	1.4280000	2.0392845	0.0001005	0.010024969	42.6933996	1.0000000000	0.0000000000	0.42918455	0.00210305	0.0000000000	BAJA
705	BPC	M	M	010	475	BPCcMMI10s475.dxf	BPCcMMI10s475.slim	1.416											
706	BPC	P	M	010	475	BPCcPMI10s475.dxf	BPCcPMI10s475.slim	1.436											
707	BPC	M	P	010	475	BPCcMIPi10s475.dxf	BPCcMIPi10s475.slim	1.418											
708	BPC	P	P	010	475	BPCcPIPI10s475.dxf	BPCcPIPI10s475.slim	1.437	1.4267500	2.0357113	0.0000957	0.009781999	43.6260533	1.0000000000	0.0000000000	0.1	0.00210305	0.0000000000	BAJA
709	BPC	M	M	050	475	BPCcMMI50s475.dxf	BPCcMMI50s475.slim	1.414											
710	BPC	P	M	050	475	BPCcPMI50s475.dxf	BPCcPMI50s475.slim	1.435											
711	BPC	M	P	050	475	BPCcMIPi50s475.dxf	BPCcMIPi50s475.slim	1.416											
712	BPC	P	P	050	475	BPCcPIPI50s475.dxf	BPCcPIPI50s475.slim	1.435	1.4250000	2.0307255	0.0001005	0.010024969	42.3941468	1.0000000000	0.0000000000	0.02	0.00210305	0.0000000000	BAJA
713	BPC	M	M	100	475	BPCcMMI100s475.dxf	BPCcMMI100s475.slim	1.414											
714	BPC	P	M	100	475	BPCcPMI100s475.dxf	BPCcPMI100s475.slim	1.435											
715	BPC	M	P	100	475	BPCcMIPi100s475.dxf	BPCcMIPi100s475.slim	1.416											
716	BPC	P	P	100	475	BPCcPIPI100s475.dxf	BPCcPIPI100s475.slim	1.436	1.4252500	2.0314433	0.0001057	0.010280443	41.3649506	1.0000000000	0.0000000000	0.01	0.00210305	0.0000000000	BAJA
717	BPC	M	M	250	475	BPCcMMI250s475.dxf	BPCcMMI250s475.slim	1.416											
718	BPC	P	M	250	475	BPCcPMI250s475.dxf	BPCcPMI250s475.slim	1.438											
719	BPC	M	P	250	475	BPCcMIPi250s475.dxf	BPCcMIPi250s475.slim	1.419											
720	BPC	P	P	250	475	BPCcPIPI250s475.dxf	BPCcPIPI250s475.slim	1.438	1.4277500	2.0385763	0.0001062	0.010304732	41.5100561	1.0000000000	0.0000000000	0.004	0.00210305	0.0000000000	BAJA

Anexo 13 Eventos registrados entre 1997 y 2017 por categoría y polígono localizados en mapa de Manizales. Fuente: (Valderrama Giraldo, 2019).
(Archivo digital PDF)



Anexo 14 Mapas de localización general y de cada uno de los rellenos por subzona. Tomados de (Osorio Sierra & Zuluaga Moreno, 2003). Archivos digitales PDF.

Anexo 15 Datos para generación de curvas de retención de humedad basada en modelo de Van Genuchten. (Curvas experimentales). Archivo digital en PDF.

Anexo 16 Proyecto en software argis donde se visualizan las siguientes capas o layers: Perímetros de los 12 rellenos, alineamiento en planta de los perfiles de los rellenos, modelos raster de las topografías de los años 1960 y 2004, orthoimagen zona de estudio año 2015, puntos de eventos de deslizamientos tomados de (Valderrama Giraldo, 2019), mapa de amenaza por deslizamiento vigente para la ciudad de Manizales (ALCALDIA DE MANIZALES, 2017).
Archivo digital shape y sus extensiones.

Anexo 17 Resultados de análisis de estabilidad y flujo de agua de los 960 escenarios correspondientes a los 12 rellenos corridos en software Slide de Rockscience. Archivos digitales extensión (.slim)

Anexo 18 Mapa de amenaza por deslizamiento vigente para la ciudad de Manizales. (ALCALDIA DE MANIZALES, 2017). Archivo digital PDF.

Anexo 19 Registro original histórico de precipitaciones estaciones El Carmen, Hospital y Agronomía. Archivos digitales PDF.