

11 CARACTERIZACIÓN GEOLÓGICA MACROSCÓPICA DE LOS MATERIALES DEL DESLIZAMIENTO

Las muestras analizadas fueron extraídas durante las excavaciones de los pozos de drenaje y la galería drenante, obras construidas para controlar el flujo de agua que se infiltra en los materiales que constituyen las laderas donde se localiza el deslizamiento.

Se revisaron 14 muestras representativas del área de estudio (tomadas de los pozos y la galería de drenaje), de las cuales se registraron su textura, color, fisibilidad, estructuras identificadas, composición mineralógica, evidencias de alteración, contenido fósil observado, fotos de estos rasgos y observaciones adicionales en algunos casos.

La textura se refiere a la determinación de qué rango granulométrico predomina en la roca (según la clasificación de Wentworth, 1922): arcilla, limo, arena y gravas; o si algunas de estas fracciones se encuentran en proporciones similares. De acuerdo con el criterio anterior se asigna la clasificación: arcillolita, lodolita (50% arcilla – 50% limo), limolita, arenita, conglomerado, etc.

Tabla 1. Clasificación de Wentworth 1922

Millimeters (mm)	Micrometers (µm)	Wentworth size class		Rock type	
4096		Boulder	Gravel	Conglomerate/ Breccia	
256		Cobble			
64		Pebble			
4		Granule			
2.00					
1.00		Very coarse sand	Sand	Sandstone	
1/2	0.50	Coarse sand			
1/4	0.25	Medium sand			
1/8	0.125	Fine sand			
1/16	0.0625	Very fine sand			
1/32	0.031	Coarse silt	Silt	Siltstone	
1/64	0.0156	Medium silt			
1/128	0.0078	Fine silt			
1/256	0.0039	Very fine silt			
	0.00006	0.06	Clay	Mud	Claystone

La fisibilidad consiste en la facilidad de las lodolitas para dividirse en planos paralelos a la estratificación (Fotografía 6). Aquellas finogranulares (arcillolitas, lodolitas y limolitas) que presentan dicha propiedad se denominan shales. En este trabajo se ha establecido una escala arbitraria de $\frac{1}{4}$ a 1 en el que 1 es la máxima fisibilidad observada y $\frac{1}{4}$ la menor.

La distribución y modificación de los rasgos texturales, la orientación de los minerales, clastos y fósiles; las evidencias de deformación y de alteración de la roca, dan lugar a sus estructuras que en este caso, se registraron como primarias: las laminaciones y bioturbación; y como secundarias: fracturas, pliegues, clivaje (desarrollo de planos de debilidad por deformación) y venas.

El color, en rocas constituidas por partículas muy finas, es indicador de elementos o compuestos cromóforos y de minerales, como el hierro en sus diferentes estados de oxidación, sales (haluros, carbonatos, sulfatos), filosilicatos y materia orgánica. La composición mineralógica fue además soportada por pruebas con ácido clorhídrico frío, lupas de 10 y 20 aumentos y rayador.

La información geológica provista por INGEOMINAS interpreta la unidad que aflora en este sector como la Formación Trincheras, que según Guerrero (2002) es de edad Barremiano a Aptiano. Dicha unidad se ha descrito como lodolitas y shales negros principalmente, con intercalaciones menos frecuentes, hacia la base, de arenitas y rocas calcáreas: micritas y esparitas; se han registrado bivalvos y amonitas.

11.1 Descripción de las muestras

Las rocas descritas correspondientes a los materiales excavados en los pozos de drenaje y la galería son lodolitas, shales y arcillolitas negras (húmedas) o grises (secas), cuya estructura primaria en todos los casos consiste en laminación muy delgada (menor de 1 mm) ondulosa discontinua, con bioturbación ocasional (ver Fotografía 13) por icnofósiles y presencia de concreciones, cuyo eje mayor va desde algunos centímetros a uno o dos decímetros.

Como estructuras secundarias se encuentra, de manera generalizada, desarrollo de planos de debilidad (clivaje, ver Fotografía 20 y Fotografía 8) con espaciamiento milimétrico, oblicuos a la estructura primaria; dos familias de fracturas conjugadas, que pueden hallarse continuas o discontinuas. Regularmente, dichas fracturas se encuentran rellenas de calcita, en venas que presentan espesores desde menos de un milímetro hasta algunos centímetros (ver Fotografía 14, Fotografía 10 y Fotografía 11). Dichas venas centimétricas se desarrollan en zonas sometidas a tensión durante la deformación compresiva de la roca.

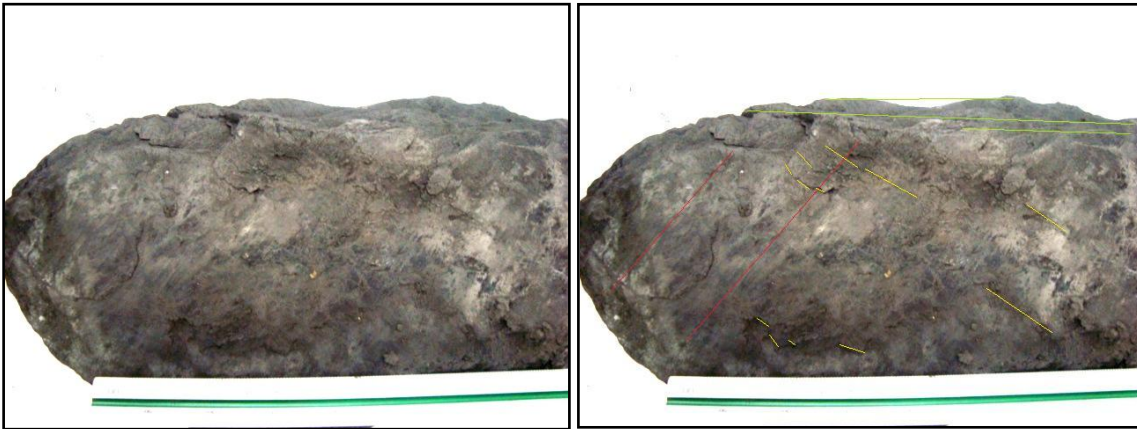
Se identifican también planos de deslizamiento (espejos de falla) con estrías, que en muchos casos se encuentran orientadas aproximadamente paralelas al rumbo de la intersección de las familias de fracturas conjugadas; pliegues amplios (ver Fotografía 8, Fotografía 12 y Fotografía 15) y pliegues por propagación de falla de los planos de clivaje.

La composición de estas muestras se ha inferido de manera general debido al tamaño de sus partículas. Entre los grupos mineralógicos y de compuestos encontrados, están: arcillas, materia orgánica, carbonatos y cuarzo. Frecuentemente se hallan pirita, yeso, siderita, hidróxidos y óxidos de hierro. No se han encontrado evidencias de amonitas, bivalvos ni foraminíferos. Sin embargo se han hallado impresiones planas carbonosas en formas tabulares y circulares; y escasos icnofósiles aislados, cuya sección es de alrededor de 1 cm de diámetro y ligeramente elípticas.

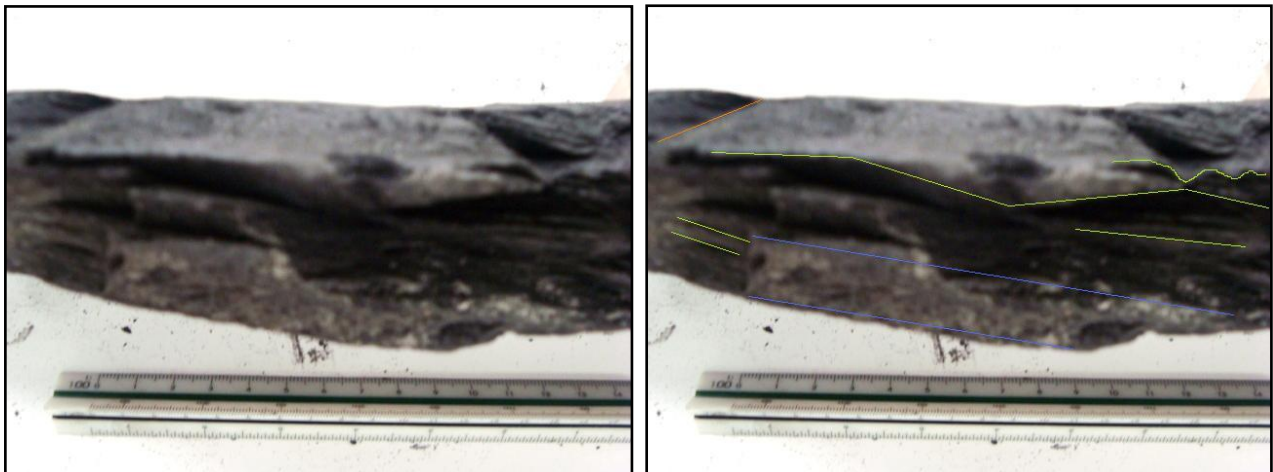
Las muestras correspondientes a los bloques que se tomaron de el se pueden describir como unos conglomerados polimícticos, matriz-soportados con arcilla arenosa de color ocre y anaranjado, con gránulos, guijos y cantos subangulares a subredondeados. Los clastos consisten en cuarzo, chert, litoarenitas conglomeráticas grises con tamaño de granos predominantemente medios, mal seleccionados; cementados con sílice y localmente por carbonato; con matriz lodosa. Los clastos se hallan imbricados.



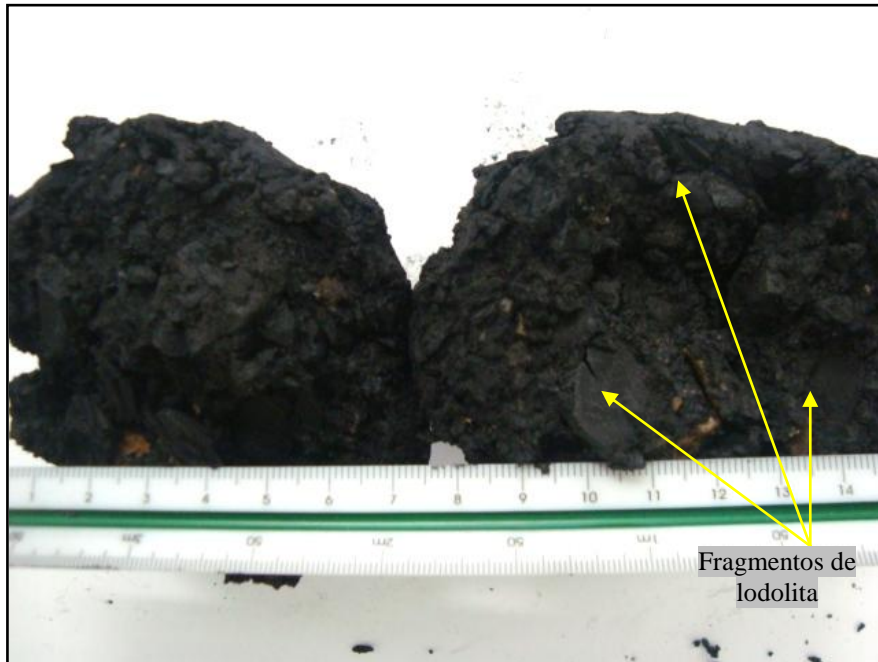
Fotografía 6: En esta fotografía se resaltan, en una lodolita poco físil, las siguientes estructuras: en anaranjado se muestran los límites de los planos de una familia de fracturas; en azul, los de una segunda familia de fracturas; en verde claro, al clivaje; y en amarillo la proyección lineal de los planos de estratificación, sobre el plano de fracturas anaranjado. Muestra 1



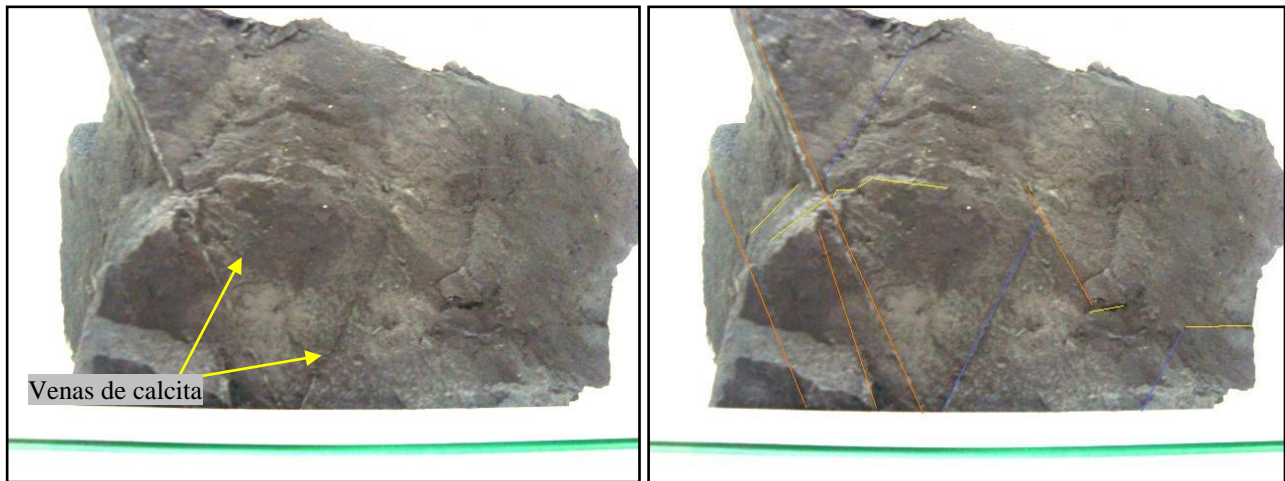
Fotografía 7: En esta fotografía se observa un espejo de falla estriado, en el que se resalta la dirección de las estrías, en color rojo; los planos de clivaje, en verde claro y los de la laminación ondulosa discontinua (estratificación), en amarillo. Este espejo de falla se desarrolla sobre un plano de clivaje, que como se observa en las fotografías, no son paralelos a los de la estratificación, pues esta última, se proyecta sobre los planos de clivaje a manera de escalones o líneas, claramente discontinuas. Muestra 2.



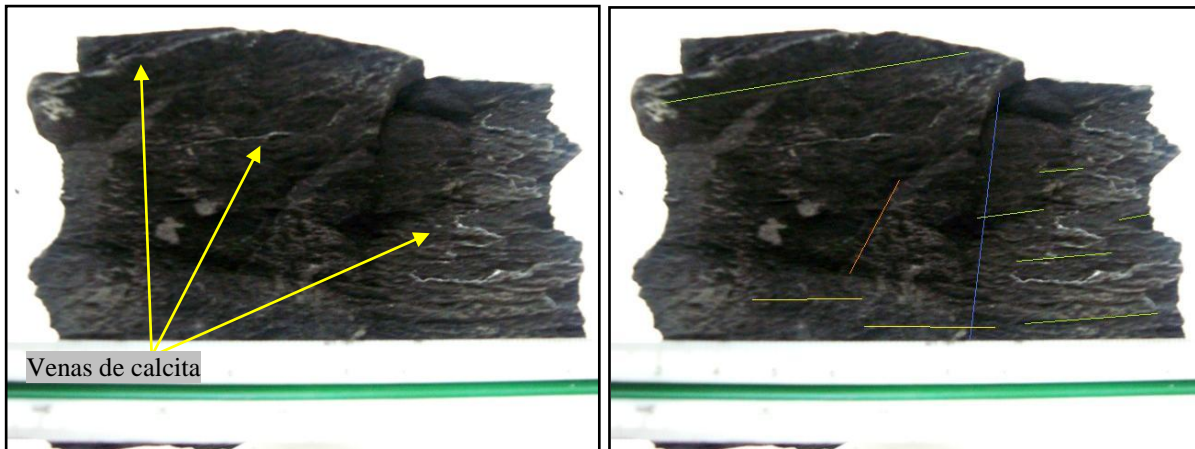
Fotografía 8: Nótese en estas fotografías los planos de clivaje deformados, resaltados en color verde. En azul y naranja, planos de fractura. Muestra 2.



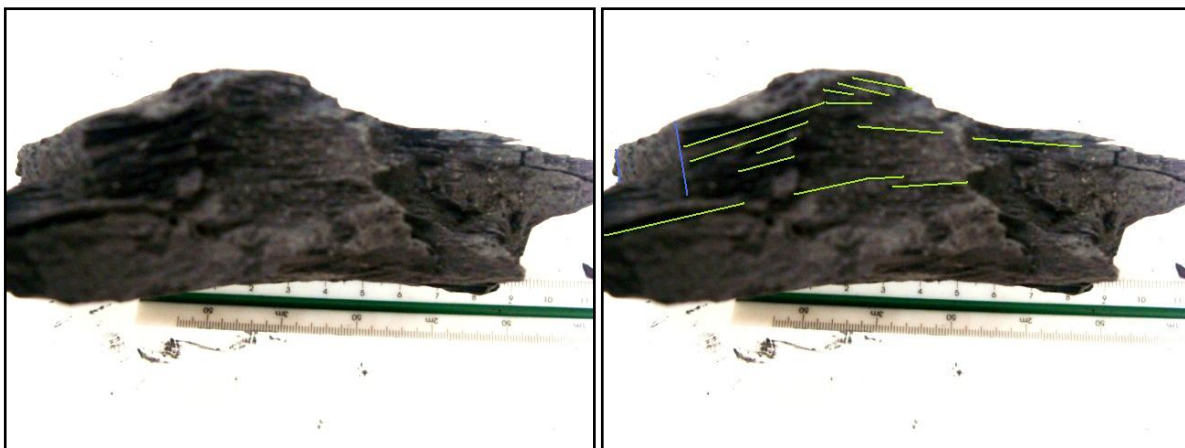
Fotografía 9: En esta fotografía se observa una muestra arcillosa, con fragmentos de lodolita incluidos. Muestra 3



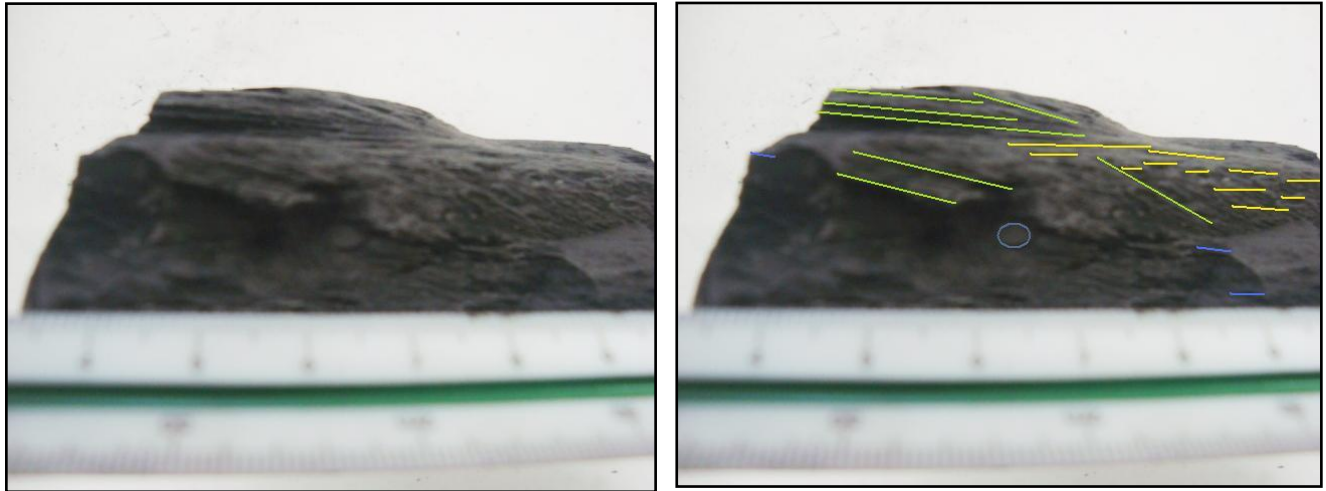
Fotografía 10: Se resalta la relación de las familias de fracturas conjugadas, marcadas en la fotografía de la derecha en azul y anaranjado. Nótese que localmente se hallan rellenas de calcita en la fotografía de la izquierda. En amarillo se marca la estratificación. Muestra 4.



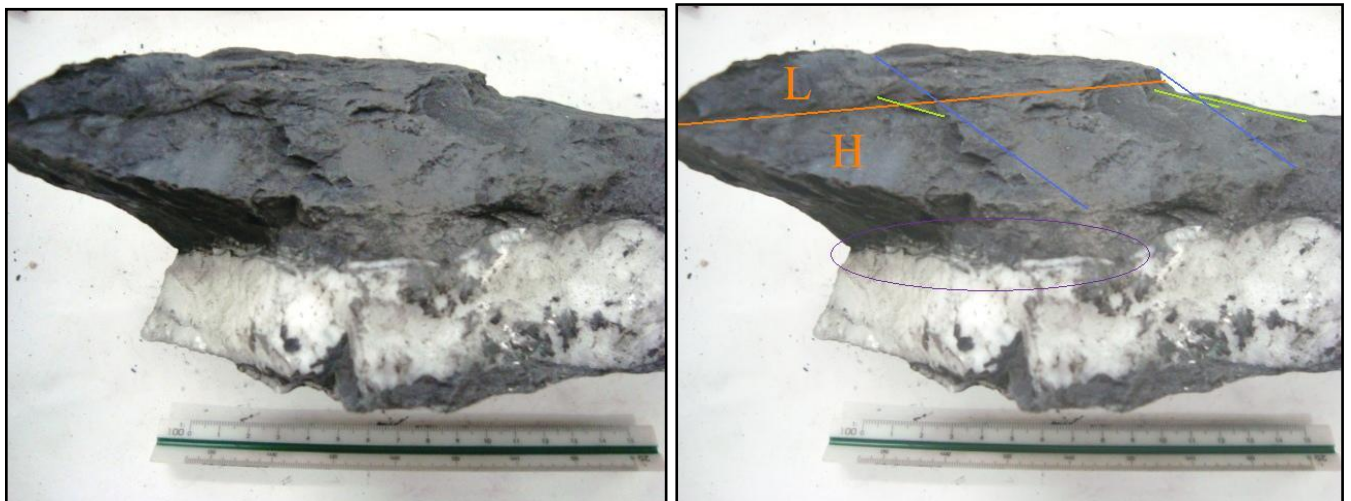
Fotografía 11: En la fotografía izquierda, se señalan las venas de calcita que se refractan en los planos de debilidad discontinuos (generalmente los de clivaje - verdes) de la roca. En la fotografía derecha se resaltan algunos de los elementos más visibles de las diferentes estructuras. Adviértase que la estructura de la roca favorece la *fisibilidad*. Muestra 4.



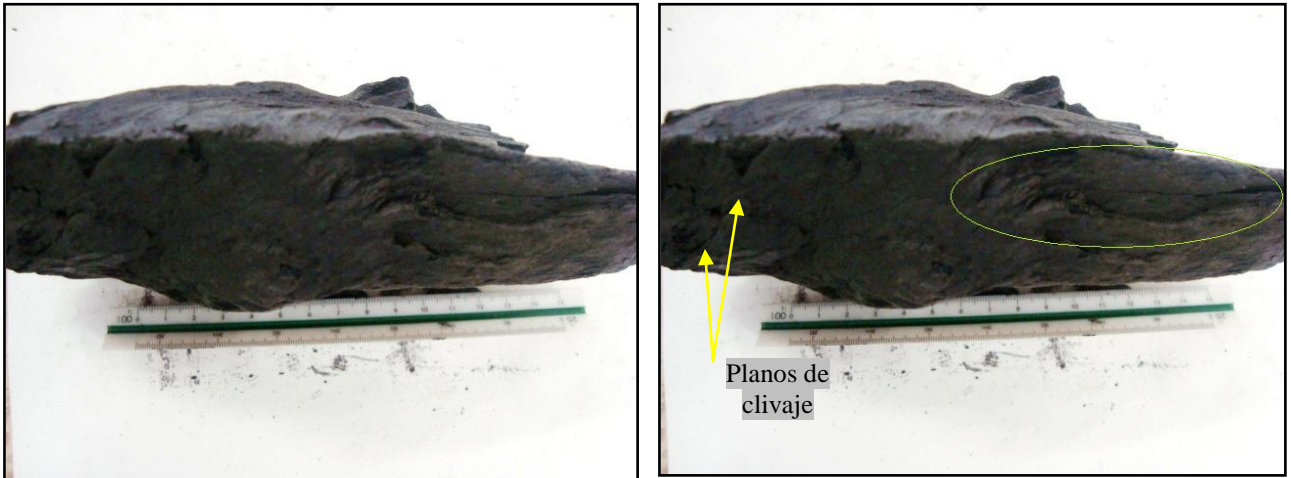
Fotografía 12: En estas fotografías se muestra un pliegue amplio asimétrico de los planos de clivaje (verde) en la *Muestra 4* que presenta alta *fisibilidad*.



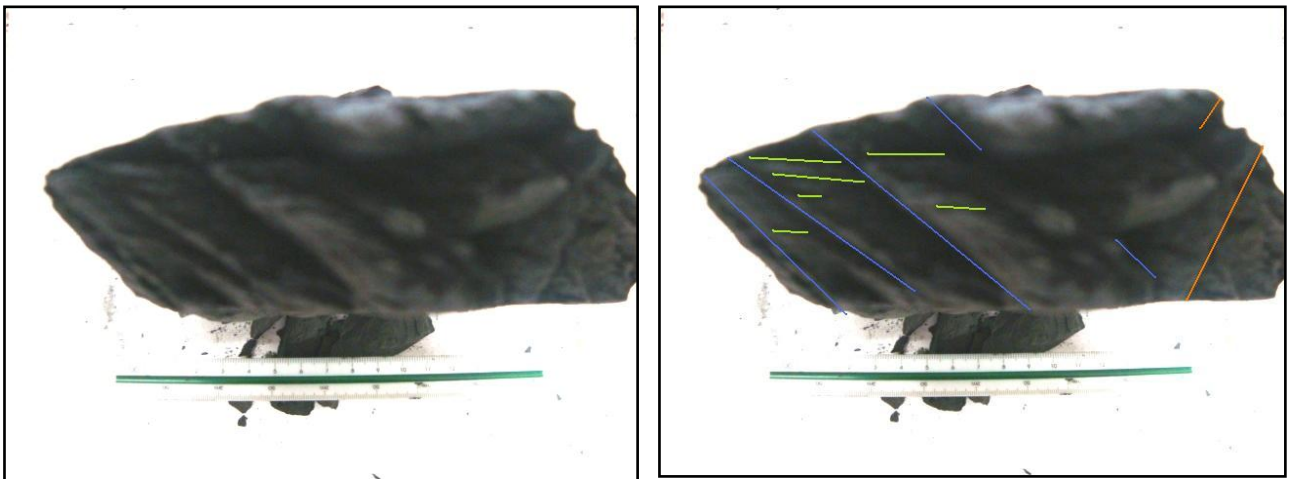
Fotografía 13: un elemento que se halla en la *Muestra 5* es bioturbación (elipse gris).



Fotografía 14: En la *Muestra 5* se halla una falla inversa (línea anaranjada) en el que el bloque marcado con una “L” se levanta con respecto a aquel que tiene la letra “H”. En esta fotografía se observa en planta y no en vista perpendicular al rumbo de esta estructura. Adicionalmente se muestra una vena de calcita de 3 a 4 cm de espesor y se resalta en la elipse morada los contactos que tiene con la lodolita, debido a su inyección dentro de la misma.



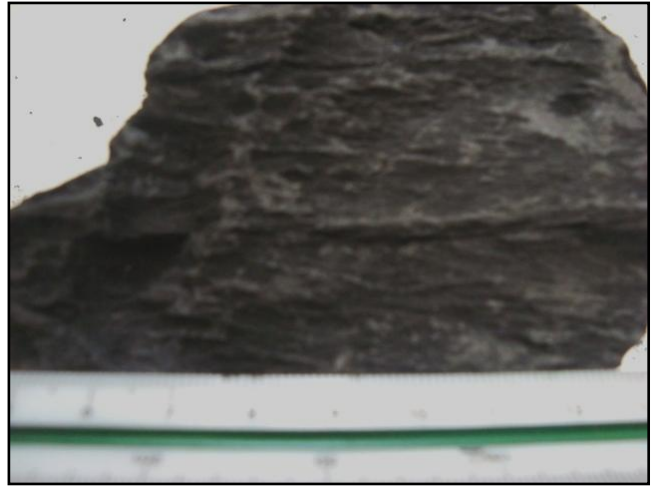
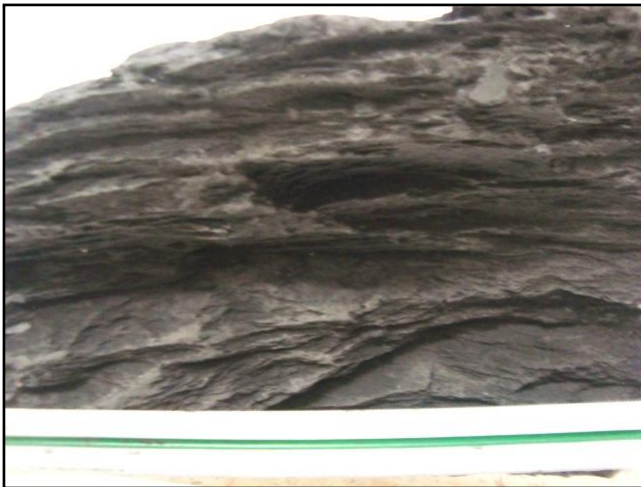
Fotografía 15: Se resalta en estas fotografías, el plegamiento (más evidente dentro de la elipse verde) de la *Muestra 5*.



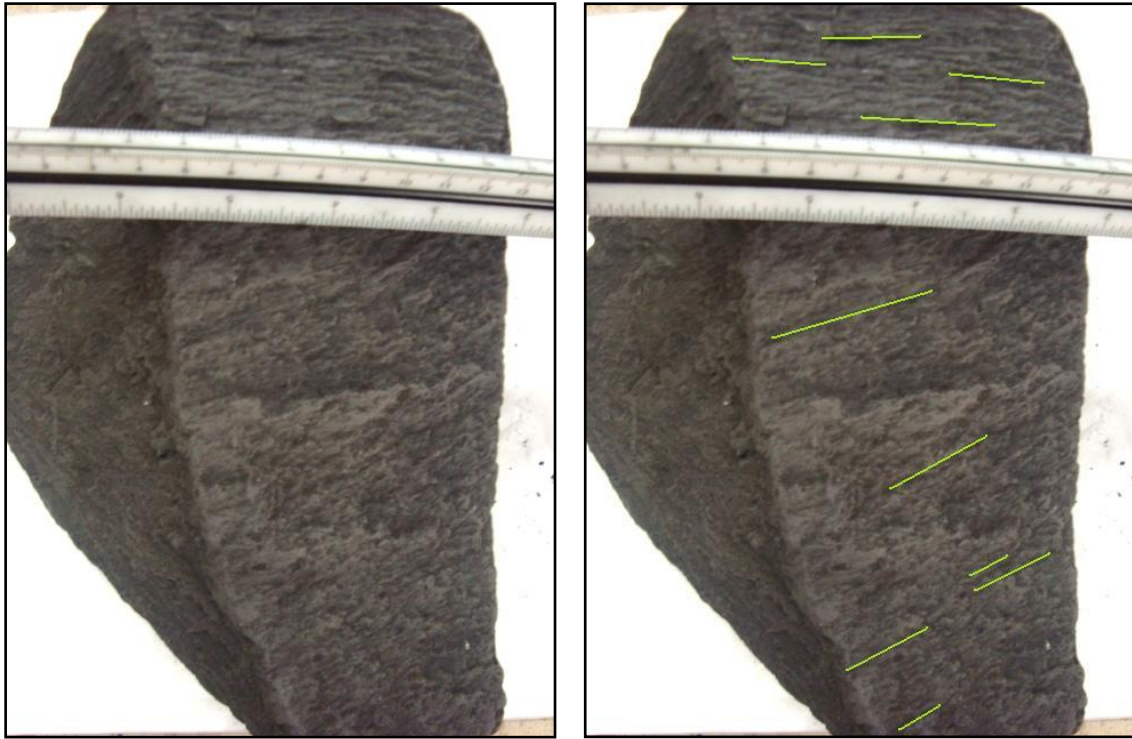
Fotografía 16: En estas fotografías se resalta la regularidad de la orientación de las fracturas (líneas azules y anaranjadas), que en este caso son claramente conjugadas. *Muestra 5*.



Fotografía 17: Concreción. Muestra 7.



Fotografías 18 y 19: En la fotografía de la izquierda, se encuentra de manera evidente – como rasgo principal, el clivaje, por el que se puede reconocer microfallamiento. Muestra 9.



Fotografía 20: El elemento estructural más evidente en estas lodolitas, es el clivaje (líneas verdes). Muestra 10.



Fotografías 21 y 22: Fragmentos en forma de astilla de lodolita, ocasionados por efectos de meteorización durante 8 días. Muestra 11.



Fotografía23: Clasto de litoarenita del depósito que se halla sobre las laderas que presentan fenómenos de remoción en masa. Adviértase que esta roca presenta un tamaño de partículas constituyentes, perceptible (puntos grises). Adicionalmente, se encuentra meteorizada y con formación de hidróxidos de hierro (color ocre) en su superficie. Muestra 12.



Fotografía 24 Clasto de litoarenita conglomerática del depósito que se halla sobre las laderas coluviales. Nótese que se observan clastos grandes (blancos y anaranjados), generalmente de cuarzo y chert, correspondientes a gránulos y guijos que le dan el carácter de conglomerática a esta arenisca. Adicionalmente, en la parte superior de la fotografía, la muestra presenta evidencias de meteorización: hidróxidos de hierro en su superficie (ocre). Muestra 13.



Fotografía 25: Matriz arcillosa del depósito que se encuentra sobre las laderas que presentan fenómenos de remoción en masa. Incluidos se hallan guijos subredondeados. Muestra 14.

12 CARACTERIZACIÓN MICROSCÓPICA DEL SUSTRATO ROCOSO - ROCAS LODOSAS DE LA FORMACIÓN TRINCHERAS

En este capítulo se presenta la caracterización microscópica de muestras de roca lodosa tomadas en campo durante las excavaciones para estructuras de drenaje. En catorce (14) muestras tomadas se determinó la estructura principal de la roca y sus elementos químicos, usando la herramienta de Microscopio Electrónico de Barrido (MEB) con imágenes de mapas de puntos EDS (mapping). En las **Figuras 6 a 17** se presentan las imágenes obtenidas y la composición elemental de las muestras.

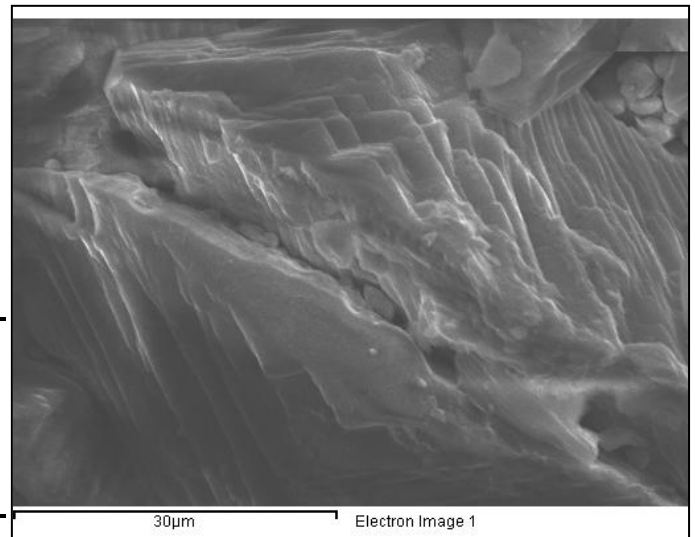
12.1 Composición y estructura de la Roca Lodosa Subyacente

Spectrum processing :
 No peaks omitted

Processing option : All elements analyzed (Normalised)
 Number of iterations = 3

Standard :
 C CaCO3 1-Jun-1999 12:00 AM
 O SiO2 1-Jun-1999 12:00 AM
 Ca Wollastonite 1-Jun-1999 12:00 AM

Element	Weight%	Atomic%
C K	14.43	21.50
O K	59.95	67.06
Ca K	25.62	11.44
Totals	100.00	

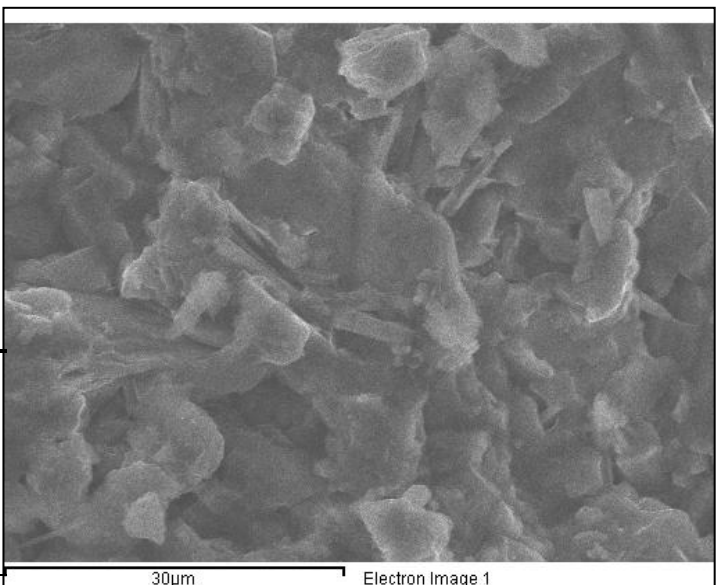


Spectrum processing :
 No peaks omitted

Processing option : All elements analyzed (Normalised)
 Number of iterations = 2

Standard :
 O SiO2 1-Jun-1999 12:00 AM
 Al Al2O3 1-Jun-1999 12:00 AM
 Si SiO2 1-Jun-1999 12:00 AM
 Fe Fe 1-Jun-1999 12:00 AM

Element	Weight%	Atomic%
O K	55.48	70.26
Al K	3.12	2.34
Si K	34.52	24.91
Fe K	6.88	2.49
Totals	100.00	

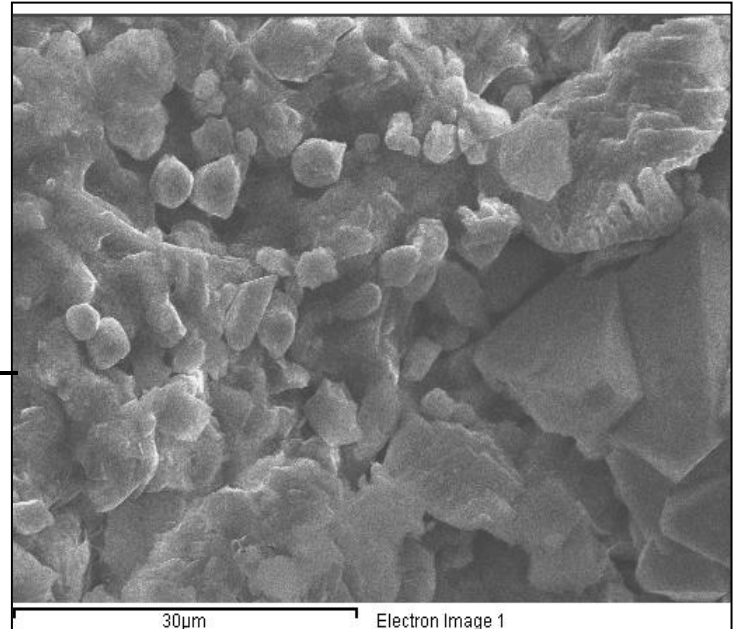


Spectrum processing :
 No peaks omitted

Processing option : All elements analyzed (Normalised)
 Number of iterations = 2

Standard :
 O SiO2 1-Jun-1999 12:00 AM
 Si SiO2 1-Jun-1999 12:00 AM
 S FeS2 1-Jun-1999 12:00 AM
 Ca Wollastonite 1-Jun-1999 12:00 AM
 Fe Fe 1-Jun-1999 12:00 AM

Element	Weight%	Atomic%
O K	50.92	68.63
Si K	23.43	17.99
S K	9.56	6.43
Ca K	4.86	2.61
Fe K	11.22	4.33
Totals	100.00	

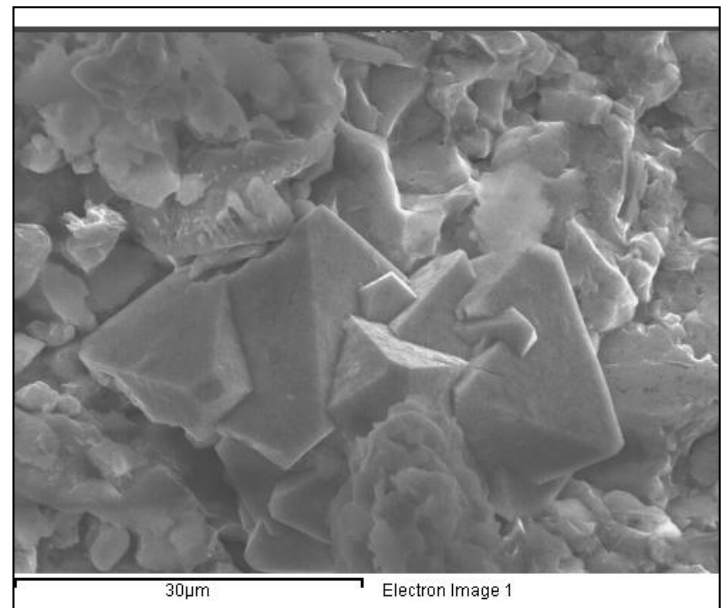


Spectrum processing :
 No peaks omitted

Processing option : All elements analyzed (Normalised)
 Number of iterations = 2

Standard :
 O SiO2 1-Jun-1999 12:00 AM
 Si SiO2 1-Jun-1999 12:00 AM
 S FeS2 1-Jun-1999 12:00 AM
 Ca Wollastonite 1-Jun-1999 12:00 AM
 Fe Fe 1-Jun-1999 12:00 AM

Element	Weight%	Atomic%
O K	49.23	67.49
Si K	19.92	15.55
S K	13.25	9.07
Ca K	6.32	3.46
Fe K	11.27	4.43
Totals	100.00	

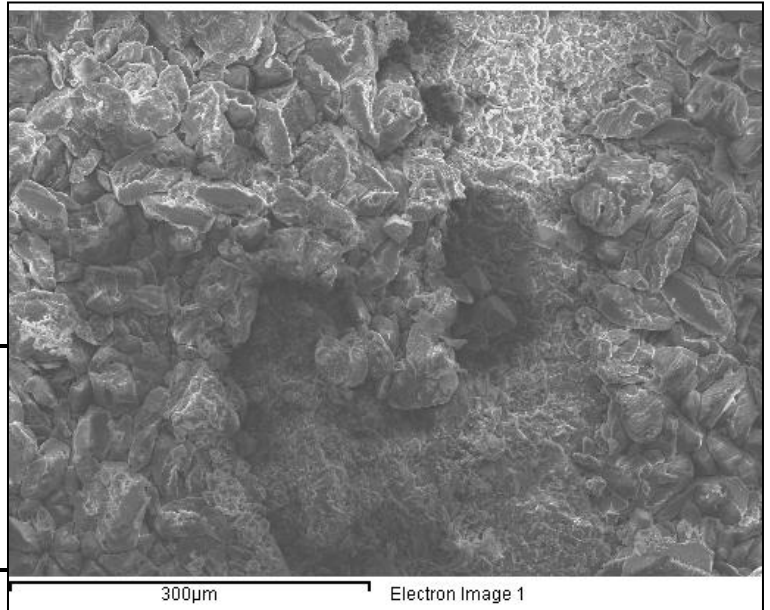


Spectrum processing :
 No peaks omitted

Processing option : All elements analyzed (Normalised)
 Number of iterations = 3

Standard :
 C CaCO₃ 1-Jun-1999 12:00 AM
 O SiO₂ 1-Jun-1999 12:00 AM
 Si SiO₂ 1-Jun-1999 12:00 AM
 Ca Wollastonite 1-Jun-1999 12:00 AM

Element	Weight%	Atomic%
C K	16.63	24.41
O K	56.23	61.98
Si K	8.86	5.56
Ca K	18.28	8.04
Totals	100.00	

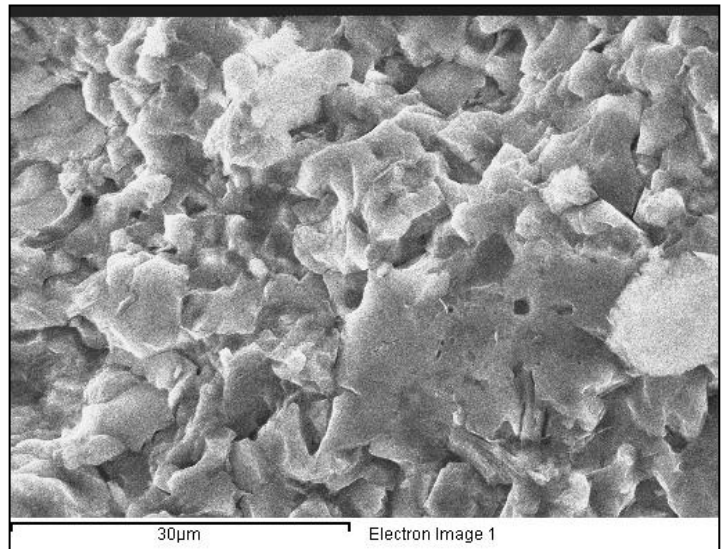


Spectrum processing :
 No peaks omitted

Processing option : All elements analyzed (Normalised)
 Number of iterations = 3

Standard :
 O SiO₂ 1-Jun-1999 12:00 AM
 Al Al₂O₃ 1-Jun-1999 12:00 AM
 Si SiO₂ 1-Jun-1999 12:00 AM

Element	Weight%	Atomic%
O K	63.70	75.43
Al K	2.70	1.89
Si K	33.61	22.67
Totals	100.00	

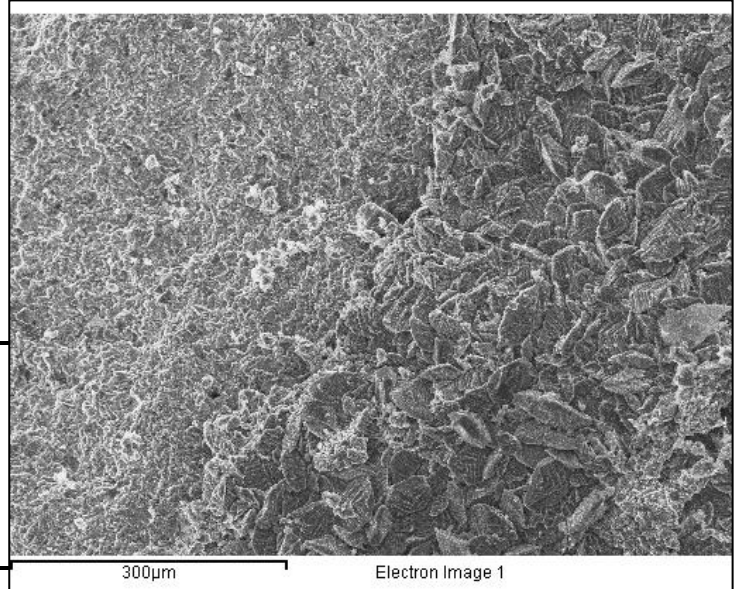


Spectrum processing :
 Peak possibly omitted : 2.305 keV

Processing option : All elements analyzed (Normalised)
 Number of iterations = 3

Standard :
 O SiO2 1-Jun-1999 12:00 AM
 Si SiO2 1-Jun-1999 12:00 AM
 Ca Wollastonite 1-Jun-1999 12:00 AM
 Br KBr 1-Jun-1999 12:00 AM

Element	Weight%	Atomic%
O K	63.75	79.10
Si K	17.30	12.23
Ca K	16.06	7.95
Br L	2.89	0.72
Totals	100.00	

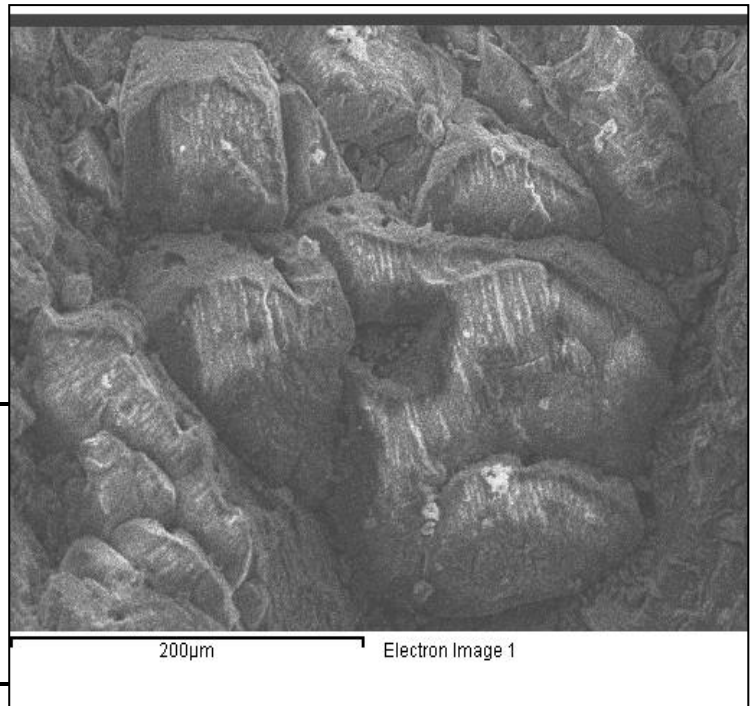


Spectrum processing :
 No peaks omitted

Processing option : All elements analyzed (Normalised)
 Number of iterations = 4

Standard :
 C CaCO3 1-Jun-1999 12:00 AM
 O SiO2 1-Jun-1999 12:00 AM
 Al Al2O3 1-Jun-1999 12:00 AM
 Si SiO2 1-Jun-1999 12:00 AM
 Ca Wollastonite 1-Jun-1999 12:00 AM
 Fe Fe 1-Jun-1999 12:00 AM

Element	Weight%	Atomic%
C K	14.39	22.14
O K	54.84	63.35
Al K	1.93	1.32
Si K	2.55	1.68
Ca K	21.53	9.93
Fe K	4.77	1.58
Totals	100.00	



Spectrum processing :
 No peaks omitted

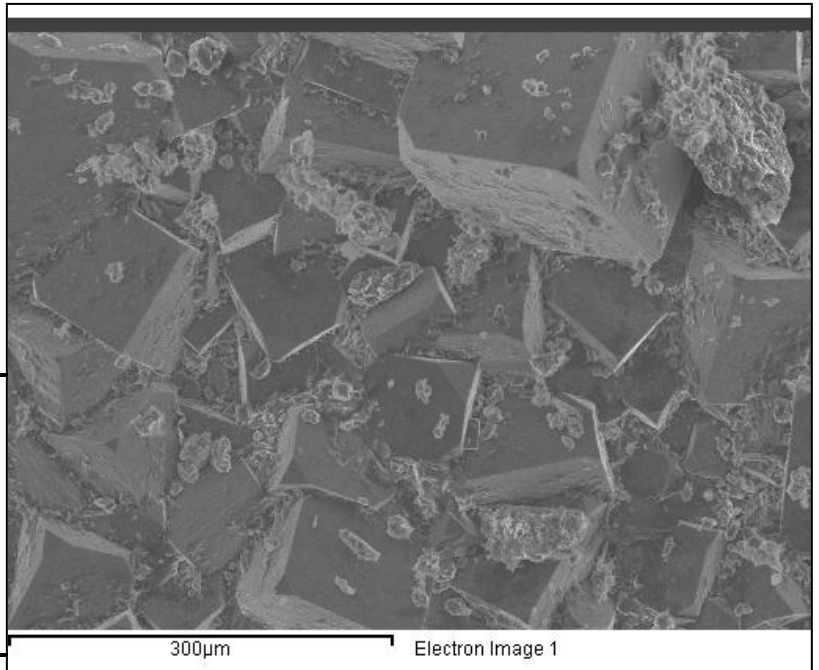
Processing option : All elements analyzed
 (Normalised)

Number of iterations = 2

Standard :

O SiO₂ 1-Jun-1999 12:00 AM
 Al Al₂O₃ 1-Jun-1999 12:00 AM
 Si SiO₂ 1-Jun-1999 12:00 AM
 S FeS₂ 1-Jun-1999 12:00 AM
 Ca Wollastonite 1-Jun-1999 12:00 AM
 Fe Fe 1-Jun-1999 12:00 AM

Element	Weight%	Atomic%
O K	37.67	58.17
Al K	5.03	4.61
Si K	7.04	6.19
S K	26.08	20.10
Ca K	1.36	0.84
Fe K	22.81	10.09
Totals	100.00	



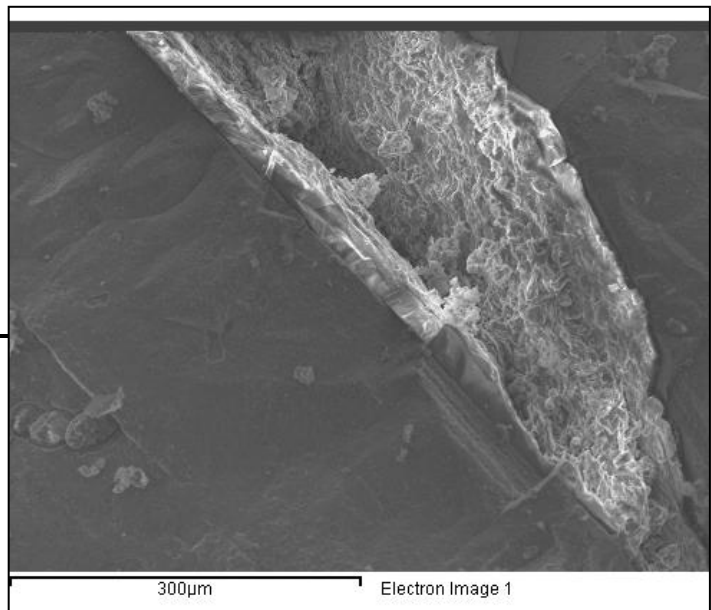
Spectrum processing :
 No peaks omitted

Processing option : All elements analyzed (Normalised)
 Number of iterations = 2

Standard :

O SiO₂ 1-Jun-1999 12:00 AM
 Mg MgO 1-Jun-1999 12:00 AM
 Al Al₂O₃ 1-Jun-1999 12:00 AM
 Si SiO₂ 1-Jun-1999 12:00 AM
 S FeS₂ 1-Jun-1999 12:00 AM
 Ca Wollastonite 1-Jun-1999 12:00 AM
 Fe Fe 1-Jun-1999 12:00 AM

Element	Weight%	Atomic%
O K	34.38	55.13
Mg K	0.83	0.87
Al K	4.29	4.08
Si K	4.33	3.95
S K	29.36	23.50
Ca K	0.80	0.51
Fe K	26.01	11.95
Totals	100.00	

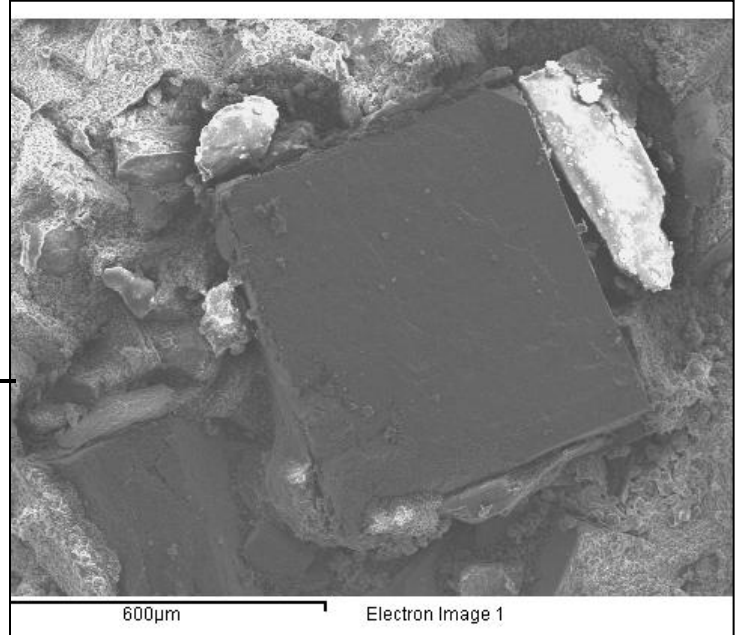


Spectrum processing :
 No peaks omitted

Processing option : All elements analyzed (Normalised)
 Number of iterations = 3

Standard :
 C CaCO3 1-Jun-1999 12:00 AM
 O SiO2 1-Jun-1999 12:00 AM
 Al Al2O3 1-Jun-1999 12:00 AM
 Si SiO2 1-Jun-1999 12:00 AM
 S FeS2 1-Jun-1999 12:00 AM
 Ca Wollastonite 1-Jun-1999 12:00 AM
 Fe Fe 1-Jun-1999 12:00 AM

Element	Weight%	Atomic%
C K	20.93	33.57
O K	38.07	45.85
Al K	2.67	1.91
Si K	2.85	1.95
S K	14.00	8.41
Ca K	6.66	3.20
Fe K	14.82	5.11
Totals	100.00	

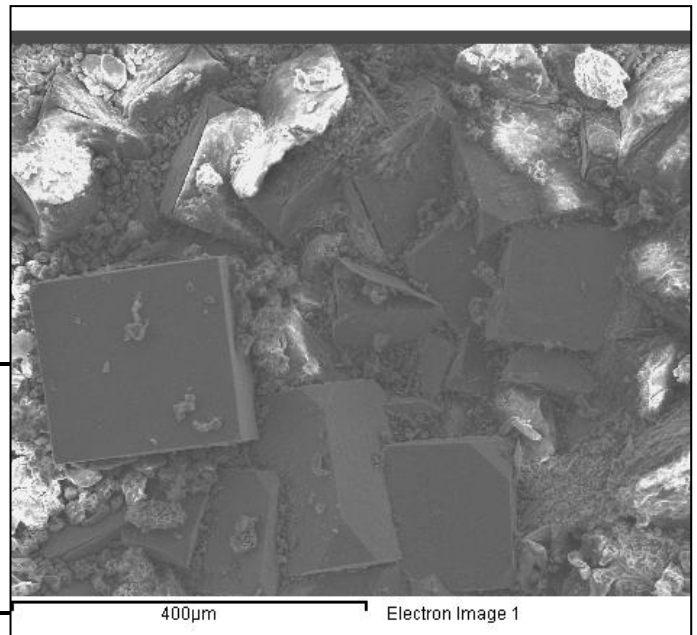


Spectrum processing :
 No peaks omitted

Processing option : All elements analyzed (Normalised)
 Number of iterations = 3

Standard :
 O SiO2 1-Jun-1999 12:00 AM
 Al Al2O3 1-Jun-1999 12:00 AM
 Si SiO2 1-Jun-1999 12:00 AM
 S FeS2 1-Jun-1999 12:00 AM
 Ca Wollastonite 1-Jun-1999 12:00 AM
 Fe Fe 1-Jun-1999 12:00 AM

Element	Weight%	Atomic%
O K	48.01	67.31
Al K	5.91	4.91
Si K	9.78	7.81
S K	14.48	10.13
Ca K	6.78	3.79
Fe K	15.04	6.04
Totals	100.00	



12.2 Planos de Discontinuidad de la roca-Superficies de falla potenciales

12.2.1 Espejos de falla

En las siguientes microfotografías se presentan zonas de falla observadas en los planos de discontinuidad de la roca. En la mayoría en todos los casos hay estrías de falla asociadas con movimientos anteriores del macizo rocoso y espejos o superficies pulidas donde ya se ha alcanzado la resistencia residual del material. Se destaca que desde el punto de vista de comportamiento mecánico estos planos estriados facilitan la entrada de agua y el incremento de presiones de poros, con posterior movimiento del terreno. En principio se han asociado estos planos a la formación de las superficies de falla.

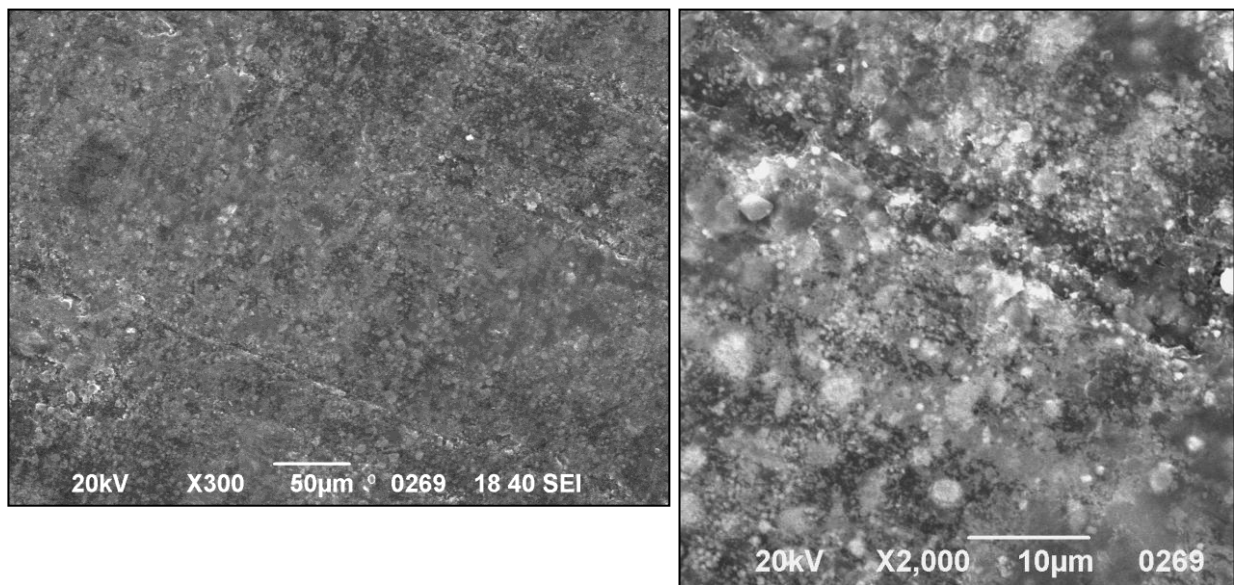


Figura 18. Presencia de planos estriados (“slikenside”), planos que hacen parte de la estructura secundaria de la roca lodosa.

12.2.2 Discontinuidades rellenas de calcita

Estos planos de discontinuidad rellenos de calcita de 1,0 cm a 4,0 cm, presentan alta susceptibilidad a la degradación y al desplazamiento, al igual que los planos anteriores son potenciales superficies de falla ya que se facilita el incremento de presiones hidrostáticas, principalmente durante periodos prolongados de lluvias en la zona (**Figura 19**).

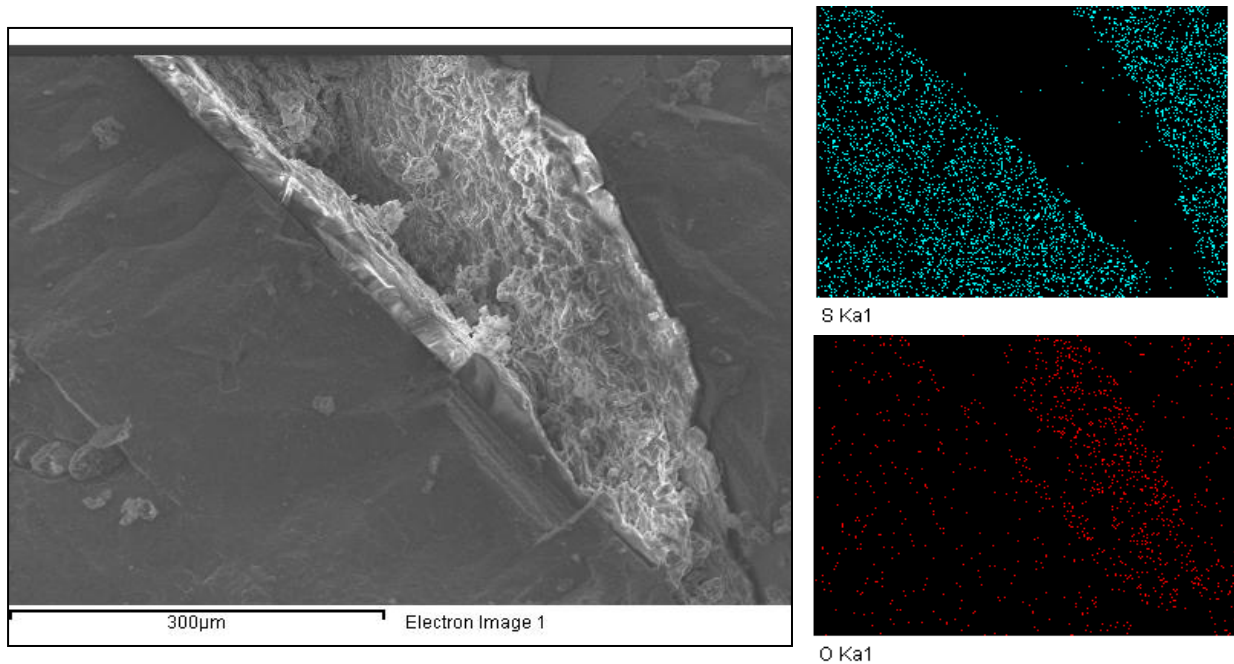


Figura 19. Aspecto microscópico de las venas de calcita presentes en las discontinuidades del sustrato rocoso (Fm. Trincheras).

12.3 Ensayos de difracción rayos X (XRD)

Adicional al análisis mediante microscopio electrónico de barrido, se realizaron ensayos de difracción rayos X en dos muestras de roca lodosa, un ensayo sobre un plano de discontinuidad (“slikenside”) y el otro en la masa rocosa. El objetivo de estos ensayos fue obtener la composición mineralógica de la roca, basados en el análisis se obtuvo la siguiente composición de minerales (**Figura 20**).

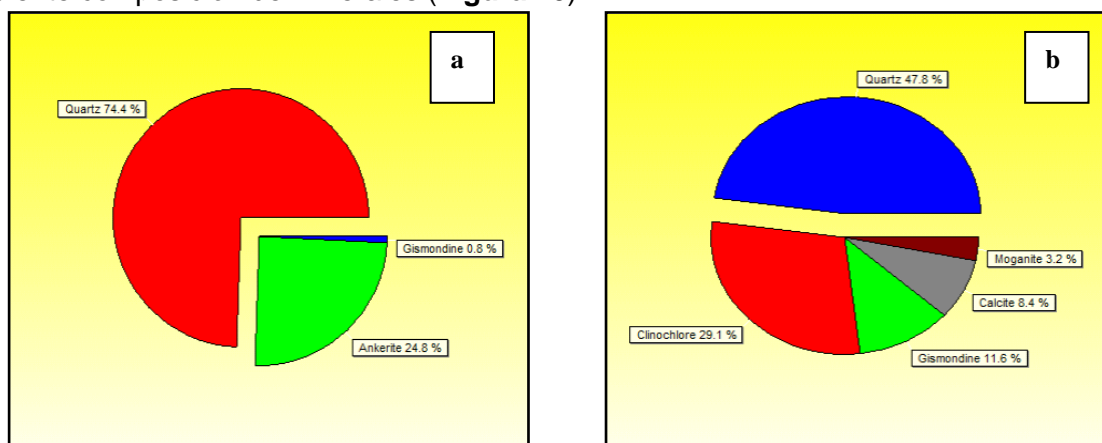


Figura 20. Composición mineralógica en la masa rocosa y en planos de discontinuidades (a) masa rocosa y (b) plano estriado. Ensayos XRD Universidad Nacional.

Masa rocosa: Cuarzo 74,4%, Ankerita 24,8%, Gismondina 0,8%.
 Plano estriado: Cuarzo 47,8%, Clinicllore 29,1%, Calcite 8,4%, Moganita 3,2% Gismondina 11,6%.

12.4 Conclusiones relacionadas con la caracterización de los materiales

- Lo más sobresaliente de las descripciones son los numerosos planos de debilidad que presentan estas rocas: su laminación, clivaje, fracturas, venas y fallas, que favorecen la infiltración de fluidos, su alteración y deformación.
- Adicionalmente, es importante advertir que dado el alto porcentaje de arcillas que presentan (alrededor del 50%), la absorción de agua es alta. Con fluctuaciones del nivel freático por ejemplo, o con la cantidad de aguas de infiltración, las rocas tienden a presentar cambios en peso, cohesión y volumen.
- Con los ensayos de XRD de refracción rayos X, se estable que las rocas que conforman el deslizamiento son rocas silíceas con un contenido de cuarzo muy importante, porcentajes de 47,8% y 74,4%. Existen otros minerales como la calcita (8,4%) y ankerita (24,8%, carbonatos) relacionados con presencia de calcio.
- En los planos estriados existe clinocloro (29,1%). Este mineral se presenta principalmente en rocas metamórficas. La presencia de este mineral indica que en estos planos se han desarrollado altas presiones e indica la existencia de metamorfismo dinámico.
- En general se obtuvo una estructura tipo laminar y cúbica. En las muestras de roca laminar predomina la presencia de oxígeno (entre el 50% y 70%) y en las formas cúbicas hay un contenido importante de Hierro (entre el 15% y el 30%) y azufre (entre el 14% y 30%), relacionados con la presencia de pirita (FeS_2).
- Los minerales constituyentes con excepción del cuarzo y algunas arcillas, se depositaron o formaron y se preservaron en un ambiente con potencial químico reductor, por lo que al ponerse en contacto con el ambiente oxidante de la superficie, se alteran fácilmente, el hierro en estado de oxidación +2 de arcillas, pirita y materia orgánica, se hidroliza y oxida formando hidróxidos y óxidos de hierro, o sales como el carbonato de hierro (siderita); el ion sulfuro de las piritas y la materia orgánica se oxida a sulfatos, como el yeso.

13 OBRAS DISEÑADAS PARA EL CONTROL DEL DESLIZAMIENTO

13.1 Descripción general de las obras correctivas

En la **Figura 21** se presenta la localización de las obras correctivas diseñadas para el control de la inestabilidad.



COMPENSACIÓN DE MASAS Descarga y Rellenos

OBRAS DE DRENAJE

(1) Galería de $l=240,0$ m.
(2),(3),(4), (5) Pozos de abatimiento de 1,5 m de diámetro y 20 m de profundidad.

OBRAS DE CONTENCIÓN

Pantallas de Pilotes de 1,5 m de diámetro.

TÚNEL FALSO

Longitud 200 m

Figura 21. Localización de obras correctivas. Fotografía: G y C 2008.

En el **Plano 1** se presenta la localización del deslizamiento y las obras correctivas.

13.2 Localización del túnel falso.

El túnel falso está compuesto por cuatro pantallas de pilotes de gran diámetro (1,25 m a 1,5 m), la No. 1 está localizada hacia la ladera y se encarga de asumir la mayor parte de la carga impuesta por el terreno. Las pantallas 2 a 4 conforman las paredes del túnel. Figura 22.

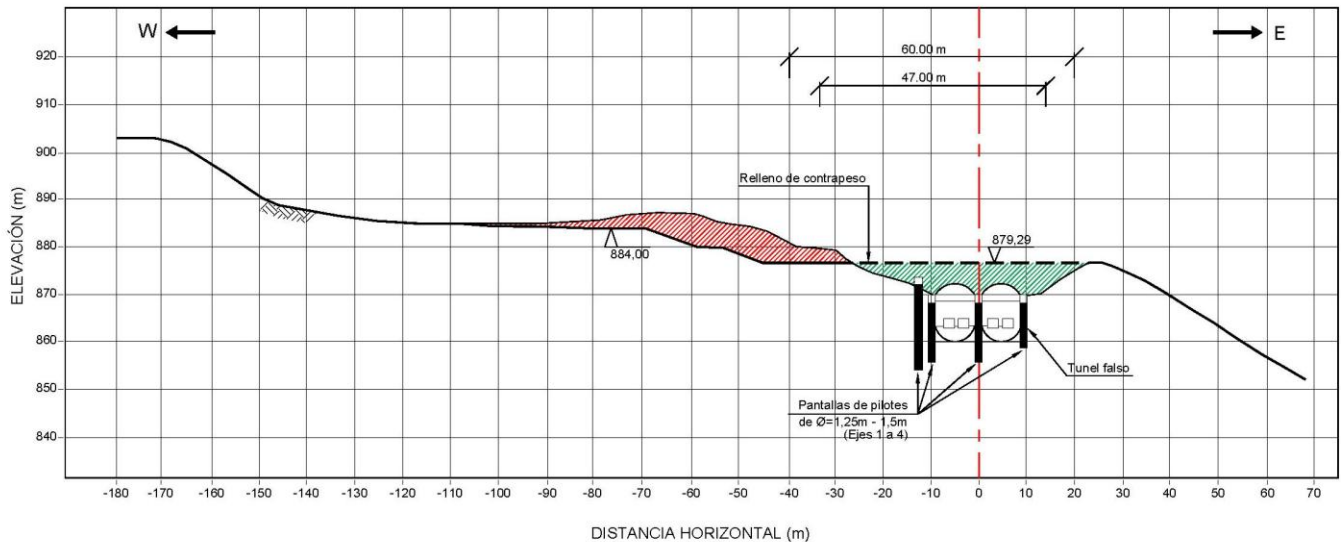


Figura 22. Localización del túnel Falso. Fuente: G y C 2008, modificada por C. Palomino S-2011.

13.3 Proceso constructivo

13.3.1 Movimiento de tierras-estabilización de masas

Se plantea la conformación de cortes y rellenos, con el fin de equilibrar cargas en el cuerpo del deslizamiento. Se tienen previstos rellenos de alturas hasta 8,0 m a 9 m localizados en el sector del antiguo corte en cajón de la carretera.

13.3.2 Drenaje profundo

13.3.3 Pozos de abatimiento-caissons drenantes

Construcción de pozos de abatimiento (caissons drenantes) de 2,0 m de diámetro y 20,0 m de profundidad, localizados en el tercio superior del deslizamiento. A medida que se realizaron las excavaciones se revestían las paredes con anillos de concreto reforzado.

13.3.4 Galería de drenaje

Desde el sector oriental, en la margen derecha de la quebrada El Cune se localiza una galería de drenaje de aproximadamente 220 m de longitud y 2,0 m de diámetro. Esta estructura se conectará con los pozos de abatimiento y será la responsable de evacuar las aguas subterráneas del deslizamiento. Figura 23.

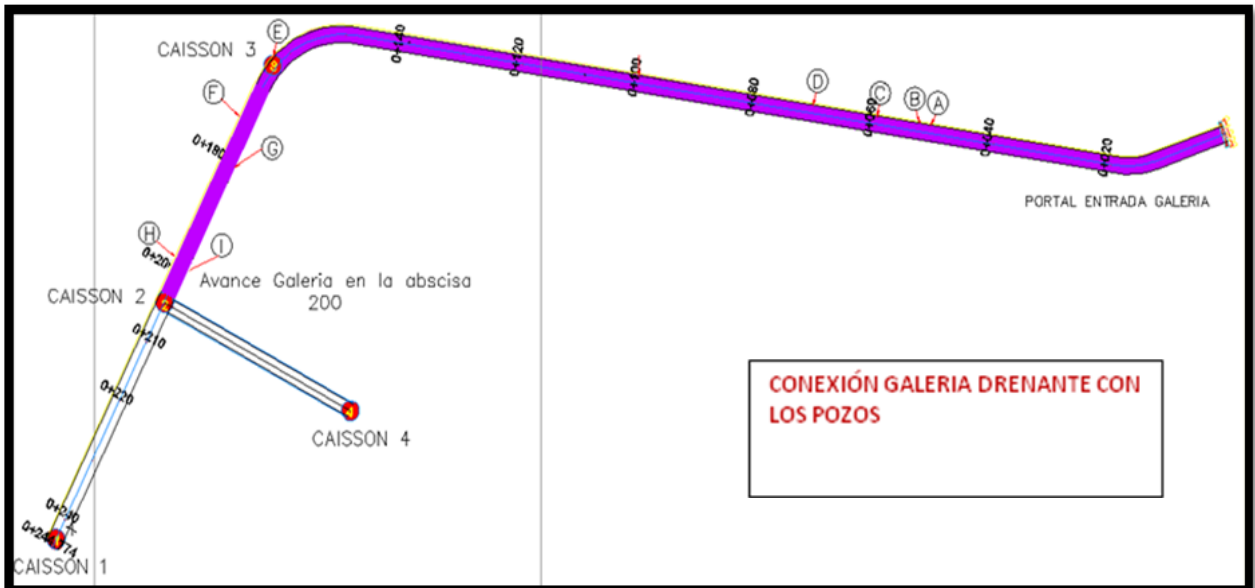


Figura 23. Localización eje de la galería y conexión con los pozos (caissons) de abatimiento.
Fuente: G y C 2008.

13.4 Construcción de túnel falso de 200 m de longitud

El proceso constructivo del *falso túnel* es el siguiente:

- Construcción de elementos verticales
- Excavación y construcción de Losa Superior
- Construcción de bóvedas superiores
- Relleno sobre bóvedas superiores
- Excavación frontal e instalación de puntal
- Mejoramiento de suelo bajo bóveda inferior
- Construcción de bóveda inferior
- Relleno final

El túnel tendrá una longitud de 200 m, considerada como la longitud de influencia del deslizamiento en la banca de la carretera. En las Figuras 24 a 26 se ilustra el proceso constructivo que se aplica para la construcción del túnel falso.

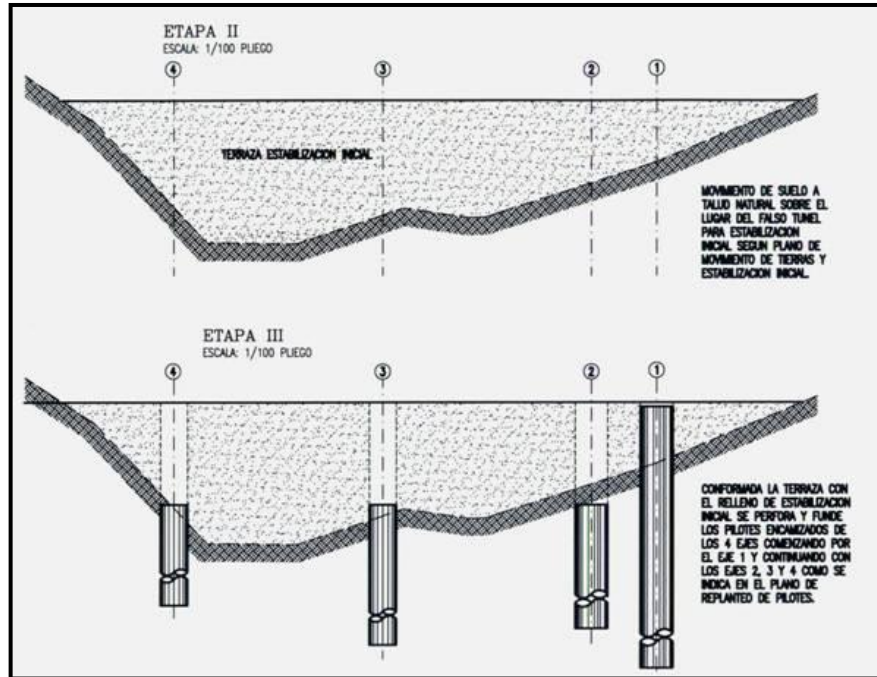


Figura 24. Etapa inicial de rellenos de compensación de masas. Fuente G y C 2008

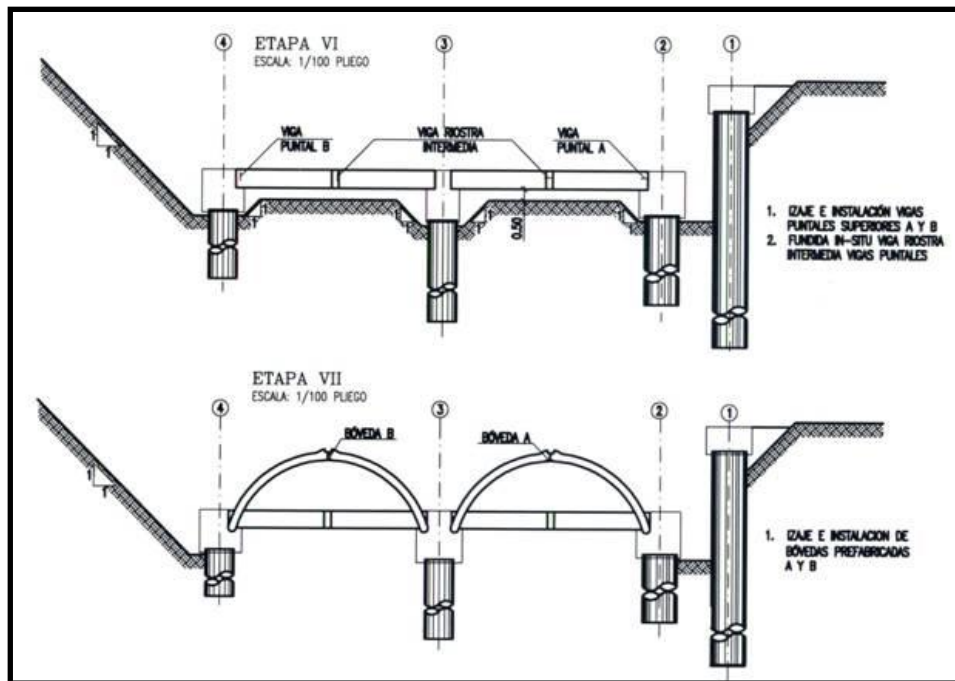


Figura 25. Etapa intermedia, construcción de elementos verticales y bóvedas superiores. Fuente G y C 2008

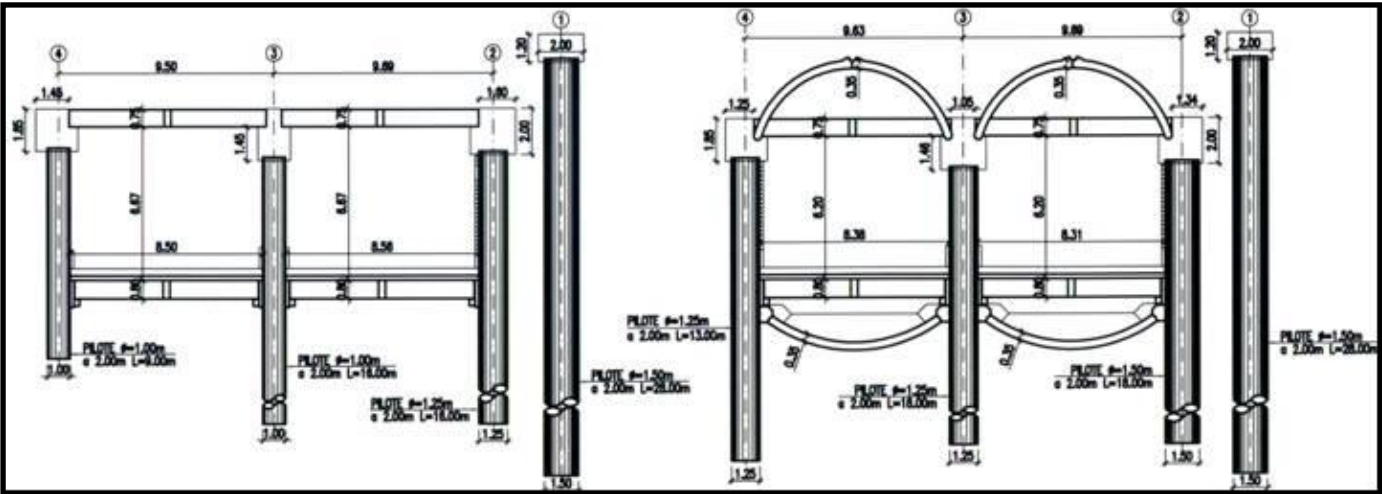


Figura 26. Etapa Final, construcción de las secciones completas del túnel y posterior relleno de contrapeso en la zona superior de las bóvedas. Fuente G y C 2008

14 INSTRUMENTACIÓN DEL DESLIZAMIENTO

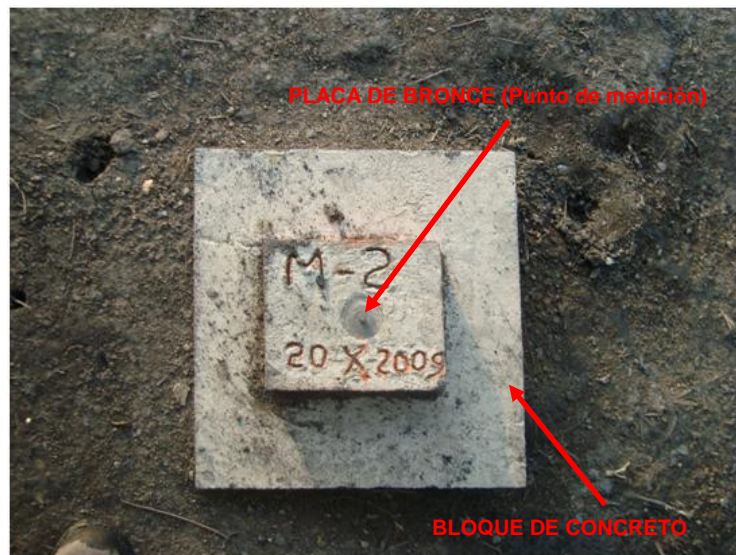
14.1 TIPOS DE INSTRUMENTOS INSTALADOS

En el deslizamiento de El Cune se han instalado los siguientes instrumentos de medición:

14.1.1 Mojones de control topográfico

Instalados a nivel del terreno, consisten en un bloque de concreto de 0,20 m de lado cimentado en el terreno; con estos elementos se miden deformaciones superficiales, con un equipo de topografía de precisión de primer orden.

Los mojones localizados dentro del deslizamiento son medidos y controlados mediante mojones de referencia localizados por fuera del deslizamiento, en puntos estables. Estos mojones controlan las deformaciones de puntos localizados en el deslizamiento. Cada punto de medición está identificado con una placa de bronce que contiene la referencia del punto (**Fotografía 26**).



Fotografía 26. Mojones de control localizados en el deslizamiento para el control de movimientos del terreno (Foto: 2010).

14.1.2 Inclinómetros

Consisten en elementos verticales compuestos por tubería de fibra de vidrio instalada a una hasta una profundidad estable. En la mayoría de los casos se alcanzó el estrato rocoso, atravesando las superficies del cuerpo del deslizamiento; con los inclinómetros se han medido deformaciones del terreno y velocidades de desplazamiento (**Fotografía 27**).



Fotografía 27. Inclinómetros para medir tasas de deformación y registrar profundidad de superficies de falla del deslizamiento (Foto:2010).

14.1.3 Piezómetros de hilo vibrátil

Consiste en dispositivos de medición instalados en profundidades donde se tiene interés de obtener las magnitudes de las presiones de poros. Las mediciones en superficie están basadas en una señal de frecuencia obtenida en el sitio donde se ha instalado el piezómetro. Con los piezómetros se han medido presiones de poros y posición de nivel freático. Fotografía 28.



Fotografía 28. Piezómetros de hilo vibrátil para medir presiones de poros y nivel freático. (Foto: 2010).

14.1.4 Extensómetros

Instrumento de medición de deformación vertical del terreno, consisten en elementos verticales que se anclan por medio de puntos fijos en el subsuelo y un elemento vertical graduado libre que mide el asentamiento o levantamiento del terreno.

En este caso específico se instalaron extensómetros en el tercio inferior del deslizamiento, sector en el cual se realizó un relleno que hizo parte de la compensación de masas. Con este instrumento de medición se han determinado los asentamientos del relleno en el tiempo de colocación y conformación. Fotografía 29.



Fotografía 29. Extensómetros instalados en rellenos de contrapeso. (Foto:2010).

En el caso del deslizamiento El Cune, los extensómetros tuvieron una vida útil corta, debido a que se localizaron en el tercio inferior del cuerpo de la masa deslizada, sector en el cual se llevaron a cabo reconfiguraciones y varios movimientos de terreno.

Celdas de Carga

Instrumentos que miden esfuerzos debidos a presiones del terreno sobre las estructuras rígidas construidas. Consisten en una celda metálica que registra la presión del terreno y mide el esfuerzo aplicado al sitio donde se ha instalado.

Pluviómetro

Aparato de medición instalado en la zona central del deslizamiento, se miden las precipitaciones diarias. Se ha logrado un periodo de medición de marzo a octubre de 2010.

En el Plano 2, se presenta la localización de la instrumentación.

14.2 VARIABLES MEDIDAS EN EL TERRENO

Se midieron las siguientes variables del terreno:

14.2.1 Desplazamientos

Los desplazamientos se midieron desde dos puntos de vista:

Superficiales: mediante mojones de control localizados en el cuerpo principal del deslizamiento y en sectores aledaños.

En profundidad: mediante el registro de los inclinómetros, los cuales han medido de forma continua las deformaciones en el perfil del subsuelo, tomándose registro de desplazamientos en los espesores de depósito (rellenos y coluvión) y en los estratos de rocas lodosas.

14.2.2 Presiones de poros

Mediciones registradas en los piezómetros de hilo vibrátil. Se han registrado presiones de poros en diferentes sitios de la masa inestable.

14.2.3 Niveles piezométricos

Medidos con base en el registro de los piezómetros de hilo vibrátil.

14.2.4 Asentamientos

Magnitudes de asentamiento medidas en extensómetros localizados en el tercio inferior del deslizamiento. Se miden deformaciones verticales de los rellenos de compensación. Estos rellenos están compuestos por materiales del sitio, colocados y conformados en el espacio dejado por el antiguo corte en cajón de la ladera. Estas mediciones de asentamiento fueron cortas debido a los movimientos de tierra llevados a cabo en la zona donde se instalaron.

14.2.5 Esfuerzos en estructuras rígidas

Se registró el efecto de las presiones de terreno deslizado sobre los elementos rígidos: pilotes y vigas. Se instalaron celdas de carga en las secciones principales de los pilotes y en las vigas longitudinales y puntales. Mediante la determinación de los esfuerzos se

logró comparar los esfuerzos inducidos por el terreno Vs. los esfuerzos del concreto de los elementos rígidos, en el tiempo de fraguado y de endurecimiento del concreto.

14.3 RESULTADOS DE LA INSTRUMENTACIÓN PERÍODO MARZO/2010 A OTUBRE/2010

Con los resultados obtenidos de la instrumentación instalada hasta la fecha se definirán dos condiciones geotécnicas importantes en el comportamiento del terreno:

14.3.1 Tendencia de movimiento del terreno – Vectores principales

Para definir las tendencias preferenciales del movimiento del terreno, nos hemos apoyado en el registro continuo de los mojones de control instalados en el deslizamiento. Los mojones se localizaron en sectores estratégicos del cuerpo del deslizamiento y han contribuido a la definición de la dirección y magnitud de los movimientos realizada en diferentes campañas de lecturas. A continuación se describen las convenciones de los mojones instalados:

Tabla 2 Localización de mojones de control, año 2010.

LOCALIZACIÓN EN EL DESLIZAMIENTO	DESCRIPCIÓN
CORONA	Mojones localizados en la parte superior de la ladera.
FLANCO IZQUIERDO	Localizados en la sección 540.
CUERPO DEL DESLIZAMIENTO	Localizados en los “caissons” (pozos) de drenaje.
CUERPO DEL DESLIZAMIENTO	Localizados en la sección 440.

En el **Plano 2**, se presentan las direcciones de las tendencias de movimiento del terreno. En la tabla siguiente se resumen las direcciones registradas en cada uno de los mojones de control topográfico, organizados desde la corona hasta la base del deslizamiento, lo anterior para observar el comportamiento del cuerpo o masa en movimiento.

Tabla 3. Registro de la dirección preferencial del movimiento del terreno, año 2010

PUNTO DE CONTROL No.	REFERENCIA DEL MOJÓN	DIRECCIÓN DEL MOVIMIENTO	OBSERVACIONES
1	MJ-11	N 65 E	Corona del deslizamiento.
2	MS-12	S 79 E	Corona del deslizamiento.
3	MS-7	N 83 E	Corona del deslizamiento.
4	MS-8	S 78 E	Corona del deslizamiento.
5	MS-9	S 82 E	Corona del deslizamiento.

PUNTO DE CONTROL No.	REFERENCIA DEL MOJÓN	DIRECCIÓN DEL MOVIMIENTO	OBSERVACIONES
6	MS-10	S 85 E	Corona del deslizamiento.
7	Caissons (Pozo) 1	S 85 E	Zona intermedia del deslizamiento.
8	Caissons (Pozo) 2	S 88 E	Zona intermedia del deslizamiento.
9	Caissons (Pozo) 3	S 85 E	Zona intermedia del deslizamiento.
10	Caissons (Pozo) 4	S 77 E	Zona intermedia del deslizamiento.
11	MOJÓN 2	S 75 E	Zona intermedia del deslizamiento.
12	MOJÓN 1	S 85 E	Zona intermedia del deslizamiento.
13	MOJÓN 4	S 85 E	Zona intermedia del deslizamiento.
14	MJ-440-11	S 48 E	Base del deslizamiento.
15	MOJÓN 3	S 75 E	Base del deslizamiento.
16	MOJÓN 6	S 82 E	Base del deslizamiento.
17	MOJÓN 5	S 75 E	Base del deslizamiento.
18	MJ-440-7	S 60 E	Base del deslizamiento.
19	MJ 440-19	Baja magnitud de movimiento.	Base del deslizamiento.
20	MJ-440-12	S 40 E	Base del deslizamiento.
21	MJ-440-9	S 56 E	Base del deslizamiento.
22	MJ-440-18	Baja magnitud de movimiento.	Base del deslizamiento.
23	MJ-440-8	Baja magnitud de movimiento.	Base del deslizamiento.
24	MJ-440-17	Baja magnitud de movimiento.	Base del deslizamiento.
25	MJ-440-16	Baja magnitud de movimiento.	Base del deslizamiento.

Se establece lo siguiente:

El cuerpo principal del deslizamiento presenta una dirección preferencial de movimiento S 80 E, delimitando una faja central rectangular de 135 m de largo y un ancho promedio de 60 m.

El sector del flanco derecho del deslizamiento presenta una dirección preferencial S 65 E y S 45 E (hacia el borde derecho del deslizamiento), este sector está delimitado por un triángulo de base 70 m (medidos desde el mojón MJ-440-8 hasta el pilote 160 localizado en el borde del flanco derecho del deslizamiento) y una altura promedio de 90 m.

El flanco izquierdo del deslizamiento está acunado por estratos rocosos compuestos por intercalaciones de rocas lodosas de la Formación Trincheras y areniscas de la Formación Útica. El terreno que conforma este flanco se desplaza con la misma dirección S 80 E del cuerpo del deslizamiento.

14.3.2 Magnitud acumulada de los desplazamientos del terreno en el período marzo/10 a octubre/10

En la siguiente tabla se presentan las magnitudes acumuladas de cada uno de los mojones instalados en el deslizamiento.

Tabla 4 Magnitud acumulada de mojones de control periodo marzo/10 – oct/10

PUNTO DE CONTROL No.	REFERENCIA DEL MOJÓN	MAGNITUD ACUMULADA (cm)	OBSERVACIONES
1	MJ-11		Corona del deslizamiento.
2	MS-12	201,23	Corona del deslizamiento.
3	MS-7	126,37	Corona del deslizamiento.
4	MS-8	185,91	Corona del deslizamiento.
5	MS-9	188,05	Corona del deslizamiento.
6	MS-10	152,46	Corona del deslizamiento.
7	Caissons (Pozo) 1	110,47	Zona intermedia del deslizamiento.
8	Caissons (Pozo) 2	160,0	Zona intermedia del deslizamiento.
9	Caissons (Pozo) 3	190,44	Zona intermedia del deslizamiento.
10	Caissons (Pozo) 4	131,36	Zona intermedia del deslizamiento.
11	MOJÓN 2	232,04	Zona intermedia del deslizamiento.
12	MOJÓN 1	261,49	Zona intermedia del deslizamiento.
13	MOJÓN 4	312,90	Zona intermedia del deslizamiento.
14	MJ-440-11	33,66	Base del deslizamiento.
15	MOJÓN 3	206,02	Base del deslizamiento.
16	MOJÓN 6	274,26	Base del deslizamiento.
17	MOJÓN 5	294,70	Base del deslizamiento.
18	MJ-440-7	109,50	Base del deslizamiento.
19	MJ 440-19	0,61	Base del deslizamiento.
20	MJ-440-12	28,20	Base del deslizamiento.
21	MJ-440-9	48,61	Base del deslizamiento.
22	MJ-440-18	1,52	Base del deslizamiento.
23	MJ-440-8	25,98	Base del deslizamiento.
24	MJ-440-17	1,30	Base del deslizamiento.
25	MJ-440-16	0,54	Base del deslizamiento.

Los mayores desplazamientos del terreno se han presentado en la zona intermedia y la base del deslizamiento con valores máximos acumulados de 294,70 cm y 312,90 cm en un período de marzo a octubre de 2010 (8 meses).

14.3.3 Resumen gráfico de desplazamiento acumulado del terreno

En las siguientes figuras se presenta un resumen de los desplazamientos del terreno con base en la sectorización del deslizamiento, sección 440, sección 540, sección 540-mojones superiores y mojones instalados en los “caissons” de drenaje.

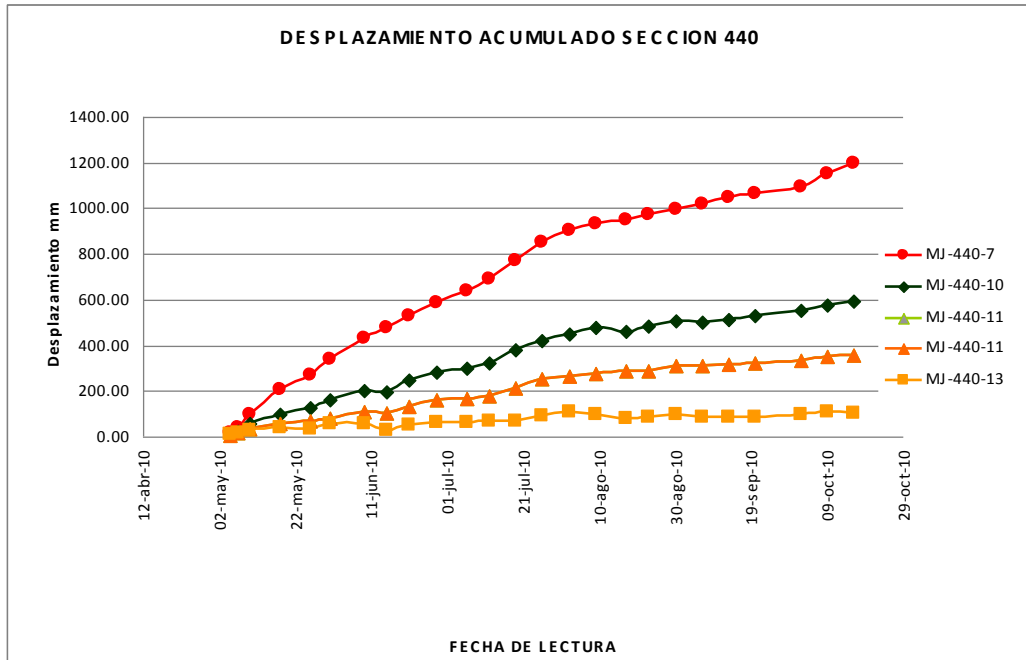


Figura 27. Desplazamiento acumulado sección 440. Datos fuente G y C 2008

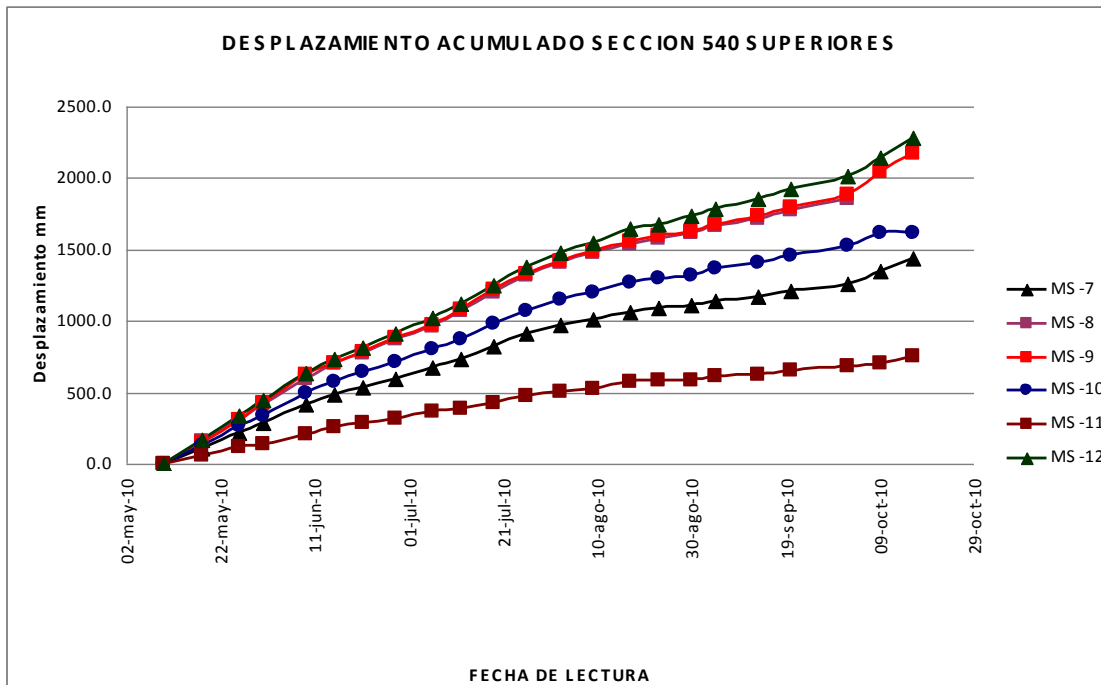


Figura 28 Desplazamiento acumulado sección 540 (superiores). Datos Fuente: G y C, 2010.

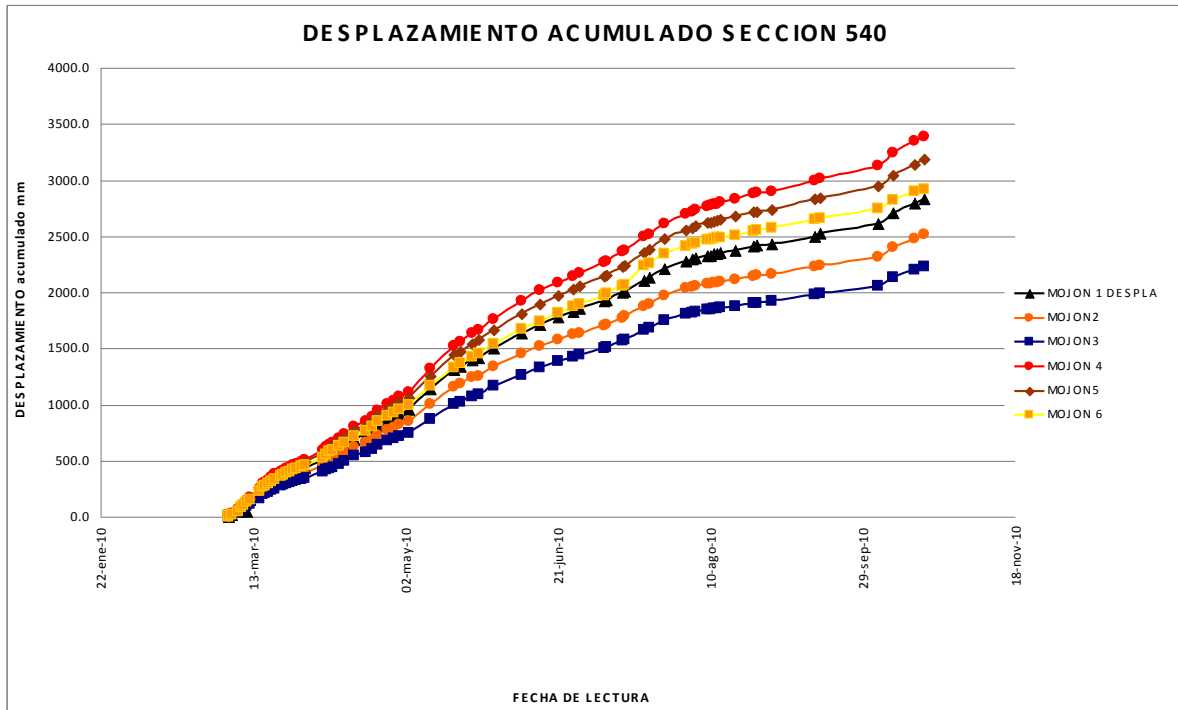


Figura 29. Desplazamiento acumulado sección 540. Datos Fuente: G y C, 2010.

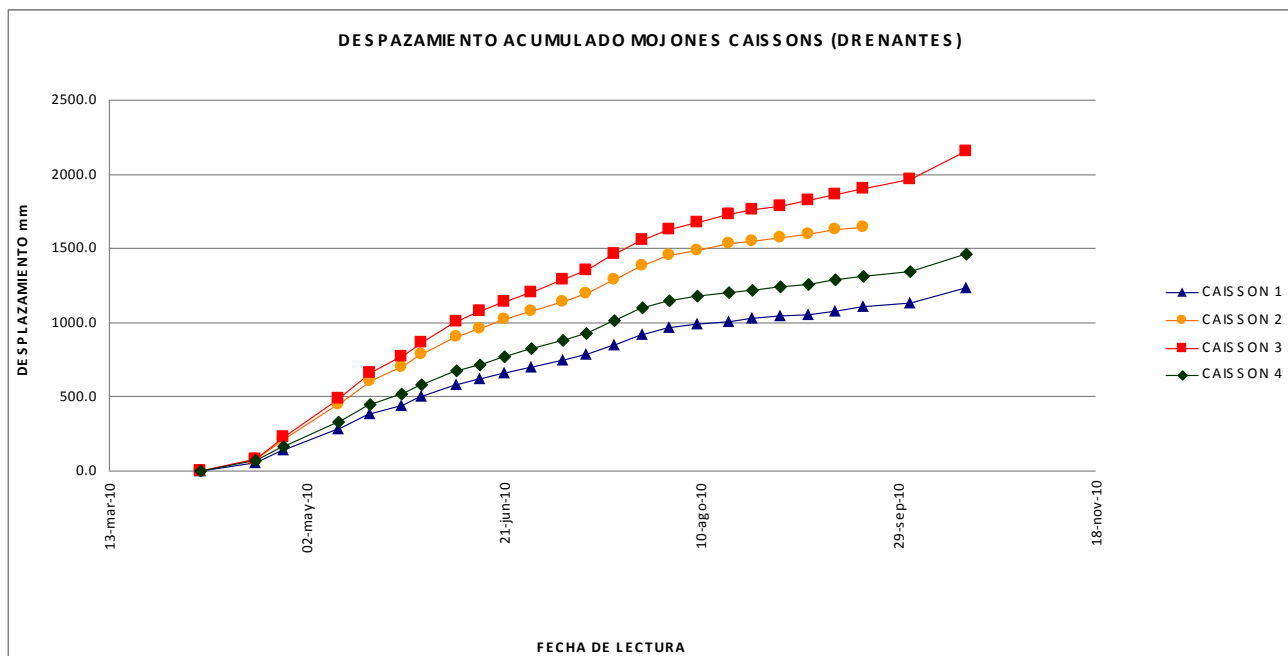


Figura 30. Desplazamiento acumulado sección- caissons drenantes . Datos Fuente: G y C, 2010.

14.3.4 Tasas de desplazamiento registradas en el terreno en el período marzo/10 a octubre/10

Tabla 5 Análisis de tasas máximas en el periodo marzo/10 – Oct/10

PUNTO DE CONTROL No.	REFERENCIA DEL MOJÓN	MAGNITUD ACUMULADA (cm)	TASA MÁXIMA ALCANZADA cm/día-(Fecha)	TASA ACTUAL (cm/día)	OBSERVACIONES
1	MJ-11				Corona del deslizamiento.
2	MS-12	201,23	2,6 (Mayo 31)	0,7 (octubre 10)	Corona del deslizamiento.
3	MS-7	126,37	1,7 (Mayo 31)	0,4 (Octubre 10)	Corona del deslizamiento.
4	MS-8	185,91	2,5 (Mayo 31)	0,7 (Octubre 10)	Corona del deslizamiento.
5	MS-9	188,05	1,9 (Julio 12)	0,7 (Octubre 10)	Corona del deslizamiento.
6	MS-10	152,46	1,8 (Junio 9)	0,6 (Octubre 10)	Corona del deslizamiento.
7	Caissons (Pozo) 1	110,47	1,3 (Mayo 31)	0,1 (Octubre 2)	Zona intermedia del deslizamiento.
8	Caissons (Pozo) 2	160,0	1,7 (Mayo 10,31)	0,2 (Octubre 2)	Zona intermedia del deslizamiento.
9	Caissons (Pozo) 3	190,44	2,2 (Mayo 18)	0,6 (Octubre 2)	Zona intermedia del deslizamiento.
10	Caissons (Pozo) 4	131,36	1,4 (Mayo 18)	0,4 (octubre 2)	Zona intermedia del deslizamiento.
11	MOJÓN 2	232,04	4,3 (Marzo 16)	0,4 (Octubre 16)	Zona intermedia del deslizamiento.
12	MOJÓN 1	261,49	4,1 (Marzo 16)	0,5 (Octubre 16)	Zona intermedia del deslizamiento.
13	MOJÓN 4	312,90	4,8 (Marzo 16)	0,6 (Octubre 16)	Zona intermedia del deslizamiento.
14	MJ-440-11	33,66	0,66 (Mayo 10)	0,11 (Octubre 16)	Base del deslizamiento.
15	MOJÓN 3	206,02	1,80 (Abril 10, Julio 7)	0,9 (Octubre 19)	Base del deslizamiento.
16	MOJÓN 6	274,26	4,8 (Marzo 5)	1,9 (Octubre 19)	Base del deslizamiento.
17	MOJÓN 5	294,70	2,7 (Mayo 10)	1,3 (Octubre 19)	Base del deslizamiento.
18	MJ-440-7	109,50	2,04 (Mayo 10)	0,70 (Octubre 16)	Base del deslizamiento.
19	MJ 440-19	0,61	0,36 (Junio 26)	0,09 (Octubre 16)	Base del deslizamiento.
20	MJ-440-12	28,20	0,71 (Julio 19)	0,22 (Octubre 16)	Base del deslizamiento.
21	MJ-440-9	48,61	1,37 (Mayo 10) 1,11 (Mayo 31)	0,55 (Octubre 16)	Base del deslizamiento.
22	MJ-440-18	1,52	0,34 (Julio 26)	0,27 (Octubre 16)	Base del deslizamiento.
23	MJ-440-8	25,98	1,45 (Mayo 10)	0,81 (Octubre 16)	Base del deslizamiento.
24	MJ-440-17	1,30	0,54 (Junio 21)	0,06 (Octubre 16)	Base del deslizamiento.
25	MJ-440-16	0,54	0,19 (Agosto 17)	0,11 (Octubre 16)	Base del deslizamiento.

14.3.5 Escala de tasas de movimiento según D. J. Varnes, 1978

Extremadamente rápido	Mayor a 3,0 m/seg.
Muy rápido	1,5 m /día-0,3 m/minuto
Rápido	1,5 m /día- 0,3 m/minuto
Moderado	1,5 m /mes (5,0 cm/día) - 1,5 m /día (150,0 cm/día)

Lento	1,5 m /año (0,41 cm/día) - 1,5 m/mes (5,0 cm/día)
Muy Lento	0,06 m/año (0,02 cm/día) - 1,5 m/año (0,41 cm/día)
Extremadamente Lento	Menor a 0,06 m/año (0,02 cm/día)

Basados en la clasificación de D. J. Varnes, 1978, y las tasas de desplazamiento del terreno obtenidas en el periodo comprendido entre marzo y octubre de 2010 los movimientos máximos registrados están en el rango moderado, obteniéndose valores de tasas máximas variables entre 2,6 cm/día y 4,8 cm/día. Estos valores máximos en el periodo de control se han disminuido a tasas variables entre 0,4 cm/día y 1,9 cm/día, consideradas dentro de la escala lenta a muy lenta. Esta disminución se debe principalmente a los tratamientos de drenaje profundo aplicados en el deslizamiento.

14.4 Comportamiento de las lluvias Vs. desplazamiento del terreno

En la zona estudiada se ha realizado monitoreo diario de lluvias mediante la lectura de un pluviómetro instalado en el cuerpo del deslizamiento; las lecturas se han registrado durante el periodo comprendido entre marzo y octubre (8 meses), registrando la magnitud de las lluvias en mm/día (**Figura 31**).

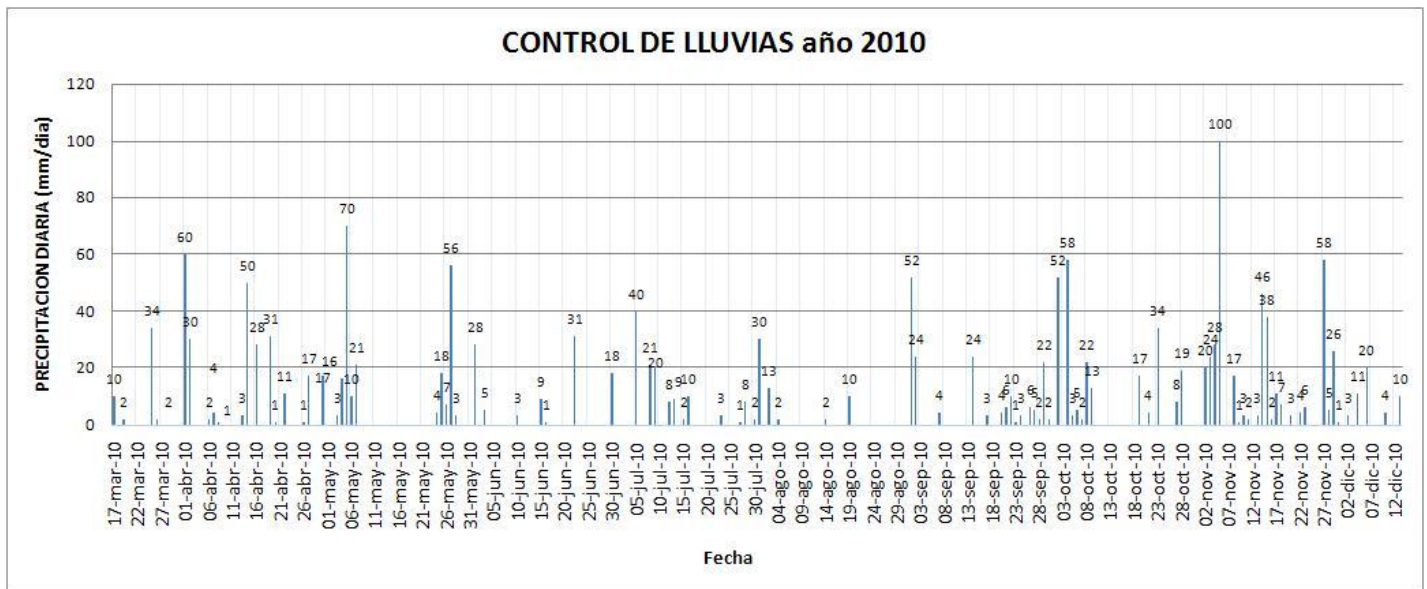


Figura 31. Comportamiento de las lluvias período año 2010. Datos Fuente: G y C, 2010.

Del análisis de las lluvias se establece lo siguiente:

- Las lluvias máximas se han presentado durante los periodos comprendidos entre el 27 de marzo y el 6 de mayo, alcanzando precipitaciones de 70 mm/día.
- Entre el 6 de mayo y el 6 de junio se presentaron lluvias de intensidad moderada, con un pico de precipitación de 56 mm/día en mayo 10 de 2010.
- Entre el 6 de junio y el 30 de agosto se presentó un periodo seco con precipitaciones mínimas variables entre 2 y 8 mm/día.
- Entre el 1 de septiembre y el 30 de septiembre se presentó un período seco. En octubre y noviembre se presentó un periodo de lluvias fuertes obteniendo valores de 52, 58 y 100 mm/día; considerados altos.

En conclusión se presentaron dos periodos lluviosos con magnitudes máximas entre los meses de marzo a mayo y septiembre a noviembre. Se resalta que los periodos de lluvias medidos son atípicas y están relacionadas con el fenómeno de la Niña caracterizado por el incremento de precipitaciones, alcanzando valores críticos que pueden llegar a superar la resistencia al corte del terreno. Por lo tanto, se estima que la estabilidad del terreno y las obras en construcción fueron sometidas (durante el 2010) a condiciones climáticas críticas que prueban la eficiencia de las obras de control adoptadas.

14.5 Magnitud de presiones de poros medidas en el terreno

En la siguiente tabla y figuras se presenta el comportamiento de las presiones de poros registradas en los piezómetros de hilo vibrátil instalados en el deslizamiento. Al final del capítulo se realizará un análisis de los resultados obtenidos. Tabla 6, figuras 32 y 33.

Tabla 6 Presiones de poros registradas. Datos Fuente: G y C, 2010.

FECHA DE LECTURA	PIEZOMETRO 1 Presión de Poros (ton/m ²)	PIEZOMETRO 3 Presión de Poros (ton/m ²)	PIEZOMETRO 4 Presión de Poros (ton/m ²)-
13-nov-09	17.35	19.09	15.04
27-nov-09	16.04	20.44	14.97
10-dic-09	14.95	19.50	14.92
28-dic-09	13.84	19.56	15.11
18-ene-10	12.75	22.83	11.34
01-feb-10	12.00	18.85	14.83
15-feb-10	11.41	18.87	15.05
24-mar-10	9.78	19.95	14.85
31-mar-10	9.41	19.73	14.77
07-abr-10	8.97	20.57	14.55

UNIVERSIDAD NACIONAL DE COLOMBIA – FACULTAD DE INGENIERÍA – SECCIÓN DE GEOTECNIA
 ESTUDIO DEL TERRENO Y OBRAS CORRECTIVAS EN EL SITIO DE EL CUNE, MUNICIPIO DE VILLETA, CUNDINAMARCA,
 CON APLICACIÓN DEL MÉTODO OBSERVACIONAL

FECHA DE LECTURA	PIEZOMETRO 1 Presión de Poros (ton/m2)	PIEZOMETRO 3 Presión de Poros (ton/m2)	PIEZOMETRO 4 Presión de Poros (ton/m2)-
10-abr-10	10.38	22.82	14.92
14-abr-10	8.74	20.18	14.38
19-abr-10	8.67	20.66	14.36
20-abr-10	8.64	20.76	14.37
27-abr-10	8.18	20.66	14.35
03-may-10	7.80	20.17	14.35
04-may-10	7.91	20.13	14.36
12-may-10	8.87	20.59	14.34
19-may-10	8.29	20.17	14.29
24-may-10	8.21	18.28	14.22
28-may-10	8.21	18.93	14.39
31-may-10	8.28	19.04	14.77
01-jun-10	8.28	19.12	14.50
04-jun-10	8.23	18.94	14.98
08-jun-10	8.16	18.42	14.73
16-jun-10	8.12	17.31	14.38
18-jun-10		17.08	14.27
21-jun-10	8.05	17.25	14.22
22-jun-10	7.99	17.10	14.20
23-jun-10	8.01	17.37	14.18
24-jun-10	8.00	17.20	14.15
25-jun-10	7.98	17.17	14.12
28-jun-10	7.93	17.34	14.08
30-jun-10	7.88	16.93	14.03
02-jul-10	11.40	16.63	13.99
07-jul-10	10.91	16.80	13.96
10-jul-10	11.50	17.29	14.34
12-jul-10	11.75	17.69	14.75
15-jul-10	11.19	17.53	14.87
16-jul-10	11.23	17.28	14.90
21-jul-10	11.50	17.05	14.94
22-jul-10	10.94	19.25	14.90
27-jul-10	11.33	9.58	14.61
30-jul-10	11.32	9.55	14.31
02-ago-10	11.24	9.65	14.04
03-ago-10	11.49	9.59	14.01
06-ago-10	12.29	9.57	14.04
10-ago-10	12.20	9.56	14.14
14-ago-10	12.58	9.64	14.14

UNIVERSIDAD NACIONAL DE COLOMBIA – FACULTAD DE INGENIERÍA – SECCIÓN DE GEOTECNIA
ESTUDIO DEL TERRENO Y OBRAS CORRECTIVAS EN EL SITO DE EL CUNE, MUNICIPIO DE VILLETA, CUNDINAMARCA,
CON APLICACIÓN DEL MÉTODO OBSERVACIONAL

FECHA DE LECTURA	PIEZOMETRO 1 Presión de Poros (ton/m ²)	PIEZOMETRO 3 Presión de Poros (ton/m ²)	PIEZOMETRO 4 Presión de Poros (ton/m ²)
18-ago-10	11.84	9.64	14.08
23-ago-10	11.20	9.67	13.94
25-ago-10	11.00	9.63	13.78
02-sep-10	11.24	9.71	13.83
06-sep-10	11.09	9.75	13.78
14-sep-10	10.64	9.78	14.00
21-sep-10	10.65	9.79	14.16
27-sep-10	10.71	9.81	14.03
29-sep-10	10.41	9.80	14.00
04-oct-10	10.63	9.88	13.94
12-oct-10	13.53	10.05	14.22
14-oct-10	13.73	10.03	14.23
19-oct-10	12.70	10.00	14.20

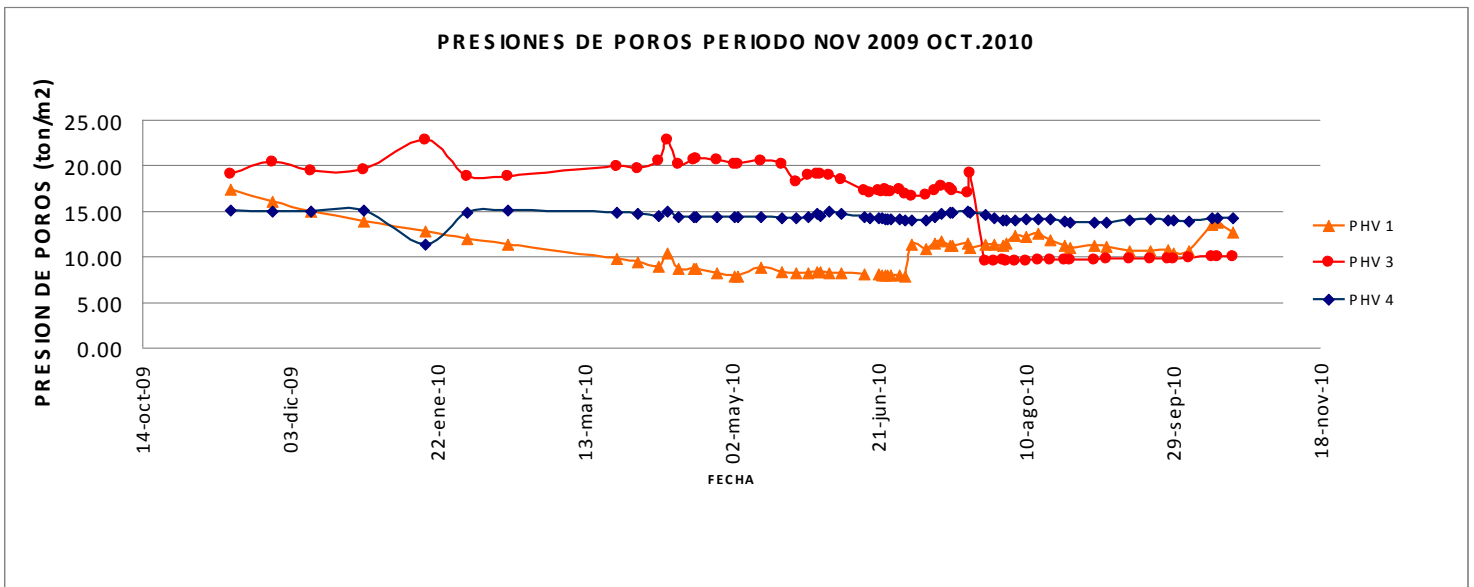


Figura 32. Comportamiento de las presiones de poros, periodo Nov. 2009- Oct. de 2010. Datos Fuente: G y C, 2010.

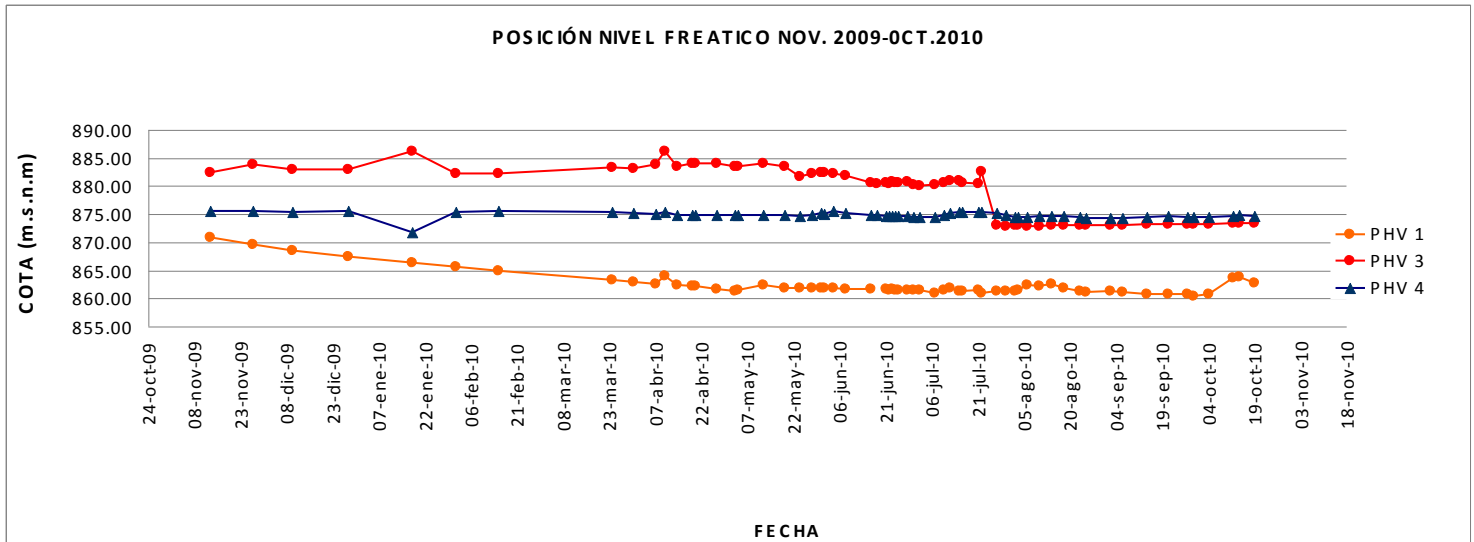


Figura 33. Comportamiento del nivel freático, periodo Nov. 2009- Oct. de 2010. Datos Fuente: G y C, 2010.

Las presiones máximas registradas varían entre **18,42 y 20,57 t/m²** entre el 7 de Abril y el 8 de junio de 2010. En este lapso de tiempo se registraron los máximos valores de precipitación tomados en el presente trabajo como valores pico: 50, 60 y 70 mm/día.

Se destaca que las magnitudes de las presiones de poros medidas se consideran altas, y son un factor contribuyente a la inestabilidad.

14.6 Factores relacionados con la magnitud de las tasas de desplazamiento del terreno

En la siguiente tabla se presentan las fechas en las que se registraron las máximas tasas de deformación del terreno. Tabla 7 y figura 34.

Tabla 7. Análisis de tasas de desplazamiento del terreno 2010.

MOJON	TASA MÁXIMA (cm/día)	FECHA	FACTOR RELACIONADO
MS 12	2,6	Mayo 31	Lluvia precedente el día 27 de mayo de 56 mm/día
2	4,3	Marzo 16	Presiones de poros entre 18,0 y 19,9 t/m ² , periodo enero-marzo.
4	4,8	Marzo 16	Presiones de poros entre 18,0 y 19,9 t/m ² , periodo enero-marzo.
6	4,8	Marzo 5	Presiones de poros entre 18,0 y 19,9 t/m ² , periodo enero-marzo.
5	2,7	Mayo 10	Lluvia precedente el día 5 de mayo de 70 mm/día.
Caissons 3	2,2	Mayo 18	Lluvia precedente el día 5 de mayo de 70 mm/día.
1	4,1	Marzo 16	Presiones de poros entre 18,0 y 19,9 t/m ² , periodo enero-marzo.

Durante el mes de marzo se presentaron las mayores tasas de movimiento del terreno de 4,1 a 4,8 cm/día, la tendencia al incremento de tasas de deformación se debe al incremento de la presión de poros durante los meses de enero y marzo con valores entre 18,00 y 19,95 ton/m² (piezómetro 3), comportamiento un poco independiente de la intensidad de las lluvias en la zona de influencia del cuerpo del deslizamiento.

Se ha establecido que el desplazamiento del terreno tiene dos factores principales:

1. Desplazamientos asociados con el comportamiento de las lluvias.
2. Desplazamientos del terreno asociados con la acción inestabilizante de la presión de poros.

14.7 Evaluación de los umbrales de precipitación (Grafica de Aboshi)

Con el fin de determinar los umbrales de precipitación en los cuales se puede llegar a presentar un deslizamiento por efecto de las lluvias, en el presente trabajo se ha adoptado como referencia el gráfico de Aboshi (1972), el cual ayuda a realizar un pronóstico temprano del riesgo de falla, basados en mediciones de cantidad de lluvia (en 24 horas) medida en el sitio.

En el gráfico se localizaron los puntos correspondientes a lluvias diarias (24 horas) y la lluvia total precedente de los 15 previos al día de la medición en la instrumentación instalada, tomando los valores de precipitación diaria a partir de 30 mm, con el fin de identificar los críticos alcanzados en el periodo de análisis (**Figura 34**).

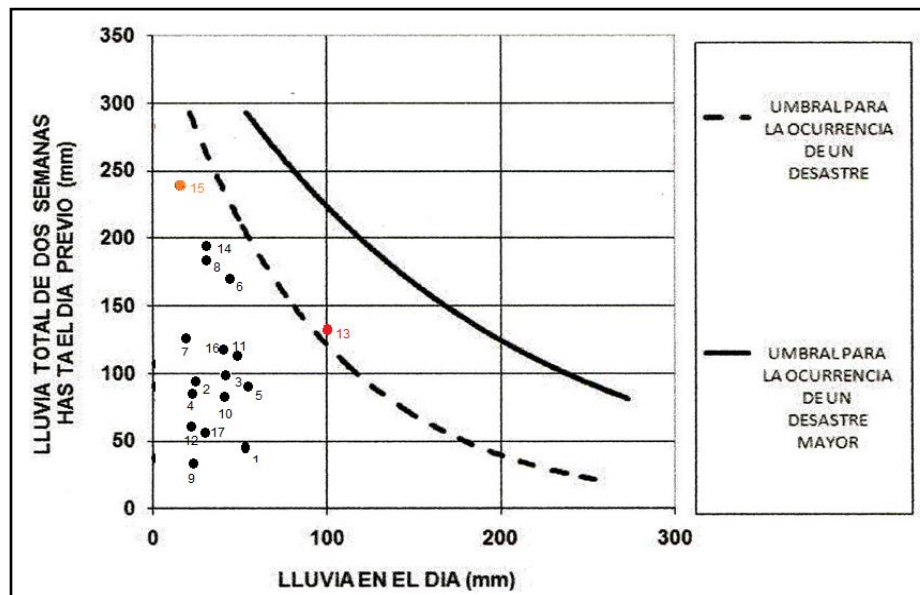


Figura 34. Grafico de Aboshi - Nivel de riesgo alcanzado en el año 2010

Tabla 8. Análisis de lluvias con base en lluvias precedentes, año 2010.

DATO No.	PRECIPITACIÓN DIARIA (mm)	PRECIPITACIÓN PRECEDENTE – (15 DÍAS).	MES
1	60	48	Abril
2	30	98	Abril
3	50	100	Abril
4	31	88	Abril
5	70	97	Mayo
6	56	166	Mayo
7	31	134	Junio
8	40	179	Julio
9	30	43	Julio
10	52	92	Octubre
11	58	116	Octubre
12	34	56	Octubre
13	100	137	Noviembre
14	46	98	Noviembre
15	38	244	Noviembre
16	58	120	Noviembre
17	30	51	Diciembre

Los meses de abril y noviembre presentaron los mayores valores de precipitación y riesgo. Se destaca una precipitación de 100 mm registrada el 5 de noviembre de 2010 y un valor crítico de lluvia acumulada del día 11 de noviembre, especialmente en el mes de noviembre se presentó incremento importante de los movimientos del terreno.

Se destaca que el método de evaluación de riesgo de Aboshi (1972) aplica de manera lógica en el comportamiento observado durante el seguimiento del terreno.

15 INSTRUMENTACION ESPECIAL CON INCLINÓMETROS EN LAS PANTALLAS DE PILOTES-TUNEL FALSO

En los ejes de las pantallas de pilotes se instalaron inclinómetros embebidos, con el fin de determinar el efecto de los movimientos del terreno sobre el comportamiento de las pantallas, la instrumentación se localizó en los ejes 1,2,3,4 de los pilotes que hacen parte del túnel falso. En las siguientes figuras se resume el comportamiento de las deformaciones medidas en el periodo 2010.

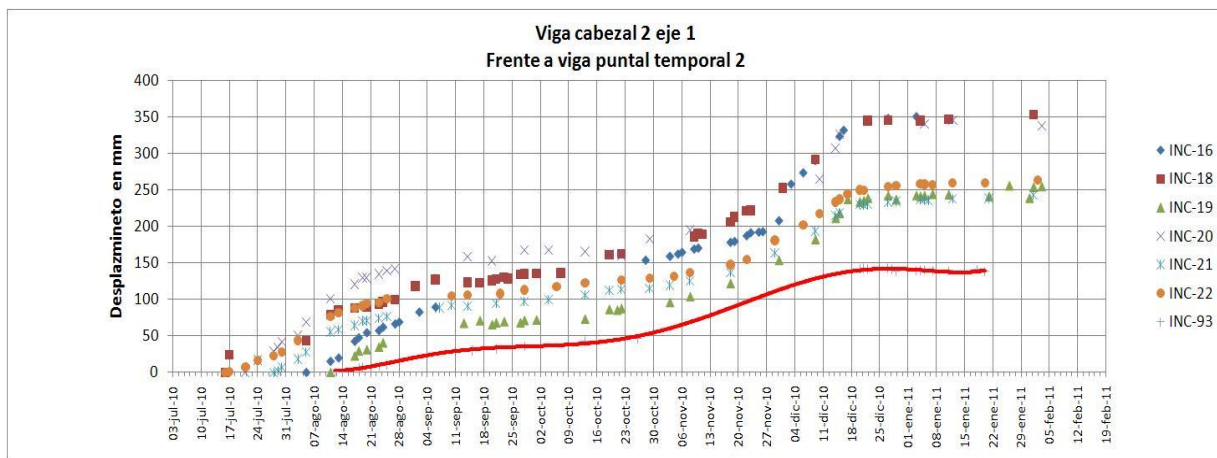


Figura 35. Comportamiento de las desplazamiento de la pantalla eje 1, Datos fuente G y C año 2010

15.2 Comportamiento de la pantalla de pilotes del eje 2 (sin apuntalamiento)

Los desplazamientos máximos registrados en los pilotes del eje 1, indican que se han obtenido valores máximos de 4 cm a 6 cm en la mayoría de los pilotes instrumentados. En el caso especial del pilote No. 127 se registró un incremento en las magnitudes de desplazamiento durante los meses de junio y julio con una estabilización de los movimientos hacia finales de julio. El valor máximo obtenido fue de 14 cm (pilote 127) durante el mes de noviembre.

Se resalta que en el deslizamiento y las pantallas, las tasas de deformación del terreno disminuyeron considerablemente después del establecimiento del drenaje subsuperficial y profundo, el cual se logra a partir del mes de agosto. Igualmente se destaca que el incremento en las tasas de deformación en la segunda quincena de noviembre se debió al inicio de las excavaciones en el área de influencia del túnel falso (inicio de una nueva etapa del proceso constructivo).

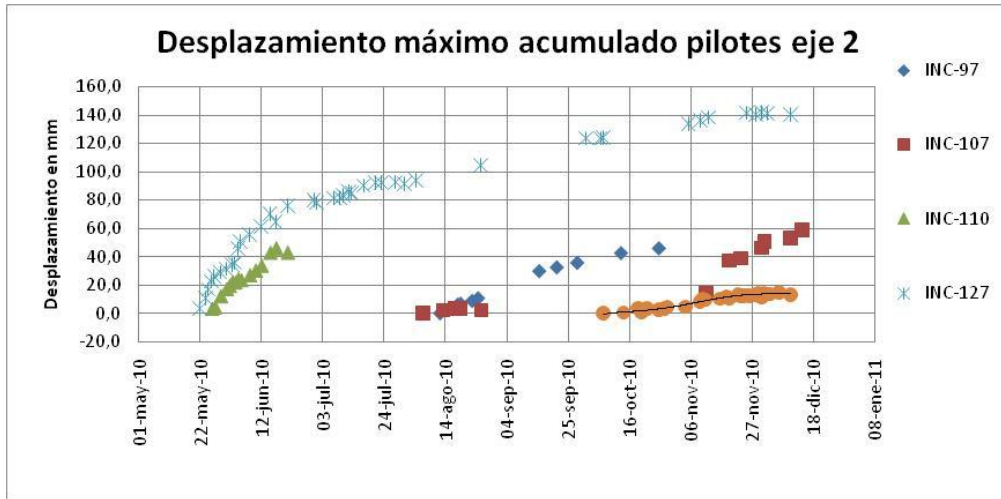


Figura 36. Comportamiento de las desplazamiento de la pantalla eje 2, Datos fuente G y C año 2010

15.3 Comportamiento de la pantalla de pilotes del eje 3 (sin apuntalamiento)

En el caso de la pantalla de pilotes del eje 3 se obtuvieron magnitudes de desplazamiento máximas de 4,5 cm, registrándose un incremento en los meses de mayo, septiembre y noviembre. Durante el mes de noviembre se reactivaron los movimientos debido al inicio de las excavaciones en el falso túnel.

El valor máximo de desplazamiento obtenido en el eje 3 corresponde al 28 % del medido en el eje 2, condición que indica que una parte importante de la deformación es controlada por las pantallas de los ejes 1 y 2.

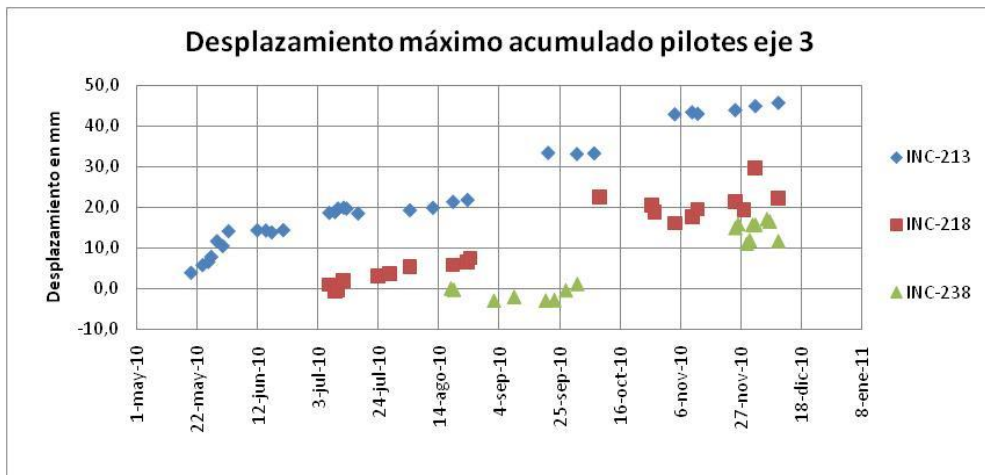


Figura 37. Comportamiento de las desplazamiento de la pantalla eje 3, Datos fuente G y C año 2010

15.4 Comportamiento de la pantalla de pilotes del eje 4 (sin apuntalamiento)

Especial comportamiento geotécnico ha tenido la pantalla localizada en el eje 4; las deformaciones registradas han sido mínimas en la mayoría de los inclinómetros instalados. Se obtuvieron magnitudes menores a 1,0 cm en el periodo de monitoreo de la estructura. En el caso particular del pilote 319, se registraron deformaciones un poco mayores a 1 cm de desplazamiento. Se ha observado que todo el empuje producido por el deslizamiento es controlado en su totalidad por las pantallas 1 a 3.

Las menores deformaciones de esta pantalla de pilotes, se relacionan con su localización en la zona de influencia de una saliente rocosa que ha dado estabilidad en el tiempo.

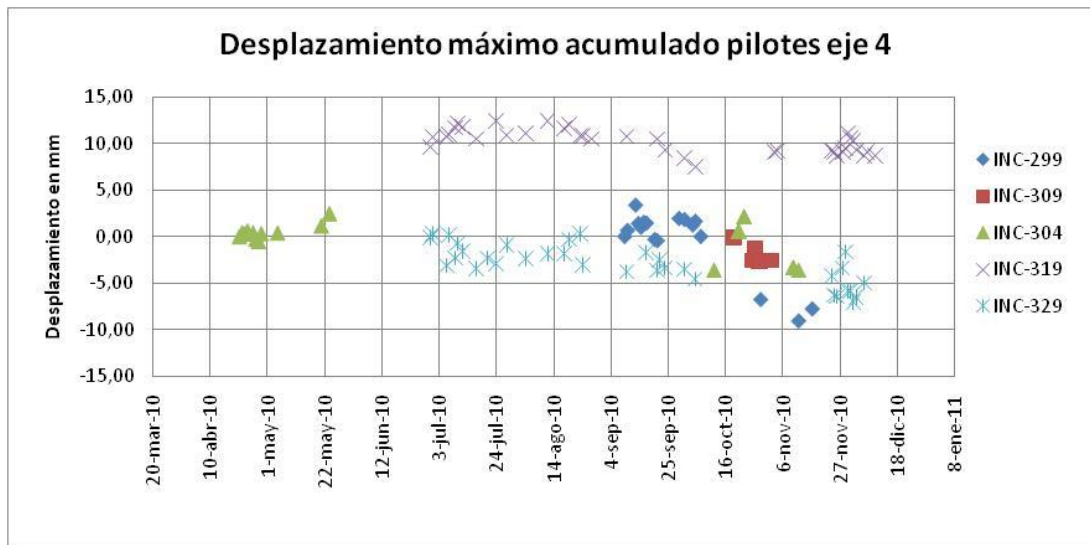


Figura 38. Comportamiento de las desplazamiento de la pantalla eje 4, Datos fuente G y C año 2010