



UNIVERSIDAD DE CANTABRIA  
ESCUELA POLITÉCNICA DE INGENIERÍA  
DE MINAS Y ENERGÍA  
Trabajo Fin de Grado



## **ESTUDIO GEOLÓGICO Y CARACTERIZACIÓN DEL ARGAYO LOCALIZADO EN EL MUNICIPIO DE SARO EN CANTABRIA**

**Geological study and characterization of the landslide located in  
the municipality of Saro in Cantabria**

Para acceder al título de:

**Grado en Ingeniería de los Recursos Mineros**

**Autor: Sergio González López**

**Director: Gema Fernández Maroto**

**Convocatoria: enero 2020**



## Índice de contenido

1. INTRODUCCIÓN .....	7
2. ESTADO DEL ARTE .....	9
2.1. INTRODUCCIÓN.....	9
2.2. TIPOS DE LADERAS .....	9
2.3. TIPOS DE DESLIZAMIENTOS .....	10
2.3.1. Desprendimientos, caídas de rocas.....	10
2.3.2. Vuelcos.....	11
2.3.3. Deslizamientos.....	12
2.3.3.1. Deslizamientos rotacionales .....	12
2.3.3.2. Deslizamientos traslacionales .....	13
2.3.4. Extensiones laterales .....	14
2.3.4.1. Extensiones laterales en rocas .....	14
2.3.4.2. Extensiones laterales en suelos y detritos .....	14
2.3.4.3. Sackung .....	15
2.3.5. Flujos.....	15
2.3.5.1. Flujos de detritos.....	15
2.3.6. Movimientos de masa complejos.....	16
2.3.6.1. Avalanchas de rocas .....	16
2.3.6.2. Flujos deslizantes .....	17
2.3.6.3. Grandes deslizamientos gravitacionales.....	17
2.3.7. Frecuencia de ocurrencia .....	17
2.4. MATERIALES INVOLUCRADOS EN ARGAYOS.....	18
2.5. RELACION AGUA/ARGAYOS .....	18
3. JUSTIFICACIÓN Y OBJETIVOS .....	25
3.1. Justificación.....	25
3.2. Objetivos .....	26
4. ZONA DE ESTUDIO .....	27
4.1. Localización Geográfica .....	27
4.2. Localización Geológica .....	29
4.2.1. Geología de la zona del argayo.....	29
4.2.1.1. Facies Buntsandstein.....	29

4.2.1.2.	Facies Keuper y Ofitas .....	30
4.2.1.3.	Techo Triásico y Jurásico Marino .....	30
4.2.1.4.	Malm y Cretácico Inferior no marinos .....	30
4.2.1.5.	Facies Purbeck.....	30
4.2.1.6.	Facies Weald.....	31
4.2.2.	Tectónica .....	33
4.2.2.1.	Tercio meridional .....	34
4.2.2.2.	Los dos tercios septentrionales.....	34
4.3.	HIDROGEOLOGIA .....	35
4.3.1.	Unidad jurásica al sur del anticlinal de las caldas del Besaya .....	35
4.3.2.	Complejo Calcáreo Urgoaptiense de la zona oriental de Cantabria .....	36
4.4.	Precipitaciones.....	36
4.5.	Descripción y evolución del argayo .....	38
4.5.1.	Descripción .....	38
4.5.2.	Evolución del argayo.....	44
4.5.2.1.	Primer movimiento .....	44
4.5.2.2.	Segundo movimiento .....	45
4.5.2.3.	Tercer movimiento.....	47
4.5.2.4.	Cuarto movimiento .....	48
4.5.2.5.	Quinto movimiento .....	49
4.5.2.6.	Sexto movimiento .....	50
5.	METODOLOGIA DE TRABAJO.....	53
5.1.	INTRODUCCIÓN.....	53
5.2.	TOMA DE MUESTRAS.....	53
5.2.1.	Introducción .....	53
5.2.2.	Ubicación de las muestras .....	53
5.2.3.	Toma de muestras .....	54
5.3.	DESCRIPCION DE LAS MUESTRAS .....	55
5.4.	ENSAYOS .....	60
5.4.1.	Preparación de las muestras .....	60
5.4.2.	Determinación de la humedad.....	60
5.4.3.	Granulometría .....	61





5.4.4.	Capacidad de retención de agua .....	62
5.4.5.	Ensayo de Casagrande, Determinación de los límites líquido y plástico .	63
5.4.6.	Densidad mediante picnómetro.....	65
5.4.7.	Determinación de la porosidad .....	66
5.4.8.	Cálculo del índice de poros.....	67
6.	RESULTADOS .....	69
6.1.	Introducción.....	69
6.2.	Secado en estufa.....	69
6.3.	Granulometría.....	71
6.4.	Capacidad de retención de agua .....	72
6.5.	Determinación del Limite líquido, ensayo de Casagrande y limite plástico....	73
6.6.	Densidad mediante picnómetro .....	78
6.7.	Determinación de la porosidad e índice de poros.....	79
6.8.	Clasificación de los materiales según La carta de plasticidad de Casagrande.	81
7.	DISCUSIÓN Y CONCLUSIONES .....	85
7.1.	Introducción.....	85
7.2.	Estudio del argayo.....	85
7.3.	Caracterización de los materiales intervinientes.....	86
7.4.	Composición de los materiales del argayo .....	89
7.5.	Relación entre las precipitaciones y los movimientos del argayo.....	91
7.6.	Tipo de movimiento.....	93
8.	BIBLIOGRAFIA .....	95



## 1. INTRODUCCIÓN

Los deslizamientos son movimientos de masas producidos en laderas, que pueden llegar a desplazar millones de metros cúbicos de terreno a velocidades que pueden alcanzar los cientos de kilómetros por hora. Estos movimientos suponen un riesgo importante, ya que pueden afectar a las poblaciones cercanas y a las vías de comunicación, entre otras.

La mayor parte de la superficie terrestre se presenta en forma de ladera, aunque con algunas excepciones. Las laderas son la principal fuente de deslizamientos naturales, cuya frecuencia de ocurrencia depende de ciertos parámetros, como el tipo y la cohesión del suelo, la presencia de agua, etc. Pese a que la mayoría de las laderas se consideran estables a corto plazo, la acción de agentes externos como los ciclos de hielo y deshielo, cambios en el clima, efectos de meteorización, etc., combinados con el paso del tiempo, puede llegar a convertir una ladera estable en una inestable, o lo que es lo mismo, susceptible de sufrir deslizamientos.

En el mundo suceden gran cantidad de deslizamientos al año:

*“Los deslizamientos en España producen anualmente unas pérdidas de 180 millones de euros y varias muertes” (Suarez y Regueiro 1977) (1)*

Por lo que es importante un gran conocimiento del suelo, para poder evitar, o en caso de ser inevitable, prevenir los movimientos de grandes masas.

La mayoría de los deslizamientos ocurren en zonas despobladas y sin ninguna afección a la sociedad humana. Sin embargo, hay algunos que son potencialmente peligrosos, tanto en la cantidad de vidas humanas afectadas, como en la cantidad de daños materiales que pueden generar. Por ello conviene centrarse en posibles movimientos que tengan riesgo de afección a seres humanos o a cualquier tipo de infraestructura construida por ellos.

Para evitar este tipo de sucesos es necesario estudiar el tipo de suelo potencialmente inestable y, si así se requiere, tomar medidas de estabilización y mitigación de daños. El estudio se consigue con la realización de ensayos, en origen geológicos para conocer el tipo de suelo a enfrentar y así tener claros los siguientes pasos, que serían de la parte geotécnica. Con todo esto se puede llegar a entender el suelo y el tipo de riesgo que supone para la sociedad, dando la oportunidad de predecirlo y evitarlo. (2)



## 2. ESTADO DEL ARTE

### 2.1. INTRODUCCIÓN

“La mayor parte de la superficie terrestre está formada por laderas” (Young, 1972) (3)

Las laderas se encuentran en constante evolución y cambio, por lo que, con las condiciones adecuadas y el paso del tiempo se pueden llegar a producir deslizamientos.

Estos deslizamientos están condicionados por ciertos parámetros, como son el tipo de material, su consolidación, asiento y la forma de la ladera. Con todo esto se definen los tipos de deslizamientos, que van desde un movimiento de tierra con vuelco, hasta desprendimientos de grandes bloques de roca.

### 2.2. TIPOS DE LADERAS

Para la definición de los distintos tipos de laderas existen varias clasificaciones asociadas a los distintos autores que las sugieren.

La primera definición del tipo de ladera es mediante el “*perfil de la ladera*” Douglas (1977) (4), en este método sugiere realizar un corte perpendicular a la ladera donde se medirán los distintos ángulos y distancias dentro de la ladera, con esto se observan una serie de irregularidades que se asemejarían a una forma cóncava o convexa de manera que suelen coincidir con las litologías de los sustratos y los procesos morfológicos de la ladera. Junto a estos procesos cabe destacar los procesos morfoclimáticos, ya que juegan un papel muy importante.

La segunda clasificación fue propuesta por Dalrymple (1968) (5), en la cual se divide la ladera en nueve unidades, estas unidades se definen en base a la forma de la ladera y los procesos edafogénicos. Estas nueve unidades salen de la combinación de la forma en planta de la ladera y la forma del perfil.

Young (1972) (3) propone una clasificación de laderas en función de la cartografía de estas, donde diferencian: mapas morfológicos, mapas de ángulos de ladera y mapas genéticos geomorfológicos.

Los mapas morfológicos han sido desarrollados por numerosos autores, pero en resumen viene a decir que el relieve puede dividirse en unidades morfológicas de carácter uniforme, limitadas por discontinuidades en la morfología.

Los mapas de ángulos de ladera se dividen en dos subtipos:

- Los primeros se realizan a partir de mapas de curvas de nivel señalando el ángulo de ladera en un punto. Se denominan mapas isoclinales.

- Los segundos se denominan mapas de promedio de ladera y se consiguen mediante la medida y promediado de un ángulo en distancias de un kilómetro a partir de mapas de curvas de nivel.

Los mapas genéticos geomorfológicos son los más populares. Se basan en la forma que se indican mediante su posible origen y tienen en cuenta los procesos actuales y los ya están inactivos, además, de su posible edad.

### 2.3. TIPOS DE DESLIZAMIENTOS

Las clasificaciones de los tipos de deslizamientos han sido muy variadas, la mayoría tuvieron una época de esplendor en la fecha de publicación siendo más tarde abandonadas, tal y como la clasificación de Terzaghi (1943) (6) que propone una clasificación en función de las propiedades físicas de las rocas intervinientes en el deslizamiento. La clasificación actual se basa en gran cantidad de autores debido a que los tipos de deslizamientos son variados en cuanto a su localización, por lo que un solo autor no llegaba a abarcar todos los tipos.

Además, esta clasificación se basa en el tipo de material y movimiento que realiza el material involucrado, no es lo mismo una fluencia lenta sobre un plano de deslizamiento, que un desprendimiento de rocas.

#### 2.3.1. Desprendimientos, caídas de rocas

Se definen como una masa rocosa que se desprende de un talud abrupto mediante una superficie de corte normalmente pequeña Ayala, (1987b) (7). Estas rocas desprendidas pueden descender con más o menos violencia dependiendo del tipo de ladera. En las laderas subverticales se produce caída libre del bloque creando grandes impactos al llegar al suelo. Si el ángulo es ligeramente menor el bloque salta por la ladera. Cuando la ladera tiene una inclinación menor de 45° las rocas descienden rodando a lo largo de la ladera. Los fragmentos de estos desprendimientos suelen romperse a lo largo del descenso creando una lluvia de material.

Estos desprendimientos se pueden clasificar según el tipo de material al que afectan, roca, detritos o suelos, sin embargo, el tipo más común sería el de rocas. Según el tipo de material la superficie de rotura inicial puede ser en cuña, planar, escalonada o vertical.

En cuanto a los motivos por los que se producen estos tipos de deslizamientos, van desde el ciclo de hielo deshielo, hasta los temblores producidos por terremotos, pasando por lluvias intensas y erosión fluvial o marina.

En los deslizamientos se distinguen las diferentes partes que se distinguen en la imagen a continuación.

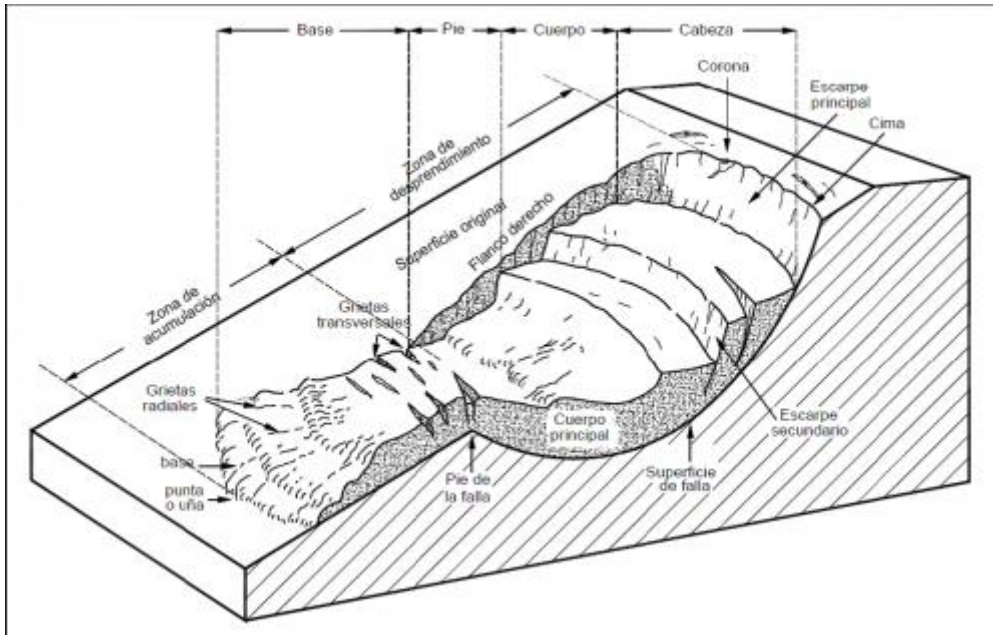


Ilustración 2.1: Croquis de un deslizamiento Tipo

Fuente: <https://estabilidad-de-taludes7.webnode.es/news/marco-teorico/>

Las partes principales de un deslizamiento son las siguientes:

- Cabeza: parte superior del deslizamiento.
- Cima: parte más alta del deslizamiento.
- Corona: material inalterado alrededor de la zona de cabeza.
- Escarpe principal: superficie de rotura inalterada que se inclina desde la corona del deslizamiento.
- Escarpes secundarios: Superficies semiverticales paralelas al escarpe principal.
- Superficie de falla: Superficie que separa el material que se mueve del que permanece inalterado, está justo entre los dos.
- Pie de superficie de falla: línea que separa la superficie de falla del terreno inalterado en la parte hacia la que se dirige el movimiento.
- Base: Por debajo de la superficie de falla, la línea que define el fin de la zona de acumulación.
- Punta: punto más separado de la cima.
- Cuerpo principal del deslizamiento: material desplazado por encima de la superficie de falla.
- Costado: lateral del movimiento.

### 2.3.2. Vuelcos

Se define como una rotación de material hacia la cara libre, esta rotación se realiza en torno a un eje que está situado por debajo del centro de gravedad de toda la masa que se desplaza. Este tipo de deslizamiento puede darse tanto en rocas como en suelos. Las principales condiciones para que se dé un vuelco sería una estructura vertical con planos de discontinuidad en el material que ayuden al vuelco. Un agente muy importante en los vuelcos es la descompresión, ya que así pierde presión y se queda la roca más libre

umentando los planos de discontinuidad. Los vuelcos pueden llegar a movilizar grandes cantidades de material, llegando a varios millones de metros cúbicos Dikau, (1996) (8).

Principalmente se distinguen cuatro tipos de vuelcos:

- Vuelco por flexión, se da comúnmente en rocas como la pizarra o el esquisto.
- Vuelco de bloques, típico en caliza y en rocas volcánicas de forma columnar, se presenta en columnas con diaclasas muy espaciadas
- Vuelco de chevron, se trata de un cambio de buzamiento como causa de una superficie de rotura.
- Vuelco de bloque flexionados, se da en rocas con grandes flexiones afectadas por movimientos a lo largo de numerosas diaclasas.

Las principales causas de los vuelcos son los ciclos de hielo-deshielo, la meteorización salina y la disolución de las calizas. En estos procesos se debilita la roca y se propagan las grietas facilitando los movimientos. Una característica a tener en cuenta es que los vuelcos de rocas se producen en grandes escarpes mientras que los vuelcos de detritos se producen en escarpes más pequeños.

### 2.3.3. Deslizamientos

*“Un deslizamiento es un movimiento de ladera de una masa de suelo o roca que tiene lugar fundamentalmente sobre superficies de rotura o sobre estrechas zonas de intensa deformación por cizallamiento”* (Cruden y Varnes,1996) (9).

Este tipo de movimientos suelen crear unas grietas en la parte de la corona, lo que avisa de que un posible deslizamiento está empezando su movimiento. Estas grietas suelen formar la corona y a partir de ahí se desencadena el deslizamiento. El movimiento de estas masas puede sobrepasar la superficie de rotura llegando a deslizar sobre el terreno original, el cual se convertiría en una superficie de separación.

Estos movimientos dejan tras de sí unas marcas que indican su movimiento, tanto en los escarpes, como en los flancos, por lo que es fácil detectar la dirección del movimiento.

Se distingue una clasificación en función del grado de actividad en el que se encuentra:

1. Activos, con movimiento actual.
2. Durmientes, sin movimiento en meses pero que podría reactivarse.
3. Estabilizados, sin movimiento y sin riesgo de reactivarse.

Dentro de los deslizamientos se distinguen dos grandes tipos de movimientos;

#### 2.3.3.1. Deslizamientos rotacionales

Los deslizamientos rotacionales son movimientos de rotación relativa alrededor de un eje paralelo a las curvas de nivel y que implican un desplazamiento de cizalla a lo largo de una superficie cóncava que es visible Varnes, (1978) (10). La superficie sobre la que se desplazan o superficie de rotura, suele tener forma redondeada o de cuchara.

El movimiento en estos deslizamientos suele comenzar con el hundimiento y giro de bloques en contra de la pendiente del material de cabecera, de forma que en su



movimiento se crean unas grietas que con concéntricas y conchabasen la dirección del movimiento.

Los materiales en los que se producen este tipo de movimientos son muy variados y de características geotécnicas muy variadas. La principal diferencia se halla en la velocidad del deslizamiento. En rocas varía desde centímetros por año hasta metros al mes sin embargo en suelos pueden alcanzar velocidades de hasta 3m/s. En cuanto al tamaño de estos movimientos, existe una gran variedad, desde unos pocos metros hasta movimientos de varias hectáreas.

Las condiciones que favorecen el movimiento pueden ser muy variadas al igual que los materiales que intervienen. Puede provenir de la fracturación de bloques, de amplias potencias de regolitos, ausencia de vegetación, estratificación horizontal, el desgaste producido por los ríos, etc.

Dentro de los deslizamientos rotacionales existen dos tipos de especiales:

- Deslizamientos rotacionales múltiples, donde se desarrollan dos o más deslizamientos rotacionales. Pueden estar originados por un desplazamiento rotacional que a su vez se amplía y genera más movimientos.
- Terracettes, son deslizamientos rotacionales de dimensiones pequeñas, que dejan pequeños escalones del orden del decímetro. Cabe destacar que algunos autores lo atribuyen a la acción del ganado.

#### 2.3.3.2. Deslizamientos traslacionales

Son movimientos que progresan hacia abajo y hacia afuera a lo largo de una superficie, pueden tener una componente rotacional, pero suele ser mínima. La masa en esta clase de movimientos se desplaza por planos creados por el terreno. El deslizamiento se produce por cambios de la resistencia al cizallamiento o por planos de discontinuidad que pueden venir de la estratificación, pizarrosidad, etc.

Debido a la gran variedad en la que se pueden dar este tipo de movimientos, rocas, detritos o suelos, se subdividen en varios tipos:

- **Deslizamientos de bloques:** son movimientos de grandes bloques sobre un plano, que suele ser el de estratificación. Estos movimientos van acompañados por pequeños movimientos rotacionales. El movimiento se realiza mediante impulsos, siendo acelerado por las grandes lluvias las cuales tienen grandes efectos sobre este tipo de movimientos.
- **Deslizamientos rocosos:** son movimientos típicos de ladera y de afloramientos rocosos con planos de discontinuidad aproximadamente igual al de la ladera. Este tipo de movimientos son muy rápidos y pueden llegar a alcanzar enormes volúmenes. Estos movimientos son causados por numerosos factores sin ningún claro predominante.
- **Deslizamientos de suelos y detritos:** son muy frecuentes en suelos muy meteorizados y en regolitos de arcillas. Su principal característica es que son poco profundos en relación con el ancho y la longitud. La principal causa que desencadena este tipo de movimientos son las grandes precipitaciones.
- **Deslizamientos de detritos:** son movimientos de material no consolidado que en su avance se desmenuza. La geometría característica de este tipo de

movimientos es poco profunda y con una relación entre la longitud y la anchura bastante elevada. Las roturas se originan en el contacto roca regolito y suelen movilizarse materiales como coluviones o mantos de alteración. Se suelen provocar por terremotos o por intensas lluvias que disminuyen su resistencia al cizallamiento. Este tipo de deslizamientos pueden provocar avalanchas de detritos.

- **Coladas de barro:** son movimientos que afectan a suelos arcillosos, limosos o arenosos. Se originan normalmente por deslizamientos sobre superficies de cizallamiento. Son movimientos lentos. Se distinguen tres partes, el área fuente que es de donde sale el material, la trayectoria que depende de la pendiente y la longitud de la ladera, y la zona de acumulación donde se deposita el material con un ángulo bajo y una con grietas radiales. Se suelen producir por intensas lluvias o por la rápida fusión de la nieve.

#### 2.3.4. Extensiones laterales

Según Terzaghi y Peck (1948) (11) el termino extensión hace referencia a movimientos súbitos en arenas y limos con agua intersticial. Las superficies de rotura no obedecen a superficies de cizalla. Estos movimientos suelen generarse por la licuefacción de una fracción de suelo.

Sin embargo, Dikay(1996) (12) y Dikau(2004) (13) comentan que estos movimientos son masas de suelo o roca que se desplazan lateralmente sobre una suelo más blando y sin una superficie de cizalla clara.

Principalmente se dividen en tres tipos distintos:

##### 2.3.4.1. Extensiones laterales en rocas

Consiste en movimientos laterales bien de rocas cohesivas o bien de masas rocosas homogéneas, estas al estar sobre materiales dúctiles son propensas a extensiones.

En masas rocosas se crean movimientos de grandes tamaños que pueden llegar a medir arios kilómetros. Su origen está relacionado con los terremotos.

Si el movimiento es en rocas cohesivas, son debidas normalmente a deformaciones por extrusión del material subyacente. Normalmente se producen fosas, fosos, depresiones y flujos de material dúctil ladera abajo. Están producidas por la formación de grietas que crecen con el tiempo y acaban por formar el movimiento de bloques en la dirección de la ladera. La principal causa de estos movimientos es el comportamiento viscoelástico del material sobre el que descansa la capa rocosa.

##### 2.3.4.2. Extensiones laterales en suelos y detritos

Normalmente producidos por el hundimiento de grandes bloques de suelos sobre la capa subyacente. Este tipo de extensiones son muy destructivas.

Dentro de este tipo se consideran las arcillas rápidas, normalmente se encuentran en ambientes marinos que han sido expuestos a los márgenes de hielo durante el cuaternario. El agua disuelve el sodio presente en las arcillas lo que las convierte en



arcillas con poca cohesión y alta movilidad. Si bien este movimiento comienza con una rotación, se considera extensión ya que esta primera parte es muy pequeña, aun siendo la que da origen al movimiento. El movimiento inicia con una rotación en la parte más baja de la ladera y que posee menor Angulo, tras esto y por descalce de las partes superiores se produce un fenómeno de retroceso que puede llegar a ser muy rápido.

#### 2.3.4.3. Sackung

En origen se creó el termino para denominar las manifestaciones superficiales de creep profundos en laderas de substratos de rocas laminadas. En si el Sackung se usa para denominar unos escarpes en la parte superior de las laderas que son contrarios, antitéticos y que están asociados a depresiones lineales con aspecto de fosas. Estas fosas son normalmente fosas efímeras.

Existen varios posibles orígenes para este tipo de fenómenos, sin embargo, el que se considera más aceptado es el que atribuye los escarpes de la parte superior de la ladera a deslizamientos de planos de rotura con un gran buzamiento.

Los posibles desencadenantes pueden ser desde la perdida de carga en valles debido a la lenta retirada de masas heladas denominadas glaciares, a esfuerzos tensionales en la parte superior, a terremotos, desplazamientos cosísmicos de fallas tectónicas profundas o subsidencias formadas por la disolución de evaporitas. De todos estos posibles desencadenantes los más probables son los terremotos.

#### 2.3.5. Flujos

Se trata de un tipo de movimiento que está causado por una fluidificación de la masa por aire o agua. Un flujo sufre una mayor deformación interna que un deslizamiento cualquiera. Este tipo de movimientos comienzan con la creación de un gran número de superficies de cizalla, o bien porque el contenido en agua es tan alto que se comporta como un fluido. Los flujos se subdividen en tres tipos distintos, flujos de detritos compuestos por fragmentos de roca con matriz arenosa, flujo de tierra compuesto por movimiento de limos, arenas y arcillas y flujos de roca que se desarrollan en rocas consolidadas. Entre los dos primeros a priori hay pequeñas diferencias y no hay una clara separación, sino que, se trata de una separación gradual de uno hacia el otro. La diferencia en la clasificación está en la arcilla, si posee más de un 50% de esta se considera un flujo de tierras, si posee menos se considera un flujo de detritos.

##### 2.3.5.1. Flujos de detritos

En esencia se trata de una mezcla de sedimentos gruesos mezclados con una matriz arenosa fina, todo ello con una gran cantidad de agua o aire en su interior. Estos movimientos se localizan en zonas morfoclimáticas. Su principal fuente son depósitos de ladera o alteración. Pueden ser muy destructivos, llegando a desplazarse grandes distancias sin problema.

El agua necesaria para que estos flujos se produzcan puede venir de lluvias tormentosas, deshielos rápidos o bien de lluvias sobre zonas nevadas de manera que se deshiele la nieve y así conseguir una gran abundancia de agua.

Normalmente se desplazan a lo largo de canales, erosionando la zona y pudiendo llegar a llenar el canal. Esta erosión depende de su viscosidad; a más viscosidad, más erosión y viceversa. El paso de estos flujos por zonas de vegetación, esta se ve arrastrada. Además, puede bloquear vías de comunicación y llegar a sepultar campos enteros.

Los depósitos formados por este tipo de movimientos suelen tener algunas características comunes. La parte frontal de estos depósitos tiene forma lobulada, mientras que la parte posterior cuenta con unas ondulaciones como resultado de los sucesivos flujos. Estos depósitos cuentan con una estructura interna en la que los clastos, dispuestos al azar en la masa, se encuentran envueltos en una masa de material de grano fino. También se pueden formar lentejones de material fino como consecuencia de posibles flujos sin material grueso. Estos depósitos normalmente se producen al final de los canales, por lo que se mezclan con depósitos aluviales.

Se proponen dos mecanismos para explicar la forma en la que se originan:

El primero es el más aceptado por la comunidad, se propone que los flujos de detritos se originan siendo un deslizamiento de detritos, que sufre un aporte importante de agua y lo transforma en flujo de detritos. Suelen tener lugar en laderas abruptas con un ángulo de ladera de 27 a 56°.

El otro mecanismo propone que se origina como una corriente de agua que, al encontrar un depósito de material suelto o poco consolidado, se mezcla y produce un flujo. Este efecto es denominado “manguera de agua”.

Estos dos mecanismos necesitan un gran aporte de agua, por lo que hace falta intensas lluvias o bien grandes deshielos.

A parte de las dos opciones mencionadas anteriormente, que ocurren en condiciones normales, un flujo también puede originarse por la acción de un terremoto, sobre todo si el suelo esta previamente saturado de agua.

En zonas de desarrollo urbano los flujos se extienden mucho más lejos y son más destructivos, ya que el suelo en esa zona es más impermeable, lo que evita que pierda agua y siga fluidificado.

Cuando uno de estos flujos se da en un volcán se denomina Lahar, estos movimientos se dan en las laderas volcánicas y son uno de los mayores riesgos de los volcanes, ya que son muy destructivos y pueden movilizar millones de metros cúbicos.

### 2.3.6. Movimientos de masa complejos

Los movimientos de masas de ladera no suelen amoldarse a un solo tipo de movimientos, sino que a lo largo de su vida suelen ir cambiando de un tipo de movimiento a otro, es decir, que suelen comenzar con una rotura que encaja con un tipo de movimiento para después cambiar y desplazarse según otro tipo de movimiento.

#### 2.3.6.1. Avalanchas de rocas

Se define “como un movimiento en masa fluidificado, fundamentalmente por aire, que moviliza rápidamente grandes volúmenes de roca, derivados de la desintegración de

rocas desprendidas, que se movilizan por la influencia de la gravedad.” (Seijmonsbergen, 2005) (14)

Suelen ser grandes volúmenes de roca movilizada, alcanzando velocidades de entorno a los 100 km/h, con algunos bloques que superan los 300 km/h. Pueden recorrer grandes distancias en función de la ladera y subir muchos metros en las laderas opuestas. Para analizar una avalancha primero se debe estudiar la rotura inicial que la provocó, y luego el movimiento. El origen de estos movimientos no está del todo claro, aunque se sugiere que puede ser por las descompresiones causadas por la retirada de los glaciares. Otro motivo sería por las socavaciones que se producen por procesos fluviales y glaciares creando así escarpes que son susceptibles de sufrir desprendimientos.

#### 2.3.6.2. Flujos deslizantes

Se trata de material de ladera poco compactado que colapsa o pierde cohesión y alcanza un estado de fluidificación. El fluido que provoca dicha fluidificación puede ser tanto agua como aire. Se origina como un deslizamiento para después fluidificarse y convertirse en un flujo. Este movimiento característico explica su nombre. Cuando cesa el deslizamiento, el flujo puede seguir moviéndose durante unos días más. Los flujos deslizantes se producen principalmente en suelos con cohesión baja, como por ejemplo en tildes glaciares, vertederos y escombreras de carbón.

#### 2.3.6.3. Grandes deslizamientos gravitacionales

Son movimientos complejos de rocas que se mueven sobre planos de estratificación, argilitas o micaesquistos. Se producen en estructuras sedimentarias que han sido levantadas y plegadas. Los bloques de materiales de grandes dimensiones deslizan sobre los materiales con una fricción baja, en favor de su dirección. Este tipo de movimientos son muy frecuentes en las montañas alpinas europeas. A veces estos movimientos se inician como extensiones laterales para después convertirse en deslizamientos de bloques. Hay autores que sugieren que el clima influye en esta clase de movimientos, pero no está del todo aceptado en la comunidad.

#### 2.3.7. Frecuencia de ocurrencia

Considerando los limitados estudios a los que se tiene acceso, a continuación, se exponen los principales movimientos en cuanto a su frecuencia según (15)

- Flujos con un 68.75%
- Deslizamientos rotacionales con un 11.85%
- Movimientos complejos con un 7.38%
- Deslizamientos traslacionales con un 5.62%
- Arrastres tipo creep con un 2.72%
- Caídas con un 2.63%
- Sackung con un 1.05%

Con estos datos parece que los sackung son movimientos poco relevantes, sin embargo, son los movimientos que más volumen de terreno movilizan llegando a poner en movimiento un 67.63% del total de material movilizado.

#### **2.4. MATERIALES INVOLUCRADOS EN ARGAYOS**

Argayo es una palabra del norte de España que denomina los deslizamientos.

Para este apartado no se cuentan con datos objetivos de toda la localidad cántabra por lo que se aprovechan estudios locales y se extrapolará a toda la región, haciendo una simplificación y aceptando el error que puede derivarse de la extrapolación.

Los argayos en Cantabria se dan sobre todo sobre las facies purbeck-wealden con materiales arenosos y limosos. También, en las zonas en las que existen arcillas del keuper y saprolitas que cubren a las ofitas se dan gran número de deslizamientos. Estas últimas suelen aparecer en zonas afectadas por pliegues diapíricos.

En menor medida también aparecen en dolomías y calizas del jurásico temprano, con algunas alternancias de margas.

Las principales formaciones a las que afectan son laderas, formaciones y depósitos glaciares y terrazas fluviales.

#### **2.5. RELACION AGUA/ARGAYOS**

El agua y los argayos están relacionados de manera íntima en Cantabria, bien porque saturan el suelo y crean un flujo, o bien porque ayudan a la rotura creando presión intersticial.

Para el estudio de la relación del agua con los argayos se realiza un análisis distribución temporal de argayos a lo largo de los años. La toma de datos se basará en el TFM de (16).

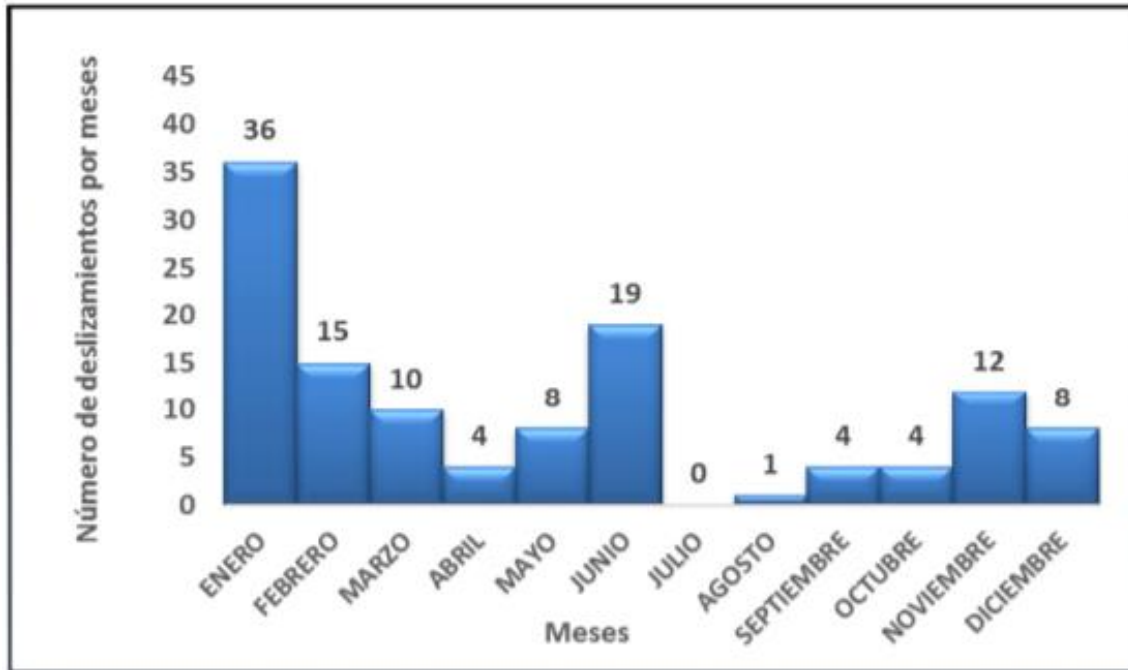


Figura 2.1 Deslizamientos por mes en el rango 2006-2015.

Fuente:

<https://repositorio.unican.es/xmlui/bitstream/handle/10902/7848/Eliezer%20San%20Millan%20Revuelta.pdf?sequence=1&isAllowed=y>

En el gráfico se aprecia que la mayoría de los argayos se reparten en dos meses, enero y junio, siendo el primero el que más sucesos comprende, llegando al 25% de los casos, siendo el dato para el segundo mes 15%.

La tendencia de los argayos es alcista desde octubre hasta enero donde empieza a disminuir al igual que las lluvias. Por otro lado, el pico de junio se debería a las intensas lluvias que se dan a finales de la temporada de primavera.

Los datos de precipitaciones se han obtenido de AEMET. Con estos datos, no parece existir una clara relación entre el aumento de las precipitaciones y la cantidad de argayos, dado que existen años con grandes registros de precipitaciones y sin embargo con baja cantidad de deslizamientos.

Para este estudio se suprimen los deslizamientos en los que no hubo precipitaciones el mismo día del evento, para los demás sucesos, se investigan las precipitaciones de los 5 días anteriores al suceso. Con estas restricciones se da la situación de que los deslizamientos se dan con precipitaciones desde 3.5mm a 200mm con un valor medio de 41.16.

En la siguiente figura se presentan las precipitaciones el día en el que ocurrió el evento, tomando unos valores entre 0.4mm y 137mm, dando un valor medio de 45.55mm.



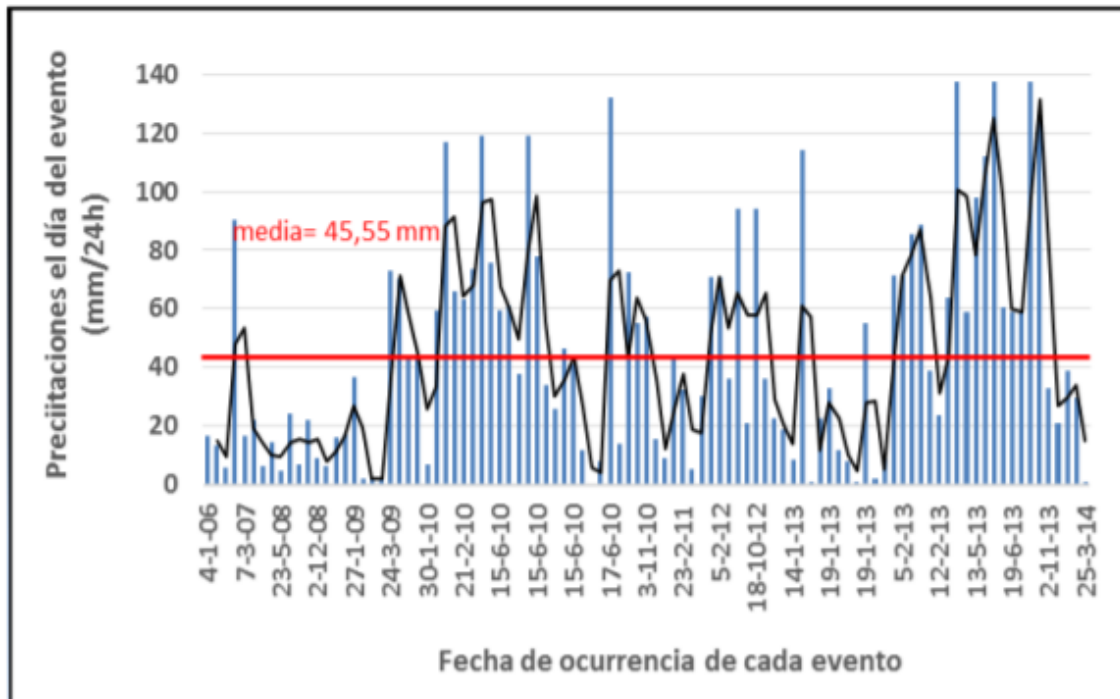


Figura 2.2: Precipitaciones en los días de algunos deslizamientos.

Fuente:

<https://repositorio.unican.es/xmlui/bitstream/handle/10902/7848/Eliezer%20San%20Millan%20Revuelta.pdf?sequence=1&isAllowed=y>

En la siguiente figura muestran los eventos en función de un rango en el que aparecen las precipitaciones el día del evento.

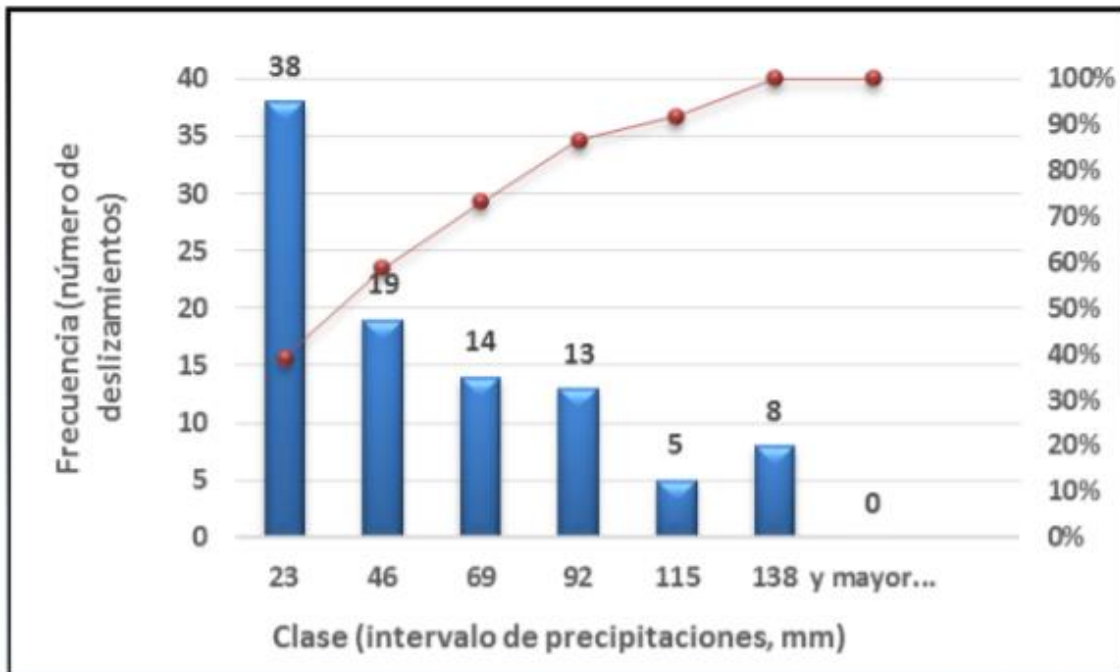


Figura 2.3: Frecuencia de precipitaciones el día de cada evento (azul) y el acumulado (rojo)



Fuente:

<https://repositorio.unican.es/xmlui/bitstream/handle/10902/7848/Eliezer%20San%20Millan%20Revuelta.pdf?sequence=1&isAllowed=y>

En la gráfica se vislumbra que el 39% de los casos se dan en situaciones de baja intensidad, de 0 a 23mm. Un 19% entre 23 y 46mm, seguido de un 2 de 46 a 92mm y un 13% a para precipitaciones superiores. La mediana de sucesos se establece en 36.20mm.

Con respecto a las precipitaciones acumuladas se muestran en otras dos graficas idénticas a las anteriores.

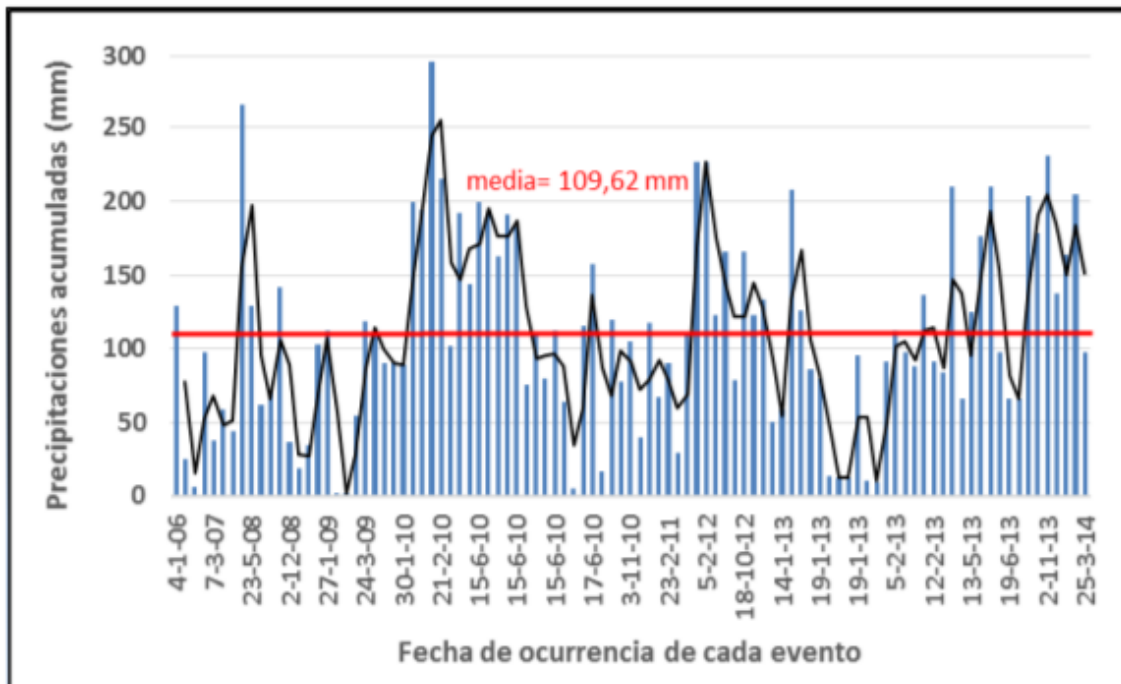


Figura 2.4: Precipitaciones acumuladas para varios deslizamientos.

Fuente:

<https://repositorio.unican.es/xmlui/bitstream/handle/10902/7848/Eliezer%20San%20Millan%20Revuelta.pdf?sequence=1&isAllowed=y>

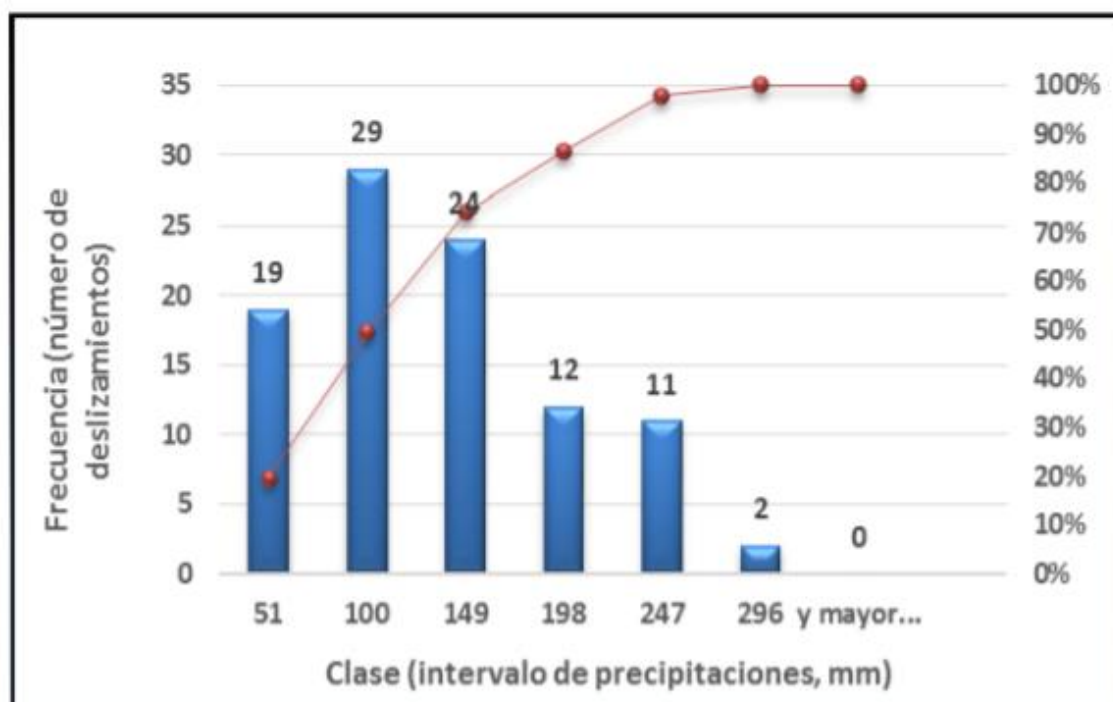


Figura 2.5: Frecuencia de precipitaciones acumuladas (azul) y el acumulado (rojo).

Fuente:

<https://repositorio.unican.es/xmlui/bitstream/handle/10902/7848/Eliezer%20San%20Millan%20Revuelta.pdf?sequence=1&isAllowed=y>

En las figuras se aprecia que el número de sucesos máximo se da para un número de precipitaciones acumuladas de 2.10 a 100mm, se dan el 50% de los eventos. Los eventos con unas precipitaciones acumuladas menos a 51mm son el 19% lo que nos deja un 31% para el rango de 51 a 100mm. A partir de ahí los porcentajes disminuyen hasta un 2% en mayor de 296mm.

La mediana en este caso se sitúa en 102.20mm, lo que significa que los sucesos necesitan gran cantidad de agua acumulada durante los días anteriores para activarse.

En la última figura, se muestra un análisis de las precipitaciones anteriores al día del suceso y que están relacionadas con este. Se observa a que la mayoría de los argayos, el 63.9%, se producen a partir de 5 días de lluvia consecutivos, y el 80% a partir de los 4 días de lluvia. Esta frecuencia de argayos disminuye con los días de lluvia antes del suceso hasta llegar a un 4% con lluvias el día anterior.

Con estos datos se deduce que, en Cantabria, cuantos más días seguidos llueve, más deslizamientos ocurren, por lo que los materiales necesitan bastante tiempo para saturarse incrementando las presiones intersticiales y así favorecer la rotura. Los eventos con 6 días seguidos de precipitaciones tienen una mediana de 40.90mm el día de la rotura y sin embargo en las acumuladas durante los 6 días serían 133.40mm. Para 5 días tiene un valor de 32.50mm para el día del evento y de 91.2mm para el acumulado de los días. Por último, para los que son afectados por 4 días, 40.60mm el día del evento

y 1101.30mm para el acumulado. A partir de ahí las precipitaciones disminuyen con la disminución de los días, al igual que los argayos.

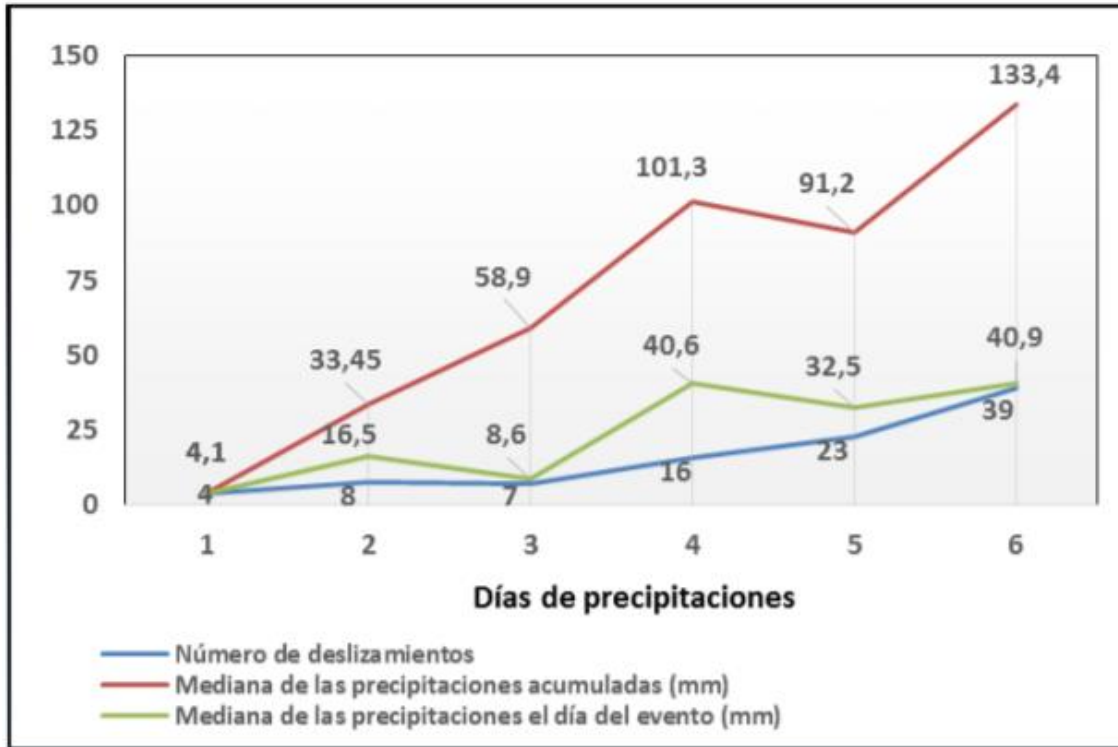


Figura 2.6: Relación entre el acumulado de lluvias, número de deslizamientos y la mediana de las precipitaciones.

Fuente:

<https://repositorio.unican.es/xmlui/bitstream/handle/10902/7848/Eliezer%20San%20Millan%20Revuelta.pdf?sequence=1&isAllowed=y>



### 3. JUSTIFICACIÓN Y OBJETIVOS

#### 3.1. Justificación

Durante el inicio de este último año se han producido periodos de intensas lluvias que han llegado a causar grandes problemas a nivel regional. Desde inundaciones por atascos de alcantarillas, desbordamientos de ríos hasta numerosos argayos que han afectado a numerosas vías de comunicación movilizando grandes volúmenes de suelo y rocas, algunas de estas rocas de más de 2 toneladas.

Este año 2019, en los días entre el 22 y el 27 de enero, se registraron 82 incidencias de argayos en toda Cantabria. Esto se debe a las intensas lluvias a las que estuvo sometida la región en este periodo. En la siguiente imagen se aprecia el porcentaje de precipitaciones respecto a la media de lluvias, valores del mes de enero de 2019.

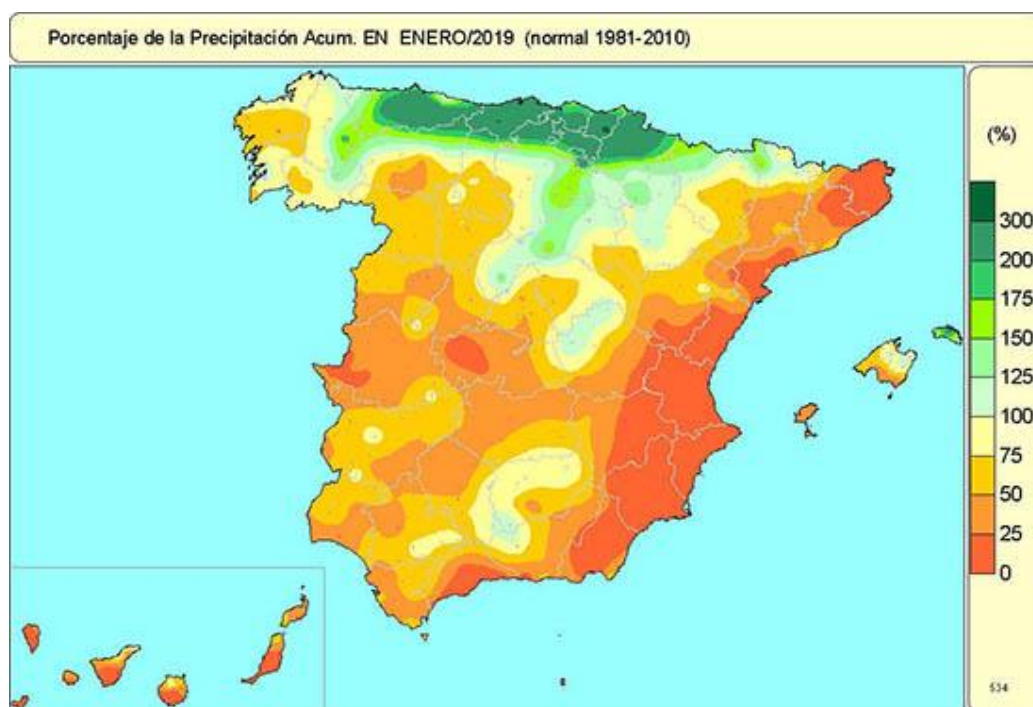


Ilustración 3.1: Relación entre las lluvias en enero de 2019 y la media de 1981-2010.

Fuente: [http://www.aemet.es/es/noticias/2019/02/Avance\\_clima\\_ene2019](http://www.aemet.es/es/noticias/2019/02/Avance_clima_ene2019)

Con esta cantidad de argayos en un periodo tan bajo de tiempo, se propone hacer un estudio de un argayo que este activo y del que se puedan tomar muestras de maneras de manera correcta y accesible.

Este estudio se propone desde un puesto de vista geológico dado que la geología y el estudio del suelo es una de las principales competencias del profesional titulado en Grado en Ingeniería de los Recursos Mineros.

Con esto en mente, y dejando de lado la caracterización geotécnica se propone el estudio y caracterización del terreno de manera que se aumente el conocimiento sobre el tema.

### 3.2. Objetivos

Este TFG tiene como objetivo estudiar, desde un punto de vista geológico, el argayo localizado en el municipio de Saro (Cantabria) y caracterizar los materiales.

Los objetivos detallados son:

1. Estudiar el argayo activo localizado en el municipio de Saro (Cantabria).
2. Caracterizar los materiales involucrados en dicho argayo a través de la realización de ensayos.
3. Conocer la composición de estos materiales.
4. Establecer relaciones entre las precipitaciones y los movimientos acaecidos en el argayo.
5. Seguimiento e interpretación del movimiento.

## 4. ZONA DE ESTUDIO

### 4.1. Localización Geográfica

La zona de estudio se encuentra ubicada en Cantabria (Ilustración 4.1), en el municipio de Saro (ilustración 4.2) a 31.7km de la capital, Santander, con las siguientes coordenadas UTM:

X: 437.651,60

Y: 4.791.650,08



*Ilustración 4.1: Localización de Cantabria dentro de España.*

Fuente: [https://es.wikipedia.org/wiki/Provincia\\_\(Espa%C3%B1a\)](https://es.wikipedia.org/wiki/Provincia_(Espa%C3%B1a)), modificada.



*Ilustración 4.2: Ayuntamiento de Saro en Cantabria.*

Fuente: [https://es.wikipedia.org/wiki/Organizaci%C3%B3n\\_territorial\\_de\\_Cantabria](https://es.wikipedia.org/wiki/Organizaci%C3%B3n_territorial_de_Cantabria), modificada.

El municipio de Saro se ubica en la parte centro oriental de Cantabria. La zona afectada por el argayo se localiza en el barrio de La Estranguada, a 8 km de Saro. Se trata de una zona de ladera próxima a las cumbres, en el límite del término municipal de Saro con el de San Roque de Riomiera. El movimiento se localiza a la orilla de la carretera en el terraplén que corta la montaña. En este punto existe el curso de un pequeño riachuelo. Se trata de una zona con una pendiente elevada prácticamente cubierta por vegetación de monte bajo, destacando helechos y escajos. En las dos imágenes siguientes se observa la localización del movimiento, tanto en el mapa político (Ilustración 4.3) y en la vista satélite de Google maps (Ilustración 4.4).

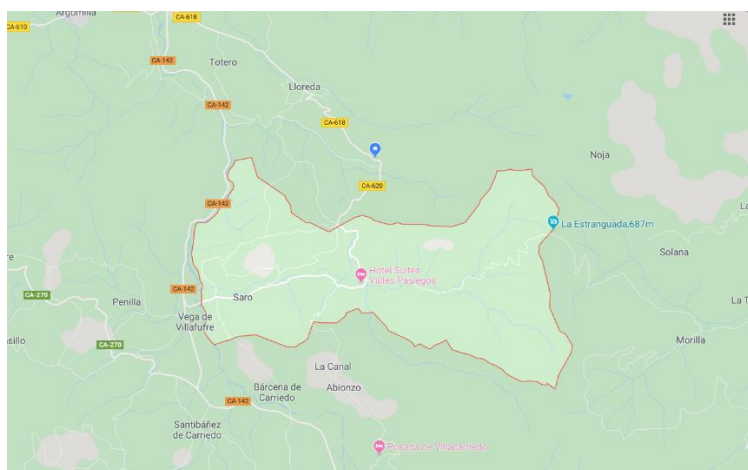


Ilustración 4.3: Municipio de Saro señalado en google Maps.

Fuente: <https://www.google.es/maps/@43.2599476,-3.8410388,16z>

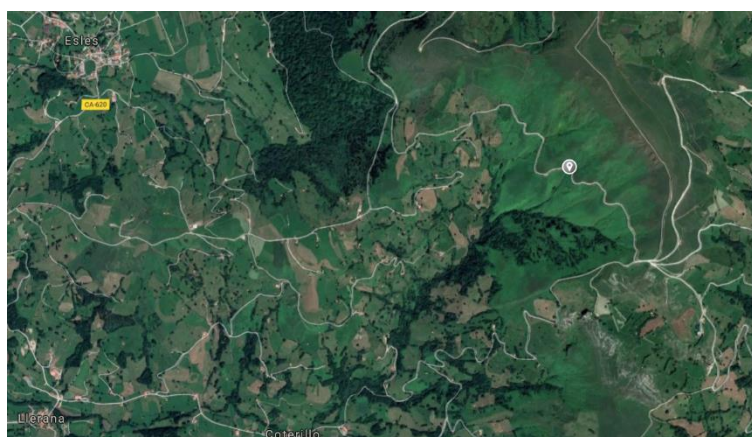


Ilustración 4.4: Localización del argayo en la vista satélite de google maps

Fuente: <https://www.google.es/maps/@43.2744964,-3.7685902,371m/data=!3m1!1e3>





Saro, es un municipio de 17,82 km<sup>2</sup> de extensión, con una altitud de 165 msnm, variando desde una cota mínima de 164m a una máxima de 805m. El municipio es limítrofe con Santa María de Cayón al norte, al Este limita con San Roque de Riomiera, al Oeste con Villafufre y el Sur con Villacarriedo. Saro contaba con una población de 512 habitantes en el año 2018 por lo que su densidad de población era de 28,9 hab/ km<sup>2</sup>. Su arquitectura destacable es principalmente Barroca, destacando desde algún palacio señorial hasta las cabañas pastoriles. Por último, la economía de la población de Saro se distribuye de la siguiente manera; un 45,5 % sector primario, un 31,2 % sector terciario, un 12,9% industria y un 10,4% la construcción. (17)

## 4.2. Localización Geológica

La zona objeto de este estudio, se encuentra localizada en la Hoja Magna nº59 denominada “Villacarriedo”. Esta hoja comprende la región de Cantabria situada en el borde meridional de la misma, dentro de la Cuenca Cantábrica y en la terminación del gran accidente tectónico conocido como “Franja Cabalgante del Escudo de Cabuérniga”.

El relieve destaca por ser fuerte y escarpado, con alturas que oscilan entre los 100 y 1500 m. Los ríos o bien se encajan en profundos valles como los del Miera y el Asón o dan origen a extensas depresiones de relleno.

El área que abarca la citada Hoja presenta afloramientos de Triásico y Jurásico en su tercio oriental. Además, el Cretácico Inferior está ampliamente desarrollado, aflorando desde la facies Purbeck a la Urganiana, con representación importante del Weald. El Cretácico Superior, restringido al cuadrante nororiental de la Hoja, se presenta en facies periarrecifales pertenecientes al Cenomaniense. El Cuaternario se presenta como recubrimientos de gran extensión superficial.

Desde el punto de vista estructural, se diferencia dos zonas:

- El tercio meridional de la hoja: ausencia de accidentes tectónicos importantes, con sedimentos suavemente plegados en su mitad oeste y débilmente inclinados hacia el sur y el este en la parte oriental, donde existe un amplio sinclinal.
- Los dos tercios septentrionales de la zona presentan una tectónica de fracturación de orientación preferente E-O, con estructuras de plegamiento de la misma dirección.

### 4.2.1. Geología de la zona del argayo

En las inmediaciones de la zona del argayo estudiado, los materiales aflorantes más antiguos son de edad Triásica, en la que se diferencian las areniscas de la facies Buntsandstein, las arcillas de la facies Keuper y rocas de origen subvolcánico (ofitas).

#### 4.2.1.1. Facies Buntsandstein

Constituido por un conjunto de areniscas conglomeráticas y conglomerados, seguido de un potente tramo de arenisca rojas a blanquecinas de grano medio a fino, potencias no

superiores a un metro que frecuentemente presentan estratificación cruzada. A techo, intercalaciones de limolitas rojo-violáceas.

#### 4.2.1.2. Facies Keuper y Ofitas

Afloramiento diapírico en los alrededores de Sarón. La facies Keuper está constituida por arcillas abigarradas, plásticas con intercalaciones de yesos. Las ofitas bordean la terminación de la Franja cabalgante del Escudo de Cabuérniga.

#### 4.2.1.3. Techo Triásico y Jurásico Marino

La sedimentación marina del Jurásico se presenta en esta zona con una gran uniformidad de facies y espesores. Frecuentemente, está erosionado faltando el Dogger e incluso parte del Lías Superior. La transición Triásico-Jurásico muestra variaciones de rocas carbonatadas entre desde dolomías a calizas.

Dentro ya del Jurásico, destacan los niveles de calizas arcillosas con intercalaciones de margas.

En los alrededores de Villacarriedo, aflora el Dogger con materiales calizos y margosos en alternancia predominando los primeros.

#### 4.2.1.4. Malm y Cretácico Inferior no marinos

Conjunto de materiales de facies continental en el que se distinguen (Ramírez del Pozo 1969 y Pujalte, 1974) dos facies: Purbeck y Weald.

#### 4.2.1.5. Facies Purbeck

Los materiales del Purbeck se sitúan en discordancia sobre el Jurásico marino. Se caracteriza por su gran variabilidad litológica y por sus importantes cambios de espesor, oscilando entre 80m (zona de Pisueña) hasta los 300m (Abionzo). Constituido por microconglomerados poligénicos con cantos de cuarzo y caliza, calizas microcristalinas y limolitas.

#### 4.2.1.6. Facies Weald

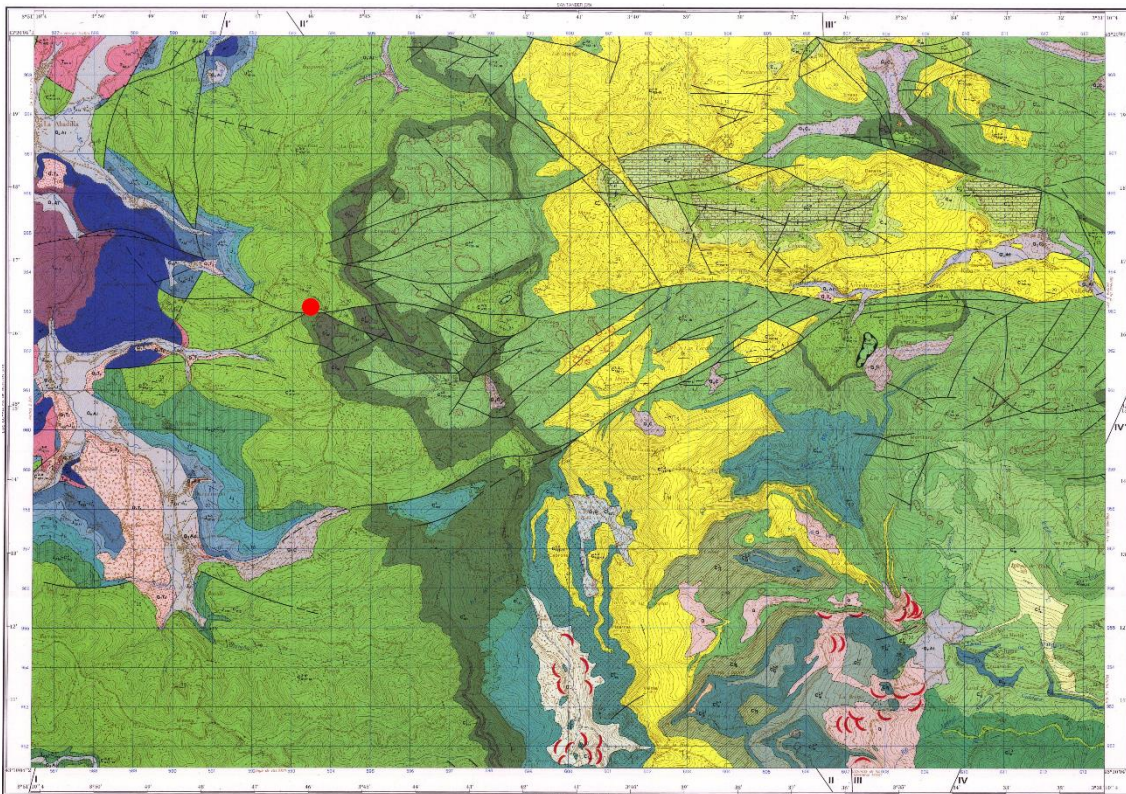


Ilustración 4.5: Localización del argayo dentro de la hoja del mapa geológico de Villacarriedo a escala 50000 IGME

Fuente: <http://info.igme.es/cartografiadigital/geologica/Magna50Hoja.aspx?id=59&language=es>, modificada.

La Facies Weald aflora en la parte oriental de la hoja de Villacarriedo, al igual que los núcleos anticlinales de la zona NE.

Este tramo se halla en paraconformidad con los materiales de la facies purbeck y por lo tanto en disconformidad erosiva con Dogger, el Lias superior e incluso el Keuper.

Está constituida por areniscas y limonitas de origen fluvio-continental, con una potencia que oscila desde los 800m en la zona norte a los 1800m en la zona sur.

En la zona norte se alternan capas de areniscas micáceas de grano medio con tonos blanquecinos y rojizos, con otras capas de limonitas violáceas, creando un conjunto homogéneo en el que es muy difícil separar ambas. A pesar de esto, predominan las areniscas en los tercios inferior y superior de estas formaciones.

En el área meridional de la hoja se diferencian 4 tramos separados por el pujalte:

- 1) El primer tramo son areniscas de grano medio, lenticulares y estratificación cruzada con pequeñas intercalaciones limoníticas. Este tramo tiene un espesor de alrededor de 200 metros.
- 2) El segundo tramo son areniscas y limonitas con carácter más o menos calcareas y calizas arcillosas, con estratificaciones en bancos delgados. Son frecuentes las estratificaciones cruzadas y los ripples simétricos. En este tramo, la potencia tiene un espesor de unos 300 metros. Además, contiene microfauna compuesta principalmente por Ostrácodos.



## Saro en Cantabria

- 3) El tercer tramo está compuesto por areniscas rojo-violáceas y blanquecinas, alternadas con limonitas de los mismos colores. Tiene una potencia de 700 a 800 metros predominando las limonitas.
- 4) El cuarto y último tramo está compuesto por areniscas de grano medio a grueso con más intercalaciones con limonitas. Se trata de arenisca lenticulares con estratificación cruzada. Su potencia oscila los 400 metros.

En estos tramos la continuidad lateral es muy hacia el norte y el sur es muy limitada.

Las facies Weald comprende desde el Valanginiense Superior hasta el Barremiense.



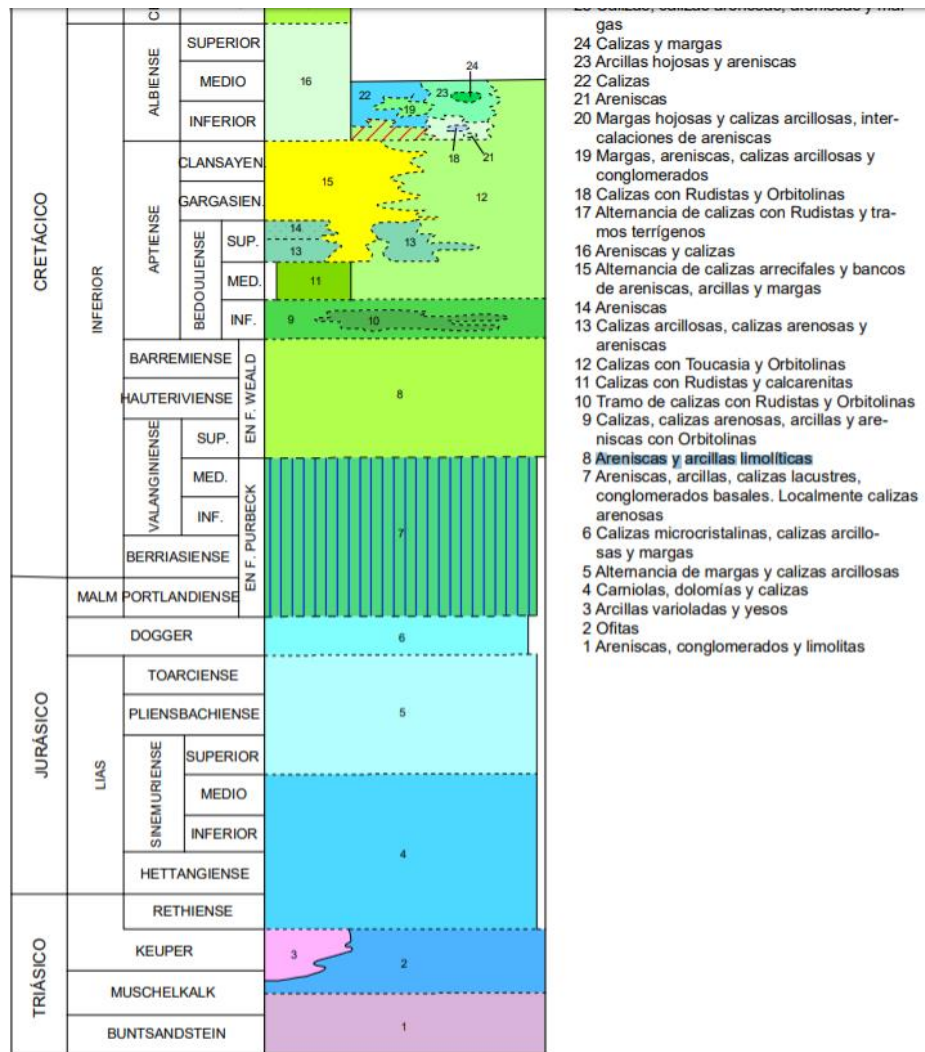


Ilustración 4.6: Columna estratigráfica de la zona de la hoja geológica a escala 50000 de Villacarriedo.

Fuente: <http://info.igme.es/cartografadigital/geologica/Magna50Hoja.aspx?Id=59&language=es>

#### 4.2.2. Tectónica

Desde un punto de vista tectónico, la península se encuentra en el bloque cortical ibérico, el cual está atrapado entre las placas litosféricas africana y Euroasiática. A parte de esto, en la península es frecuente la existencia de microplacas en el límite entre las placas.

En Cantabria, y más en concreto en la zona perteneciente a la Hoja Magna nº 59 1/50000 "Villacarriedo" se encuentra una configuración tectónica que es resultado de la acción de las distintas fases alpinas. La hoja está situada en la terminación oriental de la franja cabalgante del escudo de cabuérniga, este se trata de un anticlinal volcado vergente al sur, fallado y con cabalgamiento.

Las primeras fases orogénicas que aparecen en la hoja y de las que se tiene evidencias son las Neokimméricas, esto se traduce en la aparición de hiatos y/o erosiones sedimentarias. Aparecen discordancias erosivas entre las facies Purbeck y el Jurásico marino y entre las facies Weald y Purbeck. Además, las acumulaciones salinas del Keuper y aparición de hiatos más o menos regionales en las series del cretácico superior.

Desde el punto de vista estructural la hoja de Villacarriedo se divide en 2 zonas:

#### 4.2.2.1. Tercio meridional

Se caracteriza por su baja actividad tectónica con ausencia de fallas y fracturas importantes. Esta a su vez se subdivide en dos subzonas.

- Zona suavemente plegada de la Braguía: los sedimentos de la facies Weald se presentan suavemente plegados con ondulaciones de radio pequeño.
- Zona sinclinal del río Asón: Se desarrolla sobre sedimentos del aptiense y albiense. Se trata de un suave y amplio sinclinal que es difícil de identificar debido a su suavidad.

#### 4.2.2.2. Los dos tercios septentrionales

Esta zona se presenta más compleja a base de fallas y pliegues orientados en dirección E-O. Destacan los siguientes

- Área diapírica de Sarón: Estas áreas funcionaban como cumbres dando origen a zonas de erosión preferente y/o zonas de deposición del Jurásico marino y las facies Pulbeck.
- Terminación de la franja cabalgante del Escudo de Cabuérniga: se trata de una unidad tectónica móvil o inestable desde hace mucho tiempo como demuestran la abundancia de ofitas, la erosión y la falta de depósito de del Jurásico marino y el pulbeck.
- Área anticlinal de Villacarriedo: Zona afectada por el deslizamiento estudiado, se trata de una zona afectada por un anticlinal, con un núcleo diapírico muy fracturado. Los flancos, que son Jurásicos, están localmente replegados y en la zona axial existe un potente recubrimiento cuaternario.
- Anticlinal de Matienzo: constituidos por materiales de la facies Weald y por sedimentos del Aptiense inferior.
- Sinclinal del puerto de Alisas: Contiene un núcleo de materiales del Cenomaniense, con una inclinación de los flancos menor a 20º y atravesado por una red de fallas direccionales.
- Anticlinal de Arredondo: Constituido por sedimentos del Weald. Está roto en las proximidades de su plano axial por una falla inversa. Además, en el flanco norte está afectado por la falla de Arredondo.
- Anticlinal de ancillo: Su característica más peculiar es el alabeamiento del plano axial, que es la causa de la traza sinuosa de su eje.

### 4.3. HIDROGEOLOGIA

Cantabria se divide en tres sistemas acuíferos encontrándose la zona de estudio entre los sistemas del anticlinal de las Caldas del Besaya y el complejo de la zona oriental de Cantabria.



Ilustración 4.7: Situación de los sistemas acuíferos con la zona de estudio marcada.

Fuente: España, Instituto Geológico y minero de. Calidad de las aguas subterráneas en la cuenca norte (Cantabria). Madrid : Ministerio de industria y Energía, Servicio de Publicaciones, 1984. 84-7474-243-9.

- Sistema de Santander Santillana y la zona de san Vicente de la barquera. Constituido por los materiales que van desde el cretácico inferior hasta el oligoceno.
- Sistema de la unidad jurásica al sur del anticlinal de las caldas del Besaya. Constituidos por materiales desde el Lías inferior al Cretácico Inferior, esto forma un sinclinal con sustrato de materiales triásicos.
- Sistema del complejo urgoptiense de la zona oriental de Cantabria. Constituido por materiales de litologías muy diversas. Principalmente por calizas arrecifales, calizas microcristalinas y calcarenitas de edad aptiense-alviense.

#### 4.3.1. Unidad jurásica al sur del anticlinal de las caldas del Besaya

Este situado en la zona suroccidental de Cantabria. Las precipitaciones son frecuentes, aunque hay un mínimo en otoño. La lluvia media varía entre 1.200mm/años en las zonas de valle y 2000 en las zonas de montaña. La evapotranspiración varía entre 600mm/año en valle y 900mm/año en las zonas de montaña.

Según las características hidrogeológicas se distinguen dos franjas:

- Acuífero detrítico Weald-Purbeck; Principalmente compuesto por paquetes de areniscas y arenas con intercalaciones de arcillas. También se presenta conjuntos margosos y calizos. Esto puede ser motivo de pequeños acuíferos con muy poca continuidad lateral, espesor y sin comunicación, a parte, están limitados superior e inferiormente por capas impermeables. Las características de estos sedimentos pueden ser muy variables, siendo así variable la transmisividad, aunque variando entre valores bajos. Estos pequeños acuíferos se alimentan por la infiltración de agua, aunque se drenan por una gran cantidad de arroyos de baja importancia. En temporada de lluvias se incrementan sus caudales.
- Acuífero calcáreo jurásico; Compuesto principalmente por calizas del Lías y el Dogger. En esta zona la transmisividad es variable en función de la fracturación y la karstificación, sin embargo, es muy alto en general. EL llenado se produce por infiltración, percolación y sumideros en los ríos. La descarga se produce mediante surgencias naturales, algunas de ellas muy importantes como el nacimiento del Ebro.

Dentro de los dos subsistemas, la zona de estudio pertenece a la zona oriental de la unidad del puerto del escudo. Este subsistema está limitado al norte por la franja cabalgante del escudo de cabuérniga, al Oeste por materiales impermeables y al Sur y Este va desapareciendo por debajo del sistema acuífero de la zona oriental de Cantabria.

Las reservas estimadas hasta una profundidad de 100m es de unos 46hm<sup>3</sup>.

#### 4.3.2. Complejo Calcáreo Urgoaptiense de la zona oriental de Cantabria

Situado en la zona oriental de Cantabria, tiene unas precipitaciones que varían desde 1000mm/año en las zonas próximas a la costa, hasta 2000mm/año en la zona montañosa. La evapotranspiración está comprendida entre 500mm/año y 900mm/año en la zona costera y montañosa respectivamente.

Dentro de los subsistemas pertenecientes a este sistema, la perteneciente a la zona de estudio es la unidad de Alisas-Ramales. El subsistema más importante con unos recursos estimados de 193hm<sup>3</sup>/año. Las reservas estimadas son de 638hm<sup>3</sup>.

#### 4.4. Precipitaciones

Para la toma de datos de las precipitaciones se han tomado con los datos de AEMET (18), la base tomada como referencia es la de Villacarriedo, por ser más cercana a la zona de estudio.

Una vez que se cuentan con los datos de las precipitaciones y los días en los que se mueve el argayo se procede a cruzar los datos. El primer movimiento se produjo antes del inicio del estudio por lo que no se cuenta con la fecha exacta y por lo tanto no se cuentan con datos de precipitaciones.



Para el estudio de las precipitaciones alrededor de cada movimiento se tomarán como datos relevantes los siguientes:

- Acumulado de precipitaciones de los últimos 5 días.
- Precipitaciones el día del movimiento.
- Días seguidos en los que ha llovido antes del deslizamiento.

Se tienen los datos de 5 movimientos que se exponen a continuación.

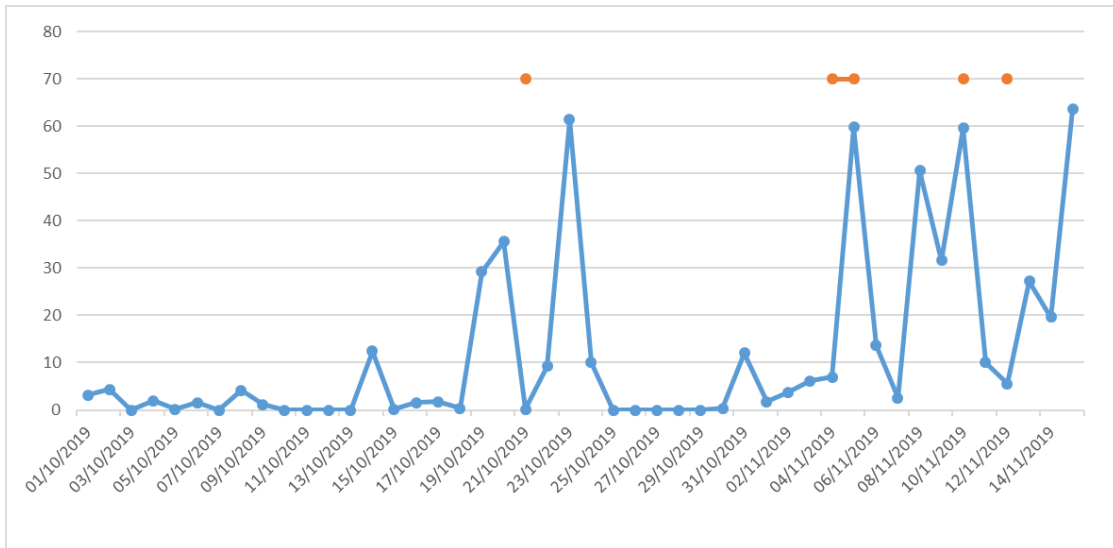


Figura 4.1: Relación de las lluvias (azul) y los movimientos (naranja).

Fuente: Elaboración propia.

A continuación, se detallan los datos más representativos de los movimientos.

Tabla 4.1: Datos de precipitaciones de los distintos movimientos.

Precipitaciones en mm			
Fecha	Acumulado 5 días	Día	Días lloviendo
21/10/2019	67,2	0,2	7
04/11/2019	30,8	7	6
05/11/2019	78,6	59,8	7
10/11/2019	158	59,6	12
12/11/2019	157,4	5,6	14

Fuente: Elaboración propia.

Se aprecia en los datos (Tabla 4.1) que las precipitaciones acumuladas varían entre los 30mm y los 160mm con una media de 98,4mm. Las precipitaciones en el día del movimiento son bastante bajas en 3 de los casos, destacando el 3 y 4 caso en los que las precipitaciones aumentan hasta sobrepasar los 59mm. Por ello se deduce que la variable importante no es el agua que cayó el mismo día sino el acumulado de los días anteriores. Los movimientos se acumulan en un lapso bastante breve, en 22 días dividiéndose en 3 etapas. El primero, es un movimiento que viene solo, sin embargo, los siguiente 4 están divididos en dos grupos de dos movimientos casi seguidos. Por último, se muestra los días de lluvia continua antes del suceso, de lo que se deduce que todos los movimientos

han sucedido a partir del 5º día de lluvia consecutiva, llegando incluso a 14 días en el último caso.

#### 4.5. Descripción y evolución del argayo

##### 4.5.1. Descripción

El argayo (Ilustración 4.17) está situado sobre el talud de una carretera en el cauce de un pequeño río, por lo que la presencia del agua es elevada. Está compuesto por arcillas compactadas y areniscas muy fracturadas.

Existen dos colores de arcilla en el argayo, unas grises con algunos tonos verdes, y otras marrón oscuro (Ilustración 4.8). La arcilla está distribuida por el argayo en forma de terrones, y los escarpes están compuestos principalmente de arcilla con algunas alternancias pequeñas de arenisca (Ilustración 4.9).



*Ilustración 4.8: Colores de la arcilla según composición.*

*Fuente: Elaboración propia.*



*Ilustración 4.9: Imagen del escarpe principal, compuesto de arcilla y alguna alternancia de arenisca.*

*Fuente: Elaboración propia.*

En la parte de la arenisca también existen cambios de color (Ilustración 4.12). La arenisca se encuentra muy fracturada (Ilustración 4.11) y con diaclasas perpendiculares a la estratificación (Ilustración 4.10) por toda la arenisca del argayo. La apertura de las grietas es de dimensiones variables, y normalmente se encuentran sin rellenar.



*Ilustración 4.10: Rastro de falla en la arenisca.*

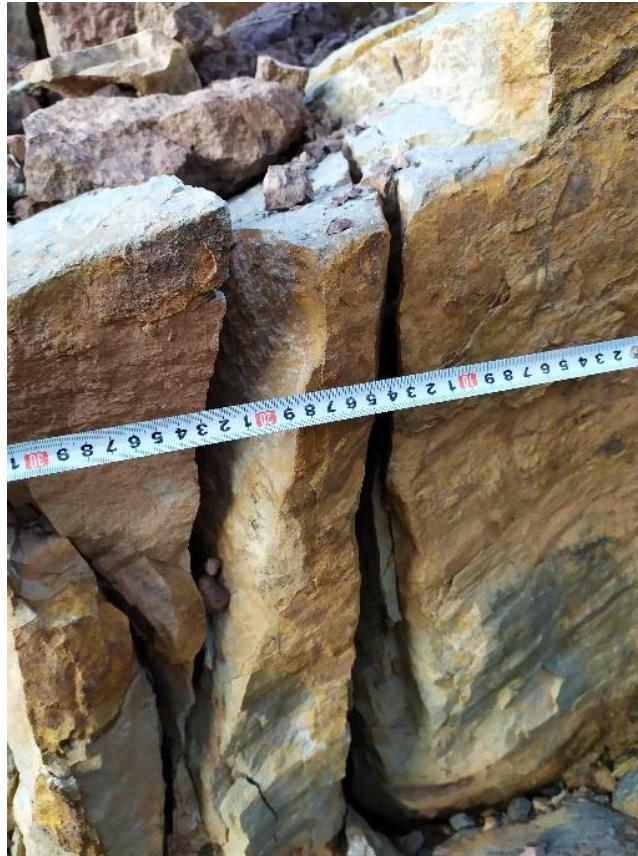
*Fuente: Elaboración propia.*





*Ilustración 4.11: Fisuras en la arenisca.*

*Fuente: Elaboración propia.*



*Ilustración 4.12: Fisuras en la arenisca 2.*

*Fuente: Elaboración propia.*

En cuanto a la forma del argayo, se trata de un argayo en el que se distinguen bien las dos zonas principales, con una última zona no muy bien definida al estar situado en el cauce de un pequeño riachuelo.

Primero la cabeza del deslizamiento (Ilustración 4.13), donde se distingue el escarpe principal y algunos secundarios.





*Ilustración 4.13: Cabeza del argayo.*

*Fuente: Elaboración propia.*

La lengua del deslizamiento (Ilustración 4.14) se distingue bien en la imagen, comienza en uno de los escarpes secundarios y termina en la carretera.



*Ilustración 4.14: lengua del deslizamiento.*

*Fuente: Elaboración propia.*

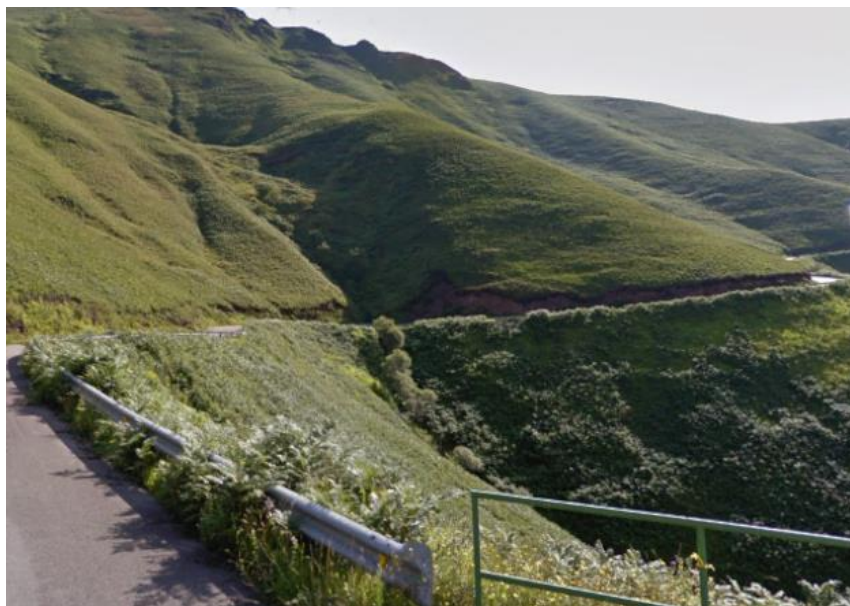
La zona de acumulación (Ilustración 4.15) es la menos visible ya que principalmente el material se acumula en la carretera. Sin embargo, al ser movido para despejar la carretera sigue su curso colina abajo. Esta situación se ve empeorada en los siguientes sucesos porque el movimiento se vuelve más fluido y se ve arrastrado con las aguas del río hasta una zona de sedimentación fluvial.



*Ilustración 4.15: zona de acumulación.*

*Fuente: Elaboración propia.*

En la situación anterior al deslizamiento (Ilustración 4.16) se aprecia el cauce de un pequeño riachuelo, por lo que el agua podría llegar a descalzar el terreno por la erosión fluvial provocando el deslizamiento posterior.



*Ilustración 4.16: Estado del terreno previo al deslizamiento.*

*Fuente: Google Maps.*



#### 4.5.2. Evolución del argayo

EL argayo se moviliza en 6 deslizamientos conocidos que se describen a continuación. Esta descripción será apoyada por ilustraciones que muestran el estado y los materiales que se movilizan en el argayo.

##### 4.5.2.1. Primer movimiento

En el primer movimiento (Ilustración 4.17) se recogieron las muestras. Este es un movimiento caracterizado por el arrastre de arcillas con importantes cantidades de arenisca que rueda por encima. De este surgen hilillos de agua por los laterales (Ilustración 4.18).



*Ilustración 4.17: Primer movimiento.*

*Fuente: Elaboración propia*





*Ilustración 4.18: Detalle del deslizamiento donde se aprecia la humedad.*

*Fuente: Elaboración propia*

#### 4.5.2.2. Segundo movimiento

El segundo movimiento ocurrió el día 21/10/2019 (Ilustración 4.19). Este movimiento es de una naturaleza mucho más fluida que el anterior. Compuesto principalmente de arcillas licuefactadas (Ilustración 4.20) que se deslizan por la lengua del argayo como si fuesen un fluido denso, a su paso arrastra todas las rocas de arenisca que contiene o que encuentra en su camino, algunas de ellas llegando un volumen de  $1\text{m}^3$ . Este movimiento, al ser mucho más fluido no se detuvo en la carretera, sino que siguió bajando por el cauce hasta una distancia indistinguible (Ilustración 4.21). Esto es debido a que se mezclaba la masa del movimiento con el agua del río más abajo y se creaba una mezcla de agua turbia que se observaba varios kilómetros más abajo en el río.



*Ilustración 4.19: Segundo movimiento 21/10/2019.*

*Fuente: Elaboración propia*



*Ilustración 4.20: Movimiento 2 acumulación en la carretera (vista desde ambos lados de la carretera)*

*Fuente: Elaboración propia*





*Ilustración 4.21: Movimiento 2 deslizamiento de los materiales río abajo.*

*Fuente: Elaboración propia*

#### 4.5.2.3. Tercer movimiento

EL tercer movimiento ocurrió el día 04/11/2019. Este movimiento es muy parecido al anterior ya que está compuesto de arcillas licuefactadas que arrastra las rocas de arenisca que encuentra en su camino. Este destapa más el terreno y el agua comienza a circular en mayor cantidad por el cauce afectando claramente a futuros movimientos debido a que continúa descalzando el terreno.



*Ilustración 4.22: Tercer movimiento 04/11/2019.*

*Fuente: Elaboración propia*





*Ilustración 4.23: Movimiento 3 agua circulan por el argayo.*

*Fuente: Elaboración propia*

#### 4.5.2.4. Cuarto movimiento

Este movimiento (Ilustración 4.24) ocurrió el día 05/11/2019. Movimiento de arcillas licuefactadas con una concentración de rocas como los anteriores. En este movimiento cabe destacar la cantidad de lluvia el mismo día y como la arcilla con las rocas ha fluido carretera abajo.



*Ilustración 4.24: Cuarto movimiento 05/10/2019.*

*Fuente: Elaboración propia*



#### 4.5.2.5. Quinto movimiento

Este movimiento ocurrió el día 10/11/2019 (Ilustración 4.25). El movimiento al igual que los anteriores está compuesto por arcillas licuefactadas y rocas de arenisca. En este movimiento se ha arrastrado vegetación y materiales de los laterales. Además, se rompió el borde exterior de la carretera arrastrado por el deslizamiento (Ilustración 4.26).



*Ilustración 4.25: Quinto movimiento 10/11/2019.*

*Fuente: Elaboración propia*



*Ilustración 4.26: Movimiento 5 Rotura de la carretera.*

*Fuente: Elaboración propia*

#### 4.5.2.6. Sexto movimiento

Este movimiento sucedió el día 12/11/2019 (Ilustración 4.27). Es el movimiento final, con un volumen mucho mayor a los anteriores. Se trata de un gran volumen de arcillas licuefactadas y rocas de arenisca (Ilustración 4.28). En este movimiento se amplió mucho el cauce del río por debajo de la carretera sin ver un final claro (Ilustración 4.30), debido a que se mezcla con el río aguas abajo y desaparece enturbiando el propio río. La Lengua del deslizamiento crece hasta sobrepasar la carretera sin ningún problema (Ilustración 4.29). EL movimiento es de tal magnitud que varios tramos del quitamiedos, presente en la imagen del movimiento 5 (Ilustración 4.25), fueron arrastrados en el movimiento hasta el pueblo existente más abajo, a 2 kilómetros de distancia.



*Ilustración 4.27: Sexto movimiento 12/11/2019.*

*Fuente: Elaboración propia*





*Ilustración 4.28: Movimiento 6 materiales del movimiento.*

*Fuente: Elaboración propia*



*Ilustración 4.29: Movimiento 6 parte justo debajo del deslizamiento.*

*Fuente: Elaboración propia*



*Ilustración 4.30: movimiento 6 rastro del deslizamiento cauce abajo.*

*Fuente: Elaboración propia*



## 5. METODOLOGIA DE TRABAJO

### 5.1. INTRODUCCIÓN

En todo proyecto de ingeniería se han de seguir unos pasos claramente definidos de tal manera que se consiga definir el objeto a estudiar de la manera más fiel a la realidad posible. Los estudios comienzan con la toma de muestras en campo. Esta toma de muestras ha de ser lo más representativa, para ello se han de tomar las muestras de la manera más imparcial posible para así no intervenir en la toma de muestras sesgando las muestras. Con la toma de muestras, junto con todos los ensayos, se realiza una caracterización del objeto de estudio de la manera más detallada posible.

### 5.2. TOMA DE MUESTRAS

#### 5.2.1. Introducción

Para la toma de muestras se ha optado por escoger un número de muestras mínimo que abarque las zonas principales del movimiento. Para la localización se utilizó una imagen tomada previamente y la vista de satélite de Google Maps.

#### 5.2.2. Ubicación de las muestras

Las muestras se toman de unas localizaciones tomadas en vista satélite de cada zona del movimiento, uno en la corona, otro en la cabeza, otro en la lengua y otra en la zona de acumulación. Las muestras numeradas serian 1, 2, 3 y 4.



Ilustración 5.1: Vista aérea de la zona, marcado en blanco las zonas donde se cogerán las muestras.

Fuente: <https://www.google.es/maps/preview>, con modificación propia.



*Ilustración 5.2: Vista en alzado de la zona de estudio y la zona donde se recogerán las muestras.*

*Fuente: elaboración propia.*

### 5.2.3. Toma de muestras

Una vez definida la localización, se procede a la toma de muestras.

Estas se cogen en las zonas escogidas previamente en campo sin poder evitar a veces desplazarse un poco debido a rocas de gran tamaño. Para la toma de muestras, se obtienen dos muestras de cada una (A y B) de tal manera que la muestra A es la más superficial y la muestra B la más profunda. Esta medida se toma debido a que la humedad del suelo no es la misma en profundidad que en superficie. Además, en algunas muestras cambiaba un poco la composición del suelo.

La toma se realiza con una pala y un martillo de geólogo para cavar un poco en las zonas más compactas. Se crea un pequeño agujero del que se va tomando como muestra el suelo que se saca del propio agujero impidiendo la contaminación del material por posibles caídas de material de las zonas adyacentes.

### 5.3. DESCRIPCION DE LAS MUESTRAS

La muestra numero 1 (Ilustración 5.3) está situada en la corona del deslizamiento. Es de composición principalmente arcillosa, pero con gran presencia de rocas. La muestra presenta un tono marrón oscuro y está bastante compacto. En cuanto a la presencia de humedad, el terreno está húmedo, tanto en profundidad como en superficie. Las rocas en esta parte del argayo son pocas y están distribuidas de manera aleatoria a lo largo de la zona donde se tomó la muestra. Existe una capa de arcilla superficial sobre una capa de roca arenisca de color amarillo que se haya muy fracturada. Las rocas que se encuentran enterradas tienen forma lenticular en la que una medida espacial es muy inferior a las otras dos.



*Ilustración 5.3: Toma de la muestra 1*

*Fuente: elaboración propia*

La muestra número 2 (Ilustración 5.4) está situada en el escarpe secundario. Su composición es una matriz arcillosa con presencia de gran número de rocas de arenisca distribuidas por la matriz. El color principal es marrón oscuro, pero también cuenta con otros colores como verdes, amarillos y ligeros tonos de morado. Estos colores son debidos a la presencia de dos tipos de arcilla distintos. El suelo es compacto y húmedo en su totalidad, esta humedad crece a medida que se profundiza en la toma de la muestra. La presencia de rocas de arenisca está caracterizada por grandes trozos de forma plana (donde una de las medidas espaciales es muy inferior a las otras dos) y pequeños trozos de forma más regular.





*Ilustración 5.4: Zona de toma de la muestra 2.*

*Fuente: elaboración propia*

La muestra número 3 (Ilustración 5.5, Ilustración 5.6) está situada en la lengua del deslizamiento. Se trata de una zona que se caracteriza por ser una mezcla de distintos materiales. Cuenta con una gran variedad de colores, desde el marrón oscuro y el gris verdoso de la arcilla hasta los distintos amarillos de las areniscas presentes. El suelo en este punto cuenta con una compacidad muy baja, es decir que se trata de material suelto. El suelo está completamente húmedo. En superficie la humedad es normal, mientras que a medida que se profundiza cada vez existe más humedad hasta llegar a un punto en el que el hueco que se crea al extraer la muestra se llena con un pequeño hilillo de agua. Cerca de esta zona, un poco más abajo en el deslizamiento se encuentran unas surgencias de agua que son constantes. En cuanto a la composición, predomina la arenisca de varios tamaños sobre la arcilla, sin embargo, a medida que se profundiza va aumentando la cantidad de arcilla presente en el suelo. La arcilla se encuentra en forma de matriz arcillosa y en forma de pequeños terrones de arcilla compacta.



*Ilustración 5.5: Zona de toma de la muestra 3.*

*Fuente: elaboración propia*





*Ilustración 5.6: Toma de la muestra 3, detalle de la humedad.*

*Fuente: elaboración propia*

La muestra número 4 (Ilustración 5.7) está situada en la zona de acumulación. La muestra es arcillosa con algunas rocas enterradas de distintos tamaños. La muestra es de color marrón oscuro y esta compactada. La muestra está húmeda sin presencia de agua. Esta zona está cubierta por una pequeña capa de vegetación por encima y una distribución de rocas en el interior aleatoria.

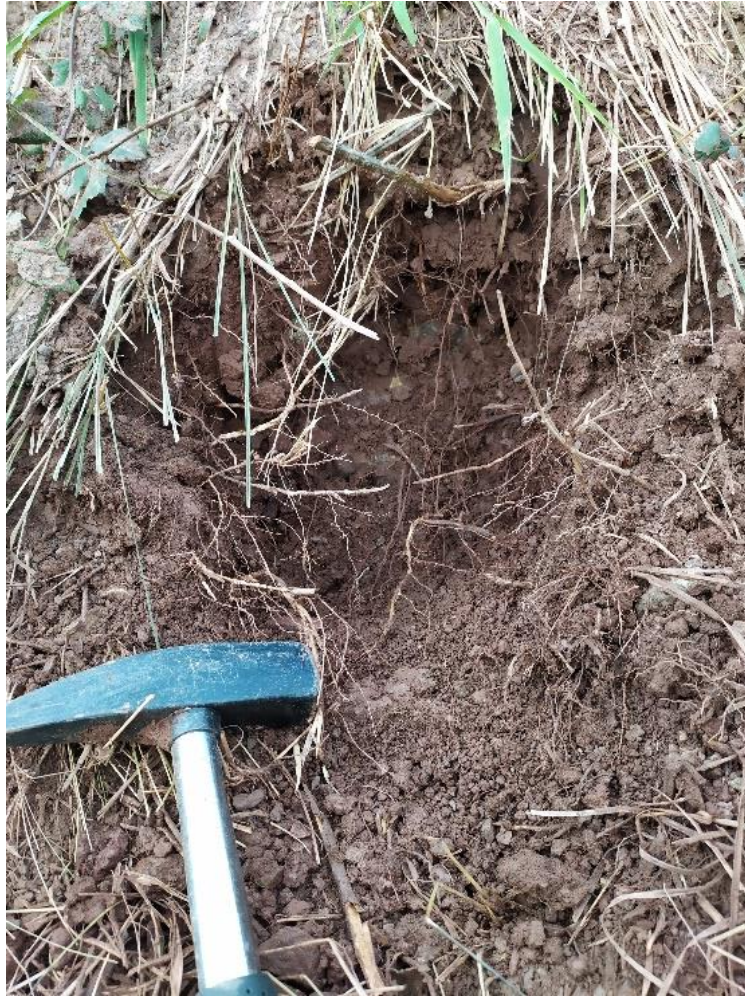


Ilustración 5.7: Toma de la muestra 4.

Fuente: elaboración propia

La descripción de las muestras in-situ se resume en la siguiente tabla (Tabla 5.1) tabla rellenada durante la toma de muestras.

Tabla 5.1: Descripción de las muestras in situ.

Descripción	Textura	Peso(g)	Localización	Humedad	Color	Compacidad	Descripción
1	Arcillosa	5810	Corona	humedad superficial	Marron oscuro	Compacto	predomina la arcilla sobre rocas. Rocas en superficie y enterradas con distribución aleatoria. Capa arcillosa sobre capa de roca muy fracturada. Capa de arcilla sobre rocas con forma lenticular de forma muy fracturadas.
2	Mezcla Arenisca y arcilla	10820	Escarpe secundario	Humedo	Desde verde hasta el marron pasando por el amarillo y ligeros toques morado	compacto	Muestra claramente arcillosa con gran humedad en profundidad, Ademas cuenta con presencia de rocas de forma lenticular de unos 15cm por 10cm. Dos tipos de arcilla.
3	Todo uno	10000	Lengua del deslizamiento.	Muy humed, al extraer muestras se llena el hueco de agua. Hilos de agua a los lados.	Marron y amarillo pasando por verde.	Suelto	Clara presencia de rocas en superficie, a mas profundidad, mas presencia arcillosa. Presencia de rocas de gran variedad de tamaños. Arcilla en forma de terrones con gran presencia de agua.
4	Arcilla	9100	Zona de acumulación	Humedad sin presencia de agua	Marron	Ligeramente compacto	Suelo con vegetacion y clara dominación arcillosa, al recoger la muestra se aprecian rocas con distribución aleatoria.

Fuente: elaboración propia.

## 5.4. ENSAYOS

### 5.4.1. Preparación de las muestras

Una vez transportadas las muestras al laboratorio en un envase apropiado, se depositan en unas bandejas que previamente han sido limpiadas, secadas y numeradas para alojar las muestras. Estas bandejas son de plástico y de gran tamaño por lo que se puede introducir una muestra completa de tal manera que ocupe toda la superficie de la bandeja.

En el caso de algunas muestras se presentaban agregados de arcilla compacta por lo que con cuidado de no romper roca o salpicar material fuera de la bandeja, se rompen para dejar cada material en su tamaño.

A parte de esta bandeja con muestra se preparan una muestra de menor tamaño, mediante la técnica del cuarteo, para hallar la humedad y por si se necesita para realizar otros ensayos.

### 5.4.2. Determinación de la humedad

La humedad de un suelo es la relación entre la cantidad de agua que tiene este y la masa de suelo seco en tanto por ciento. Para el cálculo de la cantidad de agua se seca el suelo en una estufa hasta masa constante.

La realización del ensayo viene regida por la norma (UNE 103-300/93), para la cual se necesita:

- Balanza de precisión 0.01g
- Estufa de desecación
- Recipientes de porcelana para estufa

Se toma la porción de muestra representativa y se introduce en un recipiente de porcelana resistente al calor, pesándola para así conocer el peso húmedo de la muestra. A continuación, se introduce la muestra en la estufa y se deja secando hasta masa constante. Una vez llega a este punto de masa constante se pesa de nuevo para hallar el peso seco de la muestra. Con estos dos pesos y el de propio recipiente se calcula la humedad.

$$W(\%) = \frac{(PT - PR) - (PS - PR)}{(PS - PR)} * 100$$



Donde:

- W: Humedad del suelo en estado natural en tanto por ciento.
- PT: peso total de la muestra.
- PS: Peso total de la muestra seca.
- PR: Peso del recipiente.

### 5.4.3. Granulometría

Todos los suelos están formados por partículas de distintos tamaños, por lo que con las condiciones e instrumentación apropiadas se puede separar el suelo según los distintos tamaños.

El ensayo se rige según la norma UNE-EN 933-1 y la norma UNE 103-101/95.

Para la realización del ensayo se necesita la muestra seca, por lo que este ensayo es posterior a un proceso de secado.

Una vez que se cuenta con la muestra seca, se coge una parte y se introduce en la columna de tamices de tal manera que se hecha la mayor cantidad posible sin llenarlo para no falsear la muestra.

Para la columna de tamices se escogen tamices normalizados ASTM, escogiendo los que tengan un tamaño de luz de malla cada uno la mitad que el anterior (Ilustración 5.8).

Todo esto se introduce en la tamizadora, de tal manera que los tamices de luz de maya más grande estén encima y al fondo se encuentre un recipiente para captar lo que pase.

Se activa el tamizador y se deja durante 2 minutos para un correcto tamizado.



Ilustración 5.8: Tamizadora y columna de tamices.

Fuente: <http://www.utest.com.tr/es/26148/Tamizadora-Electromagn-tico>

Tras esto se pesa la cantidad de la muestra retenida en cada una de las mallas, pesando el acumulado.

Tras esto se insertan los datos en una tabla logarítmica para su representación y se clasifica el suelo calculando el D60 diámetro equivalente por el que pasan el 60% de la muestra en peso, el D30 diámetro equivalente por el que pasa el 30% de la muestra en peso y el D10 que es el diámetro equivalente que es por el que pasa el 10% del peso.

Luego con estos datos se define el coeficiente de uniformidad CU y el coeficiente de curvatura CC.

Por último, se calcula la cantidad de arena, arcilla y limos para definir así el tipo de suelo.

#### 5.4.4. Capacidad de retención de agua

EL suelo es un sistema en el que se agrupan los granos de una manera no perfecta por lo que quedan huecos que son rellenados por agua o aire.

La medida del volumen de huecos que tiene un suelo es la porosidad. En la porosidad de un suelo el agua puede quedar atrapada, de tal manera que la vegetación se aprovecha de esta agua atrapada y absorbe los nutrientes. La cantidad de agua que puede almacenar un suelo depende del tamaño y la interconexión de ellos. Esta interconexión se denomina permeabilidad, esta mide la velocidad a la que un fluido atraviesa un suelo.

Para este ensayo se necesita el siguiente material:

- Recipientes
- Embudos
- Papel de filtro
- Agua
- Jarra
- Probeta

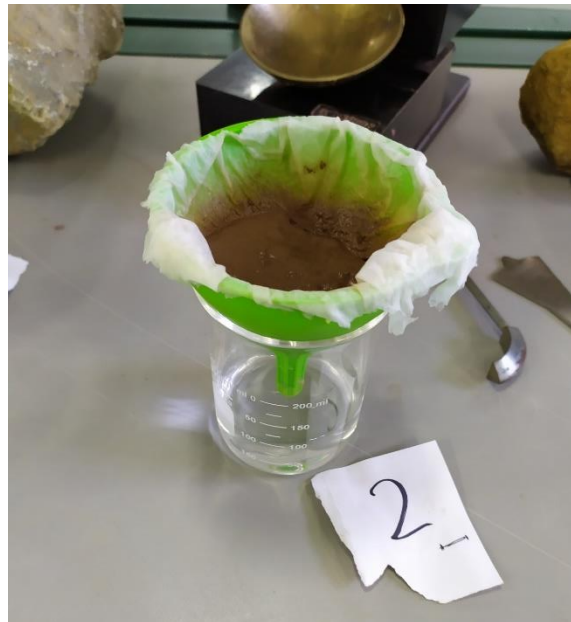
Una vez que tienes la muestra de suelo seco se procede a la realización del ensayo.

En primer lugar, se coloca el papel de filtro en el embudo.

Después se coloca la muestra de suelo que se va a utilizar sobre el papel en el embudo. Las muestras de suelo que se toman deben de ser lo más aproximadas posibles.

Luego se colocan en los recipientes de manera que el agua que se cuele caiga sobre el recipiente.

Luego se agregan 200ml de agua y se deja escurrir un día, se decide el proceso 3 veces y se mide el agua que hay en el recipiente, restando lo que queda de los 200ml. Durante la espera se tapan las muestras para evitar perder humedad.



*Ilustración 5.9: Ensayo de retención de agua, muestra número 2.*

*Fuente: Propia.*

#### 5.4.5. Ensayo de Casagrande, Determinación de los límites líquido y plástico

Este ensayo consiste en calcular el límite líquido mediante el uso de la cuchara de Casagrande. Este ensayo está normalizado según UNE 103-103/94. Este ensayo consiste en la colocación de una parte de muestra en la cuchara de manera que quede una profundidad de unos 10mm. La parte de la muestra se obtiene de una muestra, que previamente tamizada en el tamiz de 400 micras, se obtienen más de 150g y se amasan con agua hasta que este aparentemente en el límite líquido.

Tras esto se inicia el ensayo, que se divide en dos con un acanalador normalizado, después se inicia el movimiento que consiste en dejar caer la cuchara desde 10mm de altura, con una cadencia de 0.5golpes por segundo. La cuchara se deja caer sobre una base normalizada. El ensayo continuo hasta que se junte durante una distancia de 13mm después de dar 25 golpes.

Como es muy difícil acertar la humedad necesaria a la primera se permite conseguir dos muestras, una en el rango de 15 a 25 y otro en el rango de 25-35 y luego mediante la cantidad de golpes y la humedad, obtenida mediante secado se puede conseguir la humedad para 25 golpes, determinando así el límite líquido.

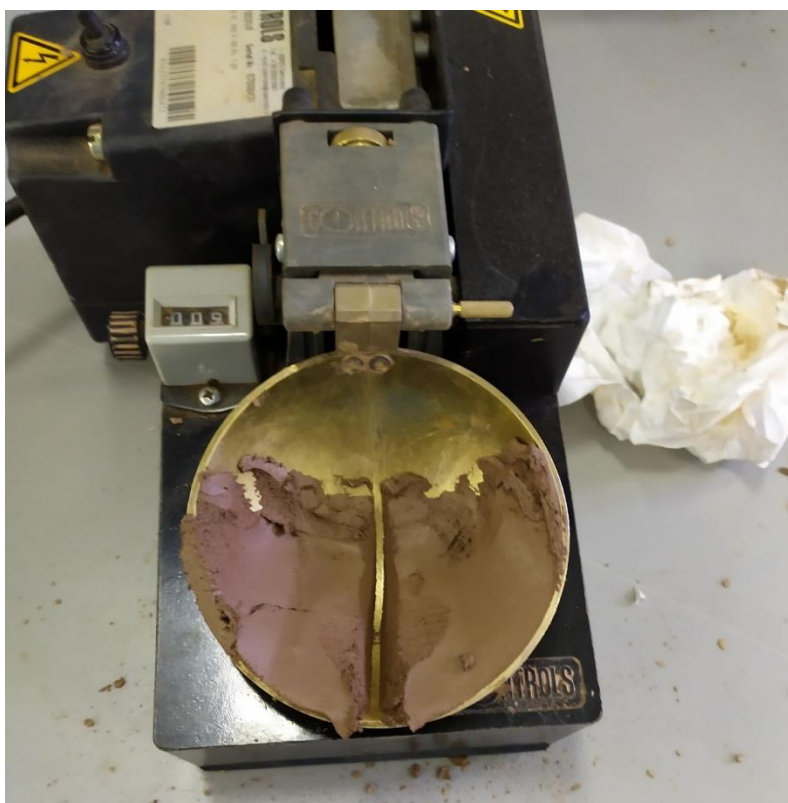


Ilustración 5.10: Cuchara de Casagrande, muestra número 2

Fuente: Propia.

El material necesario:

- Cuchara de Casagrande fabricada en aleación de cobre, y con una base normalizada.
- Acanaladores normalizados.
- Espátulas.
- Balanza con una precisión de 0.01g.
- Tamiz de 400 micras.

Una vez realizado el ensayo de Casa Grande se procede al cálculo del límite plástico que se obtiene a partir del sobrante de la muestra. Se coge una bola y se divide en 4 trozos cogiendo uno y se hace un churro de 3mm de diámetro. El ensayo finaliza cuando al hacer los churros se crean grietas sin llegar a romperse. De ese punto se obtiene la humedad del límite plástico  $W_P$ .

Una vez calculado el límite líquido y el límite plástico se procede al cálculo del índice de plasticidad con la siguiente formula:

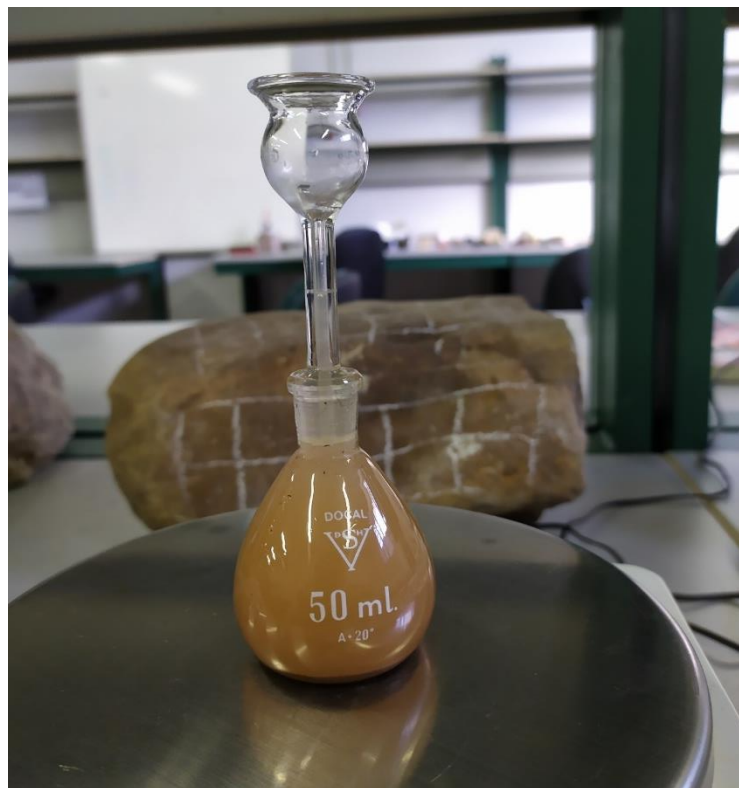
$$IP = W_L - W_P$$

Donde:

- IP: Es el índice de plasticidad.
- $W_L$ : Es el límite líquido.
- $W_P$ : Es el límite plástico.

#### 5.4.6. Densidad mediante picnómetro

EL picnómetro es un recipiente de vidrio que está dividido en dos partes. Este aparato sirve para medir volúmenes de líquido con una alta precisión. La medida se hace mediante una marca realizada en el tapón que, al ponerle junto con la otra parte, dejando una parte sin llenar para colocar la tapa e ir llenando hasta la marca del enrase.



*Ilustración 5.11: Densidad mediante el picnómetro, muestra número 1.*

*Fuente: Propia.*

EL ensayo se realiza con agua destilada. El ensayo consiste en llenar el picnómetro mediante el de agua destilada hasta el enrase, pesando el conjunto M2. Tras esto se pesa una muestra de suelo en una balanza de precisión hallando M1. Por último, se vacía un poco de agua destilada, y se introduce el suelo en el picnómetro, se vuelve a llenar de agua destilada hasta el enrase y se consigue M3. Durante la realización del ensayo, se mide la temperatura del agua para corregir el volumen según la temperatura, o bien se trabaja con el agua a una temperatura y así se elimina la corrección.

- M1 peso sólido.
- M2 peso de picnómetro más agua destilada.
- M3 peso del picnómetro con el suelo y agua.

Para el cálculo de la densidad se utiliza la siguiente formula.

$$V = \frac{M1 + M2 - M3}{d}$$

Siendo d la densidad del agua.

$$D = \frac{M1}{M1 + M2 - M3} \left( \frac{g}{cm^3} \right)$$

#### 5.4.7. Determinación de la porosidad

El suelo es un sistema trifásico que puede estar compuesto por aire, partículas sólidas y agua. La porosidad es la relación entre el volumen de poros y el volumen del suelo. Con los datos se puede calcular tanto la porosidad aparente como la real. Para el cálculo de la porosidad se calcula previamente la densidad real y la densidad aparente de las siguientes formulas:

$$\rho_a = \frac{m}{V_{ap}}$$

$$\rho_r = \frac{m}{V_r}$$

Donde  $\rho_a$  es la densidad aparente del suelo y  $\rho_r$  la densidad real del suelo.

Con estos datos se puede calcular Porosidad del suelo usando la siguiente fórmula:

$$P = \frac{\rho_r - \rho_a}{\rho_r} * 100$$

Donde P es la porosidad.

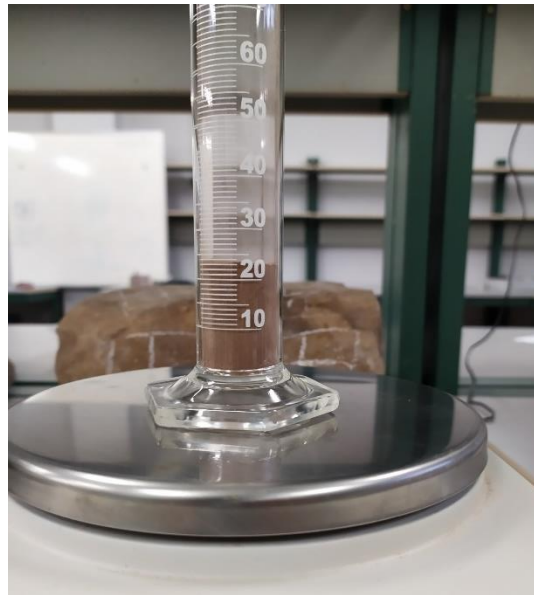
La densidad aparente es la relación entre los huecos y el volumen completo contando los huecos a la hora de calcular el volumen aparente.

La densidad real es la relación entre el volumen de huecos y el volumen real del suelo sin los huecos.

Hay que tener en cuenta que la densidad aparente va a ser siempre menor que la densidad real porque al volumen se le suma el volumen de huecos y este término está dividiendo.

La densidad real del suelo se ha obtenido en el apartado anterior mediante picnómetro.

La densidad aparente se obtendrá mediante una técnica más sencilla. Con la ayuda de una probeta se pesa una muestra de suelo, tras esto se compacta un poco mediante golpeo y se anota el volumen. De este ensayo se obtienen el peso y el volumen aparente, con lo que puedes calcular la densidad aparente.



*Ilustración 5.12: Determinación de la densidad aparente, muestra número 4.*

*Fuente: propia.*

Este ensayo se repite para todos los suelos, aunque suele ser variar de unos suelos a otros ya que la propia composición del suelo varia.

La porosidad y la permeabilidad están íntimamente relacionadas, ya que a más porosidad suele tener más permeabilidad. La relación no está demostrada ya que existe una porosidad primaria, la más importante, y una porosidad secundaria la que conecta a la porosidad primaria creando canales y aumentando así la permeabilidad.

#### 5.4.8. Cálculo del índice de poros

El índice de poros  $e$  es la relación entre el volumen de huecos de suelos y el volumen que ocupa la parte sólida. El índice de poros se calcula a través de la porosidad.

$$e = \frac{P}{1 - P}$$

Donde  $P$  es la porosidad.





## 6. RESULTADOS

### 6.1. Introducción

Las cuatro muestras se han tomado en dos partes, una superficial y otra más profunda por lo que en algunos ensayos habrá más resultados que muestras dado que en algunas muestras se comparará la situación superficial con la subsuperficial.

### 6.2. Secado en estufa

Para este ensayo se anota el número de muestra, el peso de la bandeja y el peso de la bandeja más la muestra, a continuación, se deduce el peso de la muestra y se introduce a la estufa para su secado. Una vez secado, se pesa el conjunto muestra seca más la bandeja y se resta el peso de la bandeja, tras lo que se calcula la humedad natural del suelo.

Primero se tomaron unas pequeñas muestras y se calcula la humedad para ellas siendo una muestra ligeramente sesgada debido a que cuenta con menos cantidad de rocas y por lo tanto la muestra no es lo más veraz posible (Tabla 6.1). En estos resultados aparecen varias muestras más de las que se obtuvieron en campo, esto se debe a que la muestra A es superficial y la B profunda de la misma muestra, por lo que la humedad es distinta y así se comprueba la diferencia. Las muestras en las que no se distinguen superficial y profunda, es porque a simple vista no cambia la humedad.

Tabla 6.1: Calculo de humedades en pequeños recipientes

Muestra	Peso muestra	peso bandeja	muestra+band	pesada final	Humedad (%)
1A	129,05	132,08	261,12	238,3	21,48
2A	202,67	137,53	340,19	323,96	8,71
2B	181,63	135,95	317,59	301,92	9,44
3A	193,09	135,06	328,15	265,68	7,05
3B	143,23	133,66	276,93	261,46	12,10
4B	113,07	121,39	234,44	221,63	12,78

Fuente: elaboración propia.

A continuación, se introducen las muestras completas y se recalcula la humedad, teniendo en cuenta que la humedad real del suelo sería la representada a continuación (Tabla 6.2).

Tabla 6.2: Cálculo de las humedades in situ.

Muestra	Peso muestra	peso bandeja	muestra+band	pesada final	Humedad (%)
1A	2105,38	805,95	2911,33	2592,1	17,87
2A	2078,68	798,22	2876,9	2725,19	7,87
3A	2036,36	796,03	2832,35	2751,16	4,15
3B	2265,87	800,45	3066,15	2895,63	8,14
4B	2058,91	800,6	2859,42	2665,95	10,37

Fuente: elaboración propia.

La humedad sería:

- Muestra 1-> 17.87%
- Muestra2-> 7.87%
- Muestra3A->4.15%
- Muestras3B->8.14%
- Muestras4->10.37%

El dato anómalo de la muestra 3A es debido a que la muestra 3 en superficie es muy arenosa con gran cantidad de arenisca.

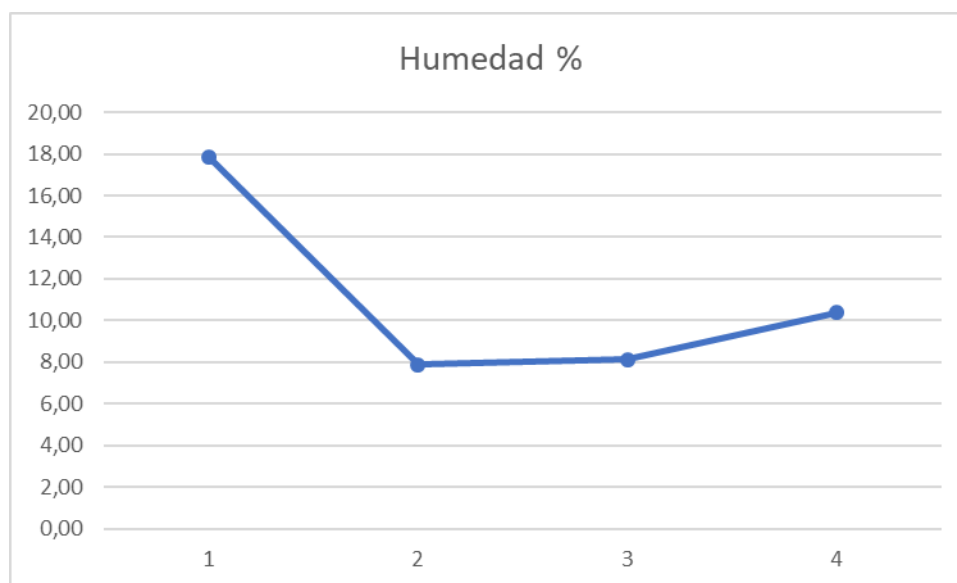


Figura 6.1: Representación de la humedad.

Fuente: elaboración propia.

En la gráfica (Figura 6.1) se aprecia una distribución de la humedad a lo largo del perfil del deslizamiento, siendo la muestra 1 la que pertenece a la corona y la muestra 4 a la zona de acumulación.

### 6.3. Granulometría

Los resultados granulométricos de las distintas muestras se muestran en las tablas a continuación.

Tabla 6.3: Resultados del tamizado, muestra 1.

Muestra 1					
Tamiz ASTM	apertura(mm)	Retenido(g)	Retenido acumulado	Retenido acumulado %	% Pasa
6	3,36	647,02	647,02	11,12	88,88
10	2	885,91	1532,93	26,34	73,66
18	1	1153,20	2686,13	46,16	53,84
35	0,5	1346,11	4032,24	69,29	30,71
60	0,4	1385,88	5418,12	93,10	6,90
	Pasa	401,30	5819,42	100,00	0,00
	Total(g)=	5819,42			

Fuente: elaboración propia.

Tabla 6.4: Resultados del tamizado, muestra 2.

Muestra 2					
Tamiz ASTM	apertura(mm)	Retenido(g)	Retenido acumulado	Retenido acumulado %	% Pasa
6	3,36	752,24	752,24	37,83	62,17
10	2	249,48	1001,72	50,38	49,62
18	1	262,84	1264,56	63,60	36,40
35	0,5	222,72	1487,28	74,80	25,20
60	0,4	238,79	1726,07	86,81	13,19
	Pasa	262,37	1988,44	100,00	0,00
	Total(g)=	1988,44			

Fuente: elaboración propia.

Tabla 6.5: Resultados del tamizado, muestra 3.

Muestra 3					
Tamiz ASTM	apertura(mm)	Retenido(g)	Retenido acumulado	Retenido acumulado %	% Pasa
6	3,36	1403,3	1403,30	16,27	83,73
10	2	1564,65	2967,95	34,41	65,59
18	1	1720,9	4688,85	54,36	45,64
35	0,5	1840,64	6529,49	75,71	24,29
60	0,4	1865,7	8395,19	97,34	2,66
	Pasa	229,68	8624,87	100,00	0,00
	Total(g)=	8624,87			

Fuente: elaboración propia.

Tabla 6.6: Resultado del tamizado, muestra 4.

Muestra 4					
Tamiz ASTM	apertura(mm)	Retenido(g)	Retenido acumulado	Retenido acumulado %	% Pasa
6	3,36	789,02	789,02	24,99	75,01
10	2	338,74	1127,76	35,72	64,28
18	1	595,47	1723,23	54,58	45,42
35	0,5	507,7	2230,93	70,65	29,35
60	0,4	541,45	2772,38	87,80	12,20
	Pasa	385,12	3157,50	100,00	0,00
	Total(g)=	3157,50			

Fuente: elaboración propia.

#### 6.4. Capacidad de retención de agua

Tras añadir los 150ml de agua y esperar los tiempos estipulados, se mide la cantidad de agua retenida en el suelo y por ende la capacidad de retención de agua del suelo, los resultados del ensayo se muestran en la tabla a continuación (Tabla 6.7).

Tabla 6.7: Resultado del agua retenida.

Muestra	1	2	3	4
peso seco (g)	72,68	72,66	72,66	72,64
agua (ml)	150	150	150	150
sobrante (ml)	107	109	112	109
agua retenida (ml)	43	41	38	41

Fuente: elaboración propia.

Los resultados de este ensayo son lo más iguales posible, ya que las muestras de suelo seco son lo más parecidas posibles, teniendo una variación en gramos de  $\pm 0.02g$ .

En la siguiente gráfica (Figura 6.2) se muestra la evolución del suelo de la parte superior (muestra1) hasta la parte inferior (muestra4) en una vista de perfil del deslizamiento.

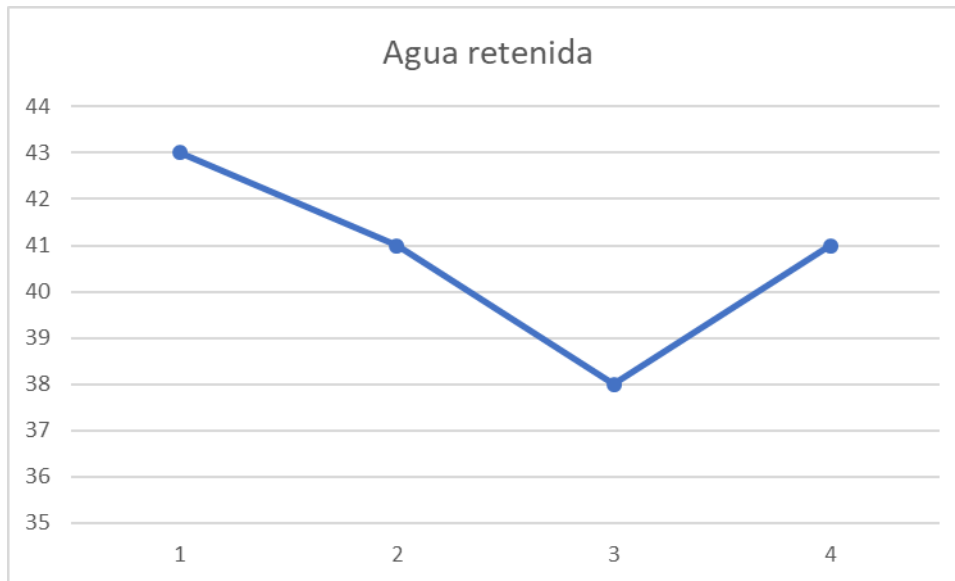


Figura 6.2: Representación del agua retenida.

Fuente: elaboración propia.

### 6.5. Determinación del Límite líquido, ensayo de Casagrande y límite plástico.

Tras la realización del ensayo de Casagrande para la determinación del límite líquido y el cálculo del límite sólido, estos son los resultados (Tabla 6.8).

Tabla 6.8: Resultados de los ensayos del límite líquido y el límite sólido.

	Casa grande 1	Casa grande 2	Casa grande 3	Casa grande 4
golpes 15/25	20,00	24,00	22,00	21,00
PR(g)	100,94	91,71	95,97	60,38
PTW(g)	19,64	20,70	23,18	20,09
Peso seco(g)	14,66	16,62	19,09	15,56
Humedad(%)	33,97	24,55	21,42	29,11
golpes 25/35	27,00	29,00	30,00	34,00
PR(g)	86,71	96,46	88,17	58,75
PTW(g)	20,73	19,69	22,67	22,74
Peso seco(g)	15,65	16,01	18,72	17,70
Humedad(%)	32,46	22,99	21,10	28,47
Churros	2,00	2,00	2,00	2,00
PR(g)	102,03	79,19	58,18	102,17
Pchurro1(g)	6,75	4,60	7,95	5,86
Pchurro2(g)	11,55	7,79	14,83	11,43
Peso seco(g)	9,34	6,65	12,63	9,43
Humedad(%)	23,66	17,14	17,42	21,21

Fuente: Elaboración propia.

A continuación, se presentan las gráficas con las que se calcula la humedad del límite líquido mediante el gráfico de Casa Grande. Una vez que se cuenta con el número de golpes y la humedad se procede a dibujarlos en la gráfica y se calcula la humedad a 25

golpes que es la humedad del límite líquido. En las gráficas se representan los puntos por los siguientes colores:

- Azul: más de 25 golpes y su humedad.
- Verde: menos de 25 golpes y su humedad.
- Roja: paralelas a la de referencia.
- Lila: Humedad a los 25 golpes.

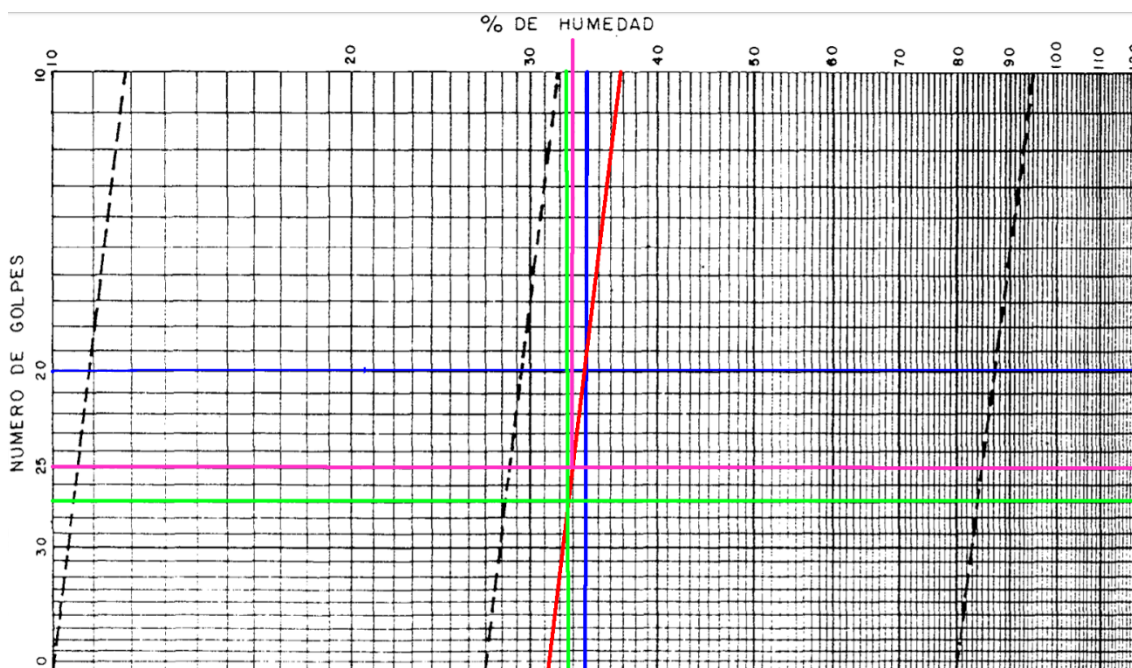


Figura 6.3: Cálculo del límite líquido, muestra 1

Fuente: Elaboración propia.

En la muestra 1 da la casualidad de que pasa por los dos puntos por lo que se dibuja la línea de 25 golpes y se calcula la humedad a 25 golpes.

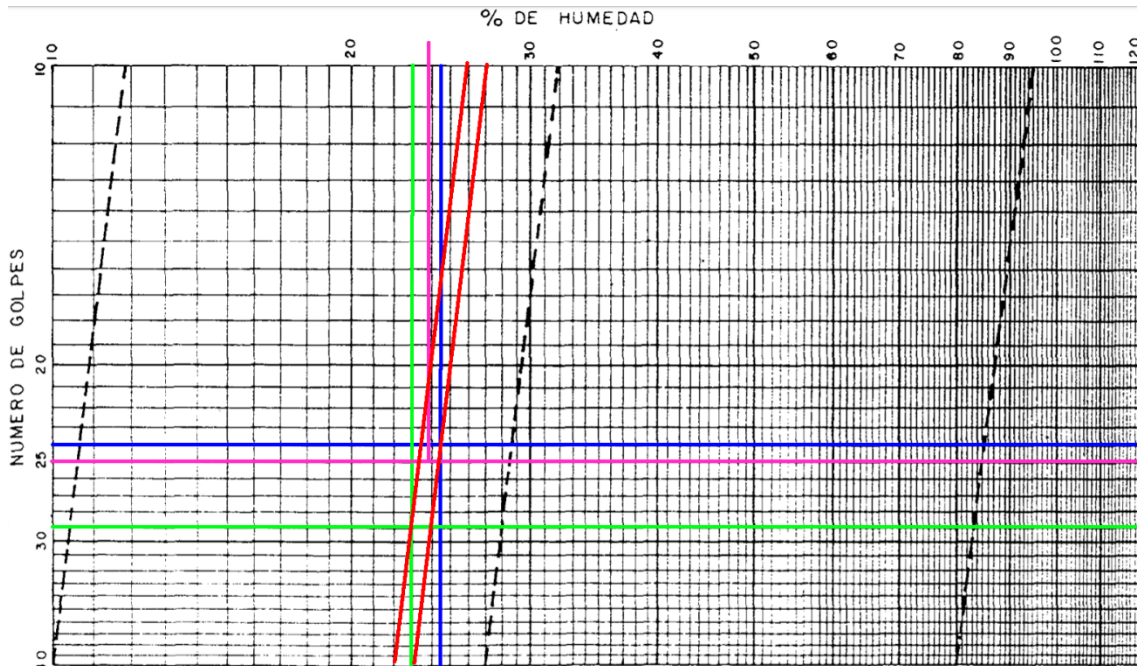


Figura 6.4: Cálculo del Limite líquido, muestra 2

Fuente: Elaboración propia.

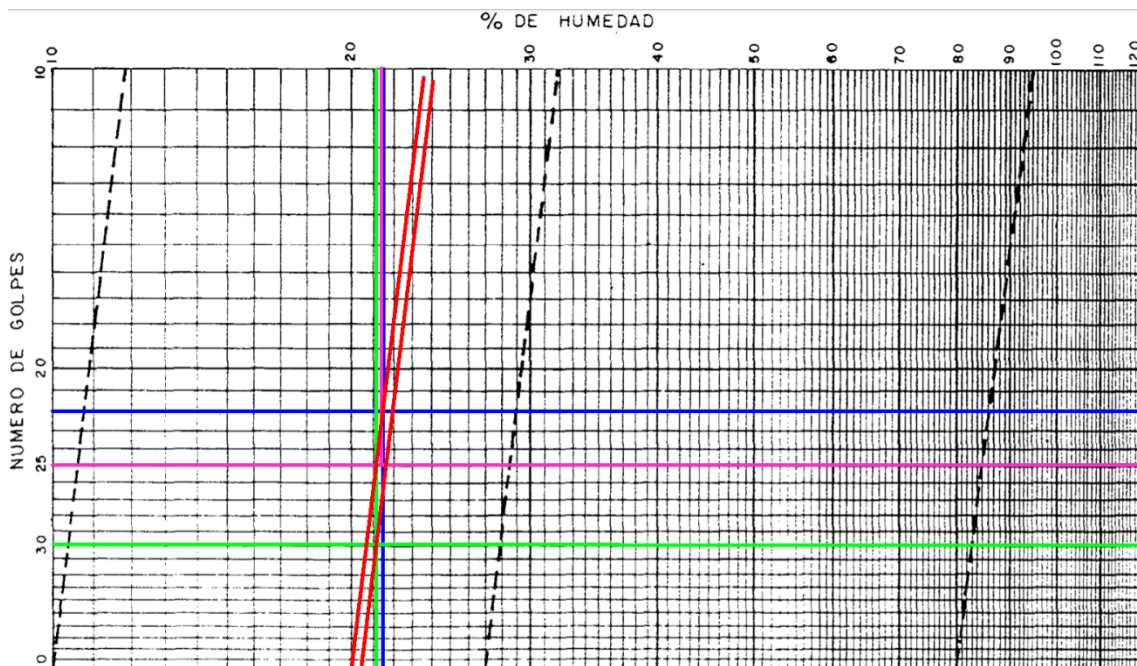


Figura 6.5: Cálculo del límite líquido, muestra 3.

Fuente: Elaboración propia.



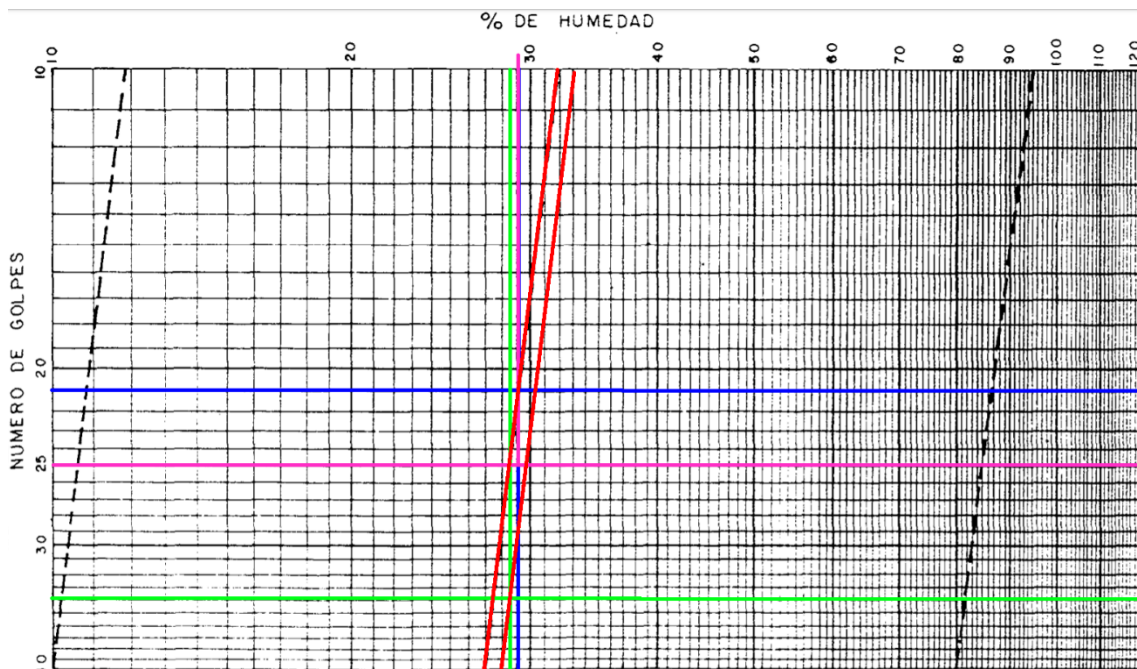


Figura 6.6: Cálculo del Límite líquido, muestra 4.

Fuente: Elaboración propia.

Una vez analizadas las gráficas se muestran los resultados en una tabla (Tabla 6.9).

Tabla 6.9: Resultados del límite líquido.

W <sub>L</sub>			
1	2	3	4
33,00	23,95	31,30	29,00

Fuente: elaboración propia.

Lo siguiente es el cálculo del límite plástico que se muestran en la siguiente tabla (Tabla 6.10).

Tabla 6.10: Resultado del límite plástico.

WP			
1	2	3	4
23,66	17,14	17,42	21,21

Fuente: elaboración propia

Por último, se calcula el índice de plasticidad con el resultado de los dos límites.

Tabla 6.11: Resultado del índice de plasticidad.

IP			
1	2	3	4
9,34	6,81	13,88	7,79

Fuente: elaboración propia

Las gráficas siguientes presentan la distribución de los datos obtenidos siguiendo una sección o perfil del deslizamiento, desde la corona al pie del depósito.



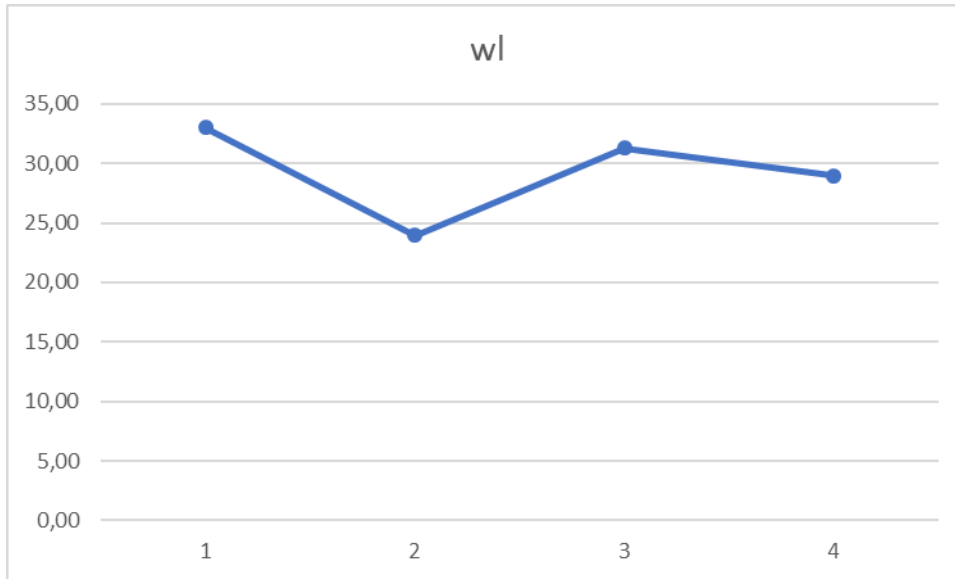


Figura 6.7: Distribución del límite líquido a lo largo del deslizamiento.

Fuente: Elaboración propia.

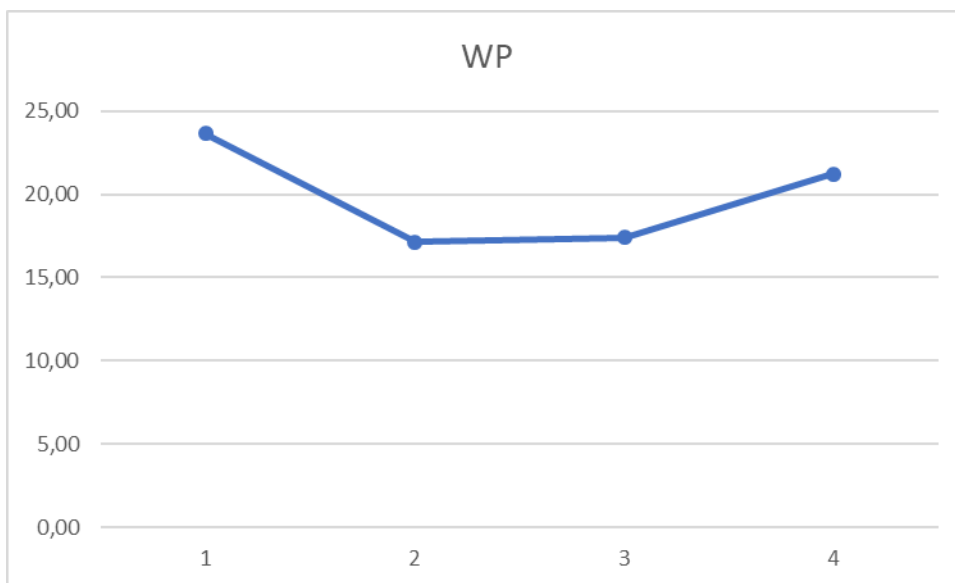


Figura 6.8: Distribución del límite plástico a lo largo del deslizamiento.

Fuente: Elaboración propia.

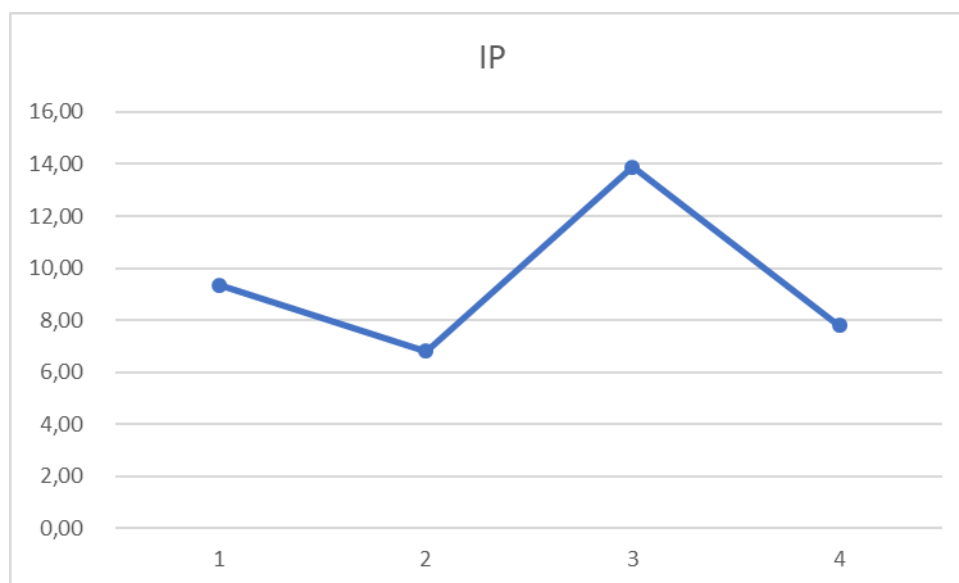


Figura 6.9: Distribución del Índice de plasticidad a lo largo del deslizamiento.

Fuente: Elaboración propia.

### 6.6. Densidad mediante picnómetro

Los resultados de la densidad mediante picnómetro se recogen en la siguiente tabla (Tabla 6.12):

Tabla 6.12: Resultados de la densidad mediante picnómetro.

Muestra	1	2	3	4
M1(g)	4,31	4,93	4,04	4,42
M2(g)	160,66	80,65	80,65	80,65
M3(g)	163,28	83,69	83,15	83,39
Densidad(g/cm3)	2,55	2,61	2,62	2,63

Fuente: elaboración propia.

El gráfico a continuación (Figura 6.10) muestra la distribución desde la corona hasta la base de la densidad en una vista del perfil del argayo.

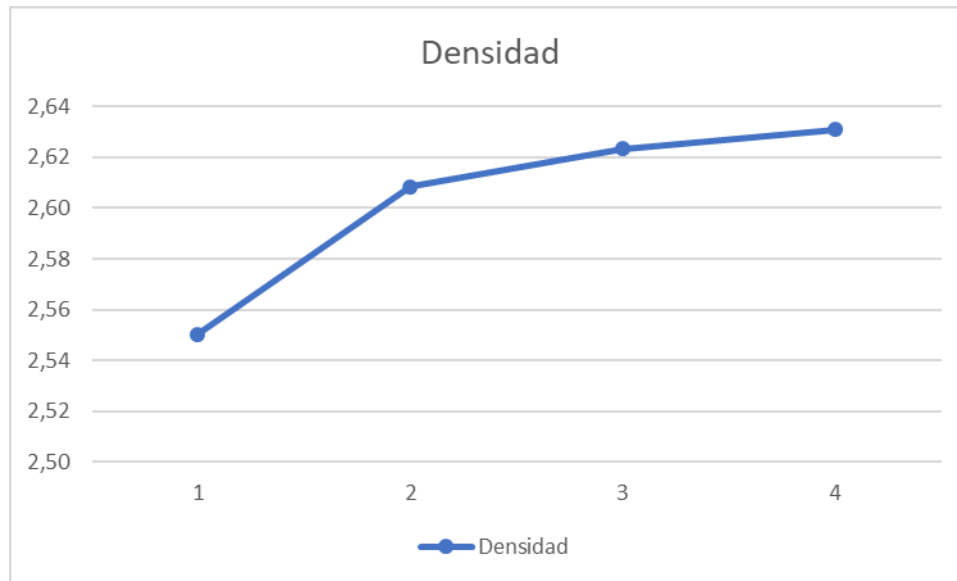


Figura 6.10: Representación de la densidad real del suelo.

Fuente: elaboración propia.

### 6.7. Determinación de la porosidad e índice de poros

A partir de la densidad real mediante picnómetro, y calculando la densidad aparente, se calcularía la porosidad.

Primero el cálculo de la densidad aparente:

Tabla 6.13: Resultados del cálculo de la densidad aparente.

Muestra	1	2	3	4
P(g)	18,90	23,96	27,17	31,64
V(ml)	24,80	26,00	27,13	30,00
densidad aparente(g/cm3)	0,76	0,92	1,01	1,05

Fuente: elaboración propia.

A partir de aquí se calcula la porosidad:

Tabla 6.14: Resultados del cálculo de la porosidad.

Muestra	1	2	3	4
Porosidad (%)	70,12	64,64	61,59	59,91

Fuente: elaboración propia.

Y por último pasamos al cálculo del índice de poros:

Tabla 6.15: Resultados del cálculo del índice de poros.

Muestra	1	2	3	4
Índice de poros	2,35	1,83	1,61	1,49

Fuente: elaboración propia.

A partir de aquí se muestran los distintos valores en graficas (Figura 6.11, Figura 6.12, Figura 6.13).

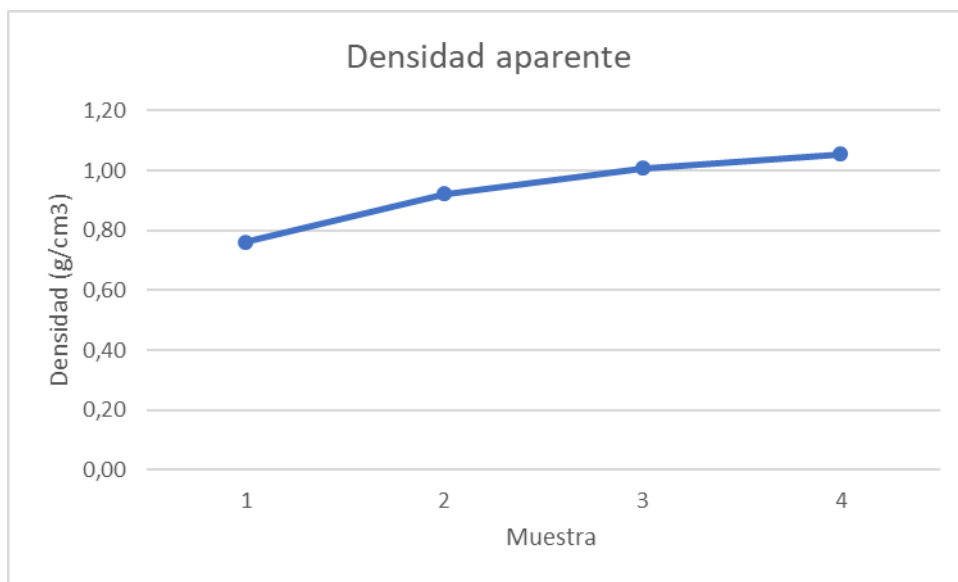


Figura 6.11: Representación de la densidad aparente.

Fuente: elaboración propia.

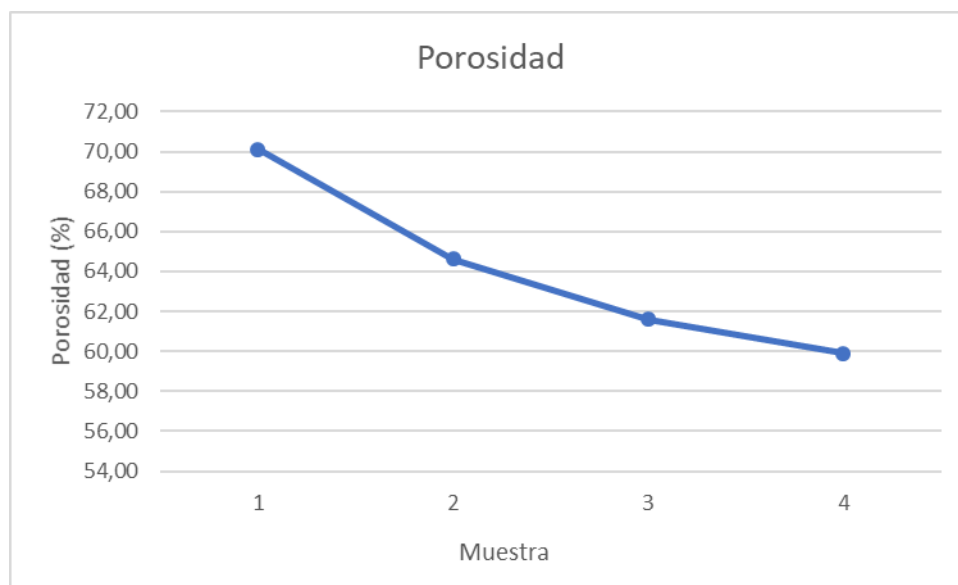


Figura 6.12: Representación de la porosidad.

Fuente: elaboración propia.



Figura 6.13: Representación del índice de poros.

Fuente: elaboración propia.

### 6.8. Clasificación de los materiales según La carta de plasticidad de Casagrande

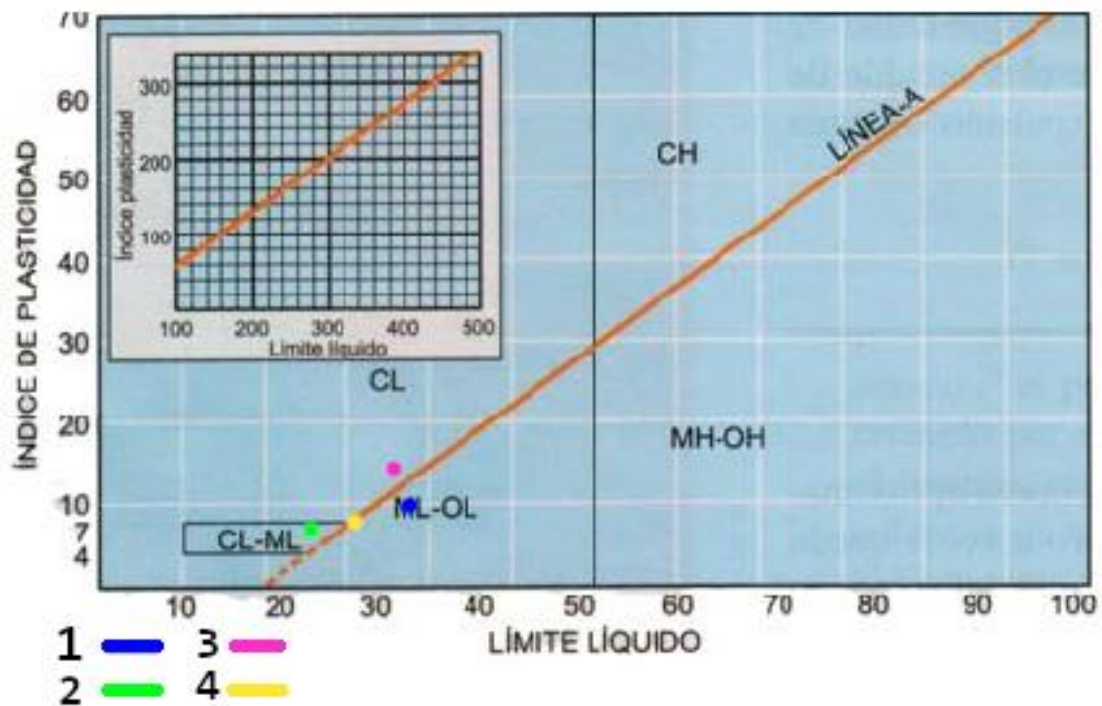


Ilustración 6.1: Carta de plasticidad de Casagrande con los valores de las muestras marcados.

Fuente: [https://www.researchgate.net/figure/Figura-7-Carta-de-plasticidad-de-Casagrande-Gonzalez-de-Vallejo-2004\\_fig2\\_257478110](https://www.researchgate.net/figure/Figura-7-Carta-de-plasticidad-de-Casagrande-Gonzalez-de-Vallejo-2004_fig2_257478110)





*Ilustración 6.2: Distribución de las muestras a lo largo del deslizamiento.*

*Fuente: elaboración propia.*

De la aplicación de la carta de Plasticidad de Casagrande (Ilustración 6.1), se concluye que:

1. Las muestras 1 y 4 son limos y suelos orgánicos de baja plasticidad.
2. La muestra 2 son arcillas y limos de baja plasticidad.
3. La muestra 3 son arcillas de baja plasticidad.

Según esta primera clasificación, coincide con la ubicación de las muestras dado que en las muestras 1 y 4 existen restos de plantas. La muestra 2 cuadra con el tipo de suelo Y la muestra número 3 cabe destacar que cuenta con arenas mezcladas por lo que puede falsearse ligeramente la clasificación.

Por otro lado, existe también la clasificación del sistema unificado de clasificación de suelos (USCS) (Tabla 6.16).

Tabla 6.16: Sistema unificado de clasificación de suelos.

Tabla 3.5 Clasificación unificada de suelos						
Procedimiento de identificación en el campo: (Excluyendo las partículas mayores de 7.6 cm. (3") y basando las fracciones en pesos estimados)				Símbolos del grupo (*)		
Suelos de partículas gruesas Más de la mitad del material es retenido en la malla No. 200 (1/2)	Gravas Más de la mitad de la fracción gruesa es retenida en la malla No. 4	Cravas Más de la mitad de la fracción gruesa es retenida en la malla No. 4 Para clasificación visual puede usarse 1/2 cm. como equivalente a la abertura de la malla No. 4	Cravas finas (Poco o nada de partículas finas)	Amplia gama en los tamaños de las partículas y cantidades apreciables de todos los tamaños intermedios.	GW	
			Cravas gruesas (Cantidad apreciable de partículas finas)	Fracción fina poco o nada plástica (para identificación, véase grupo ML abajo).	GP	
		Arenas Más de la mitad de la fracción gruesa pasa la malla No. 4	Arenas finas (Poco o nada de partículas finas)	Fracción fina poco o nada plástica (para identificación véase grupo CL abajo).	Amplia gama en los tamaños de las partículas y cantidades apreciables de todos los tamaños intermedios.	GM
				Fracción fina plástica (para identificación véase grupo CL abajo).	Promedio de un tamaño o un tipo de tamaños con ausencia de algunos tamaños intermedios.	GC
	Arenas con finos (Cantidad apreciable de partículas finas)	Arenas limosas (Poco o nada de partículas finas)	Fracción fina poco o nada plástica (para identificación véase grupo ML abajo).	Amplia gama en los tamaños de las partículas y cantidades apreciables de todos los tamaños intermedios.	SW	
			Fracción fina plástica (para identificación véase grupo CL abajo).	Promedio de un tamaño o un tipo de tamaños con ausencia de algunos tamaños intermedios.	SP	
		Arenas limosas (Poco o nada de partículas finas)	Fracción fina poco o nada plástica (para identificación véase grupo ML abajo).	Fracción fina poco o nada plástica (para identificación véase grupo ML abajo).	SM	
			Fracción fina plástica (para identificación véase grupo CL abajo).	Fracción fina plástica (para identificación véase grupo CL abajo).	SC	
	Suelos de partículas finas Más de la mitad del material pasa la malla No. 200 (Las partículas de 0.074 mm. de diámetro (malla No. 200)	Procedimientos de identificación en la fracción que pasa la malla No. 40				
		Limosas y arcillosas Límite líquido menor de 50	Resistencia en Edo. seco (Características al rampamiento)	Dilatancia Reacción al agitado	Tenacidad (Consistencia cerca del límite plástico)	
Nula a ligera			Rápida a lenta	Nula	ML	
Medio a alta			Nula a muy lenta	Medio	CL	
Limosas y arcillosas Límite líquido mayor de 50		Ligera a medio	Lento	Ligero	OL	
		Ligera a medio	Lento a nulo	Ligero a medio	MH	
		Alta a muy alta	Nula	Alta	CH	
		Medio a alta	Nula a muy lenta	Ligero a medio	OH	
Suelos altamente orgánicos				Fácilmente identificables por color, olor, sensación esponjosa y frecuentemente por su textura fibrosa.	Pt	

Fuente: <http://ingenieriaciviltips.blogspot.com/2011/06/>

Según esta clasificación los distintos suelos encajarían en la clasificación SM que equivaldría a arenas limosas, mezclas de arena y limo mal graduadas.



## 7. DISCUSIÓN Y CONCLUSIONES

### 7.1. Introducción

La metodología aplicada en este TFG, al estudio y caracterización de un argayo ubicado en el término municipal de Saro, ha permitido por un lado conocer los materiales involucrados en dicho movimiento, así como la evolución del mismo y, por otro, se ha comprobado cómo uno de los factores más importantes que desencadenan este tipo de movimiento son las precipitaciones acumuladas.

Si bien sería interesante aplicar técnicas como auscultaciones o LIDAR para conocer la velocidad de movimiento de este tipo de argayos o cuál es la zona más afectada por los movimientos, no son necesarias este tipo de técnicas para la caracterización de los materiales que se ven afectados, sino más bien conocer la cantidad de agua con la que empezarían a moverse. En este TFG, se emplea una metodología combinada de estudios de campo, toma de muestras y de ensayos de laboratorio, que ha permitido caracterizar este movimiento desde un punto de vista geológico.

Para ello, además de los estudios de campo y ensayos de laboratorio se ha realizado una importante recopilación de datos meteorológicos y bibliográficos. Se pone de manifiesto la importancia que tiene el análisis de estos movimientos de ladera, ya que como se puede ver en el reportaje fotográfico realizado en los sucesivos eventos de movimiento, este argayo activo ha supuesto daños materiales y el cierre de los accesos a zonas no muy bien comunicadas.

De este modo, se pueden establecer las conclusiones de cada uno de los pasos que se han seguido para el estudio y caracterización de un argayo activo.

### 7.2. Estudio del argayo

El movimiento del argayo a estudiar se representa en la siguiente imagen en la que se aprecia la evolución temporal del mismo. Cada imagen está tomada uno o dos días después de que ocurriese el movimiento por lo que se refleja claramente el material movido y el estado del mismo tras cada movimiento. En la imagen también se aprecia el tipo de movimiento y el cambio que va sufriendo a lo largo de las diferentes etapas.





*Ilustración 7.1: Todos los movimientos.*

*Fuente: Elaboración propia.*

### **7.3. Caracterización de los materiales intervinientes**

Para la caracterización de los materiales que intervienen en el argayo se ha estudiado el terreno para una toma de muestras lo más representativa posible (Ilustración 7.2), para después tomar las muestras y realizar el ensayo granulométrico, el ensayo del límite líquido y el ensayo del límite plástico, con lo que se calcula el índice de plasticidad y con ello se caracterizan los materiales.





*Ilustración 7.2: Zona donde se han obtenido las muestras a lo largo del argayo.*

*Fuente: Elaboración propia.*

La densidad de las distintas muestras va aumentando desde la primera a la última de manera gradual, con un salto bastante notable de la primera a la segunda muestra. Esto también ocurre en el caso de la densidad aparente, por lo que en el cálculo de la porosidad aparente y el índice de poros la gráfica tiene una curva totalmente contraria, lo que indica que los resultados son coherentes. Según estos datos la densidad del suelo en la corona es la más baja de manera que va creciendo a medida que se desciende hasta la zona de acumulación.

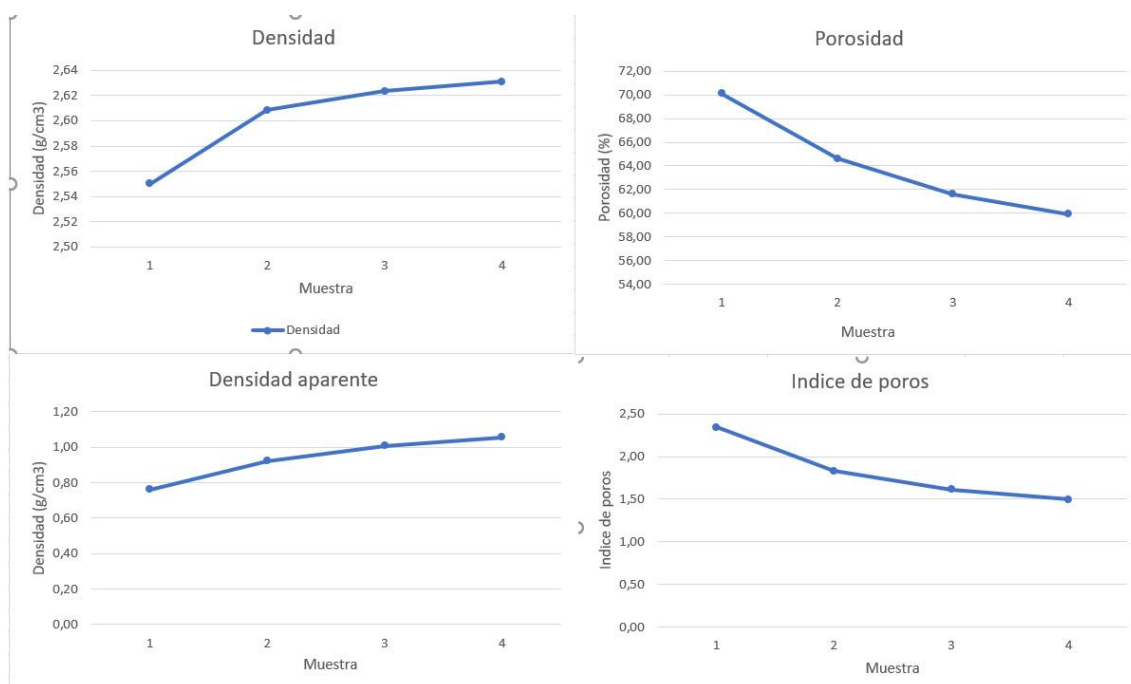


Figura 7.1: Densidad aparente, real, porosidad e índice de poros.

Fuente: Elaboración propia.

En cuanto al agua, la humedad y el agua retenida en el ensayo crean dos gráficas con curvas muy parecidas, discordando solo la muestra nº 2. Según esto, la muestra 1 sería la más húmeda seguida de la muestra 4 y las dos últimas con humedades muy parecidas. En cuanto al agua retenida la situación es parecida, la muestra 1 es la que más retiene seguida de las muestras 2 y 4 que son muy parecidas, terminando con la muestra 3 (la que a priori parecía más arenosa) que es la que menos agua retiene. Los datos de la humedad y el agua retenida son bastante parejos siendo discordante el segundo dato. Esto puede ser debido a que, en campo, la muestra 2 se ha obtenido de una zona por la que no circulaba agua y estaba más seca que las demás.

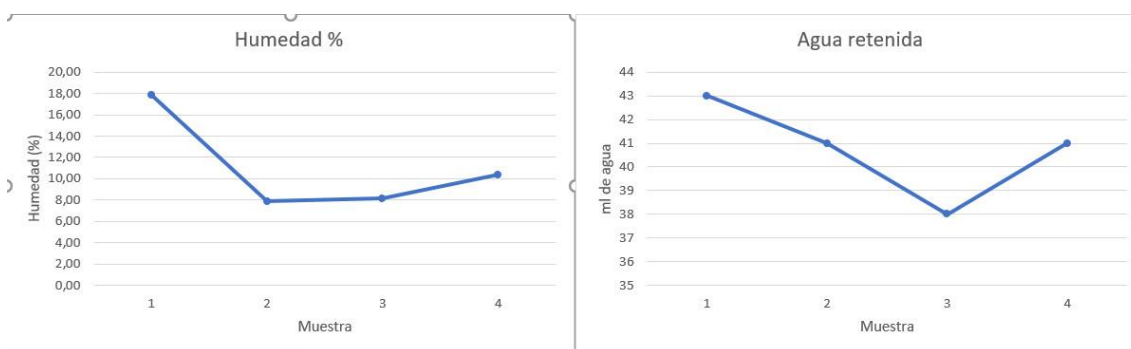


Figura 7.2: Humedad y agua retenida

Fuente: Elaboración propia.

Para la clasificación de los materiales que interviene en el argayo se utilizó la carta de plasticidad de Casagrande.



De la aplicación de la carta de Plasticidad de Casagrande, se concluye que:

- Las muestras 1 y 4 son limos y suelos orgánicos de baja plasticidad.
- La muestra 2 son arcillas y limos de baja plasticidad.
- La muestra 3 son arcillas de baja plasticidad.

Por otro lado, existe también la clasificación del sistema unificado de clasificación de suelos (USCS) ().

Según esta clasificación los distintos suelos encajarían en la clasificación SM que equivaldría a arenas limosas, mezclas de arena y limo mal graduadas.

La arena provendría de la descomposición de la arenisca mientras que los limos y las arcillas de las capas de arcillas y el regolito.

#### **7.4. Composición de los materiales del argayo**

Según el estudio realizado en campo y las pruebas realizadas en el laboratorio la composición de los materiales del argayo son areniscas y arcillas limolíticas. Las capas de arcilla compactadas tienen distintos colores en función de la composición de la sedimentación.





*Ilustración 7.3: Arcilla de dos colores.*

*Fuente: elaboración propia.*

Por otra parte, las areniscas, también con varios colores, se encuentran muy fracturadas (Ilustración 7.4). Estas fracturas se encuentran en su mayoría no rellenadas.



*Ilustración 7.4: Arenisca fracturada.*

*Fuente: elaboración propia.*

### **7.5. Relación entre las precipitaciones y los movimientos del argayo**

Con los datos de las precipitaciones proporcionados por AEMET de la base de Villacarriedo se puede crear una relación entre las precipitaciones y los argayos (Figura 7.3).



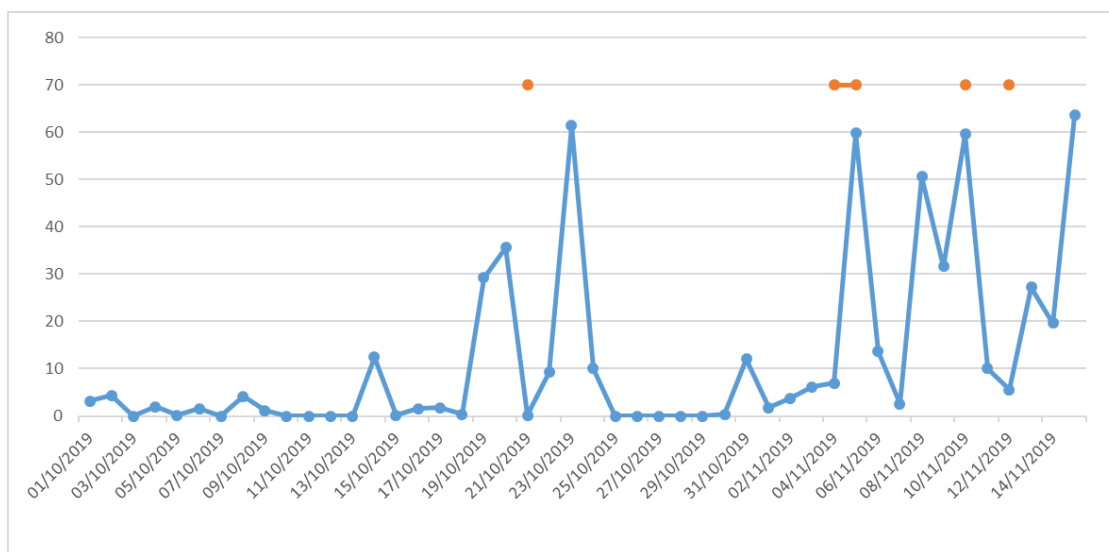


Figura 7.3: Relación de las lluvias (azul) y los movimientos (naranja).

Fuente: elaboración propia.

En los datos (Tabla 7.1) se aprecia que las lluvias el día del deslizamiento son bastante dispares, desde 0.2mm hasta casi 60mm, por lo que se estudian las lluvias acumuladas los días anteriores y el número de días que estuvo lloviendo sin cesar antes del movimiento. En este estudio vemos que existen unas precipitaciones mínimas en el segundo movimiento de 30mm, sin embargo, el resto pasa holgadamente los 60mm. Los dos últimos deslizamientos destacan en este aspecto sobrepasando los 150mm. En cuanto a los días que ha llovido seguidos antes del deslizamiento, se mantienen por encima de 6 días, salvo el segundo deslizamiento que son 6 días. Los dos últimos movimientos vuelven a aparecer con 12 y 14 días llovidos consecutivos.

Con esto se deduce que la condición más relevante son los días llovidos ininterrumpidamente antes del argayo. Por lo que con más de 6 días y 60mm de agua en los últimos 5 días el argayo es muy propenso a deslizarse. Además, se establece una relación entre la suma de días que ha llovido y el tamaño del movimiento, dado que los dos últimos movimientos son los más grandes y en los que más días ha llovido seguidos.

Tabla 7.1: Datos de precipitaciones de los distintos movimientos.

Precipitaciones en mm			
Fecha	Acumulado 5 días	Día	Días lloviendo
21/10/2019	67,20	0,20	7,00
04/11/2019	30,80	7,00	6,00
05/11/2019	78,60	59,80	7,00
10/11/2019	158,00	59,60	12,00
12/11/2019	157,40	5,60	14,00

Fuente: Elaboración propia



### **7.6. Tipo de movimiento**

El tipo de movimiento se define en función de lo descrito en el apartado 2.3 de este documento. Según esto, el movimiento comienza siendo un deslizamiento rotacional y según se van sucediendo los argayos, va pasando gradualmente desde deslizamiento rotacional hasta flujo, siendo los movimientos finales flujos.

### **7.7. Conclusión**

El Estudio realizado en el presente Trabajo Fin de Grado sobre el argayo localizado en el término municipal de Saro, ha demostrado la importancia del agua como factor principal desencadenante de este tipo de desastres naturales que generan riesgos potencialmente peligrosos. El estudio de campo, así como los ensayos de laboratorio han permitido clasificar los materiales, así como conocer el comportamiento de los mismos.



## 8. BIBLIOGRAFIA

1. **Suárez, L. y Regueiro, M.** *Guía ciudadana de los riesgos geológicos. Deslizamientos y aludes.* Madrid : Ilustre Colegio Oficial de Geólogos de España, 1997. s.n.
2. **Elorza, Mateo Gutiérrez.** *Geomorfología.* Madrid : PEARSON, 2008.
3. **A, young.** *Slopes.* Edimburgo : Oliver and Boyd.
4. **Douglas, I.** *Humid Landforms.* Cambridge : The MIT Press, 1977.
5. **J.B., Dalrymple, R.J., Blong y A.J., Conacher.** *A hypothetical nine unit landsurface form.* s.l. : Zeitschrift für Geomorphologie, 1968.
6. **Terzaghi, K.** *Theoretical soil mechanics.* New York : Wiley, 1943.
7. **F.J., Ayala, y otros.** *Manual de taludes.* Madrid : Instituto Geológico y Minero de España, 1987.
8. **R.; Dikau, y otros.** *Landslide REcognition, Identification, Movement and Causes.* Chichester : Wiley, 1996.
9. **M.C., Cruden y D.J., Varnes.** *Landslide types and proceses ED: landslides: Investigation and Mitigation.* Washinton : National Academy Press, 1996. Special report 247.
10. **D.J., Varnes.** *Slope movement: Types and proceses ED Landslides: Analysis and control.* Washinton : National Academy of Sciences, 1978. Transportation Research Board Special Report 176.
11. **K., Terzaghi y R.B., Peck.** *Soil Mechanics and Engineering Practice.* New York : Wiley, 1948.
12. **R., Dikau, y otros.** *Landslide Recognition. Identification, movement and causes.* Chichester : Wiley, 1996.
13. **Dikau, R.** *Mass movement ED Encyclopedia of Geomorphology.* London : Routledge, 2004. 644652.
14. **A.C., Seijmonsbergen, y otros.** *The Failure Mechanism of a Late Glacial Sturzstrom in the subalpine Molasse.* Austria : Voralberg, 2005. Geomorphology.66.277.286.
15. **G.D., Alberto, y otros.** *A methodological approach for the analysis of the temporal occurrence and triggering factors of landslides.* Santander : Elsevier, 1999. Geomorphology, volumen 30,issues 1-2.
16. **Revuelta, Eliezer San Millán.** *Influencias de las precipitaciones en la ocurrencia de los movimientos de ladera en Cantabria.* Santander : s.n., 2015.
17. **Wikipedia.** [En línea] [https://es.wikipedia.org/wiki/Saro\\_\(Cantabria\)](https://es.wikipedia.org/wiki/Saro_(Cantabria)).
18. **datosclima.es.** [En línea]  
<https://datosclima.es/Aemet2013/Precipitacion2013.php>.
19. [En línea] <https://trid.trb.org/view/462501>.



20. Varnes, DAVID J. Landslide Types and Processes. [En línea] <http://onlinepubs.trb.org/Onlinepubs/sr/sr29/29-003.pdf>.
21. Millán, Eliezer San. Influencia de las precipitaciones en la ocurrencia de los movimientos de la ladera en Cantabria. [En línea] 2015. <https://repositorio.unican.es/xmlui/bitstream/handle/10902/7848/Eliezer%20San%20Millan%20Revuelta.pdf?sequence=1&isAllowed=y>.
22. Elfarío. [En línea] <https://www.elfaradio.com/2019/02/01/fact-checking-cuantos-argayos-ha-habido-en-cantabria-por-las-inundaciones/>.
23. AEMET. [En línea] [http://www.aemet.es/es/noticias/2019/02/Avance\\_clima\\_ene2019](http://www.aemet.es/es/noticias/2019/02/Avance_clima_ene2019).
24. Wikipedia. [En línea] [https://es.wikipedia.org/wiki/Saro\\_\(Cantabria\)](https://es.wikipedia.org/wiki/Saro_(Cantabria)).
25. sigpac. [En línea] <http://sigpac.mapa.gob.es/fega/visor/>.
26. Mapas Cantabria. [En línea] <http://mapas.cantabria.es/>.
27. Mira, José Ramón Díaz de Terán. ocw unican. [En línea] <https://ocw.unican.es/pluginfile.php/1394/course/section/1770/tema15.pdf>.
28. researchgate. [En línea] [https://www.researchgate.net/figure/Figura-7-Carta-de-plasticidad-de-Casagrande-Gonzalez-de-Vallejo-2004\\_fig2\\_257478110](https://www.researchgate.net/figure/Figura-7-Carta-de-plasticidad-de-Casagrande-Gonzalez-de-Vallejo-2004_fig2_257478110).
29. ingenieriaciviltips. [En línea] <http://ingenieriaciviltips.blogspot.com/2011/06/>.
30. utest. [En línea] <http://www.utest.com.tr/es/26148/Tamizadora-Electromagnetico>.
31. paradigmamedia. [En línea] <https://paradigmamedia.org/poder-local-segunda-epoca/>.
32. Wikipedia. [En línea] [https://es.wikipedia.org/wiki/Archivo:Municipios\\_\(Cantabria\)\\_Mapa.svg](https://es.wikipedia.org/wiki/Archivo:Municipios_(Cantabria)_Mapa.svg).
33. el diario montanoso. [En línea] <http://eldiariomontanoso.es/pastor-vega-pas-se-queja-ovejas-se-esconden-las-fracturas-los-argayos/>.
34. Caminos UPM. [En línea] [http://www2.caminos.upm.es/departamentos/ict/lcweb/ensayos\\_aridos/granulometria.html](http://www2.caminos.upm.es/departamentos/ict/lcweb/ensayos_aridos/granulometria.html).
35. Wikipedia. [En línea] [https://es.wikipedia.org/wiki/Clasificaci%C3%B3n\\_granulom%C3%A9trica](https://es.wikipedia.org/wiki/Clasificaci%C3%B3n_granulom%C3%A9trica).
36. Estabilidad de taludes . [En línea] <https://estabilidad-de-taludes7.webnode.es/news/marco-teorico/>.
37. eVallejo, Luis I. González d. *Ingeniería Geológica*. Madrid : Pearson educación, 2002. 84-205-3104-9.



38. España, Instituto Geológico y minero de. *Calidad de las aguas subterráneas en la cuenca norte (Cantabria)*. Madrid : Ministerio de industria y Energía, Servicio de Publicaciones, 1984. 84-7474-243-9.

39. Gutiérrez Elorza, Mateo. *Geomorfología*. Madrid : Pearson Educación, 2008. 978-84-8322-389-5.

40. Canal, Soledad Cruz. Repositorio Unican. [En línea] 2017.

<https://repositorio.unican.es/xmlui/handle/10902/11390>.

41. González Díaz, A., y otros. link springer. [En línea] 2013.

<https://link.springer.com/article/10.1007/s10346-013-0413-5>.

42. González Díez, Alberto, y otros. sciencedirect. [En línea] 10 de 1999

. <https://www.sciencedirect.com/science/article/abs/pii/S0169555X99000471>.

43. IGME. IGME. [En línea]

[http://info.igme.es/cartografiadigital/datos/magna50/pdfs/d0\\_G50/Magna50\\_59.pdf](http://info.igme.es/cartografiadigital/datos/magna50/pdfs/d0_G50/Magna50_59.pdf).

44. —. IGME. [En línea

]

<http://info.igme.es/cartografiadigital/datos/magna50/memorias/MMagna0059.pdf>.