

# El deslizamiento de Coloradales - El Salitre en la zona de Paz de Río, Boyacá

ALFONSO PEREZ PRECIADO

Ingeniero Geógrafo, Geomorfológico, EPAM LTDA., Bogotá, Colombia

RUBEN DARIO LLINAS

Departamento de Geociencias, Universidad Nacional de Colombia, Apartado 14490, Bogotá, Colombia

PEREZ P, A. & LLINAS, R.D. (1990): El deslizamiento de Coloradales-El Salitre en la zona de Paz del Río.- Geol. Colombiana, 17, pp. 169-182, 5 figs., Bogotá.

## RESUMEN

El 6 de diciembre de 1987 se inició un gigantesco deslizamiento de tierras en la microcuenca del Zanjón de El Salitre, en el Municipio de Paz de Río, el cual interrumpió dos carreteras, destruyó varias propiedades y amenazó (amenaza aún) con represar el Río Soapaga, afluente del Chicamocha, con los consiguientes riesgos para el casco urbano del municipio, ubicado un kilómetro aguas abajo.

El deslizamiento, de cerca de 3 km de largo y 400 m de ancho, se desató a consecuencia de las actividades de extracción de hierro que se han venido llevando a cabo en la zona, la cual de por sí presenta problemas de inestabilidad potencial natural. En consecuencia, es éste un ejemplo de cómo la no consideración de los limitantes naturales del medio por parte de la minería, puede conducir fácilmente a situaciones catastróficas.

El anterior movimiento es analizado en el artículo dentro de su contexto geológico y geomorfológico, poniendo énfasis especial en la discusión de sus causas, mecanismos y consecuencias para las actividades e instalaciones humanas. Así mismo, se presenta un modelo de formulario geotécnico para la descripción de estos tipos de movimientos de terreno.

## ABSTRACT

On December 6<sup>th</sup>, 1987, an impressive landslide took place in the microbasin of Zanjón del Salitre, located within the Municipio of Paz de Río in Boyacá. Such a big landslide obstructed two roads, destroyed properties - and also threatened to dam the Río Soapaga, one of the tributaries of the large Chicamocha river, creating a potential tragedy over the little town located 1 km down the river.

The 3 km long and 400 m wide landslide was caused by the iron mineral exploitation around the area. This is a typical historic case teaching that a careless mining operation, could easily be converted into a tremendous urban disaster.

The above land motion was studied from the geological and geomorphological points of view. Special emphasis on the causes, mechanisms to prevent these land movements, and consequences is made for the human activities.

As a contribution to prevent this kind of potential landslides a geotechnical model questionarie is submitted for consideration.

## I.A. ANTECEDENTES

El deslizamiento de Coloradales- El Salitre se inició el 6 de Diciembre de 1987 en al área de Zanjón del Salitre y rápidamente progresó hasta alcanzar proporciones que causaron la natural alarma de la población local, en atención a que al llegar el material removido hasta el Río Soapaga, éste amenazaba con represarse, con riesgos evidentes para la cabecera de Paz de Río, localizada unos 1250 m aguas abajo.

Ante los peligros que representaba el fenómeno, las autoridades locales buscaron y lograron el apoyo de autoridades nacionales en el control del fenómeno, tarea que se prosiguió durante la mayor parte de 1988. El propio Municipio de Paz de Río contrató un estudio sobre los orígenes del deslizamiento, su dinámica y su evolución previsible, cuyo resumen es objeto del presente artículo.

El deslizamiento está ubicado en el Municipio de Paz de Río (Boyacá), en la región centro-oriental de Colombia, aproximadamente a los 6° de latitud Norte y 72° 45' de longitud Oeste de Greenwich, a unos 1250 m antes del casco urbano de Paz de Río, por la carretera que une a esta población con Belén y Duitama (veáse Fig. 1).

## I.B. CARACTERISTICAS GEOMETRICAS

El deslizamiento de Coloradales- El Salitre tiene longitud aproximada de 2976 m entre su pie y la corona.

El se extiende desde los 2276 m de altitud en su parte más baja, sobre el Río Soapaga, hasta los 2956 m en su corona, para una diferencia total de nivel de 680 m.

La pendiente promedio es entonces del 22.8%. Sin embargo, en algunos sectores, la pendiente es más alta, entre el 37 y el 43%, especialmente en el sector de la carretera a Sátiva Sur e inmediatamente aguas abajo de la corona. Así mismo, la masa deslizada presenta pendientes cercanas al 10% en sus partes más suaves.

El área total cubierta por el deslizamiento es de 59.3 hectáreas y el volumen de la masa removida, asumiendo un espesor promedio de 4 m es de unos 2.4 millones de metros cúbicos.

## I.C. CUADRO GEOLOGICO Y GEOMORFOLOGICO

### I.C.1. Estratigrafía y tectónica.

De acuerdo con Lobo-Guerrero & Rodríguez (1988), en el área de influencia del deslizamiento afloran sedimentos de las formaciones Socha Superior (Tss), Picacho (Tp) y Concentración (Tc), del Terciario Inferior, junto con depósitos de vertiente y torrenciales del Cuaternario.

La Formación Socha Superior aflora en un pequeño sector sobre la carretera Belén-Paz de Río, entre el deslizamiento y la cabecera de este último Municipio. Ella está constituida principalmente por arcillolitas y limolitas poco compactas, en bancos de hasta 20 m, intercaladas con areniscas arcillosas amarillo-verdosas de grano fino, en bancos de hasta 7 m de espesor.

La Formación Picacho (Tp) aflora igualmente a lo largo de la carretera a Belén, pero al norte del deslizamiento. Ella está constituida por un nivel inferior de areniscas conglomeráticas y areniscas de grano fino, y por un nivel superior de arcillolitas intercaladas con bancos de arenisca.

La Formación Concentración (Tc) es la principal del área y rodea en su mayor parte la zona del deslizamiento. Ella está constituida por areniscas conglomeráticas, seguidas por bancos de arcillolitas y en la parte superior bancos de mineral de hierro oolítico, que es el que se explota por parte de Acerías Paz de Río.

Los sedimentos Cuaternarios (Q) corresponden al material del deslizamiento, localizado a todo lo largo del Zanjón de El Salitre. En el momento del deslizamiento, estos materiales estaban constituidos por material coluvio-terрencial y por depósitos del material de descapotado que recubría los mantos de hierro explotados por Acerías Paz de Río.

Con relación a éste último punto, Lobo-Guerrero & Rodríguez (1988), afirman que posiblemente no existían depósitos de material descapotado en el Zanjón, pero un examen atento de las fotos aéreas del área, correspon-

dientes a distintas fechas, muestra que efectivamente, el Zanjón de El Salitre sí fue sitio de importantes acumulaciones de descapotado e incluso de variaciones en el patrón de drenaje principal de la microcuenca. Estos aspectos son mostrados en secuencia de las figuras 2 a 4, correspondientes a la fotointerpretación del estado de la microcuenca en varias fechas.

Desde el punto de vista estructural, la región se caracteriza por un intenso fallamiento. Las principales fallas conocidas son las de El Salitre, que va a lo largo del Zanjón del mismo nombre; la de Sibaría y la de El Morro. Igualmente, todas las rocas y especialmente las areniscas, muestran un grado de diaclasamiento y fracturación alto, lo cual facilita la ocurrencia de derrumbes y otros fenómenos ocasionados por la gravedad.

### I.C.2. Geomorfología

El mapa de la Fig. 5 muestra las principales unidades morfológicas y morfogenéticas que se observan en la microcuenca del Zanjón de El Salitre. Ellas son:

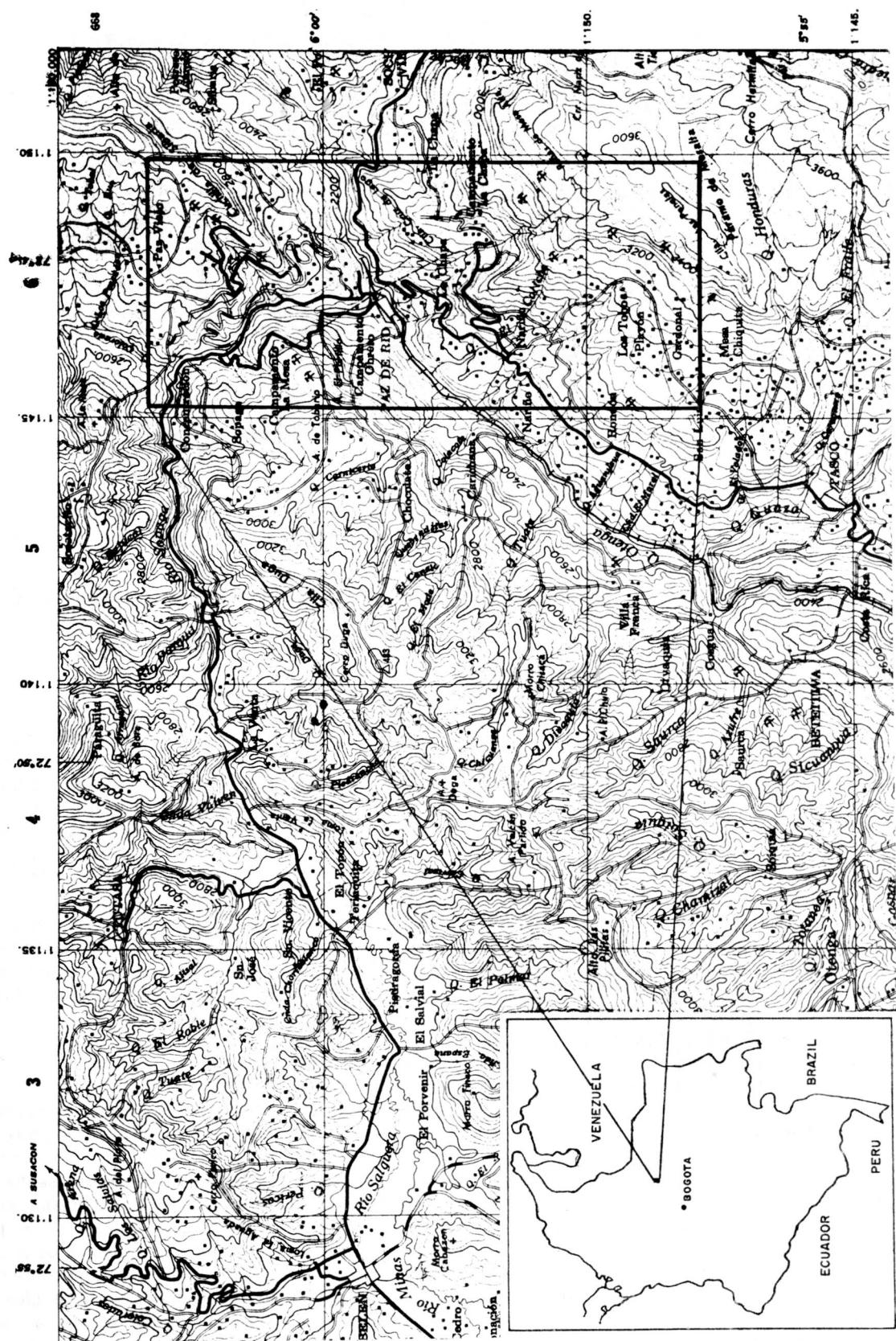
- Los planos estructurales en hierro, expuestos a consecuencia de la explotación minera, los cuales buzan en forma concordante con la pendiente hacia el interior del Zanjón, dirigiendo de esta manera el drenaje de las aguas lluvias al centro del vallecito. El proceso dominante sobre estos planos es el escurrimiento difuso intenso, aunque sin poder morfogenético alguno, dada la resistencia de los mantos de hierro oolítico.

- Los escarpes y relieves de arenisca, los cuales constituyen los relieves más sobresalientes del área. Aunque ellos no afloran dentro del zanjón, sí conforman parte de sus bordes externos y son la fuente de alimentación de los derrumbes que se construyen a sus pies.

- Los escarpes muy fuertes en arcillolitas, presentes especialmente en el cañón del Río Soapaga. Por presentar un relieve muy fuerte y un buzamiento contrario a la pendiente; son comunes aquí los desplomes o desprendimientos y derrumbes. Además, sobre ellos actúa el escurrimiento difuso intenso generalizado y el escurrimiento concentrado, el cual origina frecuentes cárcavas.

- Las laderas arcillosas suaves, presentes sólo en el extremo noroccidental de la microcuenca, aunque ellas se desarrollan preferencialmente por fuera de la misma (sectores de Paz Vieja, Tiza y Piedragorda). Estas laderas están ocupadas por cultivos y pastos y sus procesos actuales son la reptación y soliflucción lenta y generalizada de poca intensidad. Sin embargo, la unidad presenta índices de una inestabilidad potencial alta, manifestada en cicatrices de movimientos de remoción en masa de considerables dimensiones, uno de los cuales destruyó en 1934 la antigua cabecera municipal de Paz Vieja (antiguo Paz de Río).

- Los derrubios de vertiente, localizados de preferencia al pie de los escarpes, por fuera de la microcuenca del zanjón.



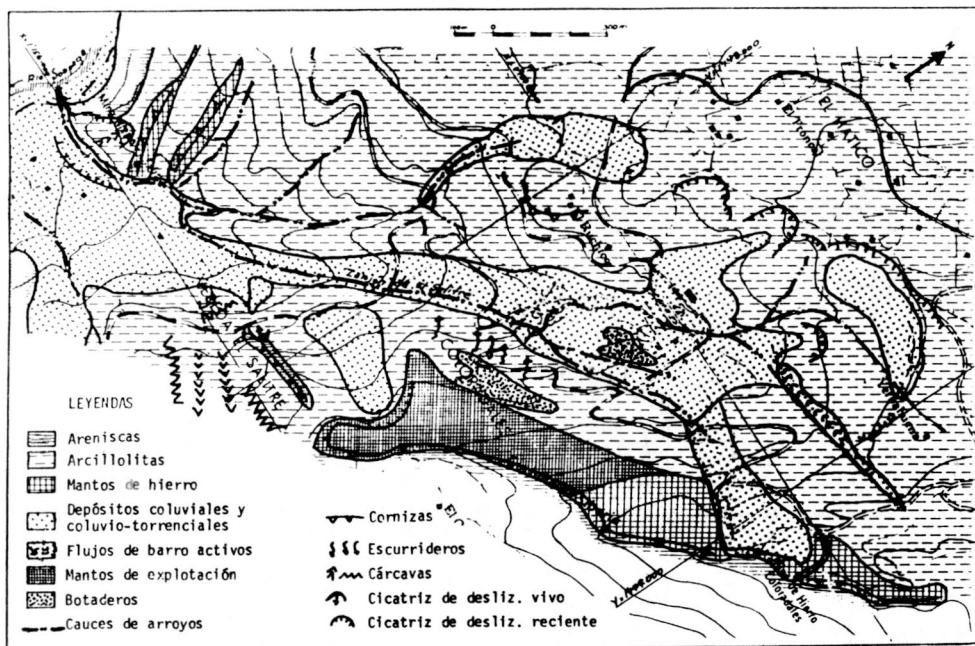


Figura 2. Situación del zanjón en 1956. Fotos 115-116. Vuelo C-780. Escala 1:13.000

- Los flujos de barro, o depósitos de movimientos en masa recientes, tales como derrumbes, deslizamientos, soliflucción líquida y otros. Al interior de la microcuenca del Zanjón del Salitre, estos depósitos y las cicatrices correspondientes son abundantes, lo que atestigua una inestabilidad potencial alta. Antes del deslizamiento, ellos estaban imbricados con pequeños depósitos torrenciales del zanjón y afloramientos de arcillolitas de la Formación Concentración, la cual les servía de lecho.

#### I.D. EL CUADRO HIDROGEOMORFOLOGICO

En toda la zona, el escurrimiento predominante es el superficial, en razón de la naturaleza arcillosa de la mayor parte de los terrenos y al fuerte relieve. A esto se debe que los procesos más generalizados en el área sean la erosión por escurrimiento difuso intenso y por escurrimiento concentrado (erosión en surcos y cárcavas). Le sigue en importancia el escurrimiento hipodérmico, responsable de los procesos de soliflucción laminar y de numerosos deslizamientos. El escurrimiento subterráneo (profundo) no parece importante; sin embargo, en las partes más altas, constituidas por areniscas, el agua lluvia se infiltra a través de las numerosas fracturas y diaclasas y luego resurge en pequeños manantiales en el Zanjón de El Salitre. Esto último sobre todo ocurre en la vertiente oriental de la microcuenca (Cuchilla de Sibaría), donde los estratos buzan paralelos a la pendiente del terreno.

En el área del deslizamiento y por estar éste en plena actividad, predomina el escurrimiento hipodérmico, gracias a las numerosas cicatrices, grietas y otros obstáculos que favorecen la infiltración. Obviamente, este escurrimiento es el motor fundamental del movimiento

de los terrenos en la forma como se presenta hoy en día.

#### I.E. DESCRIPCION DEL MOVIMIENTO

##### I.E.1. Aspecto general.

Como se ha dicho en varias oportunidades, el movimiento continua aún activo (31-XII-88). El hecho de que se detenga momentáneamente El flujo de los terrenos no implica que el fenómeno esté estabilizado. La evaporación ha resecado los terrenos superficiales, por lo cual su flujo se ha detenido. Sin embargo, con las lluvias suficientes, el flujo podrá iniciarse nuevamente bajo las distintas modalidades presentes en el área.

En consecuencia, los terrenos presentan un aspecto fresco, de color pardo-amarillento o grisáceo, según que domine en la superficie el material alterado del terreno natural o el material de descapote, este último constituido por una arcillolita grisácea.

##### I.E.2. Cabeza del movimiento

De acuerdo con testimonios de algunos campesinos y del propio Alcalde de Paz de Río el movimiento se inició en una pequeña zona de acumulación de descapote localizada frente a una casa campesina (sector I del deslizamiento), la cual, previamente a la acumulación de materiales, ya presentaba grietas.

En este sitio se produjo un deslizamiento de tipo rotacional, cuyos materiales, altamente saturados de humedad, iniciaron luego un flujo parcialmente plástico y parcialmente líquido, el cual contaminó a los demás terrenos localizados aguas abajo (sector II del deslizamiento). En este orden de ideas, la longitud de la corona

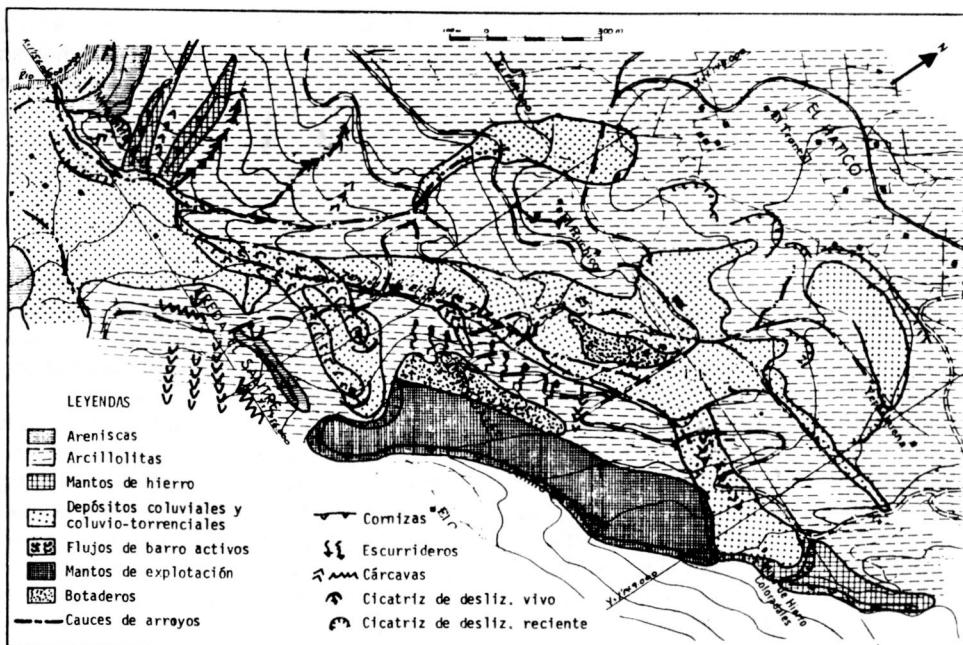


Figura 3. Situación del zanjón en 1957. Fotos 50-51-52. Vuelo C-802. Escala 1:16.000

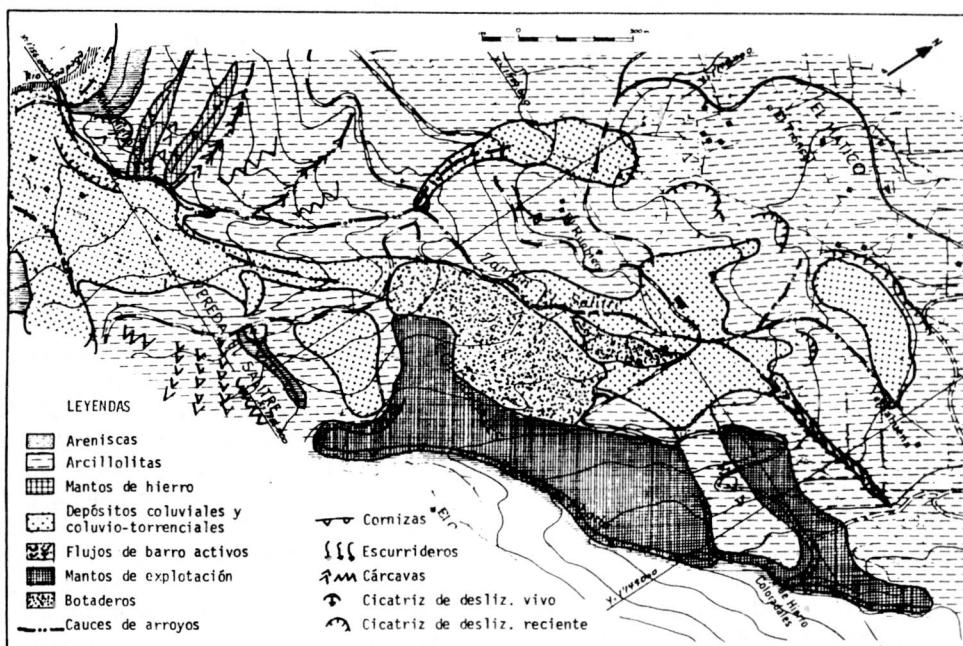


Figura 4. Situación del zanjón en 1976. Fotos 205-206. Vuelo C-1624. Escala 1:38.000

del arranque principal es relativamente reducida, de tan solo unos 280 m de longitud. Sin embargo, una vez el movimiento se generalizó a todo el zanjón, aparecieron nuevas superficies de cizallamiento a todo lo largo del movimiento. Estas rupturas se produjeron por empuje del material deslizado o fluente de aguas arriba.

La longitud de la zona erosionada es de 180 m, el ancho de 120 m y la altura del muro cicatriz es de 15 m, en promedio. La pendiente de la zona erosionada es de

21%. El área de la superficie principal de erosión (del arranque principal) es de 10.600 m<sup>2</sup> y el volumen removido en el arranque es de cerca de 159.000 m<sup>3</sup>.

#### I.E.3. Cuerpo del movimiento

Antes de hacer la descripción del cuerpo del movimiento es necesario insistir en la naturaleza compleja del fenómeno. En efecto, este no es un deslizamiento

simple, en el cual un determinado volumen de material se desplaza de su sitio original deslizándose sobre otro y se acumula o se presenta en un área localizada inmediatamente al pie, a veces a una distancia muy corta. En el presente caso, este deslizamiento se produjo sólo en la parte superior (arranque principal) en una superficie relativamente reducida (cerca de 1 ha.), pero el material removido empujó el material localizado inmediatamente aguas abajo e inició un proceso progresivo y relativamente rápido que llevó a la desestabilización de todo el zanjón. La presencia de materiales o niveles altamente saturados de humedad hizo que parte del material empujado empezara también a fluir en forma plástica y/o líquida, en un espacio de poca anchura y fuerte pendiente, lo que conllevó a la generalización del flujo. El empuje también hizo que bolsas de agua cautivas, que posiblemente se formaron a raíz de las acumulaciones de descapote, se liberaran y contribuyeran así a la saturación y al flujo de los materiales. En algunos sectores, como se anotó anteriormente, el empuje ocasionó la formación de nuevas superficies de ruptura, con los consiguientes deslizamientos y/o desplazamientos de materiales.

Esta interpretación se apoya en las formas que actualmente presenta el cuerpo de deslizamiento. En efecto, se observan nítidamente cinco sectores y un sexto correspondiente a un deslizamiento lateral reactivo.

El sector I corresponde al cuerpo del "arranque principal" ya descrito en la sección I.E.2. En él se observa aún nítidamente la masa deslizada, aunque ella ya ha sido afectada por procesos posteriores de erosión hídrica superficial y soliflucción plástica.

El sector II se inicia inmediatamente aguas abajo del anterior, coincidiendo con un incremento considerable de la pendiente. La dinámica de este sector es la de un flujo de barro típico, con muy poco o ningún material de bloques. Parece ser que en la época de mayor humedad también presentó flujo líquido, por lo menos parcialmente. Este sector va hasta la cota 2730 aproximadamente.

El sector III presenta nuevamente una dinámica de deslizamiento. No hay señales de que el flujo líquido y/o plástico hubieran sido dominantes. En los bordes se observan bien las superficies de ruptura con el material adyacente. Este sector estaba en gran parte reforestado en eucaliptos, los cuales fueron volcados y/o enterrados durante el movimiento. Llega aproximadamente hasta la cota 2620 m y presenta una pendiente relativamente suave.

El sector IV se inicia en seguida del anterior, aproximadamente en el sitio de paso de la carretera a Sátiva Sur y, como el II, coincide con un incremento notorio en la pendiente. La dinámica vuelve a ser aquí la de un flujo de barro. Este sector se prolonga aproximadamente hasta la cota 2370, cerca a la carretera actual a Paz de Río.

El sector V constituye la pata del movimiento y va hasta el propio Río Soapaga. La dinámica aquí es la de un deslizamiento "seco", sin o con poca lubricación hídrica.

ca. En efecto, la enorme presión ejercida por la masa deslizante y fluyente superior ha empujado este sector hacia el río, occasionando la formación de numerosas grietas en los materiales rocosos y depósitos pre-existentes. Este sector en gran parte ha sido cubierto posteriormente con el material removido por los bulldózeres en la parte inmediatamente superior.

Finalmente, se ha distinguido un sector VI, correspondiente a un antiguo deslizamiento en plancha localizado sobre la vertiente oriental de la microcuenca, el cual se reactivó parcialmente a partir del 6 de diciembre. Aquí se observa huellas de soliflucción líquida y plástica, aunque el espesor de la capa afectada es mucho menor que en el deslizamiento principal.

De los sectores identificados, el II y el IV son los que presentan la mayor humedad y por tanto los más inestables. Además ellos presentan un corredor inicial angosto y pendiente que favorece la concentración de aguas de escorrentía, aunque en sus partes inferiores la pendiente se suaviza, favoreciendo la infiltración, que a su vez alimenta las áreas deslizadas localizadas inmediatamente aguas abajo.

## I.F. CAUSAS DEL MOVIMIENTO

Las causas del fenómeno se pueden agrupar así:

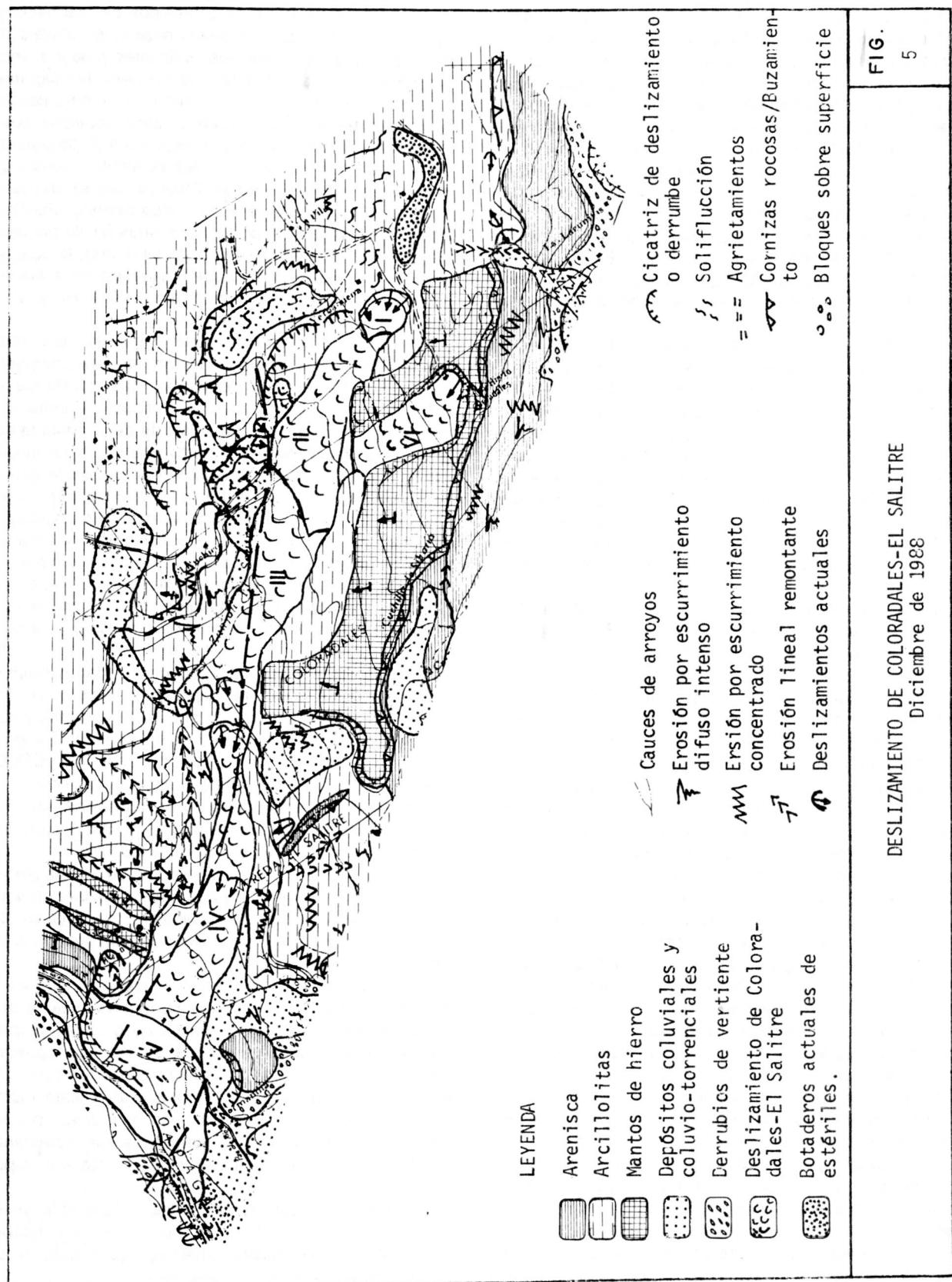
- Causas de tipo geológico
- Causas de tipo físico-químico
- Causas de tipo hidrogeomorfológico
- Causas de ingeniería de minas

### I.F.1. Causas de tipo geológico

En el área afectada, y más exactamente en el sitio donde fue interrumpida la carretera Paz de Río - Sátiva Sur, se reconoció la presencia de una zona de fallamiento, manifiesta por la presencia de intenso cizallamiento, espejos de fricción y estructuras flaser en las lutitas y areniscas de la Formación Concentración. Esta falla corresponde a la llamada por INGEOMINAS falla de El Salitre. No hay evidencias superficiales de que se trata de dos fallamientos paralelos, sino más bien se trata de una falla con una zona de cataclasis de 200 m de amplitud. Estas fallas, como lo anota Lobo-Guerrero & Rodríguez (1988), son antiguas y no evidencian actividad reciente. Aunque dicha falla ha producido fracturación y milonitización de las rocas de la Formación Concentración, ella no es la causante de la abundancia de materiales sueltos y descompuestos ya que gran parte de ellos corresponden a depósitos torrentiales y aluviales, a alteritas desarrolladas *in situ* y a depósitos de materiales de descapote.

En consecuencia, la geología de la zona, y más específicamente la estructura, es un factor de la inestabilidad de la zona, pero no es la causante directa del desarrollo del fenómeno.

### I.F.2. Causas de tipo físico-químico



El lugar donde está ubicada la corona del deslizamiento corresponde al conjunto medio de la Formación Concentración, donde Alvarado & Sarmiento (1944) reportan presencia común de yeso. Sin embargo, aunque es un clásico mineral evaporítico, no es propiamente yeso, sino que se trata de un sulfato de magnesio hidratado con 7 moléculas de agua ( $MgSO_4 \cdot 7H_2O$ ) conocido como epsomita, identificación hecha con aceites de inmersión al microscopio petrográfico de doble polarización.

Este sulfato se origina por una reacción donde el azufre lo aporta el sulfuro de hierro (pirita) presente en las lutitas y el magnesio diseminado. Estos dos elementos, en presencia de agua lluvia o de escorrentía, asimilan moléculas de agua, precipitando la epsomita por un proceso de evaporación.

Dentro de los elementos químicos comunes, varios tienen un poder dispersante de las arcillas que constituyen la lutitas. El de mayor poder es el sodio (Na); le siguen el magnesio (Mg), luego el potasio (K) y después el calcio (Ca); por lo tanto la altísima presencia de epsomita en este conjunto medio de la Formación Concentración que constituye el estéril o capote que cubre los bancos de óxido de hierro oolítico y que tiene que ser removido para la explotación, ha venido causando fenómenos de infiltración de aguas lluvias y de escorrentía superficial por la continua dispersión de las arcillas.

La presencia de epsomita se pudo comprobar en toda la parte alta de la zona afectada, donde el fenómeno desarrolló su mayor amplitud. Este mineral es de una solubilidad altísima en agua, lo que permite, al ser disuelto por el agua lluvia o escorrentía, infiltrarse y de ese modo el magnesio ejerce su poder de alta dispersión en las arcillas formando en ellas muchísimos microcanales, fenómeno conocido como "piping" que es la causa de la altísima infiltración. Este proceso afecta principalmente los horizontes o niveles superiores del suelo, a los que vuelven porosos y poco cohesivos. Las superficies húmedas, al ser expuestas a los rayos del sol, precipitan en forma instantánea grandes cantidades de cristalitos blancos de epsomita que genera una especie de pátina o cubierta blanca que cubre inclusive hasta los niveles de hematita oolítica.

Los análisis químicos hechos en muestras de agua tomadas junto al sitio donde se adelanta una perforación, muestran contenidos superiores a 6.500 mg/l en magnesio. Este promedio necesariamente produce un pH tan bajo que no permite el desarrollo de una vegetación que pueda detener el fenómeno, por lo cual la alta infiltración continuará manteniendo saturados los materiales inconsolidados y porosos y el peligro de nuevos deslizamientos seguirá latente.

Para comprobar los resultados de los análisis al microscopio y conocer otras características de los suelos del área de deslizamiento, se solicitaron varios análisis de suelos al laboratorio del Instituto Geográfico Agustín Codazzi. Estos análisis muestran que los horizontes removidos presentan unas bases totales

superiores a la capacidad catiónica de cambio, a causa principalmente de los altos contenidos de magnesio y, secundariamente, de calcio. Así mismo, el análisis de salinidad para estos mismos horizontes muestra unos contenidos altos de sulfatos y de cationes de magnesio y calcio. De las muestras analizadas, la primera corresponde a los suelos desarrollados sobre materiales coluvio-torrenciales del zanjón y la segunda a materiales de descapote encontrados en el deslizamiento (suelo con numerosos fragmentos de arcillolitas grises sin descomponerse aún). El análisis de salinidad permitió clasificar a estos suelos como ligeramente salinos S1 (la primera) y/o en el límite de salinidad L (la segunda), lo cual es lógico si se tiene en cuenta que la muestra del suelo del zanjón ha tenido más tiempo para alterarse y enriquecerse en sulfatos de magnesio.

La evidencia de dos horizontes o niveles netamente diferenciables en el zanjón: uno poroso, descompuesto y aparentemente muy permeable que constituye el material deslizado y otro más compacto y cohesivo, que constituye la base o superficie de deslizamiento del anterior, obligó a realizar algunos análisis físico-mecánicos, cuyos resultados muestran por una parte que el horizonte inferior es de textura arcillolimosa, con contenidos de arcilla superiores al 45%, mientras el material deslizado tiene textura franco-arcillolimosa, con contenidos de arcilla del orden del 31%. Así mismo, la porosidad es inferior en los horizontes inferiores. El índice de plasticidad alcanza valores del orden de 18% en los horizontes inferiores (suelos altamente plásticos), mientras en los superiores son del orden de 14 y 15% (moderadamente plásticos). La conductividad hidráulica alcanza valores bastante bajos (2.31 cm/h) en los horizontes inferiores, mientras que en los terrenos deslizados ella alcanza valores de hasta 7.84 cm/h. De igual manera, el coeficiente de extensibilidad lineal (COLE) alcanza valores más altos en los horizontes inferiores.

Ensayos de cohesión dieron para los horizontes inferiores valores mayores a 1 Kg/cm<sup>2</sup>, mientras para los superiores ellos son del orden de 0.2 a 0.5 Kg/cm<sup>2</sup>.

Así mismo, los análisis de mineralogía de arcillas permitieron comprobar que en los horizontes inferiores predominan las arcillas del tipo caolinitico, mientras en los superiores predomina la caolinita, pero con presencia de gipsis y montmorillonita.

Todos estos análisis confirman el hecho de que en el desarrollo del deslizamiento influyó la presencia de dos capas superpuestas de materiales de distintas propiedades mecánicas, en relación a su vez con características físico-químicas y mineralógicas diferentes. De especial importancia es la presencia de sulfato hidratado de magnesio en proporciones muy altas, por su papel sobre la dispersión de las arcillas y el incremento en la porosidad, sobre todo en los horizontes superiores.

Esta situación constituyó un factor favorable en el desarrollo del fenómeno, pero no fue el responsable directo de su desencadenamiento, sobre todo si se consideran las proporciones alcanzadas.

### I.F.3. Causas hidrogeomorfológicas

Estas tienen una estrecha relación con la disposición de las capas geológicas que afloran en las laderas de la microcuenca y con el tipo o tipos de escurrimiento predominantes.

Con relación al primer factor es necesario anotar que el buzamiento de las capas de la vertiente oriental es conforme con la pendiente del terreno y que incluso en una buena parte de la misma afloran superficies estructurales de roca dura dejada así por la minería del hierro. Esta estructura orienta y acelera el escurrimiento del agua hacia el zanjón, en tal forma que en poco tiempo el agua de un aguacero llega hasta el deslizamiento. Además, la fracturación de las rocas, especialmente de las areniscas, facilita en algunos sectores la infiltración de las aguas lluvias y su posterior resurgencia en la propia zona del deslizamiento, situación que se observa en la actualidad.

Por otro lado, la ausencia de un drenaje adecuado, la topografía desordenada y la presencia de numerosas grietas en la superficie del deslizamiento, favorece la rápida infiltración de las aguas lluvias, lo que conlleva a la saturación y ulterior flujo de los terrenos, sobre todo en los sectores II y IV del deslizamiento.

Las condiciones hidrogeomorfológicas fueron y seguirán siendo favorables al desarrollo del movimiento de tierra, pero obviamente, tampoco es posible afirmar que hayan sido las responsables directas del desencadenamiento del mismo.

### I.F.4. Causas de ingeniería de minas

Las actividades mineras que se desarrollan en la microcuenca del Zanjón de El Salitre contribuyeron de dos maneras al desarrollo del fenómeno:

- El uso de explosivos en la explotación tanto subterránea como a cielo abierto del hierro.
- El depósito de materiales de descapote directamente sobre la zona del zanjón.

El método utilizado para la explotación subterránea y a cielo abierto, necesariamente requiere el uso de explosivos cuyas ondas afectan el material que se encuentra en sus cercanías y genera microfracturas, así como también aumenta el tamaño de los microcanales que forma el fenómeno "piping" ya mencionado.

Este sistema de explotación también disminuye el soporte de los materiales que descansan sobre la zona del túnel haciéndolos inestables, constituyendo así otro factor acelerante del deslizamiento.

En cuanto a los materiales de descapote, existen evidencias suficientes de que durante mucho tiempo ellos fueron arrojados directamente sobre el zanjón. Estas prácticas alteraron no sólo la topografía original sino el drenaje superficial de la microcuenca, ya que cambiaron totalmente el curso original del Zanjón de El Salitre (véase figs. 3-4). Además, y como consecuencia de la alteración del drenaje superficial y del peso de los materiales arrojados (varios millones de toneladas), se

tuvo que modificar el patrón de drenaje superficial y subterráneo. De esta manera, poco a poco se fueron formando bolsas de agua cautiva y zonas de saturación hídrica que "incubaron" durante años el movimiento. En tales condiciones solo faltaba "prender el motor de arranque", el cual fue activado por el deslizamiento de proporciones modestas que se presentó en lo que se llamó anteriormente "cabeza del arranque principal" (sector I).

Se puede afirmar entonces que la actividad minera que llevó a cabo Acerías Paz de Río tanto en superficie como bajo tierra en el área del Zanjón de El Salitre fue la responsable directa del desencadenamiento del movimiento de tierra iniciado el 6 de Diciembre de 1987 y que aún está activo. La favorabilidad de las demás condiciones geológicas, físico-químicas e hidrogeomorfológicas solo facilitaron el desarrollo del fenómeno.

Sin duda alguna, la omisión de considerar los limitantes naturales del medio a las actividades mineras, fue la principal responsable de la catástrofe.

De haberse considerado el papel desestabilizador de la epsomita presente en los materiales de descapote y en el propio suelo del Zanjón, junto con los demás factores desfavorables a que se hizo referencia anteriormente (secciones I.F1 a I.F.3) es bien posible que se hubiera escogido otro sector como depósito de los estériles de la mina de Coloradas.

### I.G. EVOLUCION PREVISIBLE. RECOMENDACIONES

El movimiento seguirá activo hasta que encuentre un nuevo nivel de equilibrio bien sea en forma natural o mediante la ayuda de obras de control.

La evolución natural implica, sin embargo, riesgos importantes, ya que un invierno de proporciones modestas puede acelerar el fenómeno y ocasionar el taponamiento del cauce del Río Soapaga, cuya ruptura posterior causaría pérdidas materiales cuantiosas, y posiblemente humanas, en el casco urbano de Paz de Río.

La estabilidad del fenómeno es difícil de lograr en el corto plazo, sobre todo por la complejidad del mismo. Ella debe estar basada en dos tipos de obras complementarias:

- Establecimiento de un nuevo sistema de drenaje, mediante la construcción de una canal central principal a lo largo del zanjón, y de varios canales en espina de pescado que desembocan en el anterior.

- Paralelamente, es necesario remodelar totalmente la topografía, con el fin de eliminar depresiones y áreas de infiltración y dar una mayor compactación al terreno. Esta compactación tiene evidentemente sus límites en cuanto a la efectividad en el tiempo, dada la presencia de sales dispersantes en los suelos del área. Se sugiere no obstante que a los interfluvios entre canales se les dé una forma convexa y no plana, para disminuir la infiltración.

Una vez adelantadas estas obras sería útil regar semillas de bejucos y otras plantas herbáceas o leño-

sas bajas nativas, que puedan desarrollarse rápidamente. No son recomendables las reforestaciones clásicas, puesto que estas plantaciones favorecen la infiltración sobre todo en sus etapas iniciales, cuando la situación es más crítica. Dado el espesor de los terrenos afectados, tampoco es útil pensar en árboles, puesto que ellos no tendrán ninguna oportunidad de controlar el fenómeno y su peso puede contribuir por otra parte a desestabilizar los suelos poco consolidados.

Adicionalmente sería útil:

- Estudiar la suspensión de la explotación superficial y subterránea del hierro dentro de la microcuenca del Zanjón de El Salitre, o cambiar totalmente los sistemas de explotación, para evitar la interferencia con el drenaje y los suelos de la microcuenca.

- Buscar otros sitios para la acumulación de los materiales de descapote, diferentes a los de Uche I y II, por estar localizados en la parte alta de las microcuenca del Zanjón de El salitre y de la quebrada de El Hatico, que drena toda la zona de Paz Vieja, ya que, por tratarse de zonas potencialmente inestables, ellas podrán convertirse en herederas de potenciales movimientos en masa similares al de Coloradales - El Salitre, debido por un lado al papel de la epsomita proveniente del material de estos promontorios, que irrigará los terrenos de la microcuenca aludida, y por otro al sobre peso que representan estos materiales propensos a la soliflucción.

- Es necesario por otra parte desarrollar una estrecha vigilancia sobre el deslizamiento, con el fin de observar la formación de áreas de saturación hídrica (pantanitos y charcos) y proceder a drenarlos rápidamente. De igual manera para observar el avance de la pata del deslizamiento sobre el cauce del Río Soapaga con el objeto de controlar rápidamente su altura.

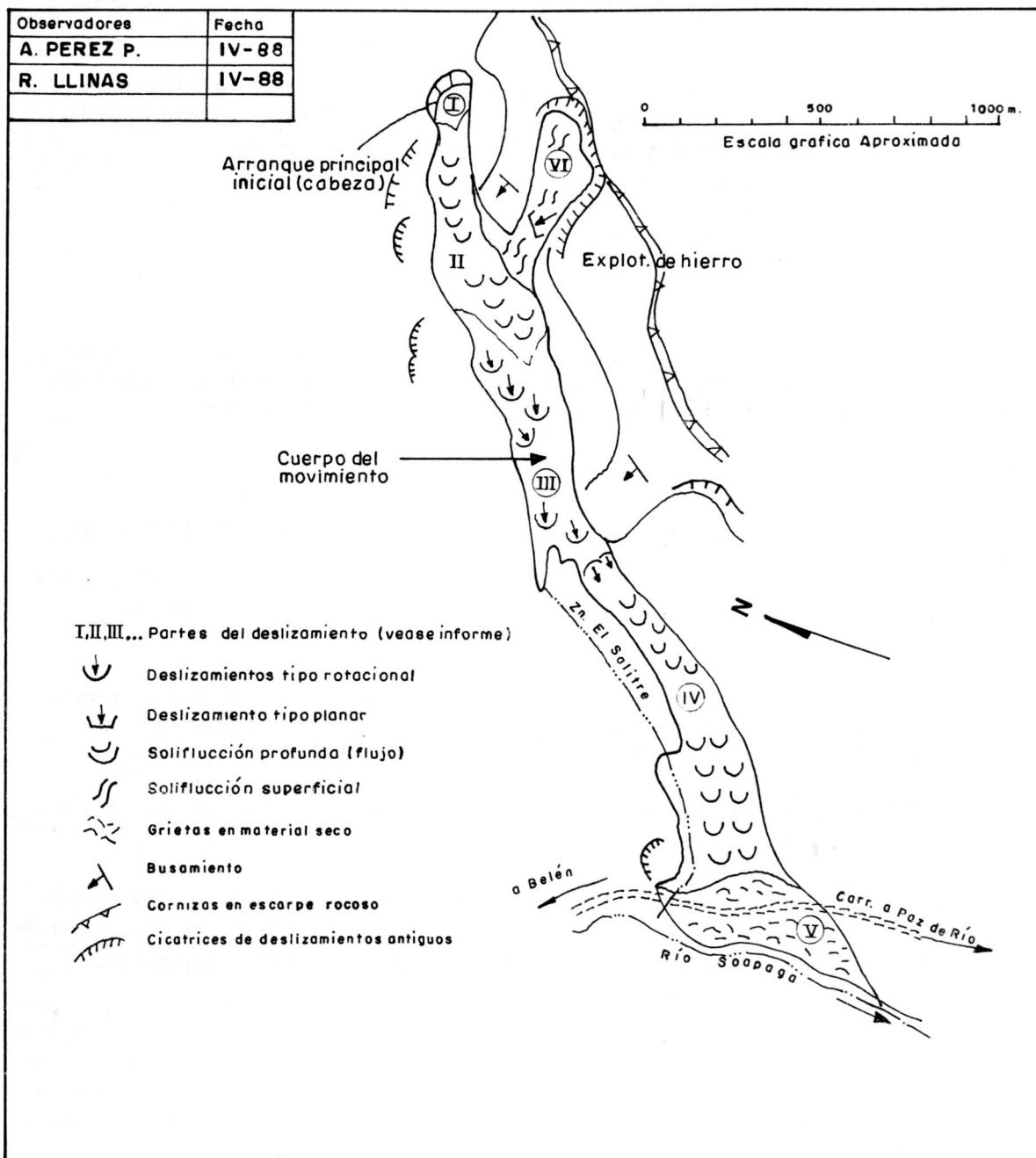
## REFERENCIAS BIBLIOGRAFICAS

- ALVARADO, B. & SARMIENTO, R. (1944): Informe sobre los yacimientos de hierro, carbón y caliza de la región de Paz de Río (Boyacá).- Serv. Geológico Nacional. Informe N° 648. Bogotá.
- BIROT, P. (1974): Etude quantitative des processus égissants sur les versants.- Z. Geomorphologie. S. 9 Paris France.
- CRESPO, V.C. (1979): Mecánica de suelos y cimentaciones Ed. Limusa. México.
- HUMBERT, M. (1972): Les mouvements de terrains.- Bull. du B.R.G.M. Section III N° 1 p. 13-28, 6 figs. Paris, France.
- LECARPENTIER, C., KHOBZI, J., PEREZ-PRECIADO, A. & OSTER, R. (1977): La erosión de tierras en Colombia. Con mapa de procesos dinámicos.- INDERENA - Banco de La República. Bogotá. 55 p. y mapa.
- LOBO-GUERRERO, A. & RODRIGUEZ, A. (1988): Análisis geológico del deslizamiento de "El Salitre", Municipio de Paz de Río.- INGEOMINAS. Bogotá.
- THOURET J. C. & PEREZ-PRECIADO, A. (1982): Contribución de la metodología de la zonificación de los procesos de erosión en los Andes del Norte: ensayos de clasificación de formas, procesos y mecanismos geomorfológicos dinámicos en los Andes Centrales de Colombia. - I Sem. sobre erosión en los Andes del Norte. Bogotá, D.E.

Manuscrito recibido, Mayo de 1990

## FICHA DESCRIPTIVA DE MOVIMIENTOS DE TERRENO

1. LOCALIZACION Plancha No. 172-I-B. I Escala 1:10.000 Plancha No. _____ Escala _____ No. 1			
Vereda <u>Coloradales</u>	Municipio <u>Paz de Río</u>	Departamento <u>Boyacá</u>	
Coordenadas	Punto mas alto de partida x <u>1' 157 284</u>	y <u>1' 149.200</u>	z <u>2.956</u> (m.)
	Punto más bajo del frente x <u>1' 155. 368</u>	y <u>1' 147.052</u>	z <u>2.276</u> (m.)
Fotografías aéreas	FAL-171 F-05 No. 06 a 10 esc. 1:9950 aprox.		
Fotografías personales	<u>Varios</u>		
Otras referencias _____	Tipo de movimientos <u>Deslizamiento</u>		



## DESCRIPCION

### 1 LOCALIZACION

- 1.1 Situación geográfica (puntos de referencia) Municipio de Paz de Río (Boy) a unos 1250 m. aguas arriba de cabecera municipal, sobre el Río Soapaga.  
1.2 Medios y rutas de acceso Duitama - Belén - Paz de Río o Sogamoso - Tasco - Paz de Río, por carretera en buenas condiciones

### 2. MARCO GEOGRAFICO GENERAL DEL MOVIMIENTO

- 2.1 Topografía general Quebrada. El deslizamiento ocupa la parte más baja del valle del Zanjón El Salitre.

- Pendiente aproximada 22.8% (área deslizada) Orientación Noreste  
2.2 Vegetación natural Transformada en su totalidad. En su lugar hay restos de bosques de eucaliptos.

- 2.3 Ocupación humana (habitad, infraestructura, cultivos, etc.) La principal actividad económica es la minería. En las laderas adyacentes se explota mineral de hierro a cielo abierto. Por debajo hay túneles y galerías subterráneas, con el mismo fin.

- 2.4 Accidentes meteorológicos Clima de tendencia seca y aguaceros violentos.

- 2.5 Clima local Frío y de tendencia seca.

### 3. MARCO GEOMORFOLOGICO

#### 3.1 Formaciones superficiales

- Naturaleza y edad (depósitos detriticos, morrénicos, coluviones, alteritas, etc.) Depósitos de vertiente y depósitos torrenciales de edad cuaternaria acumulados a lo largo del Zanjón de El Salitre. Además, depósitos de material de descapote de la minería de hierro.

- Composición granulométrica general Arcillolimosa dominante.

- Espesor (en m.) 4 - 6 m. Extensión 51.2 has. (depósito).

- 3.2 Substratos  
Litología y estratigrafía Formación Concentración (Tc) del Terciario Inferior, compuesta por areniscas, arcillolitas (las más importantes en el área) y hierro oolítico.

- Estructura general Una falla cruza a todo lo largo del zanjón. La estructura es complicada en el detalle, con numerosos pliegues. Buzamiento Hacia NO

- Presencia de fallas Falla de El Salitre. Grado de esquistosidad \* Bajo

- Grado de fracturación \* Alto Grado de diaclasamiento \* Alto

- Alteración general Las arcillolitas presentan un horizonte de alteración de unos 2 - 4 m., allí donde la erosión no se lo ha llevado.

- Observaciones Los materiales del zanjón provienen casi exclusivamente de los mantos de arcillolitas de la Formación Concentración. Los materiales de descapote también están constituidos por arcillolitas ricas en sulfatos de magnesio (epsomita).

\* Alto, medio, bajo

## 4. MARCO HIDROGEOMORFOLOGICO

- 4.1 Tipo de escorrentamiento dominante Superficial  Subsuperficial  Subterráneo
- 4.2 Características del escorrentamiento superficial (permanente, estacional, apariencia de las aguas, uso de prácticas de riego y/o drenaje, etc.) Esporádico, sobre todo después de los aguaceros (no se consideran los ríos Soapaga y Chicamocha, que traen su caudal de aguas arriba).

4.3 Características del escorrentamiento subsuperficial (superficies de infiltración, estado de humedad de los terrenos, etc.) Este escorrentamiento es importante sobre todo en laderas arcillosas suaves y en depósitos de vertiente. En la zona del deslizamiento se observan numerosas grietas y un microrelieve propio de zonas solifluyentes. El agua de drenaje es rica en sulfatos de magnesio y presenta una acidez alta. Despues de los aguaceros se observan numerosos charcos sobre el área deslizada.

4.4 Características del escorrentamiento subterráneo (pérdidas profundas, fuentes y manantiales, redes cársticas, apariencia de las aguas, etc.) Este escorrentamiento no parece importante en el área. Sin embargo, en las partes más altas, constituidas por arenas, el agua se infiltra a través de las numerosas diaclasas y fracturas y resurge en el Zanjón de El Salitre en forma de manantiales pequeños.

- 4.5 Erosión ligada al agua: Difusa  Laminar  Cárcavas  Disolución   
Soliflucción  Otras Deslizamientos superficiales y profundos.

## 5. DESCRIPCION DEL MOVIMIENTO

5.1 Aspecto general Terreno caótico y fresco, de colores pardo-amarillentos y grisáceos, según el material dominante (natural o descapote).

Frescura Fresco Grado de actividad (activo, estabilizado, creciente, decreciente) Activo

Otros datos \_\_\_\_\_

## Cabeza del movimiento (área de erosión)

5.2 Extensión del arranque principal Longitud (L), m. 280 m. Anchura (I), m. 120 Altura (h), m. 18 Pendiente % 21 Área (superficie de erosión) (A)  $m^2$  10.600  
Volumen del material erosionado.  $m^3$  159.000 Forma Trapezoidal

Otros datos \_\_\_\_\_

5.3 Superficie de ruptura o de arranque: Visible Si Invisible \_\_\_\_\_ Naturaleza Arcillolitas.

Sentido del movimiento (estrías, raíces) Estrías verticales

Presencia de líneas de agua No Erosión (difusa, surcos, cárcavas, etc.) Difusa intensa

## Cuerpo del movimiento (área de acumulación)

5.4 Extensión de la masa en movimiento: Longitud (L'), m. 2976 Anchura (I'), m. 172 Espesor (e), m. 4 m. Área aproximada de la acumulación (A')  $m^2$  592.600 (incluido sector VI)  
Relación e/L' 0.0013 Forma Alargada y angosta, con ensanchamientos.

Líneas de arranque lateral, desniveles Se presenta a lo largo del movimiento.

5.5 Estado de los materiales acumulados: En escalones \_\_\_\_\_ En banquetas \_\_\_\_\_ En paquetes   
En desorden  Otros \_\_\_\_\_ Topografía general de la superficie de acumulación Caótica  
Vegetación Sin Tipo de vegetación (bosques de eucaliptos destruidos)  
Humedad aparente: Seco Humedo Sector I Saturado Sectores II y IV Seco  
Presencia de grietas Todos sectores Erosión Soliflucción, deslizamientos, concentrada.

5.6 Relaciones entre cabeza y cuerpo del movimiento

Perímetro total (de zona de erosión y acumulación). 7.480 m. Relación A/A No válida Porcentaje del área de la cabeza  
(A) cubierta por la acumulación No válida Pendiente del terreno arriba de la corona (7.5 m.) 40 %  
Pendiente (teórica) de la línea entre el pie de la cabeza y la corona 31 % Pendiente del material acumulado abajo de la cabeza  
21.9 % Otras relaciones de interés \_\_\_\_\_

6. RELACIONES EXPLICATIVAS

6.1 La superficie de ruptura es X o parece \_\_\_\_\_: Independiente de la estructura geológica de los terrenos X  
Aparece al nivel de una discontinuidad litológica, mecánica u otra. Aparece al nivel de una discontinuidad mecánica.

En una capa, en relación con su geometría No

6.2 Descripción detallada de los terrenos de la superficie de ruptura Se presentan dos capas superpuestas: una porosa, muy permeable y poco cohesiva en el horizonte superior y otra más compacta, impermeable y cohesiva en la parte inferior, con una superficie de discontinuidad entre las dos (plano deslizante).

Índices de plasticidad y liquidez de los terrenos movidos. I P 18% en horizonte inferior y 14-15% en superior

6.3 Relaciones con la hidrogeomorfología, la erosión, el escurrimiento lineal. La hidrogeomorfología favorece el desarrollo del fenómeno, al igual que los procesos que actualmente se desarrollan al interior del mismo, al cual retroalimentan (soliflucción, agrietamientos, etc.)

7. ASPECTOS HISTORICOS DEL MOVIMIENTO

7.1 El movimiento es de edad: Geológica \_\_\_\_\_ Histórica \_\_\_\_\_ Actual X Fecha (eventualmente) 6-XII-87

7.2 Relaciones con la actividad humana La minería del hierro, y especialmente los depósitos de materiales de descapote sobre el zanjón son altamente responsables del desarrollo del fenómeno, por la alteración de la topografía y el drenaje.

7.3 Datos obtenidos de la población local sobre características y evolución del fenómeno El fenómeno se inició con un deslizamiento de proporciones limitadas en el sector I. El material deslizado empujó y ayudó a saturar el material aguas abajo, con lo cual se inició la cadena hasta llegar a su expresión actual.

8. INTERPRETACION Y PRONOSTICOS

8.1 Estimación de movimientos futuros probables. El movimiento continuará activo hasta encontrar un nuevo nivel de equilibrio. Su evolución natural puede conducir al taponamiento del cauce del Río Soapaga.

8.2 Peligros potenciales para las actividades o instalaciones humanas. De formarse y reventarse abruptamente un tapón sobre el Río Soapaga, se causarían pérdidas materiales y humanas de consideración en la población de Paz de Río, localizada aguas abajo y en otras instalaciones.

8.3 Estudios o vigilancia en curso (cuáles y por quiénes) Municipio de Paz de Río.

8.4 Observaciones finales Se deben ejecutar obras de reordenamiento del drenaje y terraceo para ayudar a estabilizar el fenómeno. Además se debe vigilar la formación de áreas sobresaturadas y el avance de la pata sobre el Río Soapaga. Se debe controlar la minería en el Zanjón de El Salitre.

NOTA. Este formulario se adaptó de uno similar del Instituto Dolomieu de Geología Aplicada de Grenoble (Francia).