

Liquefaction susceptibility assessment and study of “La Luciana” tailings dam fault (Spain, 1960) based on historical documents

Francisco Javier Fernández-Naranjo, Virginia Rodríguez, Roberto Rodríguez, María Esther Alberruche, Julio Cesar Arranz & Lucas Vadillo

Instituto Geológico y Minero de España, Madrid, España. fj.fernandez@igme.es, v.rodriguez@igme.es, roberto.rodriguez@igme.es, e.alberruche@igme.es, jc.arranz@igme.es, l.vadillo@igme.es

Received: May 20th, 2014. Received in revised form: September 30th, 2014. Accepted: October 29th, 2014.

Abstract

On 17 August, 1960 the biggest disaster by death toll in Spain, related with a tailings dam fault, took place in Reocín (Santander). The tailings dam “La Luciana” failed causing the death of eighteen people. After the fault, the mining company carried out several geotechnical tests in the remaining materials of the tailings dam. The results are available to be consulted in the Reocín Mines Documentary Collection, from which we have obtained mechanical Cone Penetration Test (CPT) data near the fault area as well as diverse maps of the dam pre-failure and post-failure. The processing of such data through current analysis techniques has revealed the relationship between the fault of the tailings dam and static liquefaction phenomena.

Keywords: slope failure, tailings dam, CPT test, static liquefaction, flow failure.

Análisis de la susceptibilidad a la licuefacción y estudio de la rotura del depósito de residuos mineros “La Luciana” (España, 1960) basado en documentos históricos

Resumen

El 17 de agosto de 1960 se produjo en Reocín (Cantabria) el mayor desastre en pérdidas de vidas humanas acaecido en España en relación con la rotura de una presa de residuos mineros. El depósito de residuos mineros “La Luciana” sufrió un fallo que derivó en costosos daños materiales y provocó la muerte a dieciocho personas. Tras la rotura, la compañía minera realizó diversos ensayos geotécnicos sobre los materiales remanentes del depósito. Los resultados obtenidos pudieron ser consultados en el Fondo Documental Mina de Reocín, obteniéndose datos de Ensayos de Penetración Estática (CPT) mecánicos del entorno de la zona de rotura, así como diversa cartografía del depósito anterior y posterior a la catástrofe. A la luz de los conocimientos actuales y el tratamiento de estos datos mediante nuevas técnicas, ha podido evidenciar la relación de la rotura del depósito con fenómenos de licuefacción estática.

Palabras clave: fallo de talud, depósito de residuos mineros, ensayos CPT, licuefacción estática, falla de flujo.

1. Introducción

El depósito de residuos mineros denominado “La Luciana”, ubicado en Reocín (Cantabria), sufrió una rotura el 17 de agosto de 1960 sobre las 22:40 horas que derivó en una gran salida en masa de material provocando costosos daños ambientales, materiales y humanos dado que supuso la pérdida de 18 vidas, muchas de ellas niños. Pese a la magnitud del desastre, y al contrario que roturas más recientes como la acaecida en Aznalcóllar (Huelva) en 1998, la rotura de La Luciana no ha gozado de tanta relevancia en los medios, ni

interés por parte del mundo académico.

Pocos meses después de la rotura, la compañía minera propietaria realizó diversos ensayos de campo sobre los materiales constituyentes del depósito de residuos. Parte de los resultados a día de hoy se conservan en el denominado “Fondo documental Mina de Reocín”, ubicado en la biblioteca de la Escuela de Mina de Torrelavega. Es poco probable que de dichos ensayos se obtuvieran resultados concluyentes en virtud del estado del conocimiento geotécnico de aquella época. No obstante, cabe la

posibilidad de interpretar dichos datos utilizando técnicas y conocimientos actuales con el objeto de arrojar algo de luz sobre lo ocurrido en el desastre de La Luciana.

1.1. Características constructivas del depósito de residuos mineros “La Luciana”

El depósito de residuos mineros “La Luciana” fue construido a partir de los estériles de lavadero de la mina de Pb y Zn denominada AZSA, entre los años 1951 y 1960, contando con un depósito principal y un recrecimiento lateral (Fig. 1).

Este depósito se construyó mediante el método “Aguas arriba” (Upstream) [13], no disponiendo de una estructura de contención propiamente dicha debido a que los lodos de vertido ejercían de soporte una vez secos. Tal y como muestran documentos gráficos de la época el vertido se efectuó desde el contorno del depósito, formándose escalones que se recrecían en la vertical (Fig. 2.). Se estima que durante su construcción el caudal de vertido rondaba los 7 litros/segundo, lo que dejaba tasas de unas 11.000 Toneladas/mes.

El material vertido era sustentado por tablones de madera arriostrados (Fig. 3) hasta que ganaba competencia mecánica tras la pérdida de humedad, para lo que se dejaba secar 15 días [1]. Debido a la exposición atmosférica y a las características mineralógicas de los relaves, éstos desarrollan una costra de tipo ferruginoso que incrementa la resistencia al corte de los escalones que conforman el talud del depósito de residuos mineros.

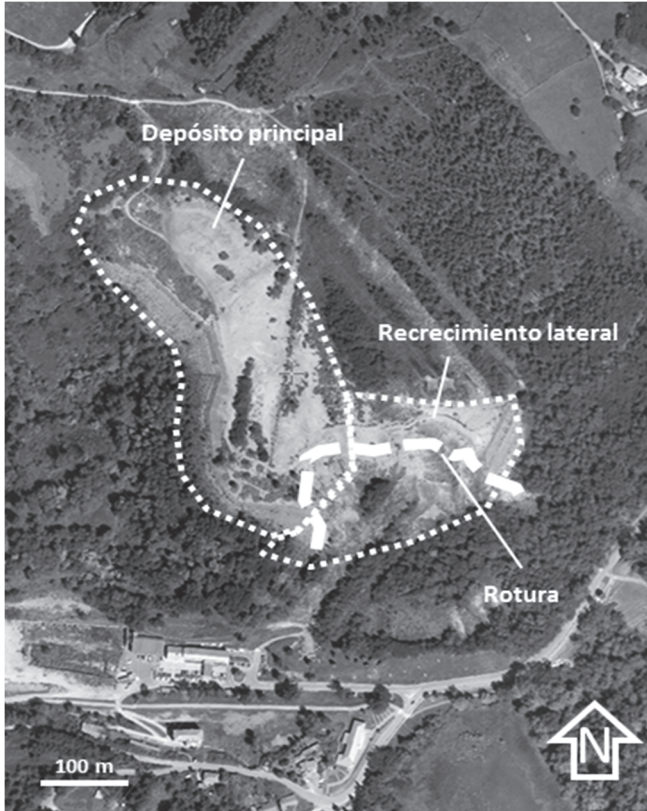


Figura 1. Fotografía aérea del depósito de residuos mineros “La Luciana” en la actualidad

Fuente: Google Earth año 2011.



Figura 2. Detalles constructivos del recrecimiento del depósito poco antes de su rotura. Pueden apreciarse: 1) Las estructuras de vertido desde el contorno, 2) El escalonamiento resultante,, 3) Las manchas de vegetación en el talud debidas a la humedad y 4) La presencia de una importante laguna de decantación cercana al talud

Fuente: Fondo documental “Mina de Reocín”.

A principios del año 1956, se inició la construcción del recrecimiento lateral que ganó altura alcanzando rápidamente la cota del depósito principal sobre mediados del año 1958. Posteriormente se recrecerían en conjunto unos 5 m más, hasta alcanzar el depósito una altura final de entre 19,5 y 20 m. Debido al particular sistema de vertido, el depósito de residuos minero ha adquirido una geometría de perfil característica, asemejándose a un sistema de escalones con una altura de 0,8 m y ancho de 2,4 m, dejando bermas de 4 metros de ancho cada 15 escalones, lo que proporciona al talud del depósito un ángulo medio de 18° [1].

El trazado en planta del depósito principal adopta, por lo general, suaves cambios de dirección. Por el contrario, dicha configuración de ángulos suaves en el trazado en planta no se respetó en la zona del recrecimiento lateral cuyo trazado resulta mucho más abrupto.

El depósito fue construido sobre antiguos terraplenes constituidos a su vez por residuos mineros granulares de granulometría más fina, probablemente generados como rechazo de antiguos métodos de cribado por vía seca (“garbillado”) del mineral. Por desgracia no se dispone de más información relevante de los materiales constitutivos de estos niveles, no obstante la cartografía de la época muestra la existencia de tres de estos niveles de terraplén con espesores entre cinco y quince metros en la zona del recrecimiento. Es muy posible que la presencia de éstas condicionara de alguna manera el irregular trazado del recrecimiento lateral, tratando de ajustarse al del depósito principal sobre la irregularidad topográfica que la presencia de los terraplenes brinda al terreno.

El sistema de drenaje del depósito se realizaba por medio de lagunas de decantación conectadas a chimeneas, y éstas a tuberías que descansaban sobre la superficie del terreno (terraplenes) y que saldrían por la base del talud del depósito. La laguna de decantación y las chimeneas se fueron desplazando ladera arriba a medida que el depósito se recrecía en vertical.

Por último, el sustrato geológico subyacente sobre el que se apoya el conjunto de terraplenes que sirven de base al

depósito está constituido por calcarenitas, margas, calizas y arenas del Cretácico inferior-Aptiense, unidades sobre la que no hay registros de problemas de índole geotécnica.

1.2. Fallo del depósito de residuos mineros

Pese a haber transcurrido más de 50 años, a día de hoy aún son evidentes las huellas de la rotura del depósito. Según la información documental recogida, el fallo movió una cantidad de material de entre 50.000 y 100.000 m³, si



Figura 3. Arriba: fotografía del sistema de vertido durante el relleno del depósito en la década de los 60. Abajo: Vestigios de dichas estructuras encontrados en la actualidad
Fuente: [1] y fotografía propia.

bien estimaciones propias basadas en la cubicación a partir de perfiles elevan dicha cantidad hasta casi los 300.000 m³.

La rotura arrastró tanto materiales del depósito como materiales propios de los terraplenes de base. Este hecho, unido a que no tardaron en iniciarse las labores de reconstrucción en la zona siniestrada, ha provocado dificultades en las labores de reconocimiento de los diferentes elementos constituyentes del depósito de residuos en la actualidad. No existe mucha información relativa a las causas del fallo. La única referencia de ámbito académico encontrada apunta a un fallo en la fundación del depósito constituida por viejos depósitos de residuos [12], si bien se destaca erróneamente que se hizo así debido a que la vegetación ocultó dichos depósitos, -siendo confundidos con terreno natural-, cuando es sabido que la existencia de estos materiales en la fundación del depósito era de sobra conocida antes de iniciarse la construcción del depósito. [11]. Ciertos testimonios afirman que en los informes periciales se consideró a los terraplenes de base como la unidad donde se generó la rotura, explicándose el fallo como producto de filtraciones de agua por parte de los relaves suprayacentes, si bien no se conserva registro alguno de dichos informes.

Cabe destacar, tal y como quedó recogido en diversos medios de información de la época, que aunque en un primer momento se planteó un sismo como causa de la catástrofe, dicha hipótesis fue rápidamente descartada [12]. En cualquier caso, no se han encontrado registros de fenómenos de sismicidad que pudieran estar asociados a la rotura. Tampoco se han podido encontrar evidencias de periodos prolongados de lluvias, eventos tormentosos u otros factores que hayan podido influenciar en la misma o actuar como desencadenantes. Otro aspecto importante a considerar es que la geometría del plano de rotura pone en evidencia la casi completa destrucción del terraplén de nivel medio (Fig. 4).

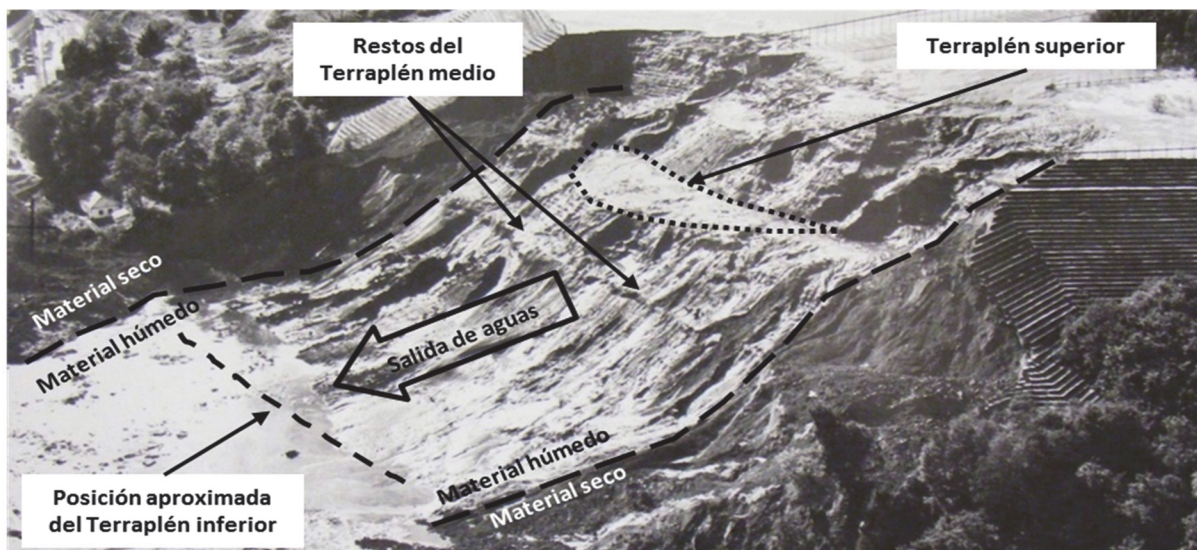


Figura 4. Detalle de los niveles de terraplén tras la rotura. Puede observarse la desaparición del terraplén inferior, la casi completa destrucción del terraplén medio y el afloramiento del terraplén superior en el entorno inmediato de la zona de rotura. Se observa además el contacto entre materiales deslizados secos y materiales humedecidos por la salida del agua de la laguna de decantación
Fuente: Fondo Documental “Mina de Reocín”.

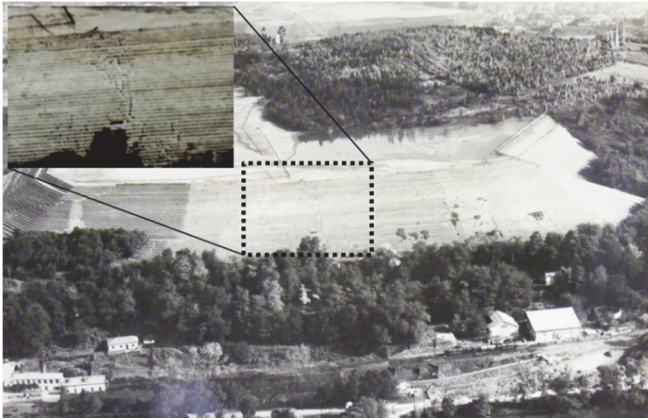


Figura 5. Posible presencia de grietas ubicadas en el recrecimiento lateral, prácticamente en el contacto con el depósito principal
Fuente: Fondo Documental "Mina de Reocín".

Por otro lado, la información documental destaca la aparición de grietas en el depósito un mes antes de la tragedia [11]. Gracias a fotografías de la época recogidas en el fondo documental se ha podido comprobar que éstas se ubicaban en el lado Oeste del recrecimiento lateral, prácticamente en el contacto con el depósito principal (Fig. 5).

1.3. Evidencias de licuefacción estática como desencadenante de la rotura

En el caso que nos ocupa se ha confirmado la existencia de fenómenos de licuefacción asociados a la rotura del depósito gracias a la presencia de diques de arena en el frente de rotura (Fig. 6) en los que el material arenoso penetra y atraviesa los niveles de limo. También es conocido que el material del depósito estaba totalmente saturado debido a la proximidad de la laguna de decantación al talud y a la presencia de áreas con manchas de vegetación en el mismo (Fig. 2).

La ausencia de eventos sísmicos u otros fenómenos de carácter dinámico hace probable que dichos diques de arena hayan sido debidos a un fenómeno de licuefacción estática; sin embargo, atendiendo a la información testimonial recopilada en la prensa escrita de la época, la rotura del recrecimiento lateral de La Luciana debió resultar un fenómeno súbito que desencadenó una enorme cantidad de energía durante su activación. Basándonos en este carácter repentino y altamente energético de la rotura, el desastre de La Luciana guarda similitud con otras roturas de depósito de residuos mineros que han sido relacionadas con proceso de licuefacción estática, como el caso de Stava (Italia, 1985) o de Merriespruit (Sudáfrica, 1994). Diversos testimonios presenciales hablan de "estallido" al describir lo ocurrido en Reocín, lo que guarda similitudes con la rotura de la presa sudafricana en el que se llega a hablar del acontecimiento de una explosión (*bang*) como un aspecto crucial del carácter súbito del fenómeno, acuñándose el concepto de "licuefacción estática instantánea" [4]. También en el caso de la rotura de la presa italiana se llega a comentar que la presa sufrió un colapso tan repentino que "sonó como el disparo de un cañón" [3].

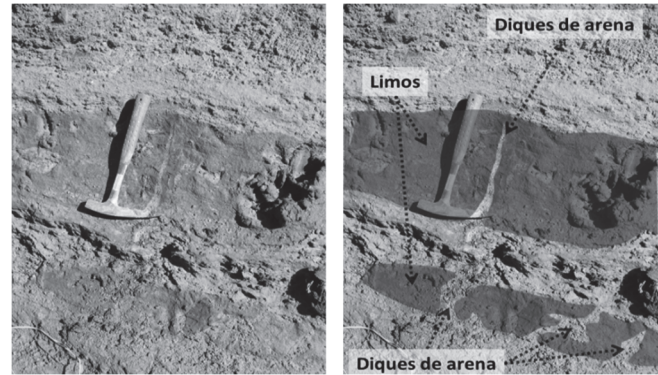


Figura 6. Detalles de diques de arena como producto de licuefacción. Pudo constatar la presencia de abundantes diques de arena encontrados en la base de los materiales remanentes del lado Oeste de la zona de rotura
Fuente: elaboración propia.

Detalles encontrados en prensa escrita de la época avalan la naturaleza explosiva de la rotura, como es la confusión de material proyectado con pedriscos de granizo en el barrio de La Barquera, distante unos 250 m del recrecimiento [12]. Existen testimonios que afirman, además, que el estallido pudo ser escuchado a más de 1 km de distancia. Se baraja, por tanto, la posibilidad de que el fallo inicial del depósito de residuos mineros responda a un fenómeno de "licuefacción estática explosiva"; no obstante, la única referencia académica encontrada que hace mención al posible carácter explosivo de la licuefacción es el trabajo de Rydelek & Tuttle (2004) [9], en el que asocia la aparición de cráteres de explosión y proyección de material a un fenómeno de licuefacción de carácter sísmico [9].

En cualquier caso, de lo que no cabe duda es que el carácter repentino de la rotura inicial y el elevado grado de energía liberada durante la misma deben responder a un aumento de gran magnitud y de carácter instantáneo de la presión de poro que debió superar la resistencia al corte del material en un intervalo de tiempo muy corto. Si consideramos la presencia de costras ferruginosas en el talud, de frágil resistencia y baja permeabilidad, podemos asumir que éstas pudieron actuar como tapón o sello que impidiera la salida o drenaje del material licuado lo que favorecería el carácter explosivo de la rotura.

1.4. Evidencias de salidas en flujo de material tras el fallo inicial

Tras este primer fenómeno súbito de rotura, hay constancia de que el material sufrió varios deslizamientos de flujo hasta alcanzar cierto equilibrio geotécnico. Ha podido comprobarse que el material puesto en movimiento a través de dichos deslizamientos alcanzó distancias del orden de 500 m, distancias que podrían haber resultado mayores de no haber sido por la existencia de varias lagunas y escombreras que frenaron el flujo y lo encauzaron hacia el este, en dirección al río Besaya, en el que se registró una subida de 1,5 m en el nivel de agua del río [12]. Los deslizamientos se sucedieron durante varios días después, dejando una zona de afección final de casi 11 hectáreas concentradas en la margen izquierda del río Besaya. Este fenómeno de flujo puede diferenciarse fácilmente de la rotura inicial atendiendo a diversos

testimonios que afirman que tras el fallo inicial, algunas víctimas atrapadas en los escombros de sus propias casas perecieron al ser enterradas por aludes de lodo que acontecieron mientras se iniciaban las labores de rescate.

2. Metodología

El fenómeno de licuefacción se produce cuando un aumento de la presión de poro logra anular la resistencia al corte de un determinado material. Dicho aumento de la presión de poro suele ir relacionado a una densificación del material con el consecuente descenso de la porosidad - producto de una respuesta de naturaleza contractiva a un determinado esfuerzo-, en condiciones de elevada saturación.

Para que ocurra la licuefacción estática se deben cumplir, por tanto, tres condiciones: 1) El material constructivo debe ser susceptible a un comportamiento contractivo ante una deformación de corte, 2) El material debe, además, estar necesariamente saturado en agua y 3) La presión de poros alcanzada debe reducir la tensión o resistencia al corte del material (conforme al principio de esfuerzos efectivos), hasta que la tensión de corte debida a las cargas gravitatorias resulte mayor que la resistencia residual del material. Esto ocurrirá con mayor facilidad en materiales con elevada capacidad para ganar densidad, es decir, materiales con valores muy bajos de Densidad Relativa. Adicionalmente, para que la licuefacción adquiera un carácter explosivo, dicho aumento de la presión deberá producirse de manera instantánea venciendo súbitamente la resistencia ofrecida por un material que actúe a modo de tapón.

2.1. Información del Fondo Documental Mina de Reocín

Tras la consulta del Fondo Documental Mina de Reocín, se accedió a los datos de catorce Ensayos de Penetración

Estática CPT (Cone Penetration Test) elaborados en el entorno inmediato de la zona siniestrada (Fig. 7), realizados entre noviembre de 1960 y marzo de 1961.

También se recopiló cartografía topográfica del depósito de residuos de antes y después de la rotura de los que pudo obtenerse datos relevantes sobre su geometría y la ubicación de dichos ensayos. Se procedió posteriormente a la digitalización y georreferenciación de la información obtenida empleando el software comercial AutoCAD Map 3D 2011. Esta información ha permitido un mejor conocimiento sobre la distribución espacial de los materiales involucrados en la rotura.

2.2. Ensayos CPT y determinación de los parámetros σ'_0 y q_{1N}

Los ensayos de penetración estática fueron realizados con un antiguo penetrómetro mecánico de tipo Gouda. Los valores de resistencia en punta (q_c) y resistencia a la fricción (f_s) recogidos en el fondo documental se correspondían erróneamente con las lecturas de los medidores de presión, por lo que se realizaron las correcciones en base a los datos encontrados en las especificaciones técnicas del equipo.

La mayoría de las correlaciones con ensayos CPT para la determinación de parámetros geotécnicos como: la tensión vertical neta (σ_0) y efectiva (σ'_0), y la resistencia en punta normalizada (q_{1N}) - fundamentales para evaluar algunos de los factores que intervienen en la susceptibilidad de la estructura al fallo por licuefacción - se han realizado con valores obtenidos con penetrómetros eléctricos. Por lo tanto, se procedió a la conversión de los valores CPT mecánicos a eléctricos aplicando el modelo desarrollado por Schmertmann y Reyna [7].

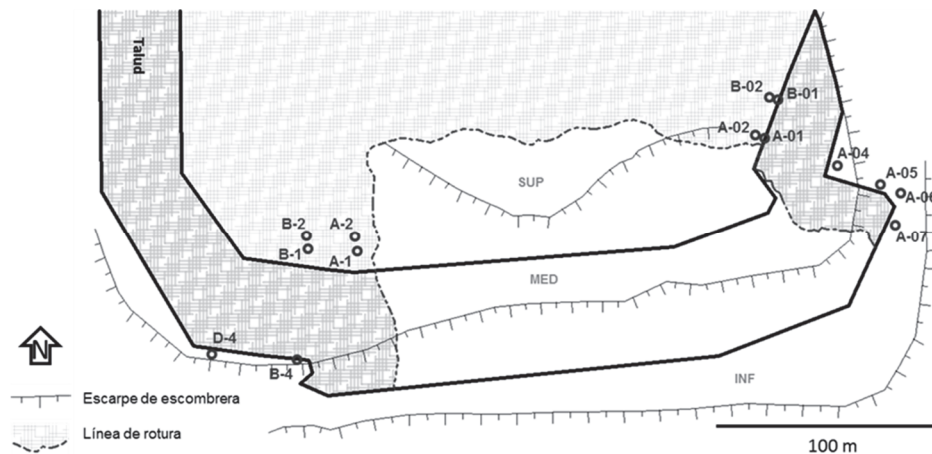


Figura 7. Trazado sur del depósito y de los niveles de terraplén superior (SUP) medio (MED) e inferior (INF), y ubicación de los catorce CPT utilizados para la obtención de parámetros geotécnicos.

Fuente: elaboración propia.

2.3. Determinación del carácter contractivo de los materiales

Posteriormente, y mediante el software comercial CPeT-IT v.1.7.6.42 a partir de los datos de los propios ensayos CPT,

considerando los residuos saturados en su totalidad (algo que se ha podido comprobar cercano a la realidad a través del barrenado de los materiales remanentes del depósito) y considerando presiones de poro incrementales en profundidad

en relación directa a la altura de la columna de agua, el software determinó automáticamente los parámetros σ_0 , σ'_0 y q_{1N} . Se ha comprobado que cálculo de dichos parámetros ha sido realizado por CPTe-IT a partir del índice SBT no normalizado, lo que necesariamente implica posibles errores en la estimación de los mismos. No obstante, en base a la experiencia de los desarrolladores en la materia y en la validez de las referencias utilizadas, dichos errores se consideran asumibles.

El comportamiento contractivo de los materiales es determinante en la susceptibilidad al fallo por licuefacción estática dado que es necesaria una reacción contractiva del material al esfuerzo vertical para provocar la densificación del mismo y el consiguiente aumento de la presión de poro. En nuestro caso, los criterios que se adopten para su determinación deberían poder ser calculados a partir de parámetros geotécnicos derivados de ensayos CPT, y no deberían asociarse con fenómenos de licuefacción dinámica o inducidos por eventos sísmicos. Se encontraron dos criterios que cumplían parcialmente dichos requisitos para la definición de la naturaleza contractiva-dilatante de los materiales: 1) El criterio de Robertson que relaciona la resistencia en punta y el coeficiente de fricción normalizados [8]; y 2) El criterio de Olson & Stark basada en la tensión vertical efectiva y la resistencia en punta normalizada [6].

Finalmente tras comprobar que la aplicación del criterio de Robertson a los valores obtenidos no es posible por quedar dichos valores fuera del rango propuesto por el autor, se decidió adoptar la correlación de Olson y Stark. Esta correlación permite además la determinación directa del carácter contractivo o dilatante del material sin necesidad de análisis de parámetros adicionales como la sensibilidad del material. De esta manera se ha podido establecer la naturaleza contractiva-dilatante de los residuos mineros en el entorno de la rotura, y la distribución espacial en profundidad de los niveles más susceptibles a la licuefacción en cada uno de los sondeos donde se realizaron CPT, atendiendo a este factor (Fig. 8).

2.4. Estimación de la Densidad Relativa de los materiales.

La Densidad Relativa de los materiales juega también un papel importante en la mayor o menor susceptibilidad de los mismos a la licuefacción dado que a mayor capacidad del material para densificar (materiales con densidades relativas bajas), mayores serán los valores de presión de poros que podrá alcanzar. Para su estimación se ha empleado la correlación de Bolton [2] que relaciona el valor de Densidad Relativa o Índice de densidad (I_D) con los valores de resistencia en punta (q_c), y tensiones verticales totales y efectivas (σ_0 y σ'_0) obtenidos a partir de los ensayos CPT, tal y como se ha descrito anteriormente, a través de la relación:

$$I_D = 0.2831 \frac{q_c - \sigma_0}{\sigma'_0} + 32.964 \quad (1)$$

3. Resultados y discusión

3.1. Análisis de la contractividad y de la Densidad Relativa de los materiales

Los datos resultantes de la interpretación del carácter contractivo o dilatante de los CPT han sido agrupados en

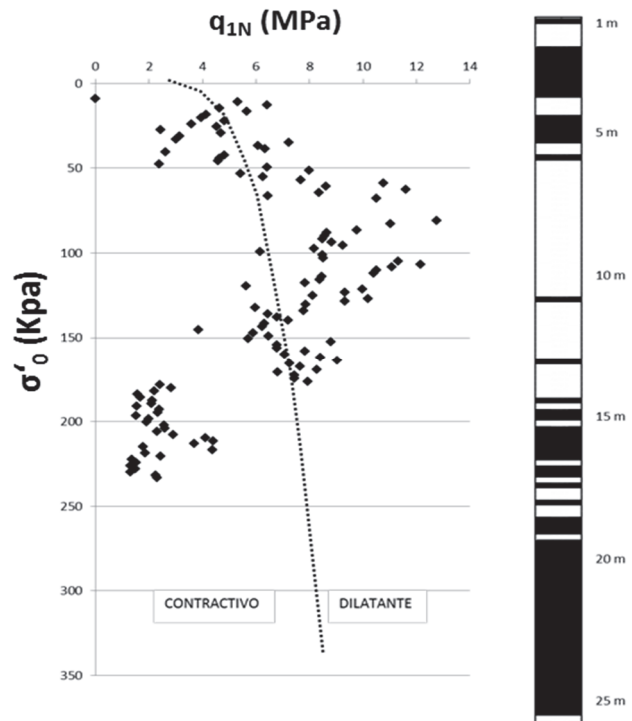


Figura 8. Determinación de los niveles de comportamiento contractivo (negro) y dilatante (blanco) en profundidad bajo el criterio de Olson & Stark para el sondeo A-2. Fuente: elaboración propia.

torno a dos perfiles topográficos trazados al Este y Oeste del plano de rotura, respectivamente (Fig. 9). Se aporta un perfil reconstruido de la estructura con el sustrato geológico y la posición de los terraplenes de base (Fig. 10).

Los resultados muestran numerosos niveles de materiales de comportamiento contractivo, y por lo tanto susceptibles a la licuefacción, en ambos perfiles. No obstante, el espesor de dichos niveles es significativamente mayor en el lado Oeste, y muy especialmente en el terraplén de nivel medio sobre el que se asienta el depósito. Es probable, por lo tanto, que el primer fallo de la estructura se iniciara en este último nivel y hacia este lado del recrecimiento, lo que explicaría el elevado grado de destrucción de los terraplenes de base a partir de este nivel y del depósito suprayacente en la zona de rotura. Por otra parte, la aparición de grietas en esta zona del depósito en los momentos previos a la catástrofe, corrobora que los materiales que caracterizan el perfil Oeste posiblemente sean los más representativos de las condiciones geotécnicas del depósito en el momento de su rotura, y que estos materiales estarían involucrados en el fallo de la estructura.

El análisis conjunto del comportamiento contractivo de los materiales y su Densidad Relativa arroja resultados aún más reveladores. No se han podido encontrar niveles contractivos de baja densidad relativa en el perfil Este que tengan potencia suficiente como para localizar en ellos el origen del evento de licuefacción instantánea de gran magnitud (Fig. 11). No obstante, el estudio de los sondeos CPT del perfil Oeste: B-1, B-2 y A-2 pone de relieve la existencia de un nivel profundo de materiales de

comportamiento contractivo y una muy baja Densidad Relativa a unos 20 m de profundidad desde la superficie del depósito, coincidiendo con el nivel medio de los terraplenes de base (Fig. 11). Los materiales de este nivel, de naturaleza contractiva y baja densidad relativa, disponen además de potencia suficiente como para inducir un fenómeno de licuefacción de gran magnitud cuyo desencadenante entraría en relación con un aumento del grado de saturación de material por entrada de agua proveniente de los residuos mineros suprayacentes.

Resulta, por tanto, más probable que el episodio de licuefacción se iniciara hacia el lado Oeste del recrecimiento y que las características de los materiales de este lado resulten más representativas de las condiciones geotécnicas del depósito que provocaron su rotura que las del lado Este. Por otro lado, cabe recordar la aparición de grietas en este lado del recrecimiento poco tiempo antes de la rotura catastrófica (Fig. 5) lo que en cierta medida vendría a corroborar que el fallo del depósito de residuos mineros pudo tener su origen en materiales del lado Oeste del recrecimiento.

Al margen de lo anterior se ha identificado en el CPT A-1, entre los 4.5 y los 8 m de profundidad un nivel que

también adopta un comportamiento contractivo y baja densidad relativa sobre los materiales del vaso del depósito (Fig. 12). Los valores de resistencia en punta (q_c) medidos en el mismo resultan nulos. Esto podría ser indicativo de que dichos materiales se encontraban licuefactados en el momento en que los ensayos fueron realizados, sin embargo este nivel se corresponde con materiales de la propia presa de residuos ubicados a mucha menos profundidad que los materiales del terraplén en los que teóricamente se localizaría el origen de la rotura y separados por materiales de la presa de lodos con rangos medios de densidad relativa, por lo que no guardaría continuidad con las unidades que teóricamente desencadenaron el fallo.

Se ignora si la pérdida de competencia de dicho nivel es un evento anterior, simultáneo o derivado del fenómeno de licuefacción estática que desencadenó el desastre, sin embargo el hecho de que este nivel se localice en el mismo lado en el que semanas antes se observara la aparición de grietas hace pensar que podría existir relación con las mismas, lo que implicaría que la pérdida de competencia de estos niveles sería un fenómeno anterior a la catástrofe.

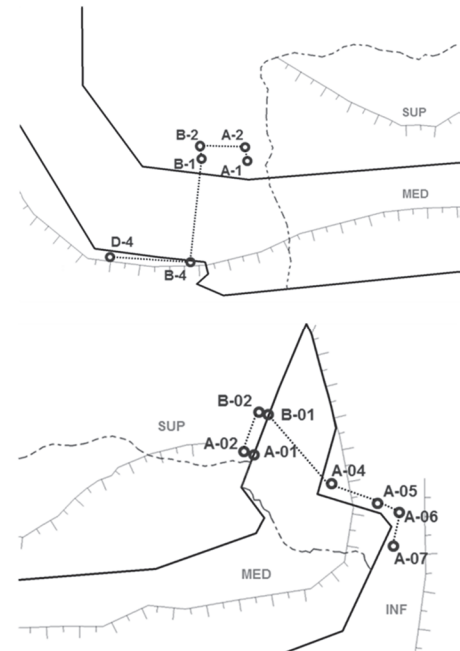
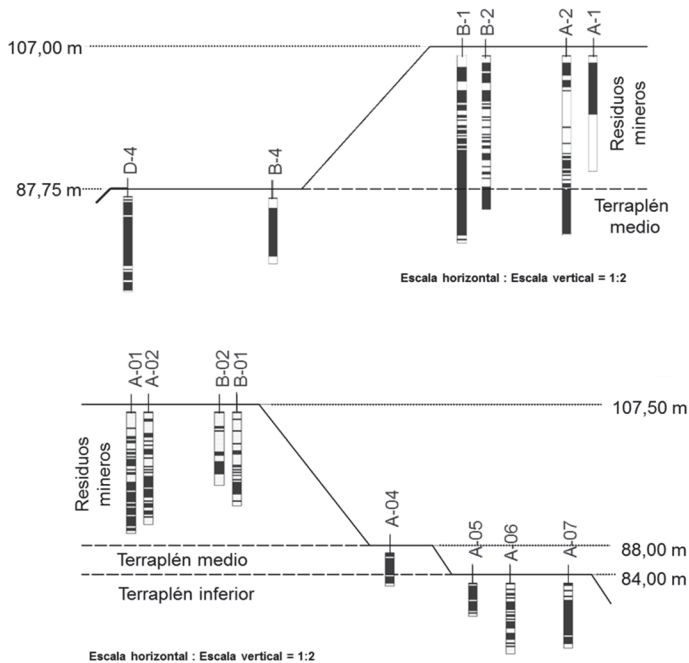


Figura 9. Perfiles esquemáticos con resultados de los sondeos CPT del lado Oeste (arriba) y del lado Este (abajo) de la rotura. Se destaca la presencia de niveles de comportamiento dilatante (blanco) frente a los contractivos (negro) más continuos y potentes en el lado Oeste. Fuente: elaboración propia.

3.2. Hipótesis de la causa del desastre

El hecho de que la rotura se concentrara en materiales del recrecimiento, y en vista de las evidencias de la sobresaturación de los materiales constituyentes del mismo (Fig. 4) es posible afirmar, -considerando el conocimiento técnico desarrollado relativo a las causas más comunes de fallo en este tipo de estructuras-, que el elevado grado de

saturación en agua guarda una estrecha relación causal con la rotura del depósito.

Existen varias alternativas que podrían explicar qué los materiales de dicho recrecimiento se encontraran mucho más saturados que el del depósito principal. En primer lugar un fallo en los sistemas de drenaje provocaría que los relaves del recrecimiento se sobresaturaran. En base a la presencia de hasta tres chimeneas de drenaje y diversos

tramos de tuberías de desagüe en el lado Oeste de la rotura (Fig. 13), resulta factible que la rotura de una de estas estructuras derivara en la saturación en agua de los relaves.

Por otro lado, tras la consulta de la fotografía aérea del vuelo americano (año 1957) de la zona, se ha comprobado que la superficie de vertido del recrecimiento resultaba muy reducida respecto al depósito principal (Fig. 13).

Esto implicaría necesariamente que el tiempo dedicado al relleno de cada escalón resultaría inferior para el recrecimiento lateral que para el depósito principal. En estas condiciones, para poder reducir lo menos posible la tasa de vertido sería entonces necesario ganar tiempo disminuyendo los periodos de remanso de cada escalón, quedando los relaves mucho más saturados en agua.

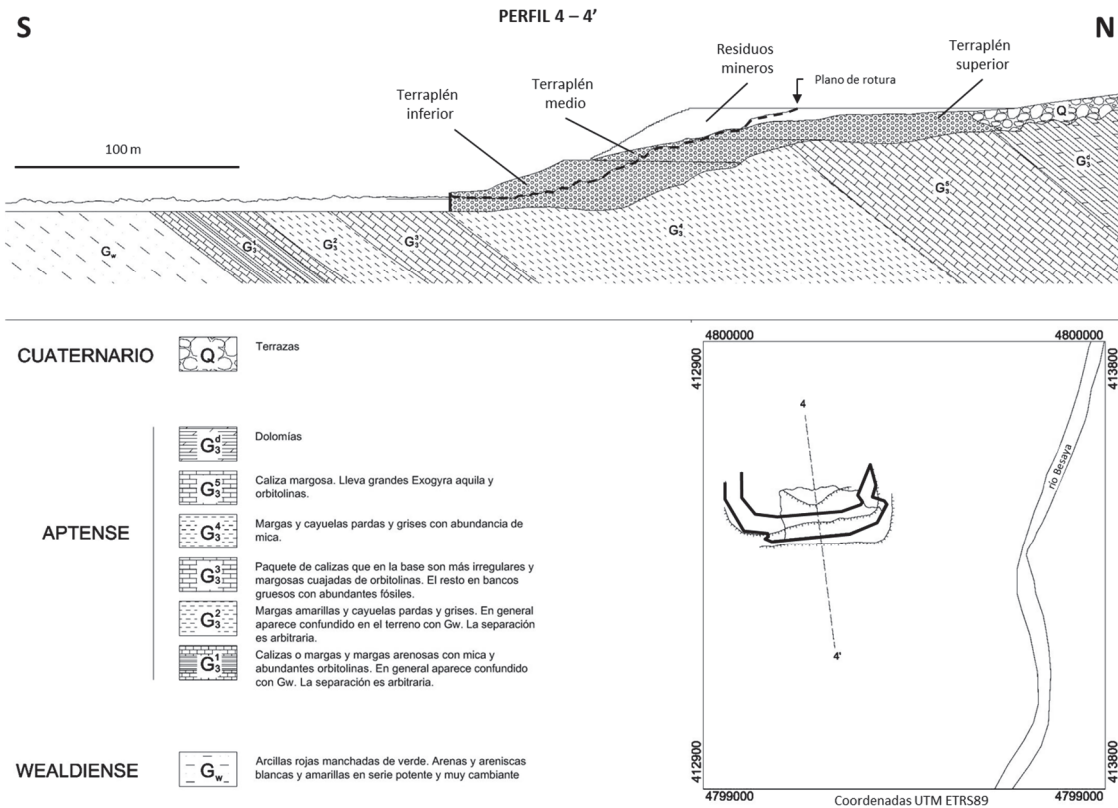


Figura 10. Perfil del depósito de residuos mineros (digitalizado y reconstruido a partir de documentación histórica). Puede observarse el sustrato geológico sobre el que se asientan las estructuras implicadas en el desastre de La Luciana, la línea de rotura, la posición aproximada de los niveles de terraplén, y del depósito de residuos mineros. Abajo: Leyenda, trazado del perfil y ubicación del depósito de residuos mineros

Fuente: elaboración propia.

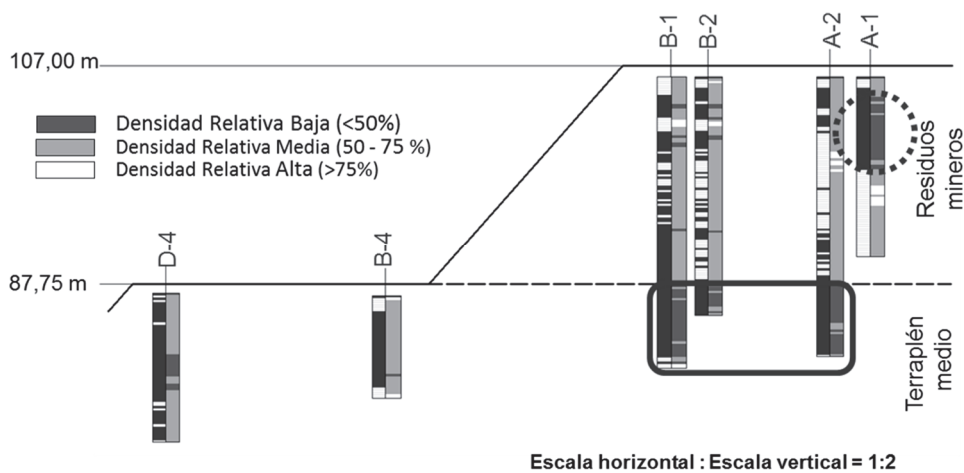


Figura 11. Esquema de perfil con los valores de Densidad Relativa (lado derecho de cada columna) junto al carácter contractivo o dilatante (lado izquierdo de cada columna). En el lado Oeste de la rotura uede observarse la presencia de niveles potentes de comportamiento contractivo y baja densidad relativa a

unos 20 m de profundidad marcado con línea continua. También se observa un nivel similar entre los 4,5 y los 8 m de profundidad en materiales del propio depósito marcado con línea discontinua
 Fuente: elaboración propia.

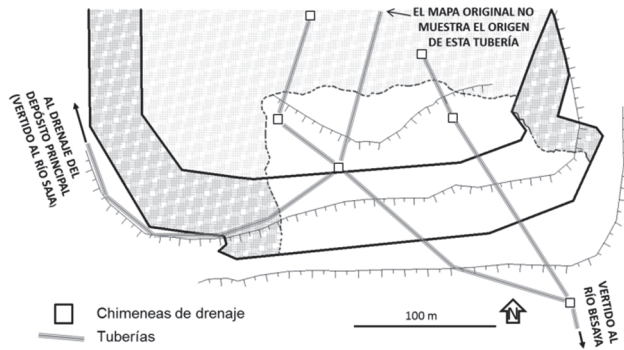


Figura 12. Sistemas de drenaje del recrecimiento lateral de La Luciana
 Fuente: elaboración propia.

También es posible que ambas circunstancias (rotura de tuberías y reducción de los periodos de remanso) se combinaran, fatídicamente de tal modo que al no respetar los periodos de secado de los escalones estos no ganaran la suficiente competencia y acabaran provocando la rotura de alguno de los elementos del sistema de drenaje.

En cualquier caso la abundancia de agua pudo facilitar un proceso de percolación que añadiría el último elemento necesario para facilitar la densificación de los materiales e inducir el correspondiente aumento de la presión de poro, que provocaría a su vez la disminución de la resistencia al corte de los materiales y que acabaría provocando un fenómeno súbito de licuefacción.

Aunque la aparición de las mencionadas grietas en el lado Oeste del recrecimiento de modo previo a la rotura guarda sin duda relación con el desastre, cabe destacar que considerando el amplio tiempo transcurrido (superior a un mes) desde la aparición de las grietas resulta difícil justificar una relación directa causa-efecto con respecto a la rotura de La Luciana, por lo que más que un auténtico desencadenante se considera una evidencia del mecanismo de fallo.

La episódica salida en flujo de los relaves propiamente dichos puede ser debida a un fenómeno de falla regresiva en efecto dominó.

4. Conclusiones

De acuerdo a los datos arrojados por los CPT y de la geometría de los materiales depositados tras el fallo, y contando con el apoyo de la información testimonial, se ha evidenciado que la fatídica rotura de La Luciana podría tener su origen en los terraplenes basales y se debiera probablemente a un fenómeno de licuefacción estática instantánea de carácter súbito o explosivo al que seguirían varios fenómenos de falla regresiva, debido al alto grado de saturación de los materiales, que provocarían en flujo de material del depósito. La existencia de una gran laguna de decantación (Fig. 2) y las evidentes huellas de salida de material húmedo (Fig. 4) parecer corroborar este hecho.

Caracterizar la naturaleza constructiva, el mecanismo de rotura y las posibles causas del desastre ha resultado de gran

utilidad a la hora de mejorar el conocimiento acerca del comportamiento geotécnico en este tipo de depósitos, aportándose además un claro ejemplo de que aspectos resultan



Figura 13. Comparación entre las superficies de vertido. Las superficies de las que se dispuso para realizar el vertido en el recrecimiento lateral resultaron muy reducidas en comparación con la superficie de vertido disponible para el depósito principal

Fuente: fotografías aéreas del vuelo americano, año 1957.

clave a la hora de prevenir desastres en depósitos similares a “La Luciana”. De acuerdo a las conclusiones del presente estudio la integridad de este tipo de depósitos queda claramente condicionada por su naturaleza estratificada, el grado de saturación de los materiales constitutivos del depósito y la competencia de los materiales que actúan de base a los mismos.

Agradecimientos

A la Biblioteca de la Escuela Técnica Superior de Ingeniería de Mina de Torrelavega el acceso a la información sin la que no habría sido posible la redacción de este artículo. A los revisores anónimos del trabajo.

Referencias

- [1] Berzal, J.L., Presas de residuos mineros. Revista de Obras Públicas. 123 (3131), pp. 301-333, 1976.
- [2] Bolton, M.D. and Gui, M.W., The study of relative density and boundary effects of cone penetration tests in centrifuge. University of Cambridge, Department of Engineering, Cambridge, United Kingdom, 1993, CUED/D-SOILS/TR256

- [3] Davies, M.P., McRoberts, E. and Martin, T., Static liquefaction of tailings: fundamentals and case histories. *Proceedings Tailings Dams ASDSO/USCOLD*, pp. 233-255, 2002.
- [4] Fourie, A.B., Blight, G.E. and Papageorgiou, G., Static liquefaction as a possible explanation for the Merriespruit tailings dam failure. *Canadian Geotechnical Journal*. 38 (4), pp. 707-719, 2001. <http://dx.doi.org/10.1139/t02-079>
- [5] Ishikara, K., Liquefaction and flow failure during earthquakes. *Geotechnique*. 43 (3), pp. 351-415, 1993. <http://dx.doi.org/10.1680/geot.1993.43.3.351>
- [6] Olson, S.M. and Stark, T.D., Yield strength ratio and liquefaction analysis of Slopes and embankments. *Journal of Geotechnical and Geoenvironmental Engineering*. 129 (8), pp. 727-737, 2003. [http://dx.doi.org/10.1061/\(ASCE\)1090-0241\(2003\)129:8\(727\)](http://dx.doi.org/10.1061/(ASCE)1090-0241(2003)129:8(727))
- [7] Reyna, F.A.M., Field investigation and liquefaction potential in the Imperial Valley: Application of the California data, including data from the Loma Prieta earthquake in 1989. PhD. Thesis. Purdue University, West Lafayette, Indiana, USA, 1990.
- [8] Robertson, P.K., Evaluation of flow liquefaction and liquefied strength using the Cone Penetration Test. *Journal of Geotechnical and Geoenvironmental Engineering*. 136 (6), pp. 842-853, 2010. [http://dx.doi.org/10.1061/\(ASCE\)GT.1943-5606.0000286](http://dx.doi.org/10.1061/(ASCE)GT.1943-5606.0000286)
- [9] Rydelek, P.A. and Tuttle, M., Explosive craters and soil liquefaction. *Nature*. 427, pp. 115-116, 2004. <http://dx.doi.org/10.1038/427115a>
- [10] Sanders, L.L., *A manual of field hydrogeology*. London: Prentice Hall International, 1998.
- [11] Saiz, J.R., *Torre la Vega siglo XX. 1950-1962: Crónica ilustrada de una ciudad. Tomo III*. Santander: Ediciones Los Cántabros, 2008. pp. 251-262.
- [12] Smith, E.S., Tailings disposal and liquefaction. *Transactions Society of Mining Engineers (AIME)*. 244, pp. 179-187, 1969.
- [13] Vick, S.G., *Planning, design, and analysis of tailings dams*. Richmond B.C.: BiTech Publishers Ltd., 1990.

F.J. Fernández-Naranjo, received the Bs. in Geology with a specialization in Hydrogeology, Engineering & Environment, in 2000 from the Universidad Complutense de Madrid, Spain and the MSc. in Mineral Resources Engineering, in 2005 from the Universidad Politécnica de Madrid, Spain. He has worked in mining for fifteen years, ten of them in the field of mining safety. Currently he is developing his work in the Spanish Geological Service (IGME), focused in the security aspects of tailings dams.

V. Rodriguez, received the Bs. in Environmental Sciences, in 2001 and a MSc. degree in Waste Management and Treatment, in 2003 from Autonomous University of Madrid, Spain. She has worked for more than nine years in environmental footprint of mining activities on the aquatic ecosystem and environmental impact assessment of energetic resources. Currently, she is working in the Spanish Geological Service (IGME), focused in environmental footprint of mining waste and environmental risk assessment.

R. Rodriguez, achieved his the Bs. in Geological Engineer, in 1989 from the Instituto Superior Minero Metalúrgico, Moa, Holguín, Cuba. He has a specialization in Hydrogeology, obtained in 1997 from Fundación Centro Internacional de Hidrogeología Subterránea, Barcelona, Spain. In 2002, he got his PhD in Geology from the Universidad Politécnica de Cataluña, Spain. Currently, he is a full researcher in the Geological Service of Spain (IGME) with the specialization in the management of tailings dams and hydrogeology in mine areas.

M.E. Alberruche, is graduate in Geography and History, Geography section, in 1987 from the Universidad Complutense de Madrid, Spain and achieved the MSc. in Geological and Environmental Engineering in 1991 from the Universidad Politécnica de Madrid, Spain. She is Specialist Upper Level Technician of the Geological Service of Spain (IGME), working in environmental impacts of mining activities and risk assessment of mining waste facilities, with more of twenty years of experience in this field.

J.C. Arranz, is PhD. in Agronomic Engineering and Environmental Engineering Specialist from the Universidad Politécnica de Madrid, Spain.

Permanent Scientist at the Geological Survey of Spain (IGME). He has developed his professional activities in areas such as environmental rehabilitation of mining sites; inventory and environmental characterization of dumps, quarries, and open-cast mines, assessment of the environmental risks of abandoned mines and studies of soil characterization in mining sites.

L. Vadillo, received the Bs. in Mining Engineer, in 1984 from the Escuela Técnica Superior de Ingenieros de Minas de Madrid, Spain, specialized in Geology and Geophysics. Currently, he is Head of Division Energy Resources and Sustainable Mining of the Geological Service of Spain (IGME) with the specialization in the Mining and Environmental Impacts.



UNIVERSIDAD NACIONAL DE COLOMBIA

SEDE MEDELLÍN

FACULTAD DE MINAS

Área Curricular de Ingeniería
Geológica e Ingeniería de Minas y Metalurgia

Oferta de Posgrados

Especialización en Materiales y Procesos
Maestría en Ingeniería - Materiales y Procesos
Maestría en Ingeniería - Recursos Minerales
Doctorado en Ingeniería - Ciencia y Tecnología
de Materiales

Mayor información:

E-mail: aceomin_med@unal.edu.co

Teléfono: (57-4) 425 53 68