



UNIVERSIDAD DE GUANAJUATO

CAMPUS GUANAJUATO

DIVISION INGENIERIAS

DEPARTAMENTO DE MINAS, METALURGIA Y GEOLOGÍA

CARACTERIZACIÓN E INTERPRETACIÓN DE ESTRUCTURAS PRIMARIAS DE DEFORMACIÓN EN JALES MINEROS DE GUANAJUATO, MÉXICO.

PARA OBTENER EL TITULO DE

INGENIERO GEÓLOGO

PRESENTA

SURI ELENA HERNÁNDEZ MANCILLA

AGOSTO 2019.

ÍNDICE	PAG
AGRADECIMIENTOS	4
RESUMEN	5
INTRODUCCIÓN	6
CAPÍTULO I. GENERALIDADES	8
I.1. Antecedentes.	8
I.2. Justificación.	9
I.3 Objetivo General.	10
CAPÍTULO II. DESCRIPCIÓN DEL ÁREA DE ESTUDIO	10
II.1. Localización del área de estudio.	10
II.2. Geología regional.	11
II.3. Geología local.	14
II.4. Descripción de los depósitos de jales estudiados.	15
II.4.1. Jales mineros La Cooperativa.	17
II.4.2. Jales mineros de El Cerro del Cuarto.	17
II.4.3. Jales mineros de Noria Alta.	18
CAPÍTULO III. METODOLOGÍA	18
III.1. Etapa de recopilación bibliográfica.	18
III.2. Etapa de Campo.	18
III.2.1. Fase 1: Reconocimiento de Localidades.	18
III.2.2. Fase 2: Levantamiento de Columnas Estratigráficas.	18

III.3. Etapa de Análisis de Laboratorio.	19
III.4. Etapa de Gabinete.	21
CAPÍTULO IV. RESULTADOS.	21
IV.1. Características mecánicas, físicas y FRX de los jales mineros estudiados.	21
IV.1.1. Sección La Cooperativa.	27
IV.1.2. Sección El Cerro del Cuarto.	28
IV.1.3. Sección Nieto Piña.	29
IV.2. Estructuras de deformación.	30
IV.2.1. Estructuras de flama.	34
IV.2.2. Laminación convoluta.	34
IV.2.3. Laminación cruzada.	34
IV.2.4. Estratos plegados.	34
IV.2.5. Ondulación.	35
IV.3. Procesos y mecanismo de deformación.	35
IV.3.1. Interpretación del mecanismo.	35
CAPÍTULO V. CONCLUSIÓN	36
REFERENCIAS BIBLIOGRÁFICAS	37

AGRADECIMIENTOS

A Dios por darme la oportunidad y concluir otra etapa más de mi vida.

A mis padres; a mi madre, que fue la primera y única en su momento que creyó y apostó por mí, a pesar de todo, gracias por tu empuje y fortaleza, y si llegué hoy hasta aquí es por ti; a mi padre, que en lo que pudo también me ayudó al final, gracias por todo, los quiero.

A mis hermanos, Tony, Juan Carlos, Jorge y Lupita, que me apoyaron para que yo cumpliera con este sueño que hoy estoy haciendo realidad. ¡Los quiero hermanos!

A mi hija Emma Itzae, llegaste a mi vida en el momento justo para renovar mi espíritu, renacer las fuerzas e ilusiones, viendo a futuro por este camino juntas, desde que naciste y hasta hoy sólo han pasado tres años mi princesa hermosa, eres mi motor, mi fortaleza, lo que le da sentido a mi vida, ¡Te amo hija!

A mis amig@s: Martha, Wendy, Eric, Katia, Alitzel, Raúl, Alicia, Paty Palafox, Daniel y Yola y a todas las personas que de una u otra forma me acompañaron y ayudaron para bien en este camino.

A Antonio, que estuviste apoyándome con todo lo que se vino encima y salimos adelante.

A la Dra. María Jesús Puy y Alquiza.

A mis maestros y maestras.

RESUMEN

Este trabajo de investigación documenta las estructuras primarias de deformación en sedimentos blandos en los depósitos de jales mineros originados por la actividad antropogénica desarrollada a principios del siglo XX en el distrito minero de Guanajuato. El distrito minero de Guanajuato se encuentra entre dos grandes provincias volcánicas de México: Sierra Madre Occidental (SMO) (Oligoceno) y el Cinturón Volcánico Transmexicano (TMVB) (Oligoceno-Mioceno), su origen se debe al descubrimiento de depósitos de plata y oro durante 1552. La producción minera generó grandes cantidades de jales mineros que se depositaron en los canales de ríos, lagunas, barrancos y valles. Cuando en las cercanías de algunos sitios mineros no había lugares naturales (para depositar el material del beneficio) los empresarios mineros solían acumular jales en áreas de contención construidas con terraplenes erigidos con los mismos jales y una vez que los depósitos se agotaron, estos fueron abandonados. Este estudio se centra en tres depósitos de jales mineros (La Cooperativa, Cerro del Cuarto y Nieto Piña) ubicados alrededor de la ciudad de Guanajuato, que constan de facies sedimentarias (deformación de los sedimentos blandos constituidos por pliegues a pequeña escala, estructuras de flama, canales, ondulación y convolutas) que incluyen gravas no consolidadas, areniscas estratificadas, limolitas y lodolitas. Estas características de deformación son atribuidas a cambios de presión de poro, principalmente causados por el escape de fluido durante los procesos de fluidización y licuefacción estática los cuales no están asociados a eventos sísmicos.

INTRODUCCIÓN

La minería es una industria que implica el manejo de grandes cantidades de material para producir un producto final. La extracción de minerales con valor económico es menor a la cantidad de desechos y es aquí donde se empiezan a acumular los jales. Los jales mineros son los materiales que quedan después del proceso de separación de la fracción valiosa. Los jales mineros también se llaman limos, colas y/o residuos de lixiviación, los cuales se van depositando en capas de sedimentos. De acuerdo con Williams et al. (1982) definen los jales como minerales y partículas de roca finamente molidos que desde el punto de vista medioambiental son propensas a ser arrastradas por el viento y el agua, pudiendo oxidarse para liberar metales (Ritcey, 1989, White et al., 1999)

El tamaño y la composición de los jales dependen del método de extracción. Para las minas metálicas los jales suelen ser lodo o polvo muy fino, que se deja después de que el mineral se tritura y los minerales valiosos se extraen de él. Los metales no procesados y no rentables, los minerales, los productos químicos, las aguas orgánicas y de proceso, se descargan generalmente en forma de suspensión, en un área de almacenamiento final comúnmente conocida como "Instalación de Almacenamiento de jales". La adición de reactivos utilizados en el procesamiento de minerales puede alterar las características químicas de los minerales procesados y, por lo tanto, influir en los procesos de fluidización y licuefacción de los mismos. La licuefacción es la interrupción *in situ* del soporte mutuo entre los granos, en el que se produce la pérdida total o parcial de la resistencia al corte de los materiales afectados (Allen, 1975; Horowitz, 1982). Debido a causas naturales o artificiales, la pérdida de resistencia de estos materiales puede ocurrir, cambiando su estado para convertirse en líquidos viscosos. El mecanismo que afecta este cambio de estado, de sólido a líquido, es la licuefacción que genera depósitos licuados (Allen 1977, 1982). Esta pérdida de cohesión puede producir desplazamientos a favor de la pendiente o inyecciones de materiales licuados en respuesta a gradientes de presión. Los ambientes sedimentarios más favorables para la génesis de la licuefacción son: playas,

barras de arena y sistemas fluviales, ambientes de lagos fluvio-lacustres y depósitos de jales mineros (Martin and McRoberts 1999). Sin embargo, la fluidización es un proceso similar a la licuefacción mediante el cual un material granular se convierte de un estado estático sólido a un estado dinámico similar a un fluido. Este proceso ocurre cuando un líquido (líquido o gas) pasa a través del material granular. La abundancia relativa de estructuras de deformación de sedimentos blandos en presas de jales está relacionada con los siguientes parámetros: 1) la presencia de sedimentos saturados en el agua, 2) el tamaño y la composición de los jales mineros, y 3) la presencia de sedimentos con alta susceptibilidad a licuefacción. Los jales generalmente se almacenan en la superficie dentro de las estructuras de retención o en forma de baterías (celdas secas), pero también se puede almacenar bajo tierra en los vacíos extraídos por un proceso comúnmente conocido como relleno.

Hasta hace algunas décadas era común en el distrito minero de Guanajuato deshacerse de los jales derivados de la minería y las operaciones metalúrgicas, arrojándolos a los canales de ríos, lagunas, barrancos y valles. Cuando en las cercanías de algunos sitios mineros no había lugares naturales "convenientes", los empresarios mineros solían acumular jales en áreas de contención construidas con terraplenes erigidos con los mismos jales y una vez que los depósitos se agotaron, estos fueron abandonados.

Este documento intenta describir procesos de licuefacción y de fluidización dentro de los depósitos de jales de minería en algunas zonas del distrito minero de Guanajuato, donde la deformación permanente en dichos depósitos no es resultado de la sismicidad.

CAPÍTULO I. GENERALIDADES

I.1 Antecedentes

La historia minera en Guanajuato data poco tiempo después de la conquista española. En 1548 los españoles iniciaron la explotación del mineral por el método de fundición y sólo se extraía en las zonas superficiales de bonanzas dentro de las vetas (Antúnez, 1964). Para 1556 se instauró un nuevo método de extracción de patio llamado amalgamación, este proceso consistía en el uso del mercurio en frío descubierto por Bartolomé de Medina en Pachuca dos años antes en 1554 (Humboldt, 1822) y sólo recuperaba partículas de oro y plata por lo que arrojaba gran acumulación de desechos llamados jales, o sea los residuos de la extracción del mineral con valor (Fernández, 1879). En 1726 se empezó a utilizar la dinamita, la cual permitió extraer mineral en las profundidades, pero también se utilizaron las lumbradas, método que consistía en calentar la roca con leña y después enfriarla hasta resquebrajarla. En los siglos XVII y XVIII el beneficio del mineral se hizo por el método de amalgamación o también conocido como "patio" (Orozco, 1921) y en 1905 el método de amalgamación es reemplazado por el método de cianuración con carbón en pulpa (Orozco, 1921). La flotación "bulk" se implementó en el distrito desde 1946 (Archivo General de la Nación, 1947) empleada para la recuperación de sulfuros como la pirita entre otros. Todo lo anterior fue de gran beneficio a la proliferación de aperturas de minas por toda la ciudad haciendo de Guanajuato uno de los Distritos mineros de mayor importancia en México desde esas épocas.

La mineralización en el Distrito de Guanajuato se dio en tres épocas metalogénicas: en el Cretácico (cuerpos tabulares de sulfuros masivos en rocas Mesozoicas), el Paleógeno (emplazamiento de batolito granítico) y el Oligoceno (actividad volcánica por subducción) (Randall-Roberts et al., 1994). La mayoría de los yacimientos minerales se dieron en la Sierra Madre Occidental (SMO) por emplazamiento de vetas epitermales rellenando fisuras (Clark et al., 1982). Y de este mismo sistema es que están formadas las vetas del Distrito minero Guanajuato.

En las formaciones Esperanza y el Conglomerado de Guanajuato se encuentra la "Veta Madre", una de las estructuras auro-argentífera más importantes del distrito minero de Guanajuato, que ha sido explotada desde 1550 hasta hoy en día. La "Veta Madre" es una estructura bien definida que se extiende hasta 26 km con un espesor que varía de 2 a 25 m. Su ataque es N45 ° W con una caída de 45 ° en el suroeste. Está formado principalmente por cuarzo blanco y amatista, calcita. El área más productiva se encuentra en su parte central del distrito de Guanajuato, que muestra una longitud de 6 km, es en esta zona donde se encuentran las minas más famosas del distrito minero, como La Valenciana, Cata, Rayas, Sirena y El Cedro. La mineralización de las rocas estudiadas se clasifica como sulfuración intermedia epitermal y corresponde a un sistema complejo de mantos y stock de trabajos con mineralización de sulfuros de Ag, Pb y Zn (Camprubí y Albinson, 2007) ubicados en rocas sedimentarias (caliza, dolomita y pizarra calcárea) de la Formación Esperanza y el conglomerado de Guanajuato.

I.2 Justificación

Las estructuras primarias de deformación aportan información valiosa sobre las condiciones hidrodinámicas deposicionales en ambientes sedimentarios y estos mismos procesos pueden ser creados por el hombre en los jales mineros, esta información ayudara a establecer zonas de riesgo en asentamientos de poblaciones y así evitar deslizamientos sobre zonas urbanas o vías de comunicación.

La información generada en relación al tema es muy importante desde el punto ambiental y de riesgos sobre todo para tomarse en cuenta por instituciones de gobierno encargadas de los suministros de agua, drenaje, luz y protección civil, la contribución de este aporte al conocimiento geológico local y regional quedará en apoyo a investigaciones futuras.

I.3 Objetivo General

Estudiar las estructuras primarias sedimentarias de deformación presentes en los jales mineros de la ciudad de Guanajuato con la finalidad de demostrar que éstas no solo se dan en ambientes sedimentarios “naturales” sino que también se forman en ambientes antropogénicos como en los jales mineros. Seleccionando tres localidades Cerro del Cuarto, Nieto Piña y La Cooperativa.

CAPÍTULO II. DESCRIPCIÓN DEL ÁREA DE ESTUDIO

II.1 Área de estudio

El distrito minero de Guanajuato (Figura 1) está ubicado al sureste de la Sierra de Guanajuato a una altura de 1991 msnm. Tiene una longitud de 20 km desde el río El Gigante al noroeste hasta el río La Saucedá al sureste, siendo su ancho promedio de 16 km, ocupando un área aproximada de 320 kilómetros cuadrados. La ciudad de Guanajuato está ubicada en el centro del distrito minero de Guanajuato (Figura 1). La colonización comenzó en la década de 1540-1550 por evangelizadores. En 1548 de la veta de plata de San Bernabé en el Mineral de La Luz inicia la explotación de la riqueza mineral en el Distrito Minero de Guanajuato. En 1550 Juan de Rayas descubrió un importante afloramiento de la "Veta Madre" donde se ubicaron las famosas Minas Mellado y San Juan de Rayas.

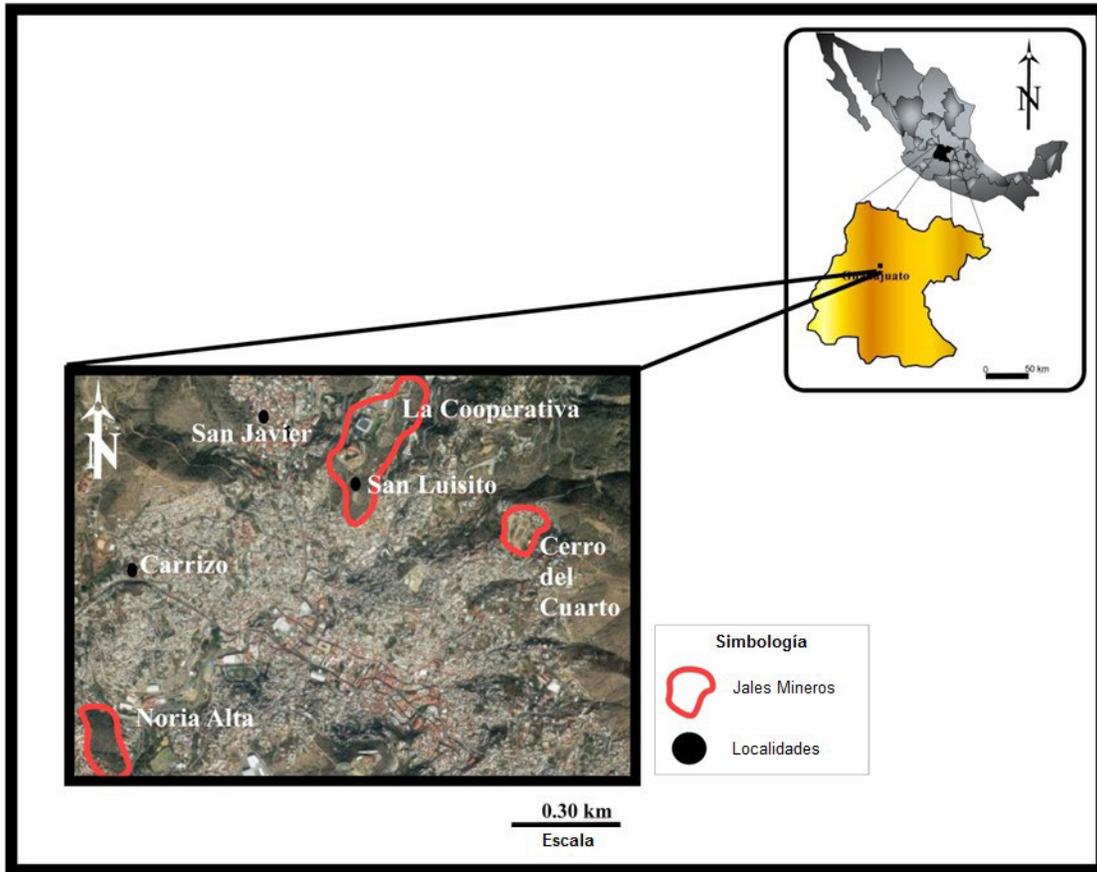


Figura 1. Ubicación del área de estudio.

II.2. Geología Regional (Secuencia volcano-sedimentaria)

La Sierra de Guanajuato es una cordillera que pertenece al Terreno Guerrero con una elevación entre 2000 y 2500 m s.n.m. (Aranda et al., 1989; Cerca-Martínez et al., 2000). Se extiende desde Comanja de Corona, Jalisco, hasta los alrededores de La Sauceda, Guanajuato. Limitada por dos depresiones transversalmente, el graben Villa de Reyes y el graben de La Sauceda. Constituida por secuencias de arco, particularmente el Jurásico Superior del Cretácico temprano, arco Alisitos-Teloloapan (Tardy et al., 1992). El conjunto de arco de Guanajuato ha sido interpretado por Lapierre et al. (1992) y Tardy et al. (1994) como un arco intraoceánico, construido sobre la corteza oceánica. Las rocas del conjunto del arco se superponen en el contacto de empuje del conjunto de la Cuenca de

Arperos, que consiste en las formaciones Arperos y Esperanza (Martini et al., 2013). La Formación Esperanza consiste en rocas metavolcánicas y calizas polideformadas (Echegoyen-Sánchez, 1978). Martini et al. (2013) dividieron la Formación Esperanza en dos unidades: las formaciones Esperanza y Valenciana.

Randall et al. (1990) y Martínez-Reyes, et al. (1987), mencionan que la geología regional se compone por las siguientes Formaciones: Formación Esperanza (secuencia volcano-sedimentaria), Formación La Luz (secuencia volcano-sedimentaria), Conglomerado Guanajuato, Formación Losero, Formación La Bufa, Formación Calderones, Andesita Cedros y Formación Chichíndaro.

Formación Esperanza (Secuencia volcano-sedimentaria)

Unidad Litológica llamada así por su localidad tipo en la Presa de la Esperanza. Dicha formación definida por Echegoyen-Sánchez, et al. (1970) se describe como una secuencia de litofacies constituida por horizontes de calizas y capas de lutitas laminares de color negro alternando con areniscas, las cuales están metamorfoseadas en facies de esquistos verdes, pizarras y filitas, cuya característica principal es su foliación muy marcada. Esta Formación se considera parte de la Formación Arperos, conocida anteriormente como Complejo Volcano-sedimentario (Davila-Martinez, 1987), este autor considera que la Formación Esperanza es de edad Cretácico y tiene un espesor de 600m.

Formación La Luz (Secuencia volcano-sedimentaria)

La Formación La Luz es una secuencia volcano-sedimentaria que está constituida principalmente por derrames basálticos masivos y almohadillados, con intercalaciones de pedernal, tobas, brechas, hialoclásticas, rocas volcano-detriticas y hacia la cima derrames dacítico-riodacítico calco-alcalinos. Tienen metamorfismo de bajo grado con presencia de zonas de milonita y están cortadas por diques félsicos y basálticos. Se considera a esta Formación del Jurásico-superior-Cretácico (Zimmerman et al., 1990). Esta Formación tiene un espesor mínimo de 1000m ya que se desconoce su base y su cima está cubierta tectónicamente por sedimentos y tobas muy deformadas (Ortiz et a., 1992). En

algunos lugares se encuentra cubriendo discordantemente al conglomerado Guanajuato.

Conglomerado Guanajuato

El Conglomerado Guanajuato es una unidad de coloración rojiza y de estratificación masiva que aflora en los alrededores de la ciudad de Guanajuato. Presenta clastos sedimentarios, ígneos, calizas y metamórficos, muestra una matriz arenosa con óxidos, carbonatos e intercalaciones de derrames andesíticos, Edwards (1955) dividió al conglomerado Guanajuato en el miembro inferior constituido por areniscas rojas y cafés, intercaladas localmente con capas de lavas, conglomerados y brechas; El miembro superior se caracteriza por un conglomerado de matriz de clastos soportados intercalados con depósitos de areniscas y lutitas. Los dos miembros que constituyen al Conglomerado Guanajuato están separados por una discordancia estratigráfica.

Formación Losero

La Formación Losero descansa concordantemente sobre el Conglomerado Guanajuato. Es una litarenita de color verde de 10 a 52 m de grosor (promedio 30 m), formada en condiciones fluviales de río trenzado (Puy-Alquiza et al., 2015).

Formación La Bufa

La Formación La Bufa descansa discordantemente sobre la Formación Losero y está constituida por tobas e ignimbritas de composición riolítica de 360 m de espesor y edad de 33.53 ± 0.48 M.a. (Nieto-Samaniego et al., 2015), presenta un color rosa rojizo. Esta Formación se encuentra al alto de la Veta Madre y es la roca encajonante de los cuerpos de mineral en forma de red de venillas o stockwork (Mango, 1992).

Formación Calderones

La Formación Calderones descansa discordantemente sobre la Formación La Bufa, se encuentra constituida principalmente por tobas andesíticas de tipo lapilli de color verde. Grosor medio de 200m (Randall et al., 1994).

Andesita El Cedro

Unidad formada por flujos de lava andesítica y tobas de composición dacítica a andesítica: Presenta un espesor de 250 a 640 m (Randall et al., 1994).

Riolita Chichíndaro

Secuencia de domos y flujos de lava Inter-estratificado con brechas y tobas volcánicas pobremente clasificadas, se aprecian texturas porfiríticas. Tiene una edad estimada 30.8 ± 0.8 Ma y 30.1 ± 0.8 Ma (K-Ar en sanidino) (Nieto-Samaniego et al., 1996), lo que la ubica en el Oligoceno temprano. En algunas zonas a esta unidad se le conoce como intrusivo Peregrina, inclusive existe en las zonas bajas de las minas de Rayas y Sirena un pórfido de monzonita el cual puede ser la base de esta unidad (Mango, 1992).

II.3. Geología Local

La Formación Esperanza consiste en capas alternas delgadas de arenisca de grano muy fino a grueso, limolita de capa fina, arcilla y escasos estratos conglomerados en forma de lente. La Formación Valenciana consiste en calizas micríticas finamente estratificadas y laminadas y lutitas. Las unidades caracterizadas por secuencias de lechos rojos de edad Cenozoica (conglomerado de Guanajuato y Formación Losero) se superponen al ensamblaje Mesozoico (complejo intrusivo y secuencia eruptiva y arco de Guanajuato).

Con base en lo anterior; la unidad geológica que aflora en el área de estudio es:

Conglomerado Guanajuato

Descansa discordantemente sobre la formación Esperanza. El conglomerado Guanajuato es una unidad de coloración rojiza y de estratificación masiva que aflora en los alrededores de la ciudad de Guanajuato. Presenta clastos sedimentarios, ígneos, calizas y metamórficos y muestra una matriz arenosa con óxidos, carbonatos e intercalaciones de derrames andesíticos (Edwards, 1955) que, mediante fósiles, se le asigna una edad del Eoceno-Oligoceno (Fries et al., 1955; Ferrusquia-Villafranca, 1987). Sin embargo, el fechamiento de una andesita intercalada con esta unidad arrojó una edad de 49.3+- 1Ma (Aranda-Gómez y McDowell, 1998) que lo ubica a finales del Eoceno temprano.

II.4. Descripción de los depósitos de jales estudiados

Los jales mineros estudiados fueron construidos aproximadamente entre 1905 y 1935, siendo las primeras presas de jales en el distrito minero de Guanajuato. Estos jales mineros consisten en tierra efluentes de rocas y procesos que se generan en una planta de procesamiento de minas. La explotación minera se llevó a cabo en la cima de las colinas y las haciendas de beneficio se construyeron en las orillas de los ríos para obtener acceso al agua, que era indispensable para los procesos de beneficio del mineral. En los siglos XVII y XVIII el beneficio del mineral era aplicando el método de amalgamación o también conocido como "patio". En 1905 el método de cianuración reemplaza al de amalgamación con una capacidad de 1000 toneladas por día. Los jales mineros se acumularon en las presas de jales ubicadas en los barrancos y ríos. El método constructivo para la acumulación de estos jales fue "aguas arriba" con arena ciclónica (Figura 2).

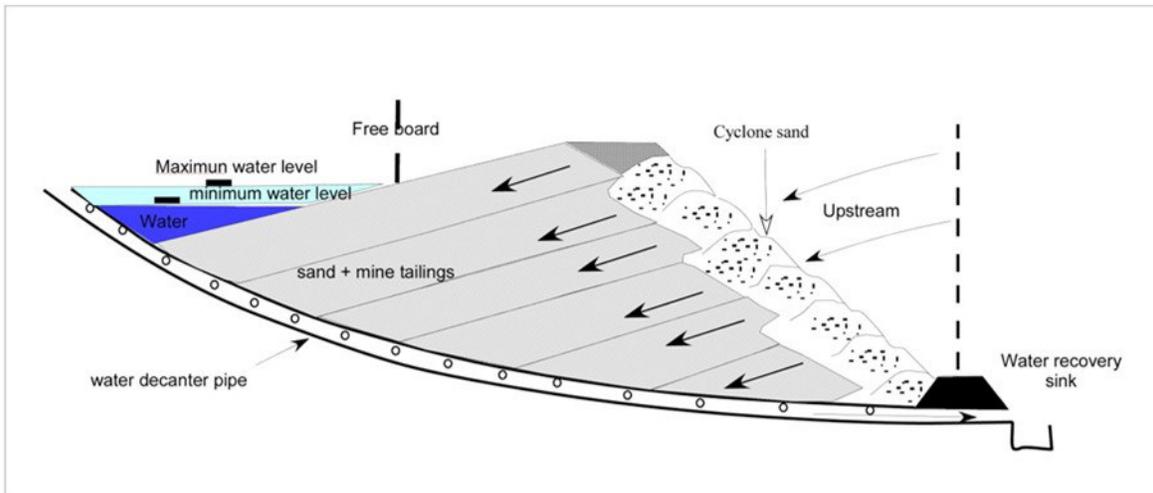


Figura 2. Método upstream con arena ciclónica (NOM-141-SEMARNAT, 2003).

Hoy estos depósitos se pueden observar alrededor de la ciudad de Guanajuato. Las presas de jales inactivas estudiadas fueron: La Cooperativa, Cerro del Cuarto y Nieto Piña, que tienen un tiempo de exposición climática de 100 años. El material de la extracción de jales proviene del beneficio minero de la Compañía Consolidada de Guanajuato. Estas presas de jales fueron producto de la actividad minera de 1905-1935. La extracción de los metales argentíferos se llevó a cabo por el método de cianuración con carbón en pulpa (Orozco, 1921). A continuación se describen los depósitos de jales mineros estudiados. Autores proponen una cifra aproximada de 75 Mt (Ramos-Arroyo et al., 2004) y 150 Mt (Carrillo-Chávez et al., 2003) de producción de residuos a la fecha. Las variaciones de descarga se registran por la alternancia de estratificación cruzada mínima y conjuntos de laminación horizontal; no obstante, este sistema conserva poca evidencia de cese del flujo durante la deposición. La presencia de una fracción de tamaño de grano predominantemente arenoso a conglomerado, las superficies erosivas internas y la conservación de lodolitas indican que la tasa de suministro de sedimentos fue mayor que la tasa de generación de alojamiento y que la presa, por lo tanto, se

desarrolló en un estado sobrellenado. La deposición en los jales mineros se organiza típicamente en ciclos de 1 a 30 metros de espesor, cada uno comenzando con una erosión, superpuestos por canales y capas de arena, y pasando hacia arriba a láminas de arena laminadas intercaladas por lodolitas. Los ciclos preservados de este tipo de estructura son representativos de los sistemas de flujo que experimentaron marcadas variaciones en la descarga; pasando repetidamente entre las condiciones responsables de la generación de formas de lecho de régimen de flujo inferior y superior (Fielding, 2006).

II.4.1. Jales La Cooperativa

Estos jales se encuentran en el centro de la ciudad de Guanajuato. Se deriva de un grupo de minas llamado "La Cata" que anteriormente se conocía como "Mina de Guadalupe". Consistió en las minas: La Cata, Secho, Maravillas, San Lorenzo y El Avispero. Hoy en día ubicados en el lado de una colina que cubre un área de 1.2 km² con un volumen de 20 millones de toneladas. El material es bastante uniforme en textura y altamente no consolidado. Localmente, se pueden observar algunos horizontes de oxidación en este material. Los depósitos de jales se observan muy erosionados. Vegetación de arbustos y arbustos espinosos como el huizache (*Acacia farnesiana*), que se observa en los límites de la pila de jales. Construido sobre estos jales hay una unidad deportiva llamada Macrocentro.

II.4.2. Jales El Cerro del Cuarto

Estos jales se encuentran dentro de la ciudad de Guanajuato. Posiblemente estos depósitos se derivan de las actividades llevadas a cabo por la Compañía de Reducción y Minas de Guanajuato "durante los años 1905. Se ubican en el costado de una colina que cubre un área de 1 km² con un volumen de 16 millones de toneladas. El material no es uniforme en textura; se observan varias capas de

grava intercaladas con arenas, y altamente no consolidadas. Localmente, se pueden observar algunos horizontes de oxidación en este material. Los depósitos de jales se observan muy erosionados. Hay desarrollo urbano en los depósitos de jales como canchas de fútbol y construcción de casas, escuelas.

II.4.3. Jales Noria Alta

Estos jales se encuentran en el lado oeste de la ciudad de Guanajuato. Estos depósitos están dispersos en un área de más de 0.3 km², con un volumen entre 5 y 7 millones de toneladas. El material es uniforme con una textura arenosa y altamente no consolidado.

CAPÍTULO III. METODOLOGÍA

La metodología consistió en cuatro etapas:

III.1. Etapa de Recopilación Bibliográfica

Se recopilaron todos los datos bibliográficos sobre información del área de estudio así como los relacionados a estructuras de deformación.

III.2. Etapa de Campo

III.2.1. Fase 1: Reconocimiento de Localidades.

Un análisis detallado de campo se llevó a cabo en tres depósitos de jales mineros inactivos (La Cooperativa, Cerro del Cuarto y Nieto Piña) que afloran dentro de la ciudad de Guanajuato.

III.2.2. Fase 2: Levantamiento de Columnas

Con la finalidad de localizar estructuras sedimentarias de deformación (aquellas originadas por procesos de licuefacción, fluidización y eventos sísmicos) se procedió al levantamiento de columnas estratigráficas, realizando una descripción sistemática de cada una de los estratos. Se registraron a detalle características

sedimentarias, considerando la textura (tamaño de grano, forma y selección), espesor de las capas y microestructuras. Las estructuras sedimentarias de deformación identificadas fueron medidas considerando su tamaño y geometría, incluyendo espesor, longitud, simetría y forma. Se tomaron quince muestras.

III.3. Etapa de Análisis de Laboratorio

Las muestras tomadas fueron investigadas por las técnicas de FRX para conocer su composición química, así mismo se realizaron análisis para determinar las propiedades mecánicas (prueba triaxial) y propiedades físicas (granulometría, densidad, límites de consistencia, peso volumétrico natural y porosidad total). Las muestras se tomaron sistemáticamente para demostrar todas las facies y sus variaciones de tamaño de grano.

III.3.1. Pruebas físicas

Se realizaron pruebas físicas como: granulometría, la densidad, los límites de consistencia, el peso volumétrico natural y el contenido de humedad. Dichas pruebas fueron realizadas en el Laboratorio de La Perlita de la Universidad de Guanajuato.

III.3.2. Granulometría

La distribución del tamaño de partícula se obtuvo por tamizado (para un tamaño de partícula mayor que 75 μm). El análisis de tamices se llevó a cabo de acuerdo con el estándar ASTM D2487-11. Las muestras se clasificaron teniendo en cuenta el Sistema de clasificación de suelos unificado (USCS).

III.3.3. Densidad

La prueba de densidad se llevó a cabo en trece especímenes utilizados según la norma europea Norma UNE-EN 1936, (2006). Los trece especímenes utilizados para esta prueba tenían una forma cúbica (8 cm x 8 cm x 8 cm). La densidad fue la siguiente (Ecuación 1): $Pr = me / Vs$ (prh), donde (me) es la masa de la muestra

triturada y seca en gramos; (V_s) es el volumen de líquido desplazado por la masa; (ρ_r) densidad del agua en kilogramos por metro cúbico.

III.3.4. Límites de consistencia

El límite de consistencia se refiere a la forma en que se compone un material cuando presenta diferentes contenidos de humedad. Los diferentes grados de consistencia son generalmente más evidentes en las muestras de grano fino porque las partículas logran mantener más agua en sus caras y bordes.

III.3.5. Peso volumétrico natural

El peso volumétrico natural del material estudiado es la relación entre el peso de la muestra y el volumen que ocupa.

$Y_m = W_m / V_m$, donde: W_m = masa de la muestra y V_m = volumen total de la muestra.

III.3.6. Porosidad total

La prueba de porosidad total se llevó a cabo en tres especímenes aplicando la norma europea UNE-EN 1936, (2006). La porosidad total se calculó utilizando la relación entre el volumen de los poros (abierto y cerrado) y el volumen aparente de la muestra (Ecuación 2).

$$p = \frac{1 - p_b}{p_r} \times 10$$

Donde (p_b) es densidad aparente y (p_r) densidad real.

III.3.7. Prueba mecánica

Prueba triaxial mediante tubos de ensayo reconstruidos

Para determinar los parámetros de los jales mineros de la mina y la relación de esfuerzos de deformación a través de la determinación del esfuerzo cortante. Se

realizaron pruebas triaxiales en trece especímenes. Consistió en colocar una muestra cilíndrica dentro de una membrana de caucho, que se inserta en una cámara especial y con una presión igual en todas las direcciones. Alcanzado ese estado de equilibrio, la presión normal o axial aumenta (σ_1), sin modificar la presión lateral aplicada (σ_3), hasta que ocurre la falla.

III.3.8. Pruebas químicas

III.3.8.1. Análisis de FRX

Para determinar la composición química, las muestras estudiadas se analizaron utilizando un espectrómetro de fluorescencia de rayos X mediante energía dispersiva, modelo Rigaku NEX CG en el laboratorio LICAMM de la Universidad de Guanajuato. Las muestras se trituraron usando un mortero de ágata y luego se pasaron a través de un tamiz de malla 230 para tener un tamaño de partícula homogéneo.

III.4. Etapa de Gabinete

Consistió en el análisis y la interpretación de los datos obtenidos de las etapas anteriores para así realizar el escrito final.

CAPÍTULO IV. RESULTADOS

IV.1. Características mecánicas, físicas y FRX de los jales mineros estudiados

Los resultados dados muestran principalmente la composición mineralógica, porcentaje de composición de tamaño de grano (la granulometría) que es un aspecto esencial a tener en cuenta, ya que brinda información sobre el tipo de residuo generado durante el proceso metalúrgico. La Tabla 1 muestra la

distribución del tamaño de las partículas que componen los jales mineros estudiados y la capacidad de resistencia, lo cual determina el tipo de material depositado en los jales mineros. Y de acuerdo con el Sistema Unificado de Clasificación de Suelos (USCS), los jales mineros estudiados corresponden a cinco tipos de suelos: GP, GM, ML, SM y CL (Tabla 1).

Tabla 1. Granulometría y clasificación de USCS de muestras de jales mineros.

Jales Mineros	Grava (%)	Arena (%)	Limo-arcilla (%)	Clasificación (USCS)
Cerro del Cuarto	10.75	39.53	49.71	GP-GM: Grava mal graduada, mezcla de grava, arena y limo. SM: arena limosa, mezcla de arena y limo mal graduada.
La Cooperativa	22.66	48.14	29.19	GP: Gravitas mal graduadas, mezclas de arena y grava con poco o ningún fino. SM: Arenas limosas, mezcla de arena y limo mal graduada. ML: limos inorgánicos y arenas muy finas, harina de roca, limo de arenas finas arcillosas o limos arcillosos con ligera plasticidad.
Nieto Piña	0.00	13.48	86.52	CL: arcillas inorgánicas de baja a mediana plasticidad, arcillas de grava, arcillas arenosas, arcillas limosas, arcillas delgadas.

La densidad se muestra en la tabla 2. Las muestras de minería de jales mostraron valores de densidad similares en términos de valores de densidad aparente, el rango de valores mostrado por las muestras estudiadas varía de (2,21 a 2,80 gr / cm³). Los límites de consistencia se muestran en la tabla 2. La consistencia de los jales mineros es la fuerza con la que los materiales se mantienen unidos o la resistencia de los jales mineros a la deformación y la ruptura. Los contenidos de agua a los que los jales mineros cambian de un estado a otro se conocen como límite de consistencia. Por lo tanto, el límite de consistencia también es conocer los límites de Atterbergs. El límite de consistencia puede determinarse mediante la siguiente prueba: prueba de límite de líquido y prueba de límite de plástico. El peso volumétrico natural y la porosidad total se muestran en la tabla 2. La porosidad es un parámetro importante debido a su influencia sobre propiedades tales como la reactividad química, la resistencia mecánica, la durabilidad y la calidad general de las muestras. La porosidad de las muestras mineras estudiadas varía de 0.86 a 2.15%.

Tabla 2. Límites de consistencia, porosidad total, peso volumétrico natural y densidad de muestras de jales mineros.

Jales Mineros	Límite líquido (%)	Límite Plástico (%)	Índice Plástico (%)	Porosidad Total (%)	Peso Volumétrico Natural (Kg/m ³)	Densidad (gr/cm ³)
Cerro del Cuarto	24.26	3.42	1.58	1.44	1301	2.21
La Cooperativa	25.33	0.00	0.00	0.865	1323	2.71
Nieto Piña	41.03	22.38	18.65	2.15	1307	2.80

Los resultados de las pruebas mecánicas se dan en la tabla 3. Estas pruebas se realizaron en muestras que utilizan orientaciones perpendiculares posteriormente se llevó a cabo un estudio estadístico de análisis de varianza para evaluar el comportamiento del material. Los resultados mostraron que las muestras de jales mineros exhibieron un comportamiento diferente.

Tabla 3. Prueba triaxial de muestras de jales mineros.

Jales Mineros	Presión Ym (Ton/m ³)	Ángulo de fricción φ	Humeda d (%)	Prueba de stress σ ₃ (Kg/cm ²)	Prueba de stress σ ₁ - σ ₃ (Kg/cm ²)
Cerro del Cuarto	1.44	22	8.57	1	1.97
La Cooperativa	1.47	29	21.05	1	2.21
Nieto Piña	1.518	26	11.96	1	2.36

Los metales y los metales pesados en las muestras de minería se muestran en la tabla 4.

Tabla 4. Composición química (FRX) de las muestras de jales mineros de El Cerro del Cuarto, La Cooperativa y Nieto Piña.

Element s Ppm	CERRO DEL CUARTO						Total (ppm)
	1C	2C	2ac	3C	4C	5C	
Al	37200	36800	76000	34500	39500	39600	43933
Ba	235	248	300	201	297	244	254.16
Si	275000	280000	172000	294000	253000	277000	258500
S	987	1570	360	2000	1260	1590	1294.5
Ca	36900	30300	9830	36200	53100	36200	33750
Fe	14400	13600	42700	13100	18200	15400	19566.6

Zn	216	299	77.3	243	180	216	205.55
Mg	4160	4510	2650	4670	4230	4740	4160
Cr	41.7	30.1	67.5	34.4	34.9	36	40.76
Mn	1650	1480	876	1560	1340	1350	1376
Ni	19.8	18.1	25.6	16.3	18.5	19.2	19.58
Cu	39.6	48.5	73	30.8	42.2	37.8	45.31
Sn	-----	13	18.8	10.5	18.7	-----	10.16
As	6.93	-----	----	5.56	10.8	-----	3.88
Sb	14	12.9	6.9	9.39	13.4	12.4	11.49
Pb	34.3	74.1	65.5	36.5	28.9	79.5	53.13
Hg	-----	-----	23.9	-----	-----	-----	3.98
Ag	34.5	36.4	9.35	24.7	33.6	30.2	28.12
Au	-----	-----	-----	-----	-----	-----	-----

Elements

LA COOPERATIVA

ppm	1B	2B	3B	4B	5B	6B	Total (ppm)
Al	30500	30700	57100	25600	24900	27800	32766
Ba	176	133	350	136	136	155	181
Si	278000	289000	207000	286000	295000	317000	278666
S	3400	3630	9560	4670	4620	2610	4748
Ca	49600	41800	33200	55000	40000	47000	44433
Fe	15000	13400	37900	12500	10300	11900	16833
Zn	46.3	43.8	74.2	46.2	45.2	41.1	49.46

Mg	4920	4970	6660	3890	3400	3630	4578.6
Cr	32.1	43.2	50	29.3	19.6	30.7	34.15
Mn	1040	967	815	1190	822	957	965.16
Ni	17.5	16.5	29.6	16.3	15.1	19.2	98.2
Cu	32.2	34.4	62	28.3	27.2	23.7	34.63
Sn	13.9	12.5	22.3	15.7	17	13.5	15.81
As	4.51	-----	----	4.68	-----	4.84	2.33
Sb	23.8	19.9	7.87	26.5	26.6	23.7	21.39
Pb	22.5	34.9	15.6	22.6	37.6	33.8	27.83
Hg	-----	-----	9.49	-----	-----	-----	1.58
Ag	32.5	26.9	15.8	39.7	37.8	26.7	29.9
Au	-----	-----	-----	-----	-----	-----	-----

Elements

NIETO PIÑA

ppm

	1N	2N	3N	Total (ppm)
Al	56100	55700	55400	55733
Ba	177	175	176	176
Si	271000	270000	270500	270500
S	3410	3400	3405	3405
Ca	49200	49100	49000	49100

Fe	30800	30797	30795	30797
Zn	457	456	457	456.6
Mg	9050	9049	9047	9115
Cr	73.9	73.6	73.5	73.66
Mn	1680	1677	1675	1677.3
Ni	33.1	33.0	32.9	33
Cu	128	129	127	128
Sn	_____	_____	_____	-----
As	38.2	37.9	38.0	38.03
Sb	12.4	12.2	12.3	12.3
Pb	370	369	368	369
Hg	12.7	12.5	12.6	12.6
Ag	40.3	40.1	40.0	40.13
Au	_____	_____	_____	-----

IV.1.1. Sección La Cooperativa (Figura 3)

La composición del tamaño de grano para La Cooperativa fue de 22,26% en peso de grava, 48,14% en peso de arena y 29,19% en peso de arcilla. La Cooperativa presenta un menor límite de consistencia que las secciones de El Cerro del Cuarto

y Nieto Piña. Las muestras presentan un peso volumétrico natural de 1323 kg/m^3 . La porosidad resultó de 0.865%. En la prueba triaxial resultó con 2.21 kg/cm^2 baja resistencia, en la prueba química muestran metales (Al, Fe, Mg y Ag) y metales pesados (As, Cr, Cu, Hg, Ni, Pb, Sn y Zn) mostrando altos valores en Ni (98.2ppm). En cuanto a las estructuras sedimentarias La Cooperativa muestra la mayor parte de estructuras primarias (laminación paralela, laminación cruzada) y de deformación (llamas, convolutas, ondulaciones, plegamientos).

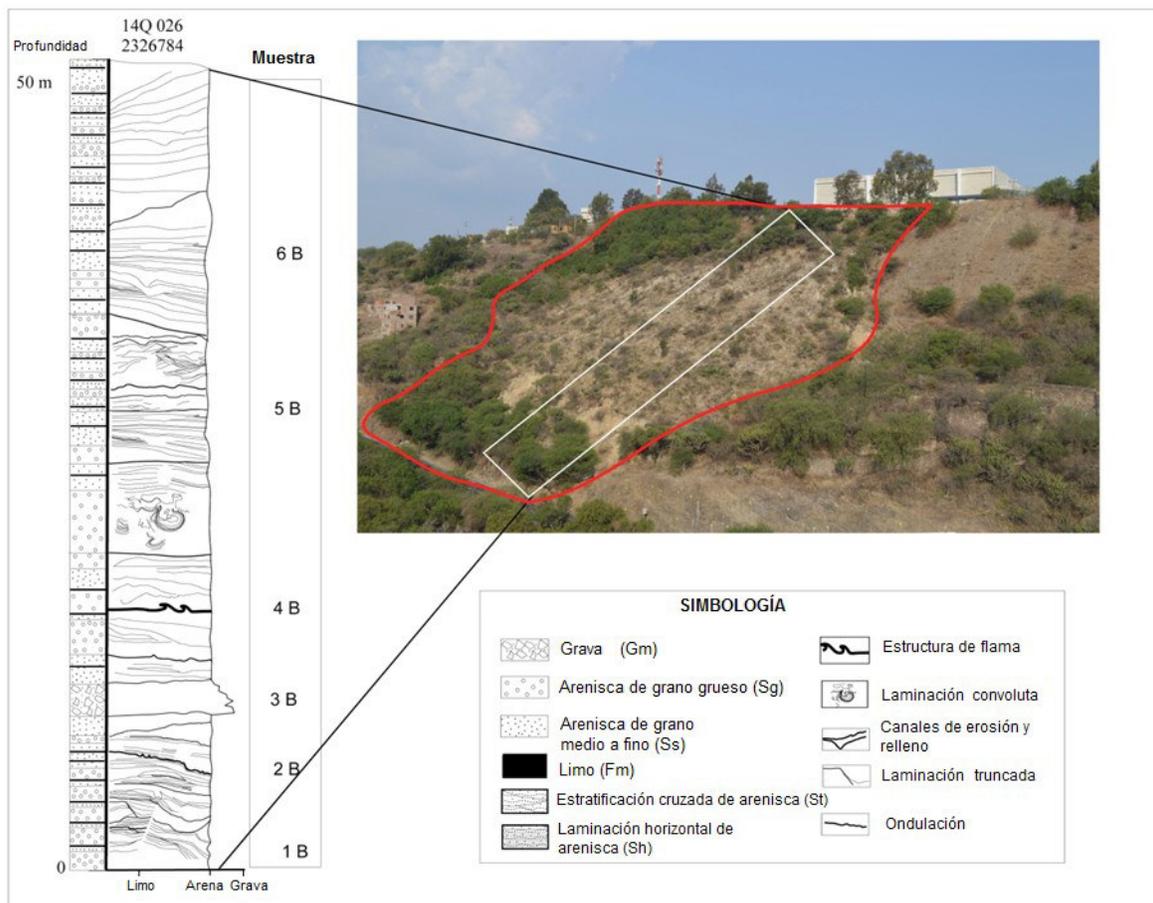


Figura 3. Columna estratigráfica La Cooperativa.

IV.1.2. Sección El Cerro del Cuarto (Figura 4).

Para esta sección El Cerro del Cuarto la composición del tamaño de grano fue de 10,75% en peso de grava, 39,53% en arena y 49,71% en arcilla limosa. El Cerro

del Cuarto presenta un mejor límite de consistencia que La Cooperativa. La porosidad presentada fue de 1.44%. En la prueba triaxial presentó 1.97 kg/cm². En los análisis de FRX los jales de El Cerro del Cuarto muestran metales como Al, Fe, Mg y Ag y metales pesados como As, Cr, Cu, Hg, Ni, Pb, Sn y Zn.

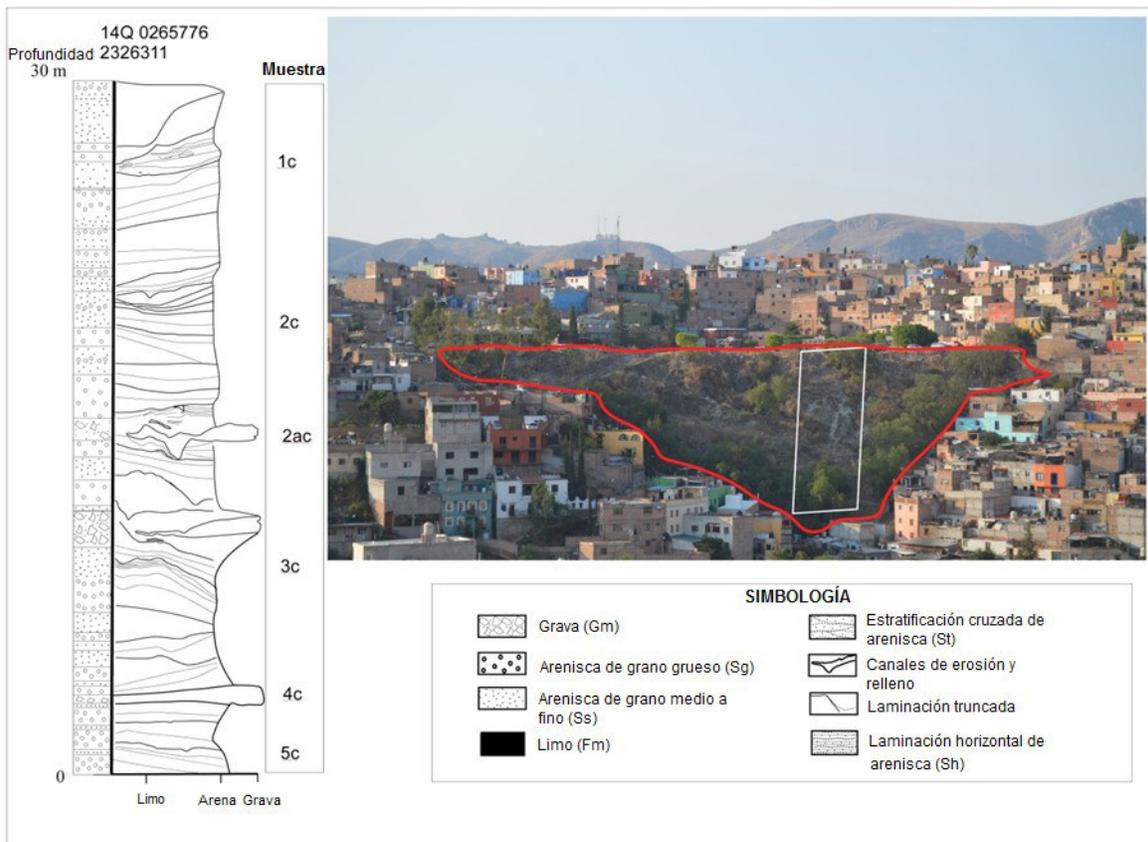


Figura 4. Columna estratigráfica del Cerro del Cuarto.

IV.1.3. Sección Nieto Piña (Figura 5).

La sección Nieto Piña tuvo una composición de tamaño de grano de 0,00% de grava, 13,48% en arena y 86,52% en peso de arcilla limosa. Este presenta un

mejor límite de consistencia en comparación a La Cooperativa. La porosidad más alta presentada fue la de esta sección con 2.15%. En las pruebas mecánicas Nieto Piña presentó en la prueba triaxial 2.36 kg/cm² mostrando valores de alta resistencia. En cuanto a las pruebas químicas los jales mineros de Nieto Piña muestran altos valores de metales como Al (55730ppm), Fe (30797ppm), Mg (9115ppm) y Ag (28.12ppm), así como metales pesados Cr (73.66ppm), Cu (128ppm), Hg (12.6ppm), Pb (369ppm) y Zn (456.6ppm).

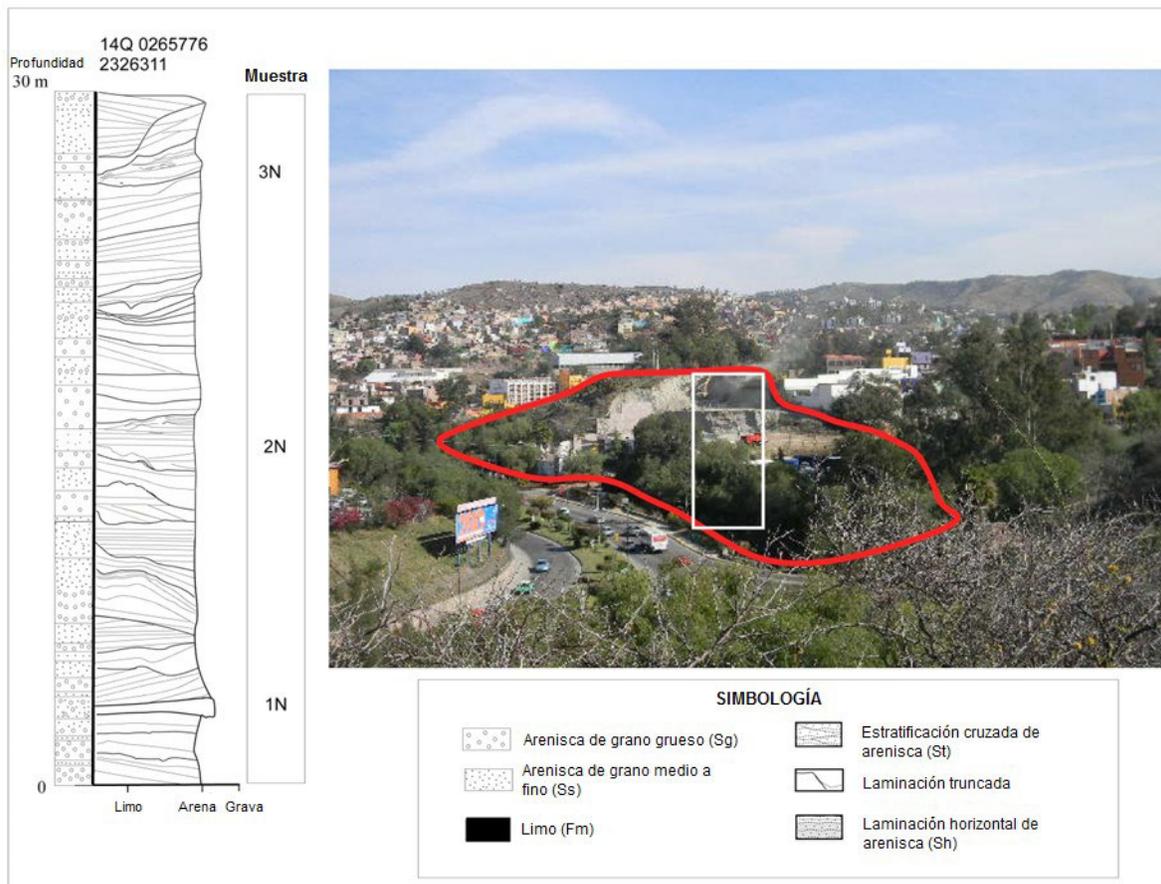


Figura 5. Columna estratigráfica de Noria Alta.

IV.2. Estructuras de deformación en los depósitos de jales.

Las estructuras de deformación indican una serie de inestabilidades durante y después de la depositación. La deformación en los sedimentos blandos involucra

plegamientos y contorsiones que se desarrollaron mucho antes de que el sedimento fuera litéficado. El mecanismo para la formación de la estructura de deformación es principalmente la presión incrementada de poro-agua asociada con la licuefacción de sedimentos saturado sin cohesión. Son varios los estilos comunes de deformación de sedimentos blandos: llama, convoluta, socavación y relleno, ondulación y plegamiento por asentamientos que producen una gran variedad de morfologías y niveles en los jales mineros (Figuras 6, 7 y 8). También hay una gran cantidad de estructuras sedimentarias primarias como estratificación cruzada, estratificación laminar, y estructuras de corriente. Todas estas estructuras tienen buena continuidad lateral en cada lecho, aunque algunas muestran baja intensidad de deformación. La licuefacción y las estructuras de fluidización asociadas están presentes en varios tipos de litofacies: areniscas finas, medianas y gruesas intercaladas con limolitas y lodolitas en las tres secciones estudiadas.

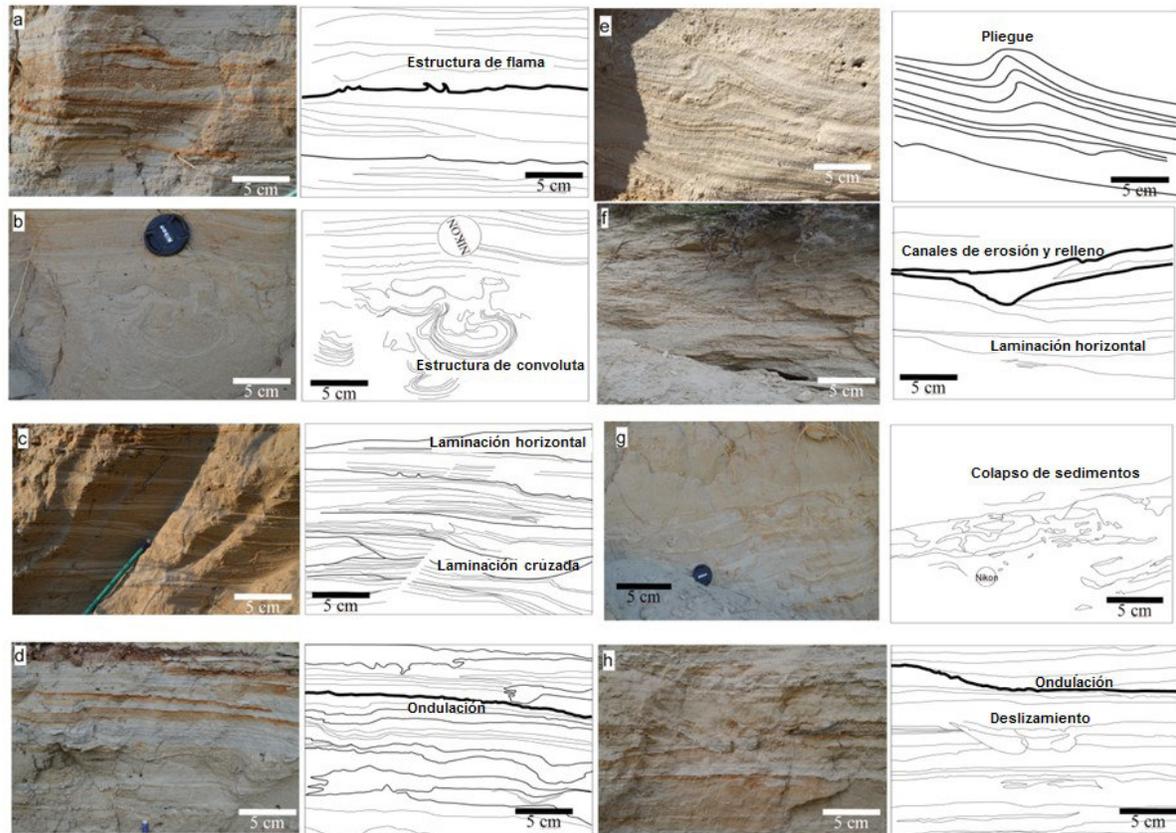


Figura 6. Fotografías de las estructuras de sedimentos blandos como resultado del fenómeno de licuefacción y fluidización en la explotación minera de La Cooperativa: a) estructura de la llama; b) laminación convoluta; c) laminación horizontal y transversal; d) ondulación; e) estructuras plegadas; f) Recubrimiento y relleno y laminación horizontal; g) la caída de los sedimentos superpuestos debido al colapso y la inestabilidad de la pared colgante; h) ondulación y depresión.

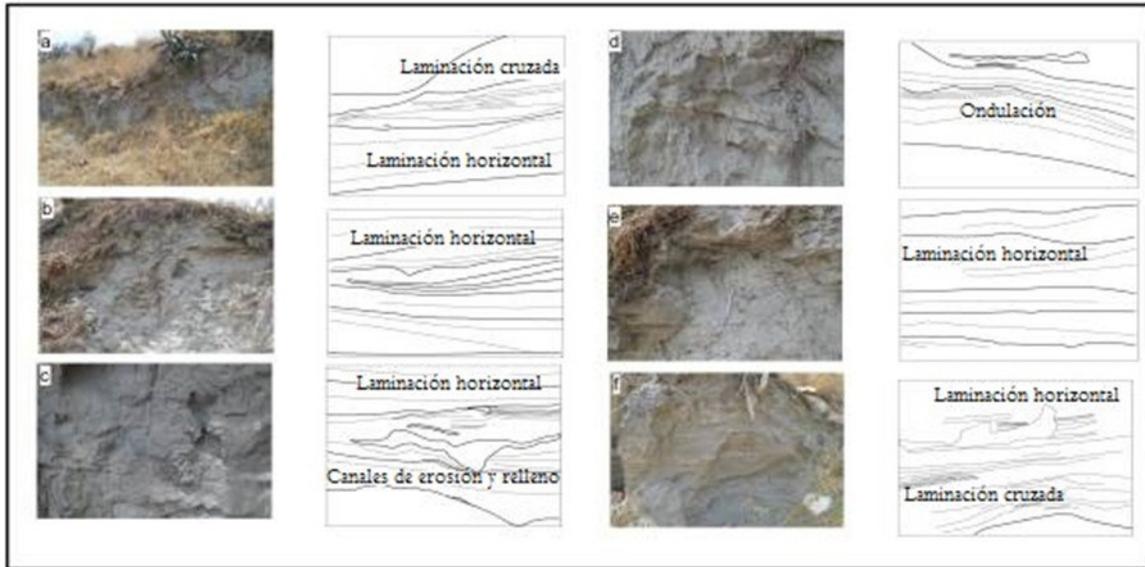


Figura 7. Fotografía de estructuras de sedimentos blandos como resultado de un fenómeno de licuefacción y fluidización en jales del Cerro del Cuarto: a, f) laminación cruzada y horizontal; b, e) laminación horizontal; c) laminación horizontal y canales de erosión y relleno; d) Estructura de ondulación.



Figura 8. Fotografía de estructuras de sedimentos blandos como resultado de un fenómeno de licuefacción y fluidización en los jales de Noria Alta: a) Laminación horizontal y ondulación; b) Laminación cruzada.

IV.2.1. Estructuras de flama.

Están presentes dentro de unidades heterolíticas compuestas por interlaminaciones muy finas de arena y barro (Figura 6), la arcilla limosa se inyectó hidroplásticamente en la unidad de arena de gran fino formando una estructura de llama compleja, las llamas cercanas a los pliegues se dirigen hacia arriba en ángulo alto respecto al lecho, tienen hasta 30 cm de ancho y 50 cm de alto dentro de los mismos horizontes de estas se encuentran las laminaciones convolutas. Un conjunto de láminas de lodolitas que tomaron forma de llama se reconoce en una capa de la sección La Cooperativa.

IV.2.2. Laminación convoluta.

La laminación convoluta está presente en los horizontes intercalados de arena-barro (Figura 6). Las circunvoluciones consisten en anticlinales y sinclinales orientados aleatoriamente, de 3-15 cm de amplitud y 5-25 cm de ancho. Están presentes en los horizontes intercalados de arena-barro. Las láminas convolutas están presentes en forma de trenes de pequeños pliegues cóncavos y convexos alternadamente, con crestas y depresiones en forma de cúpula ininterrumpidas. Estas también se han reconocido en un lecho de la sección La Cooperativa.

IV.2.3. Laminación cruzada.

La laminación cruzada es generada por el flujo subcrítico bidireccional que originalmente tenían condiciones de régimen alto. Asociada a laminación cruzada se tiene la laminación paralela (Figura 6).

IV.2.4. Estratos plegados.

Cuando el sedimento en una pendiente se licua este tiende a deslizarse hacia debajo de la pendiente. A veces estos pliegues se truncan por la erosión y se superponen con el material sedimentario similar.

IV.2.5. Ondulación

Presentes dentro de unidades compuestas por inter-laminaciones muy finas de arena y barro. Consiste en crestas de diferente amplitud. La capa se altera hasta formar pequeños remolinos, caracteriza el modo turbulento en la depositación.

IV.3. Procesos y mecanismo de deformación.

La deformación de los sedimentos blandos se produce por la sobrepresión de los mismos sedimentos (Lowe y Lo Piccolo, 1974; Lowe 1975). Las estructuras de deformación en los jales mineros fueron causadas por procesos de licuefacción y fluidización.

IV.3.1. Interpretación del mecanismo.

La alta concentración de limo causa un flujo dilatante (Brodzikowski, 1981), licuefacción espontánea, fluidización y comportamiento tixotrópico (Boswell, 1948; Allen y Banks, 1972; Lowe, 1975). El complejo de estructuras de deformación de sedimentos blandos de los jales mineros se formó en un sistema inicial de gradiente de densidad inversa de múltiples capas. Las arenas pesadas pueden hundirse en arenas y sedimentos más ligeros, acompañados de una disminución drástica o pérdida total de la resistencia al corte de los sedimentos (Allen, 1982; Owen, 1987).

- La formación de las estructuras de flama se atribuye a la fluidización direccional y al escape de agua debido al contraste de densidad entre las capas de arena y barro a lo largo de la interfaz (Collinson y Thompson, 1982).
- Los procesos de agua pueden causar la licuefacción del sedimento, lo que lleva a la formación de laminación convoluta y diferentes estructuras de escape de agua (Allen, 1977, Chakraborty, 1977). Cuando la deformación

se controla mediante procesos de agua, es más probable que se rompa la parte superior de las cúpulas de la lámina convoluta debido al flujo de agua unidireccional (Selley et al., 1963). Según Reineck y Singh (1980), se pueden formar capas convolucionales asociadas con superficies erosivas debido a la resistencia actual en ambientes acuáticos. Varios autores (Middleton y Hampton 1973, Allen 1977, Chakraborty 1977, Cojan y Thiry 1992, Owen 1996, Rossetti 1999, Samaila y otros 2006) sugieren que la convolución se relaciona con eventos de fluidización-licuefacción y la expulsión concomitante de agua intersticial. Owen (1996) atribuye algunas laminaciones convolutas a un gradiente de densidad aparente invertido sobre arena o sobre contactos de arena. Sin embargo, las laminaciones convolutas están asociadas en muchos casos con estructuras de escape de agua (Allen, 1982; Rossetti, 1999; Moretti et al., 1999).

- A veces la estratificación en una secuencia sedimentaria es gravitacionalmente inestable; una capa dada tiene una mayor densidad aparente que la capa subyacente. Entonces, si el sedimento se moviliza, produce una serie de ondulaciones en la superficie. Cuando se producen fluctuaciones de flujo laminar a turbulento en la capa límite laminar, es que éstas estructuras se producen.
- En los estratos sedimentarios, el material de desprendimiento generalmente se dobla elásticamente hasta que se excede la resistencia de la roca, cuando se rompe y se mueve rápidamente.

CAPÍTULO V. CONCLUSIÓN

1. Las estructuras de deformación sedimentaria observadas en los depósitos de jales mineros estudiados se desarrollaron como resultado del aumento de la presión de poro y por los esfuerzos verticales u horizontales inducidas por el proceso de licuefacción y fluidización que no están asociados a eventos sísmicos. El proceso de licuefacción y fluidización, jugó un papel importante en su génesis, por ello la similitud de las estructuras de deformación con sismitas descritas en la literatura.

2. Se han identificado estructuras de deformación de sedimentos en una sucesión de 30 m de espesor de arena, arena de grano fino y arcilla limosa en el distrito minero de Guanajuato.
3. La morfología se puede describir como una sucesión vertical compleja de diferentes capas alternadas. La deformación varía de ligeramente a fuertemente distorsionada, e incluye: a) pliegues, b) estructuras de flama, c) ondulación, d) canales de erosión y relleno, y e) laminación convoluta.
4. En el área de estudio, las estructuras de deformación solo aparecen en la parte inferior de la presa, por lo que se sugiere un fenómeno de sobrecarga; En el fenómeno de sobrecarga, los procesos se desarrollan principalmente en sedimentos finos ya que en los sedimentos arenosos el incremento de la presión intersticial producida por sobrecarga sedimentaria, disminuye rápidamente debido a la alta permeabilidad del sedimento arenoso y normalmente dificulta la licuefacción.
5. Este tipo de procesos se desarrolla sólo cuando el depósito masivo es repentino, instantáneo, como ocurre en las presas de jales, estas características no pueden explicarse por otros mecanismos, incluidos los procesos gravitacionales o hidrodinámicos.
6. Las estructuras deformadas de sedimento son importantes características de diagnóstico de los estudios de licuefacción y fluidización.

REFERENCIAS BIBLIOGRÁFICAS

Allen, J.R.L., Banks, N.L., 1972, An interpretation and analysis of recumbent folded deformed cross-bedding. *Sedimentology*, 19, 257-283.

Allen, C.R., 1975, Geological criteria for evaluating seismicity. *Geological Society of America Bulletin* 86, 1041–1057.

Allen, J.R.L., 1977, The possible mechanics of convolute lamination in graded sand beds. *Journal of the Geological Society, London*, 134, 19-31.

Allen, J.R.L., 1982, *Sedimentary structures: their character and physical basis*, Vol. II. Elsevier, New York. 663 pp.

Antúnez, E.F., 1964, *Monografía Histórica y Minera del Distrito Minero de Guanajuato: México*, Consejo Nacional de Recursos Naturales no Renovables, Publicación 17-E, 589 p.

Aranda-Gómez, J.J., Aranda-Gómez, J.M., Nieto-Samaniego, A.F., 1989, Consideraciones acerca de la evolución tectónica durante El Cenozoico de La Sierra de Guanajuato y la parte meridional de la Mesa Central: *Revista Instituto Geología, Universidad Autónoma, México*, 2, 33-46.

Aranda-Gomez, J.J., Mc Dowell, F.W., 1998. Paleogene extension in the southern basin and range province of México: Syndepositional tilting of Eocene red beds and Oligocene volcanic rocks in the Guanajuato mining district: *International Geology Review*, 40, 116-134.

Archivo General de la Nación, 1947, Expediente 606.1/33, Informe del Gerente General Relativo a las Operaciones de la Sociedad Cooperativa Minero-Metalúrgica "Santa Fé de Guanajuato" No. 1, S.C.L., Noviembre de 1947. Se realizan pruebas metalúrgicas para probar la factibilidad del método de flotación en minerales del Distrito Minero de Guanajuato: Dirección del Archivo Histórico Central, 42 p.

ASTM D2487-11 standard Método de Ensayo Estándar para la Clasificación de Suelos con Propósitos de Ingeniería (Sistema de Clasificación Unificado de Suelos).

Boswell, P.G.H., 1948, A preliminary examination of the thixotropy of some sedimentary rocks. *Quarterly Journal of the Geological Society*, 104, 499-526.

Brodzikowski, K., 1981, Dilatancy and the course of the deformational process in unconsolidated sediments, *Annales Societatis Geologorum Poloniae*, 51 (1-2), 83-98.

Camprubí, A., Albinson, T., 2007, Epithermal deposits in México – an update of current knowledge, and an empirical reclassification, in Alaniz-Álvarez, S.A., Nieto-Samaniego, A.F. (eds.), *Geology of México: Celebrating the Centenary of the Geological Society of México: The Geological Society of America Special Paper*, 422, 377-415.

Carrillo-Chávez, A., Morton-Bermea, O., González-Partida, E., RivasSolórzano, H., Oesler, G., García-Meza, V., Hernández, E., Morales, P., Cienfuegos, E., 2003, Environmental geochemistry of the Guanajuato Mining District, Mexico: *Ore Geology Reviews*, 23, 277-297.

Cerca-Martínez, L.M., Aguirre-Díaz, G.J., López-Martínez, M., 2000. The geologic evolution of the southern Sierra de Guanajuato, México: A documented example of the transition from the Sierra Madre Occidental to the Mexican Volcanic Belt: *International Geology Review*, 42, 131-151.

Chakraborty, A., 1977, Upward flow and convolute lamination. *Senckenbergiana Maritima*, 9, 285–305.

Clark, K.F., Foster, C.T., Damon, P.E., 1982, Cenozoic mineral deposits and subduction-related magmatic arcs in Mexico: *Geological Society of America Bulletin*, 93, 533–544.

Cojan, I., Thiry, M., 1992, Seismically induced deformation structures in Oligocene shallow marine and eolian coastal sands (Paris Basin). *Tectonophysics*, v.206, 79–89.

Collinson, J.D., Thompson D.B., 1982, *Sedimentary Structures*, Allen & Unwin, London, 194 pp.

Dávila-Alcocer, V.M., Martínez-Reyes, J., 1987, Una edad Cretácica para las rocas basales de la Sierra de Guanajuato: Instituto de Geología, Simposio sobre la Geología de la Región de la Sierra de Guanajuato, resumen, 19-20.

Echegoyen-Sanchez, J., Romero-Martinez, S., and Velazquez-Silva, S., 1970. Geología y yacimientos minerales de la parte central del distrito minero de Guanajuato: Consejo de Recursos Naturales No renovables, Boletín 75, México, D.F., 36p.

Echegoyén, S.J., 1978. Yacimientos minerales de la Sierra de Arperos y Comanja. Estado de Guanajuato, México: Consejo de Recursos Naturales, 21 p.

Edwards, J.D., 1955. Studies of some early Tertiary red conglomerates of Central Mexico: U.S. Geology Survey Professional. 264, 153-185.

Fernández, V., 1879, Práctica del beneficio de minerales de plata auríferos usado en el Distrito de Guanajuato llamado de patio: La Naturaleza, 4, 1877–1879.

Ferrusquía-Villafranca, I., 1987, Reubicación geocronología del Conglomerado Guanajuato basada en nuevos mamíferos, in Programa, resúmenes y guía de excursión del simposio sobre la geología de la región de la sierra de Guanajuato, Guanajuato, Gto., 28-30 de abril: Universidad Nacional Autónoma de México, Instituto de Geología, 21-23.

Fielding, C.R., 2006, Upper flow regime sheets, lenses and scour fills: extending the range of architectural elements for fluvial sediment bodies. *Sedimentary Geology* 190, 227-240.

Fries, C.; Hibbard, C.W. & Dunkle, D.H. (1955). Early Cenozoic vertebrates in the Red conglomerate at Guanajuato, Mexico. *Smithsonian Miscellaneous Collection*, 123(7), 25 p.

Horowitz, D.H., 1982, Geometry and origin of large-scale deformation structures in some ancient wind-blown sand deposits. *Sedimentology* 29, 155–180.

Humboldt, A., 1822, *Ensayo Político Sobre el Reino de la Nueva España: México*, Editorial Porrúa, S.A., quinta edición, 1991, 698 p.

Lapierre, H., Ortíz, L.E., Abouchami, W., Monod, O., Coulon, C., Zimmermann, J.L., 1992, A crustal section of an intra-oceanic island arc: the Late Jurassic-Early Cretaceous Guanajuato magmatic sequence, Central México. *Earth Planetary science Letters*, 108, 61-77.

Lowe, D.R., LoPiccolo, R.D., 1974, Characteristics and origins of dish and pillar structures. *Journal of Sedimentary Petrology*, 44, 484-501.

Lowe, D.R., 1975, Water scape structures in coarse grained sediments. *Sedimentology*, 22, 157-204.

Mango, H.N., 1992, *Origin of epithermal Ag–Au–Cu–Pb–Zn mineralization on the Veta Madre, Guanajuato, México*: Hanover, New Hampshire, Dartmouth College, tesis doctoral, 138 p.

Martin, T.E. and E.C. McRoberts (1999). "Some considerations in the stability analysis of upstream tailings dams". *Tailings and Mine Waste '99*, pp. 287- 302.

Martínez-Reyes, J., 1987. *Resumen de la geología de la Sierra de Guanajuato*: Universidad Nacional Autónoma de México, Instituto de Geología, Simposio sobre la geología de la región de la Sierra de Guanajuato, Guanajuato, Gto., p 50-91.

Martini, M., Mori, L., Solari, L., Centeno-García, E., 2013, Sandstone provenance of the Arperos Basin (Sierra de Guanajuato, Central Mexico): Late Jurassic-Early Cretaceous back- arc spreading as the foundation of the Guerrero-terranes: *The Journal of Geology*, 119(6), 597-617.

Miall, A. D., 1996, *The Geology of Fluvial Deposits: Sedimentary Facies, Basin Analysis and Petroleum Geology*. Berlin: Springer Verlag.

Middleton, G.V., Hampton, M.A., 1973, Sediment gravity flows: Mechanics of flow and deposition in Turbidites and Deep Water Sedimentation: Tulsa Oklahoma, SEPM, Pacific Section, Short Course Lecture Notes, 1-38.

Moretti, M., Alfaro, P., Caselles, O., Canas, J.A., 1999, Modelling seismites with a digital shaking table. *Tectonophysics*, 304, 369-383.

Nieto-Samaniego, A.F., Macías-Romo, M.C., y Alaniz-Alvarez, S.A., 1996, Nuevas edades isotópicas de la cubierta volcánica cenozoica de la parte meridional de la Mesa Central, México: *Revista Mexicana de Ciencias Geológicas*, 13, 117-122.

Nieto-Samaniego, Á.F.; Báez-López, J.A.; Levresse, G.; Alaniz-Álvarez, S.A.; Ortega-Obregón, C.; López-Martínez, M. & Solé-Viñas, J. (2016). New stratigraphic, geochronological, and structural data from the southern Guanajuato Mining District, México: implications for the caldera hypothesis. *International Geology Review*, 58(2): p. 246–262.

Orozco, R., 1921, La Industria Minera de México. Distrito de Guanajuato. México: Secretaria de Industria, Comercio y Trabajo. Departamento de Exploraciones y Estudios Geológicos, 163pp.

Owen, G., 1987, Deformation processes in unconsolidated sands. In: Jones, M.E., Preston, R.M.F. (Eds.), *Deformation of Sediments and Sedimentary Rocks*: Geological Society of London, Special Publications, 29, 11–24.

Ortiz-Hernández, L.E., Choidi, M., Lapierre, H., Monod, O., Calvet, P., 1992, El arco intraoceánico alóctono (Cretácico Inferior) de Guanajuato, características petrográficas, geoquímicas, estructurales e isotópicas del complejo filoniano y de las lavas basálticas asociadas. Implicaciones geodinámicas: *Revista del Instituto de Geología*, 9(2), 126-145.

Owen, G., 1996, Experimental soft-sediment deformation: structures formed by liquefaction of unconsolidated sands and some ancient examples. *Sedimentology*, 43, 279–293.

Puy-Alquiza, M.J., Miranda-Avilés, R., Salazar-Hernández, C., Vega- González, M., Cervantes, J., 2013, Characterization petrophysical of the Losero Formation in the Historical Architecture of the Guanajuato City, Mexico: *Ingeniería Investigación y Tecnología*, 14(2), 191-205.

Puy-Alquiza, María Jesús; Miranda-Avilés, Raúl; Zanon, Gabriela Ana; Salazar Hernández, Ma. Mercedes; Salazar-Hernández, Ma. del Carmen, 2015. Cenozoic seismites and soft-sediment deformation structures in the Losero Formation, southern Sierra de Guanajuato, Mexico. *Revista Mexicana de Ciencias Geológicas* 32 (2), 203-218.

Ramos-Arroyo Y.R., Prol-Ledesma R.M., Siebe-Grabach C., 2004, Características geológicas y mineralógicas e historia de extracción del Distrito de Guanajuato, México; Posibles escenarios geoquímicos para los residuos mineros: *Revista Mexicana de Ciencias Geológicas*, 21(2), 268-284.

Randall-Roberts, J., 1990, Geology of El Cubo mine and area, Guanajuato, México, in Clark, K.F. (ed.), *Mexican Silver Deposits, Guidebook: Society of Economic Geologists, SEG Guidebooks Series*, 6, 213–227.

Randall-Roberts, J.A., Saldaña, E., Clark, K.F., 1994, Exploration in a volcano-plutonic center at Guanajuato, México: *Economic Geology*, 89, 1722–1751.

Reineck, H.E., Singh, I.B., 1980, *Depositional sedimentary environments*, Springer-Verlag, Berlin-Heideberg-, New York, 439 p.

Ritcey, G.M., 1989, *Tailings Management Problems and solution in the Mining Industry*. Elsevier Press.

Rossetti, D.F., 1999, Soft-sediment deformational structures in late Albian to Cenomanian deposits, Sao Luis Basin, northern Brazil: evidences for paleoseismicity. *Sedimentology*, 46, 1065–1081.

Samaila, N.K., Abubakar, M.B., Dike, E.F.C., Obaje, N.G., 2006, Description of soft-sediment deformation structures in the Cretaceous Bima Sandstone from the Yola Arm, Upper Benue Trough, Northeastern, Nigeria. *Journal African Earth Science*, 44, 66-74.

Selley, R.C., Shearman, D.J., Sutton, J., Watson, J., 1963, Some underwater disturbances in the Torridonian of Skye and Raasay: *Geological Magazine*, 100(3), 224–243.

Tardy, M., Lapierre, H., Bourdier, J.L., Coulon, C., Ortiz-Hernández, L.E., Yta, M., 1992, Intraoceanic setting of the western Mexico Guerrero Terrane- implications for the Pacific Tethys geodynamic relationships during the Cretaceous. *Universidad Nacional Autónoma de México, Instituto de Geología*, 10(2), 118-128.

Tardy, M., Lapierre, H., Freydier, C., Coulon, C., Gill, J.B., Mercier de Lepinay, B., Beck, C., Martinez, J., Talavera, M., Ortiz, E., Stein, G., Bourdier, J.L., and Yta, M., 1994, The Guerrero suspect terrane (western Mexico) and coeval arc terranes (the Greater Antilles and the Western Cordillera of Colombia): A late Mesozoic intraoceanic arc accreted to cratonic America during the Cretaceous: *Tectonophysics*, v. 234, p. 49–73.

UNE-EN 1936, (2006). método de ensayo para piedra natural : determinación de la densidad real y aparente y de la porosidad abierta y total.

Williams, E.G., Rose, A.W., Parizek, R.R., Waters, S.A., 1982, Factors controlling the generation of acid mine drainage. Final Report on US Bureau of Mines Research Grant n. 51055086. Pennsylvania State University.

White, W.W., Lapakko, K.A., Cox, R.L., 1999, Static test methods most commonly used to predict acid-mine drainage; practical guidelines for use and interpretation, in Plumlee, G.S. (ed.), *The Environmental Geochemistry of Mineral Deposits*, Part

A: Processes, Techniques, and Health: Reviews in Economic Geology, 6A, 325–338.

Zimmermann, J. L., Stein, G., Lapierre, Henriette, Vidal, Raúl Campa, M.F., y Monod, Olivier, 1990, Données geochronologiques nouvelles sur les granites laramiens du centro et de l'ouest du Mexique (Guerrero et Guanajuato): Société Géologique de France, Réunion des Sciences de la Terre, 13, Grenoble, Francia, p. 127 (resumen).