



UNIVERSIDAD NACIONAL AUTÓNOMA DE MÉXICO

FACULTAD DE INGENIERÍA

ANÁLISIS TÉCNICO - ECONÓMICO PARA DEFINIR LA
VIABILIDAD DEL USO DE INICIADORES ELECTRÓNICOS
PARA SUSTITUIR LOS INICIADORES PIROTÉCNICOS
EN UNA CANTERA DE CALIZA

T E S I S

QUE PARA OBTENER EL TÍTULO DE:
INGENIERO DE MINAS Y METALURGISTA

PRESENTA

CARLOS ALTAMIRANO ALVAREZ



MEXICO, D.F.

2010



Universidad Nacional
Autónoma de México



UNAM – Dirección General de Bibliotecas
Tesis Digitales
Restricciones de uso

DERECHOS RESERVADOS ©
PROHIBIDA SU REPRODUCCIÓN TOTAL O PARCIAL

Todo el material contenido en esta tesis esta protegido por la Ley Federal del Derecho de Autor (LFDA) de los Estados Unidos Mexicanos (México).

El uso de imágenes, fragmentos de videos, y demás material que sea objeto de protección de los derechos de autor, será exclusivamente para fines educativos e informativos y deberá citar la fuente donde la obtuvo mencionando el autor o autores. Cualquier uso distinto como el lucro, reproducción, edición o modificación, será perseguido y sancionado por el respectivo titular de los Derechos de Autor.

INTRODUCCION

Zemer Constructora S.A. de C.V. se ha constituido como una empresa líder en el servicio de explotación de minas a cielo abierto para suministrar las materias primas para la fabricación de cemento y cal. La empresa define sus negocios en términos de las necesidades de sus clientes ajustando sus operaciones en busca de la calidad del servicio.

Este servicio de out-sourcing abarca desde la planeación de la explotación, hasta la entrega del producto triturado en la calidad y cantidad requeridas por el cliente. Este tipo de servicio en la explotación de minas a cielo abierto ofrece varias ventajas las cuáles son:

- a) Disminución de inversión en equipo para la explotación de canteras.
- b) El cliente puede orientar su atención en sus procesos internos, mejorándolos y enfocándose en resultados.
- c) Optimización de costos.
- d) Se tiene un precio pre-establecido de la materia prima.
- e) Reducción de la carga administrativa.
- f) Obtención de tecnología y procesos de punta.
- g) Empresa certificada en ISO 9001: 2000, ISO 14000 y OHSAS 18000.

Bajo este enfoque, Cementos Lafarge y Zemer Constructora comenzaron un proyecto a raíz de la construcción de una nueva planta de cemento localizada en el estado de Hidalgo en 2003. Dicho proyecto incluye la construcción y operación de un sistema de trituración y cribado para la entrega de dos productos, caliza triturada de 30 mm a 15 mm y caliza triturada menor a 70 mm excepto la fracción de 30mm a 15 mm. Dicho sistema debía contar con la más alta tecnología en sistemas de control electrónico así como la operación del mismo junto con la operación de la cantera.

El sistema de trituración incluye una banda de longitud de 1,600 m la cuál transporta el material desde la parte superior del Cerro Blanco hasta la planta de cemento ubicada en la parte inferior de dicho cerro, sustituyendo al acarreo convencional en camiones. La construcción del proyecto y preparación de la cantera terminó en octubre del 2005, desde entonces Zemer Constructora ha operado y entregado el material solicitado a un ritmo inicial de 600,000 ton anuales.

Operar con la banda transportadora incluye un acarreo de los bancos de explotación hasta una quebradora primaria, la cuál está ubicada en la parte alta del Cerro Blanco y descarga sobre la banda BT01 que tiene una longitud de 1,600m, la cuál es la que lo lleva por toda la ladera hasta una criba y un circuito de trituración secundario.

Actualmente el equipo de explotación de la cantera ésta compuesto por:

Perforadora Stenuick

Compresor Sullair 375

Perforadora IR 590

Cargador Komatsu WA 430

Camiones de Acarreo Tipo Torton de 14 m³

El sistema de iniciación de las voladuras es el sistema Nonel, en su variante de EZdet, los cuáles proveen un tiempo de retardo en el fondo y una de superficie. Los resultados con éste sistema durante 3 años de trabajo han sido aceptables en fragmentación y desplazamiento.

Una posible mejora es la utilización de un sistema de iniciación electrónica la cuál disminuye la dispersión que el sistema pirotécnico posee, y puede ofrecer alternativas en las plantillas de barrenación, inclusive abrir dichas plantillas para bajar el costo de barrenación obteniendo los mismos resultados.

Este trabajo tiene como objetivo, hacer un análisis económico y técnico mediante el cuál se vea la viabilidad del uso de iniciadores electrónicos en lugar de los pirotécnicos, obteniendo los resultados de desplazamiento y fragmentación óptimos, con un costo por tonelada tumbada igual o semejante al de las voladuras con pirotécnicos, con un ahorro en barrenación debido a la posibilidad de abrir la plantilla de barrenación, para lo cuál, una vez establecida la plantilla tal que sea posible abatir el costo del explosivo con el ahorro en barrenación, se deberá proceder a un periodo de pruebas para evaluarlas.

Para esto se utilizaran los datos reales de costos y parámetros de operación, así como una prueba con dichos iniciadores realizada en mayo del 2008.

CAPITULO 1. GENERALIDADES

1.1 LOCALIZACION

El lugar de estudio se denomina predio Navarrete y se localiza en medio de El Cerro Chiquihuitillo, Cerro Los Cuates y Cerro Blanco perteneciente al municipio de Atotonilco de Tula, Hidalgo. Que se ubica en la parte Sur Oeste del estado de Hidalgo entre los 2300 msnm, y entre las coordenadas geográficas 20°00' latitud Norte y 99°10' longitud Oeste.

Se llega al lugar, llegando a Vito de Tula Hidalgo y tomando la carretera No.21 y del cruce del refugio rumbo Apaxco en el kilómetro 1+145 se toma el camino vecinal rumbo al Rancho “El Bateje” y en el kilómetro 0+650 se encuentra el acceso al predio.

El predio como se menciona pertenece al municipio de Atotonilco de Tula y colinda con los municipios de Atitalaquia y Tetepango que pertenecen al Estado de Hidalgo y por él la Este colinda con el municipio de Apaxco, Estado de México.

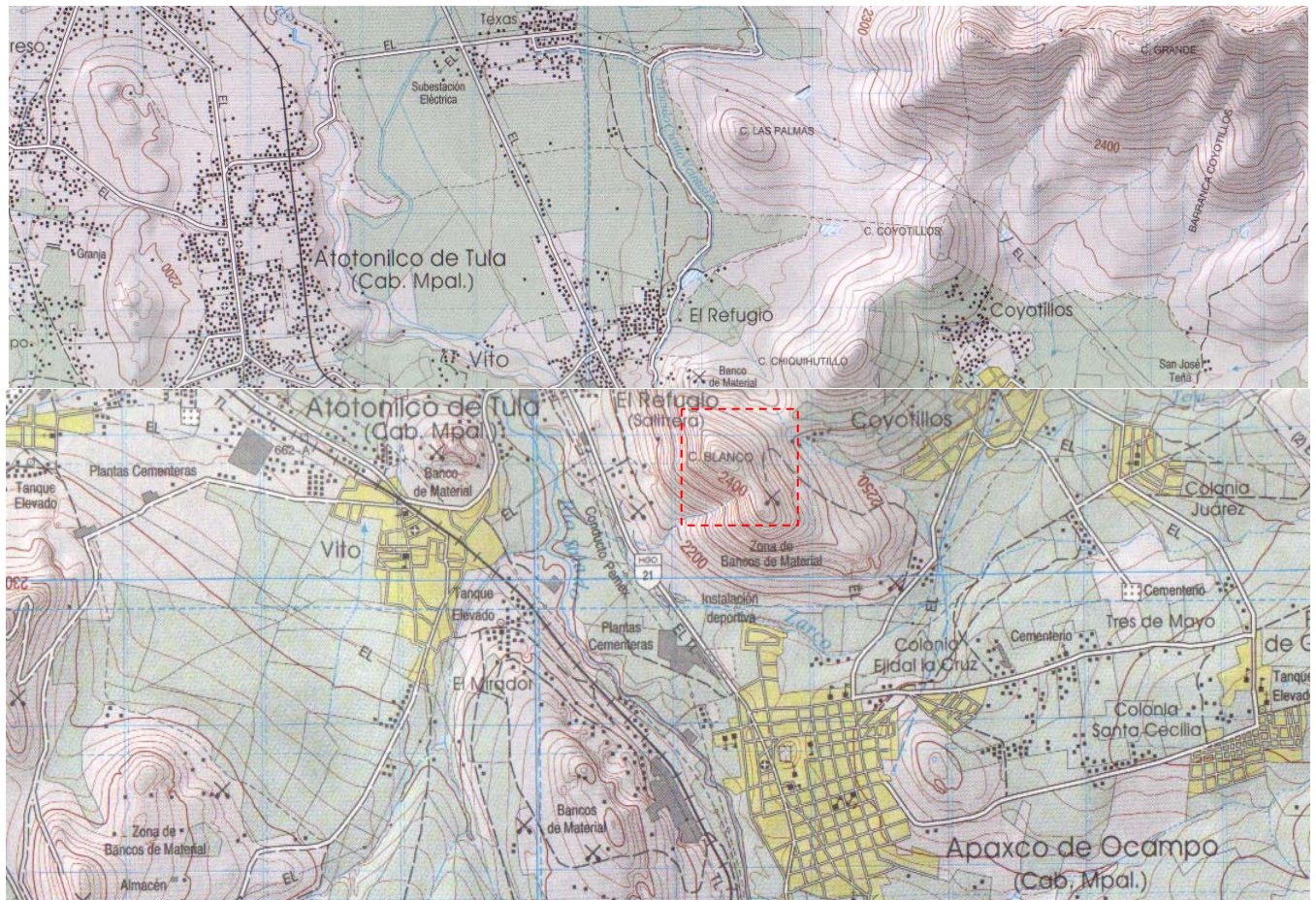


Figura 2. Plano de localización

1.2 TOPOGRAFIA

La topografía del lugar es suave en la parte norte, pero se hace mucho más irregular en el sur. En los cerros la altura llega a los 2430 msnm, y en la parte más suave cerca del límite norte de la propiedad llega a los 2210 msnm. El área aproximada de terreno es de 130 hectáreas.

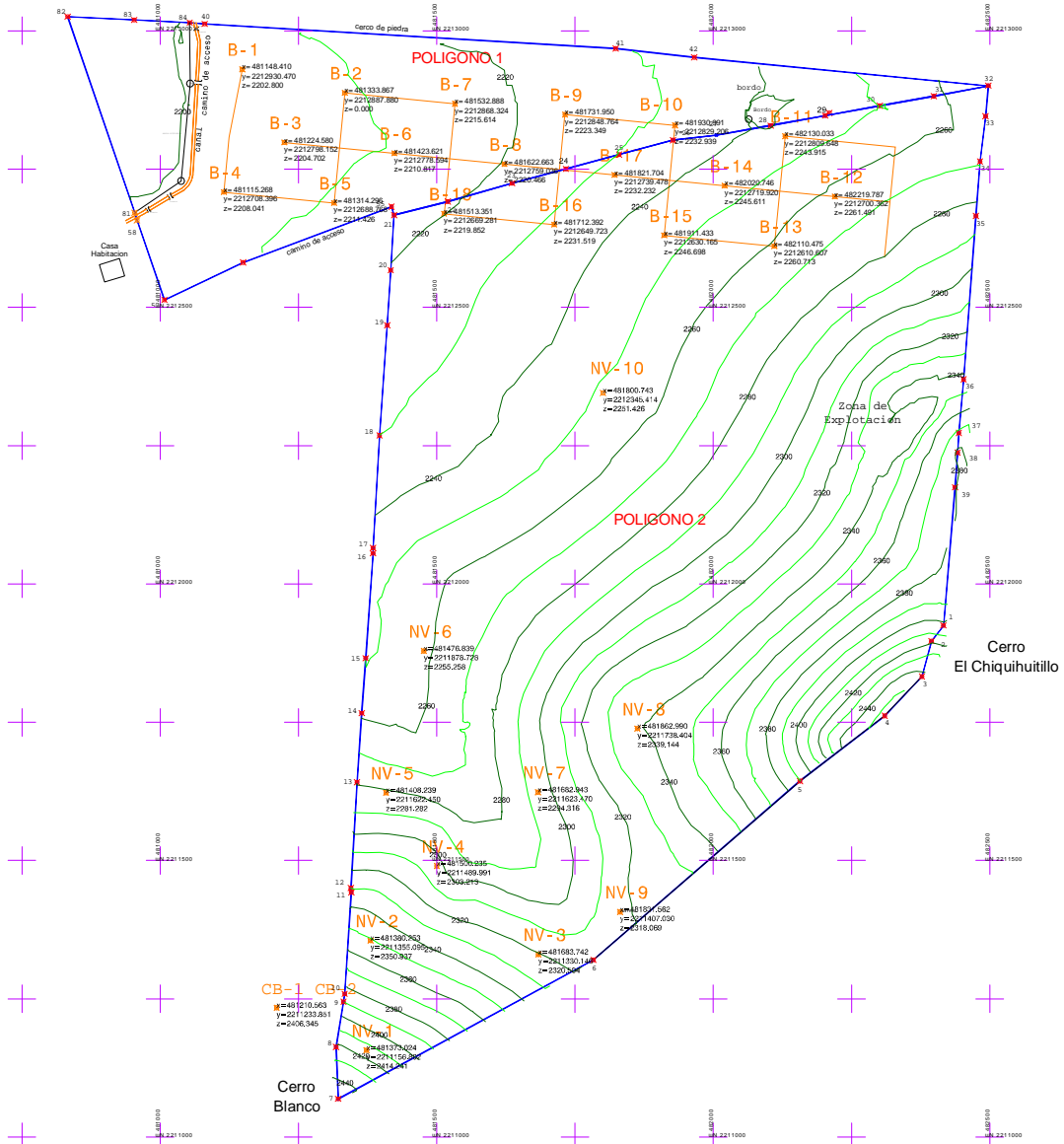


Figura 3. Plano topográfico

1.3 VIAS DE COMUNICACIÓN

La integración del lugar de interés con las vías de comunicación es accesible y rápida, que favorece al lugar con una excelente red de comunicaciones a su colindancia con el Distrito Federal y su situación intermedia paso obligado hacia el bajío.

1.3.1 Carreteras. El predio Navarrete tiene una cercanía muy estrecha con el Distrito Federal y se puede comunicar por la carretera federal (21) Apaxco - Atitalaquia, y por la carretera federal (31) Conejos - Jorobas que entronca con la Autopista México – Querétaro carretera (57) que es la vía principal terrestre de acceso al Distrito Federal con la parte Norte, Centro y Occidente del país.

Además tiene un fácil acceso a las principales poblaciones conurbanas del lugar como, Atotonilco, Atitalaquia, Tetepango, Apaxco, Vito y Conejos, y donde por la cercanía con el Distrito Federal, que en un radio de 30 kilómetros del lugar existe un gran numero de poblaciones con una densa población.

La capital del estado es *Pachuca* se localiza a 80 kilómetros aproximadamente del lugar de estudio.

1.3.2 Ferrocarriles. Actualmente las vías que tocan cercanamente el lugar de interés son el trayecto *México a Querétaro* principal vía de comunicación de todo el centro y norte del país hacia la *Ciudad de México*.

1.3.3 Vías Aéreas. Por vía aérea, el aeropuerto más cercano es el de la *Ciudad de México*, que es el principal aeropuerto del país con conexión a toda la república y el extranjero. Ubicado aproximadamente a 60 minutos del lugar de nuestro interés.

1.3.4 Otras vías de comunicación. Además de las vías de comunicación mencionadas, se tiene suficiente acceso a comunicaciones como, teléfono, teléfono celular, y en la cabecera municipal de Atotonilco, población cercana cuenta con correo, red telegráfica, onda corta y banda

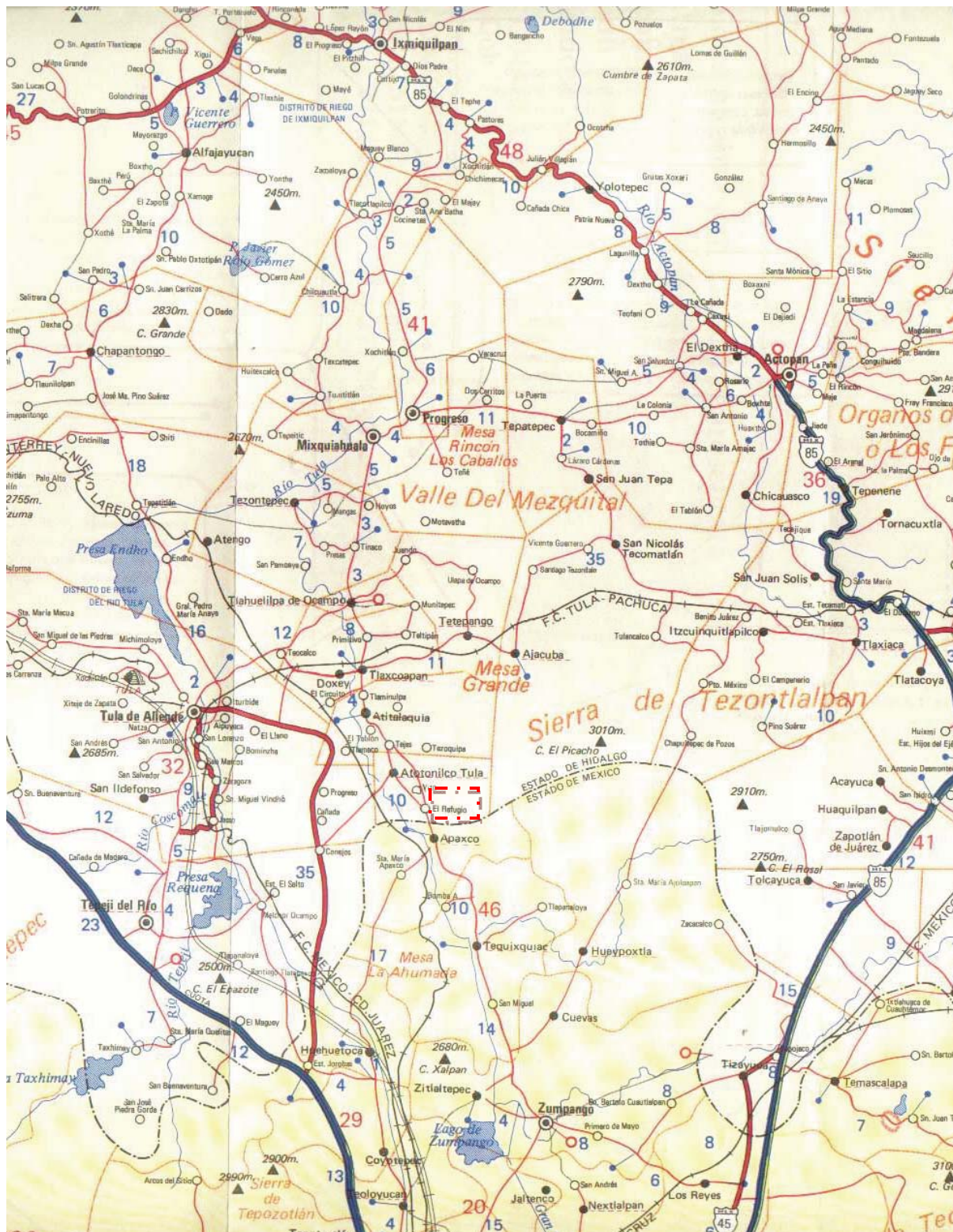


Figura 4. Mapas de carreteras

1.4 MEDIO SOCIO-ECONOMICO

El lugar de estudio pertenece al municipio de Atotonilco de Tula Hidalgo. Pero como colinda muy cercanamente con los municipios de Atitalaquia y Tetepango Hidalgo. Así como con Apaxco, Estado de México, se describen las principales características sociales que tienen en el medio social de estas poblaciones.

1.4.1 Demografía y servicios sociales.

De acuerdo con el censo de población y vivienda de 2000 (INEGI), se tiene que la población estimada del municipio de Atotonilco de Tula es de alrededor de 24,733 habitantes distribuida en 12,250 hombres y 12,483 mujeres, Atitalaquia cuenta con 21,805 habitantes distribuidos en 10,771 hombres y 11,034 mujeres, Tetepango cuenta con 8,927 habitantes los cuales 4,394 hombres y 4,533 mujeres, Apaxco cuenta con 23,734 habitantes 11,711 hombres y 12,023 mujeres. Lo que hace un total de población en estas comunidades de 79,199 habitantes.

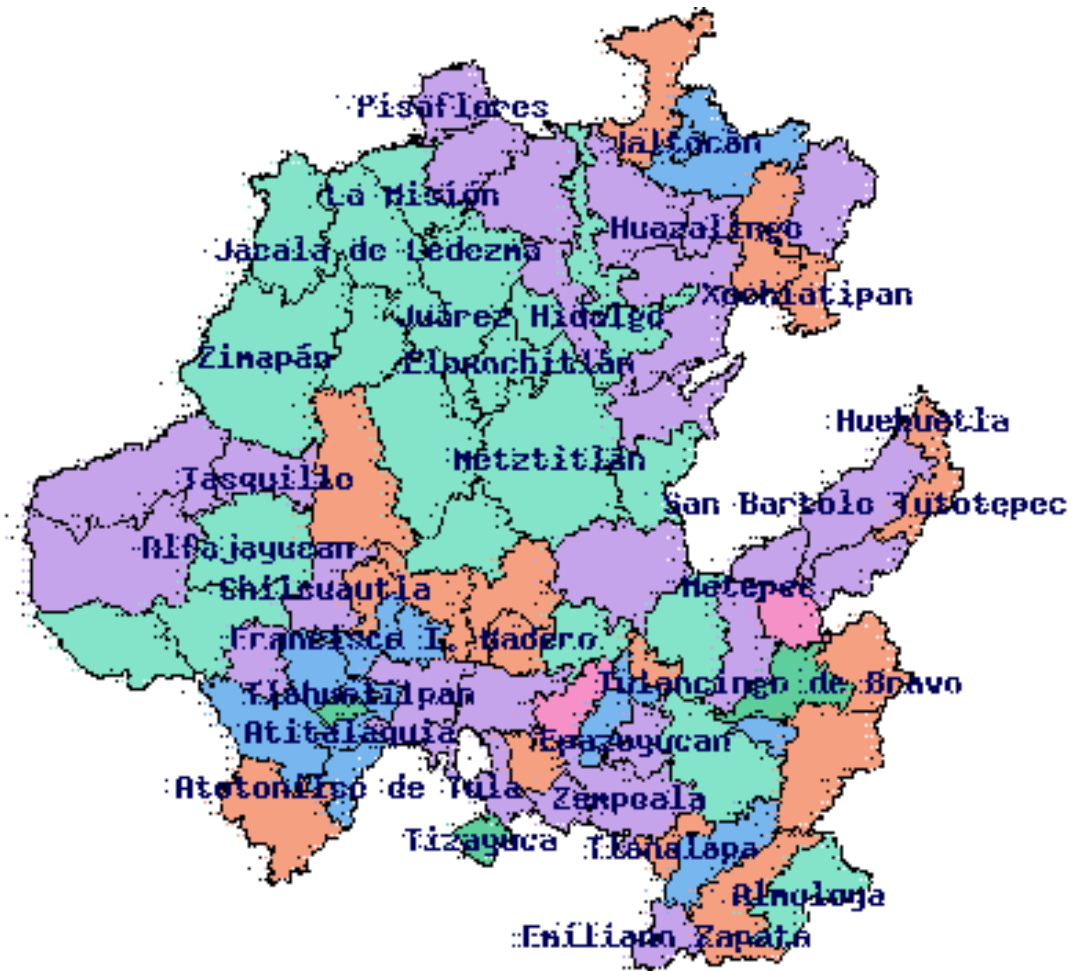


Figura 5. Mapa del Estado de Hidalgo

1.5 HIDROLOGÍA Y CLIMATOLOGÍA

1.5.1 Geohidrología

Hidrología Superficial.- Las corrientes superficiales de esta zona corresponden a la cuenca del Río Salado afluente del Río Tula por su margen derecha, esta cuenca presenta aporte de varios arroyos de comportamiento intermitente y secos en la mayor parte del año, este río lleva aguas de desecho de la ciudad de México al cual se le han realizado obras hidráulicas con la finalidad de llevar el riego a las áreas cercanas a su cauce

Debido al bajo aporte que tiene de manantiales y al control de bordos que presentan sus arroyos este presenta bajo caudal. Este se desarrolla desde la población de Apaxco, Estado de México. y se dirige hacia el Este de la población de Tula, Hidalgo.

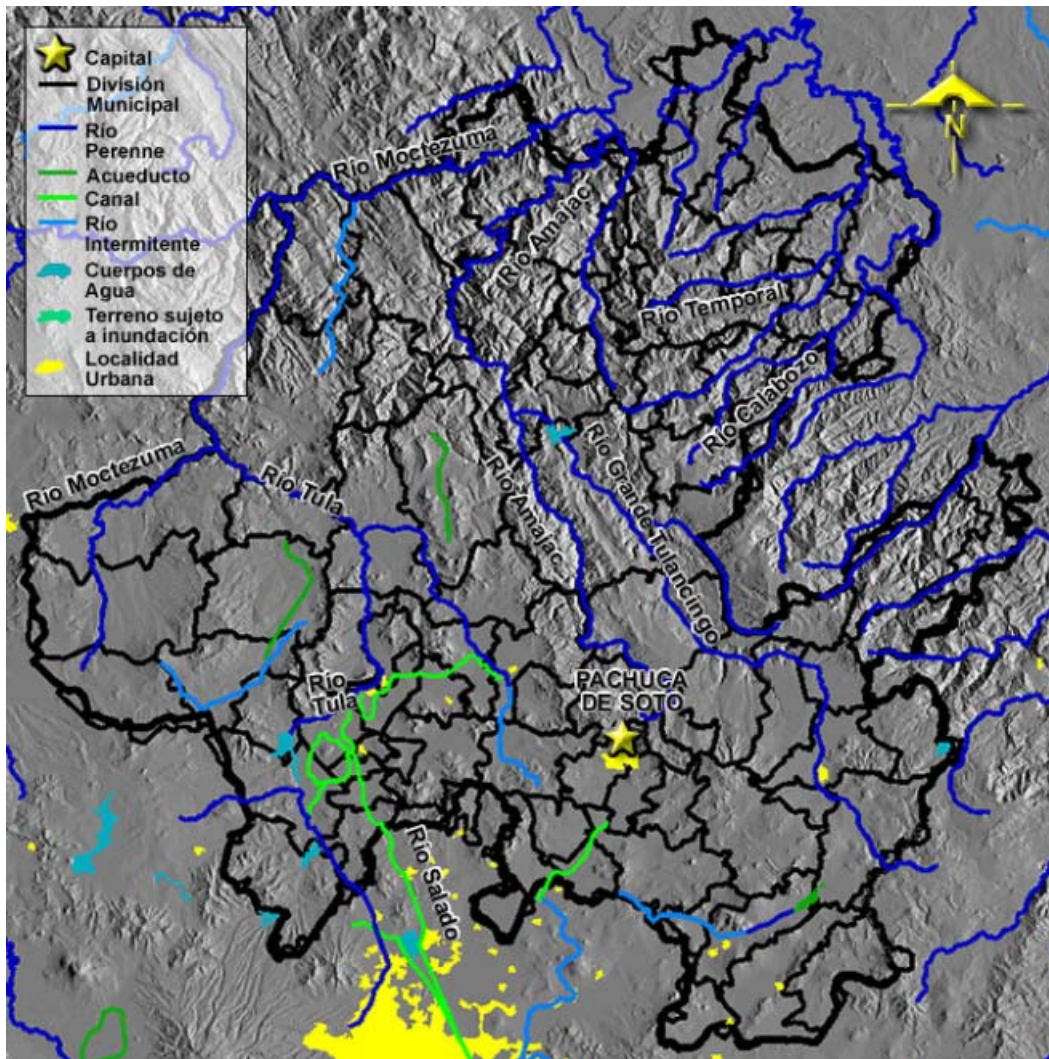


Figura 6. Mapa Hidrológico de la región

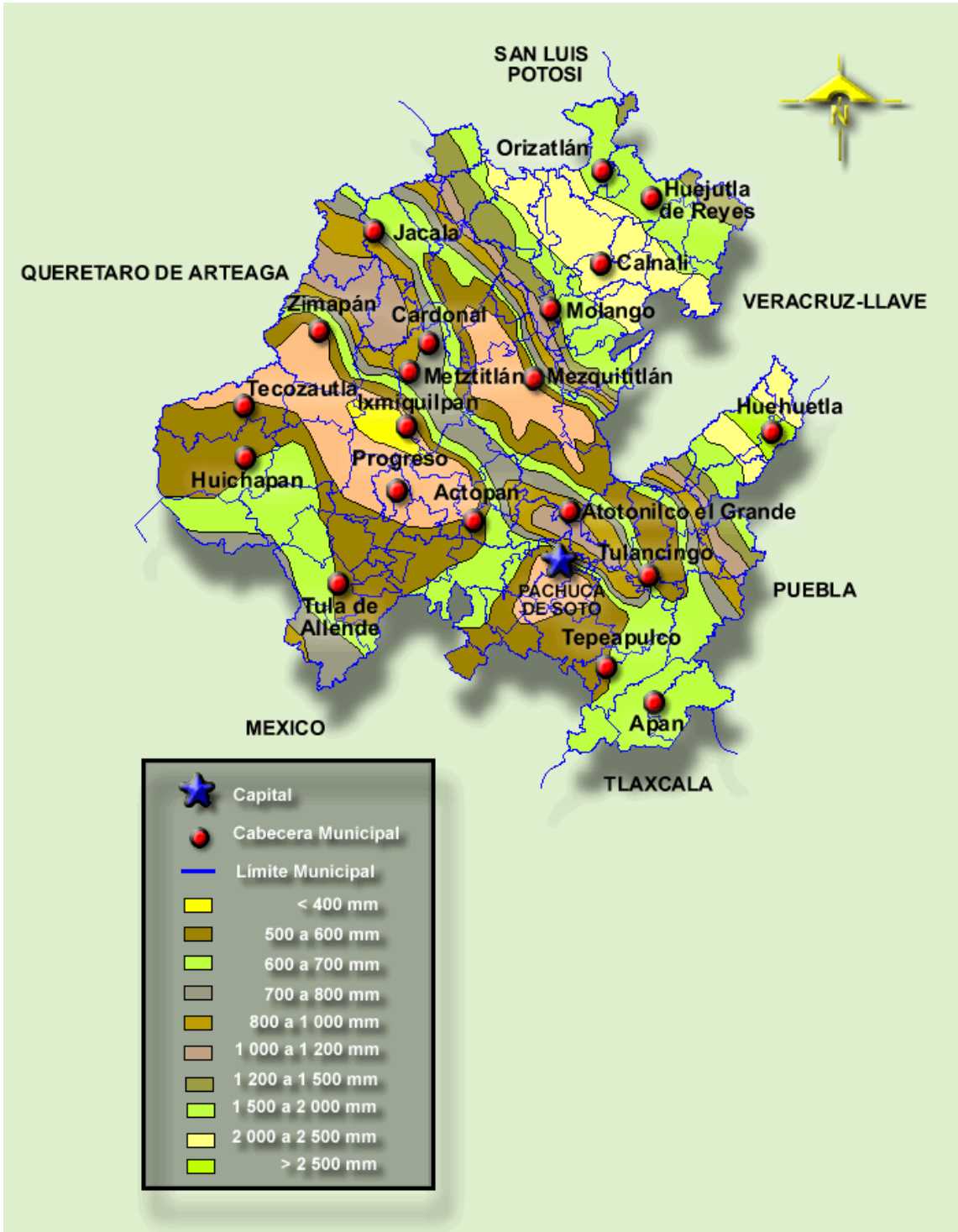


Figura 7. Precipitación media anual

Por la parte central del valle que su cauce va formando del lado norte del Cerro Blanco se observa una presa de materiales o bordo de contención de agua denominado la Presa Vieja la cual se encuentra totalmente seca, así como esta se observan varias en la localidad.

Hidrología Subterránea.- Se observan en la zona diferentes pozos de aprovechamiento para agua potable los cuales en su mayoría no son recomendables para consumo humano debido a la salinidad que se presenta en la región y por pasar aguas negras en la zona, en estos ríos se recabó la información.

Es el comportamiento del agua subterránea en los mantos acuíferos que es aprovechable en la zona, en un radio máximo de 12 kilómetros los cuales se presentan en materiales consolidados y hacia las zonas formada por valles en las partes bajas tomando como referencia el nivel del piso entre los 1930 y 1970 m de altura sobre el nivel del mar.

Manantiales. En el poblado de Vito se manifiesta por la margen derecha del Río Salado y cercano al puente se presentan diversos manantiales termales con temperatura que varia de 10°C a 50°C el agua caliente que de ahí sale contiene sales minerales como carbonatos, sulfuros y cloruros principalmente, el gasto mínimo conocido es de 50 L.P.S., estos se visualizan como atractivo turístico, diversión y hasta de tratamiento medico.

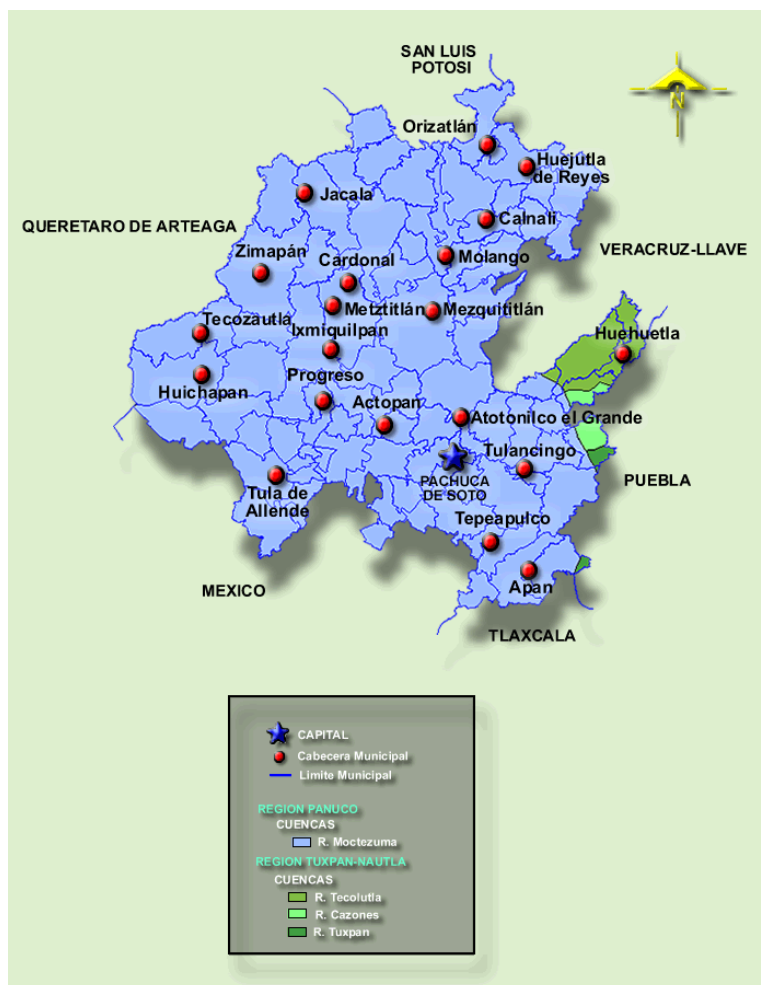


Figura 8. Cuencas hidrológicas de la región

1.5.2 Climatología

El clima que se presenta es de templado a frío con temperatura media anual de 15°C, la precipitación es baja con medias anuales de 500 a 520 mm, la mayor parte a finales del verano, lo que permite que en esta zona se presente vegetación de tipo matorral caracterizado por nopales, cardonales, plantas espinosas y pasto escaso, esta zona se considera de cultivo no por su clima y vegetación sino por el aprovechamiento de aguas residuales que desecha la ciudad de México.

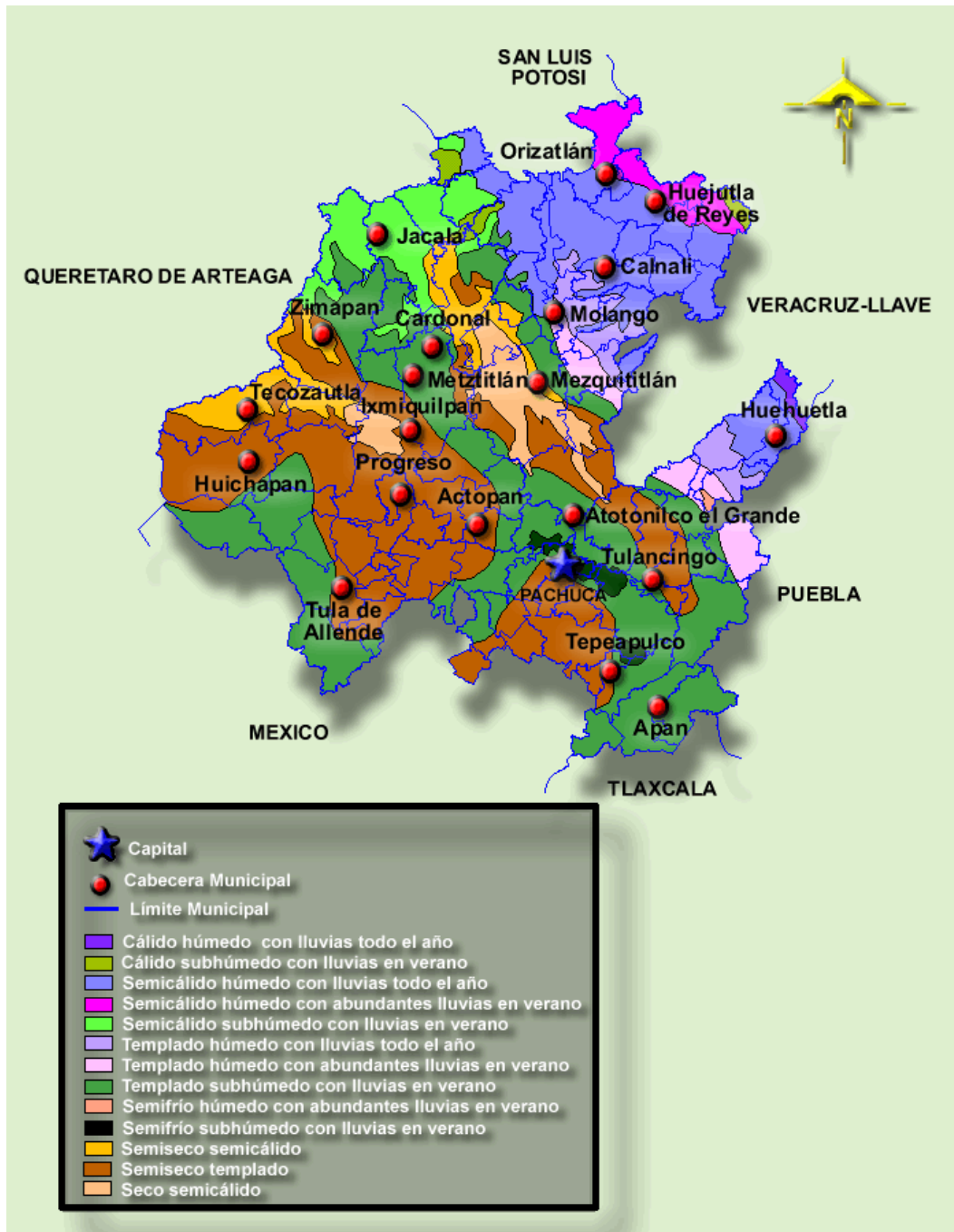


Figura 9. Mapa climático

1.6 GEOMORFOLOGÍA Y GEOLOGÍA

1.6.1 Geomorfología

La zona se encuentra enclavada en una región que contiene pequeñas sierras bordeadas por amplios valles en donde se manifiestan elevaciones que varían desde los 1900 m hasta los 2700 m sobre el nivel del mar. Esta se presenta comprendida dentro de la provincia fisiográfica del Eje Neovolcánico (clasificación del INEGI), la zona se presenta en una etapa de madurez geomórfica en donde el proceso erosivo se manifiesta modificando la estructura y forma que dio origen a la zona montañosa.

Destaca una actividad mecánica mayor a la fluvial, los cerros que forman el relieve son amplios y arredondados de origen volcánico alrededor del sitio y en la región de estudio son de origen sedimentario, los valles son amplios con suaves pendientes en su mayoría con suave inclinación hacia el norte de la zona.

1.6.2. Geología.

La geología de la región esta caracterizada por presentar depósitos sedimentarios del Mesozoico, rocas volcánicas del Cenozoico y Materiales no consolidados de edad reciente.

Estas calizas se presentan formando una amplia ventana estructural rodeadas de rocas volcánicas piroclásticas y materiales aluviales y residuales, las cuales son de color gris claro a oscuro de grano fino con horizontes que presentan fósiles mal conservados y de estratificación de mediana hacia la base del cerro blanco y gruesa en la cima del cerro blanco en donde se manifiestan rocas deformadas suavemente formando el flanco de un gran anticlinal. Esta roca podría corresponder a la Unidad litoestratigráfica de la formación *El Doctor*.

Cenozoico Medio y Superior Volcánico. Cercano a la zona de estudio se observan derrames de rocas volcánicas de composición andesítica y basáltica cubriendo grandes zonas y de depósitos piroclásticos y tobas de igual composición, las cuales forman la mayor parte del relieve, su posición es casi horizontal con espesores variables.

Cuaternario. Materiales no consolidados. Los materiales que se presentan en el cuaternario y de edad reciente corresponden a sedimentos no consolidados formados por gravas arenas y arcillas, que cubren la totalidad de los amplios valles de la región y en donde se encuentran la mayor parte de la zona cultivable conocidos estos como depósitos aluviales, así como los que se presentan en la base de los cerros los cuales son considerados como depósitos de talud o depósitos residuales con formación de suelos.

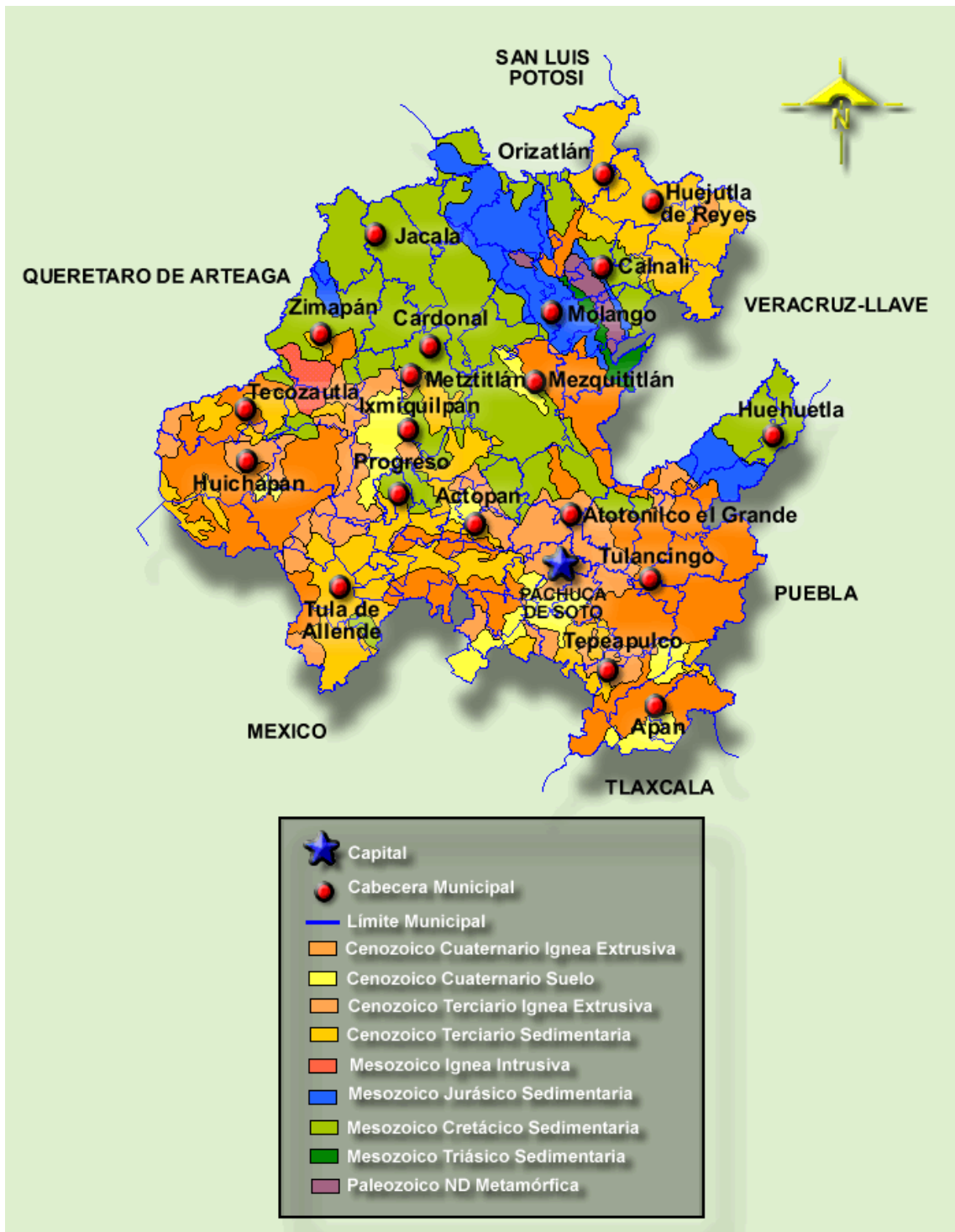


Figura 10. Regiones geológicas del estado de Hidalgo

CAPITULO 2. INICIADORES NO ELECTRICOS PARA VOLADURAS

2.1. Sistemas de iniciación de tubo de choque (NONEL):

Los sistemas de iniciación no eléctricos de tubo de choque, conocidos de manera genérica como NONEL, se desarrollaron en Suecia por *Nitro Nobel*, consisten en un tubo de plástico laminado que contiene una pequeña capa de material reactivo llamado homoxiclonita o HMX (0.453 kg por cada 30,480 m de tubo); cuando el tubo se inicia, transmite una señal de baja energía a una velocidad de 1981 m/s. La detonación es sostenida por la pequeña película de material reactivo, que se propaga a través del tubo como una onda de choque, inclusive a través de dobleces, nudos o torceduras del tubo transmisor, dejando intacta la superficie exterior, es decir, el tubo no se deflagra, ni detona ningún tipo de explosivo comercial con el cuál entre en contacto, únicamente inicia al detonador con retardo no eléctrico.

El diámetro exterior del tubo es de 3 mm, y el interior de 1.2 mm tiene una resistencia mínima a la tensión de 13.6 kg y una elongación del 200%.

Los retardos disponibles para la serie MS va de 25 ms a 600 ms, en incrementos de 25, 50 y 100 ms, en longitudes de 12 a 100 ft. La serie LP va de 0.2 seg a 9.6 seg, con longitudes de 12 a 30 ft.

El sistema puede iniciarse con cordón detonante, fulminante, estopín, o por algún dispositivo tipo pistola con cargas encapsuladas.

Estos sistemas son silenciosos, lo cuál representa una ventaja ambiental y no afectan el explosivo circundante al tubo en líneas descendentes en los barrenos al solo transmitirse dentro del tubo como una onda de choque. El sistema elimina los riesgos eléctricos excepto la posible iniciación por el efecto látigo al alargarlo hasta que se reviente.

Una aplicación de los iniciadores no eléctricos NONEL, es aquella en la cual cuentan con el retardo de fondo en un extremo y un retardo de superficie en el otro; dichos iniciadores conocidos por el nombre de Handi-Det, fabricados por ORICA, aunque existen otros fabricantes, transmiten la señal de detonación de un barreno a otro con un tiempo de retardo asignado en superficie, y un tiempo de retardo en el fondo del barreno, sin utilizar una corriente eléctrica para dicho fin.

En la cantera de este estudio, se utiliza el sistema Handi-Det, desde el inicio de operaciones en ésta en 2005, por lo que cuando se hable de iniciadores no eléctricos, serán éstos los referenciados.

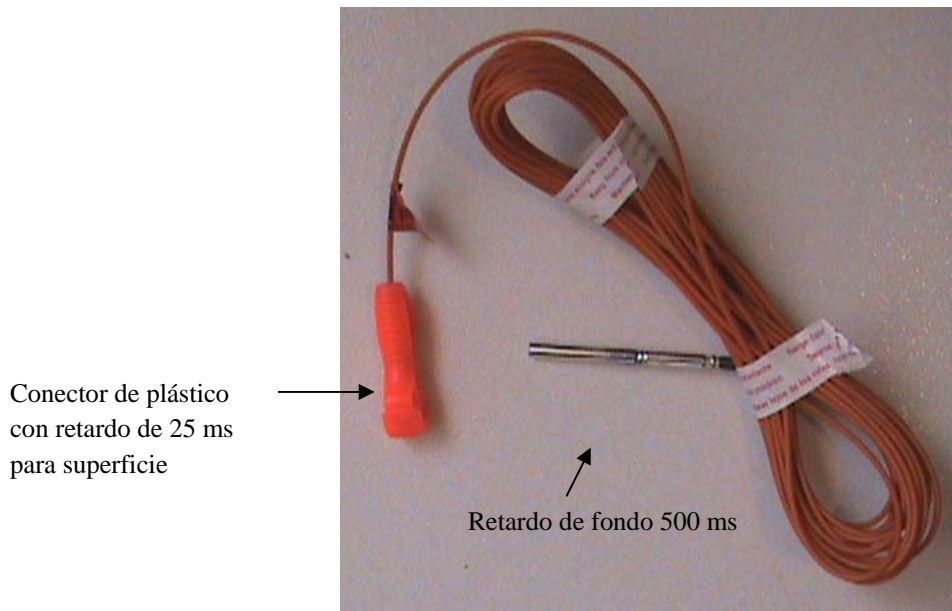


Figura 11. Handi-DET 25 /500 ms.
Fabricante ORICA

La selección de un sistema de iniciación es crítico para los resultados de una voladura, y las posibles afectaciones al entorno, por lo que deben tenerse en cuenta varios aspectos:

a) Operativos. Debe considerarse el iniciador adecuado para el tipo de plantilla de barrenación usada, altura de bancos, los resultados esperados de la voladura como fragmentación, desplazamiento vertical y horizontal, proyección del material, así como el daño a las paredes posteriores (pateo); posible roca en vuelo, la cuál pone en riesgo la seguridad de equipos, instalaciones y personas.

b) Económicos. El costo del explosivo y accesorios ha ido en incremento durante los últimos años, por lo cuál seleccionar un iniciador el cuál sea de un costo accesible dependiendo el tamaño de la operación minera en donde se utilicen, la disponibilidad de los iniciadores, el uso de iniciadores de bajo movimiento comercial incrementan el costo de los mismo.

c) Ambientales. Las voladuras generan vibraciones, ruido, polvo, dicho factores son establecidos en algunos de los permisos de operación otorgados por los gobiernos estatales, como por ejemplo para la operación de la cantera de éste trabajo, los límites establecidos por el Consejo Estatal de Ecología en el Estado de Hidalgo, en el cual establece como límites máximos permisibles de vibraciones 2in/s y 136 dB de ruido.

d) Sociales. Generación excesiva de vibraciones y ruido pueden ocasionar problemas en construcciones de poblados aledaños a las zonas de operación, por lo que un buen control de retardos, ayuda a evitar estos problemas.

2.2. Sistema de iniciación mecha - fulminante

El primer método no eléctrico de iniciación fue el de mecha – fulminante. La mecha de seguridad es un iniciador acarreador de flama, que consta de un núcleo de pólvora negra recubierto o forrado por un tramado textil que confina el núcleo de pólvora negra para formar un cordón unitario de aproximadamente ¼ in de diámetro. La función principal de la mecha es acarrear la energía en forma de fuego hacia el detonador o fulminante; el fulminante está compuesto de tres materiales explosivos de menor a mayor sensibilidad (estifnato de plomo, azida de plomo y pentrita), confinados todos ellos en una cápsula metálica de aluminio con dimensiones aproximadas de 1 ¼ in de diámetro, los fulminantes fueron diseñados para ser iniciados por medio de mecha de seguridad.

Este sistema tiene un bajo costo, pero un alto riesgo operativo, debido a que el tiempo de retardo se asigna a la velocidad de quemado de la mecha, la cual puede ser de 30 s/ft o 40 s/ft, por lo que la exactitud en el tiempo de retardo es muy baja. Este sistema se ha dejado de usar para dar tiempo de retardo a cada barreno, y se continua utilizando para iniciar líneas troncales de voladuras con el sistema NONEL – Cordón detonante o el Handidet, así como en operaciones de moneo y plasteo.

2.3. Cordón detonante

El cordón detonante está formado por un núcleo central que contiene un material explosivo de alta intensidad llamado pentrita y las capas textiles y plásticas protectoras del núcleo. La cantidad de explosivo puede ir de 4.03 g/m hasta 42.4 g/m.

Su uso principal es como líneas troncales y descendentes de voladuras así como para iniciar cargas de explosivos de alta densidad (booster, emulsión e hidrogeles), así como para voladuras secundarias (moneo y plasteo). El uso de cordón detonante como línea descendente al barreno fue muy utilizado, era barato y se controlaba de mejor manera al introducir retardos bi-direccionales de tubo de choque en superficie. Los estudios han demostrado que el cordón detonante como línea descendente provoca una caída en la cantidad de gases producida en la columna de un barreno debido a la deflagración existente del ANFO en torno al cordón cuando detona, es por esto que su uso como línea descendente fue disminuyendo, dejando paso a los sistemas de tubo de choque.

El tema de los sistemas de iniciación es muy extenso, por lo que para ampliar cada uno de los temas aquí tratados se puede consultar el texto “Fundamentos para la Explotación de Minas” de Victor Manuel López Aburto, UNAM, Facultad de Ingeniería. 2008.

CAPITULO 3. DISPERSION, PRECISION Y EXACTITUD DE LOS INICIADORES NO ELECTRICOS DE TUBO DE CHOQUE

En voladuras, hablar de tiempo de retardo es una cuestión crucial para el buen desempeño del explosivo en búsqueda de los objetivos establecidos. Es por esto que en las últimas dos décadas los principales avances en explosivos comerciales para minería, se han enfocado en el desarrollo de productos de retardo, los cuáles sean más exactos con su tiempo nominal.

Así tenemos nuevos iniciadores con sistemas electrónicos de programación, apoyados con herramientas de software, los cuáles nos permiten diseñar y asegurar una exactitud casi total con lo esperado de acuerdo a los tiempos de retardo.

En éste capítulo abordaremos un poco a cerca de dichos tópicos para intentar explicar los cambios de enfoque con respecto a los tiempos de retardo que se están dando hoy en día.

Existe una serie de términos estadísticos que se emplean al tratar el discutido tema de los tiempos de retardo de detonadores. Es usual hablar de precisión, exactitud, dispersión, rango, etc. A continuación se enuncia brevemente la definición tradicional de ellos.

3.1. DEFINICIONES

3.1.1 Media Aritmética o promedio

La media aritmética o promedio es igual a la suma de todos sus valores dividida entre el número de sumandos.

$$\bar{x} = \frac{\sum_{i=1}^n x_i}{n}$$

Donde:

\bar{x} = Media aritmética o promedio

n = Número de datos de la muestra

x_i = Valores de la muestra

3.1.2 Precisión

Corresponde a que tan dispersos están los valores respecto de la media los tiempos de retardo de una serie de detonadores muestreados con un mismo tiempo nominal.

Estadísticamente, la precisión está dada por la desviación estándar la cuál se calcula de la siguiente forma:

$$\sigma = \sqrt{\frac{1}{n-1} \sum_{i=1}^n (x_i - \bar{x})^2}$$

Donde:

σ = Desviación estándar o precisión

n = Número de datos de la muestra

x_i = Valores de la muestra

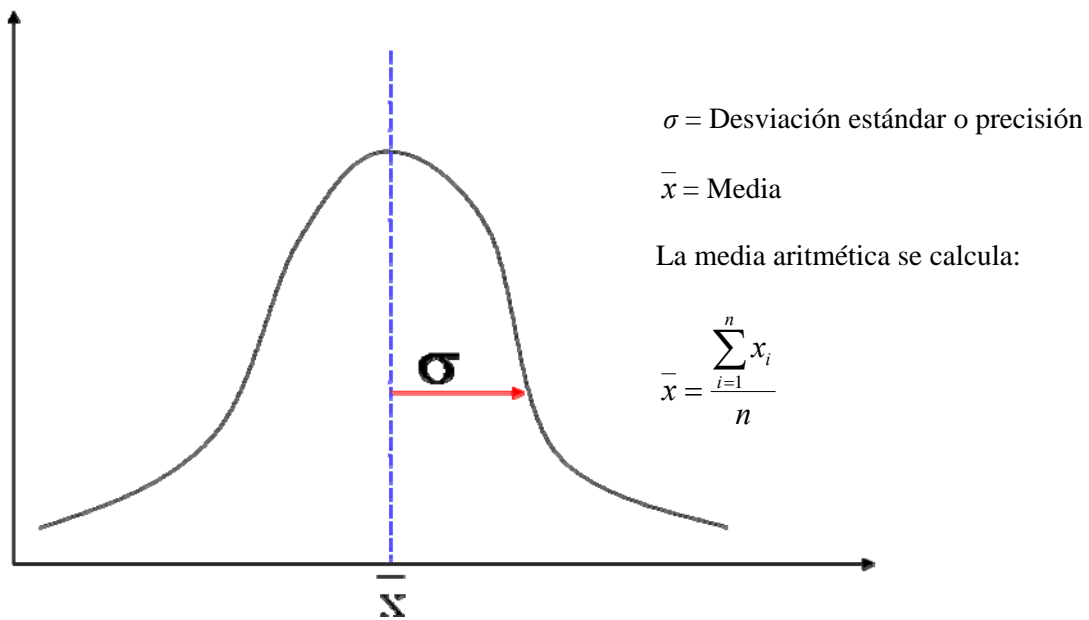


Figura 12. Gráfica tipo de la desviación estándar

3.1.3 Exactitud:

Se refiere a que tan cerca del tiempo nominal de un retardo, se encuentra el valor del tiempo medido. La *Exactitud* se mide entonces a través del coeficiente de las medias (Cm) cuya fórmula es:

$$Cm\% = \frac{(\bar{x} - N)}{N} * 100\%$$

Donde:

$Cm\%$ = Coeficiente de las medias o exactitud en porcentaje

N = Tiempo nominal del retardo

\bar{x} = Media aritmética

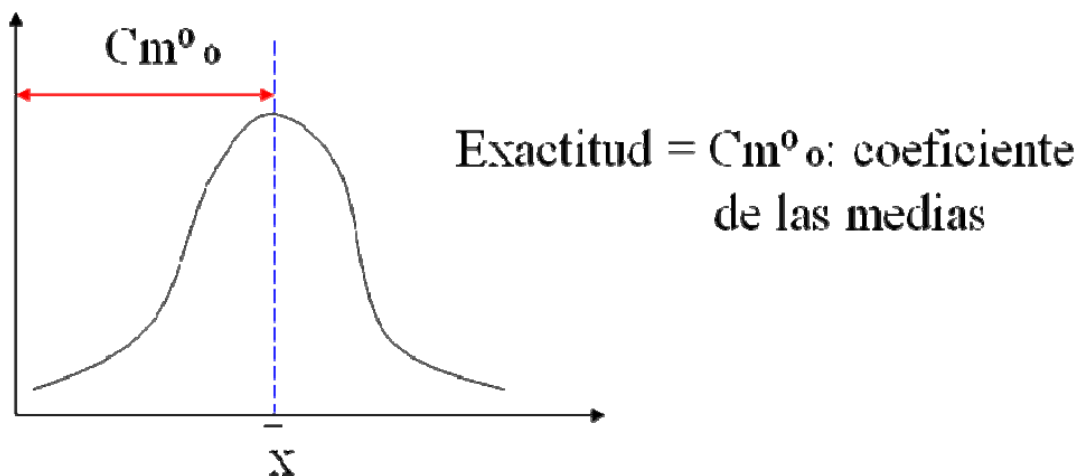


Figura 13. Gráfica tipo del coeficiente de las medias

3.1.3. Rango

El *rango* no es otra cosa que el intervalo de tiempos entre los cuales deben estar todos los tiempos de una muestra, independientemente de su precisión y exactitud.

El que esto ocurra impide que existan traslapes entre números correlativos de una serie de retardos. Este concepto es muy importante a la hora de diseñar una voladura, debido a que el diseñador tiene rangos de tiempos y no números nominales.

Los tres conceptos anteriormente vistos: *Precisión*, *Exactitud* y *Rango* deben ser considerados en el control de calidad de un detonador no eléctrico, ya que al tener controlados a todos ellos se puede asegurar que el rango a usar en el diseño de la voladura será confiable.

Todos los sistemas de iniciación de tubo de choque usados actualmente tienen una dispersión, lo cual implica que el iniciador no detona en el tiempo diseñado. En general podemos hablar de una exactitud del +/-10% para las marcas más importantes del mercado. Esto es por ejemplo si un iniciador de tubo de choque tiene un retardo de fabricación de 200 ms nominales, el retardo real puede estar entre 180 y 220 ms. Esto puede traer problemas en la secuencia de disparo, lo que nos puede originar mala fragmentación debido a las salidas de los barrenos en tiempos reales diferentes al diseño, roca en vuelo, desplazamiento diferente al esperado y sobre rompimiento trasero (pateo).

Diversas empresas fabricantes de explosivos, han estudiado la dispersión en sus productos pirotécnicos, sobretodo los que ocupan el sistema del tubo de choque, debido a su gran utilización en la minería mundial.

A continuación se muestra un estudio de dispersión, realizado por Dyno Nobel en el año 2005, en Chile, para un retardo de superficie tipo tubo de choque, la prueba consiste en tomar 10 iniciadores de tubo de choque con una longitud de 12 m, todos de la misma marca y tipo, con un tiempo nominal de 17 ms; se midió el tiempo real de detonación para hacer un análisis estadístico, la prueba arrojó los siguientes resultados:

MEDICION DE TIEMPOS DE DETONACION	
Datos del Producto	
Tipo	CTD
Marca	Famesa
Linea de Transmisión	Tubo de Choque
Longitud Linea Trans	12 m
Tiempo Nominal	17 ms
Muestra	Tiempo de Detonación
Retardo 1	14.7800 ms
Retardo 2	13.8500 ms
Retardo 3	13.3600 ms
Retardo 4	14.2000 ms
Retardo 5	16.1200 ms
Retardo 6	15.1400 ms
Retardo 7	15.3400 ms
Retardo 8	15.4800 ms
Retardo 9	16.4800 ms
Retardo 10	13.6200 ms
Valores Estadísticos	
Media	14.84 ms
Precisión	1.06 ms
Dispersión	7.14%
Exactitud	-12.71%

Tabla 1. Medición de tiempos de detonación de un retardo pirotécnico de superficie. Dyno Nobel 2005

Los resultados obtenidos se grafican a continuación:

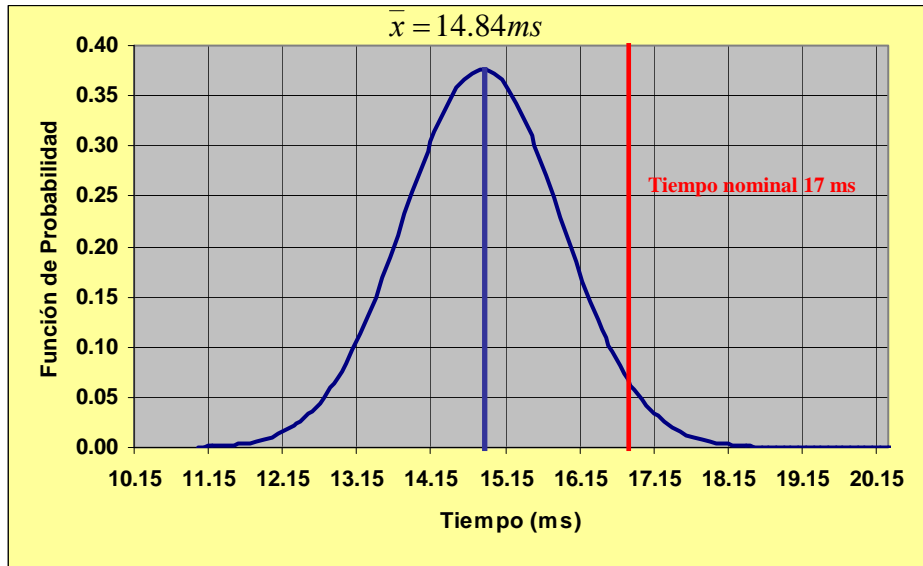


Figura 14. Distribución normal de la prueba de medición de tiempos de detonación de un iniciador de tubo de choque. Dyno Nobel 2005

Lo que podemos observar en la Figura 14 es una exactitud baja, la cuál es menor al 83 %, en torno al tiempo de diseño de 17 ms, por lo que la desviación estándar es alta, mayor a 1 ms. Por lo cuál, se presentarán cargas de explosivo detonando traslapadas o alejadas unas de otras, muy diferente a lo que se espera en el diseño, ocasionando problemas de vibraciones altas, roca en vuelo o ruido.

A continuación se muestra una prueba de medición de la dispersión para un iniciador de columna con un tiempo nominal de retardo de 500 ms:

Medición de Tiempos de Detonación	
Datos del Producto	
Tipo	Fanel
Marca	Famesa
Línea de Transmisión	Tubo de Choque
Longitud Línea Trans	15 m
Tiempo Nominal	500 ms
Muestra	Tiempo de Detonación
Retardo 1	527.1100 ms
Retardo 2	521.1700 ms
Retardo 3	519.0200 ms
Retardo 4	525.3100 ms
Retardo 5	519.9300 ms
Retardo 6	523.2000 ms
Retardo 7	518.8900 ms
Retardo 8	525.5500 ms
Retardo 9	515.5100 ms
Retardo 10	530.1800 ms
Retardo 11	525.4100 ms
Valores Estadísticos	
Media	522.84 ms
Precisión	4.33 ms
Dispersión	0.83%
Exactitud	4.57%

Tabla 2. Medición de tiempos de detonación de un iniciador de columna. Dyno Nobel 2005

Existe una dispersión considerable en los tiempos obtenidos para los iniciadores pirotécnicos de tubo de choque, por lo que se verán afectados los resultados de una voladura en cuanto a su desplazamiento y fragmentación. Incluso podemos obtener barrenos quedados lo que genera situaciones de riesgo para el personal y equipo.

Con éstas pruebas realizadas por Dyno Nobel en 2005, en Chile, se puede observar que la dispersión existente en los iniciadores de tubo de choque tanto de superficie como para retardos en columnas de explosivo, es significativa, lo cuál origina problemas con los resultados de las voladuras en fragmentación, desplazamiento, generación de vibraciones y ruido, posibles barrenos sin detonar y roca en vuelo.

CAPITULO 4. IMPORTANCIA DE LA SECUENCIA DE RETARDO EN LOS RESULTADOS DE LA VOLADURA

El tiempo de retardo de una voladura nos proporciona una voladura secuenciada, esto con el fin de obtener varios objetivos:

- Control de la energía explosiva.
- Control del confinamiento.
- Maximizar el rendimiento del explosivo
- Reducción de vibración y golpe de aire.

Es por esto que la importancia de la secuencia de disparo es uno de los factores más importantes en el diseño de una voladura, de tal forma, las principales consideraciones que se deben atender para considerar los tiempos de retardo son:

- a) *Geología.* Para realizar el diseño de la voladura, es necesario analizar las estructuras geológicas presentes, tales como fallas, fracturas, cavidades, pliegues, etc. Así como el tipo de roca y sus características físicas y químicas como dureza, velocidad sónica, módulo de Young, etc. Los resultados de las pruebas de campo y laboratorio y mecánica de rocas se pueden ocupar como una guía para iniciar el diseño de una plantilla de barrenación, el cuál se debe mejorar documentando los resultados obtenidos durante un periodo de tiempo que abarque un número considerable de voladuras. Estructuralmente, el diseño deberá siempre que sea posible, tomar en cuenta una salida lo más perpendicular a la orientación de las estructuras, aunque no siempre ésta condición es posible. Por ejemplo, en yacimientos con capas delgadas y horizontales, se obtendrán fragmentaciones pequeñas y desplazamientos notables, con bordos y espaciamientos relativamente grandes, mientras que si el yacimiento presenta capas verticales, el bordo y espaciamiento deberán reducirse para obtener una fragmentación pequeña, o con poca presencia de bloque de sobretamaño.
- b) *Fragmentación requerida.* La fragmentación del material dependerá del uso que se le dé al material explotado, si se le da un tratamiento metalúrgico, generalmente se deseará obtener la mayor fragmentación posible. El tamaño de fragmentación también va de la mano con el equipo de carga, acarreo y trituración disponibles, de tal forma que se tendrá un tamaño óptimo del material resultante de la voladura, el cuál no sea demasiado costoso obtener, y que su manejo sea a un costo óptimo. Establecer éste parámetro es fundamental para poder medir la efectividad de la voladura, se puede hacer con herramientas digitales que miden la distribución de fragmentación con fotografías digitales. En la cantera de este trabajo, el tamaño máximo de voladura es de 80 cm.
- c) *Desplazamiento de la roca.* El desplazamiento del material de voladura se presenta en dos proyecciones, la vertical, la cuál es la distancia que el material desciende y el horizontal, es la distancia de movimiento hacia el frente del banco. La definición de éstos parámetros está relacionada directamente con el tamaño del equipo de carga y acarreo. En algunas operaciones, el desplazamiento de roca representa un factor determinante para disminuir el

costo de operación, principalmente en minas a cielo abierto de carbón, en las cuáles resulta más económico desplazar el material estéril o encape con explosivo (voladuras tipo Cast-Blast) que con maquinaria, en México, operaciones de éste tipo se tienen actualmente en MICARE (Minera Carbonífera Río Escondido), en el municipio de Nava, Coahuila.. En minas con palas o excavadoras como equipos de carga, las voladuras con exceso de desplazamiento horizontal, resulta en productividades bajas para dichos equipos o la necesidad de equipos auxiliares para juntar el material. Para la cantera del presente estudio, con bancos de una altura de 10 m, se obtienen desplazamientos verticales de hasta 5 m, para dicha altura el equipo de carga utilizado (Cargador frontal Komatsu WA-460) es óptima, los desplazamientos verticales llegan a 15 m

- d) *Control de pared y talud.* Como resultado de la voladura obtenemos daños en la pared o paredes posteriores, así como en el talud resultante, dependiendo del uso de dichas paredes y taludes, deberá diseñarse la voladura para dicho fin, por ejemplo una voladura de producción de mina a cielo abierto, requiere menos cuidado de estabilidad en las paredes posteriores que un corte para carretera, el cuál deberá permanecer por un periodo de tiempo largo, de manera estable, o una pared de límite final en un tajo. Estos tipos de voladuras son totalmente diferentes en su finalidad y en su diseño.

Anteriormente, hasta la década de los 90 del siglo anterior, la teoría de los explosivos indicaba que los tiempos cortos de retardo entre filas, originaba problemas con los resultados de fragmentación y desplazamiento. Así tenemos que en los numerosos textos del tema, se encuentran esquemas como los siguientes, los cuáles son extraídos de información de DYNONOBEL:

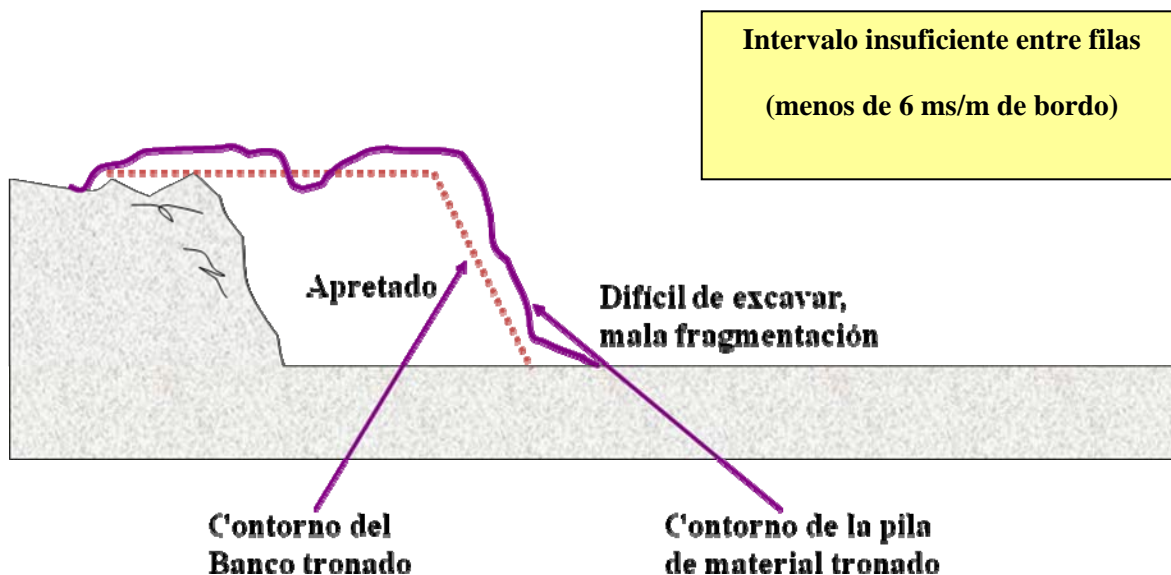


Figura 15. Esquema con menos de 6 ms/m de retardo entre filas de barrenos

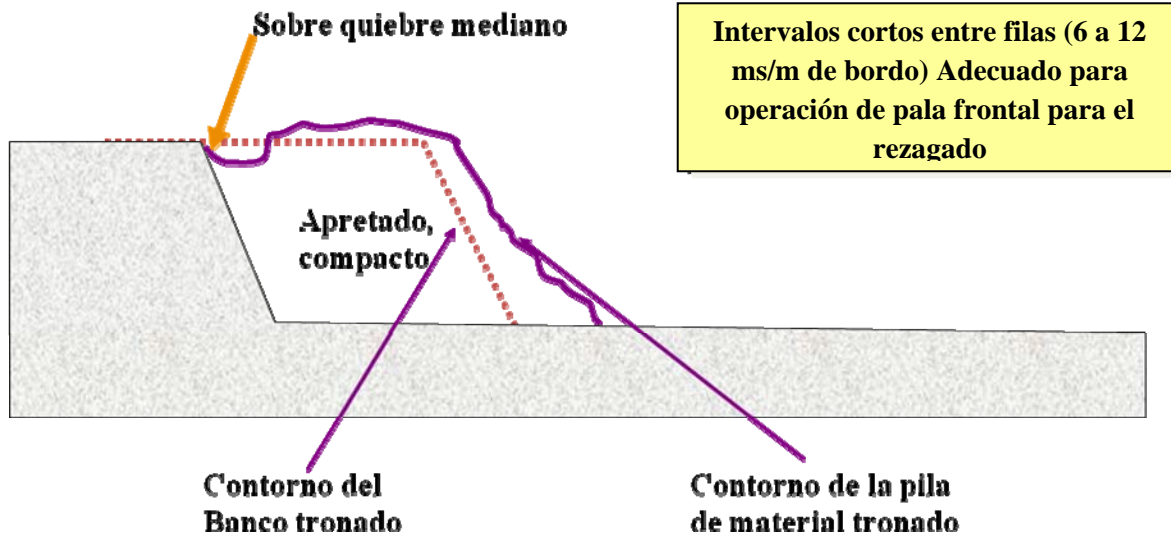


Figura 16. Esquema con 6 ms/m a 12 ms/m de retardo entre filas de barrenos

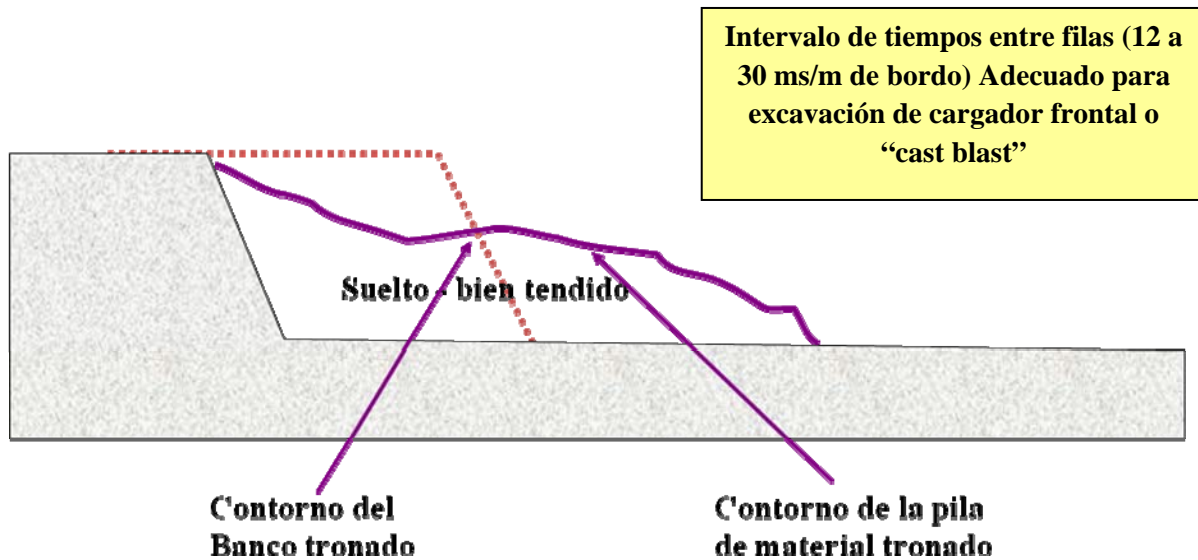


Figura 17. Esquema con 12 ms/m a 30 ms/m de retardo entre filas de barrenos

Algunos datos de retardos de tiempo dependiendo del tipo de roca, según DYNNO NOBEL son:

TIPO ROCA	FACTOR RETARDO
CALIZA – LUTITA	5 A 6 ms/m
CALIZA COMPACTA – CUARCITA	4 A 5 ms/m
PORFIDO DIABASA – GNEIS	3 A 4 ms/m

Los posibles resultados de la voladura de acuerdo a los tiempos de retardo proporcionados por Dyno Nobel se enlistan a continuación:

VUELO DE ROCA VIOLENTO	3.2 A 6.6 ms/m
RAFAGA DE AIRE	
MAYOR ROMPIMIENTO	
MALA FRAGMENTACIÓN	
PILA ALTA	6.6 A 9.8 ms/m
VUELO DE ROCA	
ROMPIMIENTO TRASERO	
PILA ESPARCIDA	9.8 A 13.1 ms/m
PILA MÁS HORIZONTAL	13.1 A 19.7 ms/m

Para el Dr. Calvin J. Konya los valores a considerar para tiempo de retardo entre barrenos para voladuras con dos caras libres son:

TIPO DE ROCA	CONSTANTE TH (ms/m)
Arenas, carbón	6.5
Algunas calizas, sal, algunas arcillas	5.5
Caliza compacta y mármol, algunos granitos y basaltos, cuarcitas, algunos gneisses y gabros	4.5
Diabasa, gneisses compactos, magnetitas	3.5

Tabla 3. Constantes para retardo entre barrenos según diferentes rocas. Criterio Dr. Calvin J. Konya

Así el retardo entre barrenos se calcula con la siguiente fórmula:

$$t_H = T_H * S$$

t_H = Retardo entre barrenos

T_H = Constante para retardo entre barrenos (Tabla 3)

S = Espaciamiento

Para el retardo entre filas de barrenos, el Dr. Calvin J. Konya establece que se deben de considerar los siguientes puntos:

- a) Retardos cortos de tiempo causan pilas de roca alta cerca de la cara (Desplazamiento horizontal bajo).
- b) Retardos cortos de tiempo causan más sobre rompimiento.
- c) Retardos cortos de tiempo causan golpe de aire mayor vibración.
- d) Retardos cortos de tiempo tienen el potencial de originar roca en vuelo.
- e) Retardos largos de tiempo disminuye la vibración.
- f) Retardos largos de tiempo disminuye el sobre rompimiento trasero (Pateo).

Para determinar el tiempo entre filas que se debe usar, el Dr. Calvin J. Konya considera los siguientes valores:

CONSTANTE TR (ms/m)	RESULTADOS
6.5	Voladura violenta, excesivo golpe de aire y rompimiento trasero.
8	Pila alta cerca de la cara, golpe de aire moderado, sobre rompimiento trasero.
11.5	Altura promedio de la pila, golpe de aire y sobre rompimiento trasero promedio.
16.5	Pila dispersa con mínimo sobre rompimiento trasero.

Tabla 4. Constantes para retardo entre líneas de barrenos según diferentes rocas. Criterio Dr. Calvin J. Konya

Así el retardo entre barrenos se calcula con la siguiente fórmula:

$$t_r = T_R * B$$

t_r = Retardo entre filas de barrenos

T_R = Constante para retardo entre líneas de barrenos (Tabla 4)

B = Bordo

El texto “Uso de explosivos en México” de Atlas de México, S.A. de C.V., anota que un retardo demasiado corto causa problemas al iniciarse antes que el bordo de los barrenos del frente se empiece a mover. De ésta manera el efecto de abundamiento ocasiona problemas en voladuras con líneas múltiples de barrenos.

Este efecto repercute en las últimas líneas causando roca en vuelo y rezaga empacada (abundamiento deficiente) cuando se utilizan periodos cortos de retardo.

Por otro lado si los periodos son largos hay posibilidad de corte. El intervalo de retardo óptimo depende del bordo y la velocidad de desplazamiento de la roca, cuando no se cuenta con esta información, una regla empírica es utilizar de 6 a 8 veces el bordo de los barrenos en metros. Por ejemplo a 3 m de bordo, el retardo sugerido sería 24 ms ($3 \times 8 = 24$ ms).

Los retardos pueden ser menores con voladuras de dos o tres líneas pero con más de tres líneas, los tiempos de retardo para las últimas líneas deberán ser mayores con lo cual se reduce el pateo, vibraciones y roca en vuelo.

Como podemos ver, durante muchos años se ha tenido la idea de que los tiempos cortos de retardo nos proporcionaban resultados negativos de fragmentación, desplazamiento, vibraciones y roca en vuelo, así como el daño en el talud trasero.

La tecnología disponible hasta finales de los años 90's, no permitían establecer de manera más exacta, cuáles eran en verdad los resultados, esto debido a la dispersión presentada por los iniciadores pirotécnicos.

Con la llegada de los iniciadores electrónicos, esta dispersión se ha disminuido a niveles casi nulos, y la posibilidad de programar en incrementos de 1 ms desde 0 ms hasta 20,000 ms. Las últimas tendencias nos han mostrado que se puede realizar voladuras con tiempos entre líneas de hasta 2 ms, obteniendo muy buenos resultados en fragmentación y desplazamiento, por lo que la manera de ver el tema de los tiempos de retardo está cambiando.

Se ha comprobado en algunas operaciones mineras (Mexicana de Cananea, Mexicana de Cobre, Micare, Cementos Chihuahua), que al hacer uso de tiempos cortos de retardo entre barrenos, se logra disminuir el tamaño de fragmentación de la roca, esto debido a la interacción de las ondas y fracturas en el área entre los barrenos con un diferencial de tiempo del rango de 2 a 5 ms; el arreglo de tiempos en la secuencia de disparo se debe de modificar para maximizar el área influenciada por ésta interacción, se debe arreglar la salida en “echelones” o diagonales, de ésta manera se obtiene

mejor fragmentación además de desplazamiento, y un buen corte en la parte posterior de la voladura.

En mayo del 2008, se realizó una prueba utilizando iniciadores electrónicos, con tiempo de retardo entre barrenos de 32 ms y entre líneas de 4 ms. Contrario a lo que se podría esperar con la idea de que los tiempos cortos nos pueden ocasionar problemas en los resultados de la voladura, se obtuvo una voladura con muy buenos resultados. Dichos resultados se mostraran en el capítulo 6 del presente trabajo.

CAPITULO 5. INICIADORES ELECTRONICOS UNITRONIC

Los iniciadores electrónicos utilizados para la operación de canteras, son los de la línea Unitronic, cuyo fabricante es Orica. El sistema se compone de los iniciadores y un hardware para programar, probar e iniciar el sistema.

5.1. Iniciador electrónico Unitronic



Figura 18. Iniciador electrónico Unitronic

El detonador en el iniciador electrónico se diseñó para utilizarse de manera convencional al booster o emulsión. El rango de programación va desde 0 ms hasta 10,000 ms. La dispersión del tiempo programado y el real es de hasta 0.01%, lo que ayuda a una correcta secuencia de disparo.

Tiene un código único de identidad almacenado en su memoria interna, este código está representado por medio de un código de barras impreso en una etiqueta en el detonador ubicado en la parte superior de la línea descendente.

Cada detonador, está compuesto por los siguientes elementos:

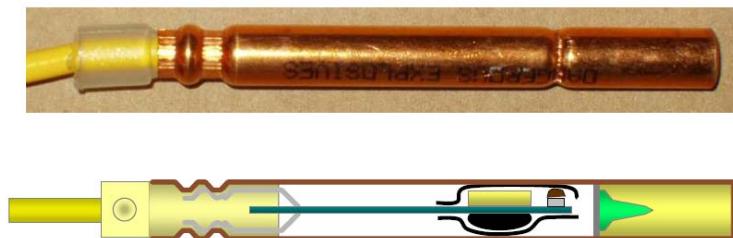


Figura 19. Detonador Unitronic

La parte externa es un cápsul metálico tal como se aprecia en la figura 19, el cuál esta unido a dos cables eléctricos, por medio de dos cojinetes de conexión.

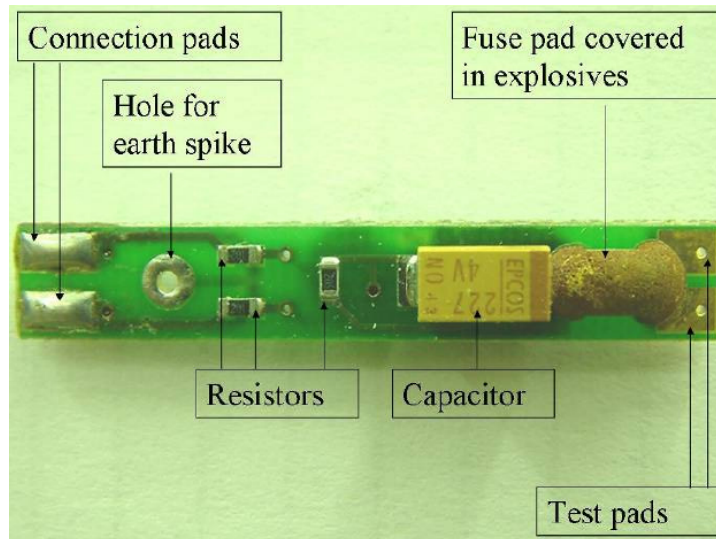


Figura 20. Conformación del detonador (interna)

Los cojinetes de conexión, los cuáles reciben los cables eléctricos con la polaridad correspondiente, transmiten la señal eléctrica por un par de resistencias de seguridad para evitar variaciones de voltaje que afecten al microchip.

La corriente eléctrica pasa después a un capacitor en donde se encuentra el microchip que almacena la información del tiempo de retardo que debe tener, dicho capacitor libera la energía cuando se manda la señal adecuada para esto.

Los cojinetes de prueba son para corroborar que la energía ha llegado al capacitor, después se manda la señal hasta el fusible cubierto de una carga primaria y una carga base, el cuál detona en el tiempo exacto.

Los iniciadores electrónicos Unitronic, están diseñados para no iniciarse por corrientes extrañas, sobre voltajes, electricidad estática y radiación electromagnética.

En su manejo se debe tener cuidado de no iniciarlos por impactos intensos, fricción o calor.

Las características de fabricación de los iniciadores Unitronic se muestran en la tabla 5:

Cable descendente	De cobre con recubrimiento de acero para incrementar la resistencia a la tensión.
Aislamiento del cable	Polypropileno
Resistencia a la tensión del cable	25 kg
Longitudes	6m, 9m, 15m, 20m, 25m.
Carga base	PETN
Carga Primaria	Azide de plomo
Min/Max retardo	0 ms a 10,000 ms

Tabla 5. Características de fabricación de los iniciadores electrónicos Unitronic

A continuación describiremos de manera general la manera de utilizar el sistema Unitronic:

1. Nivelación de profundidad de barrenos. En cualquier voladura, de fundamental importancia para obtener un buen control de los pisos del banco es verificar la profundidad de los barrenos previo al cargado de los mismos. Se recomienda usar una cinta graduada para éste fin.



Figura 21. Nivelación de barrenos con cinta graduada

2. *Cebado*. El cebado del barreno es la operación en la cuál se inserta el cápsul dentro de la emulsión empacada o cualquier iniciador de alta presión, una vez unidos, se le conoce como cebo, el cuál se coloca dentro del barreno en la parte baja de éste conservando siempre la línea descendente la cual será conectada en superficie con la línea o cable troncal. Para el sistema Unitronic, se realiza de igual manera que con los tubos de choque.



Figura 22. Colocación del cebo en el barreno

3. *Cargado*. Una vez cebado el barreno, se procede a la carga del mismo, que es el vaciado del ANFO (Amonium Nitrate Fuel Oil) de forma granular como una columna. Este cargado se realiza de igual forma que cuando usamos iniciadores de tubo de choque. Después se coloca el taco o material que confina al agente explosivo ANFO.



Figura 23. Cargado del barreno con agente explosivo ANFO

4. *Programación.* Una vez que los barrenos han sido cargados y tapados con el material del taco, usamos el scanner en cada uno de ellos. Este aparato es la interfase entre el software de diseño de las voladuras y el iniciador, con él leemos el código de identificación y mediante un incremento secuencial con el teclado, se programa el tiempo de detonación del iniciador, dicha información queda almacenada en el scanner, de donde se vaciará en el blast box previo a la voladura.

La capacidad de almacenaje es de hasta 500 códigos de identificación, con sus respectivos tiempos de retardo.

Está equipado con una batería recargable.



Figura 24. Scanner

5. *Conexión.* Posterior a ésta operación, se procede a la conexión de los iniciadores mediante un cable eléctrico como se ve en la figura 25.



Figura 25. Conexión del iniciador Unitronic al cable eléctrico línea troncal. (Detalle)



Figura 26. Conexión del iniciador Unitronic al cable eléctrico línea troncal.

5. *Prueba de continuidad eléctrica.* Después de asignar el tiempo de retardo a cada uno de los barrenos y conectarlos a la línea troncal, se procede a hacer una verificación de la continuidad eléctrica. Dicha prueba se hace con un aparato llamado Network tester.



Figura 27. Network tester

Para asegurar dicha continuidad se utiliza el Network tester, mediante este dispositivo, comprobamos que todos los iniciadores hayan recibido su retardo y que todos están conectados en la secuencia de disparo, es decir que existe comunicación con cada uno de ellos; en caso de que exista algún iniciador sin la información respectiva y/o que no se encuentre conectado, se indicará en la pantalla, por lo que habrá que hacer una revisión barreno por barreno hasta encontrar la inconsistencia.

Provee un sistema seguro de prueba de continuidad de las conexiones, y nos indica si existen cortos circuitos, o circuitos abiertos, así como avisos de la polaridad de las conexiones.

6. *Disparo de la voladura.* Para iniciar la voladura, se utiliza un aparato llamado Blast Box, este aparato se conecta a la voladura mediante los cables de cobre. Todos los códigos de identificación y su tiempo de retardo asignado se encuentran en la memoria del scanner y son descargados al blast box mediante un puerto de frecuencia infrarroja ubicado en la parte inferior del scanner. Cada detonador es cargado y programado mediante la comunicación existente entre los barrenos y el blast box con el cable eléctrico de conexión.

Está equipado con una batería recargable.

En el blast box aparecerán detalles si existiera alguna falla de comunicación con algún detonador, ya que hace una revisión uno a uno. Reporta las fallas y detalles en la pantalla.

Tiene la capacidad de disparar hasta 500 iniciadores por voladura.

Una vez que todos los iniciadores han sido programados y confirmados, se puede proceder a realizar la voladura.



Figura 28. Blast Box



Figura 29. Blast Box descargando la información de los iniciadores Unitronic

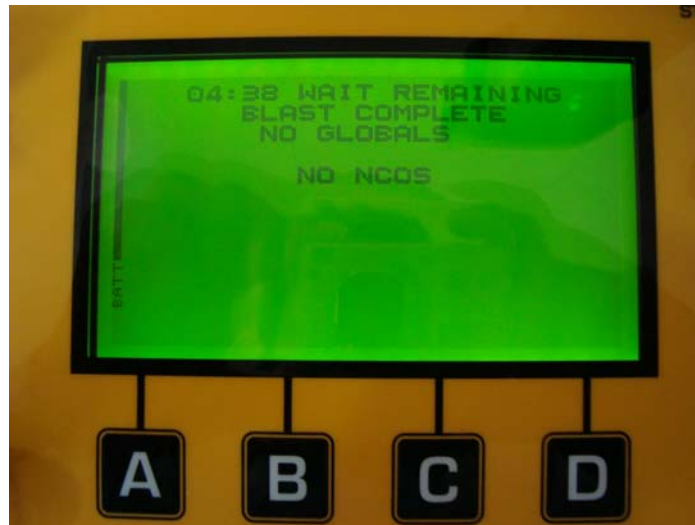


Figura 30. Una vez descargada la información del scanner y verificada la continuidad o comunicación de todos los barrenos el Blast Box nos permite realizar el disparo accionando un botón.

CAPITULO 6. ANALISIS DE VOLADURAS CON INICIADORES PIROTECNICOS Y ELECTRONICOS

6.1. Situación actual de voladuras

Durante los últimos dos años se han hecho algunas pruebas en la cantera para determinar los mejores parámetros de barrenación y cargado los cuáles permitan los mejores resultados de fragmentación y desplazamientos. Así tenemos que la geometría de las plantillas de barrenación actuales son:

Bordo	3.0 m
Espaciamiento	3.5 m
Altura de banco	10.0 m
Sub-barrenación	1.0 m
Diámetro de barrenación	3 ½ in
Taco	2.3 m
Material para taco	Gravilla de caliza
Carga de fondo	1.04 kg de emulsión
Carga de columna	50 kg de ANFO (Promedio)
Tiempo de retardo entre barrenos	25 ms
Tiempo de retardo entre líneas	115 ms
Tiempo de retardo en el fondo	350 ms

El sistema usado de iniciación es el Handi-DET de la línea Nonel, marca Orica, es un tubo de choque con retardo en fondo y superficie, que nos ayuda a tener en una sola pieza ambos retardos. Esto reduce los inventarios de polvorines al no tener existencias de varios tiempos.

Los resultados obtenidos de las voladuras son buenos, con desplazamientos verticales de hasta 4 m y horizontales de 10 a 20 m. La fragmentación presenta uniformidad, obteniéndose hasta 5% de roca de sobretamaño.

Los costos de la barrenación y consumo de explosivo reales acumulados de enero 2008 a abril 2008, con un tipo de cambio de \$10.40, con los parámetros mencionados son los siguientes:

Barrenación por tonelada	1.91 \$/ton
Consumo de explosivo	2.07 \$/ton

6.2. Prueba iniciadores electrónicos unitronic

Para probar la tecnología ofrecida por los iniciadores electrónicos, se programo una voladura de prueba.

La geometría de la barrenación no se modificó, para poder hacer una comparación entre los dos sistemas únicamente modificando los tiempos de retardo. Así tenemos la geometría es la misma:

Bordo	3.0 m
Espaciamiento	3.5 m
Altura de banco	10.0 m
Sub-barrenación	1.0 m
Diámetro de barrenación	3 ½ in
Taco	2.3 m
Material para taco	Gravilla de caliza
Carga de fondo	1.04 kg de emulsión
Carga de columna	50 kg de ANFO
Tiempo de retardo entre barrenos	4 ms
Tiempo de retardo entre líneas	32 ms
Número de barrenos	154 barrenos
Tonelaje	55,000 ton

Según lo comentado en el capítulo anterior, la salida recomendada es en echelones, ésta salida obtenida por la combinación de tiempos, se muestra a continuación:

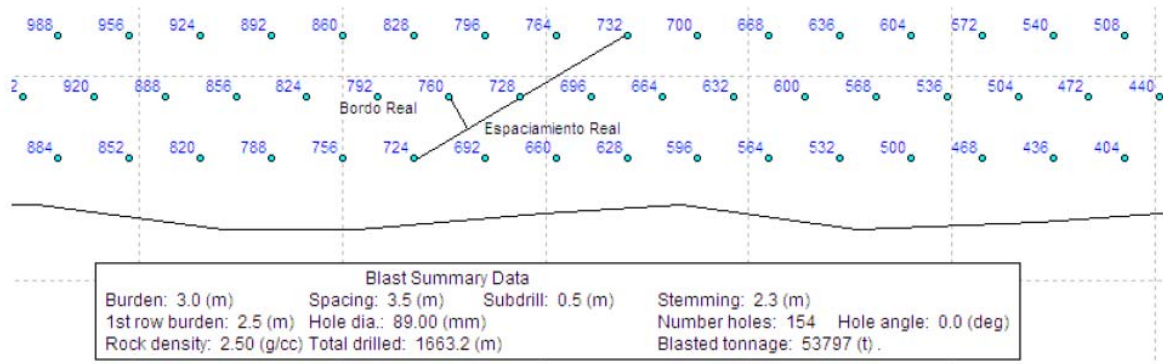


Figura 24. Diagrama de retardo de la voladura utilizando el sistema Unitronic

Con éste tipo de salida se tiene que medir el bordo y espaciamiento real, así tenemos que:

$$\text{BORDO REAL} = 1.76 \text{ m}$$

$$\text{ESPACIAMIENTO REAL} = 6.04 \text{ m}$$

$$\text{AREA POR BARRENO} = 15.7 \text{ m}^2$$

Los resultados obtenidos en este estudio se realizó un estudio foto y se le dio seguimiento a la producción y desplazamiento, para la distribución de la fragmentación y acarreo y trituración.

Los resultados de la fragmentación se muestran en la figura 25, en los cuáles se puede observar que el 80 % del acumulado positivo se encuentra en 28.6 cm (11.26 in), y vemos que el 100% se encuentra por debajo de 61 cm (24 in), lo cuál es un resultado favorable pensando que el tamaño máximo de alimentación a la quebradora primaria es de 80 cm. Estos resultados se obtienen de un análisis de imágenes tomadas en la parte frontal de la pila o rezaga, figura 26, este material corresponde a la primera fila de barrenos, y en donde la fragmentación presenta roca de sobretamaño, producto del daño ocasionado a la pared con la voladura anterior. En las imágenes se muestra como en el interior de la pila la fragmentación es mucho mejor.

Un tema que conviene seguir estudiando es el relacionado a las microfisuras obtenidas por la voladura al reducir el tiempo de retardo, ya que éstas incrementan la productividad de los equipos de trituración.

Las microfisuras existen y son parte del mecanismo de fragmentación de la roca, son ocasionadas en el volumen de roca circundante a cada barreno, ocasionadas en un primer momento por la expansión de los gases producto de la detonación del explosivo. Al reducirse el tiempo de retardo,

dicha onda de choque se incrementa, lo que ayuda al mejoramiento de la fragmentación y de la trituración.

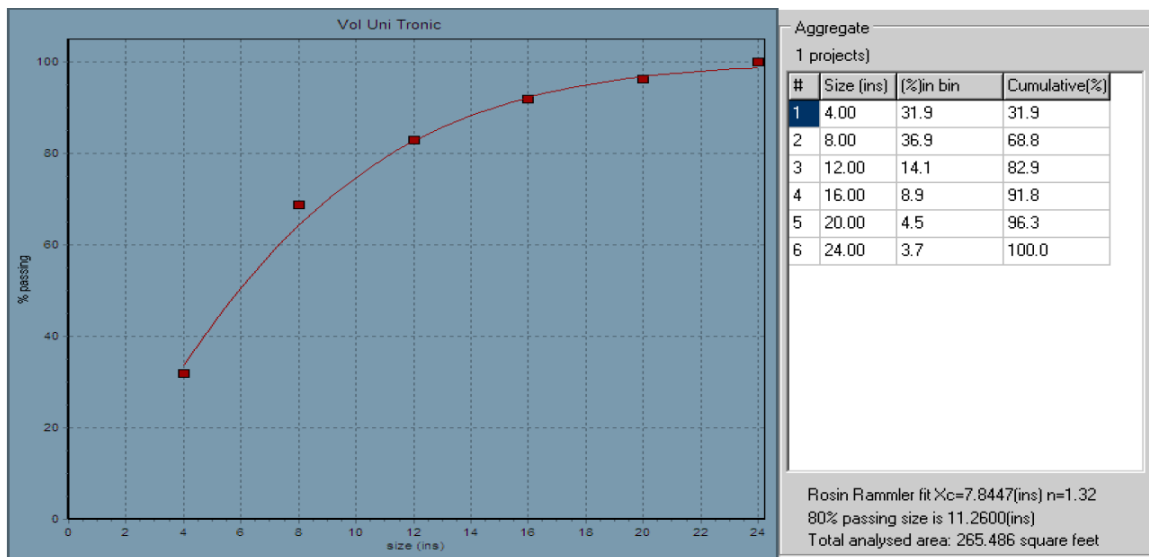


Figura 25. Distribución de fragmentación de la voladura de prueba con unitronic



Figura 26. Fotografía tipo para análisis de fragmentación

El control de la voladura sobre roca en vuelo fue muy grande, como veremos en las siguientes fotografías:



Figura 27. Secuencia de disparo 1



Figura 28. Secuencia de disparo 2



Figura 29. Secuencia de disparo 3



Figura 30. Secuencia de disparo 4

Como se puede observar en la figura 29, existe una uniformidad en el tamaño de la roca de la voladura, así como en el desplazamiento y control de la pared trasera. No son visibles rocas de sobretamaño las cuáles no se puedan alimentar a la quebradora primaria.

Es importante mencionar que en esta voladura se usaron 4 ms entre barrenos, originando este nivel de fragmentación, si se deseara un menor tamaño de la roca, disminuyendo el retardo ($t = 3$ ms) se podría lograr una mejor fragmentación.

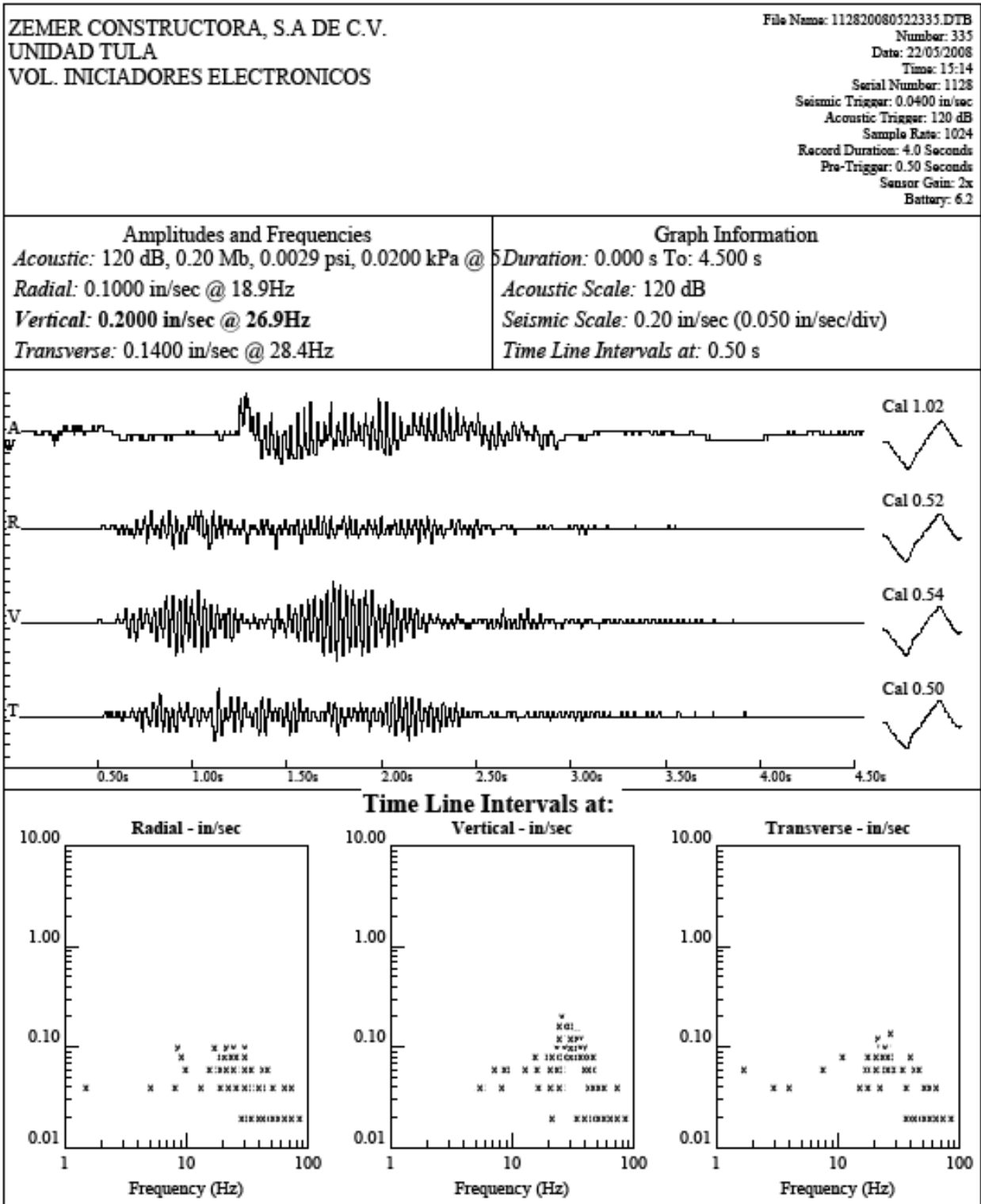


Figura 31. Registro sismográfico voladura con iniciadores electrónicos

Como podemos ver en la figura 31, el registro de vibraciones y ruido no rebasa las 2 in/s que es el parámetro del USBM establecido y el cuál es el criterio más difundido en las operaciones mineras de todo el mundo.

En cuanto al ruido se mantuvo dentro de los límites establecido por la norma estatal de Hidalgo, la cuál debe ser menor a 130 db, la lectura obtuvo 120 db.

Con esto podemos ver que a pesar de los tiempos cortos de retardo, las vibraciones se mantienen controladas, por debajo de los estándares que se ocupan en ésta operación.

Se propone medir los resultados con el sistema tradicional y después hacer una comparación con un grupo de voladuras con iniciadores electrónicos UniTronic™ (7 a 8 voladuras equivalentes al timbre de 1 mes), para evaluar de mejor manera los parámetros, en una forma representativa.

Ya que dicho sistema incrementa la presencia de microfisuras en la roca, es posible abrir la plantilla de barrenación, y con ello encontrar un equilibrio de costos entre la barrenación y el consumo de explosivos.

Para ello, se calculará la plantilla tal que, se equiparen los costos de barrenación y consumo de explosivo entre el sistema pirotécnico y el electrónico, observando dicha plantilla y analizando si es conveniente, real y que según la experiencia, se puedan obtener buenos resultados.

Los costos de la barrenación y consumo de explosivo utilizando iniciadores electrónicos son los siguientes:

Barrenación por tonelada	1.91 \$/ton
Consumo de explosivo	2.21 \$/ton

6.3 Cálculo de la plantilla necesaria para equiparar costos

Debido al enfoque de salida en diagonal para el diseño de voladuras con iniciadores electrónicos, se realizará un cálculo tal que, se tenga una plantilla en la cuál podamos equiparar el costo de la barrenación con el del costo de explosivo usando iniciadores electrónicos:

La diferencia de costos entre el sistema pirotécnico y electrónico es de:

$$2.21 \text{ \$/ton} - 2.07 \text{ \$/ton} = 0.14 \text{ \$/ton}$$

Para un costo de 2.21 \$/ton, se obtiene un volumen de roca por barreno de 10 m de 262.5 ton, entonces se tiene que:

$$\frac{2.21 \frac{\$}{\text{ton}}}{262.5} = \frac{(2.21 + 0.14) \frac{\$}{\text{ton}}}{x}$$

$$X = 279 \text{ ton}$$

Entonces necesitamos incrementar el volumen de roca tumbado por barreno de 262.5 ton a 279 ton. Por experiencia, se ha observado que para un diámetro de 3 ½ in, bordos superiores a 3m, se obtienen voladuras con baja fragmentación y desplazamiento, así que se propone un bordo real de 3 m, así tenemos que:

$$\text{Tonelaje} = \text{Bordo} \times \text{Espaciamiento} \times \text{Densidad de la roca} \times \text{altura del banco}$$

$$279 \text{ ton} = 3 \text{ m} \times \text{Espaciamiento} \times 2.5 \text{ ton/m}^3 \times 10 \text{ m}$$

$$\text{Espaciamiento} = 3.7 \text{ m}$$

Si hacemos la consideración de la salida en echelones con una plantilla marcada en campo de 3 x 3.7 m, tenemos que:

Bordo aparente	3 m
Espaciamiento aparente	3.7 m
Bordo real	1.9 m
Espaciamiento real	6.3 m
Altura de banco	10.0 m
Sub-barrenación	1.0 m

Los parámetros actuales y los propuestos se encuentran en la tabla 6:

	PLANTILLA ACTUAL	PLANTILLA PROPUESTA
BORDO APARENTE	3	3
ESPACIAMIENTO REAL	3.5	3.7
ALTURA DE BANCO	10	10
SUB-BARRENACION	1.0	1.0
BORDO REAL	1.76	1.9
ESPACIAMIENTO REAL	6.04	6.3

Tabla 6. Parámetros de la plantilla actual y la propuesta para equiparar costos utilizando iniciadores electrónicos.

CAPITULO 7. CONCLUSIONES Y RECOMENDACIONES

1. Los iniciadores de tubo de choque, presentan por lo general dispersiones alrededor de su tiempo nominal que van hasta el +/- 10%, lo cuál origina problemas de iniciación, que se traducen en pobre fragmentación y desplazamiento, posible corte de secuencia y roca en vuelo, así como daño a la pared posterior.
2. Como podemos ver en los textos citados en éste trabajo, durante muchos años se ha tenido la idea de que los tiempos cortos de retardo nos proporcionaban resultados negativos de fragmentación, desplazamiento, vibraciones y roca en vuelo, así como el daño en el talud trasero y el incremento de las vibraciones.

La literatura de las décadas de los 70's hasta mediados de los 90's afirmaban que los retardos cortos producían problemas de baja fragmentación, desplazamiento, problemas para la carga, roca en vuelo, daño a la pared posterior. La tecnología disponible con los iniciadores no eléctricos de tubo de choque hacían creer esto.

Con el desarrollo de los iniciadores electrónicos que permiten tiempos entre 0 ms a 20000 ms en incrementos de 1 ms, se ha podido comprobar en el campo que éstas aseveraciones no son del todo ciertas. Ha sido posible utilizar retardos entre líneas de barrenos de hasta 2 ms. Los iniciadores no eléctricos de tubo de choque funcionaron durante dichos años, pero los resultados pueden ser mejorados con éstas tecnologías.

3. Los iniciadores electrónicos son una herramienta moderna con la cuál es posible disminuir la dispersión en los tiempos de retardo presente en los iniciadores pirotécnicos. Es posible programar retardos desde 0 ms a 20,000 ms con una dispersión casi nula, con esto el control sobre la secuencia de disparo es completo.
4. Los sistemas de seguridad que componen el sistema Unitronic son de alto estándar, lo que permite su manejo seguro durante el proceso de carga, conexión y comprobación de continuidad. Disminuyendo el riesgo de manera muy importante así como la posibilidad de barrenos no detonados.
5. Actualmente la diferencia de precios entre los iniciadores electrónicos y los pirotécnicos es casi de 2 a 1 (\$ 17 US electrónicos a \$ 8.26US pirotécnicos), hace que para algunas operaciones no sea costeable su uso, pero debido a la mayor formación de microfracturas en la roca, es posible encontrar una plantilla de barrenación con un bordo y un espaciamiento mayor, obteniendo los mismos resultados de fragmentación y desplazamiento. Este ahorro en barrenación debe balancear el costo por consumo de explosivo.

6. Es necesario realizar un periodo de pruebas con el fin de establecer la plantilla óptima que permita disminuir el costo de barrenación. Las pruebas son necesarias debido al cambio en la geología del terreno, formas y orientaciones de los bancos.

Dicha plantilla deberá ser aquella en la cuál los resultados de fragmentación y desplazamiento sean los óptimos para la operación de la cantera, es decir, desplazamiento vertical de 3 a 4 m y obtener un porcentaje del 2% de roca de sobretamaño (mayor de 80cm). Estas pruebas están en espera de la autorización por parte de la Dirección de Zemer, después de un análisis técnico y económico.

7. Para la plantilla propuesta en éste trabajo, el bordo real se incrementa 7.9%, el espaciamento se incrementa 4.3% de los realizados con la prueba. Con la experiencia de campo obtenida, se puede decir que, dicha plantilla puede funcionar y obtener buenos resultados de fragmentación y desplazamiento.

BIBLIOGRAFIA

Fundamentos para la explotación de minas
Victor Manuel López Aburto
Universidad Nacional Autónoma de México
Facultad de Ingeniería
México, 2008

Technical Data Sheet “Unitronic Electronic Blasting System”
ORICA Mining Services
2008

Seminario Técnico Internacional “Técnicas de voladuras y tecnología; un mismo concepto”
Chihuahua, México
Febrero 2008

Innovaciones en las técnicas de iniciación: Sistema mixto de iniciación no eléctrico-electrónico
en voladuras en túnel
Javier Muñoz García y Jorge López Rodríguez
MAXAM Europe
2007

Sistemas Electrónicos de Iniciación “Componentes de la Capsula UNI Tronic™ 500”
ORICA Mining Services
2007

Seminario técnico de voladuras para canteras
Dyno Nobel
Tula, Hgo.
2006

Blast Design
Dr. Calvin J. Konya
Precision Blasting Services
1994

Uso de Explosivos en México
Atlas de México, S.A. de C.V.
México D.F.
1998

Blasting principles for open pit mining. Volume 1
William Hustrulid
A.A. Balkema/Rotterdam/Brookfield
1999