



**UNIVERSIDAD DE CHILE
FACULTAD DE CIENCIAS FÍSICAS Y MATEMÁTICAS
DEPARTAMENTO DE INGENIERÍA DE MINAS**

**DISEÑO DE UN SISTEMA DE CONTROL PRODUCCIÓN PARA LA MINERÍA DE
ESMERALDAS**

MEMORIA PARA OPTAR AL TÍTULO DE INGENIERO CIVIL DE MINAS

DANIELA ANDREA SIÑUELA POMAR

**PROFESOR GUÍA:
ENRIQUE RUBIO ESQUIVEL**

**MIEMBROS DE LA COMISIÓN:
ALDO CASALI BACELLI
HANS GÖPFERT HIELBIG**

**SANTIAGO DE CHILE
ENERO, 2012**

RESUMEN

El objetivo principal de este trabajo es el diseño de un sistema de control de producción para la minería de esmeraldas, ya que, para este tipo de minería no existe un sistema de control producción, la explotación se realiza de manera artesanal siguiendo la veta mineralizada. El no poseer un control de producción para la planificación tiene como consecuencia la nula extracción de material de interés por una inadecuada distribución de recursos.

El sistema que se propone se puede separar en cuatro grandes tópicos, siendo estos evaluación de recursos, planificación minera, sistema de control producción, y reconciliación. Este consiste en un ciclo cerrado de etapas sucesivas, partiendo de una base de datos que posee toda la información necesaria para obtener estadísticas de producción que servirán como datos de entrada a un modelo de planificación minera. El ciclo consta, entre otros, de una etapa de optimización, y otra de asignación de extracción que apuntan a horizontes de planificación distintos.

La etapa de optimización consiste en el cálculo del programa de producción mensual y tiene como finalidad maximizar el beneficio obtenido por la producción de esmeraldas, generando un plan de producción que cumpla con el objetivo sujeto a restricciones presupuestarias y operacionales obtenidas del desempeño histórico de la mina, de modo de respetar sus capacidades e infraestructura. La etapa de asignación consiste en entregar la secuencia de explotación a seguir para el cumplimiento del plan. Esta última se realiza mediante el método de minimización de cuadrados, minimizando la brecha entre los metros de avance realizados y los planificados para el mismo período de tiempo.

Luego de realizadas las dos etapas se obtiene el plan minero diario a seguir en el mes, el cual luego de ser aplicado en la operación de la mina, entregará resultados que son la base para realizar una reconciliación productiva, es decir, comparar lo realizado con lo planificado, obteniendo información útil para realizar ajustes y mejorar estimaciones mediante la retroalimentación de información al sistema.

La filosofía que tiene el sistema propuesto, es que define simultáneamente la preparación minera con la producción de frentes y a su vez el levantamiento geológico, el cual cumple un rol primordial para la planificación en este tipo de yacimientos. Por otro lado, se verá que permite agendar a priori mantenciones y reparaciones, disminuyendo imprevistos que obliguen a interrumpir la operación para la realización de estas actividades. Además, que se asegura la creación de planes de producción alcanzables en la práctica mediante la aplicación de restricciones operacionales de la mina.

El sistema es aplicado a un mes de operación del año 2010 de la mina de esmeraldas de Muzo, Colombia, obteniendo resultados satisfactorios con un valor por producción un 26% mayor al obtenido, lo cual sugiere su aplicación.

ABSTRACT

The main purpose of this work is to design a Production Control System for emerald mining. This type of mining is generally carried out by a nonprofessional operation that simply follows the mineralized vein without any production control system. The lack of a production control to support mine planning results in inefficiencies in the operation because of a poor allocation of resources.

The proposed system can be separated in four main topics. These are resources evaluation, mine planning system, production control system and reconciliation. This system consists in a closed sequence of stages, starting with a database that contains all the information needed to get production statistics that are the inputs to feed the mine planning model.

The sequence itself consists, among others, of an optimization stage and an extraction assignation stage, aiming at different planning horizons. The first stage has a monthly view and seeks to maximize the benefit associated to the emerald production. It generates a monthly production mining plan -providing the monthly goal of progress in meters- and reaches the objective satisfying budgetary and operational constraints obtained from historical mine performance in order to respect its capabilities and infrastructure. The monthly mining plan obtained at the first stage, will be the goal of the second stage, whose objective is to deliver the mining sequence for the fulfillment of the plan. This second stage is performed by quadratic programming, minimizing the quadratic difference between the actual advanced and planned meters for the same period of time.

The result of both stages is the diary mining plan to be implemented in the operation through the month. It will also deliver useful information to make adjustments and improve estimates by feeding back the system with actual and planned results. Minimizing the deviation in order to increase the emerald production is fundamental.

The philosophy of the proposed system is that it defines the mine preparation simultaneously with the production headings together with the geological survey, which has a very important role for planning in these kind of deposits. It will also allow scheduling repair and maintenance activities ahead of time avoiding costly interruptions. Another point to consider is that it guarantees achievable production mining plans by applying the mine operational constraints.

The system has been applied to a month of operation of the emerald mine from Muzo, Colombia, obtaining satisfactory results showing that the benefit associated to production was over 26% above the one actually obtained.

AGRADECIMIENTOS

A mi mamá Ingrid (Q.E.P.D) a quien le debo gran parte de lo que soy, que junto a mi papá, Luis, hicieron hasta lo imposible por que tuviera la mejor educación para llegar a ser una buena profesional. Gracias a ellos por ser un ejemplo de padres en todas las etapas de mi vida

A mi hermano Cristián y cuñada Olivia por estar siempre conmigo a pesar de estar lejos, y por darme una de las mayores alegrías, mi lindo sobrino Tomasito

A Jose por acompañarme durante toda mi vida universitaria, y por soportarme en esta última etapa, sé que ha sido difícil

A mis amigos mineros, Montse, Lucho, Lupi y Migue, con quienes me reí (mucho), pasé los mejores momentos de la carrera y me apoyaron y acompañaron en momentos difíciles

A los profesores de mi comisión, en especial a Enrique Rubio por darme la oportunidad de entrar al mundo laboral minero, más aún en un proyecto tan único como la mina de esmeraldas de Colombia

A todos aquellos que aportaron con algún granito de arena, entre ellos Pamela, María José, Milivoj; y a Juanita que siempre estuvo ahí para temas académicos y personales

ÍNDICE

1 INTRODUCCIÓN.....	1
1.1 Objetivos.....	3
1.1.1 Objetivo general	3
1.1.2 Objetivos específicos.....	3
1.2 Alcances.....	3
1.3 Metodología.....	4
2 ANTECEDENTES BIBLIOGRÁFICOS	5
2.1 La esmeralda y el mercado de esmeraldas.....	5
2.1.1 Producción de esmeraldas en Colombia.....	8
2.1.2 El mercado de las Esmeraldas.....	8
2.1.3 Exportaciones mineras Colombianas	10
2.2 La planificación minera	12
2.3 Sistemas de control producción	13
2.4 Ajustes a planificación de mediano y corto plazo	14
2.5 Herramientas de programación.....	16
2.6 Antecedentes generales de la composición y geología de las esmeraldas.....	17
2.6.1 Composición química.....	17
2.6.2 Formación y paragénesis.....	18
3 BASE DE DATOS CONTROL PRODUCCIÓN MINA, MUZO	22
3.1 Componentes base de datos control Producción Mina.	22
4 ANTECEDENTES GENERALES Y PRODUCTIVOS MINA MUZO	24
4.1 Método de explotación.....	24
4.2 Resultados operacionales año 2010	27
4.3 Marco Geológico Mina Muzo.....	33
4.4 Monitoreo geología y geotecnia	35
4.5 Monitoreo Geofísico	38
4.6 Geoquímica.....	42
4.7 Costo de Actividades Productivas	45
4.7.1 Insumos.....	45
4.7.2 Costos Fijos.....	45

4.7.3 Costos por Categoría.....	46
4.8 Esquema cálculo programa de producción	47
4.9 Reconciliación planes de producción.....	47
5 SISTEMA CONTROL PRODUCCIÓN MINA	49
5.1 Diseño lógico del sistema	49
5.2 Estructura para la planificación	50
5.2.1 Entradas al sistema:.....	50
5.3 Programación de la Producción	58
5.4 Reconciliación	61
6 CASO DE APLICACIÓN Y RESULTADOS	65
6.1 Planificación mes de Octubre 2010 (caso real).....	65
6.2 Reconciliación operación mes de Octubre 2010 (caso real).....	67
6.3 Aplicación del sistema al mes de Octubre 2010 (caso modelado).	68
7 CONCLUSIONES Y RECOMENDACIONES	71
REFERENCIAS	72
Anexos.....	74
Anexo A: Imágenes de la mina de Muzo.....	74
Anexo B: Base de Datos	76
Anexo C: Reconciliación	77
Anexo D: Anexo Capítulo 6	79

ÍNDICE DE FIGURAS

Figura 1: Principales productores de esmeraldas en el mundo.....	1
Figura 2: Tallas de la esmeralda.....	6
Figura 3: Esmeralda tipo Chispero.....	7
Figura 4: Esmeralda tipo Morralla.....	7
Figura 5: Muestra.....	7
Figura 6: Producción Histórica de esmeraldas en Colombia, 1940 - 2010.....	8
Figura 7: Precio esmeraldas.....	9
Figura 8: Esquema comercialización esmeraldas.....	9
Figura 9: Exportaciones Mineras - Colombia.....	10
Figura 10: Producción de esmeraldas - Colombia.....	11
Figura 11: Destinos producción esmeraldas colombianas.....	12
Figura 12: avance con martillo en la frente.....	24
Figura 13: Malacate Tequendama.....	24
Figura 14: Layout General de la Mina.....	26
Figura 15: Extracción Tequendama.....	27
Figura 16: Avance Tequendama.....	28
Figura 17: Extracción Puerto Arturo.....	28
Figura 18: Avance Puerto Arturo.....	29
Figura 19: Extracción Catedral.....	29
Figura 20: Avance Catedral.....	30
Figura 21: Extracción Volveré.....	30
Figura 22: Avance Volveré.....	31
Figura 23: Extracción Mina.....	31
Figura 24: Avance total Mina – Producción kilates.....	32
Figura 25: Origen material esmeraldífero extraído.....	33
Figura 26: Clasificación material esmeraldífero extraído.....	33
Figura 27: Mapa potencial de esmeraldas.....	34
Figura 28: Esquema de Contacto entre Litología, Tramas, Simbología.....	37
Figura 29: Línea de trabajo tomografía, Tequendama SR1.....	40
Figura 30: Plano Tequendama, SR1.....	40
Figura 31: Modelo 2D de resistividad, SR1.....	40
Figura 32: Línea de trabajo Tomografía Tequendama R1Inf.....	41

Figura 33: Plano Tequendama.....	41
Figura 34: Modelo 2D resistividad R1inf.....	41
Figura 35: Espectro mineralógico. Difracción de Rayos X.....	43
Figura 36: Modelo predictivo.....	44
Figura 37: Modelo y realidad.....	44
Figura 38: Distribución de costos.....	46
Figura 39: Diagrama integración de la información.....	47
Figura 40: Cumplimiento planes de Producción – Reconciliación kilates.....	48
Figura 41: Diseño Lógico sistema de Control Producción.....	49
Figura 42: Caracterización geológica frentes.....	51
Figura 43: Mapa geológico.....	52
Figura 44: Histograma de Frecuencia de leyes. Tequendama SR1-SR2. Sector C02, Morralla.....	53
Figura 45: Máximo avance diario por mina.....	54
Figura 46: Máximo avance diario por nivel – Tequendama.....	55
Figura 47: Máximo avance diario por nivel - Puerto Arturo.....	55
Figura 48: Máximo avance diario por nivel - Catedral y Volveré.....	56
Figura 49: Plan minero Octubre 2010.....	66
Figura 50: Resultado Secuencia de Explotación al aplicar método en mes de Octubre.....	69
Figura 51: Plan Minero resultante de aplicación del método.....	70
Figura 52: Puertas para fortificación.....	74
Figura 53: Plátinas de soporte para fortificación.....	74
Figura 54: Interior pique de acceso mina Tequendama.....	74
Figura 55: Vista de mangas de ventilación.....	74
Figura 56: Veta mineralizada.....	75
Figura 57: Correa en planta de lavado.....	75
Figura 58: Lavado manual de mineral.....	75

INDICE DE TABLAS

Tabla 1: Exportaciones Esmeraldas Colombianas	11
Tabla 2: Paragénesis mineralógica de las venas principales mineralizadas en la Mina de Muzo. Según Hall (1973, 1978) y Hall et al (1976, 1978).	21
Tabla 3: Indicadores de Producción – Tequendama.....	27
Tabla 4: Indicadores de Producción - Puerto Arturo.....	28
Tabla 5: Indicadores de Producción – Catedral.....	29
Tabla 6: Indicadores de Producción – Volveré	30
Tabla 7: Indicadores de Producción – Mina.....	31
Tabla 8: Caracterización geología frentes.	36
Tabla 9: Caracterización calidad de roca en frentes	38
Tabla 10: Relación Na/K en análisis geoquímico de muestras.	42
Tabla 11: Costos mes.....	46
Tabla 12: Máximo de avance diario por mina (avance en metros).	54
Tabla 13: Avance diario máximo por nivel. Horizontal y Vertical.	56
Tabla 14: Rendimientos por frente [m/dia/frente].....	57
Tabla 15: Costo unitario por metro	58
Tabla 16: Curvas de llenado bolsas de producción.	63
Tabla 17: Dimensiones bolsas de producción.	63
Tabla 18: Precio kilates para caso de aplicación	65
Tabla 19: Planificación mes de Octubre 2010.....	66
Tabla 20: Planilla Reconciliación metros, mes de Octubre.....	67
Tabla 21: Plan Obtenido de Primera Optimización.....	68
Tabla 22: Resultados Octubre 2010 v/s Plan Propuesto.....	70

1 INTRODUCCIÓN

Hoy en día la minería de Esmeraldas en el mundo se realiza de manera artesanal en diferentes países que explotan gemas. Son pocos los países que tienen el privilegio de poseer depósitos de esmeraldas lo suficientemente significativos para su comercialización. Encabezando la lista se encuentra Colombia, que abastece el 55% del mercado mundial de esmeraldas, las cuales gozan de una gran popularidad por su buena calidad y gran tamaño. Le sigue Brasil con el 15%, Zambia 12%, Zimbawe 5%, Pakistán 5%. El 8% restante corresponde a otros países entre ellos Rusia, Tanzania, Austria y Nigeria. En Brasil se pueden encontrar piedras de entre 2 y 3 kilates (1 kilate = 0.2 gr.) versus las de Colombia que pueden llegar a los 40, 50 y hasta más de 1,000 kilates, convirtiéndolas en las más grandes del mundo, bien formadas y muy hermosas lo cual hace que las esmeraldas colombianas tengan pocos competidores.

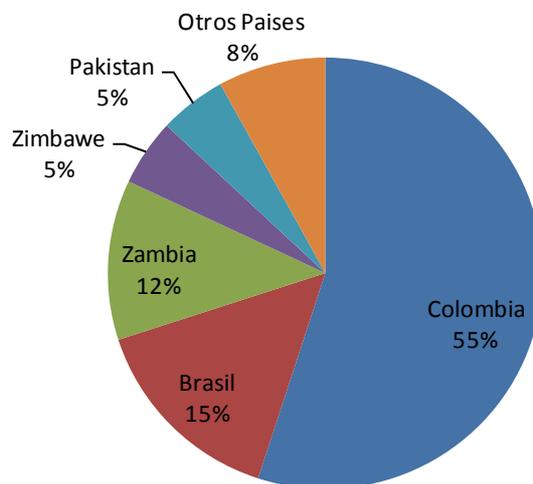


Figura 1: Principales productores de esmeraldas en el mundo.

La producción anual de Esmeraldas en Colombia consiste en 4,2 millones de kilates como promedio en los últimos 30 años, siendo los principales consumidores Estados Unidos, Japón, Tailandia, entre otros.

La esmeralda es una piedra preciosa valorada principalmente por su rareza, pues existe una serie de piedras preciosas de color verde pero la esmeralda es la única que tiene la particularidad de encontrarse en forma cristalina, y en particular las esmeraldas de Colombia son reconocidas en el mundo debido a su alta calidad, generada gracias a condiciones únicas del subsuelo, que las hacen más resistentes, brillantes, de tonalidades más puras y profundas, y de gran tamaño, posicionándolas por sobre las esmeraldas de cualquier otro origen. Los yacimientos se encuentran principalmente en los municipios de Muzo y Chivor, ubicados en el departamento de Boyacá a 300 kilómetros al noreste de Bogotá.

La producción de esmeraldas en Muzo ha sido una importante actividad económica reconocida desde el período prehispánico hasta la actualidad. Sin duda fue una de las fuentes de riqueza captadas por las familias de elite significando un gran aporte económico para este sector, pero no así para el desarrollo social de la región, sino que por el contrario, desde los inicios de la época republicana (s. XIX), Muzo se convirtió en fuente de corrupción administrativa e inseguridad con presencia de grupos armados generalmente al margen de la ley y protagonistas de innumerables desafueros. Situación que ha ido menguando al paso de los años.

El yacimiento de esmeraldas en cuestión, es de origen sedimentario hidrotermal, en que producto de la tectónica de placas se formaron pliegues y fallas que son específicamente donde se encuentra el mineral, esta es la razón de la necesidad de pasar de un método de explotación superficial a cielo abierto, a excavaciones subterráneas de modo de extraer el mineral selectivamente de entre los contactos litológicos en que están alojadas las gemas. El control geológico, junto con herramientas de monitoreo geofísico y análisis geoquímico aplicables a este tipo de yacimiento servirán de base como guía de planificación.

La empresa Coexminas es la encargada de explotar la mina de Muzo, para lo cual ha desarrollado una alianza estratégica con la empresa de minería americana Texas Mining and Energy, de tal manera de implementar un negocio de esmeraldas que se encuentre integrado verticalmente desde la extracción de Esmeraldas hasta su comercialización directa a casas de joyería y otros clientes. El modelo de negocios a utilizar por el joint venture entre estas dos últimas se divide entre la mina, el tallado y corte de gemas, finalizando con la comercialización en grandes subastas de gemas en tres lugares en el mundo: Beirut, Ginebra y Nueva York.

Actualmente la mina se explota de manera artesanal, siguiendo la veta, existiendo pérdidas estimadas en el 50% de las gemas, principalmente por robos, por quiebre debido al uso de martillo rompedor, y por pérdidas de zonas productivas en las frentes de producción.

Motivados por lo anterior, la empresa REDCO Mining Consultants ha sido contratada como contraparte experta en el negocio minero para desarrollar el proyecto de modernización y expansión de la operación actual, que permita mejorar el comportamiento de la recuperación de esmeraldas desde la mina. El objetivo es desarrollar proyectos tecnológicos que permitan transformar la situación actual a un estándar internacional que permita comercializar la producción de gemas de manera trazable y sustentable en el tiempo. La empresa consultora ha desarrollado un plan estratégico que dice relación con la explotación de los recursos actuales conocidos y potenciales en los pedimentos de Coexminas y Texminas, a partir del cual se definen una serie de proyectos tecnológicos a desarrollar, siendo los más importantes: la construcción e implementación de una planta de selección óptica, modernización de los sistemas de fortificación y ventilación, desarrollo de un sistema de control producción mina, realización de sondajes, análisis geoquímico de diversos sectores de la mina, estudio geofísico, levantamiento geológico, manejo de minerales en superficie, y obras civiles, todo con el mismo fin de obtener mejores recuperaciones y una eficiente utilización de los recursos, automatizando y mejorando las operaciones unitarias de la faena.

En este nuevo escenario, cabe destacar que la complejidad de las mediciones que caracterizan el yacimiento desde el punto de vista de concentración de esmeraldas, el procesamiento de gemas de distintos tamaños, y los planes de producción, hacen necesario el desarrollo de un sistema de control producción que permita integrar información proveniente de diferentes orígenes, como movimiento de la mina, planta de selección, geoquímica de muestras, estudio geofísico, y la planificación de la producción histórica, para llevar a cabo la planificación y poder realizar reconciliaciones que faciliten la identificación de desviaciones de las estimaciones que soportan el negocio.

Actualmente no se conoce algún sistema de control producción para este tipo de yacimientos, pero si existe la necesidad de uno, pues se necesita llevar un control de la operación de la mina, con el fin de mejorar los resultados obtenidos tanto en el corto como en el largo plazo, de modo de maximizar beneficios, cumpliendo los contratos de venta y ajustándose al presupuesto. Por otro lado, es importante integrar restricciones de manejo de materiales para respetar la infraestructura y capacidades productivas de la mina, además de que se trate de un método automatizable, rápido y auditable.

En el presente trabajo se presenta el diseño de ese sistema, que con la ayuda de herramientas de optimización pretende dar solución a esta necesidad.

1.1 Objetivos

1.1.1 Objetivo general

Desarrollar un sistema de control producción para la minería de esmeraldas.

1.1.2 Objetivos específicos

- Creación de una base de datos que soporte el sistema.
- Desarrollar una metodología de reconciliación mina - planta.
- Construir un modelo de planificación de la producción.

1.2 Alcances

- Diseño del sistema con datos actuales y estimados.
- El sistema soporta un horizonte de programación mensual que define la meta productiva, y otro diario enfocado a la asignación de extracción.
- Se integrará información de distinto tipo, tal como:
 - Geología de la mina, entendiendo los procesos genéticos del recurso esmeraldífero.
 - Características geotécnicas
 - Monitoreo geofísico
 - Análisis geoquímico

- Leyes estimadas (concentraciones anómalas)
- Costos involucrados en la operación.
- Rendimiento productivo por frentes y niveles de producción.

Los dos últimos formarán parte de las restricciones aplicadas al sistema.

1.3 Metodología

1. Revisión bibliográfica.
2. Revisión de los antecedentes de la faena.
3. Definición de los contenidos que tendrá la base de datos de control producción mina. Los contenidos de esta base de datos serán el punto de partida para la creación del sistema de control producción.
4. Planteamiento del problema a resolver, definiendo una función objetivo a optimizar y las restricciones operacionales y estratégicas necesarias para lograr el resultado esperado, el plan de producción que maximice el beneficio.
5. Especificación de parámetros requeridos para el modelo. Los parámetros responden principalmente a la necesidad de cumplir una cierta producción de material esmeraldífero asociada a un beneficio (US\$), respetando el presupuesto disponible para la operación y la capacidad máxima del sistema de manejo de minerales, entre otras que se detallan más adelante. Para esto es necesario el manejo de grandes cantidades de información, de producción, costos asociados a la operación, rendimiento asociado a diferentes escenarios posibles, historia geológica de los frentes de producción, entre otras.
6. Aplicación del sistema, obteniendo como resultado el plan de producción, y la secuencia a seguir para cumplirlo de una manera óptima, es decir, dónde, cuándo, y cuánto se debe producir, tomando en cuenta todas las variables de interés, minimizando la brecha operacional existente entre lo realizado y lo esperado, con el fin de alcanzar una meta productiva.
7. Análisis de resultados.
8. Conclusiones y recomendaciones.

2 ANTECEDENTES BIBLIOGRÁFICOS

2.1 La esmeralda y el mercado de esmeraldas.

La esmeralda es la tercera piedra más preciosa luego del diamante y el rubí, incluso a veces más valiosa que el diamante dependiendo – entre otros – de su pureza y tamaño. Es una gema muy dura¹ que constituye una variedad del mineral berilo, es un silicato de berilio, que gracias a la presencia de cromo en su composición, toma el color verde característico que es el principal causante de su alto valor.

Se utilizan en joyería y como piedra ornamental con diversos fines dependiendo de la pureza. También se le han atribuido propiedades curativas por lo que en algunos casos las esmeraldas de menor valor son utilizadas para la práctica de gemoterapia (terapia de medicina alternativa en que se utilizan diversas variedades de gemas).

Según expertos talladores colombianos, una esmeralda de muy buena calidad, siendo examinada boca arriba, debería permitir ver su faceta trasera. Gavrilenko (2009) define una serie de características fundamentales para que una esmeralda se diferencie de las otras adquiriendo un mayor valor comercial. Estas características son color, pureza, calidad de la talla y peso, características relevantes para la valorización de la gema.

- Color: corresponde al factor más importante, no sólo para esmeraldas sino para cualquier gema incluyendo los diamantes. El berilo se presenta en la naturaleza de diferentes colores, amarillo, rosado, blanco o incoloro, pero el verde esmeralda es el más valioso, ya que pese a existir en la naturaleza otros minerales de color verde intenso, la esmeralda es la única que lo posee en forma cristalina, lo cual explica su rareza y elevado valor. El color de una esmeralda nunca llega a ser muy oscuro, a no ser por la presencia de numerosas inclusiones internas o fisuras. Este no es el caso del rubí o del zafiro, en los que existe un límite de saturación del color, pasando a tonalidades demasiado oscuras y perdiendo su belleza. De esta manera puede decirse que en el caso de la esmeralda cuanto más verde, más valiosa.
- Pureza: es un factor relativo para determinar la exclusividad y valor de la piedra, pues una esmeralda de color intenso, pese a tener algún grado de impurezas, puede llegar a ser sumamente valiosa dependiendo de la talla, no así algunos berilos, que sin tener impurezas ni fisuras, resultan ser mucho más comunes que las esmeraldas tendiendo entonces un menor valor que una esmeralda de pureza inferior. En caso de comparar dos esmeraldas de similares características de color y brillo, indudablemente es más valiosa la que posea un mayor grado de pureza.
- Peso: también corresponde a un factor relativo, comparable entre esmeraldas de similares características de color y pureza, la de mayor peso tendrá un valor mayor.

¹ Dureza 7.5 – 8 en la escala de Mohs

- **Calidad de la talla:** la talla más común para las esmeraldas, es la talla en galería o “talla esmeralda”, que se caracteriza por tener caras largas y anchas, lo cual realza el color de la piedra, que como ya se mencionó, es la característica más importante y que le otorga un mayor valor a la gema. La calidad de la talla depende de quien la realiza. Un tallador avezado debe encontrar el equilibrio entre el peso y las proporciones perfectas, que en conjunto den como resultado un mayor valor para la piedra, pues se generan asimetrías en la forma de la piedra con el fin de aprovechar al máximo el tamaño y peso de ésta. Luego, se debe tomar sabiamente la decisión entre priorizar peso o simetría en la forma. A continuación se muestran algunos cortes en los que se suele tallar la esmeralda. De izquierda a derecha estas tallas se denominan de la forma siguiente: cabuchón, corazón, cuadrada, lágrima, oval, y redonda.

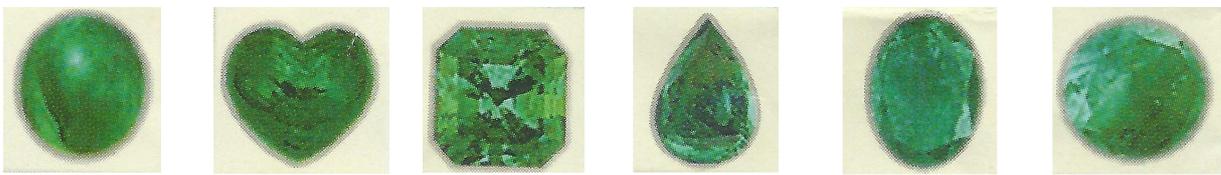


Figura 2: Tallas de la esmeralda.

Un factor que algunas veces es considerado en la valoración de la esmeralda, es el lugar de origen. Pues se sabe que las esmeraldas colombianas son las mejores del mundo, lo cual puede ir en perjuicio de esmeraldas de otros orígenes al momento de comparar y negociar, obteniendo las esmeraldas colombianas una tasación mayor a las esmeraldas de otros orígenes.

En cuanto a la clasificación, lo denominado como el Chispero, es la esmeralda de mayor calidad, es decir que posee un color verde intenso, translúcido y un alto grado de cristalinidad, y buen tamaño. Morralla se denomina a aquella piedra de calidad intermedia, que posee un color más sucio, lechoso, no alcanza una buena cristalización, por consiguiente, tiene un valor económico considerablemente menor. También están las del tipo Muestras, que son las de peor calidad. Cabeza corresponde a la o las gemas más valiosas del lote dentro de las clasificadas como chispero. Esta última categoría no se especifica directamente de la mina, sino que en la clasificación posterior cuando el material ya es analizado. Se estima que en el tallado se pierde aproximadamente el 50% de la piedra, del 50% restante, el 10% correspondería a chispero, el 20% a morralla, el 20% a muestras, y el 50% restante corresponde a estéril.

En las figuras siguientes se pueden ver imágenes de estas tres categorías. Estos ejemplos corresponden a material extraído de la mina de Muzo.



Figura 3: Esmeralda tipo Chispero



Figura 4: Esmeralda tipo Morralla

En las Figuras 3 y 4 se puede ver claramente que el color es la principal característica que determina la calidad de la esmeralda, ya que pese a que los chisperos de la Figura 3 son piedras pequeñas, son considerablemente más valiosas que la morralla que se ve en la Figura 4, que es de un tamaño mucho mayor.



Figura 5: Muestra

La piedra de tipo muestra que se ve en la figura anterior, tiene un valor considerablemente menor pero puede utilizarse como adorno en suvenires, entre otros, además de utilizarse para la fabricación de esmeraldas artificiales.

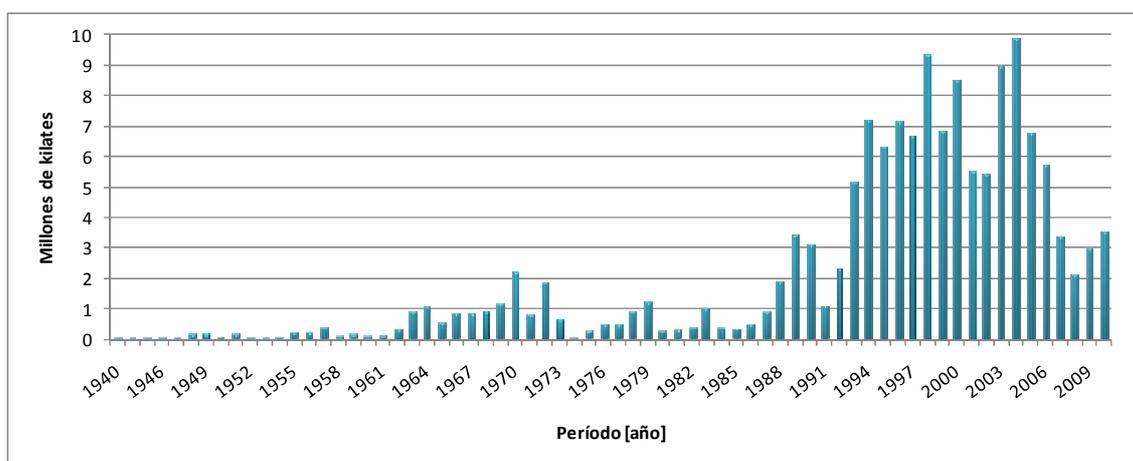
2.1.1 Producción de esmeraldas en Colombia

La minería de Esmeraldas en Colombia se remonta a comienzos del siglo XIX, en las minas de Muzo explotándose los yacimientos de manera artesanal, en que la motivación de seguir o no explotando, y por dónde, obedece a una metodología de seguir la veta a medida que se encuentren zonas más ricas en esta preciosa gema.

Para el año 1964, sólo a modo de referencia, existen registros de que la producción de esmeraldas consistió en alrededor de 70.000 kilates, cifra que difiere bastante de la producción actual de Colombia, que en el año 2004 ascendió a 9.83 millones de kilates, produciéndose como promedio, desde 1940 hasta la fecha, 2.75 millones de kilates al año, siendo aproximadamente el 90% de esta producción para exportación y el 10% para consumo local.

En el gráfico siguiente se presenta la evolución en la producción de esmeraldas en Colombia – en millones de kilates – entre los años 1940 y 2010²

Desde 1940 hasta fines de los 80', la producción de esmeraldas es bastante irregular, y existen una serie de bajas intermitentes en la producción, esto puede deberse a la seguidilla de conflictos por los que pasa el país, para que luego hacia la década del 90', se presente un aumento considerable en la producción, este es el momento en que la venta de esmeraldas comienza a ser industria, lo cual se mantiene hasta el día de hoy.



Fuente: 1990-1997 Mineralco; 1998-2003 Minercol Ltda; 2004 en adelante Ingeominas con base en pago de regalías. Unidad de Planeación Minero Energética.

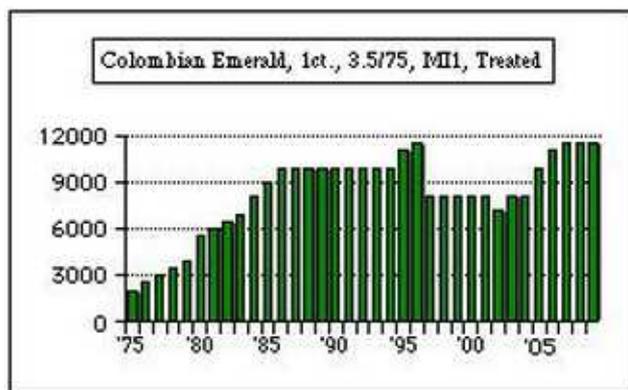
Figura 6: Producción Histórica de esmeraldas en Colombia, 1940 - 2010

2.1.2 El mercado de las Esmeraldas

El precio de Esmeraldas al igual que de todas las gemas, no se transa en bolsa, por lo cual el precio de venta es aquel que tanto el comprador como el vendedor aceptan como el precio de la transacción.

² Datos del 2010 actualizados hasta el 2° trimestre.

El siguiente gráfico se puede tomar como un indicador para estimar la tendencia general de los precios entre los años 1975 y 2009 (en US\$/kilate), y no como valores reales por lo mencionado en el párrafo anterior. Los precios que aparecen aquí corresponden a los más altos encontrados en los mercados de Estados Unidos, luego, ocurre que las piedras pueden ser encontradas a precios distintos respecto a los presentados, para formas estándar y parámetros ideales de calidad.



Fuente: NGC, National Gemstone

Figura 7: Precio esmeraldas.

Los pasos entre la extracción de la esmeralda desde la mina hasta el consumidor final, hacen que el precio de la esmeralda tenga un comportamiento sumamente volátil, difícil de establecer un valor como único u oficial. El precio de la esmeralda está determinado por la demanda, belleza, color, carencia de defectos e inclusiones, y perfección del tallado. Se estima que un kilate puede costar entre 250 y 20.000 dólares americanos dependiendo de, además de los factores mencionados anteriormente, del producto final en que se proyecta esa esmeralda, y la *expertise* de las partes involucradas en la transacción. A continuación se muestra un esquema sobre las etapas de comercialización de la esmeralda.

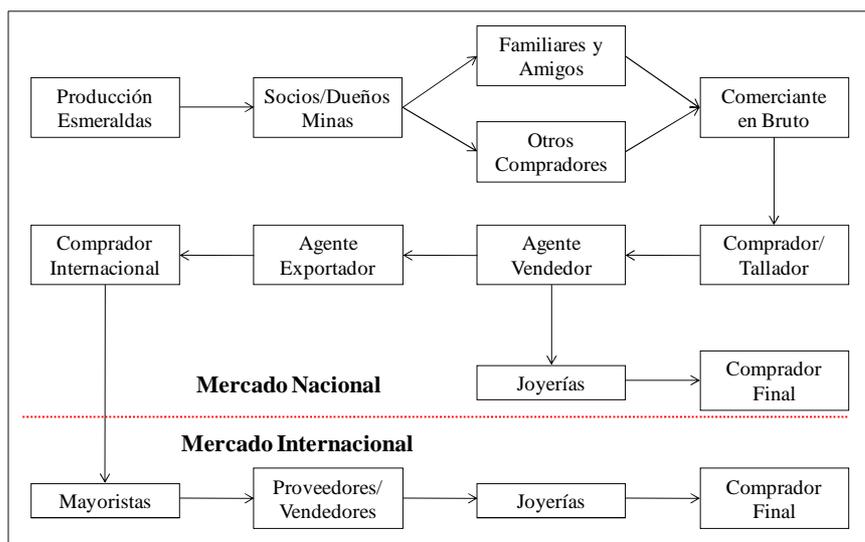
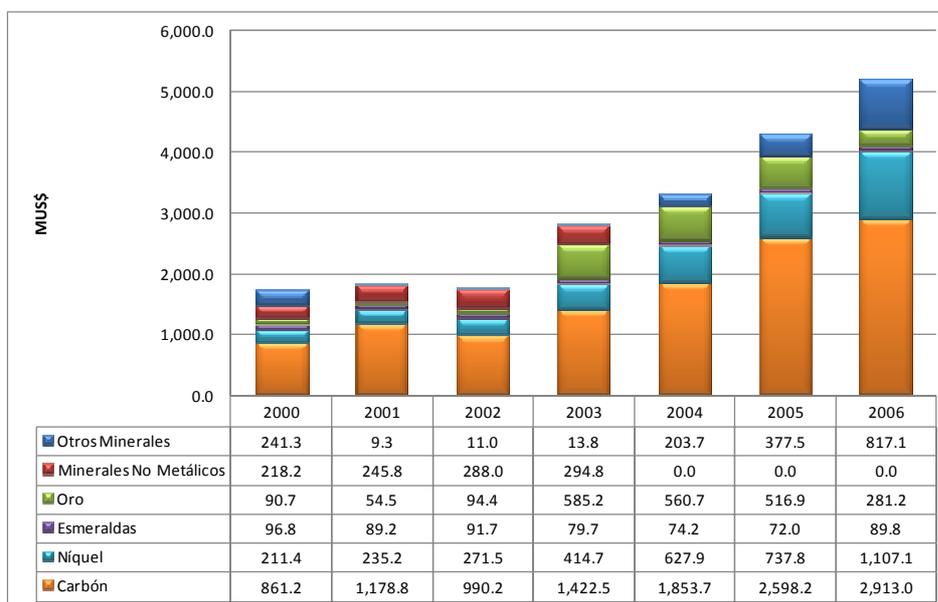


Figura 8: Esquema comercialización esmeraldas

2.1.3 Exportaciones mineras Colombianas

El mayor aporte para el producto interno bruto de Colombia es proporcionado por el sector servicios, seguido de la agricultura, ganadería y pesca. La contribución de la minería al PIB es menos significativa en comparación con algunos de sus vecinos como Brasil, Chile, Perú o el resto de Sudamérica. Para el año 2007 la minería aportó con un 2,57% en el PIB sin contar los hidrocarburos, tomando en cuenta que el petróleo es el principal producto exportado por Colombia.

En cuanto a minería se trata, las exportaciones son lideradas por el carbón, acaparando el 56% de las exportaciones en el período comprendido entre los años 2000 y 2006, seguido por el níquel, minerales no metálicos, oro y otros, y luego esmeraldas en que su participación en las exportaciones oscilan entre el 1,7 y 5,6%, en el mismo período.



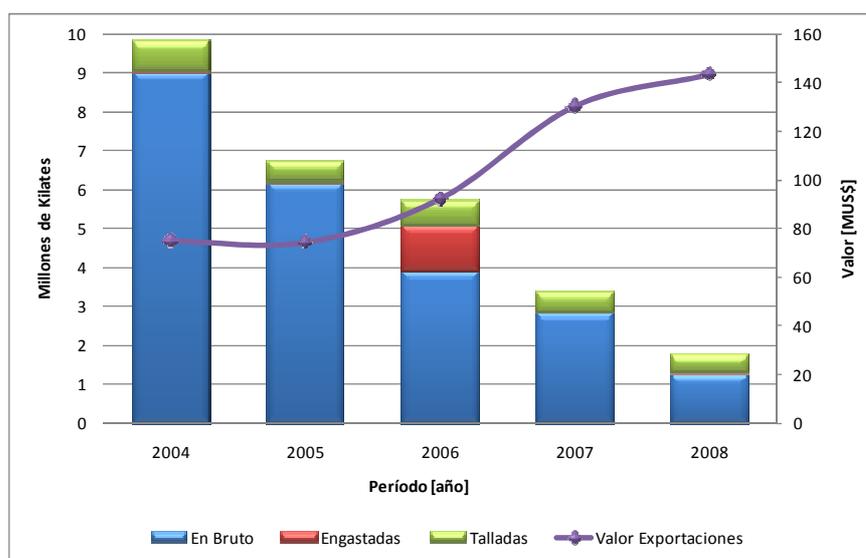
Fuente: Ingeominas

Figura 9: Exportaciones Mineras - Colombia

La exportación de esmeraldas ha tenido una tendencia a la baja en la última década, sin embargo el valor de las exportaciones aumentó en un 91% entre el año 2000 y 2006, manteniendo este negocio como algo tremendamente rentable, tomando en cuenta además que la información disponible es sólo una parte del total, debido a que los productores son bastante reservados en la entrega de información.

Tabla 1: Exportaciones Esmeraldas Colombianas

Período	Producción [Millones de Kilates]	Valor Exportaciones [MUS\$]
2004	9.83	74.91
2005	6.75	74.29
2006	5.73	92.22
2007	3.39	130.36
2008	1.76	143.39
Total	27.45	515.16



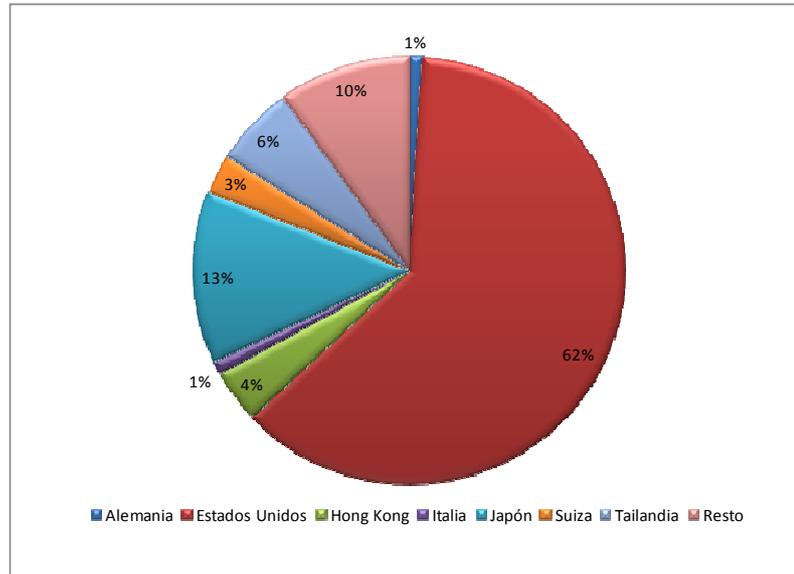
Fuente Ingeominas³

Figura 10: Producción de esmeraldas - Colombia

El comportamiento del valor de las exportaciones de esmeraldas no concuerda con lo que se esperaría por la disminución en el volumen de éstas. Una teoría plausible, es que la mayoría de las principales minas de Esmeraldas de Colombia, en los distritos de Chivor, Muzo y Coscuez - las cuales corresponden aproximadamente al 60% de la producción del país - han dejado de producir en grandes cantidades, quedan mayoritariamente las de Muzo, siendo Puerto Arturo la mina que posee las Esmeraldas de mayor calidad y tamaño, por consiguiente, de mayor valor económico. Otra alternativa es que este comportamiento se deba a un mayor control o fiscalización de este mercado, y luego por leyes de oferta y demanda el comportamiento sea éste.

Los principales destinos de las esmeraldas colombianas son Estados Unidos (62%), seguidos por Japón (13%), Tailandia (6%), Hong Kong (4%), Suiza (3%), y otros que se detallan a continuación se puede ver gráficamente lo mencionado.

³ Información II Trimestre 2007. Fecha última actualización: Julio 2007



Fuente: Ingeominas

Figura 11: Destinos producción esmeraldas colombianas.

2.2 La planificación minera

La planificación minera es la actividad minera que transforma el inventario de recursos en la mejor alternativa económica para ofrecer una promesa de negocios a los inversionistas. Es el punto de partida para determinar la vida de la mina, el volumen de reservas, capacidad productiva, perfiles de inversión entre otros, con el fin de maximizar las rentas del negocio económico (Rubio *et al.*, 2008). Consiste en ensamblar adecuadamente todas las variables que permiten la extracción de un mineral, mediante un diseño previamente definido. El proceso de planificación debe lidiar con la incertidumbre de muchas variables asociadas a la explotación minera, aleatoriedad que es muy difícil de incorporar al plan de producción, por lo que generalmente hay que asumir una serie de supuestos, que no siempre se ajustan a la realidad

Existen tres ramas principales en la planificación, estas son (Troncoso S, 2009):

- Planificación estratégica, la cual se preocupa del enlace entre los recursos naturales disponibles y el mercado de manera de obtener el mayor beneficio en base al valor del recurso minero.
- Planificación conceptual, que da una primera idea de los recursos naturales y físicos necesarios para cumplir los objetivos definidos, es el momento en que se definen la capacidad y vida de la mina, como también las reservas.
- Planificación operativa, la cual comienza cuando la faena ya está en operación, se definen indicadores operacionales que dan cuenta del funcionamiento de la faena, posibles falencias y

también soluciones para alinearse con el plan minero, optimizando equipos y procesos para la consecución del plan minero.

Por otro lado, dada la incertidumbre existente en las distintas fases de un proyecto minero, se utilizan distintos horizontes temporales de planificación dependiendo del grado de incertidumbre. Estos son los siguientes:

- Planificación de largo plazo: involucra los aspectos más generales, como envolvente económica, el método de explotación a utilizar, ritmo de explotación, secuencia de explotación y leyes de corte, todo incorporado para lograr el máximo beneficio económico.
- Planificación de mediano plazo: define planes de producción que permitan conducir la operación a las metas de producción definidas.
- Planificación de corto plazo: genera indicadores basados en la operación de modo de corregir los modelos que sustentan la planificación, esto último sirve como retroalimentación para la planificación de largo plazo.

Todo lo anterior se fusiona para obtener un programa de producción, el cual define qué parte del cuerpo mineralizado se va a extraer, el instante de tiempo en el que se hará y las tasas de producción para un determinado período de tiempo y su duración. En él también se cuantifican los recursos humanos y materiales a utilizar en las distintas etapas, procurando cubrir las necesidades demandadas sin sobrepasar la capacidad productiva y recursos disponibles.

2.3 Sistemas de control producción

Los sistemas de control de producción son utilizados para cualquier proceso productivo de cualquier industria, ya sea minera, manufacturera, materias primas, entre otras. Para cualquiera de los casos, si bien el producto es completamente distinto, el objetivo final es el mismo, maximizar la producción con la correcta utilización del tiempo y recursos humanos y físicos.

Un sistema de control de producción se encarga de la coordinación de las actividades programadas, y por lo tanto del cumplimiento del plan de producción. El número de incidencias que pueden afectar a la producción puede ser elevado, y tomar la decisión adecuada para retornar el sistema a condiciones estables, es una labor que exige, cuando menos, experiencia.

La finalidad del control de producción es controlar y gestionar el flujo de materiales, realización de planes y cálculo del programa de producción, teniendo un permanente control y seguimiento de la operación de la manera más económica.

Los pasos involucrados en un proceso de control producción son los siguientes:

1. Órdenes de producción.
2. Reportes de trabajo.
3. Comparación de lo programado (P) con lo realizado (R).

4. Análisis de casos:

- i. $P = R$, caso de cumplimiento.
- ii. $P < R$, se deben identificar causas.
- iii. $P > R$, se deben identificar las causas y proponer acciones correctivas.

5. Registro de materias primas y/o insumos.

Las ventajas de llevar un control de la producción son diversas: se logra una organización en la producción, se controla el consumo de materias primas, se controla el tiempo trabajado por operario y se verifican las cantidades producidas.

En la minería, tanto mediana como gran minería, existen sistemas de control producción, algunos más sofisticados que otros pero todos cumplen el mismo objetivo de control y de proveer una funcionalidad de planificación. Se realizan mediante la ayuda de softwares con gran capacidad de almacenamiento y manejo de información, algunas veces del tipo ERP (*Enterprise Resource Planning*) proporcionados por varias empresas existentes en el mercado para diversos ámbitos de la industria, como también existen empresas que proveen soluciones especializadas en el control de la producción en la minería, llevando un control a tiempo real, ayudando a la gestión de la operación y a la planificación, integrando desde la administración de riesgos hasta el control de ley, generando informes y estadísticas en cada proceso, entre otras aplicaciones dependiendo de los requerimientos del cliente.

2.4 Ajustes a planificación de mediano y corto plazo

El programa de producción es fundamental para el funcionamiento de una operación minera, pues tiene efectos sobre la economía de la operación como también puede afectar la vida de la mina, es por esto que su construcción se ha vuelto cada vez más sofisticada, pasando de su formulación mediante métodos manuales, a métodos matemáticos de mayor complejidad como la investigación operativa.

La investigación operativa es una rama de las matemáticas que consiste en el uso de métodos matemáticos, estadísticas y algoritmos con el fin de llevar a cabo un proceso de toma de decisiones, en que se quiere optimizar un objetivo tomando en cuenta la escasez de recursos, como también la necesidad de minimizar costos sin afectar la productividad del sistema. Estas herramientas se aplican en diversas disciplinas, como en lo militar, económico, de infraestructura, logística, etc., y también en minería.

Para la utilización de estos métodos, lo principal es la formulación de la función objetivo y la correcta elección de las restricciones.

Estas herramientas han sido utilizadas como ayuda para la planificación en minería subterránea, en particular para el método de explotación por Block Caving, método para el cual se

pueden distinguir las siguientes restricciones operacionales para la construcción del plan de producción (Rubio *et al*, 2000):

- Tasa de incorporación de área: determina el máximo número de puntos de extracción a abrir en un determinado período de tiempo determinado. Se basa en la geometría, geomecánica e infraestructura de la mina.
- Secuencia de construcción de puntos de extracción: corresponde al orden en que se abren los puntos de extracción.
- Máxima área abierta: restricción por el tamaño del cuerpo mineralizado, infraestructura y equipos disponibles, pues con muchos puntos activos, se puede exceder la distancia de transporte y capacidad de equipos.
- Tasa de extracción: controlará el flujo de marina en el punto de extracción. Es función de la fragmentación y del modelo de hundibilidad. Definirá la capacidad del punto de extracción, y debe ser lo suficientemente rápida para evitar compactación, pero no al extremo para evitar gap de aire.
- Razón de extracción: define una relación temporal de tonelaje entre un punto y sus vecinos. Se cree que este parámetro podría controlar la entrada de dilución al punto de extracción y el daño del nivel de producción debido a stress inducido.
- Limitaciones de tiempo: obligan al sistema a tener la producción deseada manteniendo flexibilidad para posibles variaciones operacionales.

La forma de integrar todo lo anterior en un problema matemático, es mediante una optimización cuya función objetivo es la minimización de la diferencia entre dos superficies utilizando programación cuadrática. La primera aplicación para minimizar la diferencia entre el actual perfil de extracción y el deseado, fue desarrollado por Rahal, 2003. Sin embargo este modelo lineal tenía la desventaja de que la mínima desviación se podría lograr teniendo una gran desviación al principio del programa, y una pequeña al final, obteniendo como resultado una desviación igual a cero.

Luego, el algoritmo propuesto por Rubio (2004) es la minimización del cuadrado de la desviación, de esta forma, minimizar cualquier desviación tiene el mismo valor para la función objetivo, independiente si se encuentra al principio o al final.

La función objetivo que se plantea es la siguiente:

$$\min \left\{ \sum_{t=1}^T a_t * \sum_{i=1}^I \{d_{it} - d_t\}^2 \right\}$$

En que,

a_t : Número de puntos de extracción activos en un período t.

d_t : Promedio de tonelaje extraído en un período “t” de los puntos activos.

d_{it} : Tonelaje a ser extraído de cierto punto de extracción i en el período t . Esta es la variable principal del proceso de optimización, el que finalmente conduce al programa de producción.

Las restricciones a este problema son las siguientes:

- Tasa de explotación:
 $v_t \leq New_t, \quad \forall t = 1 \dots T$, corresponde a un número entero.

- Tonelaje esperado:

$$\sum_{i=1}^I d_{it} \leq TTU_t \quad y \quad \sum_{i=1}^I d_{it} \geq TTL_t \quad \forall t = 1 \dots T$$

En que TTU y TTL son la máxima y mínima tasa de producción en el período t , respectivamente.

- Tasa de extracción:
 $d_{it} \leq TU_{it} * a_{it} \quad y \quad d_{it} \geq TL_{it} * a_{it} \quad \forall t = 1 \dots I \quad y \quad t = 1 \dots T$

En que TU y TL son la máxima y mínima tasa de extracción por punto de extracción por período, respectivamente.

Lo anterior puede ser aplicado en otros casos, como por ejemplo para el caso en estudio en que los puntos de extracción pasarían a ser las frentes de explotación.

Un aspecto importante a considerar para generar la carta de tiraje, es la prioridad que se le da a los distintos frentes de explotación, o a los puntos de extracción en el caso del block caving, los cuales están categorizados según grupos de prioridad mayor a menor (Samoir *et al*, 2004), basándose en parámetros como humedad, estabilidad geotécnica, puntos por debajo del plan, entre otros, lo cual en este caso es análogo para galerías tanto de exploración como de producción, en que la geología, la estabilidad geotécnica, la presencia de aguas y ubicación estratégica, junto con las leyes estimadas, son parámetros fundamentales para la construcción del plan de producción y el secuenciamiento de la producción.

2.5 Herramientas de programación

El proceso de generación de planes de producción se realizará en base a una etapa de optimización y una segunda etapa de secuenciamiento, en las que se hace uso de herramientas de programación lineal, en la primera, y programación no lineal en la segunda.

La programación lineal corresponde a un conjunto de herramientas matemáticas que se conjugan para resolver el problema de optimización (maximizar o minimizar) una función objetivo (lineal, de varias variables) sujeta a una serie de restricciones lineales de desigualdad. Por

su parte, la programación no lineal es el proceso de resolución de un sistema de igualdades y desigualdades sujetas a un conjunto de restricciones sobre un conjunto de variables reales desconocidas, con una función objetivo a minimizar o maximizar, cuando alguna de las restricciones o la función objetivo son no lineales. Una forma de resolver un problema de programación cuadrática es utilizando la condición de Karush - Kuhn – Tucker (KKT), extensión del Teorema de Lagrange, que consiste en la aplicación de condiciones necesarias y suficientes para que la solución de una programación no lineal sea óptima. El problema se transforma en la resolución de una matriz cuyo resultado será la obtención de los multiplicadores de Lagrange.

Condición necesaria de Karush - Kuhn – Tucker (Ortiz et al, 2000):

Suponiendo el problema (P), cuya función a minimizar es $f: \mathbb{R}^n \rightarrow \mathbb{R}$, y las restricciones de desigualdad $g_i: \mathbb{R}^n \rightarrow \mathbb{R}$ y de igualdad $h_j: \mathbb{R}^n \rightarrow \mathbb{R}$.

Sea \bar{x} un mínimo local de (P) tal que se cumple la condición de regularidad en \bar{x} . Entonces, existen escalares $\lambda \geq 0$, $\mu_1 \geq 0, \dots, \mu_m \geq 0, v_1 \geq 0, \dots, v_l \geq 0$, denominados “multiplicadores de Lagrange”, tales que:

$$\lambda + \sum_{i=1}^m \mu_i + \sum_{j=1}^l |v_j| > 0,$$

$$\lambda \nabla f(\bar{x}) + \sum_{i=1}^m \mu_i \nabla g_i(\bar{x}) + \sum_{j=1}^l v_j \nabla h_j(\bar{x}) = 0$$

$$\mu_i g_i(\bar{x}) = 0 \quad i = 1, \dots, m.$$

Condición suficiente de Karush - Kuhn – Tucker (Ortiz et al, 2000):

Sea el problema (P) diferenciable tal que $f(x)$ es convexa y $g_i(x)$ es convexa, $i = 1, \dots, m$, y sea \bar{x} una solución factible para (P). Si \bar{x} satisface las condiciones de KKT, entonces \bar{x} es un mínimo global de (P).

2.6 Antecedentes generales de la composición y geología de las esmeraldas

2.6.1 Composición química.

Como ya se mencionó, la esmeralda pertenece a la familia del Berilo ($\text{Be}_3\text{Al}_2(\text{SiO}_3)_6$), que químicamente puro es incoloro, lo que le da el particular color verde que lo convierte en una gema tan valiosa es la sustitución de los átomos de Al por pequeñas (normalmente inferiores a 1% de peso) mezclas de Cr^{3+} o V^{3+} (Gavrilenko, 2003).

El berilio es un elemento escaso en la corteza terrestre, encontrándose en concentraciones de 2.8 ppm en la corteza terrestre, 0.5 ppm en basaltos, 2 ppm en granodioritas, 5 ppm en granitos,

3 ppm en lutitas, 1 ppm en calizas y 6 ppm en suelos⁴, las mayores concentraciones se encuentran en rocas magmáticas ácidas acumulándose este elemento en las fases magmáticas tardías - pegmatíticas graníticas (Gavrilenko, 2003). Estas rocas constituyen el principal tipo de yacimiento, que a veces puede llegar a formar cristales muy grandes y concentraciones económicamente importantes. Para que exista formación de esmeraldas, se necesita además, la presencia de Cromo, por lo que además de los elementos comunes como Silicio, Aluminio y Oxígeno, la formación requiere de la presencia de dos elementos (Berilio y Cromo) que están asociados a litologías distintas, lo cual explica la rareza de formación de esmeraldas en la naturaleza.

El berilo es un mineral que ocurre en cavidades y drusas, en granitos y granitos pegmatíticos. En cuanto a la paragénesis, Deer (1992) dice que como minerales asociados se pueden presentar: cuarzo, feldespato, muscovita, lepidolita, topacio, turmalina, espodumeno, casiterita, columbita y tantalita. La presencia de berilo en las pegmatitas de granito se relaciona con el tamaño del ion Be, que es demasiado pequeño como para sustituir la mayoría de las estructuras de los silicatos, y por esta razón se concentra en los fluidos magmáticos residuales. Las esmeraldas, en comparación con las aguamarinas, son casi restringidas a una paragénesis metamórfica, por lo general en esquistos de biotita, aunque la principal fuente moderna de esmeraldas en las minas de Muzo, Colombia, se presenta en venas de calcita bituminosa⁵.

2.6.2 Formación y paragénesis.

La mayoría de los depósitos de esmeraldas del mundo, típicos de berilo, son depósitos pegmatíticos o hidrotermales, estos últimos encajados en rocas metamórficas. Los yacimientos de Colombia, tienen la particularidad de estar encajados en rocas sedimentarias, de ahí viene su diferenciación con el resto. Por ejemplo, en África del Sur (Zambia, Tanzania, Rhodesia), se presentan en diques pegmatíticos o venas hidrotermales encajados en rocas metamórficas que varían en su textura y composición mineralógica, así como también en lentes y capas de biotita dentro de esquistos y gneises. En Europa (Salzburgo, Austria) también se han encontrado depósitos de esmeraldas, pero de baja calidad y escasa importancia dentro de venas en esquistos micáceos. Los depósitos de Brasil (también reconocidos mundialmente), se encuentran en venas de matriz carbonática dentro de esquistos micáceos, y otros consisten en berilos de generaciones múltiples y asociaciones variadas, relacionadas a varios pulsos de mineralización. Donde también se han encontrado esmeraldas de buena calidad es en Rusia, las cuales se alojan en venas hidrotermales encajadas en rocas metamórficas de los Urales, en Transbaikalia. (Fuente: Recursos Minerales de Colombia, INGEOMINAS)

Durante años el modelo de esmeraldas ha sido basado en roca pegmatítica con berilio interactuando con rocas máficas y ultramáficas, con cierto contenido de cromo. Pero la falta de

⁴ FIELD GEOLOGISTS' MANUAL (p. 54)

⁵ INGEOMINAS, 1987. Recursos minerales de Colombia, Segunda Edición. Tomo II, Minerales preciosos, Rocas y minerales no metálicos, Recursos energéticos.

actividad pegmatítica o granítica en los sectores productores de esmeralda de Colombia, dio pie a la formulación de la hipótesis de que la formación de esmeraldas puede estar asociada a una mayor variedad de ambientes geológicos de los que se pensaba. La mayoría de los depósitos de esmeraldas del mundo, a excepción de las de Colombia y Noruega, pueden ser agrupadas en dos categorías: los alojados en zonas de sutura recientes, y los alojados en zonas de sutura muy antiguas, que fueron desapareciendo con el tiempo transformándose en esquistos de clorita, piedras verdes, y otras rocas huésped. Desde entonces, se han presentado un gran número de sistemas de clasificación (Walton, 2004):

- Pegmatitas sin esquistos: los cristales de esmeralda están hospedados en granitos, y cavidades sin granito. Ejemplo: Nigeria
- Pegmatitas con esquistos de flogopita (mica perteneciente a filosilicatos). Ejemplo: Brasil, Mozambique
- Esquistos con ausencia de pegmatitas. Ejemplo: Austria
- Lutitas negras con venillas y brechas. Ejemplo: Colombia

Por otro lado, el modelo más actual, y aceptado, es el que distingue seis tipos, que incorpora, a diferencia del resto, la temporalidad entre intrusiones pegmatíticas y mineralización esmeraldífera (Sabot, 2002).

1. Yacimientos tipo I: Pegmatitas sin bandas metasomáticas con cristales de esmeralda dentro de las mismas venas pegmatíticas. Ejemplos: Kaduna, Nigeria; Emmaville, Australia; Eidsvoll, Noruega.
2. Yacimientos tipo II: Pegmatitas sincrónicas a la mineralización, con el desarrollo de bandas metasomáticas que contienen turmalina. Ejemplos: Carnaiba, Brasil; Kamakanga, Zambia.
3. Yacimientos tipo III: Pegmatitas sincrónicas a la mineralización, con el desarrollo de bandas metasomáticas sin turmalina. Ejemplo: Ambodibonary, Madagascar.
4. Yacimientos tipo IV: no contienen venas pegmatíticas sincrónicas a la mineralización, pero sí bandas metasomáticas con esmeraldas. Ejemplo: Ianapera, Madagascar; Cheremshanskoye, Rusia; Poona, Australia.
5. Yacimientos tipo V: no tiene relación con pegmatitas y la roca encajante está representada por rocas carbonatadas sin asociaciones de albita y pirita. Ejemplo: Swat, Pakistán.
6. Yacimientos tipo VI: no tiene relación con pegmatitas, la roca encajante está representada por rocas carbonatadas en asociación de albita y pirita y evidencias de lixiviación evaporítica en rocas encajantes. Ejemplo: Colombia.

Para el caso particular de las minas de Muzo, se tiene el siguiente modelo de paragénesis mineralógica de las principales venas mineralizadas.

Tabla 2: Paragénesis mineralógica de las venas principales mineralizadas en la Mina de Muzo. Según Hall (1973, 1978) y Hall et al (1976, 1978).

Orden de mineralización	Asociaciones de Minerales Precipitados	Lugares de Precipitación	Tipos de Solución
G-I: primera generación de soluciones	Cuarzo + albíta (en poca cantidad)	Paredes arcillosas de las venas.	
G-II: Segunda generación de soluciones	Calcita blanca + pirita escasa	Mayoría de las fracturas	Solución rica en carbonatos, mas afín con calcita de origen hidrotermal ("neumatolítico") que con calcita de origen sedimentario, metamórfico o carbonatítico.
G-III: Tercera generación de soluciones. Varios eventos aparentemente simultáneos de mineralización: a, b y c.	a: Esmeralda + minerales silíceos (cuarzo + albíta + ortoclasa + muscovita + turmalina) + apatito + rutilo + pirita + minerales raros (helvita + fergusonita + fenacita + bavenita + bastnacita) + carbón + albíta en estructura trapiche	Fracturas, espacios intersticiales y venillas de disolución de calcita.	Solución de base Si-Al, con cationes de transición trivalentes (V, Cr, Fe), pocos cationes alcalinos univalentes (K, Na) y escasísimos elementos alcalinos divalentes, con la notable excepción de Be. Carece completamente de elementos raros (La, Y, Nb, Mo). Material carbonoso derivado de arcillolita encajante.
	b: Carbonatos de tierras raras (parisita + codazzita) + dolomita gris + pirita.	Fracturas, espacios intersticiales y venillas de disolución de calcita.	Solución de base carbonática rica en Ca, Mg y tierras raras (Ce, La, F, Y) y carentes de Si, Al, Be, elementos alcalinos univalentes y elementos de transición trivalentes. Requiere una fuente externa de elementos.
	c: Fluorita	Fracturas, espacios intersticiales y venillas de disolución de calcita.	Solución de naturaleza semejante tal vez la misma, que la de G-III-a; cristalizó tardíamente con respecto a G-III-b. El enriquecimiento en Y y F permite suponer esto.
G-IV: Cuarta generación de soluciones	Barita + calcita (en cantidades menores)	En vacíos y fracturas prevaecientes de las fracturas.	

3 BASE DE DATOS CONTROL PRODUCCIÓN MINA, MUZO

La base de datos contiene información proveniente directamente de la mina, pues diariamente se preparan 3 documentos basados en la operación de la misma, estos son:

- Reporte de producción: en él se encuentra el resumen de producción del día, en que se incluye información detallada sobre la producción de posible material esmeraldífero (N° tulas⁶, N° aproximado de kilates y tipo), el número de carros, los metros de avance medidos, la descripción cualitativa de la geología y la geotecnia, y el tipo de labor que se está haciendo, todo esto para cada frente, de cada nivel, y la mina que corresponde.

También se incluye información de insumos y personal que fueron necesarios para la operación de ese día, y planos esquemáticos del estado de la mina y geología de las frentes. La información del reporte de producción es la que se ingresa directamente a la base de datos.

- Reporte de incidentes: documento que presenta un resumen del estado de cada mina, luego un detalle de los incidentes que ocurrieron. Se lleva un seguimiento de los incidentes, con su prioridad, y día a día se actualiza el estado (en proceso ó solucionado).
- Carta de producción del día siguiente: se detallan los frentes a producir al día siguiente, con los correspondientes carros y metros de avance a realizar por frente, y la actividad a realizar (preparación minera, desarrollo, producción de avance, etc.), junto con la geología y geotecnia esperada. Todo esto acorde al plan de producción.

3.1 Componentes base de datos control Producción Mina.

Los contenidos de la base de datos corresponden a todo lo relacionado con la operación de la mina, en que se tiene el detalle día a día, de la extracción de carros, avance en metros, producción de material esmeraldífero, características geológicas y de geotecnia observadas en la frente, y la actividad que se realiza. Toda esta información se encuentra detallada para cada frente, de cada nivel de cada una de las minas. Esta base de datos se actualiza diariamente.

Cada uno de estos ítems contenidos en la base de datos se define a continuación:

- Fecha: en formato dd/mm/aa.
- Mina: mina a la que corresponde la información, en que para cada una se utiliza una abreviación (TQ-Tequendama, PA-Puerto Arturo, VV-Volveré, CA-Catedral)
- Nivel: nivel de la mina. Es importante que la nomenclatura que se utilice para referirse a cada nivel sea consistente a través del tiempo para evitar confusiones.

⁶ Bolsas de seguridad donde se almacenan las esmeraldas extraídas.

- Frente: ID de la frente. Es importante que la nomenclatura que se utilice para referirse a cada frente sea consistente a través del tiempo para evitar confusiones.
- Producción: producción de material esmeraldífero, separando número de tulas, clasificación del material, y peso estimado en kilates por categoría (chispero, morralla, muestras).
- Carros: número de carros extraídos en la frente
- Avance: metros de avance. Corresponden a los metros de avance medidos al final del día.
- Geología: categoría geológica asignada a la frente en cuestión (ver tabla N°10)
- Geotecnia: categoría del tipo de roca asignado a la frente en cuestión (ver tabla N°11)
- Tipo: tipo de labor, ya sea galería, pique, buzón, etc.
- Actividad: tipo de actividad, ya sea preparación, producción, mantención, etc.

El material esmeraldífero obtenido de lavado, es decir, no directamente desde una frente, se ingresa a la base de datos por separado.

La geofísica y geoquímica proporcionan parte importante de la información, no entran en la base de datos propiamente tal, pero ayudan a identificar las zonas de contacto entre litologías y zonas con potencial aparición de esmeraldas. Por lo cual contribuyen como base de la planificación.

Gracias a esta base de datos es posible obtener estadísticas de producción, que serán la información de entrada al sistema de control producción.

En el siguiente capítulo se presenta detalladamente en qué consiste cada uno de los ítems nombrados anteriormente, y de qué forma aporta a la base de datos y al sistema de control producción.

4 ANTECEDENTES GENERALES Y PRODUCTIVOS MINA MUZO

A continuación se describen todos los antecedentes productivos de la mina durante el año 2010. Además de detallar la geología de la mina, el levantamiento geológico realizado durante el período, detalle de los estudios geofísico y geoquímico en distintas zonas de la mina, como también detalle de costos asociados a la operación. Todos estos pasan a ser parte del sistema de control producción mina diseñado.

4.1 Método de explotación

La mina de esmeraldas de muzo, comprende 4 principales sectores en operación, Tequendama, Puerto Arturo, Catedral y Volveré, todos ellos operados por la misma compañía. En el año 2010 se realizaron una serie de labores de exploración y explotación.

La explotación de la mina se realiza artesanalmente de manera subterránea, selectivamente siguiendo la veta mineralizada. El fracturamiento de la roca se realiza mediante martillos picadores con los cuales se avanza en las distintas frentes. Posterior a esto el manejo de minerales consiste en el llenado de carros de acero de tracción manual, lo cuales tienen capacidad para aproximadamente 350 kilos⁷ de mineral, estos son llevados a superficie mediante malacates⁸, cuya profundidad alcanza hasta los 120 metros, en el caso del malacate de Puerto Arturo. Ya en superficie el contenido de los carros es directamente acopiado para ser ingresados a la planta de lavado en el caso de los carros provenientes de Puerto Arturo, o transportado mediante camiones carreteros hacia la planta en el caso de los carros provenientes del resto de los sectores de la mina.



Figura 12: avance con martillo en la frente.



Figura 13: Malacate Tequendama.

La planta de lavado consiste en primera instancia en un trommel scrubber⁹, en el cual se separa el material. Los finos son eliminados y los gruesos son depositados sobre una correa

⁷ Para efectos de cálculo se utiliza que cada carro tiene capacidad para 354 kilos.

⁸ Plataforma+jaula levantada mediante un torno a lo largo de un pique de acceso, a modo de skip.

⁹ Cilindro de detección utilizado para separar los materiales por tamaño.

transportadora de un metro de ancho, a lo largo de la cual se realiza una selección manual del material esmeraldífero, de alrededor de 5 personas a lo largo del recorrido de la correa. Este sistema espera ser reemplazado por una máquina de selección óptica por color, lo que automatizará el sistema haciéndolo más rápido y eficiente, además de idealmente disminuir la cantidad de esmeraldas robadas ya que todo el material será pasado directamente a la planta.

El material esmeraldífero proviene de la planta de lavado o directamente del picado de frentes. Este material se saca tanto de la mina como de la planta en bolsas de seguridad, las cuales posteriormente son vaciadas y almacenadas por parte de personal autorizado y autoridades de la mina para posteriormente ser enviadas a pesar y analizar a CTT (Colombiano Texas Transformadora) desde donde posteriormente se recibe un reporte de la producción, el cual se utiliza para realizar la reconciliación.

La ventilación se realiza mediante mangas ingresadas por el pique principal, que llevan aire a las frentes en operación. La fortificación por su parte se lleva a cabo con la construcción de puertas¹⁰ de madera equiespaciadas cada 1,5 metros, además de la instalación de tablas de madera de manera de recubrir los túneles, procedimiento al que se le llama tamboreo.

El ritmo de explotación alcanza un promedio de 50 tpd y 3.2 metros por día para el año 2010.

A continuación se puede ver un layout general de la mina, en que se identifica cada uno de los sectores hasta ahora explorados, estando en explotación los mencionados anteriormente.

¹⁰ Marcos.

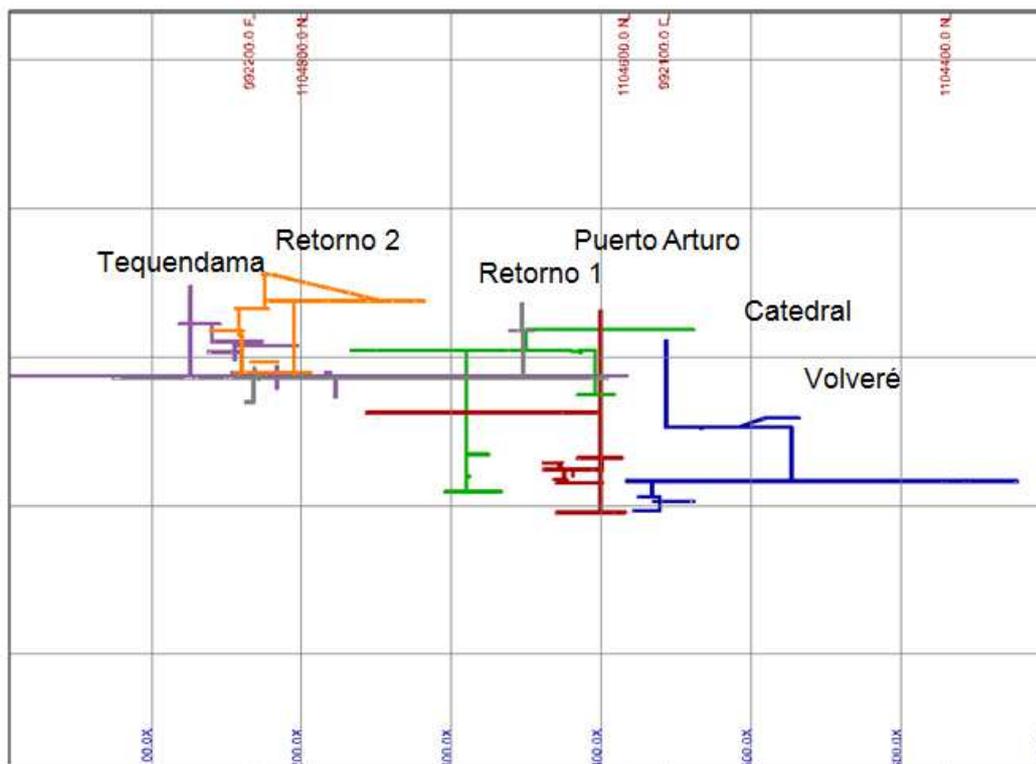


Figura 14: Layout General de la Mina

Tequendama corresponde a la mina más grande del proyecto, con alrededor de 2.5 kms de desarrollo en galerías y 250 metros en infraestructura vertical. Durante el año 2010 ha sido el sector con mejores resultados productivos. Se ha observado que tanto en este sector como en otras minas, la presencia de esmeraldas está directamente relacionada con la presencia de morralla y en algunos casos con brechas con vetas de calcita, pirita diseminada y caolín.

Puerto Arturo tiene un desarrollo de galerías de aproximadamente 700 metros, y 150 metros de infraestructura vertical, las características de los sectores con presencia de esmeraldas son similares a las descritas para Tequendama.

Retorno 1 y Retorno 2 no están actualmente en actividad, respectivamente cuentan con 1,176 y 476 metros de galería construidas, y 83 y 215 metros de desarrollo vertical. De Retorno 1 existen registros de buena producción de esmeraldas, y se sabe de la existencia de posibles reservas de esmeraldas importantes en Retorno 2.

Catedral y Volveré tienen una cantidad importante de infraestructura construida, aproximadamente 1.15 y 1.75 kms de desarrollo horizontal, y 140 y 240 metros verticales, respectivamente.

4.2 Resultados operacionales año 2010

A continuación se muestran los resultados operacionales de la mina, correspondiente a la extracción de mineral, metros de avance, y producción de esmeraldas de la mina de Muzo, de Enero a Diciembre de 2010, por mina.

- Tequendama

Tabla 3: Indicadores de Producción – Tequendama

Indicadores Operacionales	Cantidad	Unidad
Extracción total	8,289	[ton]
Extracción promedio	691	[ton/mes]
TPD	23.0	[tpd]
Avance total	605.1	[mts]
Avace promedio	50.4	[mts/mes]

En los gráficos se puede observar la extracción de carros para cada una de las minas, mensualmente.

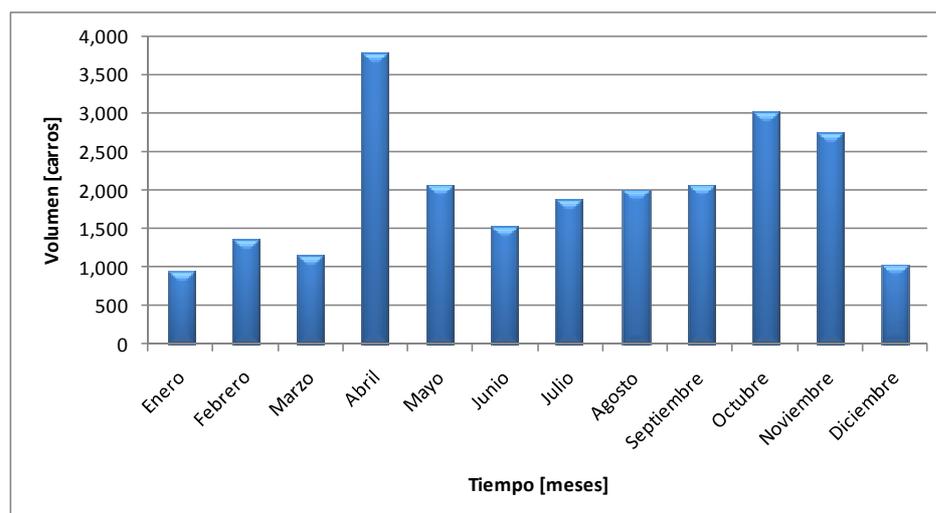


Figura 15: Extracción Tequendama

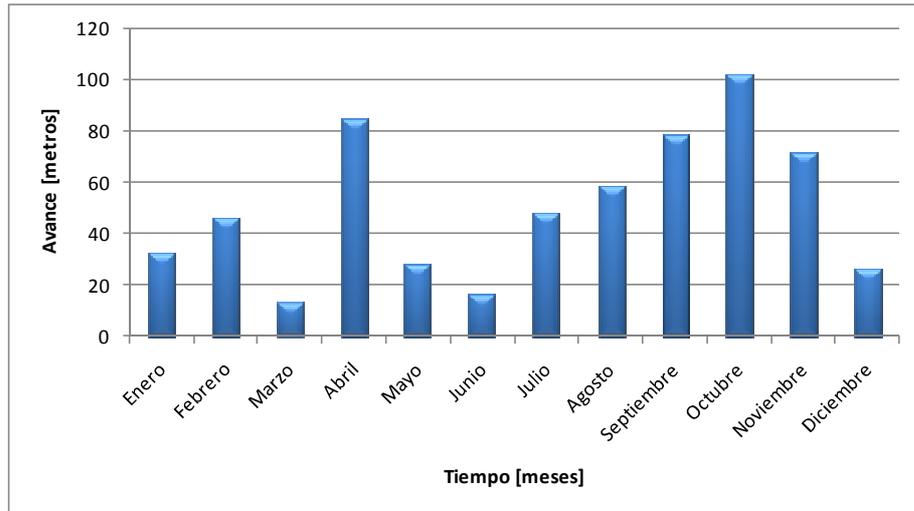


Figura 16: Avance Tequendama

- Puerto Arturo

Tabla 4: Indicadores de Producción - Puerto Arturo

Indicadores Operacionales	Cantidad	Unidad
Extracción total	6,572	[ton]
Extracción promedio	548	[ton/mes]
TPD	18.3	[tpd]
Avance total	335.0	[mts]
Avance promedio	27.9	[mts/mes]

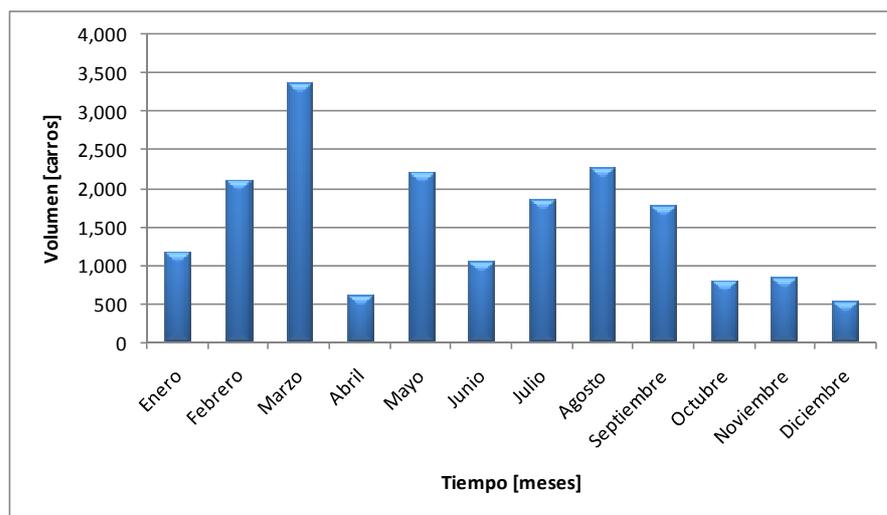


Figura 17: Extracción Puerto Arturo

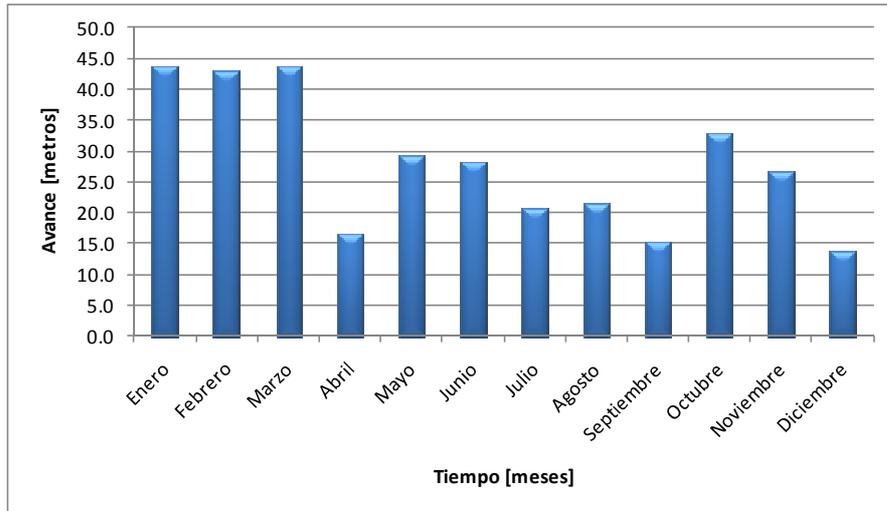


Figura 18: Avance Puerto Arturo

- Catedral

Tabla 5: Indicadores de Producción – Catedral

Indicadores Operacionales	Cantidad	Unidad
Extracción total	1,549	[ton]
Extracción promedio	129	[ton/mes]
TPD	4.3	[tpd]
Avance total	127.1	[mts]
Avace promedio	10.6	[mts/mes]

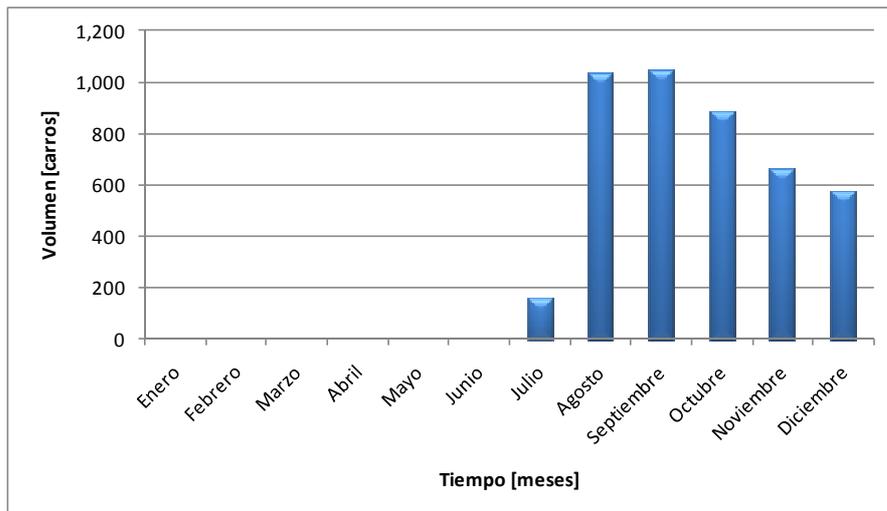


Figura 19: Extracción Catedral

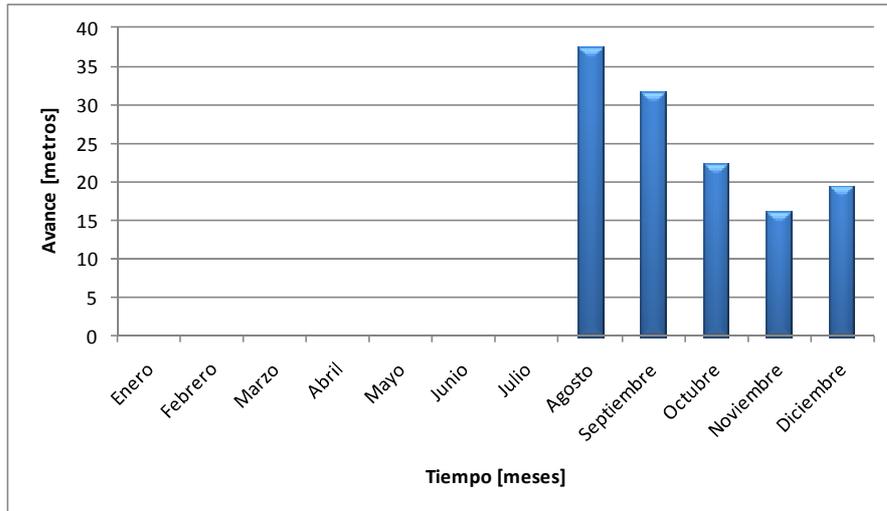


Figura 20: Avance Catedral

- Volveré

Tabla 6: Indicadores de Producción – Volveré

Indicadores Operacionales	Cantidad	Unidad
Extracción total	1,348	[ton]
Extracción promedio	112	[ton/mes]
TPD	3.7	[tpd]
Avance total	99.6	[mts]
Avace promedio	8.3	[mts/mes]

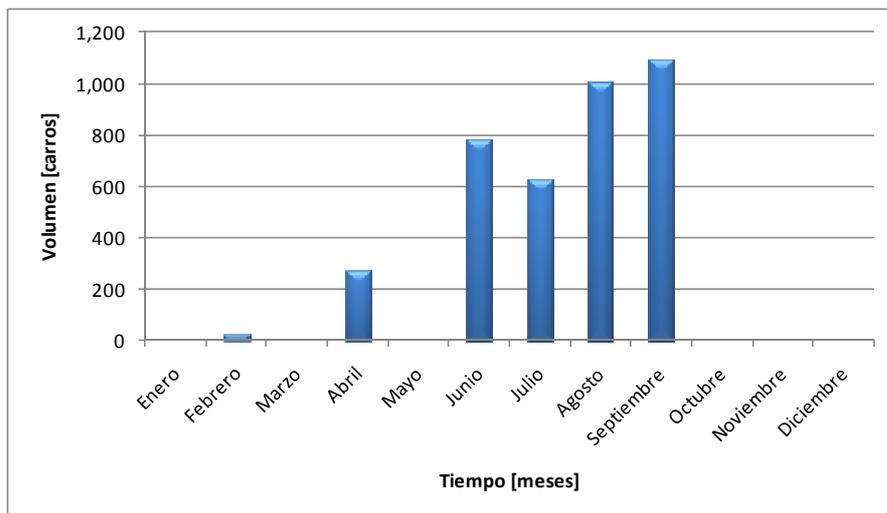


Figura 21: Extracción Volveré

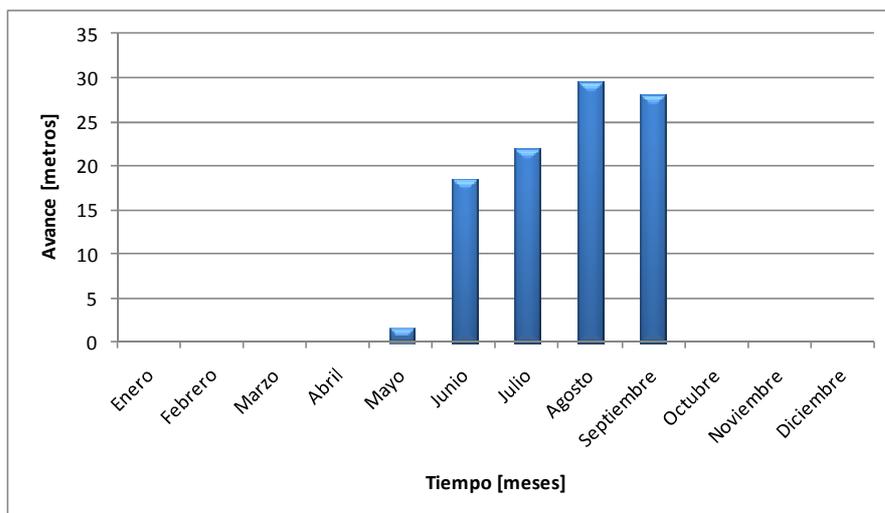


Figura 22: Avance Volveré

Se ve claramente de los gráficos anteriores que los sectores Tequendama y Puerto Arturo han sido los más explotados durante el año 2010, Volveré y Catedral comienzan a tomar importancia recién al mes de Julio en que se comienza a hacer exploraciones en diversos sectores en la búsqueda de nuevos sectores ricos en material esmeraldífero, siendo en este momento Tequendama donde se puede decir que hay más potencial en el corto plazo.

Como resumen de toda la mina se presenta lo siguiente:

Tabla 7: Indicadores de Producción – Mina

Indicadores Operacionales	Cantidad	Unidad
Extracción total	17,758	[ton]
Extracción promedio	1,480	[ton/mes]
TPD	49.3	[tpd]
Avance total	1166.7	[mts]
Avance promedio	97.2	[mts/mes]

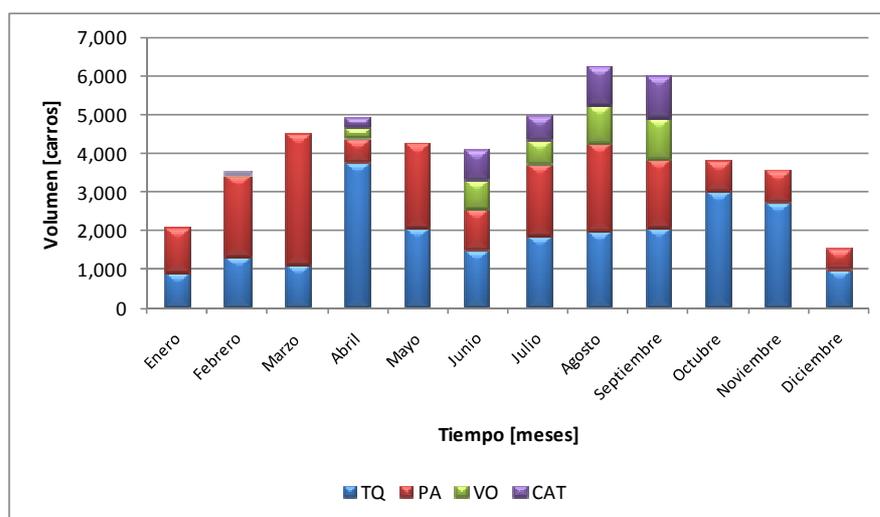


Figura 23: Extracción Mina

En la figura a continuación se muestra el avance en metros aportado por cada mina mensualmente, además de la producción de kilates (1 kilate = 0.2 gr). No se ve una correlación entre los metros de avance y la producción de kilates, esto se debe a que se han realizado muchas labores de exploración en búsqueda de contactos mineralizados, sin obtener producción de estas labores. Esto es una prueba de la necesidad de tener un buen conocimiento del cuerpo mineralizado de modo de extraer mineral de sectores efectivamente ricos en material esmeraldífero. Se esperaría que luego de la aplicación del sistema exista una correlación y que la producción de kilates sea proporcional a la actividad de la mina.

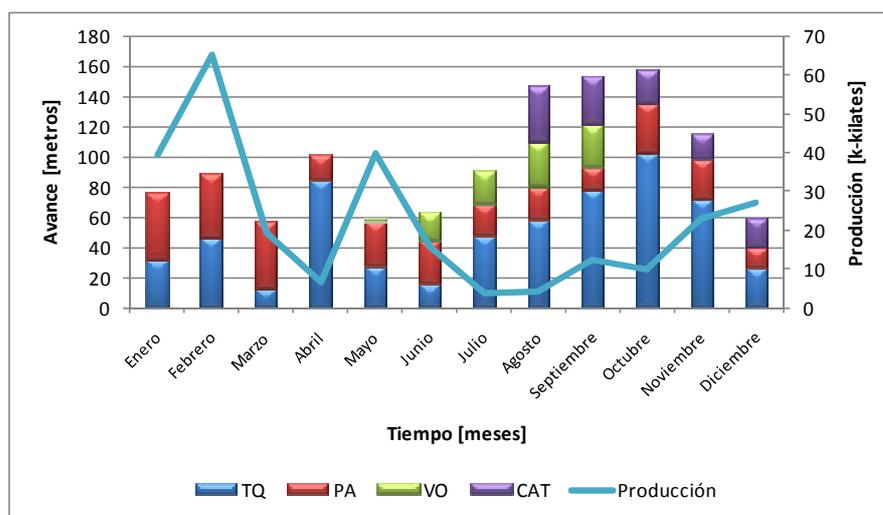


Figura 24: Avance total Mina – Producción kilates

A continuación se muestra la participación de cada mina en la producción de esmeraldas entre los meses Enero y Diciembre del 2010, y también la clasificación de ese material.

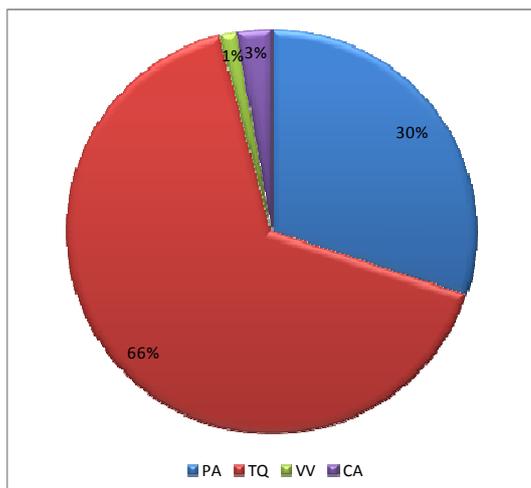


Figura 25: Origen material esmeraldífero extraído

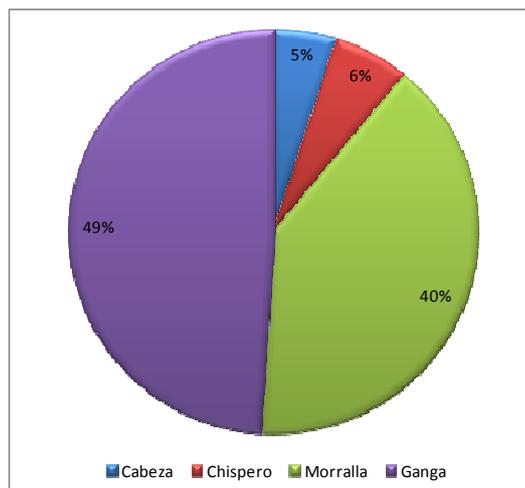


Figura 26: Clasificación material esmeraldífero extraído

Se ve claramente el protagonismo de Tequendama y Puerto Arturo en la producción de esmeraldas, hecho que se justifica con lo mencionado anteriormente que Volveré y Catedral comenzaron a incorporarse más significativamente a mediados de año.

4.3 Marco Geológico Mina Muzo

La mina de esmeraldas de Muzo se encuentra en el cinturón occidental esmeraldífero de Colombia, al noroeste de Bogotá.

En esta zona predominan las rocas de la Formación Muzo - de edad Cretácico Inferior -, la cual consiste en capas delgadas de lodolitas calcáreas y micritas con venas de calcita y pirita. También se observan lodolitas albitizadas y zonas de brechas hidrotermales en las zonas mineralizadas (Reyes *et al.*, 2006).

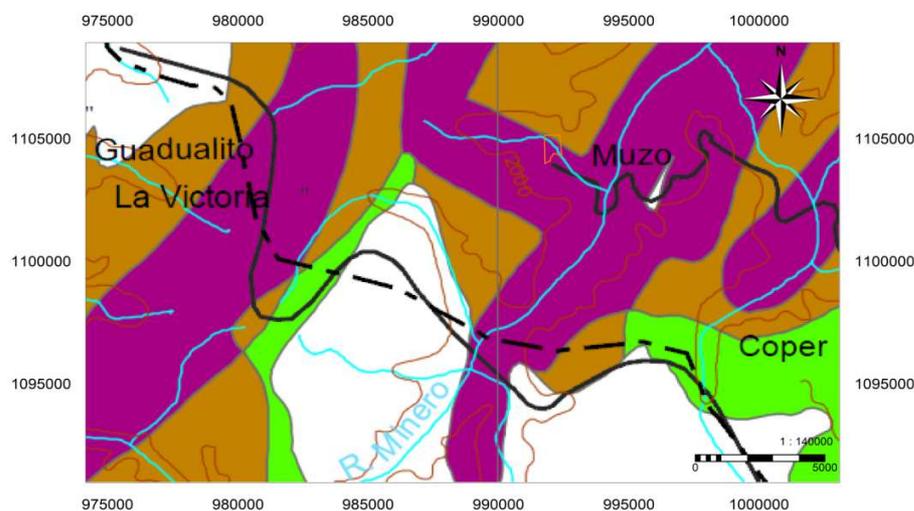
El origen del yacimiento es del tipo sedimentario hidrotermal. Previo al Mioceno Superior esta zona era como una laguna a la cual llegaba mucho sedimento fino y con escaso oxígeno. La estaticidad de estos sedimentos les otorgó la oportunidad de depositarse de manera horizontal, que posteriormente con la formación de la Cordillera Central junto con esfuerzos de la tectónica de placas, estos sedimentos aun no consolidados, sufrieron deformaciones formándose pliegues y fallas en distintas direcciones. La generación de estas zonas de contacto permiten el paso de fluidos hidrotermales ricos en Be y en Si depositándose posteriormente como esmeraldas.

Una teoría de lo mencionado en el párrafo anterior pertenece a Branquet (1996), quien postula que las deformaciones están asociadas a los eventos hidrotermales aumentando los corrimientos, plegamientos y clivaje, definiendo tres eventos de deformación principal presentes en esta zona. Estos son los siguientes:

1. Pliegues con dirección N130E y corrimientos N30E.
2. Pliegues y corrimientos con dirección ESE.

3. Desarrollo de una brecha tectónica hidrotermal roja (cemento de ankerita). También caracterizado por pliegues hectométricos con dirección NW y una falla inversa.

A continuación se muestra un mapa de la potencial presencia de esmeraldas, en el cual se ve claramente que la zona de Muzo tiene un alto potencial esmeraldífero.



Fuente: Ingeominas, 2003. Escala 1:500.000.

Figura 27: Mapa potencial de esmeraldas.

En el mapa se destacan 3 zonas que se definen a continuación:

Alta (■): Áreas con buen nivel de conocimiento, donde se incluyen tres o más indicadores geológicos mineros sustentados; evidenciando características favorables para el hallazgo de depósitos de esmeraldas en venas, producto de fluidos hidrotermales en estrecha relación con aguas connatas y meteóricas, generadas en cuencas sedimentarias asociadas con zonas de fractura y brechamiento.

Media (■): Regiones con nivel medio de conocimiento, incluyen únicamente dos indicadores geológicos minero soportados y evidencian características favorables para el hallazgo de depósitos de esmeraldas.

Baja (■): Regiones con bajo nivel de conocimiento, incluye únicamente un indicador geológico minero sustentados. Establecen regiones o sectores extensos con potencialidad para la prospección de esmeraldas de origen hidrotermal

3.2.1.1 Geología de la mina

El proyecto de esmeraldas Muzo consiste en la explotación de seis minas principales en toda su historia: Tequendama, Retorno 1, Retorno 2, Puerto Arturo, Catedral y Volveré, de las cuales en este momento están siendo explotadas, Tequendama, Puerto Arturo, Catedral y Volveré.

Hernández (2009), clasificó las rocas presentes en el área en 3 grupos generales que permitieran distinguirlos entre sí como unidades mapeables independientes. Estos grupos son:

- **Lutitas:** Roca de caja. Corresponde a rocas sedimentarias laminadas de color gris, que representan a las rocas más consistentes del lugar. Estas rocas se hallan casi siempre inclinadas con respecto a la horizontal y en ocasiones su disposición general, indicada por la laminación primaria, es vertical. Se observa que en la mayoría de los casos, el rumbo de los estratos de lutitas se acerca bastante a uno N-S, con manteos predominantemente al este. En este tipo de rocas se observa escasa presencia de venillas de calcita, las que se ven levemente incrementadas cuando las rocas se encuentran plegadas.
- **Brechas:** Corresponden a lutitas tectónicamente brechizadas, matriz soportadas. La matriz consiste en la misma roca molida, con un tamaño de grano fino a medio. Es común ver clastos angulosos de lutitas carbonosas, inmersas en la matriz, los que muchas veces tienen la apariencia de antracita. Las brechas pueden disgregarse fácilmente con la mano o algún elemento más duro, como un martillo y la mayoría de las veces representan niveles o cuerpos favorables para el desarrollo de venillas de calcita-pirita-albita. Es precisamente en este tipo litológico donde se han encontrado las más prolíficas zonas productivas de esmeraldas.
- **Pseudobrechas:** Corresponden a lutitas con un grado de brechización intermedio entre los dos tipos de rocas descritos anteriormente. Este tipo de clasificación se adoptó, debido a que en las pseudobrechas también se favorece el desarrollo de venillas y vetas de calcita-pirita, pero ellas se presentan como bolsanadas métricas, posiblemente debido a que sólo cuentan con pocos sectores lo suficientemente permeables como para que los fluidos puedan ser conducidos y encajados a través de la roca completa.

De acuerdo a las descripciones anteriores la pirita es un mineral que se encuentra estrechamente asociado a la mineralización de esmeraldas. Hernández (2009) observó pirita en las zonas mineralizadas y también en aquellas brechizadas con presencia de matriz y *stockworks* de carbonatos. Sin embargo, también se observó que la presencia de pirita no es exclusiva en zonas mineralizadas, sino que también puede estar presente en otros sectores que sólo presentan brechización y algún grado de metasomatismo, pero que no necesariamente tienen esmeraldas. Aún así Hernández (2009) considera la pirita como un mineral guía para la exploración de esmeraldas.

4.4 Monitoreo geología y geotecnia

Se ha realizado un estudio geológico de la mina, en base a muestras obtenidas de una serie de sectores en los cuales ha habido o no presencia de material esmeraldífero, con el fin de identificar indicadores geológicos que guíen la explotación. Se ha determinado que existen zonas de contacto entre litologías, donde se presenta el mayor enriquecimiento.

Para mantener un control geológico homogéneo y simple, entre los meses de Junio y Diciembre se utilizó la siguiente escala para caracterizar las frentes, esta clasifica la roca con valores entre 1 y 10. Cada tipo de roca tiene asociada una mineralización, en la que el número 1 corresponde a una mineralización que no está asociada a presencia de esmeraldas, siendo ésta la roca de caja presente en el yacimiento, los valores entre el 2 y el 6 corresponden a características de la roca que se conocen como buenos indicadores (en terreno) de la presencia de esmeraldas, basándose en mineralización y disposición de las distintas especies minerales y finalmente los códigos 7 y 10 indican la presencia de esmeraldas, morralla o chispero dependiendo de la calidad. A continuación se presenta la tabla que muestra la descripción y el código asignado a cada tipo de roca.

Tabla 8: Caracterización geología frentes.

Código	Tipo	Descripción
1	Lutita Lisa	Lutita carbonatada de competencia media que no muestra indicios de tectonismo póstumo. Típicamente conocida en terreno como lisos.
2	Lutita con pliegues	Lutita de menor competencia que muestra indicios de tectonismo póstumo como pliegues y foliación principalmente en la matriz.
3	Calcita en vetillas	Lutita de menor competencia que se quiebra al martillarla, donde existen vetillas de calcita y cuarzo.
4	Pirita en cubos	Lutita frágil, donde existen vetillas rellenas con calcita y pirita en los bordes de las vetillas.
5	Pirita diseminada	Brecha frágil con vetillas en la matriz de lutita y pirita diseminada.
6	Caolín	Igual al código 5 con presencia de caolín o patinas de azufre nativo.
7	Muestras	Muestras de morralla (esmeralda de mediana calidad).
10	Esmeraldas	Aparición de chispero (esmeralda de buena calidad).

Esta clasificación se usa hasta mediados del mes de Diciembre, momento en que se realiza un análisis geológico acabado y se genera una nueva clasificación.

En la Figura 28 se observa la disposición de los estratos mineralizados en la mina, donde se asocia la aparición de esmeraldas a las zonas de stockwork, y algunos contactos litológicos. Este nuevo modelo lleva al replanteamiento del diseño de la infraestructura general de la mina, con el fin de extraer de manera selectiva y eficiente el material de interés.

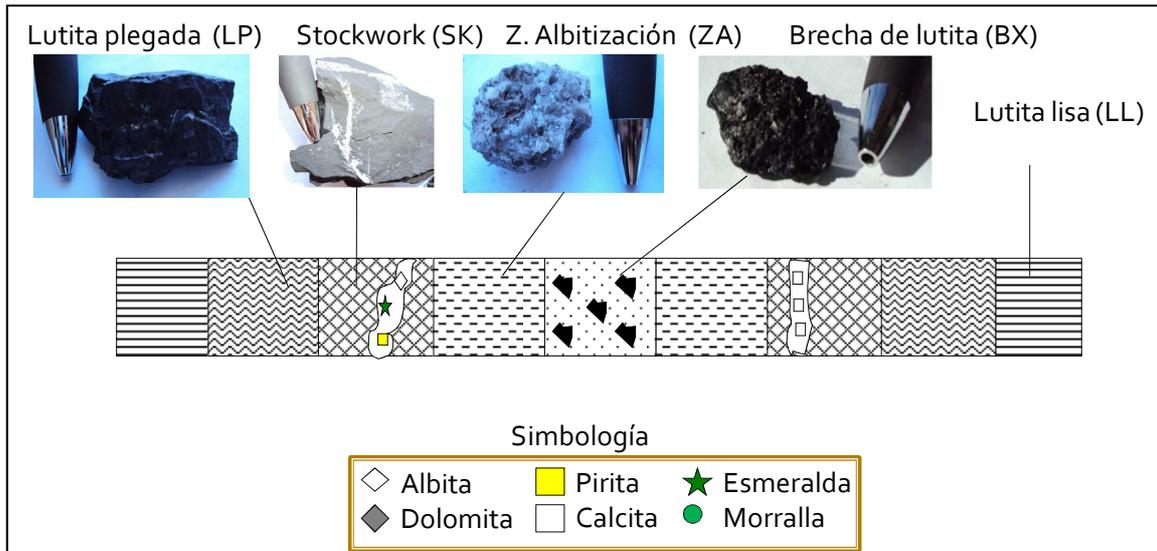


Figura 28: Esquema de Contacto entre Litología, Tramas, Simbología.

El detalle de esta figura se presenta en el siguiente listado, con una descripción breve de cada categoría, realizada por geólogos que estudiaron la mina y una serie de muestras obtenidas de ésta.

1.- Lutita Lisa (LL)

- Lutita carbonatada de competencia media que no muestra indicios de tectonismo póstumo ni mineralización.
- En terreno se describe como lisos.

2.- Lutita Plegada (LP)

- Lutita con plegamiento.
- Venillas con calcita y pirita.
- La pirita puede verse en horizontes y en forma diseminada.

3.- Stockwork (SK)

- Lutita negra carbonatada.
- Venillas de albita, calcita.
- Pirita diseminada.
- Vetas de máximo 20 [cm] de espesor con albita/calcita (espesor promedio 10 [cm])
- Puede contener esmeraldas.

4.- Zona de albitización (ZA)

- Roca gris muy alterada con textura de brecha.
- Se observan cristales sanos y alterados de albita y dolomita.
- Se disgrega con la mano.
- Pirita diseminada.
- Algunas zonas con disposición laminar o en bandas.
- Puede presentar clastos mm angulosos de lutita negra.
- Algunas zonas carbonatadas.

5.- Brecha de lutita (BX)

- Lutita negra muy blanda que se disgrega en la mano.
- Vetillas de albita (alterada a arcilla) y piritita diseminada.
- Matriz arcillosa.

En cuanto a la calidad de la roca se ha hecho algo similar, en que se caracteriza el estado de la roca frente a cualquier intervención. La clasificación es la siguiente:

Tabla 9: Caracterización calidad de roca en frentes

Código	Condición
1	Martillo rebota
2	Se quiebra
3	Desgrana Roca
4	Martillo enterrado
5	Agua en la frente

4.5 Monitoreo Geofísico

De modo de encontrar zonas de contacto entre litologías, se realiza un estudio geofísico basado en el estudio de resistencia eléctrica que presentan las distintas rocas que forman el manto rocoso de la mina. Esto se hizo también con el fin de probar la aplicación de estas técnicas en la exploración de este tipo de minería, a modo de disminuir el problema de la incertidumbre existente en encontrar ocurrencia de esmeraldas. Para esto se trabajó en túneles (505 metros) de Tequendama, Volveré y Catedral. También se realizan trabajos en superficie (125 metros) en los sectores Tequendama-Volveré y Tequendama-Puerto Arturo. Estos se efectúan con el fin de obtener la dureza y porosidad de cada una de las distintas capas que forman el manto rocoso de la región para identificar los contactos litológicos, para esto se emplean las técnicas de IP (polaridad inducida) y Tomografía.

Estas técnicas tienen por objetivo determinar la distribución real de la resistividad del subsuelo en el ámbito comprendido entre dos polos o bien hasta un cierto rango de profundidad a lo largo de un perfil de medida, a partir de los valores de resistividad aparente obtenidos mediante medidas realizadas por métodos convencionales de corriente continua. La forma de realizar las mediciones es distinta para cada uno de los métodos.

En el caso de la polaridad inducida, esta se realiza en superficie, y se basa en el estudio de resistividad y polarización inducida utilizando una configuración dipolo-dipolo. Se inyecta una corriente continua (intensidad en Amperes) al subsuelo a través de un dipolo (dipolo de corriente) y se registra la caída de potencial (dipolo de potencial) (V, en miliVolts), en otro dipolo distante del primero (en este caso 50 metros). La resistividad del medio es proporcional a la razón entre el voltaje y la corriente (V/I). Este procedimiento, con los equipos utilizados, posibilita realizar medidas simultáneas con hasta 6 valores de la caída de potencial para cada dipolo de corriente.

Pese a las dificultades debido a la topografía, vegetación y humedad ambiente para realizar los procedimientos, se pudo realizar obteniendo resultados satisfactorios para éste método. Se obtuvo que la resistividad e IP resultaron ser buenos métodos para delimitar zonas de contacto entre roca dura y roca blanda, por lo que se presume presencia de pirita, el cual corresponde a uno de los indicadores de posible aparición de esmeraldas. En estos sectores se presentan valores de resistividad levemente superiores a los detectados en zonas con únicamente lutitas, corresponden a lutitas con presencia de sulfuros de fierro – pirita – causantes del efecto IP. Cabe destacar que para la interpretación de los resultados de IP es fundamental tener un control geológico ya que el efecto puede ser causado por la presencia de magnetita, arcillas, alteraciones tipo cloritización, materiales sulfuros de níquel, de fierro o cobre; claro está que en este caso el origen más probable son las arcillas y la pirita.

La tomografía de resistividad se aplica de forma similar al método anterior también se utiliza la configuración dipolo-dipolo. Es decir, en 2 estacas (dipolo de corriente) se inyecta una corriente (en Amperes) al subsuelo y en otros dipolos (dipolos de potencial), se recibe el potencial (en miliVolts) generado por el paso de corriente a través de las rocas. En este estudio, los dipolos de potencial se ubicaron con separaciones de 5, 10, 15 y 20 metros del dipolo de inyección de corriente, todo esto dentro de túneles de la mina y en superficie. La diferencia básica y fundamental es que mientras en resistividad IP se utilizan cables eléctricos normales y se emplea un transmisor y un receptor, en tomografía el mismo equipo es transmisor y receptor a la vez y el cable es especial, tiene 50 conductores. En este método cada dipolo puede ser de corriente o de potencial. Este método resultó ser una excelente herramienta para poder discriminar una misma roca con distinto estado de consolidación, humedad y/o contenido de material carbonoso.

Un buen ejemplo de esto último se presenta a continuación en dos casos, en el primero se ve claramente un contacto vertical entre dos tipos de lutitas, en color azul se presentan las lutitas más secas y consolidadas, y los colores más claros representan lutitas carbonosas y más húmedas. Esta imagen pertenece al estudio de la zona SR1 de Tequendama. El segundo ejemplo también corresponde a la mina Tequendama.

En ambos sectores ha habido efectivamente aparición de esmeraldas, durante el último trimestre de 2010.

La línea de trabajo se muestra en rojo en la figura siguiente, y a la derecha se indica en el plano el sector al cual pertenece.

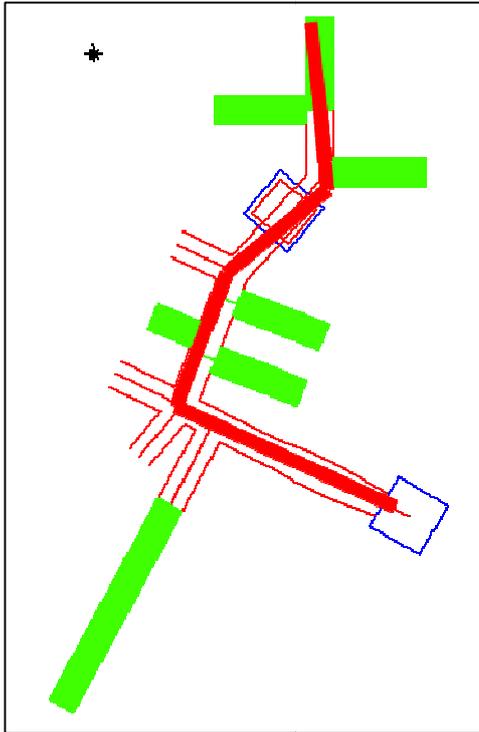


Figura 29: Línea de trabajo tomografía, Tequendama SR1

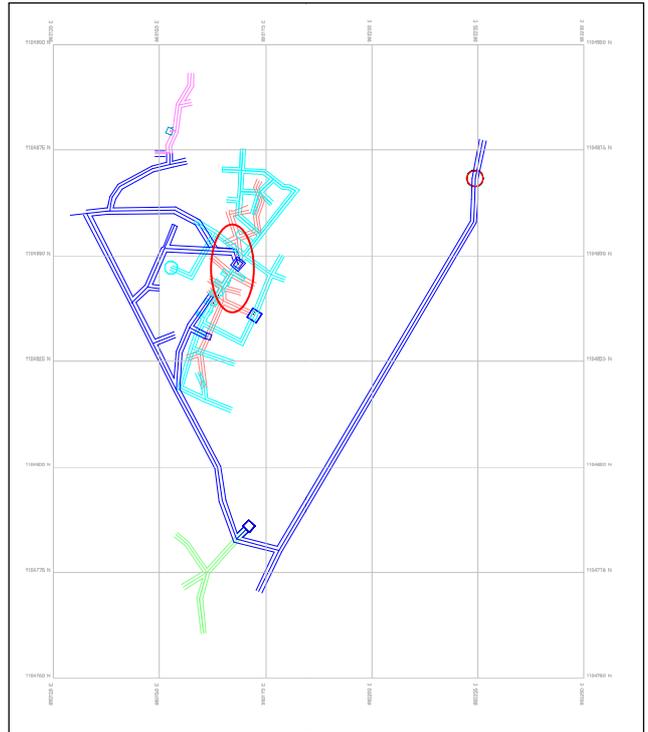


Figura 30: Plano Tequendama, SR1

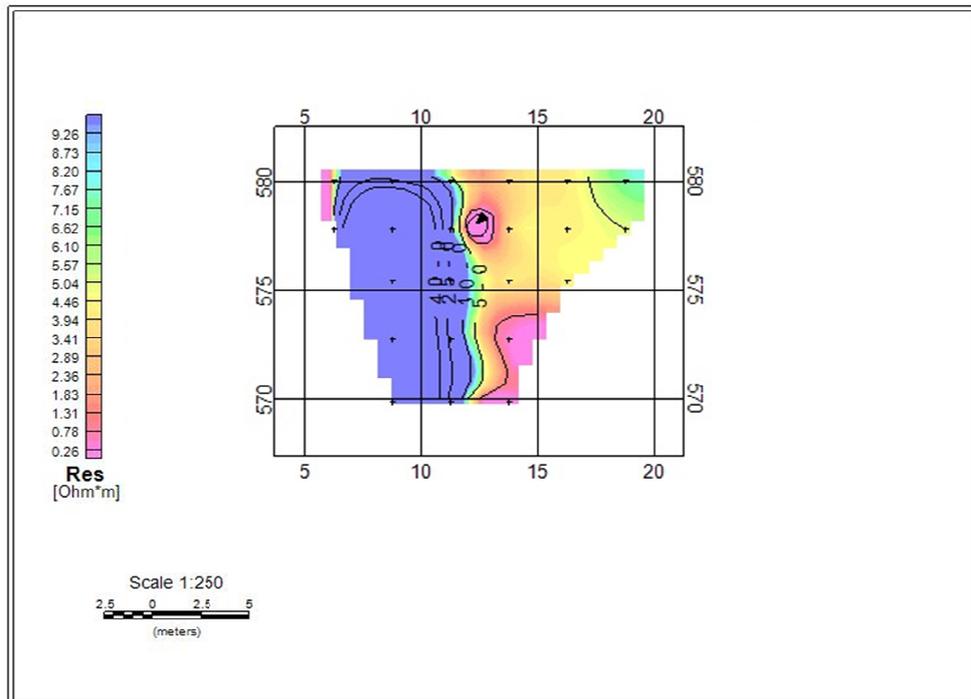


Figura 31: Modelo 2D de resistividad, SR1.

En el segundo caso también se ha detectado un contacto entre las dos tipos de lutitas. La leyenda representa lo mismo que en el caso anterior.

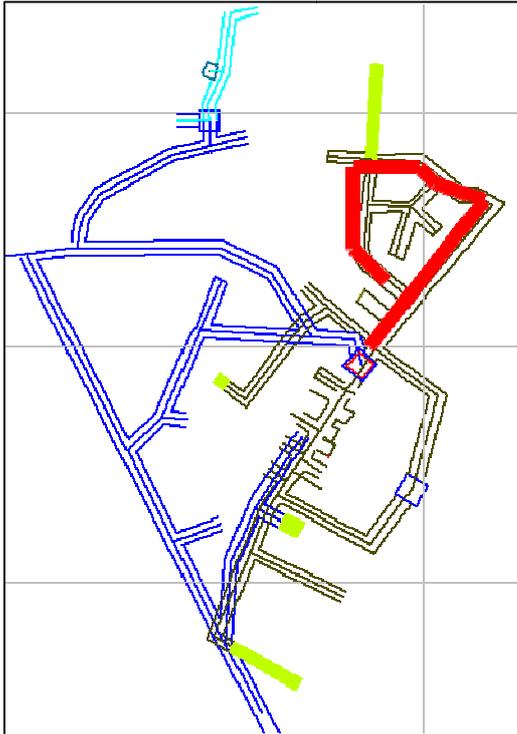


Figura 32: Línea de trabajo Tomografía Tequendama R1Inf

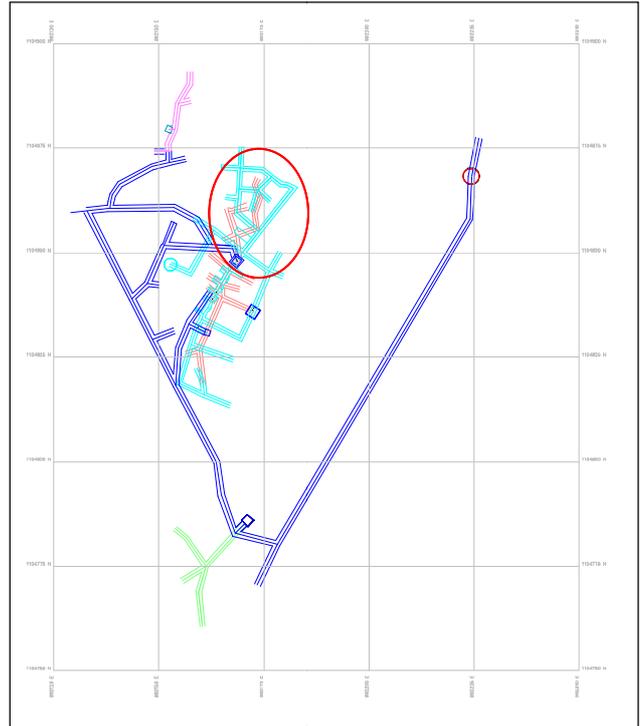


Figura 33: Plano Tequendama

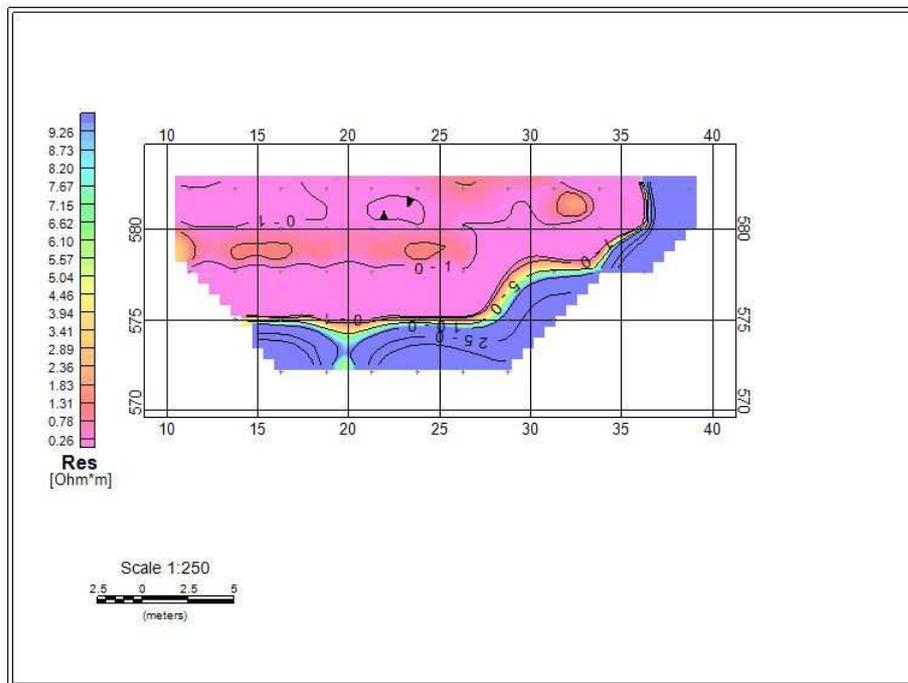


Figura 34: Modelo 2D resistividad R1Inf.

Luego, como resultado se obtuvo que gracias a estas tecnologías, es posible identificar los contactos litológicos entre las estructuras de diferente dureza, lo cual permite identificar los

sectores con alta probabilidad de encontrar concentraciones de esmeraldas, sirviendo esto como guía para la planificación.

4.6 Geoquímica

Como herramienta complementaria para la exploración y prospección de esmeraldas, se decide realizar análisis geoquímico de muestras de la mina, de modo de poder caracterizar de una manera más completa los sectores de la mina identificados como ricos en material de interés. Los métodos utilizados corresponden a fluorescencia de rayos X, y difracción de rayos X.

Algunos de los factores considerados para este análisis son el comportamiento de ciertos indicadores que según estudios tienen relación a la aparición de esmeraldas, uno de ellos es la relación Na/K, la cual determina la posible presencia de mineral de interés (Mendoza, 1991).

Se utilizan muestras provenientes de distintos sectores de la mina para pruebas de fluorescencia de rayos X. Se utilizaron muestras de alto contenido de mineral y otras completamente estériles de modo de obtener contraste en los resultados, consistente con las muestras enviadas. El resultado de estos análisis arrojó los siguientes indicadores:

- Baja o nula presencia de Si y Al en muestras ricas en material esmeraldífero.
- Baja concentración de Mg presente en muestras de estéril.
- Se verifica la teoría de Mendoza de que un buen indicador es la relación $Na/K > 1$, alta en muestras ricas, descendiendo hacia las más pobres y nulas en mineral de interés. Algunos resultados de esto son los siguientes:

Tabla 10: Relación Na/K en análisis geoquímico de muestras.

N° muestra	Na/K
1	19.2
2	1.6
3	79.3
4	42
5	0
6	0
7	43.1
8	19.1
9	24.7
10	85.9
11	2.1
12	18.9

Las muestras 4, 7, 9, y 10 corresponden efectivamente a muestras de sectores en que se extrajo chispero, y poseen un alto índice de la relación Na/K. Por otro lado las muestras 5 y 6 fueron tomadas de un sector completamente estéril, lo cual es consistente con los resultados nulos de relación Na/K.

Por otro lado, de los resultados de difracción de rayos X, se obtiene el espectro mineralógico presente en cada una de las muestras, esto se muestra en la figura a continuación.

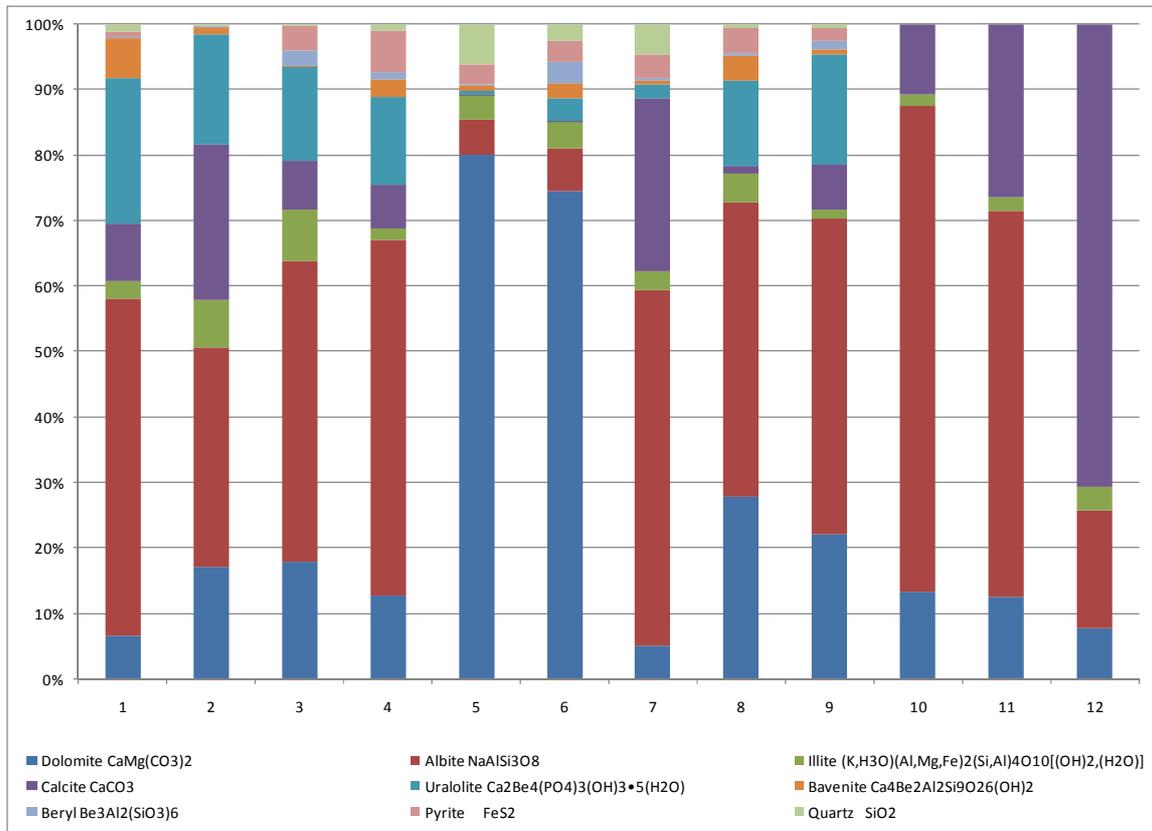


Figura 35: Espectro mineralógico. Difracción de Rayos X.

Algunas observaciones respecto a lo anterior, son la presencia significativa de Albite (asociada a Na, Al, Si y O) en todas las muestras, salvo en 5 y 6 en que la presencia es muy baja, siendo precisamente las muestras estériles, estas últimas sin embargo poseen un alto contenido de Dolomita, a diferencia de todo el resto.

Con los resultados obtenidos, se realizó un modelo multivariable de alteración, que permite predecir zona de ocurrencia de esmeraldas:

$$\text{Emerald ID} = (1.957 \cdot 10^{-3} \cdot \text{Na/Ka}) + (3.01 \cdot 10^{-2} \cdot \text{Albite}[\%])$$

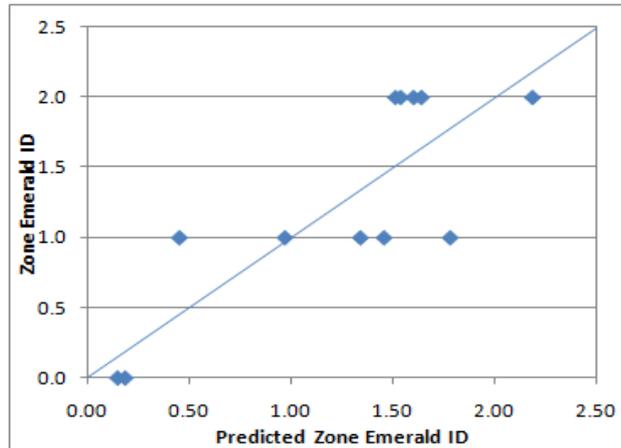


Figura 36: Modelo predictivo

Los resultados del modelo son los siguientes:

- Cuadrante 1: Modelo y realidad concuerdan con ocurrencia de esmeraldas.
- Cuadrante 2: Realidad con ocurrencia de esmeralda Morralla, pero el modelo no concuerda.
- Cuadrante 3: Modelo y realidad concuerdan en la no ocurrencia de esmeraldas.

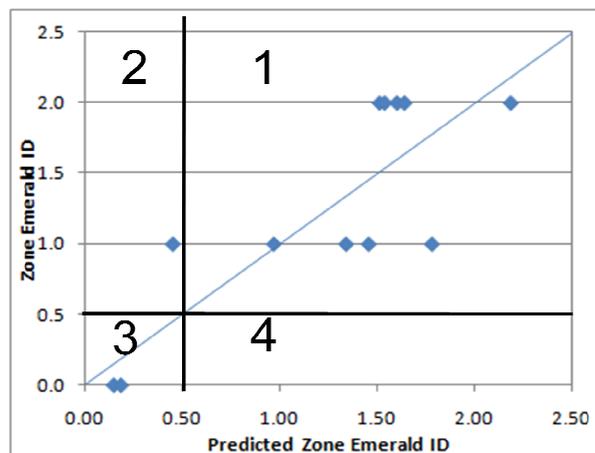


Figura 37: Modelo y realidad.

Existen varias formas de identificar y posiblemente caracterizar el yacimiento mediante pruebas geoquímicas realizables sobre muestras o directamente a la roca en terreno.

Una forma interesante ya probada para el estudio de gemas, es el uso de Microscopía Electrónica de Barrido Automatizado (SEM, por su sigla en inglés) para determinar la abundancia de especies minerales o elementos químicos, que cuenta con cámaras y múltiples detectores de Rayos X dispersivos de energía, acompañados de softwares de vanguardia para mineralogía cuantitativa mineralizada. También pueden ser utilizados en otros sectores como petróleo y gas, medioambiente, medicina, entre otros.

Alrededor del mundo ya hay varias aplicaciones para este tipo de tecnología (Hoal *et al*, 2009), como por ejemplo: depósitos de diamantes, depósitos tipo Carlin hospedados en roca sedimentaria, mineralogía en un pórfido de cobre, mineralogía de feldespatos, incluso aplicaciones en biología y medioambiente. En este caso, la aplicación de interés es a piedras preciosas, para lo cual un buen referente es su utilización en depósitos de diamantes en que se ha tenido buenos resultados.

4.7 Costo de Actividades Productivas

El objetivo general del presente capítulo es la identificación de los ítems de costo y su conexión con las estructuras de operación y de gestión. Los ítems de costo son agrupados en dos categorías: costos fijos, tales como recursos, dotación, gastos corporativos y costos variables o proceso-dependientes. Los costos fijos, como recursos, dotación, y gastos corporativos, no son modelables en función del proceso; sus valores dependen de las necesidades de la operación y son asignados de acuerdo a la experiencia y juicio de la administración. Los costos proceso-dependientes o insumos pueden ser modelados en función del proceso.

Es importante identificar los tipos de costos que se tienen en la operación, para ello se definen las siguientes categorías:

4.7.1 Insumos

Se define como el tipo de gasto que se genera por una necesidad directa del proceso productivo, es decir, son proceso-dependientes. Los insumos son consumidos por la operación (combustible, maderas, etc.).

El gasto en insumos es uno de los más considerables en la mina de Muzo (34%), pues todas las actividades necesitan una serie de elementos para poder ser llevadas a cabo, como por ejemplo para la fortificación y la ventilación. Además se debe tomar en cuenta que siendo una mina artesanal surgen muchos imprevistos los cuales deben ser solucionados de manera eficiente, pues cualquier descuido puede causar pérdidas en la producción, o accidentes personales, esto también lleva a la utilización variable de insumos de diversa índole.

4.7.2 Costos Fijos

En esta categoría se tienen 3 ítems principales:

Recursos: corresponden a los costos asignados por la jefatura de cada actividad, sirven al proceso en actividades de producción o de apoyo (equipos, herramientas, etc.)

Dotación: representa a los costos en la dotación en cada actividad (empleados o supervisores).

Gastos corporativos: son aquellos gastos asignados desde afuera del perímetro funcional del proceso. Como no son modificables por los administradores del área no se puede realizar gestión de costos sobre ellos (publicidad, impuestos, etc.).

4.7.3 Costos por Categoría

A continuación se muestran los resultados de los costos mensuales para cada categoría mencionada anteriormente:

Tabla 11: Costos mes

Categoría	US\$/mes
Dotación	342.337
Recursos	205.947
Insumos	303.332
Gastos Corporativos	13.194
Otros	17.866
Total	882.676

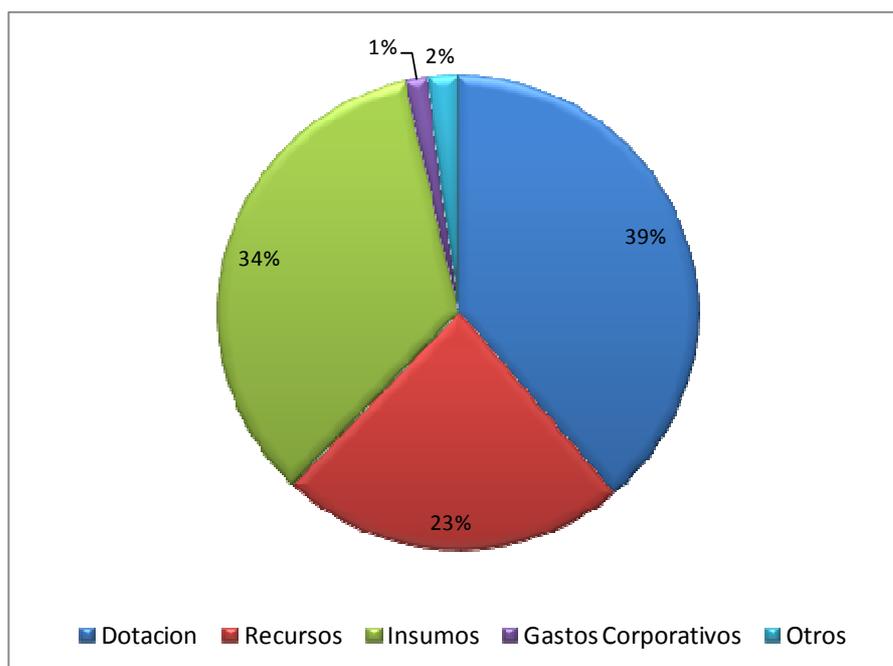


Figura 38: Distribución de costos.

Mediante el manejo de esta información, se obtienen posteriormente los costos unitarios por metro y por carro que se utilizarán para la aplicación de la etapa de optimización del sistema de control producción.

4.8 Esquema cálculo programa de producción

A continuación se muestra de manera esquemática la integración de la información para el cálculo del programa de producción, mediante un diagrama en que se detalla los pasos a seguir, la información necesaria, y el resultado a obtener en cada paso. Para finalmente obtener un programa de producción que cumpla con las expectativas productivas y restricciones.

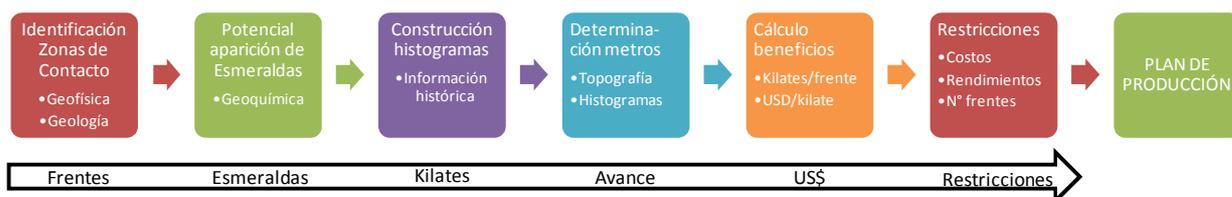


Figura 39: Diagrama integración de la información.

4.9 Reconciliación planes de producción

La elaboración de los planes mensuales se realiza analizando la productividad del mes anterior, tomando en cuenta las labores realizadas como también las contingencias, es tomando en cuenta las características geológicas encontradas en las frentes y los sectores y niveles a los que se quiere llegar tanto por la existencia de material esmeraldífero, o por estrategia para alcanzar ciertos sectores ricos. El resultado de esto es un plan que si bien está basado en la experiencia de acontecimientos recientes en la mina, es cumplido (como promedio) en un 66% en los metros de avance y un 91% en extracción de carros, sin tomar en cuenta que muchas veces se obtienen un gran número de carros provenientes de turreones¹¹ u operaciones de mantenimiento y no de avance en túneles, hechos que entorpecen la operación normal de la mina.

En cuanto a la producción, desde el mes de Junio se comienza a tener una cifra estimada de kilates a producir, comenzando con una producción de 9,000 kilates en Junio, seguida de 20,000 kilates para los próximos meses. El cumplimiento de los planes en términos de kilates se puede ver en la figura a continuación.

¹¹ Colapsos dentro de galería

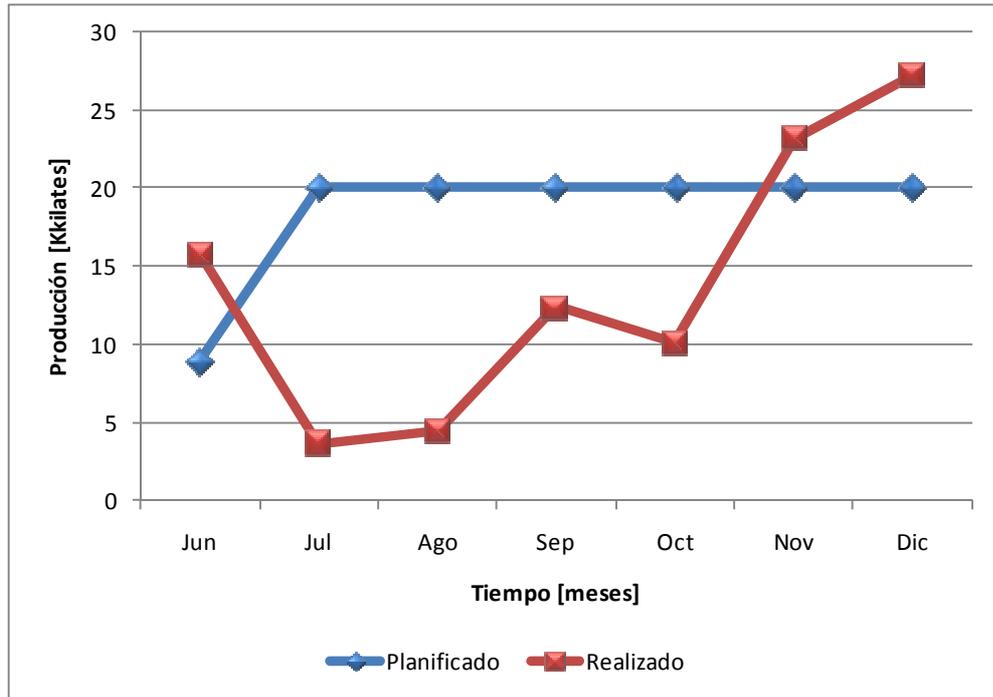


Figura 40: Cumplimiento planes de Producción – Reconciliación kilates

El sistema de control producción diseñado tiene dentro de su proceso la etapa de reconciliación, actividad que no ocurría anteriormente, la cual entrega información valiosa al momento de evaluar la operación de un período. Consecuentemente se ve una notoria mejora para los meses de Noviembre y Diciembre, esto se debe un mejor conocimiento de la geología y estructuras presentes en la mina gracias al análisis de muestras de diversos sectores de la mina por parte de profesionales, que fueron capaces de actualizar el modelo geológico que se tenía hasta el momento, además de la mejora en la planificación minera con la implementación de un sistema de control producción, lo que desencadenó trabajos de exploración a nuevas zonas de contacto ricas en material esmeraldífero, y el considerable aumento en la producción. Luego el sistema propuesto promete lograr eficiencia en la operación, aprovechando al máximo los recursos tanto humanos como materiales, pudiendo desarrollar y cumplir planes mineros cada vez más exigentes.

5 SISTEMA CONTROL PRODUCCIÓN MINA

5.1 Diseño lógico del sistema

El sistema de control producción consiste en una serie de etapas que componen un ciclo. El objetivo principal del sistema es maximizar el beneficio y la producción de kilates, puesto que existen contratos de venta con distintos tipos de clientes, que se deben cumplir en tiempo y forma. Además de quedar la operación sujeta a un costo que no supere el presupuesto disponible, y a restricciones que logren que se respete la infraestructura de la mina. A continuación se muestra una figura esquemática que caracteriza el sistema.

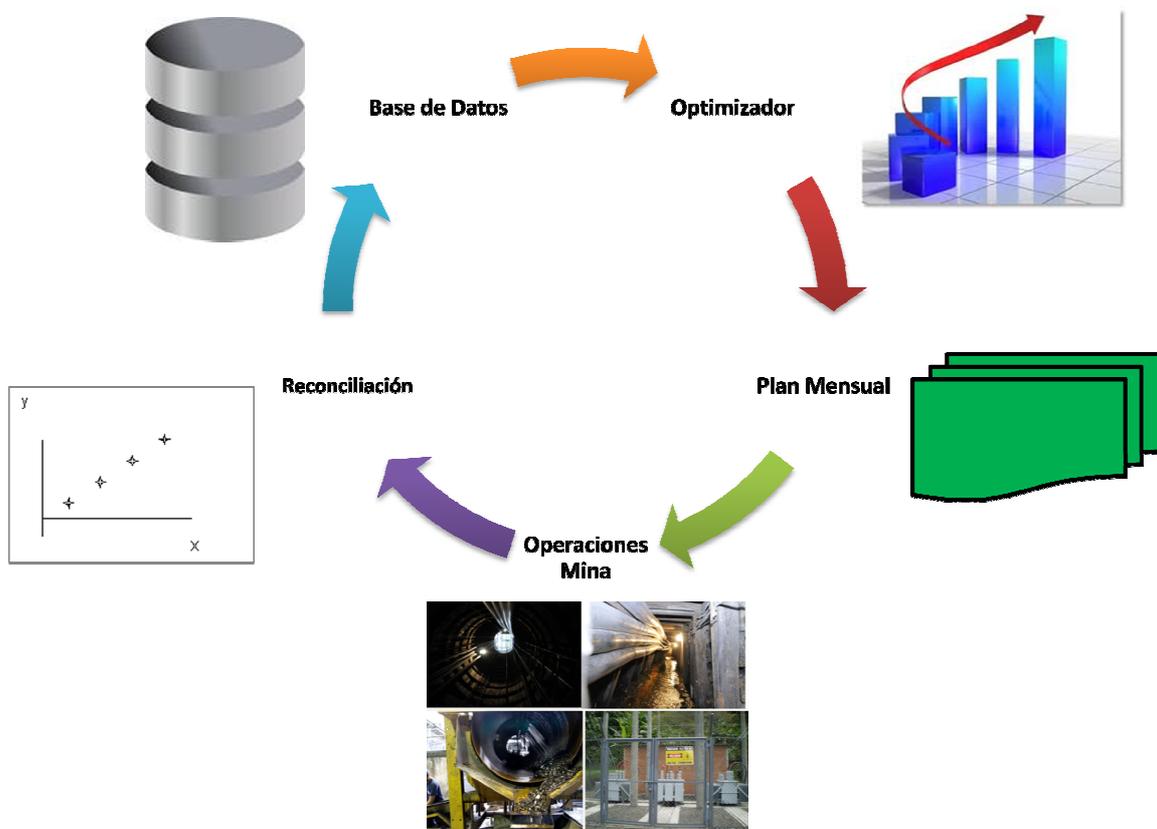


Figura 41: Diseño Lógico sistema de Control Producción

Este ciclo comienza en el manejo de una base de datos, que contiene toda la información referente a la operación de la mina, la cual se actualiza diariamente. Del manejo de la base de datos se obtienen los parámetros de entrada al sistema optimizador. Las características principales del sistema son la integración de rendimientos y parámetros operacionales, tales como productividades, avances y geología, y la definición de la preparación minera simultáneamente

con la producción de kilates y levantamiento geológico, todo sujeto a un presupuesto definido por el mandante.

La optimización consiste en dos etapas que responden a diferentes horizontes de planificación. El primero es de carácter mensual, en que la función objetivo es maximizar el beneficio generado por la producción, sujeto a restricciones operacionales, y entregando como resultado el plan mensual. La segunda etapa consiste en generar la secuencia de explotación para el cumplimiento de este plan, realizando una minimización de cuadrados entre lo realizado y lo planificado, el resultado de esta etapa es el plan minero diario. El plan obtenido será llevado a cabo en la operación de la mina, llevándose un seguimiento diario del cumplimiento de éste. El hecho de la realización de planes de producción sujetos a las capacidades de la mina, asegura la creación de planes alcanzables.

De los resultados de la operación se realiza la reconciliación que indica el estado de la operación con respecto a la planificación, es decir lo realizado con respecto a lo planificado, tanto en avances como en producción de kilates para luego entrar nuevamente al ciclo, esto después de el análisis de desviaciones e identificación de las fuentes que provoquen las desviaciones y posterior toma de medidas, además de la posibilidad de corregir estimaciones en base a los resultados.

El plan anual se realiza en base a los mismos fundamentos, con la diferencia de que este incorpora una mayor cantidad de frentes abarcando más sectores, siendo la motivación de avance los mismos, maximizar el beneficio y producción llevando a cabo la construcción de la infraestructura de la mina acorde a un modelo genético de mineralización.

5.2 Estructura para la planificación

Como se dijo anteriormente, el punto de partida del sistema es la base de datos, que proporciona la información necesaria para obtener estadísticas de producción de la mina para determinar las restricciones operacionales y de producción de kilates, así como también las características de geología, geotecnia y actividad de cada frente. Las restricciones operacionales se calculan en base a metros de avance pues estos corresponden al indicador medible con mayor precisión en terreno. Por otro lado a la esperanza de aparición de esmeraldas de sectores con mineralización anómala, se estima en base a la producción de esmeraldas de períodos anteriores utilizándose como proyecciones de lo que se espera encontrar a cierta distancia de la zona de contacto litológico, además de información proporcionada por estudios geofísico y geoquímico, estos sumados a los conocimientos geológicos de la mina.

5.2.1 Entradas al sistema:

1. **Geometría del cuerpo mineralizado.** Se requiere delinear la forma geométrica de los sectores de interés. Para esto se realiza periódicamente una revisión y caracterización de

las frentes, de esta manera se tiene un mapeo geológico de éstas. Para cada una de ellas se informa desde la mina el estado de las frentes como se muestra en la figura a continuación.

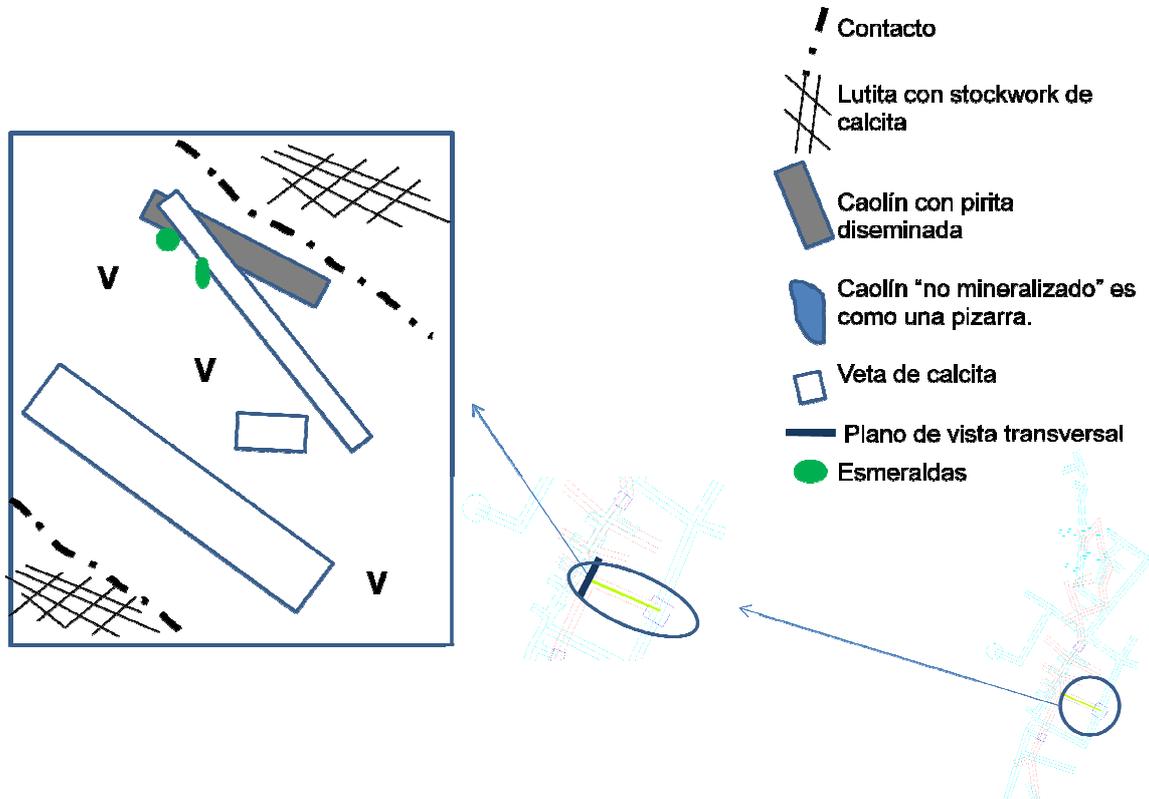


Figura 42: Caracterización geológica frentes.

Esta información se traspasa el plano, y de esta forma se puede ver la tendencia de la mineralización. A continuación se muestra el plano correspondiente a uno de los niveles de Tequendama, en que cada frente tiene asignada una caracterización en base a lo descrito anteriormente. Se ve claramente la tendencia de la mineralización a través de la calle principal, encontrándose en esta zonas caracterizadas con material esmeraldífero, caolín y brecha, y hacia los costados zonas exploradas que sólo presentan características de lutitas, tanto lisas como plegadas que no presentan mineralización. Esta clara tendencia indica que esta calle principal se encuentra precisamente en una zona de contacto.

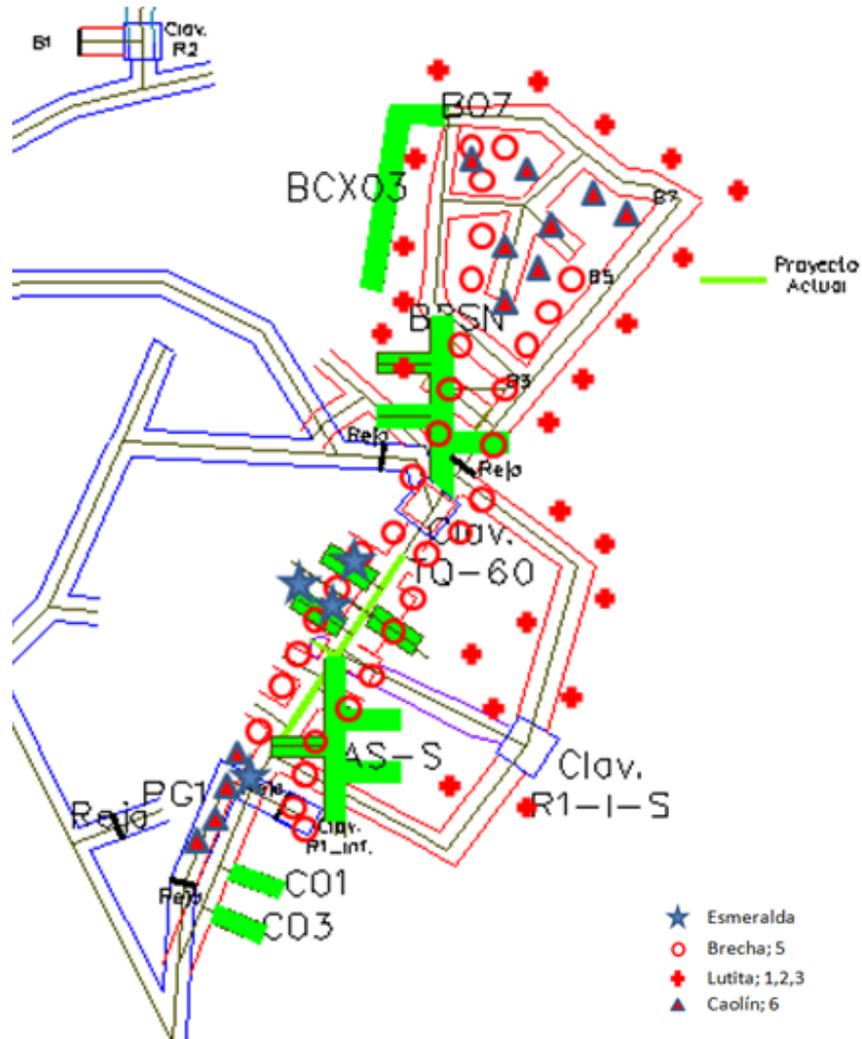


Figura 43: Mapa geológico

El mapa geológico junto con la información disponible de aparición de esmeraldas, complementado con los resultados de estudios geofísicos (que ayuda a identificar las zonas de contacto) y geoquímicos (que entrega zonas de potencial mineralización según asociaciones mineralógicas y composicionales de la roca) es el punto de partida para poder ingresar a la primera etapa de optimización, pues es desde donde se alimentan los histogramas que definen la esperanza de encuentro de cierta cantidad de kilates en los determinados sectores, que posteriormente corresponden a las leyes esperadas en los distintos puntos las cuales son las que guiarán la planificación.

2. **Distribución de concentraciones anómalas en contactos metasomáticos.** Se generan histogramas de frecuencia de aparición de esmeraldas en kilates. Para cada sector del que se posee información se genera un histograma para cada tipo de esmeralda, tomando una distancia de influencia de 5 metros. Estos histogramas proporcionan la esperanza de encontrar cierta cantidad de kilates para cada sector, es decir, la posibilidad de encontrar

determinada ley (kilates) de esmeraldas en puntos específicos. Estos puntos serán el blanco al que se quiere llegar. La fusión de toda esta información permite generar un mapa de zonas de interés en que la planificación se realizara en función de extraer todos los puntos con ley asociada de modo de recuperar la mayor cantidad de kilates que la mina permita. A modo de ejemplo de presenta a continuación el histograma de la presencia de kilates de morralla en el sector C02 de SR1-SR2 en Tequendama.

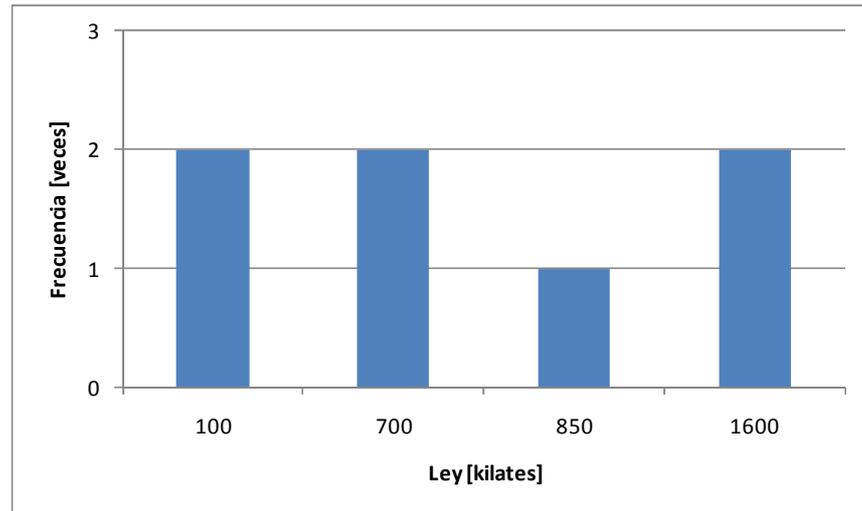


Figura 44: Histograma de Frecuencia de leyes. Tequendama SR1-SR2. Sector C02, Morralla.

Esto arroja una esperanza de aparición de aproximadamente 800 kilates de esmeralda del tipo morralla.

3. **Rendimientos y productividades.** Estarán condicionados por los aspectos geotécnicos, capacidad del malacate, y distancias de transporte.
 - i. Máximo de avance por mina [m]. Esta restricción (al igual que ii, iii, y iv) se utiliza de modo de asegurar que el resultado arrojado por el sistema no supere las capacidades reales de la mina, y se obtenga un resultado alcanzable. Estos se obtienen de las estadísticas de producción de la mina.

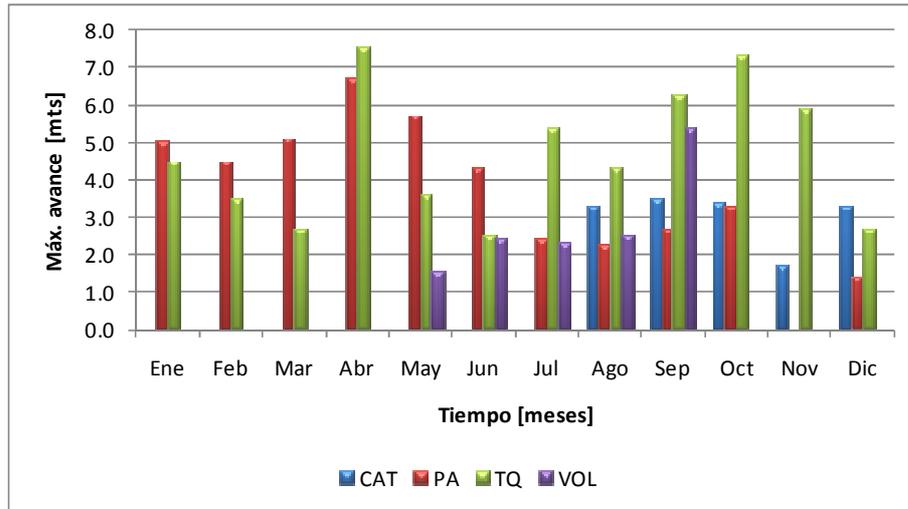


Figura 45: Máximo avance diario por mina.

En la figura anterior se presentan los máximos de avance diario para cada mes en cada una de las minas. Se puede ver que la mina Tequendama es aquella que posee los máximos rendimientos. Los resultados de esto mismo diferenciando entre avance vertical y horizontal para roca dura y blanda son los siguientes:

Tabla 12: Máximo de avance diario por mina (avance en metros).

Tipo de Excavación	Tequendama		Puerto Arturo		Catedral		Volveré	
	Roca dura	Roca blanda	Roca dura	Roca blanda	Roca dura	Roca blanda	Roca dura	Roca blanda
Horizontal	4.2	5.2	2.0	2.3	2.4	3.4	4.5	5.4
Vertical	2.7	2.2	0.8	1.0	1.0	0.5	1.2	2.0

Para efectos de cálculo se ha considerado como roca dura los avances realizados que reporten tipos de roca entre las categorías 1 y 2, y roca blanda a aquellas que posean categorías 3, 4 y 5 (ver Tabla 9: Caracterización calidad de roca en frentes

- ii. Máximo de avance por nivel [m]

Las 3 figuras siguientes muestran el máximo de avance por día para cada uno de los niveles de cada mina, entre los meses de Agosto y Diciembre (período del cual se tiene la información exacta por nivel). Se puede ver que en el peak de avance diario se alcanza a los 5.4 metros para el nivel 12s1 de Puerto Arturo en el mes de Septiembre.

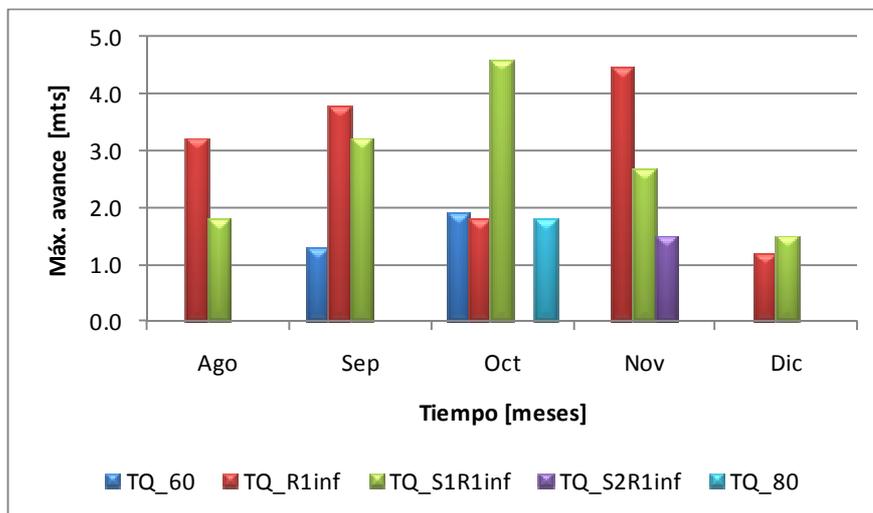


Figura 46: Máximo avance diario por nivel – Tequendama

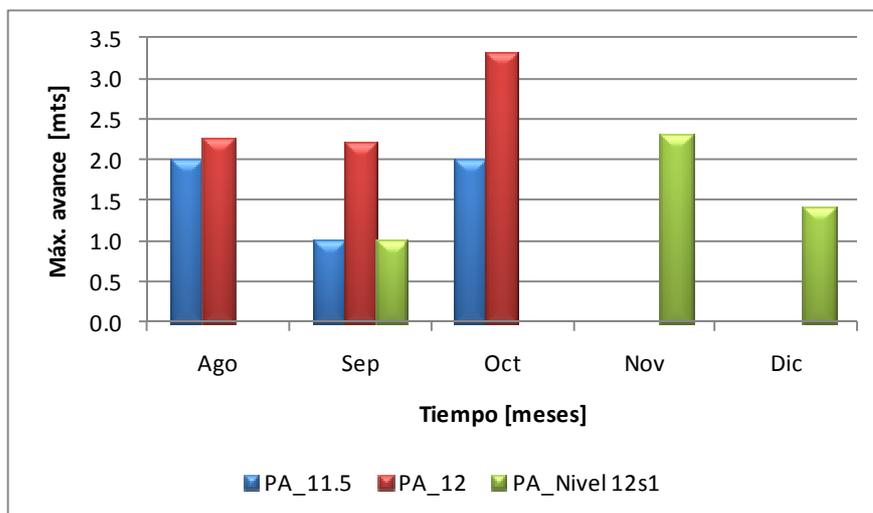


Figura 47: Máximo avance diario por nivel - Puerto Arturo

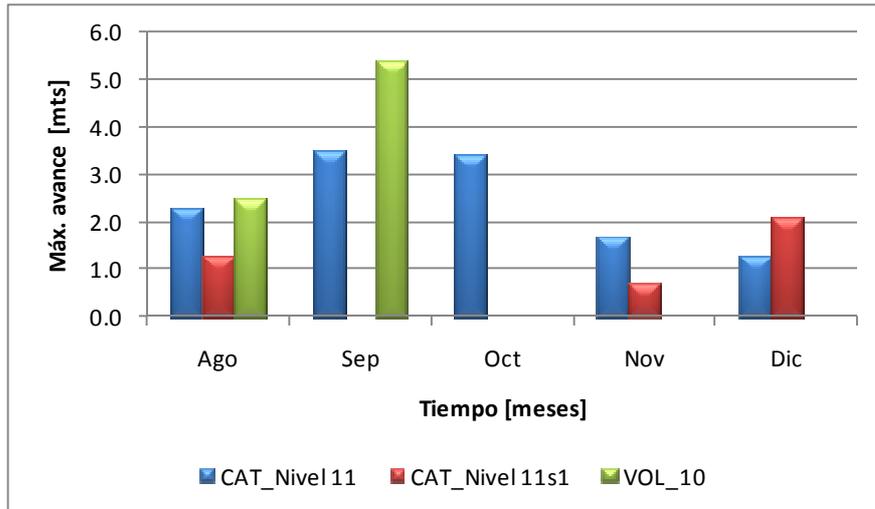


Figura 48: Máximo avance diario por nivel - Catedral y Volveré

Los máximos de avance diario por nivel, diferenciando avance horizontal de avance vertical se tienen a continuación:

Tabla 13: Avance diario máximo por nivel. Horizontal y Vertical.

Máximo avance diario por nivel [mts]		
Nivel	Horizontal	Vertical
CAT_Nivel 11	3.50	1.00
CAT_Nivel 11s1	2.10	0.50
PA_11.5	2.00	-
PA_12	2.25	2.30
PA_Nivel 12s1	3.30	-
TQ_60	1.90	1.70
TQ_R1inf	3.80	2.00
TQ_S1R1inf	4.60	-
TQ_S2R1inf	1.50	-
TQ_80	1.80	-
VOL_10	5.40	1.10

- iii. Rendimientos por frente. Estos dependen de las condiciones en la infraestructura cercana a la frente, es decir, de la distancia recorrida para extraer los carros, condiciones del malacate, profundidad, condiciones de los caminos, comunicación, entre otras. Todas estas características tendrán influencia en el avance ya que para poder seguir picando, es necesario que la carga anterior haya sido extraída, y que exista carros y personal disponible para la próxima carga. El rendimiento por frente ha sido calculado para cada mina, puesto que cada una posee características físicas distintas. Los resultados se muestran a continuación:

Tabla 14: Rendimientos por frente [m/día/frente].

Tipo de Excavación	Tequendama		Puerto Arturo		Catedral		Volveré	
	Roca dura	Roca blanda	Roca dura	Roca blanda	Roca dura	Roca blanda	Roca dura	Roca blanda
Horizontal	1.0	1.2	1.2	1.4	0.9	1.3	1.3	1.6
Vertical	0.5	0.6	0.5	0.6	0.2	0.4	0.3	0.6

Luego de ver los resultados, se debe tomar en cuenta que el promedio para cada mina es obtenido de entre los días en que las frentes estuvieron operativas.

Estos resultados son consistentes si se toma en cuenta las condiciones presentes en la mina, puesto que para cada una de ellas se tiene lo siguiente:

Volveré: las frentes se encuentran a más de 200 metros de la salida a superficie, pero el camino a recorrer está en muy buenas condiciones, pavimentado, y en bajada hacia la salida, lo que hace que la extracción de material sea de manera muy rápida y eficiente.

Puerto Arturo: las frentes en general están cercanas entre sí (aproximadamente a una distancia de 30 metros de túnel), pero el hecho de que desde el nivel 12 haya que subir los carros mediante una pluma¹² hace que el proceso no sea tan fluido como en el caso anterior.

Tequendama: la existencia de muchos niveles y malacates genera interferencia en la operación, sumado a que en Tequendama se trabajó generalmente en 4 o más frentes simultáneamente.

Catedral: las labores se encuentran a gran profundidad y los malacates internos son muy lentos. A esto hay que agregar la mala comunicación existente dentro de la mina entre el malacatero¹³ en superficie y el carrero dentro de la mina.

4. **Simultaneidad.** Se refiere a la cantidad de frentes operando simultáneamente en un período de tiempo. Este parámetro también se encuentra sujeto a la capacidad productiva de la mina, sin embargo es un factor variable, pues depende de qué manera se expandan las labores, de la mecánica de rocas si permite o no cierta actividad, y de la dotación disponible. Basándose en la operación actual, se tiene que en un período de una semana, es posible alcanzar un total de 7 frentes operando. Se implementará en el sistema utilizando una variable binaria. Un “1” para cada frente que sí será puesta en actividad para cada período.

¹² La pluma es una especie de grúa que se encuentra al interior de la mina, se utiliza para el izamiento de material.

¹³ Personal encargado de subida y bajada del malacate.

5. **Costo de cada uno de los segmentos.** Este variará dependiendo si se trata de roca dura o roca blanda. Para efectos de cálculo se ha considerado como roca dura los avances realizados que reporten tipos de roca entre las categorías 1 y 2, y roca blanda a aquellas que posean categorías 3, 4 y 5 (ver Tabla 9: Caracterización calidad de roca en frentes).

Tabla 15: Costo unitario por metro

Costo unitario [US\$/m]	Roca dura	Roca Blanda
Avance horizontal	2.600	1.500
Avance vertical	6.000	4.000

Por otro lado, cada metro de avance está asociado a un número de carros extraídos. En rigor el cálculo de estos carros esta dado por:

$$\frac{\text{Ancho galería [m]} * \text{Alto galería [m]} * \rho_{\text{esponjada}} \left[\frac{\text{ton}}{\text{m}^3} \right]}{\text{Contenido carro} \left[\frac{\text{ton}}{\text{carro}} \right]} = \frac{2.1[\text{m}] * 2.1[\text{m}] * 1.6 \left[\frac{\text{ton}}{\text{m}^3} \right]}{0.354 [\text{ton/carro}]}$$

Esto último da un total de 20 carros por metro de avance, sin embargo, en la práctica se tiene que este número corresponde a 30 carros en promedio para todo tipo de roca. Esto se debe principalmente a que la operación muchas veces se ve afectada por la ocurrencia de turreones (desprendimiento de material dentro de la mina), por lo cual se debe extraer una mayor cantidad de material que lo correspondiente al cálculo anterior. Se ha estimado que el costo de extraer un carro, es de 30 [USD/carro], lo cual adiciona al costo unitario la suma de 900 dólares por metro.

5.3 Programación de la Producción

La metodología para llevar a cabo en plan de producción consta de 2 etapas independientes, las cuales corresponden a horizontes de planificación distintos.

La primera consiste en una etapa de optimización encargada de generar el programa mensual, cuya función objetivo es maximizar el beneficio generado por la producción de esmeraldas, dando como resultado la cantidad de metros (T_i) que es necesario avanzar para alcanzarlos. Es decir, después de esto se sabe que frentes trabajar, cuánto avanzar, y cuanto material extraer.

Programación mensual

Función Objetivo 1:

$$\text{Max Beneficio} = \sum_{i=1}^n (B_i * X_i)$$

en que:

$n = \text{número de frentes.}$

$B_i[US\$]$: Corresponde al beneficio asociado a la producción asociada a la frente i . El valor por kilates depende de la calidad de esmeralda en cada caso. ($B_i[US\$] = L_i[kilates] * Valor_i[\frac{US\$}{kilate}]$)

$X_i[binaria]$: representa si se extrae o no la frente i (1 o 0, respectivamente), llegando a ese punto significa la realización del avance T_i , es decir, es una variable que está implícitamente asociada a metros. La forma de determinar si se trabaja una frente o no, depende de si se alcanza a completar la distancia necesaria para obtener los kilates del punto al que se quiere llegar, si no es así, esta frente no entra en el plan mensual. Este es el resultado de esta etapa de optimización.

Los datos de entrada a esta primera etapa son:

- F_i : frente de trabajo.
- M_i : mina a que pertenece la frente i .
- N_i : nivel de mina al que pertenece la frente i .
- $L_i[kilates]$: representa la ley correspondiente al punto a alcanzar por la frente “ i ”, viene de la esperanza obtenida de los histogramas de leyes generados anteriormente. Estas leyes corresponden al número de kilates, distinguidas por categoría (chispero, morralla). El número de kilates se pondera por 0.5, considerando una pérdida de la gema de un 50% luego del tallado.
- $T_i[m]$: distancia necesaria a recorrer para alcanzar el punto de interés de ley L_i por la frente “ i ”. Este valor es ponderado por la variable X_i , el resultado de esto corresponde a la meta en metros por frente T'_i a alcanzar en la próxima etapa ($T'_i = X_i \cdot T_i, \forall X_i = 1, i = 1 \dots n', \text{ con } n' \text{ el } N^\circ \text{ de frentes seleccionadas para el plan}$). Pueden corresponder a distancias tanto horizontales como verticales.
- $C_i[USD/m]$: es el costo unitario por metro, el cual depende del tipo de roca a excavar (dura o blanda), y de si se trata de excavación horizontal o vertical.

Las restricciones a este problema son no superar el presupuesto mensual (puesto que cada metro avanzado tiene un costo asociado), y no superar la capacidad de la mina según la productividad de cada mina (TQ, PA, CAT, VOL), por esto la existencia de los parámetros M_i y N_i para poder aplicar esta restricción. Luego las restricciones se ven de la siguiente manera:

$$X_i = \text{binario}, \forall i$$

$$\sum_{i=1}^n (T'_i * C_i) \leq \text{Presupuesto mensual [US\$]}$$

$$\sum_{i=1}^n T'_{iM} \leq \text{Máx. avance mensual en mina M [mts]}$$

$$\sum_{i=1}^n (T'_{iN}) \leq \text{Máx. avance mensual en nivel N [mts]}$$

Todas las restricciones de metros de avances se aplican discriminando entre distancias verticales y horizontales, y si se trata de roca dura o blanda.

El resultado de esta optimización es el plan de producción mensual, en metros de avance por frente a producir. Al poner como restricción las capacidades propias de la mina, se asegura que el plan sea cumplido en su totalidad.

La segunda etapa corresponde a la planificación diaria para cumplir el plan generado en la etapa anterior. En este caso la función objetivo es minimizar la diferencia cuadrática entre lo planificado y lo realizado, sujeto a los rendimientos de cada frente, y a la simultaneidad de frentes.

Programación diaria

Función objetivo 2:

$$\text{Min} \sum_{i=1}^n (T'_i - TC_i)^2$$

Con

$$TC_i = \sum_{t=1}^m x_{i,t}$$

en que TC_i corresponde al avance acumulado en la frente "i" al tiempo "t", $x_{i,t}$ es la respuesta al modelo de planificación diario, y T'_i es el techo al cual se quiere llegar según el plan que viene de la etapa anterior.

Los datos de entrada para esta segunda etapa son:

- F_i : frente de trabajo.
- $T'_i[m]$: corresponde al plan determinado en la etapa de optimización anterior para la frente i , que es la meta a cumplir en esta segunda etapa.
- M_i : corresponde a la mina en que se encuentra la frente i .
- N_i : corresponde al nivel en que se encuentra la frente i .

Las restricciones a este problema son el rendimiento de cada frente, es decir:

$$x_i \leq \text{Rendimiento frente } i \left[\frac{m}{\text{día}} \right]$$

además de la simultaneidad de las frentes, puesto que por período de tiempo es posible excavar un número máximo de frentes simultáneamente. Esto último se controla mediante una variable binaria (F'_i), cuyo valor es 1 si la frente F_i será activada en el período, o un 0 en caso contrario. Luego,

$$\sum_{i=1}^n (F'_i) \leq \text{Máx. N}^\circ \text{ de frentes simultáneamente}$$

El objetivo de esta segunda etapa es minimizar la brecha entre lo planificado y lo realizado, arrojando una secuencia de explotación que cumpla con todos los requerimientos y con las metas de producción. De esta forma se obtiene el plan minero diario, asegurando el beneficio maximizado en la primera etapa de optimización, asegurando también la cantidad de kilates planificada, y respetando todas las restricciones aplicadas de presupuesto y operacionales.

5.4 Reconciliación

La reconciliación consiste en aumentar la exactitud de la planificación en la mina basándose en la medición del desempeño de la operación versus lo planificado al inicio de un período. Esta medición es reflejada en indicadores cuyo análisis ayuda a mejorar el conocimiento del yacimiento y de las falencias que se puedan tener en la operación, pudiendo en muchos casos encontrar una explicación para éstas y proponer soluciones para la mejora de los problemas. En una operación convencional - por ejemplo de minería de cobre, oro o plata - el principio de la reconciliación se basa principalmente en la comparación de tonelaje y leyes estimadas (en una predicción anterior a los resultados operacionales), con el tonelaje y leyes medidas (posterior a la producción). Para el caso de la minería de esmeraldas es análogo, salvo que los participantes serán

principalmente los metros de avance, la cantidad de kilates producidos, los kilates estimados y la interpretación geológica.

La realización de reconciliaciones periódicas es una etapa importante en la operación de una faena pues es una buena forma de monitorear el desempeño y mejorar estimaciones de manera retroalimentativa, con el fin de obtener un mejoramiento continuo en los resultados de estas mismas, ya que la obtención de resultados desfavorables en la reconciliación significa que los recursos no están siendo aprovechados, generando que las metas planificadas sean inalcanzables no pudiendo cumplir los compromisos con inversionistas y compradores del producto final.

La reconciliación contará con una serie de etapas que se pueden definir en los cuatro puntos siguientes a realizar semanalmente:

- Tener un ordenado y eficiente control de datos manejando tablas con la información. Esta información se refiere a los reportes diarios de producción, sumado a los reportes de incidentes provenientes de la mina. Poseen información detallada sobre la extracción de carros, avance medido en metros, estimación de cantidad de kilates, e incidentes ocurridos durante la jornada de trabajo, todo para cada una de las frentes de cada sector de la mina. Por otro lado se encuentra la reconciliación mina-planta, la cual regula la producción de kilates.

La reconciliación mensual debe proporcionar además de las diferencias por debajo de lo planificado, cualquier desviación de carácter de adelanto, es decir realizado sin haber sido planificado.

Por último, se debe hacer una reconciliación de la interpretación geológica en base a los resultados obtenidos, corroborar que la producción sea consistente al modelo geológico que se maneja.

- Generar gráficos de las diferencias. Son útiles para poder interpretar las diferencias encontradas entre lo planificado y lo realizado y poder comunicarlo de forma más ilustrativa a todos los participantes de la planificación y de la operación.
- Reportar y explicar diferencias: es importante que toda diferencia encontrada sea comunicada a todas las partes involucradas, que se realicen reportes de éstas y en caso que sea posible incorporar la explicación a cada una de ellas. Luego de identificar los problemas se debe actuar rápidamente para solucionarlos.

La reconciliación mina planta no puede ser realizada frente a frente ya que una vez que el mineral entra a la planta de selección, no se puede identificar la procedencia de éste, pero si se puede hacer de manera global.

- Tomar medidas. Una vez identificadas las desviaciones y posibles explicaciones a ellas, se deben tomar medidas de modo de disminuirlas o eliminarlas desde su fuente de origen.

La reconciliación mensual se realiza en base a los planes de producción, en los cuales se tiene la meta productiva del mes, tanto para kilates, metros de avance por frente, y extracción de carros asociados, estos dos últimos son reconciliados con la información proveniente de los reportes de producción enviados diariamente desde la mina. Para los kilates, la información de estas últimas fuentes se cruza con los reportes enviados por la CTT (Colombiano Texas Transformadora) que contienen informes de los pesos de la producción de material esmeraldífero de la mina. La información enviada por la CTT corresponde al peso real de la producción, es información inmodificable por lo tanto con respecto a estos pesos se reconcilia la producción y se pueden recalcular las estimaciones de modo de obtener una mejora continua en el sistema pudiendo estimar con más precisión los sectores de interés a futuro. Pues las estimaciones de pesos de la producción de la mina, se realiza de forma cualitativa por volumen, dependiendo de la fracción de bolsa que ocupa el material producido, separándose este entre chispero, morralla y muestras en distintas bolsas. El resultado de esto último, se traduce en curvas de llenado de las bolsas construidas en base a la información disponible del año 2010, de modo que las estimaciones sean cada vez más exactas.

Tabla 16: Curvas de llenado bolsas de producción.

Fracción de bolsa	N° Carates		
	Pequeña	Mediana	Grande
1/12	10	120	300
1/10	130	250	500
1/8	200	400	650
1/7	220	550	800
1/6	250	750	1000
1/5	300	1000	1200
1/4	700	1500	2000
1/3	1000	2000	5000
1/2	1500	4000	8500
3/4	2000	8000	12700

Las bolsas son de material plástico transparente, las dimensiones se detallan a continuación:

Tabla 17: Dimensiones bolsas de producción.

Bolsa	Ancho [cms]	Alto [cms]
Pequeña	12	13
Mediana	20	22.5
Grande	28	25.5

El objetivo es que toda esta información en conjunto se utilice para obtener una retroalimentación del sistema a través del andar, dando pie para determinar las metas de

producción posibles para los períodos siguientes, utilizándose para ajustar las estimaciones de producción con los histogramas de leyes que ayudan a guiar la planificación.

6 CASO DE APLICACIÓN Y RESULTADOS

El sistema se implementó para el mes de Octubre. Se realiza una comparación entre los resultados obtenidos en la operación del mes de Octubre con respecto a los resultados esperados a obtener para el mismo mes según la planificación propuesta por el sistema de control producción.

Para la aplicación se han utilizado los valores de restricciones operacionales y de costos detallados en los capítulos anteriores.

La herramienta que se utiliza para realizar las optimizaciones es la aplicación Solver de Microsoft Excel.

Como precio de las esmeraldas producidas se considera lo siguiente (el material de tipo muestras no ha sido utilizado para la valorización de la producción, en ninguno de los casos):

Tabla 18: Precio kilates para caso de aplicación

Calidad	US\$/carate
Chispero	2.000
Morralla	250

6.1 Planificación mes de Octubre 2010 (caso real)

En la tabla siguiente se muestra la meta del plan de producción del mes de Octubre, la cual se grafica posteriormente como plan minero en la Figura 49. En el anexo D se puede ver un mayor detalle de las características de cada frente.

Tabla 19: Planificación mes de Octubre 2010

Mina	Nivel	Frente	Plan [mts]
PA	12s1	CX01 Sur	4.90
PA	12s1	C01N	4.90
PA	12s1	C01S	2.10
PA	11.5	Conex 12	4.00
CAT	11	CL01	6.00
CAT	11	CX08 E	9.10
CAT	11	Central A	6.30
CAT	11	CX01 W	1.40
TQ	TQ80	CX01 N	7.70
TQ	60	CL02	3.50
TQ	60	CL04	6.00
TQ	R1inf	C01	8.40
TQ	R1inf	C03	4.90
TQ	R1inf	Central B2	6.30
TQ	S1 R1inf	Ext. de pilar	0.00
TQ	S1 R1inf	Const. Sillpil	0.00
TQ	S1 R1inf	A02	2.80
TQ	S1 R1inf	A04	2.80
TQ	S1 R1inf	Central B2	8.40
TQ	S1 R1inf	B01	4.20
TQ	S1 R1inf	B03	4.20
TQ	S1 R1inf	B02	2.80
TQ	S1 R1inf	Bloque C	9.80

El plan minero siguiente corresponde a la planificación del mes de Octubre de 2010, en la leyenda cada serie representa una frente codificada de la siguiente forma: Mina_Nivel_Frente. El plan fue realizado con fecha de inicio el 4 de Octubre.

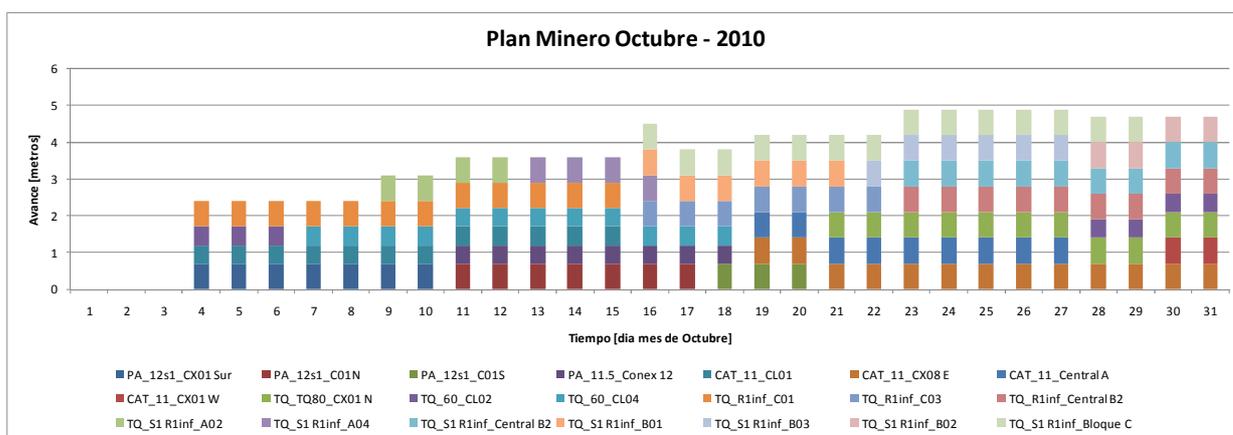


Figura 49: Plan minero Octubre 2010

6.2 Reconciliación operación mes de Octubre 2010 (caso real)

Para el mes de Octubre de 2010 se tenía una meta de producción de esmeraldas de 20.000 kilates estimando esta producción en 4.000 kilates de chispero, 6.000 de morralla y 6.000 de muestras, los cuales se estimó aportarían un valor de MUS\$ 4,75, provenientes de 3.055 carros y 110.5 metros de avance en trabajos que involucran preparación minera, producción de avance y exploración. El plan consideró el trabajo en 7 cuadrillas en operaciones mineras y 1 en mantención. Como resultado se produjo un total de 10.084 kilates, estimándose 1.008 kilates de chispero y 2.017 de morralla, alrededor del 50% esperado a producir pese a que se sobrepasaron las metas de carros extraídos y metros de avance, y trabajándose el 63% del tiempo con 7 cuadrillas. A continuación se presenta un detalle de los avances realizados al final del período y sus desviaciones.

Tabla 20: Planilla Reconciliación metros, mes de Octubre

Mina	Nivel	Frente	Realizado	Planificado	Desviación (+ o -)
PA	12s1	CX01 Sur	3.0	4.9	-38.8%
PA	12s1	C01N	1.5	4.9	-69.4%
PA	12s1	C01S	5.1	2.1	142.9%
PA	11.5	Conex 12	18.6	4	365.0%
CAT	11	CL01	6.9	6	15.0%
CAT	11	CX08 E	0.0	9.1	-100.0%
CAT	11	Central A	8.4	6.3	33.3%
CAT	11	CX01 W	7.0	1.4	400.0%
TQ	TQ80	CX01 N	8.5	7.7	10.4%
TQ	60	CL02	1.3	3.5	-62.9%
TQ	60	CL04	10.0	6	66.7%
TQ	R1inf	C01	9.4	8.4	11.9%
TQ	R1inf	C03	3.5	4.9	-28.6%
TQ	R1inf	Central B2	2.1	6.3	-66.7%
TQ	S1 R1inf	Extracción de pilar	3.4	0	-
TQ	S1 R1inf	Const. Sill pillar	0.0	0	-
TQ	S1 R1inf	A02	5.7	2.8	103.6%
TQ	S1 R1inf	A04	6.4	2.8	128.6%
TQ	S1 R1inf	Central B2	4.0	8.4	-52.4%
TQ	S1 R1inf	B01	14.2	4.2	238.1%
TQ	S1 R1inf	B03	5.7	4.2	35.7%
TQ	S1 R1inf	B02	4.6	2.8	64.3%
TQ	S1 R1inf	Bloque C	14.2	9.8	44.4%
PA	-	Rehab. clavada Puerto	0.0	0	-
General Mina	-	Mantencion	0.0	0	-
Total			143.5	110.5	29.8%

De la tabla anterior se desprende que se sobrepasa en un 29,8% la cantidad de metros realizados en la totalidad del período (mes de Octubre), sin embargo no se cumple la meta

productiva de 20.000 kilates. Además de sobrepasar con creces la meta de metros de avance en algunas frentes, se ve que hay otras en que el resultado está por debajo de lo esperado, esto debido a que el plan estuvo realizado solamente en base a la caracterización de frentes finalizado el mes anterior, por lo que hay casos en que a medida que se avanza por una frente, se nota que la mineralización no continúa por lo que se abandonan, lo cual deja entrever que teniendo un mejor conocimiento de las zonas mineralizadas, esta situación disminuiría. Como resultado de la operación del mes se tiene que se extrajeron 30 tulas, 4.381 carros (43% sobre el plan) con un promedio de 162 carros/día (58 tpd), y se avanzó 143.45 metros (29.8% sobre el plan) a un promedio de 5.3 m/día. Las principales actividades corresponden a exploración y preparación en los niveles Tequendama 60, Tequendama R1Inf, Tequendama SubR1Inf, Catedral 11, Puerto Arturo 11.5 y 12s1 y Volveré 10. Las actividades en Puerto Arturo tuvieron que ser suspendidas en el último tercio del mes por problemas en el pique principal por lo que se privilegiaron actividades en frentes de Tequendama. El costo asociado a los metros avanzados por el plan corresponde a US\$ 354.900, superándose este en un 29% alcanzando los US\$ 450.750.

6.3 Aplicación del sistema al mes de Octubre 2010 (caso modelado).

Se aplican las etapas de optimización para el mes de Octubre, para el cual se obtiene el siguiente plan de la primera etapa de optimización:

Tabla 21: Plan Obtenido de Primera Optimización

Mina	Nivel	Frente	Ti (m)
TQD	R1I	B-05	4
TQD	R1I	B-03	5
TQD	R1I	PG1	8
TQD	SR1inf	B2sn	5
TQD	SR1inf	B2sn_i	16.2
TQD	SR1inf	Pique	8
TQD	SR1inf	PR	11
TQD	SSR1	CN	8
TQD	SSR1	CS	8
TQD	SSR1	E1	9.5
TQD	SSR1	E2	9.5
TQD	SSR1	E3	9.5
TQD	SSR1	E4	9.5
PA	12	CX02	7
PA	PA12	Pique A2	5
CAT	11	CX01	5
Total metros			128.2

Se llega a un total de 128.2 metros de avance para el mes, asociados a 3,846 carros, produciendo un total de 1,181 kilates de chispero y 3,219 kilates de morralla, producción que se traduce en un beneficio total de MUS\$ 1.58, a un costo de kUS\$ 437 asociados a metros de avance y carros extraídos.

Con respecto a los kilates producidos, se supone que la calidad de los kilates a obtener se sabe antes de realizar la optimización, luego para valorizarlos sólo se ponderan por el 50% de recuperación resultante luego de la talla y luego por el valor.

Para la segunda etapa se ha considerado que el mes tiene 28 días, la secuencia de extracción obtenida se muestra en la figura siguiente, en que en el eje de las abscisas se tienen las frentes de explotación y en el eje de las ordenadas los metros de avance. Cada serie corresponde a un período de una semana, se muestra así para facilitar la visualización. Se puede ver que al finalizar el último período, representado por la línea celeste, se cumple el plan. El plan está representado por la línea roja punteada. Es decir, se cumple el objetivo que es alcanzar la meta determinada por la etapa anterior.

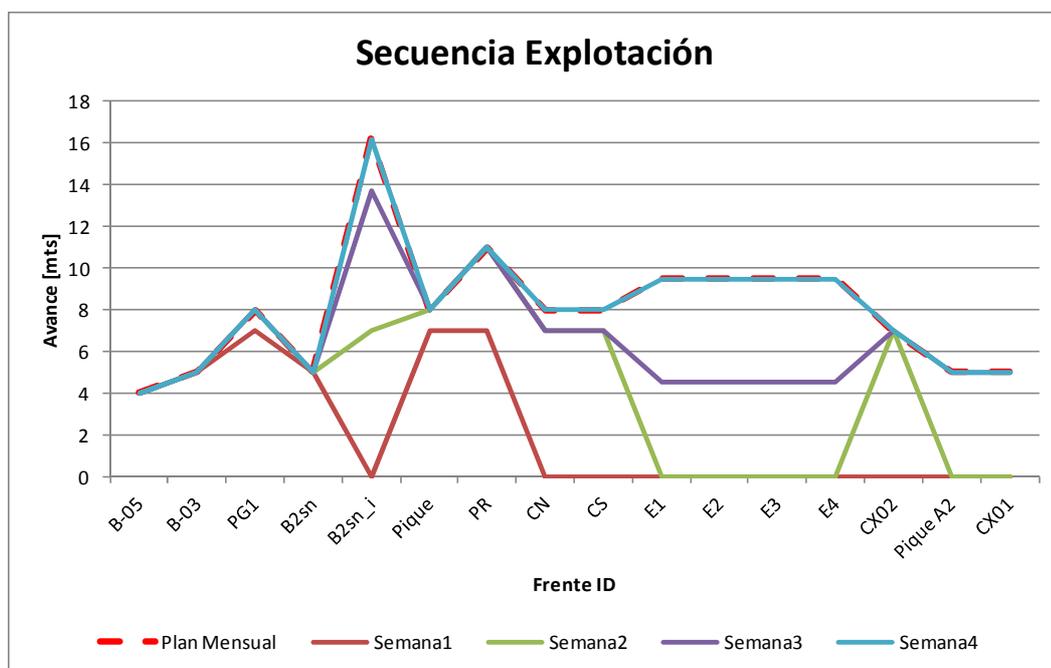


Figura 50: Resultado Secuencia de Explotación al aplicar método en mes de Octubre.

Lo anterior se traduce en el plan minero siguiente.

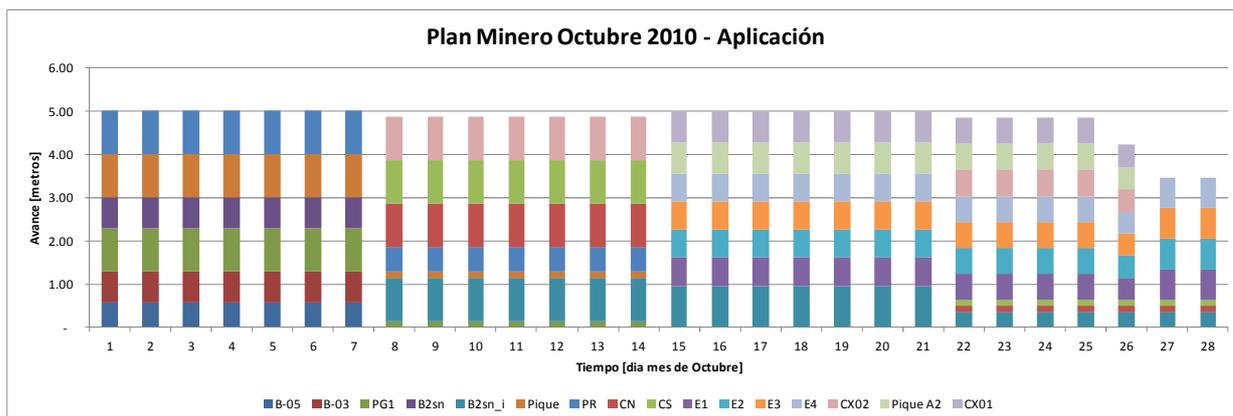


Figura 51: Plan Minero resultante de aplicación del método.

Se ve que el máximo de avance por día corresponde a 5 metros, lo que corresponde a aproximadamente la mitad de la capacidad de la mina, y sin embargo se cumple la meta productiva. Esto indica que además de cumplirse el plan, respetando todas las restricciones impuestas, existe una holgura que puede ser aprovechada para agendar mantenencias a principio del mes, lo cual evitaría en gran medida una serie de inconvenientes que se pueden producir debido a fallas en equipos, inundaciones por mal funcionamiento de bombas, o misiles¹⁴ que periódicamente presentan fallas por obstrucciones que con mantenimiento periódico se podrían evitar.

Lo descrito anteriormente como resultado de ambos casos se presenta en la tabla a continuación:

Tabla 22: Resultados Octubre 2010 v/s Plan Propuesto.

	Planificado mes de octubre 2010	Realizado mes de Octubre 2010	Propuesta para mes de Octubre 2010
Avance [mts]	110.5	143.5	128.2
N° carros	3,055	4,381	3,846
Carates chispero	4000	1008	1,181
Carates morralla	6000	2017	3,219
Costo asociado [USD]	354,900	450,750	437,350
Valor producción [MUSD]	4.75	1.26	1.58

De lo anterior se desprende que el plan del mes de Octubre es similar al propuesto, la diferencia es que el cumplimiento de este plan en cuanto al valor aportado por la producción fue de un 27% luego del término del mes, por lo que el resultado esperado difiere bastante de la realidad. En cambio el plan realizado en base al sistema promete ser cumplido, lo que significaría un valor de la producción un 26% mayor al obtenido.

¹⁴ Bombas sumergibles

7 CONCLUSIONES Y RECOMENDACIONES

Luego de la realización del trabajo, se concluye que existe la posibilidad de integrar información de diferentes fuentes para realizar la planificación minera. En este caso los estudios geofísico y geoquímico cumplen un rol importante como guía de planificación, junto con un buen conocimiento geológico del yacimiento, además de la información proveniente de la operación de la mina, como también rendimientos y costos, información aplicable en las restricciones del problema.

Es posible generar un plan de producción que cumpla con requerimientos de distinto origen. Partiendo por cumplir el objetivo principal de maximizar el beneficio. Las restricciones aplicadas en este caso se realizan en base a la información disponible de la mina de Muzo y sus características, por lo que se deja propuesta la aplicación de este mismo sistema con la adición o sustracción de ciertas restricciones, dependiendo del caso.

Se concluye también que la realización de planes de producción puede convertirse en un proceso automatizable, lo cual significa una mayor rapidez y robustez en este proceso. Además de incorporar la cuantificación de la preparación minera para cumplir la producción.

Los resultados del caso de aplicación, dan cuenta que utilizando el método propuesto se tiene una mejor utilización de los recursos, aplicando todos los conocimientos que se tienen de la mina, de modo de no destinar recursos materiales ni humanos a sectores poco prometedores. Esto da pie a que exista holgura en los planes de producción, la cual puede ser utilizada para agendar mantenimientos y reparaciones a priori, con lo cual se evitarían una serie de imprevistos e inconvenientes que a menudo interrumpen la operación.

La reconciliación compara lo medido con lo estimado, siendo una buena herramienta para lograr un mejoramiento continuo ya que además de ayudar a detectar desviaciones, se ha utilizado para ajustar estimaciones de información que vuelve a entrar al sistema de forma retroalimentativa como se hizo con la estimación de kilates. Es una forma de obtener indicadores operacionales, que sirven de base para el cálculo de planes de producción. Esta reconciliación se mide como parte del sistema de control producción mina, actividad que no ocurría anteriormente.

El sistema arroja resultados satisfactorios por lo cual se recomienda la utilización de este, luego se propone realizar estudios geofísicos y geoquímicos acabados para complementar aún más la información, ya que los estudios existentes fueron realizados para ciertas zonas con el fin de estudiar la aplicabilidad de los métodos a la mina.

Cabe destacar que anterior a este trabajo, nunca existió una noción de planificación minera en la mina, luego se considera un gran aporte para este tipo de minería.

REFERENCIAS

RUBIO, E. y DIERING, T. Block cave production planning using operations research Tools. En: MassMin 2004, pp. 141-149.

TRONCOSO, S. Confiabilidad de programas de producción en sistemas mineros subterráneos complejos. Tesis (ingeniero civil de minas). Santiago, Chile. Universidad de Chile, Facultad de Ciencias Físicas y Matemáticas, 2009.

RUBIO, E. Market Driven Mine Planning: Optimizing Products Portfolio, Muzo Emerald Mine Case Study. MinePlanning 2011.

SAMOSIR, E., BRANNON, C., y DIERING, T. Implementation of cave management system (CMS) tools at the Freeport DOZ Mine. En: MassMin 2004, pp. 513-517.

ORTIZ, C., VARAS, S., VERA, J. Optimización y modelos para la gestión. Dolmen Ediciones, 2004.

GAVRILENKO, E. Esmeraldas de los Urales: Condiciones de formación y caracterización comparativa con Esmeraldas de otros orígenes. Universidad de Madrid, 2003.

DEER, W.A., HOWIE, R. A., ZUSSMAN, J.; 1996. An Introduction to the Rock-Forming Minerals. Second Edition.

AMAYA, G. Producción de Esmeraldas en Muzo Boyacá durante el Radicalismo Colombiano. Siglo XIX. Artículo de investigación científica Universidad Pedagógica y Tecnológica de Colombia, 2006.

BRANQUET Y., LAUMONIER B., LOPES B., CHEILLETZ A., GIULIANI G., RUEDA F.; 1996: Evidences of compressive structures in the Muzo and Coscuez emerald deposits, eastern cordillera of Colombia. Third ISAG. 675-677 pp. St. Malo, France.

HERNÁNDEZ L., 2009: Reconocimiento geológico preliminar de las minas de esmeraldas de Coexminas, Muzo, Colombia. Informe interno REDCO. Santiago, Chile. 28 pp.

REYES G., MONTOYA D., TERRAZA R., FÚQUEN J., MAYORGA M.; 2006: Geología del cinturón esmeraldífero occidental. Escala 1:100 000. Instituto Colombiano de Geología y Minería. Colombia.

INGEOMINAS, 2003: Mapa potencial para esmeraldas. Escala 1:500.000. Plancha 5-09. Colombia.

INGEOMINAS, 1987. Recursos minerales de Colombia, Segunda Edición. Tomo II, Minerales preciosos, Rocas y minerales no metálicos, Recursos energéticos.

GROAT L. & LAURS B.; 2009: Gem formation, production, and exploration: Why gem deposits are rare and what is being done to find them. Elements, Vol. 5, 153-158pp

MENDOZA P.G.A., 1991. Exploración zona de reserva nacional para esmeraldas Muzo-Coscuez, Boyacá, área suroriental. En: Maya, M., Buenaventura, J., Salinas, R., 2004. Estado del conocimiento de la exploración de esmeraldas en Colombia. INGEOMINAS.

HOAL, K., STAMMER, J., APPLEBY, S., BOTHA, J., ROSS, J. y BOTHA, B.; 2009. Research in quantitative mineralogy: Examples from diverse applications

Instituto Colombiano de Geología y Minería, INGEOMINAS. Fecha visita: 14 de Octubre de 2010.

NGC, National Gemstone (www.preciousgemstones.com). Fecha visita: 14 de Octubre de 2010.

WALTON, L.; 2004. Exploration criteria for Coloured Gemstone Deposits in the Yukon. Energy, mines and Resources. Yukon Geological Survey. Tigerstar Geoscience. 57-103pp

Anexos

Anexo A: Imágenes de la mina de Muzo

Se anexan imágenes de modo de ilustrar ciertas características y situaciones mencionadas en el documento. Las primeras corresponden a fortificación y ventilación. Se puede ver las puertas de madera y las uniones que poseen plátinas que se ubican en los vértices de intersección de columnas y tablas de madera.



Figura 52: Puertas para fortificación



Figura 53: Plátinas de soporte para fortificación

A continuación se muestra el tamboreo en el interior del pique de Tequendama, pique por el cual descende el malacate principal de esta mina. En la figura de la derecha se observan las mangas de ventilación en el extremo superior derecho.



Figura 54: Interior pique de acceso mina Tequendama



Figura 55: Vista de mangas de ventilación



Figura 56: Veta mineralizada



Figura 57: Correa en planta de lavado



Figura 58: Lavado manual de mineral

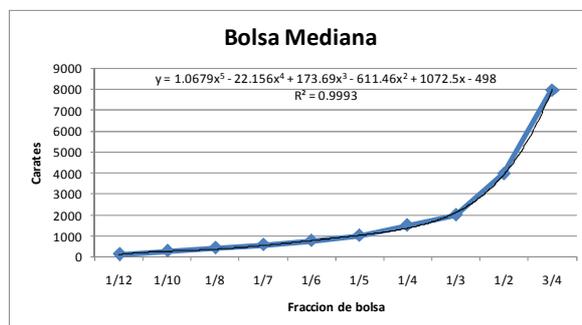
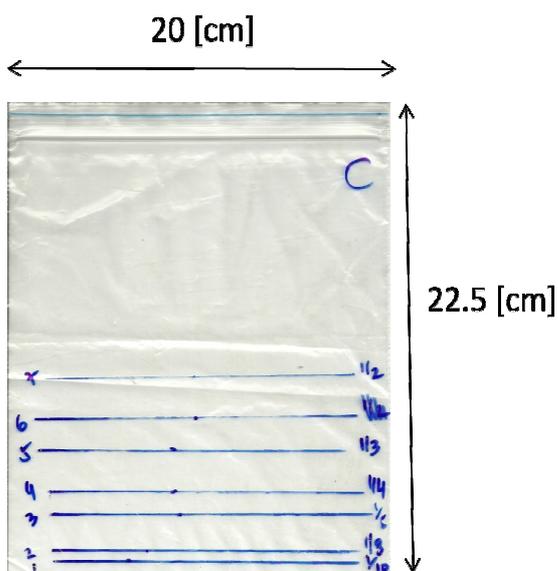
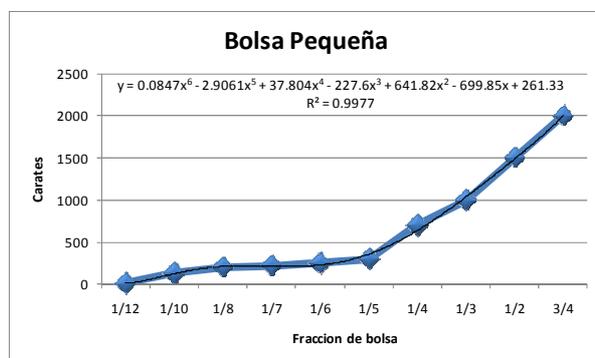
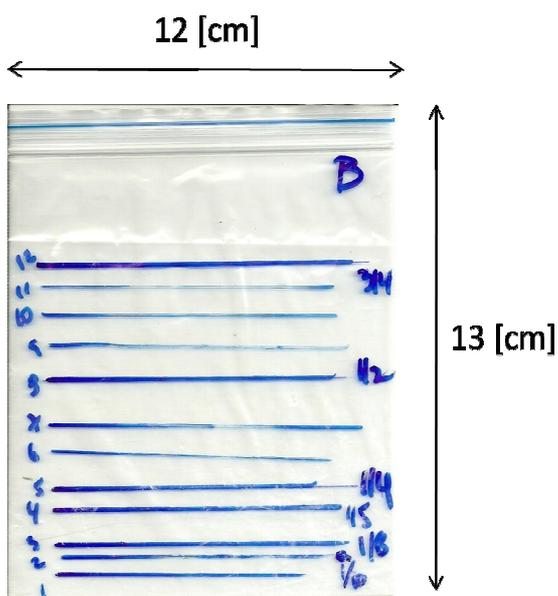
Anexo B: Base de Datos

En el presente anexo se muestra un extracto de la base de datos de control producción mina.

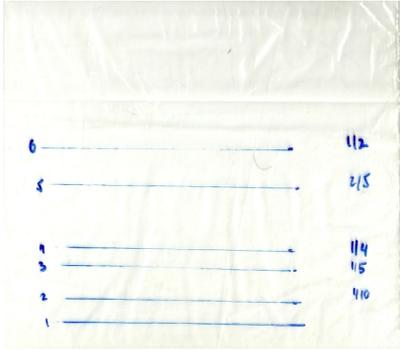
Fecha	Mina	Nivel	Frente	N° Tulas	Descripción	CH	MO	MU	CARROS	Avance [mts]	Geología	Geotecnia	Tipo	Actividad
16-11-10	TQD	S1R1inf	B-CX01						38	0.73	6	3	Galería	Prep Minera
16-11-10	TQD	S2R1inf	A-CX01						26	0.43	4	3	Galería	Desarrollo
16-11-10	TQD	R1inf	C-HW						39	0.5	6	3	Galería	Prod Avance
16-11-10	CAT	11	A-HW						19	0.5	6	3	Galería	Prod Avance
17-11-10	PA	12s1	A-CX03						57	2.3	6	3	Galería	Prod Avance
17-11-10	TQD	R1inf	CL04						23	0	1	1	Pique	Desarrollo
17-11-10	TQD	R1inf	B2-FW	1	Morralla 10% chispero (1/4 b peq)	80	720		22	1	10	3	Galería	Prod Avance
17-11-10	TQD	S1R1inf	B-CX01						17	0.9	6	3	Galería	Prep Minera
17-11-10	TQD	S2R1inf	A-CX01						28	1.4	6	3	Galería	Desarrollo
17-11-10	TQD	R1inf	C-HW						20	0.8	6	3	Galería	Prod Avance
17-11-10	CAT	11	CL01						17	0	3	3	Pique	Desarrollo
18-11-10	PA	12s1	A-CX03						39	1.7	6	3	Galería	Prod Avance
18-11-10	TQD	R1inf	CL04						14	0	1	1	Pique	Desarrollo
18-11-10	TQD	R1inf	B2-FW						22	0.8	6	3	Galería	Prod Avance
18-11-10	TQD	S1R1inf	B-CX01	1	Chispero (1/2 b grande)	5000			17	0.6	10	3	Galería	Prep Minera
18-11-10	TQD	S2R1inf	A-CX01						26	0.9	10	3	Galería	Desarrollo
18-11-10	TQD	S1R1inf	C-FW						31	2	6	3	Galería	Prod Avance
18-11-10	CAT	11s	A-CX01						19	0.5	3	3	Pique	Desarrollo
19-11-10	PA	12s1	A-CX03						32	0.5	6	3	Galería	Prod Avance
19-11-10	TQD	R1inf	CL04								1	1	Pique	Desarrollo
19-11-10	TQD	R1inf	B2-FW	1	Morralla (1/4 b peq), 30% chispero	180	420		25	0.7	10	3	Galería	Prod Avance
19-11-10	TQD	S1R1inf	B-CX01	2	Chispero (3/4 b gde); (1/2 b gde)	11600			21	0.7	10	3	Galería	Prep Minera
19-11-10	TQD	S2R1inf	A-CX01						32	1.5	6	3	Galería	Desarrollo
19-11-10	TQD	S1R1inf	C-FW						28	1	6	3	Galería	Prod Avance
19-11-10	CAT	11s	A-CX01						9	0.4	3	3	Pique	Desarrollo
20-11-10	PA	12s1	A-CX03						27	1.5	6	3	Galería	Prod Avance
20-11-10	TQD	R1inf	CL04						11	1.72	1	1	Pique	Desarrollo
20-11-10	TQD	R1inf	B2-FW						5	0	6	3	Galería	Prod Avance
20-11-10	TQD	S1R1inf	B-CX01	1	Chispero (1/4 b gde)	2000			20	0.87	10	3	Galería	Prep Minera

Anexo C: Reconciliación

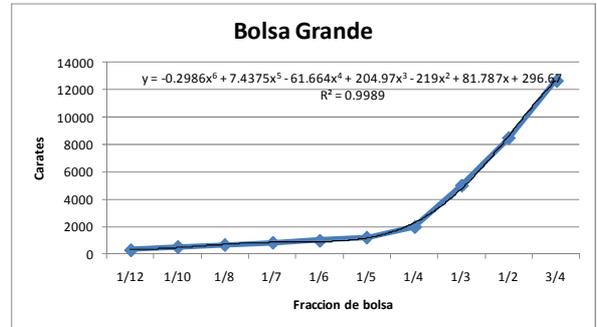
A continuación se muestran las bolsas de producción con sus respectivas dimensiones y marcas de llenado. A la derecha de cada una de ellas se presenta la curva de llenado que se ha construido en base a la reconciliación de la producción de kilates. Sobre la curva de llenado se puede ver la ecuación que mejor representa la curva, que en cada una de ellas se ajusta a una función polinomial.



28 [cm]



25.5 [cm]



Anexo D: Anexo Capítulo 6

En la tabla siguiente se muestra la planificación efectivamente realizada para el mes de Octubre de 2010. Se detallan las características de dureza (dura (D) o blanda (B)) y orientación (horizontal (H) o vertical (V)) de las labores, así como también el costo asociado a ellas en las últimas dos columnas.

Mina	Nivel	Frente	H o V	Roca D o B	H o V y roca	Ci (\$/m)	Plan [mts]	Realizado [mts]	USDplan	USDreal	
PA	12s1	CX01 Sur	H	B	HB	\$ 2,400	4.90	3.00	\$ 11,760	\$ 7,200	
PA	12s1	C01N	H	B	HB	\$ 2,400	4.90	1.50	\$ 11,760	\$ 3,600	
PA	12s1	C01S	H	B	HB	\$ 2,400	2.10	5.10	\$ 5,040	\$ 12,240	
PA	11.5	Conex 12	H	B	HB	\$ 2,400	4.00	18.60	\$ 9,600	\$ 44,640	
CAT	11	CL01	V	D	VD	\$ 6,900	6.00	6.90	\$ 41,400	\$ 47,610	
CAT	11	CX08 E	H	B	HB	\$ 2,400	9.10	0.00	\$ 21,840	\$ -	
CAT	11	Central A	H	D	HD	\$ 3,500	6.30	8.40	\$ 22,050	\$ 29,400	
CAT	11	CX01 W	H	B	HB	\$ 2,400	1.40	7.00	\$ 3,360	\$ 16,800	
TQ	TQ80	CX01 N	H	D	HD	\$ 3,500	7.70	8.50	\$ 26,950	\$ 29,750	
TQ	60	CL02	V	B	VB	\$ 4,900	3.50	1.30	\$ 17,150	\$ 6,370	
TQ	60	CL04	V	D	VD	\$ 6,900	6.00	10.00	\$ 41,400	\$ 69,000	
TQ	R1inf	C01	H	B	HB	\$ 2,400	8.40	9.40	\$ 20,160	\$ 22,560	
TQ	R1inf	C03	H	B	HB	\$ 2,400	4.90	3.50	\$ 11,760	\$ 8,400	
TQ	R1inf	Central B2	H	D	HD	\$ 3,500	6.30	2.10	\$ 22,050	\$ 7,350	
TQ	S1 R1inf	A02	H	B	HB	\$ 2,400	2.80	5.70	\$ 6,720	\$ 13,680	
TQ	S1 R1inf	A04	H	B	HB	\$ 2,400	2.80	6.40	\$ 6,720	\$ 15,360	
TQ	S1 R1inf	Central B2	H	B	HB	\$ 2,400	8.40	4.00	\$ 20,160	\$ 9,600	
TQ	S1 R1inf	B01	H	B	HB	\$ 2,400	4.20	14.20	\$ 10,080	\$ 34,080	
TQ	S1 R1inf	B03	H	D	HD	\$ 3,500	4.20	5.70	\$ 14,700	\$ 19,950	
TQ	S1 R1inf	B02	H	B	HB	\$ 2,400	2.80	4.60	\$ 6,720	\$ 11,040	
TQ	S1 R1inf	Bloque C	H	B	HB	\$ 2,400	9.80	14.15	\$ 23,520	\$ 33,960	
Totales								110.5	143.45	\$ 354,900	\$ 450,750

En la tabla a continuación se muestra el detalle de la planificación utilizando el método, especificando kilates, costos, avances, y beneficio asociado a cada frente.

Mina	Nivel	Frente	Li chispero [carates]	Li morralla [carates]	Valor [USD/carat]	Ti [m]	H o V	Roca D o B	H o V y roca	Ci [US\$/m]	Costo_tot [US\$]	Beneficio [USD]
TQD	SR1inf	B2sn	194	581	\$ 266,063	5	H	B	HB	\$ 2,400	12,000	\$ 266,063
TQD	SR1inf	B2sn_i	194	581	\$ 266,063	16.2	H	D	HD	\$ 3,500	56,700	\$ 266,063
TQD	SSR1	CN	194	581	\$ 266,063	8	H	D	HD	\$ 3,500	28,000	\$ 266,063
TQD	SSR1	CS	194	581	\$ 266,063	8	H	D	HD	\$ 3,500	28,000	\$ 266,063
TQD	R1I	B-05	0	44	\$ 5,500	4	H	D	HD	\$ 3,500	14,000	\$ 5,500
TQD	R1I	B-03	57	142	\$ 74,781	5	H	B	HB	\$ 2,400	12,000	\$ 74,781
TQD	SR1inf	Pique	70	50	\$ 76,250	8	V	D	VD	\$ 6,900	55,200	\$ 76,250
TQD	SSR1	E1	70	50	\$ 76,250	9.5	H	D	HD	\$ 3,500	33,250	\$ 76,250
TQD	SSR1	E2	70	50	\$ 76,250	9.5	H	D	HD	\$ 3,500	33,250	\$ 76,250
TQD	SSR1	E3	70	50	\$ 76,250	9.5	H	D	HD	\$ 3,500	33,250	\$ 76,250
TQD	SSR1	E4	70	50	\$ 76,250	9.5	H	B	HB	\$ 2,400	22,800	\$ 76,250
TQD	SR1inf	PR	0	57	\$ 7,125	11	H	B	HB	\$ 2,400	26,400	\$ 7,125
TQD	R1I	PG1	0	57	\$ 7,125	8	H	B	HB	\$ 2,400	19,200	\$ 7,125
PA	12	CX02	0	97	\$ 12,094	7	H	B	HB	\$ 2,400	16,800	\$ 12,094
PA	PA12	Pique A2	0	75	\$ 9,375	5	V	D	VD	\$ 6,900	34,500	\$ 9,375
CAT	11	CX01	0	175	\$ 21,875	5	H	B	HB	\$ 2,400	12,000	\$ 21,875
Totales			1,181	3,219	1,583,375	128.2						\$ 1,583,375