



UNIVERSIDAD DE CHILE  
FACULTAD DE CIENCIAS FISICAS Y MATEMATICAS  
DEPARTAMENTO DE INGENIERA DE MINAS

ESTUDIO DE EVALUACIÓN ECONÓMICA DE UNA SECUENCIA MINERA PARA  
UN MODELO DE *STOCK PILE* GENERADO BAJO SIMULACIÓN CONDICIONAL

TESIS PARA OPTAR AL GRADO DE MAGISTER EN MINERIA

SAUDITH MARCELA TORRES MONTIEL

PROFESOR GUIA  
JOSE CHARANGO MUNIZAGA-ROSAS

MIEMBROS DE LA COMISION  
BRIAN TOWNLEY CALLEJAS  
ERNESTO ARANCIBIA VILLEGAS  
DAVID VARGAS NUÑEZ

SANTIAGO DE CHILE  
2018

RESUMEN DE TESIS PARA OPTAR  
AL GRADO DE: Magister en Minería  
POR: Saudith Marcela Torres Montiel  
FECHA: 04/05/2018  
PROFESOR GUIA: José Charango  
Munizaga-Rosas

## ESTUDIO DE EVALUACIÓN ECONÓMICA DE UNA SECUENCIA MINERA PARA UN MODELO DE *STOCK PILE* GENERADO BAJO SIMULACIÓN CONDICIONAL

El ciclo de planificación estratégica permite alinear el desempeño del plan acorde a las directrices corporativas, generando un proceso de trabajo que controla el riesgo y maximiza los resultados.

La estrategia de las empresas mineras que consideran incluir *stock* de largo plazo en los planes de vida de mina abre una ventana para generar procesos que cubren distintas etapas de la evaluación de proyectos mineros. Los *stock piles* cumplirán una función determinada para la mayor parte de las estrategias de la planificación minera, sin embargo el manejo de eso tiene asociado un costo alto de recuperación.

Este trabajo ilustra un escenario en el que se considera un *stock pile* como reserva en el LOM (*Life of Mine*), se presentan tres casos de modelación para dicho *stock* (modelo con información Histórica, modelo con muestreos y modelos de simulación condicional), se desarrolla una secuencia minera parametrizada de la misma forma para todos los casos de modelo y se evalúa económicamente el comportamiento para cada escenario, buscando ilustrar la viabilidad de un proyecto minero, basado en un *stock pile*.

## **Agradecimientos**

Realizar estudios de maestría siempre es una elección en el crecimiento profesional, aprender con los mejores académicos es una convicción. Cumplir las metas, es una aventura que vale la pena vivir y aun cuando pases por malos momentos, siempre tendrás una luz en el camino.

Gracias a Dios y a la Vida por tener la oportunidad de alcanzar una meta más.

Gracias a mi madre, Noris Montiel, por la fortaleza y tenacidad ha tenido durante todos estos años para hacer de sus hijos personas de bien.

A mi padre por apoyar a mi madre incondicionalmente y mis hermanos José y Aura por confiar en mí y cuidar de la familia en mi ausencia.

A mi esposo, Marc Focsh, por ayudarme a levantarme todas las veces que tropecé, por su amor incondicional y por su dedicación.

A José Charango Munizaga-Rosas, mi director de tesis por su tiempo, profesionalismo y humanidad, Brian Townley, Ernesto Arancibia y David Vargas, mi comisión evaluadora, por su tiempo y compromiso y a Verónica Möller y el personal administrativo del departamento de Ingeniera de Minas por hacerme sentir en casa.

## **TABLA DE CONTENIDO**

---

<b>CAPITULO 1</b>	<b>1</b>
1. INTRODUCCION	1
1.1 ANTECEDENTES	1
1.2 LITERATURA Y ESTADO DEL ARTE	3
1.2 SOBRE ESTA TESIS	5
1.4 OBJETIVOS	6
1.4.1 GENERAL	6
1.4.2 ESPECIFICOS	6
1.5 ALCANCE	6
1.6 ESTRUCTURA	7
<b>CAPITULO 2</b>	<b>9</b>
2. METODOLOGIA	9
<b>CAPITULO 3</b>	<b>11</b>
3. DESCRIPCION DEL PROBLEMA	11
3.1 LINEA BASE	11
3.2 CONDICIONES CASO DE ESTUDIO	14
3.3 CONTRUCCION DEL MODELO DE <i>STOCK PILE</i>	20
3.4 PREMISAS DEL CASO DE ESTUDIO	22
3.5 LITOLOGIA CASO DE ESTUDIO	23
<b>CAPITULO 4</b>	<b>29</b>
4. SIMULACIÓN CONDIONAL DE MODELO DE MUESTRAS	29
4.1 DESCRIPCION DE LA INFORMACION	30
4.2 ANALIS EXPLORATORIO DE LAS MUESTRAS	30
4.3 MODELO TEÓRICO DE VARIOGRAMA	34
4.4 MODELO DE LAS MUESTRAS	49
4.5 SIMULACION DE MODELOS	56
4.6 VALIDACIÓN DE LOS MODELOS SIMULADOS	63
<b>CAPITULO 5</b>	<b>71</b>

5.	PLAN MINERO	71
5.1	METODOLOGÍA PARA EL PLAN MINERO DEL MODELO HISTÓRICO	72
5.2.	METODOLOGÍA DEL PLAN MINERO PARA MODELO DE MUESTRAS Y LOS MODELOS SIMULADOS	77
5.3	ESTIMACION CAPACIDAD DE CARGUE INSTALDA Y REQUERIDA	91
5.4.	CAPACIDAD DE ACARREO INSTALDA Y REQUERIDA	93
<b><u>CAPITULO 6</u></b>		<b>96</b>
6.	ANALISIS ECONOMICO	96
6.1	ANÁLISIS ECONÓMICO MODELO HISTÓRICO	97
6.2	ANÁLISIS ECONÓMICO DE MODELO INICIAL (MUESTRAS)	99
6.3	ANÁLISIS ECONÓMICO DE LOS MODELO SIMULADOS	100
<b><u>CAPITULO 7</u></b>		<b>107</b>
7.	CONCLUSIONES	107
<b><u>CAPITULO 8</u></b>		<b>109</b>
8.	BIBLIOGRAFIA	109

## LISTA DE ILUSTRACIONES

Ilustración 1	Corrientes proceso minero. ....	3
Ilustración 2	Metodología de trabajo. ....	10
Ilustración 3	Diagrama de flujo de proceso minero tradicional. ....	12
Ilustración 4	Diagrama de flujo de proceso minero con reprocesamiento de <i>stock pile</i> . ....	13
Ilustración 5	Caso de estudio ideal. ....	14
Ilustración 6	Crecimiento de <i>stock piles</i> por diferencias topográficas. ....	15
Ilustración 7	Ley de metal y tonelaje de <i>stock Pile</i> por información histórica. ....	15
Ilustración 8	Histogramas de leyes históricas. ....	16
Ilustración 9	Modelo construido y perforaciones en el área. ....	17
Ilustración 10	Modelo de <i>stock pile</i> después de campaña de muestreo. ....	18
Ilustración 11	Ley de metal y tonelaje de <i>stock pile</i> por construcción de <i>modelo</i> . ....	18
Ilustración 12	Histograma de leyes del modelo. ....	19
Ilustración 13	Caso de estudio después de la campaña de muestreo. ....	19
Ilustración 14	Rutina creación de modelo "muestras". ....	22
Ilustración 15	Perfil de la Laterita rica en hierro y níquel. ....	26
Ilustración 16	Litología Caso de Estudio, formación de <i>stock pile</i> . ....	28
Ilustración 17	Proceso de análisis y construcción de modelos simulados. ....	29
Ilustración 18	Perforaciones campaña de muestreo. ....	31
Ilustración 19	Histograma de leyes de las muestras. ....	33
Ilustración 20	Grafico curva tonelaje – ley de las muestras. ....	33
Ilustración 21	Grafico de dispersión de las muestras. ....	34
Ilustración 22	Gráfico de variograma. ....	35
Ilustración 23	Construcción del variograma. ....	36
Ilustración 24	Gráfico modelo esférico. ....	38
Ilustración 25	Gráfico modelo exponencial. ....	39
Ilustración 26	Gráfico modelo gaussiano. ....	40
Ilustración 27	Gráfico modelo lineal. ....	41
Ilustración 28	Variograma en dirección AZ=0°. ....	42
Ilustración 29	Variograma en dirección AZ=30°. ....	42
Ilustración 30	Variograma en dirección AZ=60°. ....	43
Ilustración 31	Variograma en dirección AZ=90°. ....	44
Ilustración 32	Variograma en dirección AZ=120°. ....	44
Ilustración 33	Variograma en dirección AZ=150°. ....	45
Ilustración 34	Variograma en dirección AZ=180°. ....	46
Ilustración 35	Variograma en dirección AZ=210°. ....	46

Ilustración 36	Variograma en dirección AZ=240°.....	47
Ilustración 37	Variograma en dirección AZ=270°.....	47
Ilustración 38	Variograma en dirección AZ=300°.....	48
Ilustración 39	Variograma en dirección AZ=330°.....	49
Ilustración 40	Kriging. ....	52
Ilustración 41	Rutina en Datamine para crear modelo de las muestras. ....	56
Ilustración 42	Proceso de simulación condicional. ....	61
Ilustración 43	Histograma de las muestras. ....	64
Ilustración 44	Histograma de las simulaciones P10, P50 y P90. ....	65
Ilustración 45	Validación - gráficos cuantil-cuantil entre la distribución de leyes P10, P50 y P90 vs la correspondiente distribución de leyes de los compositos.....	66
Ilustración 46	Resumen de las estadísticas de los modelos vs las muestras. ....	67
Ilustración 47	Validación - reproducción de los semi-variogramas en dirección norte-sur. ....	68
Ilustración 48	Validación - reproducción de los semi- variogramas en dirección este-oeste. ....	69
Ilustración 49	Validación - distribución espacial de leyes para tres realizaciones P10, P50 y P90.....	70
Ilustración 50	Formación y dimensionamiento del <i>stock pile</i> . ....	71
Ilustración 51	Plan minero con fases.....	72
Ilustración 52	Plan minero con fases divididas por mes y perímetros. ....	73
Ilustración 53	Rutina evaluación de perímetros. ....	75
Ilustración 54	Resultado de evaluación de perímetros. ....	75
Ilustración 55	Ley media del material de interés para el modelo histórico. ....	76
Ilustración 56	Tonelaje de mineral y estéril para modelo histórico. ....	77
Ilustración 57	Estrategia de minería bloque a bloque en los modelos simulados.....	78
Ilustración 58	Asignación de destino y orden de salida de cada Bloque en los Modelos simulados.....	79
Ilustración 59	Salida del frente de minería.....	79
Ilustración 60	Modelos P10 y P90. ....	80
Ilustración 61	Ley media del material de interés para el modelo inicial. ....	81
Ilustración 62	Tonelaje de mineral y estéril para modelo inicial. ....	82
Ilustración 63	Ley media del material de interés para el modelo simulado P10. ....	83
Ilustración 64	Ley Media del Material de Interés para el Modelo Simulado P50. ....	83
Ilustración 65	Ley media del material de interés para el modelo simulado P90. ....	84
Ilustración 66	Resumen ley media del material de interés para	

	los modelos simulados.....	85
Ilustración 67	Rango de Ley de mineral de los modelos simulados.....	87
Ilustración 68	Tonelaje de mineral y estéril para el modelo simulado P10. ....	88
Ilustración 69	Tonelaje de mineral y estéril para modelo simulado P50. ....	88
Ilustración 70	Tonelaje de mineral y estéril para modelo simulado P90. ....	89
Ilustración 71	Resumen de tonelaje de mineral y estéril de los modelos simulados. ....	89
Ilustración 72	Rango de Toneladas de mineral para los modelos simulados. ....	91
Ilustración 73	Simulación de ciclo de acarreo.....	93
Ilustración 75	Variables económicas para estimación del VAN. ....	96
Ilustración 76	Variables económicas modelo histórico. ....	97
Ilustración 77	VAN modelo histórico. ....	98
Ilustración 78	Variables económicas modelo inicial. ....	99
Ilustración 79	VAN modelo inicial. ....	100
Ilustración 80	Variables económicas modelo simulado P10. ....	101
Ilustración 81	VAN modelo simulado P10.....	101
Ilustración 82	Variables económicas modelo simulado P50. ....	102
Ilustración 83	VAN modelo simulado P50.....	102
Ilustración 84	Variables económicas modelo simulado P90. ....	103
Ilustración 85	VAN modelo simulado P90.....	103
Ilustración 86	Resumen VAN de los modelos simulados.....	104
Ilustración 87	Rango VAN de los modelos simulados.....	105



## LISTA DE TABLAS

Tabla 1 Premisas caso de estudio. ....	23
Tabla 2 Estadística de las muestras. ....	32
Tabla 3 Campos modelos simulados. ....	60
Tabla 4 Resumen ley media del material de interés para todo los modelos .....	86
Tabla 5 Resumen de tonelaje de mineral y estéril.....	90
Tabla 6 Capacidad de cargue. ....	92
Tabla 7 Capacidad de acarreo. ....	94
Tabla 8 Resumen VAN y flujos actualizados para cada modelo. ....	106

# **CAPITULO 1**

---

## **1. INTRODUCCION**

### **1.1 ANTECEDENTES**

El posicionamiento de las compañías mineras están regidas por los intereses de los accionistas de las mismas, es decir las empresas mineras tienen la potestad de decidir cómo quieren ser reconocidas en el mercado dentro de una amplia gama de posibilidades:

1. Mejor empresa minera para trabajar,
2. Mejores políticas de seguridad para sus empleados.
3. Mejores índices de producción.
4. Mejor políticas sociales.

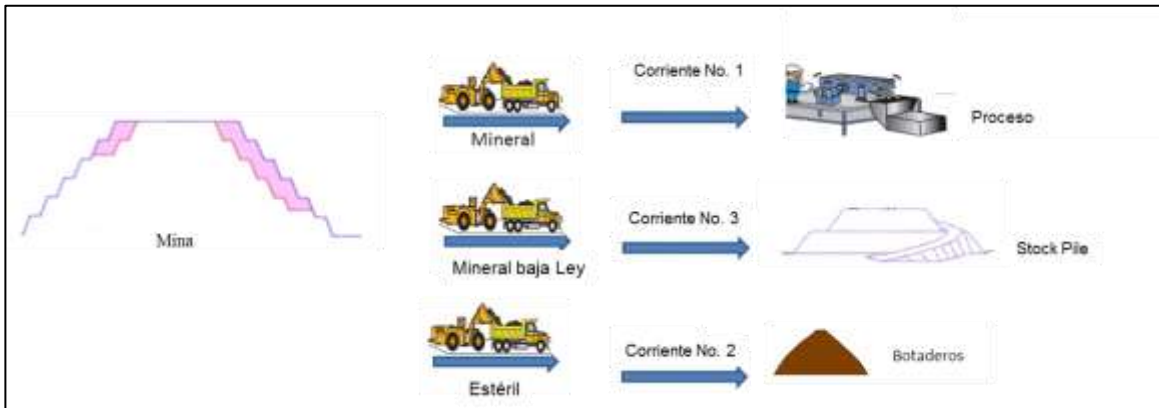
Cualquiera que sea el caso, estas políticas, son las que periodo a periodo cada empresa decide seguir según los intereses de sus accionistas y se conocen como carta de valores.

Luego de la definición de la carta de valores, éstas buscan la forma de transmitir las políticas a sus empleados y que se vean reflejadas en todas las etapas de la cadena minera. Estas políticas se convierten en premisas en la optimización del plan de vida de la mina o también conocido como LoA (*Life of Asset*). Una vez construido el plan de vida de mina, se construye el plan de 5 y 2 años de la mina, de los cuales se obtiene el conocido plan de Producción.

El plan de vida de mina al igual que el plan de producción se construye con un modelo geológico del yacimiento que contiene el material de interés. Ahora bien, el modelo para la construcción del plan de producción debe ser un modelo robusto, es decir, un modelo que contenga información de las propiedades físicas, químicas, estructuras e hídricas de los tipos de materiales contenidos en las zonas destinadas por el plan de vida de mina para realizar la extracción minera, con la suficiente certeza para asegurar el cumplimiento de la producción planeada. Este es el proceso general para todos los planes de producción asociados a yacimiento in-situ.

Considere ahora la situación en que la base del plan de minería no es un modelo in-situ; sino un material con propiedades físicas, químicas, estructurales e hídricas alteradas y que no obedecen a una formación natural.

La actividad minera es una operación que se realiza para la extracción de los minerales que se acumulan en un yacimiento. El proceso de extracción minero consiste en recuperar el mineral con una ley económicamente rentable; generando varias corrientes de proceso, la primera corriente será el material destinado al proceso, el cual tiene la mayor concentración de mineral, la segunda corriente es el material que no posee ninguna concentración del elemento de interés y es enviada a los botaderos de estéril y puede existir una tercera corriente de material que contiene alguna concentración de interés que puede llegar a ser importante para la entidad minera en algún momento de su proceso; esta corriente puede almacenarse en un lugar específico durante un periodo determinado de tiempo, produciendo con esto los *stock pile*.



**Ilustración 1 Corrientes proceso minero.**

La industria minera es una actividad económica que considera grandes inversiones de capital y un gran riesgo asociado a la naturaleza del negocio, ya que la predicción o evaluación económica de los recursos naturales, no es exacta; ahora bien, si consideramos la realización de la actividad minera en un material que no obedece a una formación geológica; sino un material que aunque contiene un mineral con cierta ley de interés, es un material que ha sido alterado en sus propiedades físicas y químicas, la incertidumbre asociada a dicho proceso será una mayor que las ya propias de la industria.

La actividad minera extrae recursos naturales no renovables, además de generar gran cantidad de desechos, que en algunos casos pueden llegar a ser reprocesados, el reto está en cómo caracterizar estos desechos y trabajar con ellos para hacerlos económicos, considerando el grado de incertidumbre asociado a su transformación.

## **1.2 LITERATURA Y ESTADO DEL ARTE**

Los *stock piles* son pilas de almacenamiento de mineral de leyes más bajas dispuestos para ser procesados cuando la extracción del pit ha disminuido o cesado. La ley de corte utilizada es la que define el destino del material que sale de la mina, siendo ésta dirigido al proceso inmediato, separado temporalmente (leyes marginales) o dispuestos en botaderos de material estéril.

Existen algunos estudios que profundizan sobre la optimización de planes mineros que involucran mezclas con *stock pile*, considerando la mayor incertidumbre en el modelo del yacimiento mineral.

Trabajos como el S. Kasmaee, ilustran como estimar leyes y tonelajes de material de stock pile usando geoestadística, considerando la incertidumbre asociada a la discontinuidad geológica de los *stock pile* durante su construcción. Cuenta con una información de construcción de los stocks extrapolada de los bancos de la mina, la cual es verificada con muestreo en la pila de stock.

Existen algunas propuestas para modelos de programación estocástica que optimizan el problema de la programación anual de la producción de minas a cielo abierto y modelos de programación lineal que buscan determinar en qué momento se debe extraer cada bloque y cuál es su mejor destino, de tal manera que maximice el valor presente neto, teniendo en cuenta las restricciones espaciales de precedencias y capacidad de recursos, descritas en los trabajos realizados por Rezakhah y Yarahmadi Alireza, respectivamente.

Este trabajo tiene como base evaluar un plan con secuencia minera fija de un *stock pile* que es la base de la alimentación a planta durante 3 años, para el cual algunos de los estudios como el de Rezakhah y Yarahmadi muestran algunas pautas que guían este propósito.

La hipótesis inicial del *stock pile* de estudio, es que el material con el que se construyó el stock es solo mineral. Es decir, que su único destino es la planta de proceso y que su ley media es alrededor de 1.74%. Para evaluar la veracidad de esta hipótesis, se genera una campaña de muestreo, luego un modelo y además las simulaciones condicionales, después de la realización de este ejercicio, se evidenciara o no la veracidad de la hipótesis inicial.

La compañía minera tiene 2 alternativas para la asignación de los recursos mineros

- ✓ Alternativa No. 1 Minar el *stock Pile*.
- ✓ Alternativa No. 2 Asignar los recursos a un nuevo yacimiento que está a 45 km de la plata.

El trabajo realizado con esta tesis le dará a la compañía la evaluación económica y el riesgo asociado correspondiente a la alternativa número 1. Una vez terminado este trabajo podrán decidir que alternativa implementaran.

## **1.2 SOBRE ESTA TESIS**

Muchos de los residuos mineros hoy en día son un gran problema para esta actividad. En algunos casos esos residuos aun contienen material de interés que no fueron procesados porque no existe la tecnología para hacerlo o simplemente porque en el momento de su remoción no eran económicos.

Hoy en día debido al agotamiento de algunos yacimientos, estos materiales están empezando a ganar interés; sin embargo el gran desafío es como trabajarlos, ya que no obedecen a una formación natural.

Con esta tesis, se busca ilustrar un escenario en el cual se genera un plan de producción basado en estos materiales y estimar el riesgo económico asociado a generar un plan con un material con gran variabilidad química.

## 1.4 OBJETIVOS

### 1.4.1 GENERAL

Desarrollar una metodología que permita calcular el valor en riesgo asociado a una secuencia minera fija de un modelo de *stock pile* de acuerdo al perfil de riesgo de la compañía.

### 1.4.2 ESPECIFICOS

- ✓ Generar un modelo de simulación condicional para un inventario de *stock pile*.
- ✓ Estimar los límites Económicos de un inventario de *stock Pile* para una secuencia minera definida bajo condiciones específicas (acceso, minado capa a capa, destino del material).
- ✓ Evaluar económicamente y soportar la decisión de asignar los recursos disponibles en el proceso de minado del *stock pile*.

## 1.5 ALCANCE

- ✓ **Elección de *stock pile* de trabajo:** Durante todo el proceso productivo de la mina, se construyeron varios *stock pile*, los cuales al mezclar en diferentes proporciones contribuyen a la construcción de la mezcla adecuada para la planta de proceso, este trabajo solo trabajará uno

de estos *stock pile*, considerado que es el que aporta mayor cantidad de material al plan de producción de mina.

✓ **Horizonte de planeación:** el período del plan que se generará, será de 3 años (Mediano plazo).

✓ **Diseño del *stock pile*:** Está dado por la formación del *stock pile*, se contempla hacer una minería bloque a bloque, en bancos de 4 metros, de arriba hacia abajo.

✓ **Parámetros mineros:** Se considera información real correspondiente a % de uso y % de disponibilidad de equipos, simulación de tiempos de ciclo, costos de extracción y procesamiento, precio de venta y flota instalada. Las leyes del material de interés y las coordenadas de las muestras de perforación tienen un factor de ajuste, por confidencialidad de la información.

✓ **Simulación de modelo de leyes del *stock pile*:** se genera modelos de simulación condicionales para las muestras del *stock pile*.

✓ **Generación de planes de producción y evaluación económica:** se genera un plan de producción y una evaluación económica para cada modelo simulado.

## 1.6 ESTRUCTURA

➤ **CAPITULO 2:** Describe la metodología de trabajo, las etapas de proceso de formación del stock y señala las premisas y acontecimientos importantes.

➤ **CAPITULO 3:** Describe la línea base del trabajo, la formación del stock, la información disponible y la actividades de verificación y mejora de esta.



- **CAPITULO 4:** Muestra el proceso de elaboración de los modelos simulados, la variografía, tipos de modelos, validación de los datos y las simulaciones.
  
- **CAPITULO 5:** Describe la estrategia de minería usada después de la simulación de los modelos, la estimación de la capacidad instalada y requerida de acuerdo a la secuencia.
  
- **CAPITULO 6:** Contiene la evaluación económica de las secuencias mineras de cada uno de los modelos simulados, de las muestras y el modelo histórico, también se calcula valor a riesgo del proyecto.
  
- **CAPITULO 7:** Expone las conclusiones del trabajo.
  
- **CAPITULO 8:** Revisión bibliográfica.

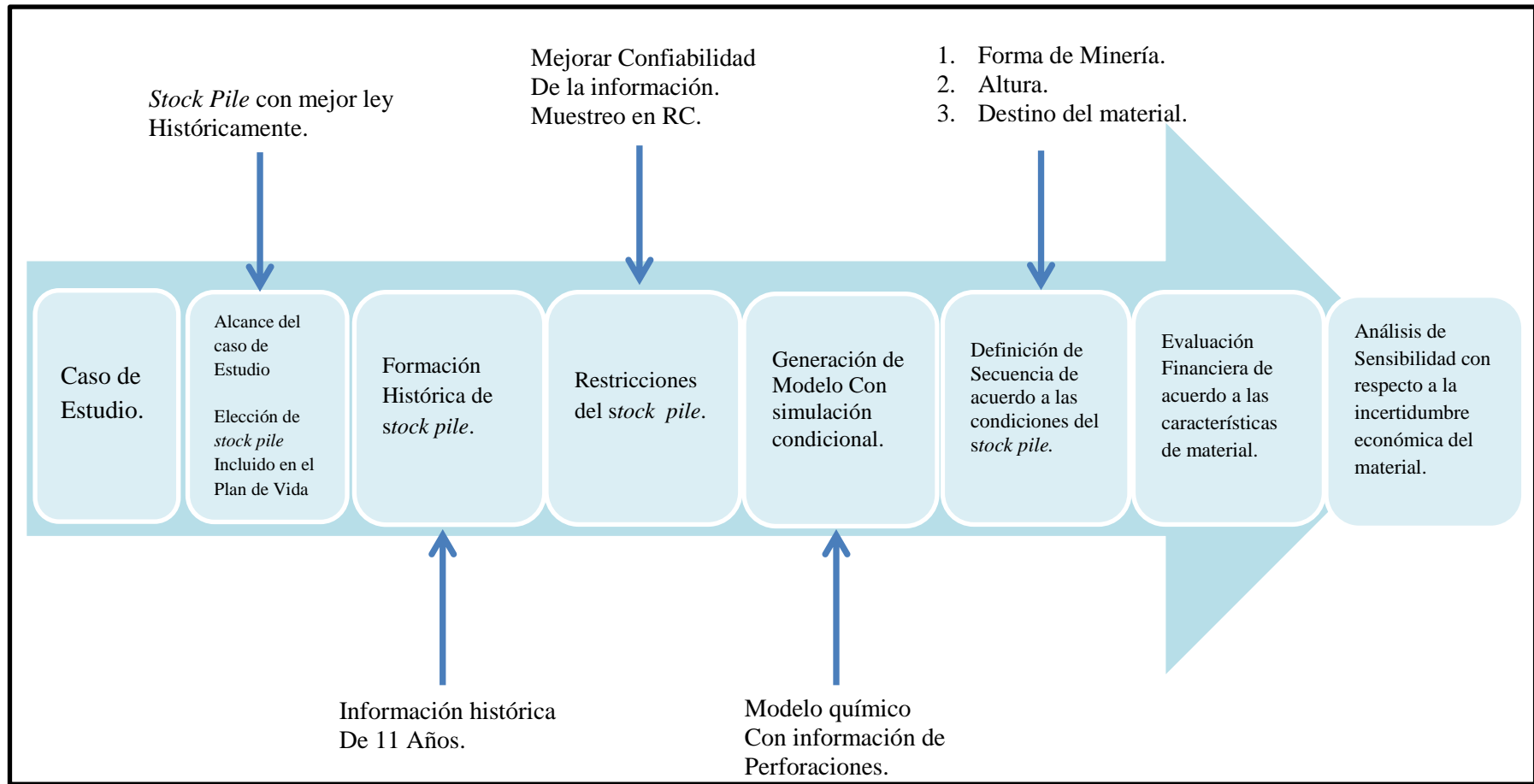
### 2. METODOLOGIA

La definición de este caso de estudio se originó como consecuencia de la baja información de un material que se consideró como reservas, almacenado en un *stock pile* y que estaba incluido en el plan de vida de la mina. Durante las Labores mineras que se desarrollaron por más de 30 años, se crearon varios stocks de material con leyes de corte variables, consideradas procesables en años posteriores.

Para este caso se considera como base de estudio el stock con la mejor ley del material de interés y que representa 3 años de producción de la mina.

La construcción del stock aproximadamente, se realizó, durante 11 años. Tiempo durante el cual solo se contaba con registros de material, en toneladas, que depositaban los camiones por día y las propiedades química eran el resultado del muestro en campo que se hacía en el frente de cargue de la mina donde se originaba este material.

Una vez iniciado el periodo de la vida de la mina correspondiente a la extracción de este material, se empezó a reportar en la triturado una alta variabilidad de la ley obtenida durante los años de construcción y la ley obtenida en la planta de trituración, en ese momento se decidió iniciar una campaña de muestro para mejorar la confiabilidad de la información fuente, las muestras obtenidas de este campaña de muestreo dieron origen a un modelo inicial de leyes, sobre este modelo se generará las simulaciones condicionales, en datamine, para luego generar un plan de secuencia minera bloque a bloque y una evaluación económica para cada modelo simulado.



**Ilustración 2 Metodología de trabajo.**

## **CAPITULO 3**

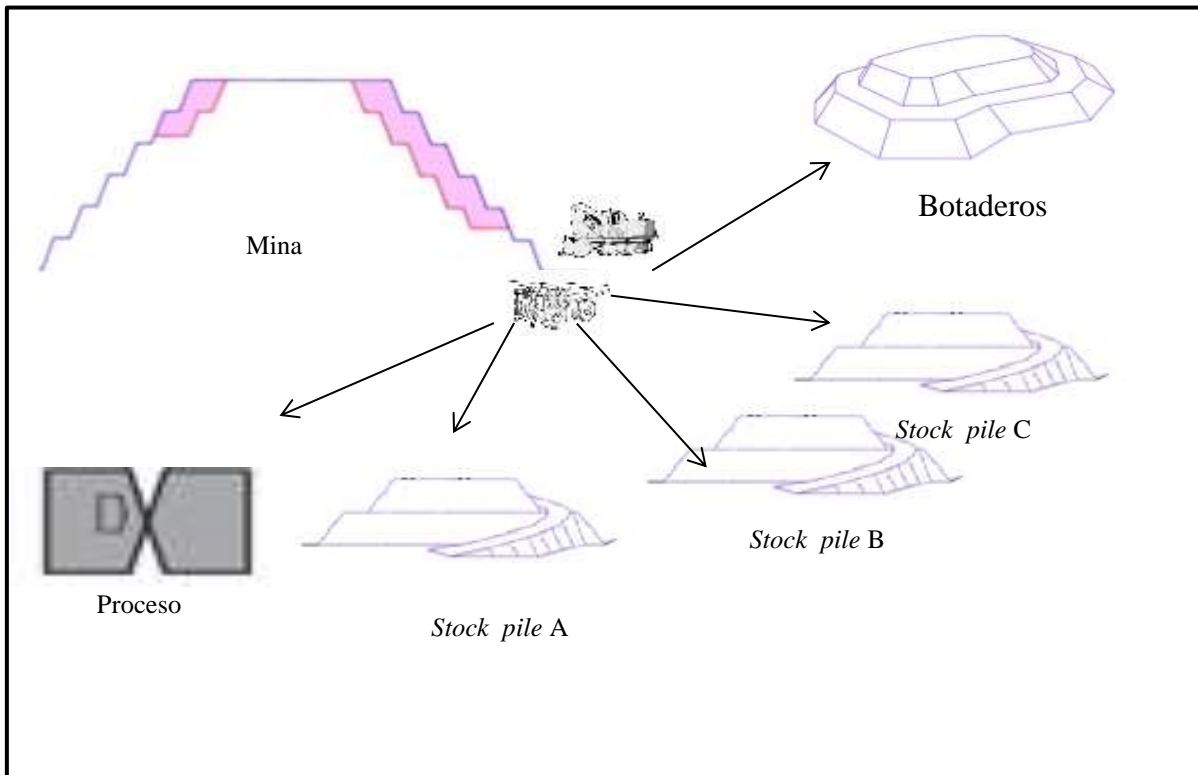
---

### **3. DESCRIPCION DEL PROBLEMA**

#### **3.1 LINEA BASE**

El proceso inicia en la mina con la actividad minera típica, Identificación de área a minar, voladura y acarreo, durante el acarreo se generan tres corrientes:

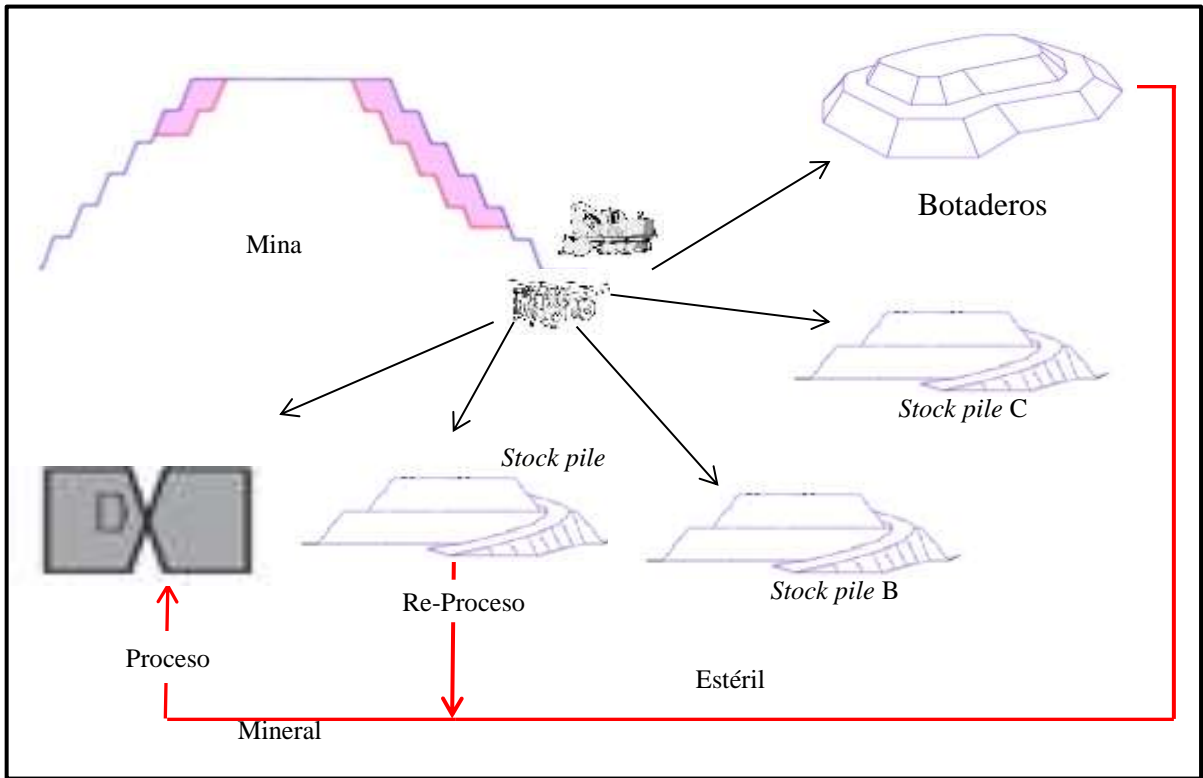
1. Material con alto contenido de elemento de Interés cuyo destino es la planta de proceso.
2. Material con 0% del elemento de interés cuyo destino son los botaderos de estéril.
3. Material con algún porcentaje de elemento de interés que se almacena en los stocks pile durante años.



**Ilustración 3 Diagrama de flujo de proceso minero tradicional.**

Los procesos mineros tradicionales deben enfrentarse a una situación típica de todos los yacimientos minerales; el agotamiento de los mismos.

Para los planes de vida de mina, en los cuales se tiene considerado el re-procesamiento de materiales almacenados en *stock pile*, es un gran desafío el manejo de la incertidumbre de estos materiales, ya que no obedecen a ninguna formación y sin embargo, por algún periodo de tiempo, son la fuente para asegurar un plan de producción en el mercado.



**Ilustración 4 Diagrama de flujo de Proceso minero con reprocesamiento de *stock pile*.**

Los *stock pile*, son el material resultante de la mina, que cuenta con leyes del elemento de interés que pueden ser procesables, este material ha sido volado, transportado y almacenado durante años. Sin embargo, aunque fueron considerados en el plan de vida de mina, el seguimiento a la disposición de los mismos no es muy detallado. La información histórica que se tiene, contiene el tonelaje del *stock pile*, estimado por con el número de camiones que depositaron material allí y el payload de estos, la ley del *stock pile* se estimó con las muestras manuales tomadas en campo en los fretes de cargue y evaluadas química con x-med (Lector químico portátil) y además se tiene una reconstrucción topográfica del llenado del stock.

## 3.2 CONDICIONES CASO DE ESTUDIO

Durante el proceso de formación y crecimiento del *stock pile* se consideró que todo el material de éste, en el momento de su re-procesamiento, su único destino sería la planta de beneficio.

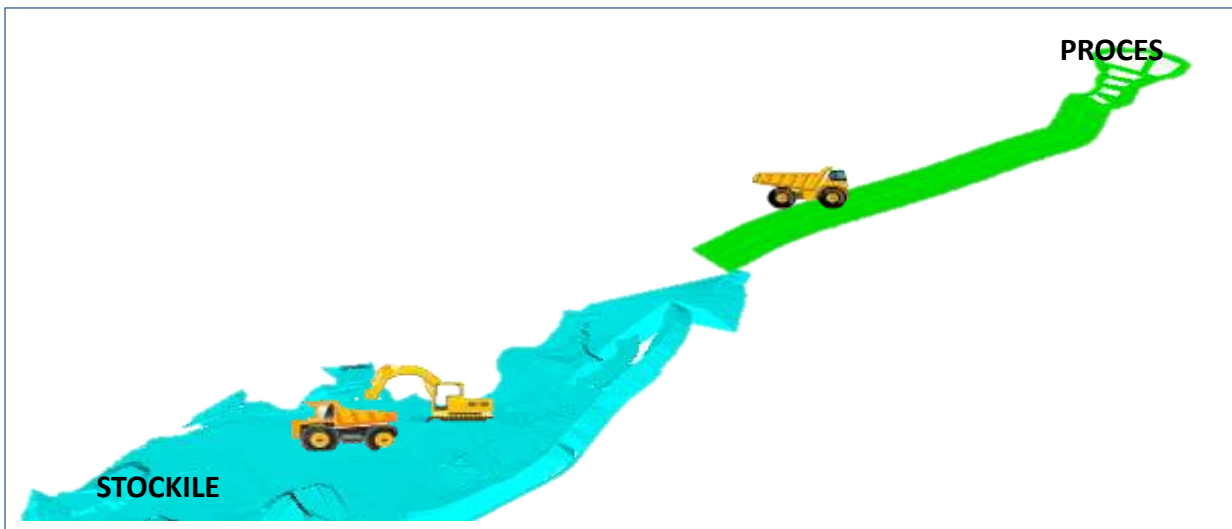
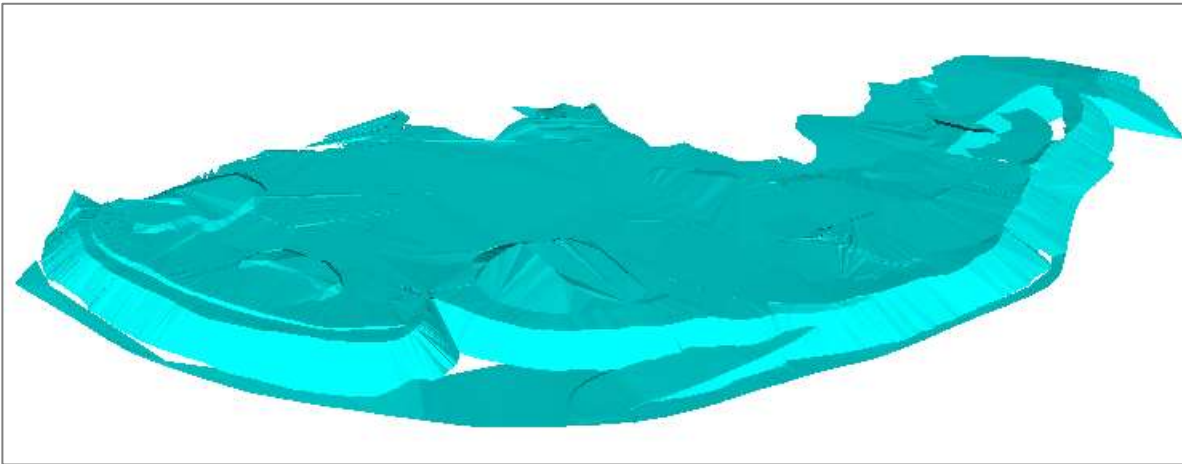


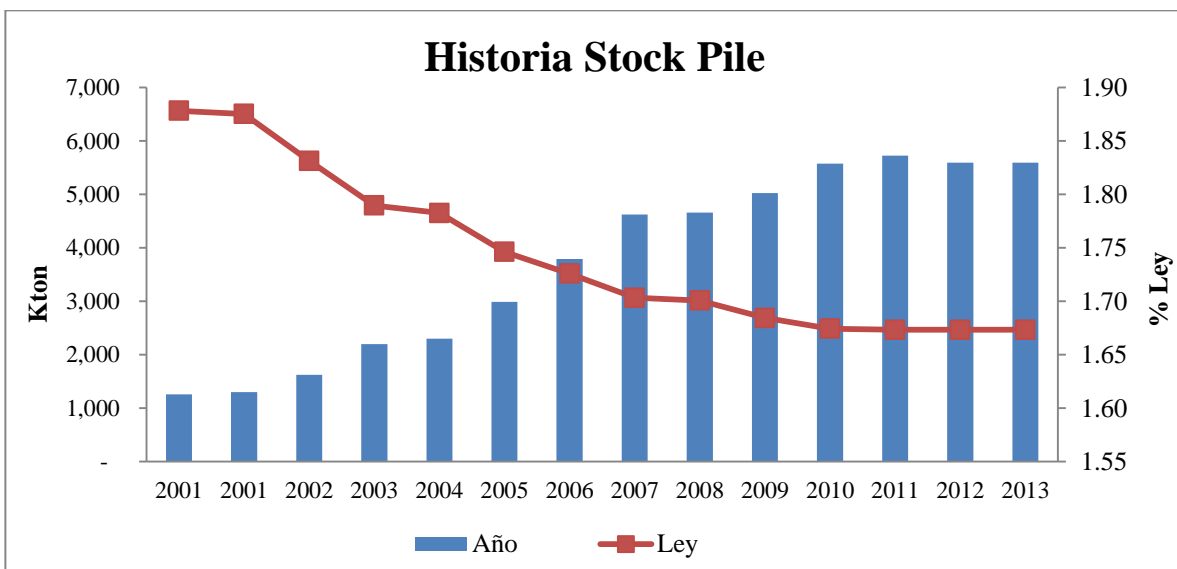
Ilustración 5 Caso de estudio ideal.

### 3.2.1 Formación y composición histórica de *stock pile* informada

Como se mencionó anteriormente, se cuenta con una reconstrucción topográfica del crecimiento del *stock pile*, tonelaje y leyes históricas durante 11 años.

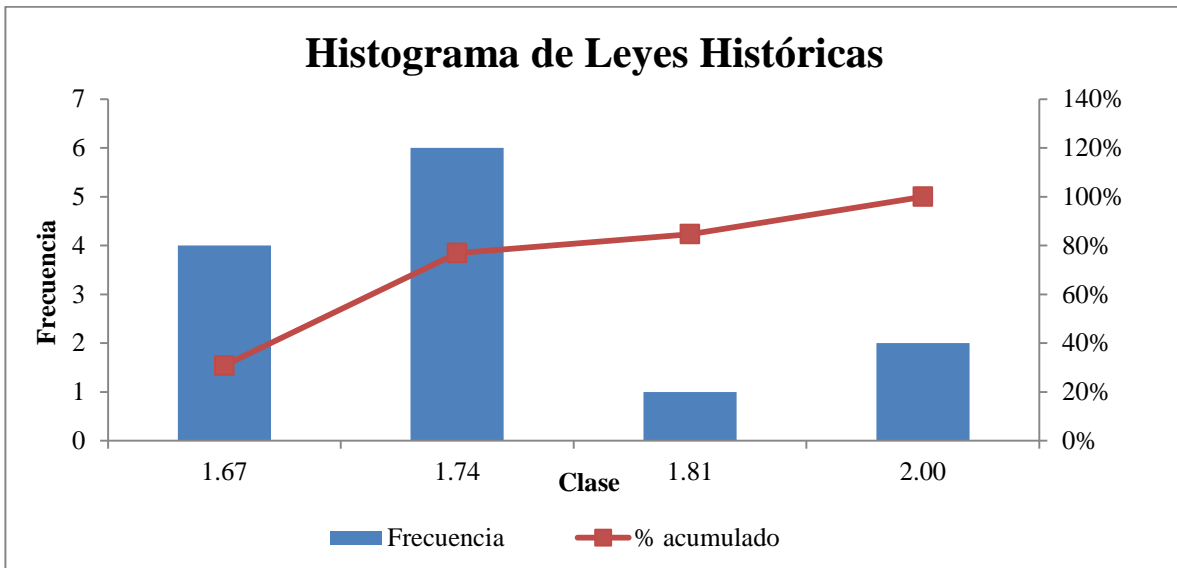


**Ilustración 6** Crecimiento de *stock piles* por diferencias topográficas.



**Ilustración 7** Ley de material y tonelaje de *stock pile* por información histórica.





**Ilustración 8 Histogramas de leyes históricas.**

Los datos históricos del *stock pile* aseguraban que se contaba con cerca de 5 millones de ton con 1.74% de ley del material de interés, lo cual, efectivamente confirmaba que el material del *stock pile* constituían reservas que aseguraban el beneficio de material durante 3 años.

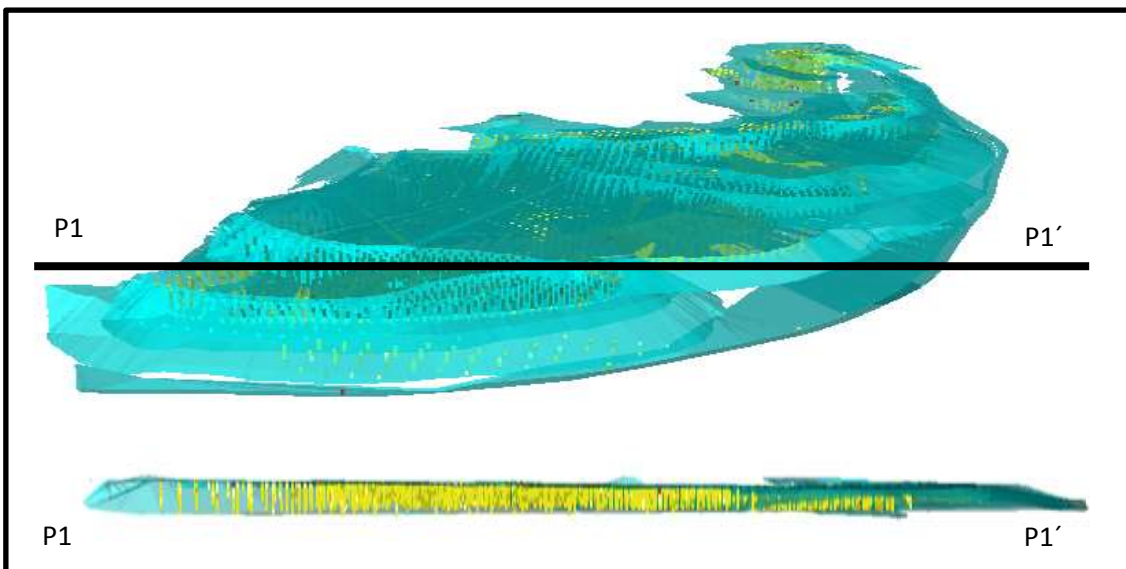
### 3.2.2 Formación de *stock pile* con muestreo de perforaciones

Para generar el plan de minería del *stock pile*, se debe contar con un índice de confianza lo suficientemente alto, para crear un plan de producción con un alto porcentaje de cumplimiento en especificaciones de tonelaje y especificaciones químicas. Con base en esta información se genera una campaña de muestreo en la zona de interés y a su vez se genera un modelo químico.

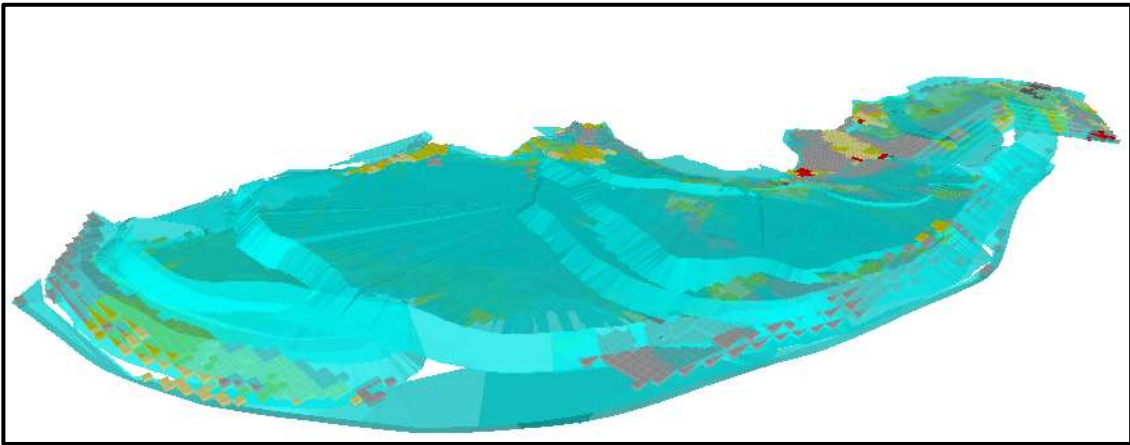
Se generó un plan de perforaciones de muestreo para el *stock pile*, de manera que se pudiera confirmar la información histórica disponible.

Se diseñaron mallas de perforación de circulación reversa de 25m x 25m, se tomaron muestras cada 3.5m de profundidad y con esta información se generó un modelo químico de la composición del *stock pile*.

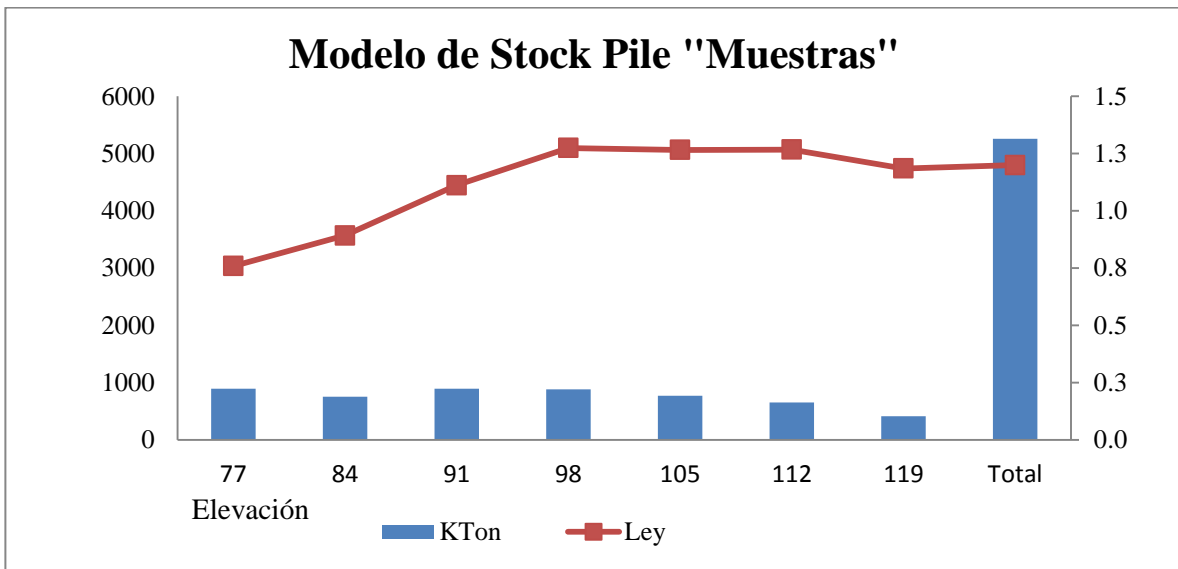
Modelo químico de los *stocks pile*, después de la campaña de muestreo.



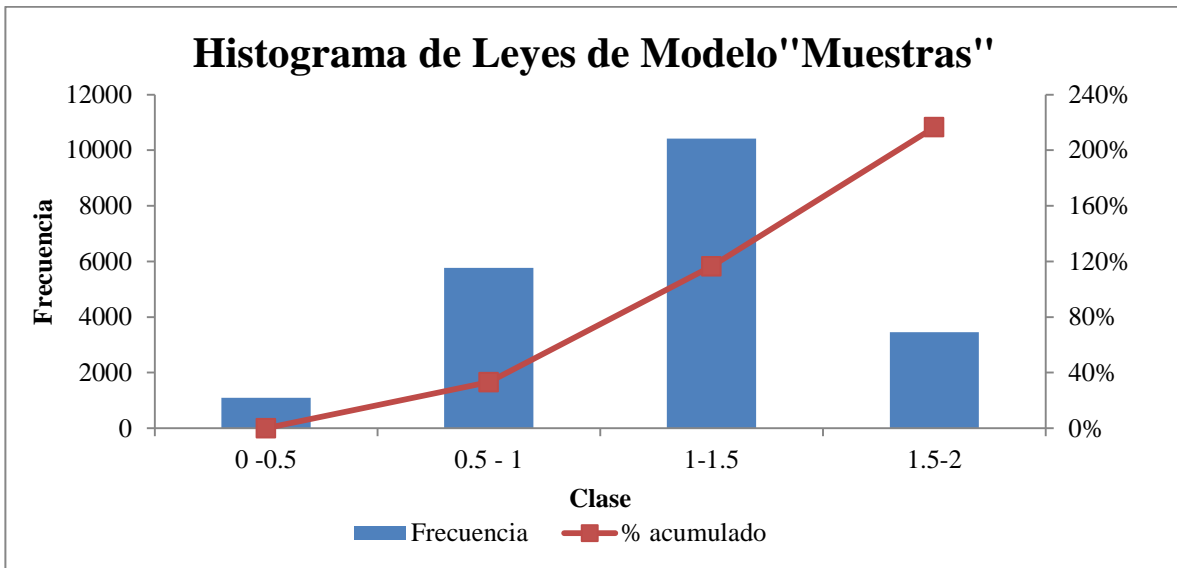
**Ilustración 9** Modelo construido y Perforaciones en el área.



**Ilustración 10** Modelo de *stock pile* después de campaña de muestreo.

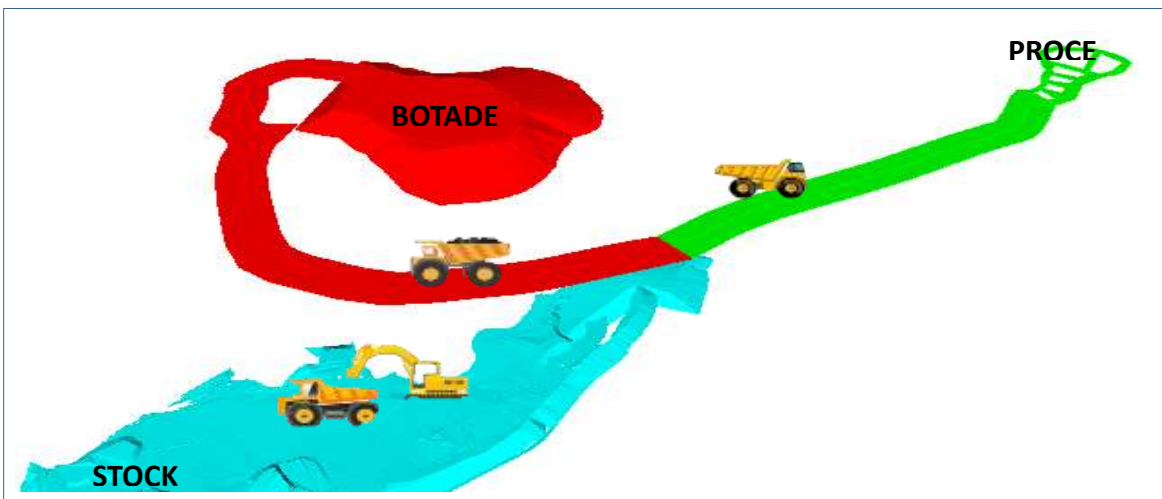


**Ilustración 11** Ley de material y tonelaje de *stock pile* por construcción de modelo.



**Ilustración 12 Histograma de leyes del modelo.**

La asunción inicial acerca del material presente en el *stock pile* (información Histórica) cambio significativamente luego de la realización de la campaña de muestreo, ya que los datos obtenidos reflejan una situación diferente, pues si bien existían las 5 millones de toneladas de material en el *stock pile*, la ley del material de interés es 1.2%, lo que quiere decir, que además de la corriente con destino a la planta, también debía contemplarse una corriente con estéril como destino.



**Ilustración 13 Caso de estudio después de la campaña de muestreo.**

### 3.3 CONTRUCCION DEL MODELO DE *STOCK PILE*

Para construir el modelo de *stock pile*, se generó una rutina en Datamine, la cual consiste en:

- ✓ Definir las Variables para la rutina (base de datos de perforación y parámetros para la estimación).
  
- ✓ Crear un prototipo con el origen y te tamaño de bloque del modelo de la mina (Modelo de Control de Ley).
  
- ✓ Definir los campos que tendrá el modelo (química, tonelaje, % de Muestreo de los bloques y dimensiones)
  
- ✓ Calcular el modelo.

```
#-----  
## Define variables  
#-----  
!LET $mclpro#=MCLPROTO_aff  
!LET $modpro#=resproto_aff  
!LET $dhmcl#=hoyoshoy  
!LET $dhres#=dh_lp  
!LET $mclmues#=mclmues_aff  
!LET $resmues#=resmues_aff  
!LET $scpar#=m6scparm  
!LET $stpar#=m6stparm
```

```

! PROTOM   &OUT(protoMMP),@ROTMOD=0.0
N
Y
-2000
-1050
-700
6.25
6.25
7
960
864
130

! SLIMOD   &PROTO(protoMMP),&IN($Inmod#),
           &OUT(TEMP1_1)

! MGSORT   &IN(temp1_1),&OUT(temp1_2),*KEY1(IJK),@ORDER=1.0

! PROMOD   &IN(temp1_2),&OUT($modres#),@DENSITY=1.0,@OVERLAP=2.0,
           @OPTIMIZE=2.0,@TOL=0.001,@ACCURACY=0.001

! SLIMOD   &PROTO(protoMMP),&IN($mclori#),&OUT(temp2_1)

! MGSORT   &IN(temp2_1),&OUT(temp2_2),*KEY1(IJK),@ORDER=1.0

! PROMOD   &IN(temp2_2),&OUT(temp2),@DENSITY=1.0,@OVERLAP=2.0,
           @OPTIMIZE=2.0,@TOL=0.001,@ACCURACY=0.001

! ESTIMA   &PROTO($mclpro#),&IN($dhmcl#),
           &SRCPARM($scpar#),&ESTPARM($stpar#),
           &MODEL(TEMP1),*X(X),*Y(Y),*Z(Z),@DISCMETH=1.0,
           @XPOINTS=1.0,@YPOINTS=1.0,@ZPOINTS=1.0,@PARENT=0.0,
           @DYANKR=0.0,@MINDISC=1.0,@COPYVAL=0.0,@FVALTYPE=2.0,
           @XSUBCELL=1.0,@YSUBCELL=1.0,@ZSUBCELL=1.0,@ALLWGTS=0.0,
           @LINKMODE=3.0,@UCSAMODE=2.0,@UCSBMODE=3.0,@UCSCMODE=2.0,
           @PLANE=1.0,@TOLRNC=0.0,@ORGTAG=-

! COPY     &IN(TEMP1),&OUT($mclmues#),FLAG>0.00001<+

#-----
## MARCA LOS BLOQUES DEL MODELO DE RESERVA
#-----

! SORTX    &IN($modpro#),&OUT(TEMP2),*KEY1(IJK),
           @BINS=5.0,@ORDER=1.0
! ESTIMA   &PROTO(TEMP2),&IN($dhres#),&SRCPARM($scpar#),
           &ESTPARM($stpar#),&MODEL($resmues#),*X(X),*Y(Y),*Z(Z),
           @DISCMETH=1.0,@XPOINTS=1.0,@YPOINTS=1.0,@ZPOINTS=1.0,
           @PARENT=0.0,@DYANKR=1.0,@MINDISC=1.0,@COPYVAL=0.0,
           @FVALTYPE=2.0,@XSUBCELL=1.0,@YSUBCELL=1.0,@ZSUBCELL=1.0,
           @ALLWGTS=0.0,@LINKMODE=3.0,@UCSAMODE=2.0,@UCSBMODE=3.0,
           @UCSCMODE=2.0,@PLANE=1.0,@TOLRNC=0.0,@ORGTAG=-

! DIR      &OUT(Temp),Temp1?, Temp2?
! DELETE   &IN(Temp)

! end

```

```

# selecciona campos a usar
-----
!SELCOP  &IN(Temp1),&OUT(Temp2),*F1(IJK),*F2(XC),*F3(YC),*F4(ZC),
          *F5(XINC),*F6(YINC),*F7(ZINC),*F8(DENORE),*F9(DENWAS),*F10(NI),
          *F11(FE),*F12(MGO),*F13(SIO2),*F14(AL2O3),*F15(CO),
          *F16(ROCK10),*F17(ROCK13),
          *F18(ROCK14),*F19(ROCK20),*F20(ROCK24),*F21(ROCK30),
          *F22(ROCK40),*F23(ROCK42),*F24(ROCK43),*F25(ROCK44),
          *F26(ROCK50),*F27(ROCK60),*F28(ROCK70),*F29(ROCK80),
          *F30(MCL),*F31(MUESTREO),
          *F32(XMORIG),
          *F33(YMORIG),*F34(ZMORIG),*F35(NX),*F36(NY),*F37(NZ),
          @KEEPALL=1.0

!MGSORT  &IN(Temp2),&OUT(Temp3),*KEY1(IJK),@ORDER=1.0

!EXTRA   &IN($nclmues#),&OUT(Temp4),@APPROX=0.0
DENORE=DENSITY
DENWAS=0
MCL=1
MUESTREO=1
GO

!IJKGEN  &PROTO($resmues#),&IN(temp4),
          &OUT(temp5),*X(XC),*Y(YC),*Z(ZC),@PSMODEL=1.0

!SELCOP  &IN(Temp5),&OUT(Temp6),*F1(IJK),*F2(XC),*F3(YC),*F4(ZC),
          *F5(XINC),*F6(YINC),*F7(ZINC),*F8(DENORE),*F9(DENWAS),*F10(NI),
          *F11(FE),*F12(MGO),*F13(SIO2),*F14(AL2O3),*F15(CO),
          *F16(ROCK10),*F17(ROCK13),
          *F18(ROCK14),*F19(ROCK20),*F20(ROCK24),*F21(ROCK30),
          *F22(ROCK40),*F23(ROCK42),*F24(ROCK43),*F25(ROCK44),

!MGSORT  &IN(Temp6),&OUT(Temp7),*KEY1(IJK),@ORDER=1.0

!ADDMOD  &IN1(Temp3),&IN2(Temp7),&OUT($mmp#)

!END

```

**Ilustración 14 Rutina creación de modelo "muestras".**

### 3.4 PREMISAS DEL CASO DE ESTUDIO

Para la etapa de minería del stock pile, existen una serie de condiciones que se deben cumplir, asociadas a la ubicación del stock y a los recurso destinados para el re-procesamiento del mismo.

<b>PREMISAS</b>	<b>UNIDADES</b>
Flota (CAT 773)	4
Cargue (Hitachi 1200)	1
Disponibilidad %	90
Utilización %	80
Altura <i>stock pile</i> (m)	42
Banco minado (m)	4
Accesos para minería	1
Destinos de material	Proceso/Botadero
Ley de corte (%)	1
Costo de transporte proceso (\$USD/Ton)	2
Costo de transporte botadero (\$USD/Ton)	4
Longitud de ciclo proceso (km)	5.5
Longitud de ciclo botadero (km)	6
Ton. totales en <i>stock Pile</i> (ton)	5.000.000
Equipo de muestreo en campo (X-Med)	2
Muestreo en campo (Geólogo)	1
Tiempo planeado de minado (años)	3

**Tabla 1 Premisas caso de estudio.**

### **3.5 LITOLOGIA CASO DE ESTUDIO**

La naturaleza y composición geoquímica, mineralógica y petrológica de nuestro planeta difiere por cada capa en que se divide; la composición en la zona más profunda (núcleo) es simple y homogénea, intermedia en el



manto y, la capa más superficial (la corteza) presenta una composición más compleja y heterogénea considerándose desde un aspecto geoquímico es decir, que todos los elementos químicos están distribuidos de forma muy amplia en esta última zona por lo tanto, esta zona puede estar formada por rocas ígneas, sedimentarias y metamórficas.

Durante los procesos geológicos que llevan a la formación de una roca, algunos elementos o minerales pueden concentrarse selectivamente muy por encima de sus valores "normales" dando origen a concentraciones "anómalas". Para que esta concentración mineral se convierta en un yacimiento o depósito de minerales útiles, tienen que darse las condiciones necesarias que lo permitan; el mineral debe ser valioso en sí mismo o ser portador de algún elemento nativo y debe ser requerido por el mercado cumpliendo el requisito de que su explotación sea económicamente rentable. Prácticamente cualquier proceso geológico puede dar origen a yacimientos minerales.

Para el caso de estudio de esta tesis, el yacimiento mineral, se formó en zonas de relieve horizontal sobre rocas ricas en hierro, especialmente en rocas ígneas básicas, ricas en minerales ferromagnesianos como el olivino.

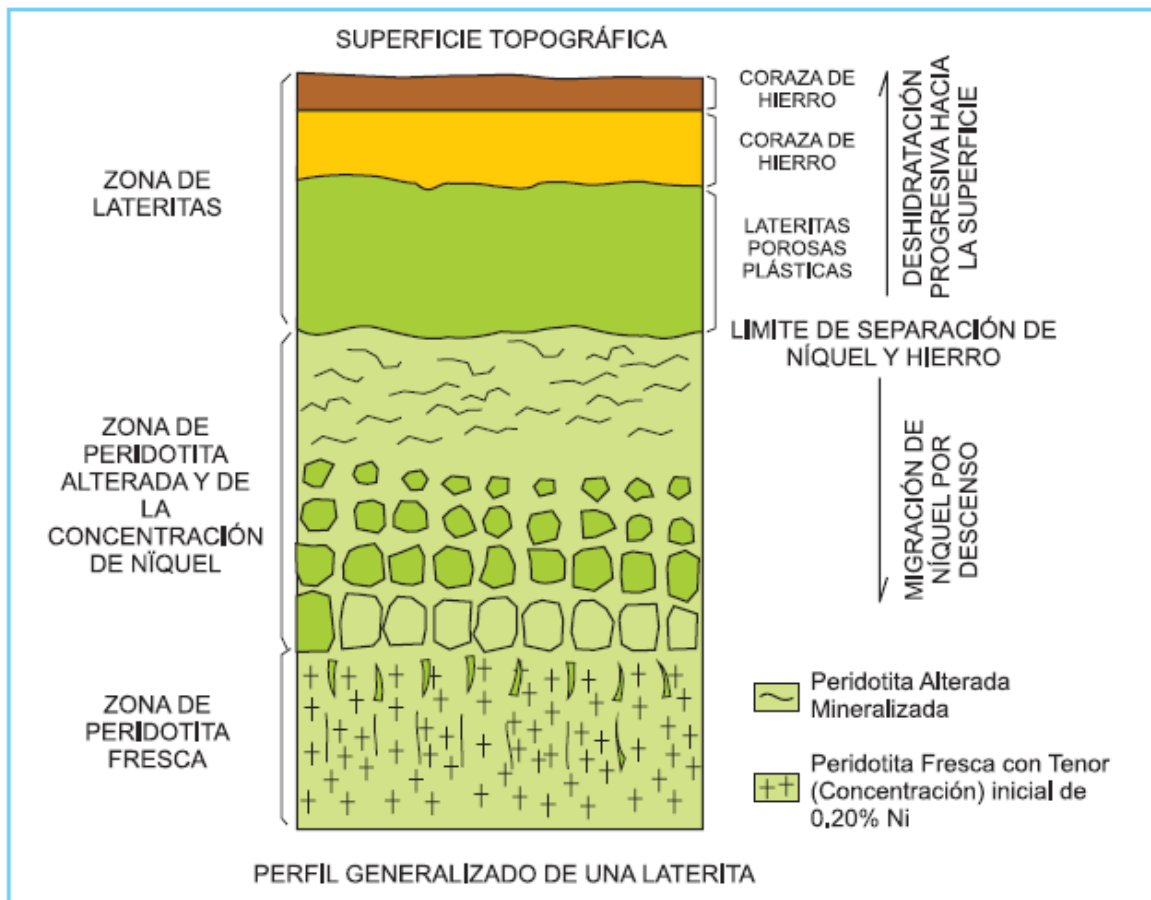
La hidrólisis de este mineral, a través de serpentina y clorita principalmente, forma como productos finales óxidos/hidróxidos de hierro, sílice, y sales solubles de Mg y Ca (procedentes del clinopiroxeno). Algunos de los componentes minoritarios de estos minerales (Ni, Cr, Co) pueden también concentrarse en la laterita, aumentando sus posibilidades mineras.

Este depósito de forma a partir de la alteración superficial de Peridotitas, durante un proceso activo, bajo determinadas condiciones climáticas y topográficas, que se denomina laterización.

Los cambios bruscos de temperatura y la circulación subterránea de las aguas de infiltración, alteran gradual y progresivamente a la roca,

predominando la acción geoquímica de disolución o el ataque mecánico de la erosión. Las aguas se infiltran por las fisuras o diaclasas y ponen rápidamente en solución a los silicatos de Hierro y Magnesio anhidros. Durante el proceso, la Peridotita adquiere un mayor grado de porosidad y permeabilidad, facilitando la penetración y circulación de las aguas de infiltración y el ataque continuo a la Peridotita fresca por reacciones geoquímicas, también se produce la eliminación de los productos en solución durante algún tiempo después de períodos de lluvias intensas.

La masa laterítica, muestra que la Peridotita alterada presenta texturas progresivamente más terrosas hacia la superficie, a la vez que se produce el enriquecimiento en Níquel; luego se observa un empobrecimiento en Níquel y Magnesio, y un enriquecimiento en Hierro y Cobalto. El límite que separa las zonas enriquecidas en Níquel de las enriquecidas en Hierro generalmente es pronunciado y se manifiesta en un cambio de color, que se convierte en marrón oscuro al pasar de la Peridotita terrosa mineralizada a la laterita. El espesor de la laterita "in situ" representa el residuo insoluble de la masa de Peridotita infrayacente de la cual teóricamente se ha liberado una cantidad de Níquel, que puede concentrarse debajo de la laterita o en sus cercanías.



**Ilustración 15 Perfil de la laterita rica en hierro y níquel.**

Características del proceso de laterización

- Presencia de rocas ultramáficas, sometidas a cambios bruscos de temperatura y la circulación subterránea de las aguas por infiltración que alteran gradual y progresivamente a la roca ultramáfica, predominando la acción geoquímica de disolución o ataque sobre la mecánica de erosión.
- La infiltración de aguas por las fisuras o diaclasas, producidas por efecto de los esfuerzos dinámicos, ponen rápidamente en solución a los silicatos de magnesio y hierro anhidros. En esta etapa de alteración, la peridotita conserva su estructura primitiva.
- El aumento de la porosidad y la permeabilidad de la peridotita, facilita la penetración y circulación de las aguas con reacciones geoquímicas. La

peridotita alterada presenta texturas progresivamente más terrosas hacia la superficie. Las aguas superficiales que se infiltran, probablemente ácidas, atraviesan la laterita porosa y se mantienen durante algún tiempo en la porción inferior plástica de esta zona, poniendo a los minerales que se encuentran en la peridotita alterada en soluciones que pueden precipitarse al descender constituyendo entonces las concentraciones explotables de níquel, o que también pueden ser arrastrados en solución.

□ Después del eventual relleno de los espacios disponibles (poros y cavidades) las soluciones níquelíferas circularían a modo de aguas subterráneas sobre la superficie impermeable de la peridotita serpentizada situada a cierta profundidad deslizándose entre los bloques de peridotita y ciertas zonas serpentinosas impermeables. El níquel se concentraría únicamente al hallar las condiciones favorables para su precipitación en este proceso y a cierta profundidad, ya que estos precipitados no son estables ni insolubles sino al estar protegidos por una capa o recubrimiento laterítico.

□ El níquel se encuentra difuso en la masa peridotítica alterada. Esto sólo se evidencia en los análisis químicos; no es explotable, pero la mineralización contribuye a la concentración posterior.

□ Enriquecimiento en níquel, hierro y cobalto. El límite que separa las zonas enriquecidas en níquel de las enriquecidas en hierro generalmente es pronunciado y se manifiesta en un cambio de color que se convierte en marrón oscuro al pasar de la peridotita terrosa mineralizada a la laterita. Este límite níquelífero avanza progresivamente en sentido descendente a medida que se incorporan el magnesio simultáneamente el espesor de la laterita residual ferruginosa aumenta gradualmente. Este desplazamiento progresivo hacia la base del límite níquel-hierro se denomina "descenso" de la laterita.

Como resultado de un proceso minero, se generó una mezcla de material entre peridotita saprolitizada y laterita con concentraciones de interés, que se almacenó durante 11 años, para luego ser reprocesado en los últimos años de vida de la mina, cuando las leyes del depósito fuera decreciendo.

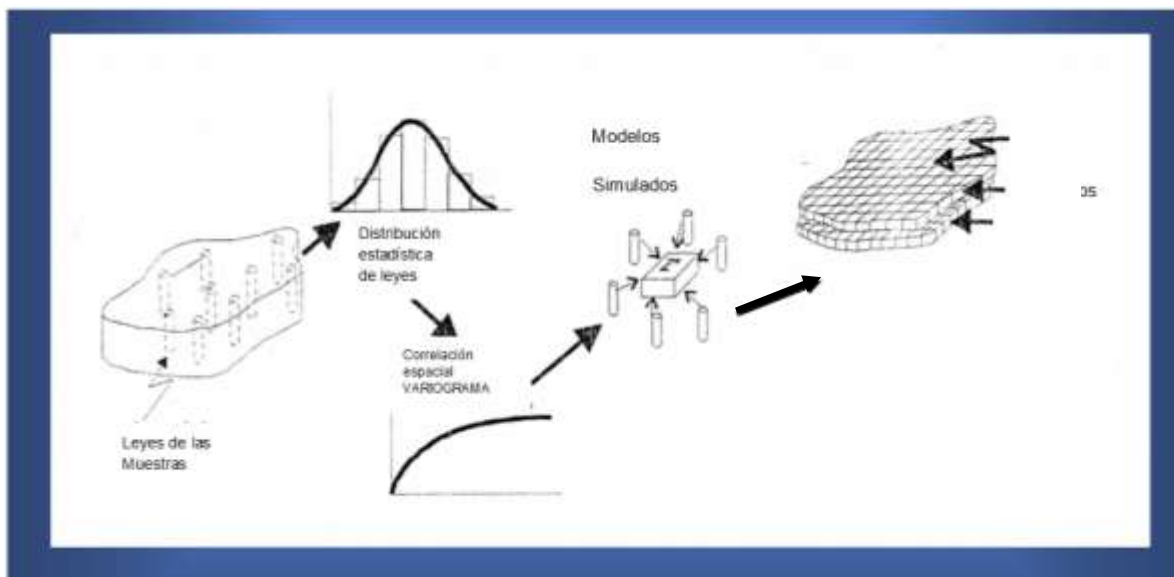
Este material es el resultado de la construcción de un *stock pile*, el cual se encuentra fracturado y es altamente permeable, en su composición química tiene cerca del 1,2 % de materia de interés y además presenta altas concentraciones en Fe, SiO<sub>2</sub> y Al<sub>2</sub>O<sub>3</sub>, la granulometría del material puede oscilar entre 40 y 50 cm. El material se encuentra dispuesto en una pila de 42 m de altura y solo permite ser minada, por estabilidad, a 4 m de altura de banco, el ángulo de reposo del material es del 10%.



**Ilustración 16** Litología caso de estudio, formación de *stock pile*.

### 4. SIMULACIÓN CONDIONAL DE MODELO DE MUESTRAS

En el siguiente flujograma se observa de descripción del proceso para la construcción de los modelos simulados.



**Ilustración 17 Proceso de análisis y construcción de modelos simulados.**

Se cuenta con unas perforaciones de un material que se depositó durante años, debido a temas de confidencialidad, ya que los datos de este trabajo corresponden a un depósito real, se ha hecho una modificación en las coordenadas de ubicación, las leyes están afectadas por un factor de ajuste y no se mencionará el mineral que se extraer, se hará referencia a él, como mineral, material o elemento de interés. Se analizará el comportamiento de los datos para luego modelar el variograma experimental y teórico.

## **4.1 DESCRIPCION DE LA INFORMACION**

Para la realización del ejercicio se ha seleccionado un *stock pile* con dimensiones de 800m x 400 m x 42 m.

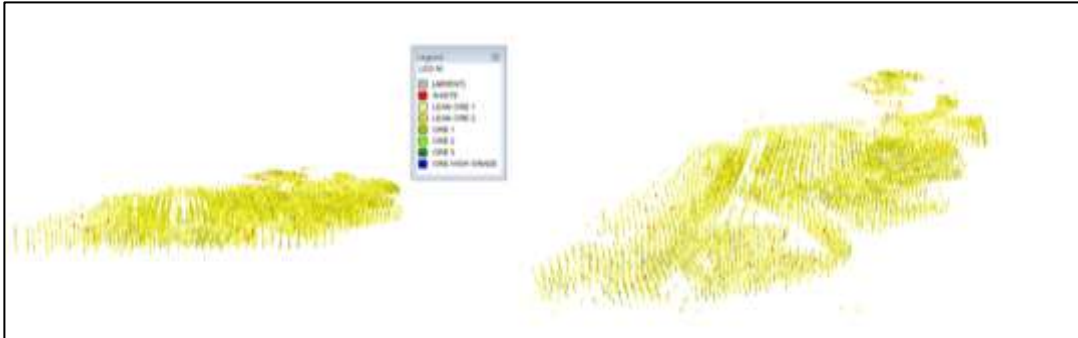
La base de datos cuenta con un total de 20752 muestras con pozos de perforación de 42 m de profundidad. El composito de las muestras es de 3.5 m cada muestra tiene la información asociada a las leyes del material de interés, calidad, tipos de roca y ubicación espacial.

A continuación, se muestra el análisis geoestadístico de la información para caracterizar e interpretar el comportamiento de la "variables regionalizadas".

## **4.2 ANALIS EXPLORATORIO DE LAS MUESTRAS**

En la etapa de análisis exploratorio existe una revisión visual de las perforaciones, el cálculo de las estadísticas básicas y las distribuciones de leyes mediante histogramas, la construcción de curvas de tonelaje vs ley media, ley de corte y nubes de dispersión de los datos.

### 4.2.1 Visualización de las perforaciones



**Ilustración 18 Perforaciones campaña de muestreo.**

Se observan las perforaciones verticales de los pozos, no hay ninguna muestra inclopetada, ni desviadas, todas las perforaciones realizadas, tienen una recuperación de detrito cada 3.5 m de perforación, las perforaciones realizadas se hicieron en circulación reversa.



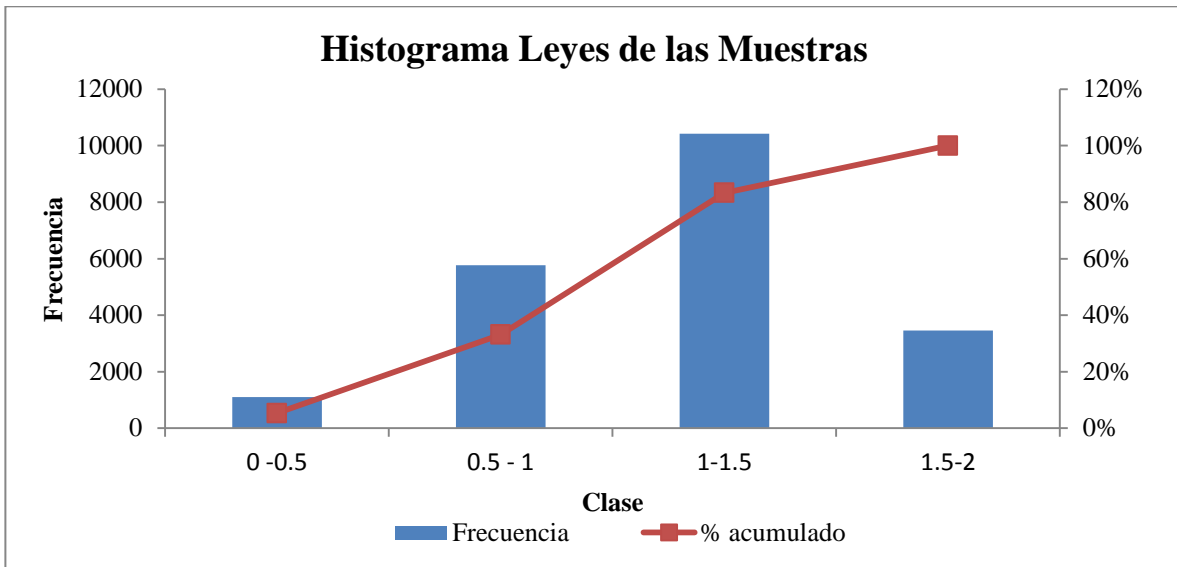
## 4.2.2 Estadística básica de las Muestras

Resumen estadístico de las Muestras.

<i>Estadística Descriptiva de las Muestras</i>	
Media	1.073
Error típico	0.003
Mediana	1.19
Moda	1.25
Desviación estándar	0.39
Varianza de la muestra	0.15
Curtosis	0.74
Coficiente de asimetría	-0.16
Mínimo	0.00
Máximo	1.95
Suma	24016
Cuenta	20752
Mayor	1.95
Menor	0.00

**Tabla 2 Estadística de las muestras.**

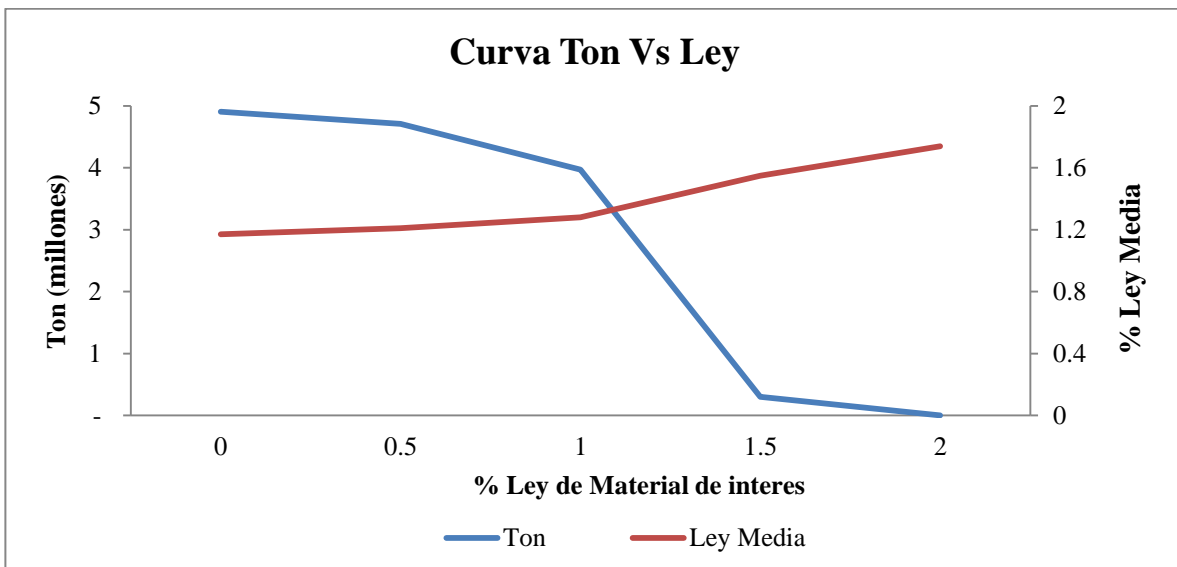
### 4.2.3 Histogramas



**Ilustración 19 Histograma de leyes de las muestras.**

Las mayores leyes de las muestras están entre 1% y 1.5% de ley.

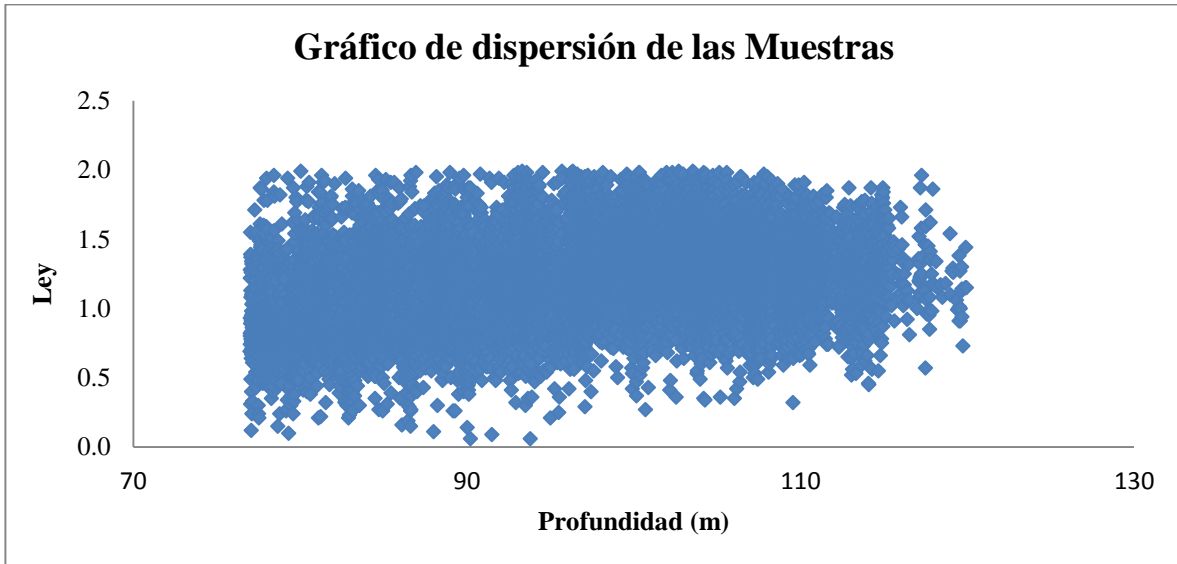
### 4.2.3 Curva tonelaje Ley, Ley Media y Ley de corte de las Muestras



**Ilustración 20 Grafico curva tonelaje – ley de las muestras.**

De la curva tonelaje ley, se observa que a ley 1.25% del material de interés, que es la moda de los datos, que hay cerca de 3.5 millones de toneladas.

#### 4.2.4 Grafico de dispersión de las Muestras



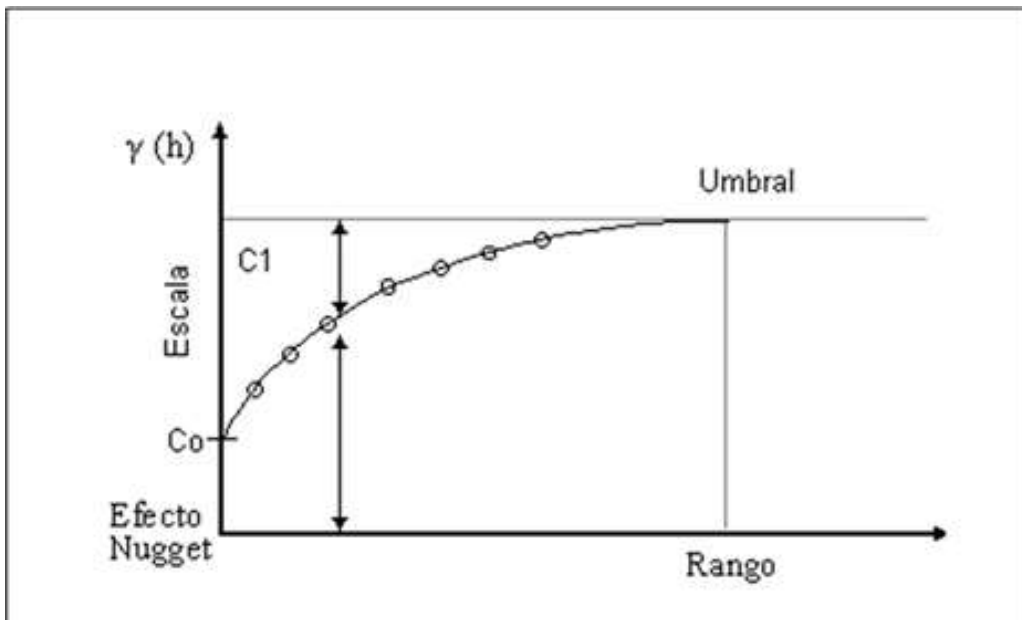
**Ilustración 21 Grafico de dispersión de las muestras.**

El análisis de los datos muestra que no hay datos típicos, la población está bien definida.

#### 4.3 MODELO TEÓRICO DE VARIOGRAMA

El variograma es un estimador de la varianza poblacional, por lo tanto la población debe tener una tendencia de estacionariedad; el variograma está relacionado con una dirección y distancia ( $h$ ), es la principal herramienta básica, que da soporte a las técnicas de Kriging, permite representar

cuantitativamente la variación de un fenómeno regionalizado en el espacio. El variograma modela como dos valores en el espacio o tiempo se ponen en correlación.



**Ilustración 22 Gráfico de variograma.**

El Variograma está conformado por los siguientes elementos:

*Efecto Nugget ( $C_0$ ):* Generalmente el variograma no tiende a cero como lo hace la distancia  $h$ , el *Efecto Nugget* indica la discontinuidad del semivariograma para distancias que sean menores, que la menor distancia que se da entre los puntos muestrales. Parte de esta discontinuidad puede también ser dividida en errores de medición, una pobre precisión analítica, o más a menudo por mineralización altamente errática a baja escala.

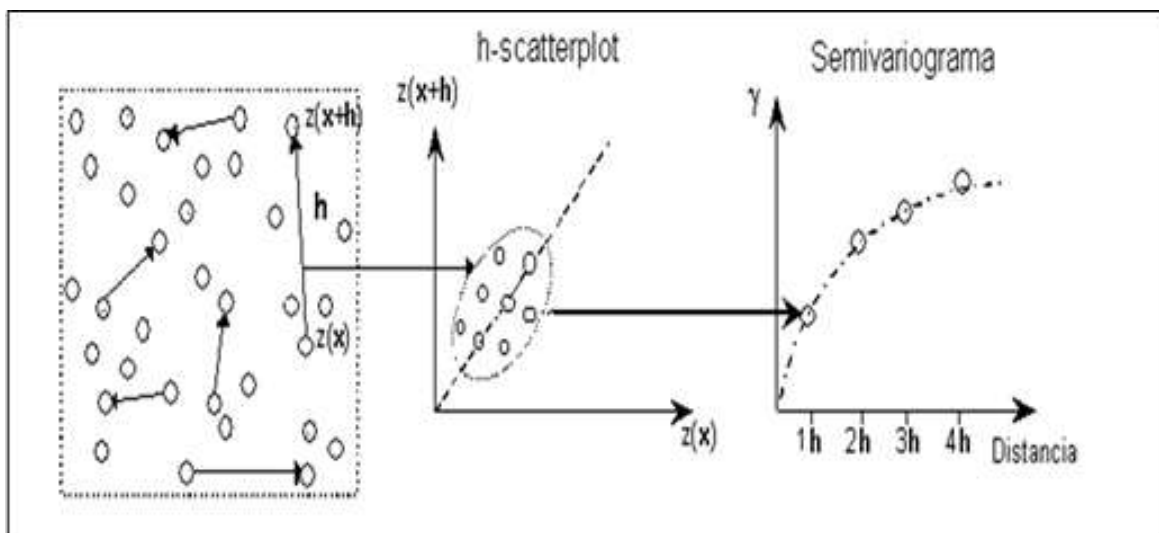
*Umbral ( $Sill = C_1 + C_0$ ):* Es el valor alcanzado por el variograma en el *Rango*. El *Sill* de un variograma, puede ser denotado como la varianza de la muestra.

*Escala (C1)*: Es el valor tal que;  $C1 + C0 = \text{Sill}$ .

*Rango (a)*: Es la distancia dentro de la cual, las muestras están correlacionadas espacialmente.

Cálculo del Variograma.

Para calcular el variograma se debe definir un incremento lag, tomar todos los pares de puntos que tengan esa distancia entre ellos, calcular el cuadrado de las diferencias para cada par de puntos, resumir todas las diferencias y luego dividir para dos veces el número de pares de puntos que tienen esta distancia entre sí, este resultado es el valor del variograma. Hacer lo mismo para otros incrementos lag.



**Ilustración 23 Construcción del variograma.**

El variograma es definido como:

$$2\gamma(h) = \text{Var. } [Z(x+h) - Z(x)] = E[\{Z(x+h) - Z(x)\}^2]$$

Puede ser estimado a partir de una muestra por:

$$\hat{2\gamma}(h) = \frac{1}{N(h)} \sum_{i=1}^{N(h)} [z(x_i) - z(x_i+h)]^2$$

### **Modelos Teóricos del Variograma.**

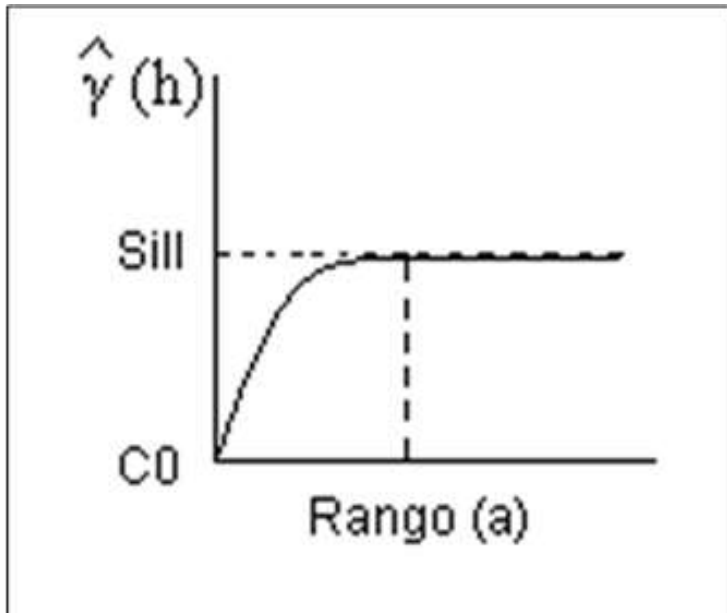
Son varios los modelos básicos de los Variogramas, que son capaces de explicar los diferentes comportamientos que pueden presentar las variables regionalizadas; entre los modelos más usuales que se dan tenemos:

✓ Modelo Esférico.

Está representado por la ecuación siguiente:

$$\hat{\gamma}(h) = \begin{cases} 0 & ; |h| = 0 \\ C0 + C1 \left[ \frac{3}{2} \left( \frac{|h|}{a} \right) - \frac{1}{2} \left( \frac{|h|}{a} \right)^3 \right] & ; 0 < h < a \\ C0 + C1 & ; |h| > a \end{cases}$$

Este modelo, presenta una tendencia creciente curvilínea, hasta que llega al *Sill*, para tomar una tendencia lineal. El modelo Esférico alcanza el valor *Sill*, en la distancia *a* (*rango* actual).



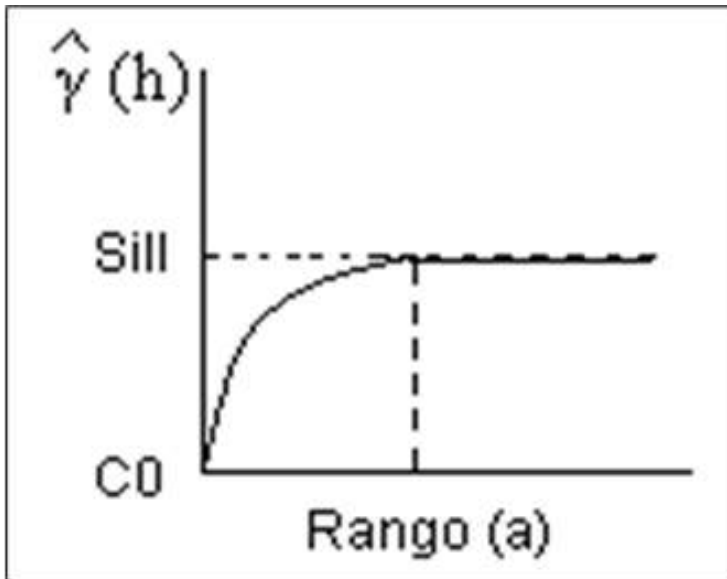
**Ilustración 24 Gráfico modelo esférico.**

✓ Modelo Exponencial:

Está representado por la ecuación siguiente:

$$\hat{\gamma}(h) = \begin{cases} 0 & ; |h| = 0 \\ C0 + C1 \left[ 1 - \exp\left(-\frac{|h|}{a}\right) \right] & ; h \neq 0 \end{cases}$$

El modelo Exponencial, alcanza el valor *Sill* asintóticamente, el *rango* (*a*) es la distancia a la cual el valor del modelo, es el 95 % del *Sill*.



**Ilustración 25 Gráfico modelo exponencial.**

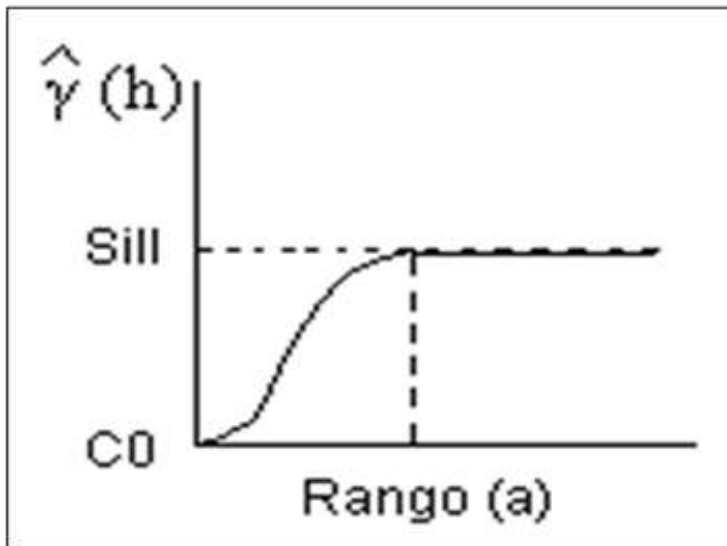
✓ Modelo Gaussiano:

Está representado por la ecuación siguiente:

$$\hat{\gamma}(h) = \begin{cases} 0 & ; |h| = 0 \\ C0 + C1 \left[ 1 - \exp\left(-\frac{|h|^2}{a}\right) \right] & ; h \neq 0 \end{cases}$$



El modelo Gaussiano, alcanza el valor *Sill* asintóticamente, el *rango* (*a*) es la distancia a la cual el valor del modelo, es el 95 % del *Sill*.



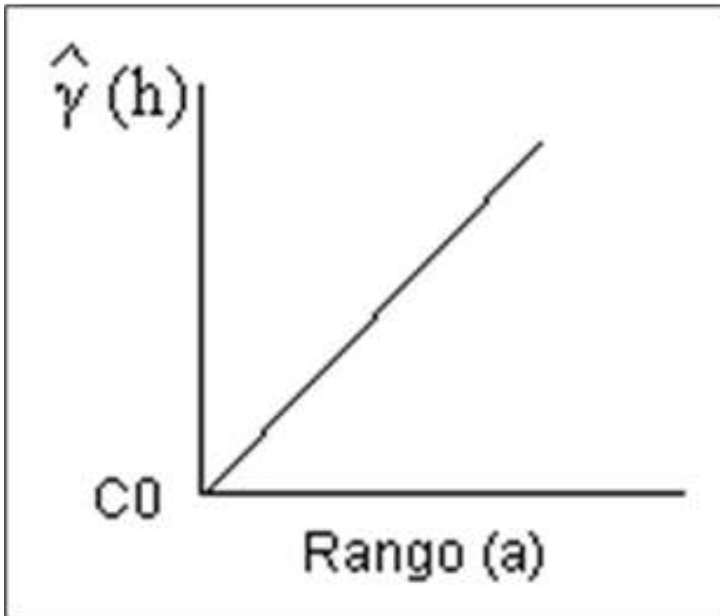
**Ilustración 26** Gráfico modelo gaussiano.

✓ Modelo Lineal.

Está representado por la ecuación siguiente:

$$\hat{\gamma}(h) = A(h) + B$$

No posee valor *Sill*, continua aumentando mientras la *distancia* (*h*) aumenta, es utilizado para modelar fenómenos que presentan capacidad infinita de dispersión.



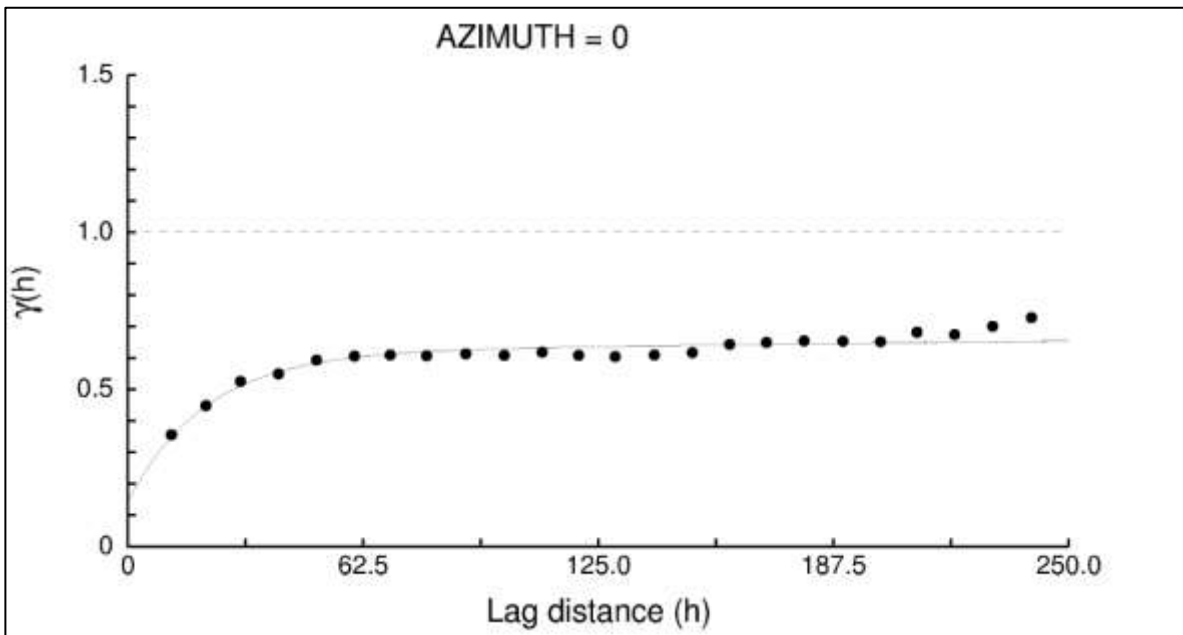
**Ilustración 27** Gráfico modelo lineal.

## **CONSTRUCCIÓN DEL VARIOGRAMA DESDE LAS MUESTRAS**

A continuación se ilustra el variograma experimental de los las muestras, ajustado a un modelo Variográfico (modelo exponencial), en las direcciones de azimut 0, 30, 60, 90, 120, 150, 180, 210, 240, 270, 300 y 330.

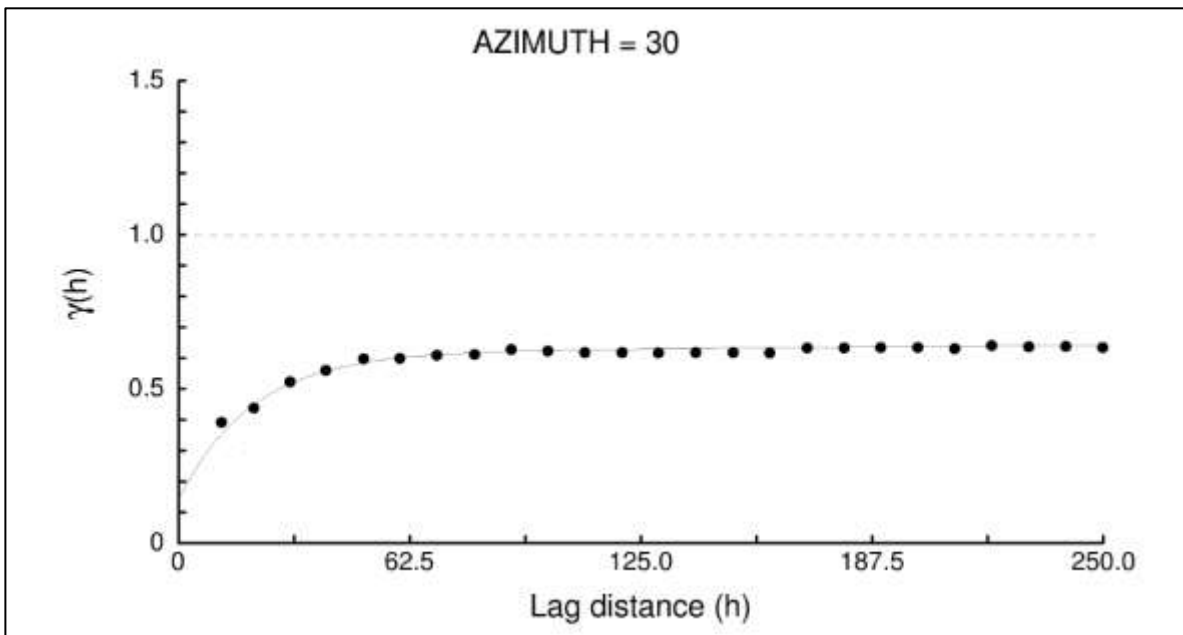
El efecto pepita del variograma modelado es de 0.143

- Variograma en dirección AZ= 0°



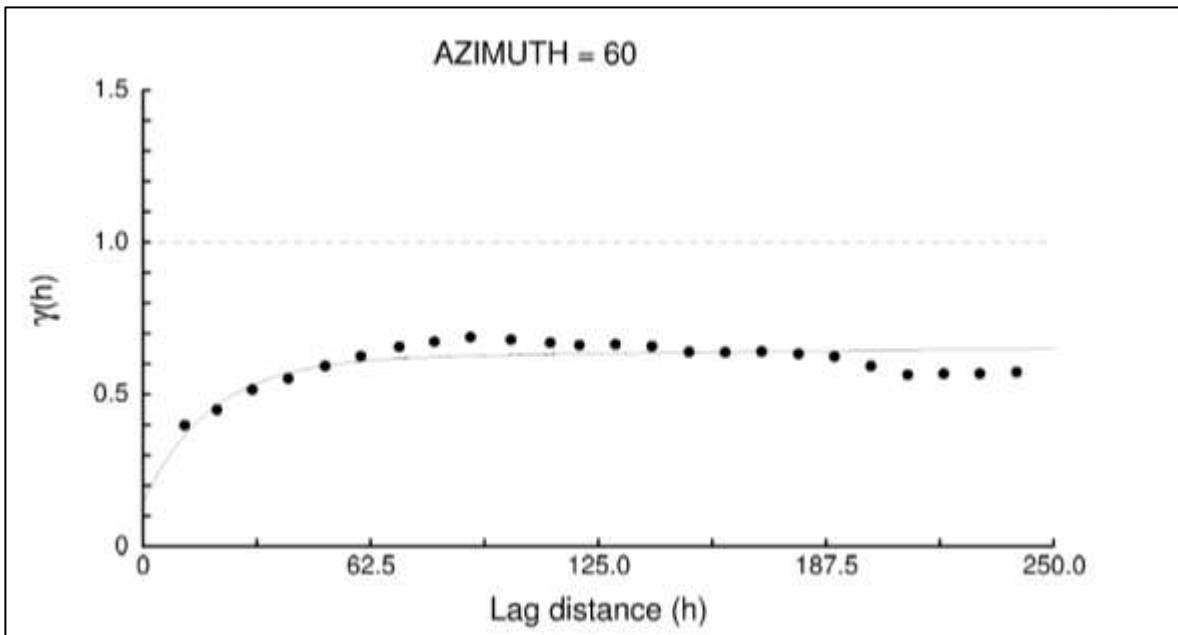
**Ilustración 28 Variograma en dirección AZ=0°.**

- Variograma en dirección AZ= 30°



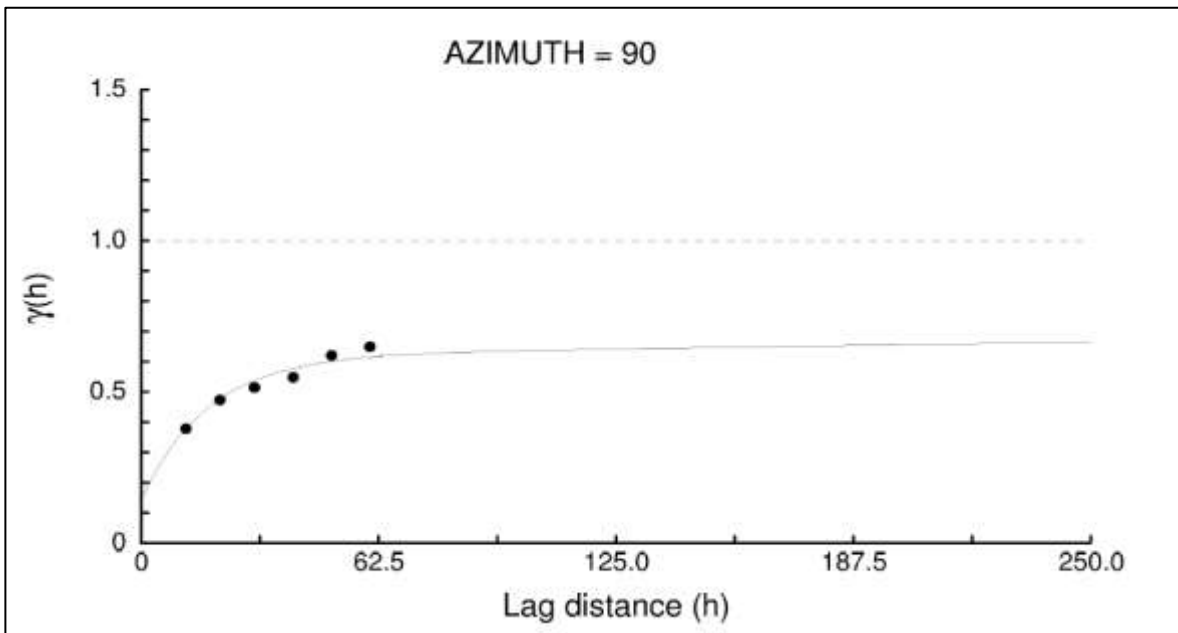
**Ilustración 29 Variograma en dirección AZ=30°.**

- Variograma en dirección AZ= 60°



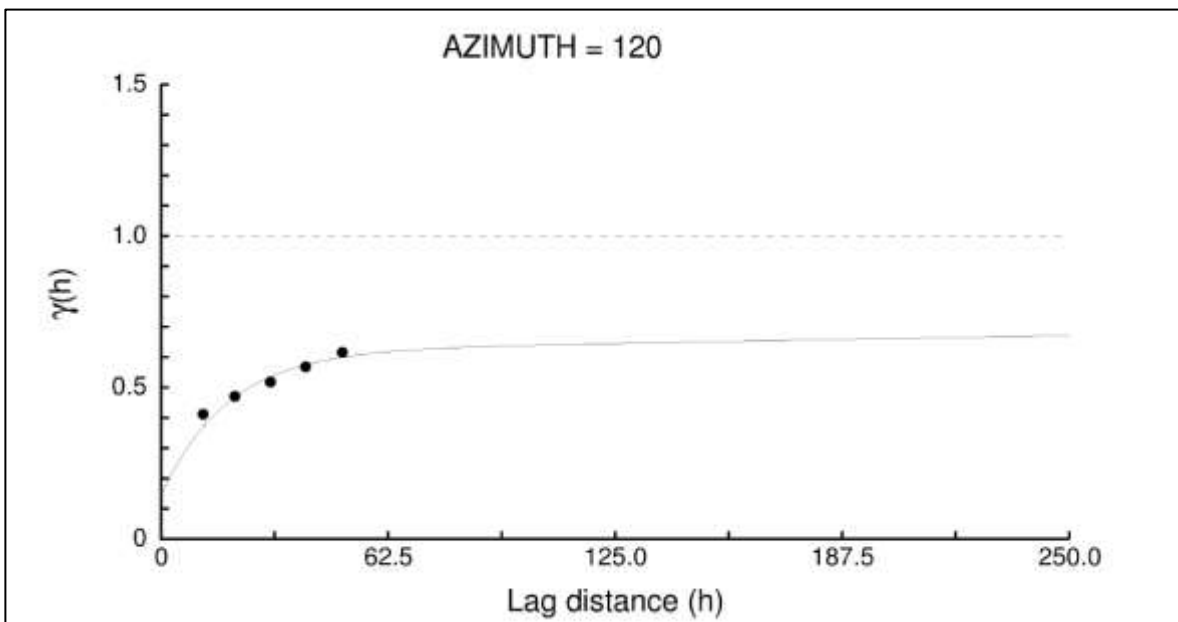
**Ilustración 30 Variograma en dirección AZ=60°.**

- Variograma en dirección AZ= 90°



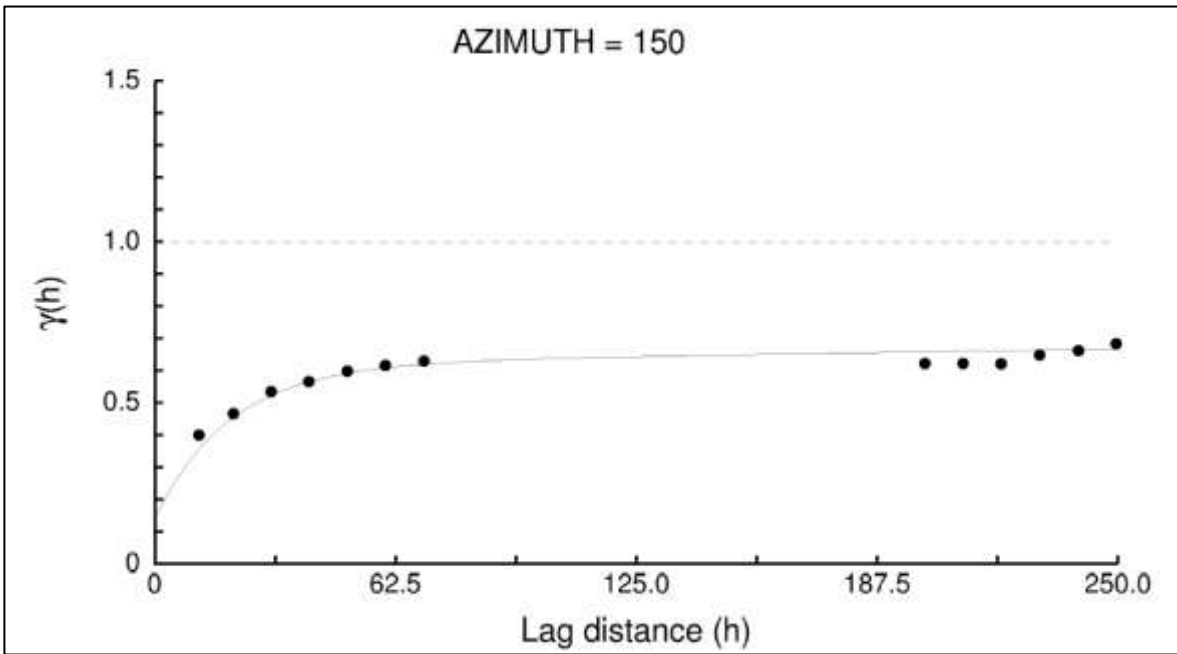
**Ilustración 31 Variograma en dirección AZ=90°.**

- Variograma en dirección AZ= 120°



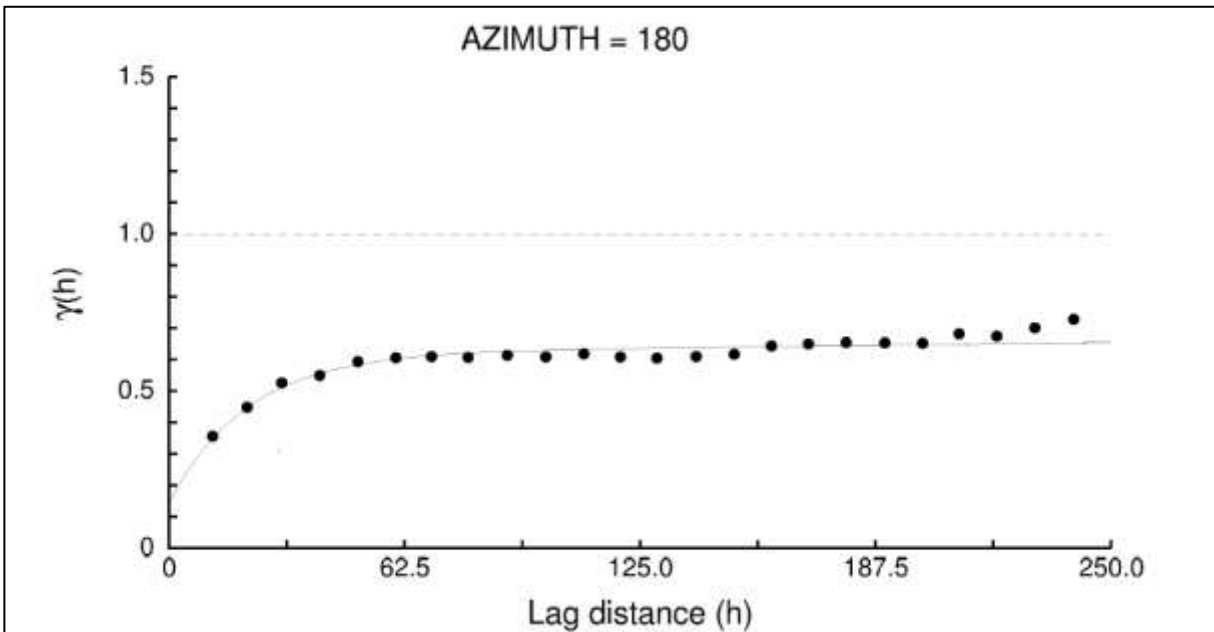
**Ilustración 32 Variograma en dirección AZ=120°.**

- Variograma en dirección AZ= 120°



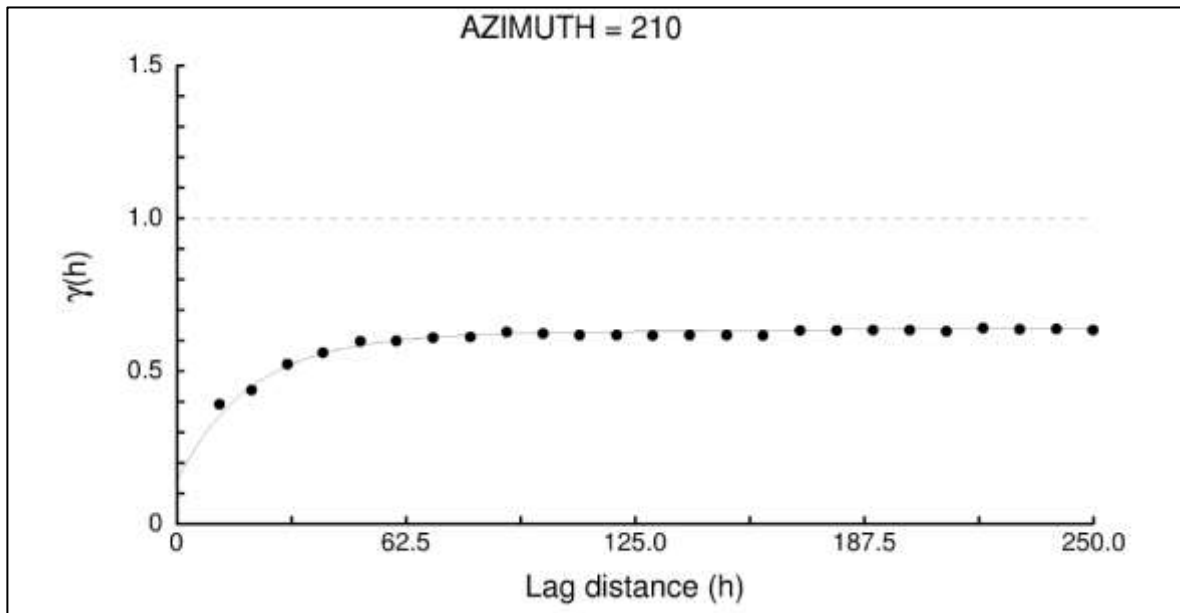
**Ilustración 33** Variograma en dirección AZ=150°.

- Variograma en dirección AZ= 180°



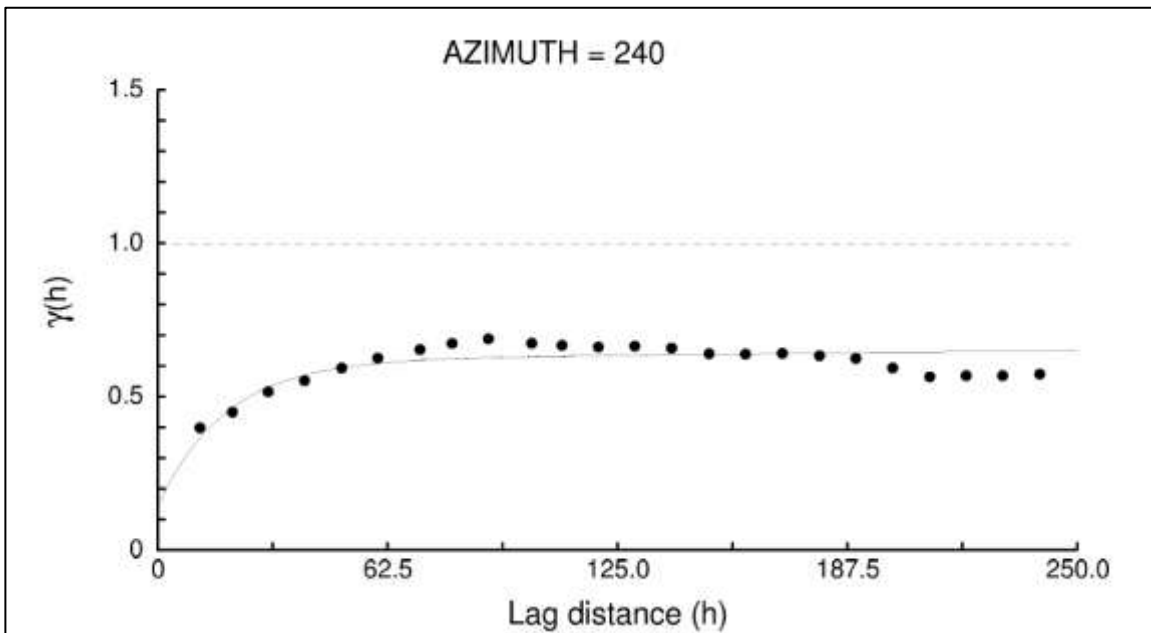
**Ilustración 34 Variograma en dirección AZ=180°**

- Variograma en dirección AZ= 210°.



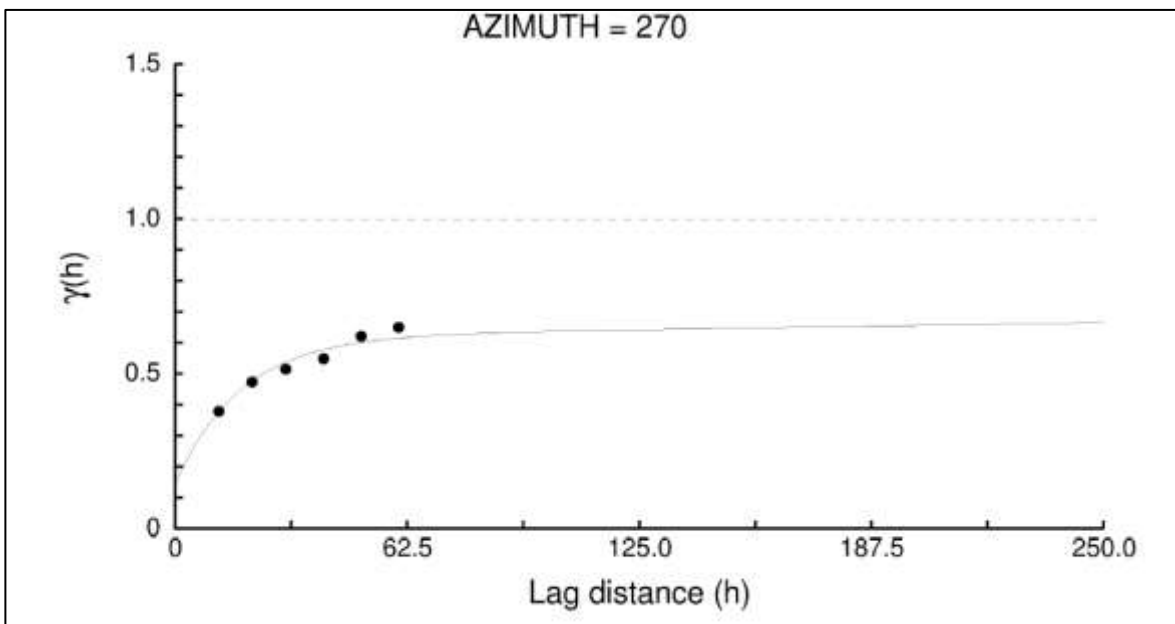
**Ilustración 35 Variograma en dirección AZ=210°.**

- Variograma en dirección AZ= 240°



**Ilustración 36 Variograma en dirección AZ=240°.**

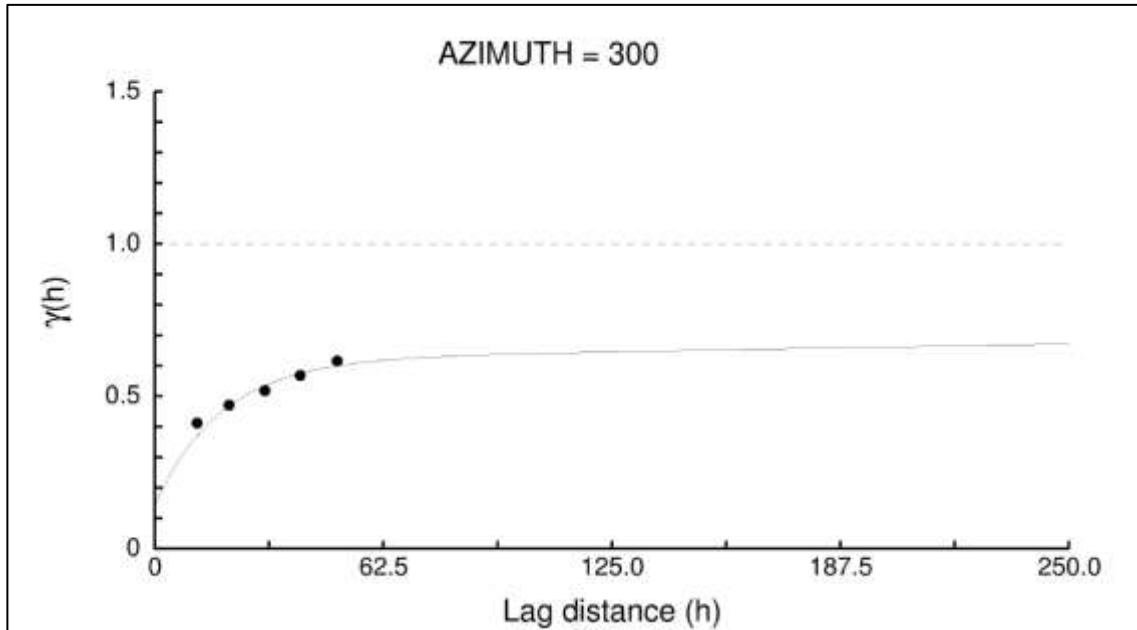
- Variograma en dirección AZ= 270°



**Ilustración 37 Variograma en dirección AZ=270°.**

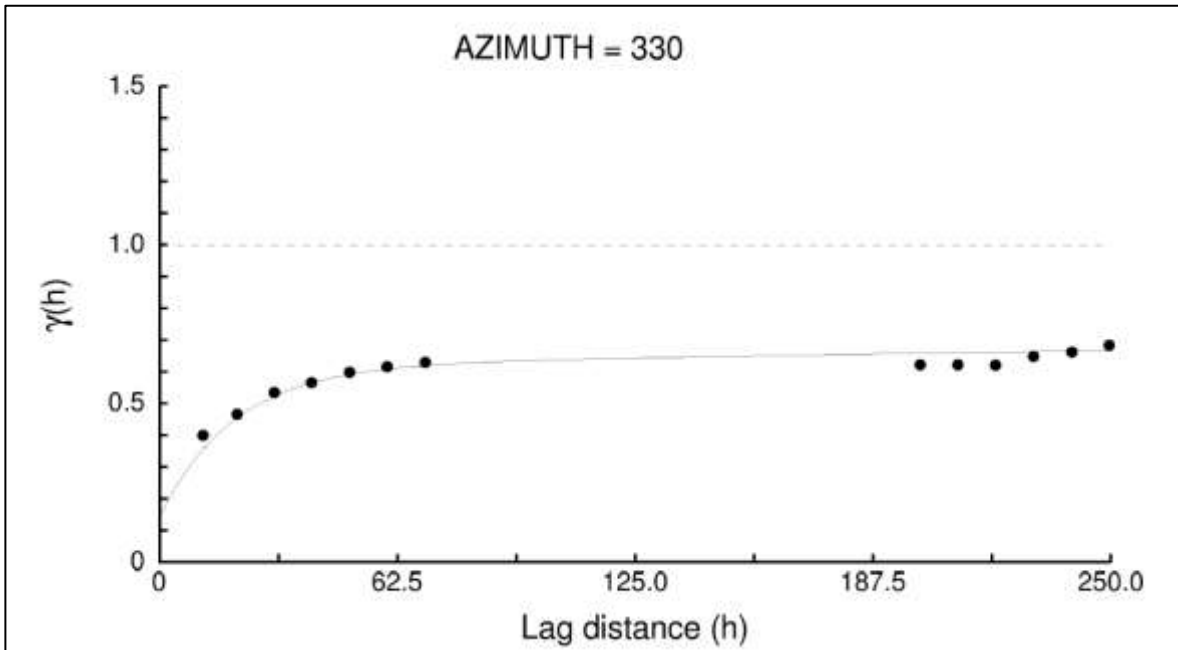


- Variograma en dirección  $AZ = 300^\circ$



**Ilustración 38 Variograma en dirección  $AZ=300^\circ$ .**

- Variograma en dirección  $AZ = 330^\circ$



**Ilustración 39 Variograma en dirección AZ=330°.**

#### **4.4 MODELO DE LAS MUESTRAS**

El Kriging es conocido como el método interpolador geoestadístico, es un estimador lineal insesgado, presenta dos propiedades básicas que son: Hacer que la suma de errores tienda a cero, y que el cuadrado de las desviaciones sea mínimo.

Tiene como objetivo estimar el valor de la variable  $Z$ , para un punto  $x_0$  que no ha sido considerado anteriormente, realiza una suma ponderada sobre todos los sectores que conforman la zona de estudio de interés, tomando los vecinos más cercanos al punto de interés  $x_0$ .

$$\hat{Z}(x_0) = \lambda_1 Z(x_1) + \lambda_2 Z(x_2) + \dots + \lambda_n Z(x_n)$$

$$\hat{z}(x_0) = \sum \lambda_i * z(x_i)$$

El proceso del Kriging es asignar pesos a los vecinos más cercanos, considerados para la estimación, la diferencia del Kriging con otros métodos de interpolación, es que utiliza un método semejante a la interpolación por media móvil ponderada, a diferencia que los pesos son asignados a partir de un análisis espacial, basado en el semivariograma experimental.

Un método de interpolación será exacto cuando, pase por los puntos muestrales, lo más cercano posible a ellos.

Es importante que un modelo para semivariograma que ha sido ajustado, represente una tendencia a los modelos antes descritos, para que las estimaciones obtenidas por medio del Kriging sean más exactas y más confiables.

Las estimaciones mediante el método Kriging pueden ser, por punto o por bloque.

### **Métodos de Estimación del Kriging**

Existen dos métodos de Kriging para realizar las estimaciones.

✓ **Kriging Ordinario**

Es el método más apropiado, para situaciones medioambientales, este método asume que las medias locales, no están necesariamente relacionadas lo más cercanamente a la media poblacional, por lo cual solo usa las muestras en la vecindad local para la estimación.

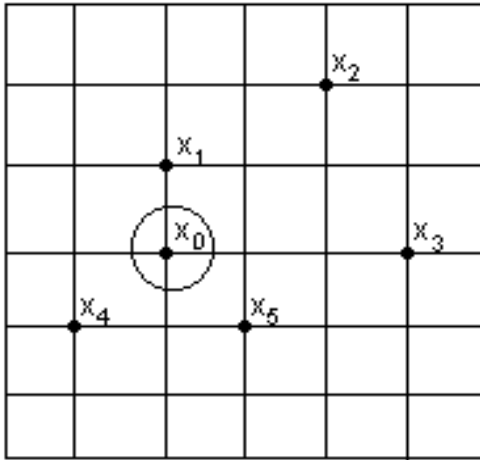
✓ **Kriging Simple**

Asume que las medias locales son relativamente constantes e iguales a la media poblacional, la cual es conocida. La media poblacional es usada como un factor en cada estimación local, a lo largo con las muestras en la vecindad local.

Hay dos tipos de Kriging, el de Punto y el de Bloque, lo cuales generan unas cuadrículas de interpolación.

✓ **Kriging de Punto**

Estima los valores de los puntos en los nodos de las cuadrículas.



**Ilustración 40 Kriging.**

✓ **Kriging de Bloque**

Estima el valor promedio de los bloques rectangulares, que están centrados en los nodos de las cuadrículas, los bloques son del tamaño y forma de las celdas de las cuadrículas, este tipo de Kriging no resulta ser un buen interpolador, ya que no estima el valor de un punto.

**CONSTRUCCION DEL MODELO DE LAS MUESTRAS**

Al igual que con el método de Inverse Power of Distance (IPD), kriging asigna ponderaciones a los datos circundantes. Sin embargo, una de las principales ventajas de kriging es que los pesos se calculan para minimizar la varianza del error.

Ubicación espacial de las muestras

Cuando se minimiza la varianza del error, kriging tiene en cuenta la ubicación espacial de las muestras una respecto de la otra. Por lo tanto, si se

agrupan varias muestras, esto se tendrá en cuenta cuando se calculen los pesos y se reduzcan los pesos en consecuencia. Este no es el caso para IPD, donde el peso depende únicamente de la distancia de la muestra desde el punto que se estima, y no tiene en cuenta la ubicación de las otras muestras.

El cálculo de los pesos combinados se basa en el variograma del modelo, que describe la correlación entre dos muestras en función de la distancia entre ellas. Se proporcionan más detalles de los modelos de variograma en la sección del archivo de parámetros del modelo de variogramas.

Para Kriging simple (SK), se calcula un peso  $W_i$  para cada muestra y se asigna un peso de  $(1 - \sum W)$  al nota media

Kriging simple (SK): IMETHOD = 4

```

#-----
#VARIABLES
#$inmod#: MODELO DE RESERVAS
#$mclori#: MODELO DE CONTROL DE LEY ACTUALIZADO
#$mclres#: RESULTADO MODELO DE CONTROL DE LEY EN EL PROTOTIPO REQUERIDO
#$modres#: RESULTADO MODELO DE RESERVAS EN EL PROTOTIPO REQUERIDO
#-----

!START crear_mo

#-----
# Define variables
#-----
!LET $inmod#=cmsa11npv3aff
!LET $mclori#=m6210814
!LET $mclres#=MCLPROTO_aff
!LET $modres#=resproto_aff
#-----

!PROTOM   &OUT(protoMMP),@ROTMOD=0.0
N
Y
-2000
-1050
-700
6.25
6.25
7
960
864
130

!SLIMOD   &PROTO(protoMMP),&IN($inmod#),
&OUT(TEMP1_1)

!MGSORT   &IN(temp1_1),&OUT(temp1_2),*KEY1(IJK),@ORDER=1.0

!PROMOD   &IN(temp1_2),&OUT($modres#),@DENSITY=1.0,@OVERLAP=2.0,
@OPTIMISE=2.0,@TOL=0.001,@ACCURACY=0.001

!SLIMOD   &PROTO(protoMMP),&IN($inmod#),
&OUT(TEMP1_1)

!MGSORT   &IN(temp1_1),&OUT(temp1_2),*KEY1(IJK),@ORDER=1.0

!PROMOD   &IN(temp1_2),&OUT($modres#),@DENSITY=1.0,@OVERLAP=2.0,
@OPTIMISE=2.0,@TOL=0.001,@ACCURACY=0.001

!SLIMOD   &PROTO(protoMMP),&IN($mclori#),&OUT(temp2_1)

!MGSORT   &IN(temp2_1),&OUT(temp2_2),*KEY1(IJK),@ORDER=1.0

!PROMOD   &IN(temp2_2),&OUT(temp2),@DENSITY=1.0,@OVERLAP=2.0,
@OPTIMISE=2.0,@TOL=0.001,@ACCURACY=0.001

!EXTRA    &IN(temp2),&OUT(temp3),@APPROX=0.0
ROCK10=0
ROCK13=0
ROCK14=0
ROCK20=0
ROCK24=0
ROCK30=0
ROCK40=0
ROCK42=0
ROCK43=0
ROCK44=0
ROCK50=0
ROCK60=0
ROCK70=0
ROCK80=0
VOL=XINC*YINC*ZINC
RTON=VOL*DENSITY
NIMET=NI*RTON
FEMET=FE*RTON
MGMET=MGO*RTON
SIMET=SIO2*RTON
ALMET=AL2O3*RTON
COMET=CO*RTON
IF(ROCKNA==10)
ROCK10=1
END
IF(ROCKNA==13)
ROCK13=1
END
IF(ROCKNA==14)

```

```

#-----
#VARIABLES
#Mclpro#: MODELO DE CONTROL DE LEY EN EL PROTOTIPO REQUERIDO (SE OBTIENE DE LA MACRO
#Modpro#: MODELO DE RESERVAS EN EL PROTOTIPO REQUERIDO (SE OBTIENE DE LA MACRO 1)
#Dhmc1#: BASE DE DATOS DE PERFORACIONES DEL MCL
#Dhres#: BASE DE DATOS DE PERFORACIONES DEL MODELO DE RESERVAS
#Mclmues#: RESULTADO MODELO CON LOS BLOQUES MUESTREADOS DEL MCL
#resmues#: RESULTADO MODELO CON LOS BLOQUES MUESTREADOS DEL MODELO DE RESERVA
#scpar#: RADIOS DE BUSQUEDA DE LAS ESTIMACIONES
#stpar#: PARAMETROS DE BUSQUEDA DE LAS ESTIMACIONES
#-----
! START MUESTREO
#-----
## Define variables
#-----
!LET $mclpro#=MCLPROTO_aff
!LET $modpro#=resproto_aff
!LET $dhmc1#=hoyoshoy
!LET $dhres#=dh_lp
!LET $mclmues#=mclmues_aff
!LET $resmues#=resmues_aff
!LET $scpar#=m6scpar
!LET $stpar#=m6stpar
#-----
## MARCA LOS BLOQUES DEL MODELO DE CONTROL DE LEY
#-----
!ESTIMA  &PROTO($mclpro#),&IN($dhmc1#),
          &SRCPARM($scpar#),&ESTPARM($stpar#),
          &MODEL(TEMP1),*X(X),*Y(Y),*Z(Z),@DISCMETH=1.0,
          @XPOINTS=1.0,@YPOINTS=1.0,@ZPOINTS=1.0,@PARENT=0.0,
          @DYANKR=0.0,@MINDISC=1.0,@COPYVAL=0.0,@FVALTYPE=2.0,
          @XSUBCELL=1.0,@YSUBCELL=1.0,@ZSUBCELL=1.0,@ALLWGTS=0.0,
          @LINKMODE=3.0,@UCSAMODE=2.0,@UCSBMODE=3.0,@UCSCMODE=2.0,
          @PLANE=1.0,@TOLRNC=0.0,@ORGTAG=-
!COPY    &IN(TEMP1),&OUT($mclmues#),FLAG>0.00001<+

```

```

#VARIABLES
#$resmues#: MOD RESERVA CON LOS BLOQUES CON MUESTREO MARCADOS (SE OBTIENE DE LA MACRO
#$mclmues#: MCL CON LOS BLOQUES CON MUESTREO MARCADOS (SE OBTIENE DE LA MACRO 2)
#$mmp#:     MODELO HIBRIDO MCL-RESERVAS
#-----
! START mod_bla
#-----
## Define variables
#-----
!LET $resmues#=resmues_aff
!LET $mclmues#=mclmues_aff
!LET $mmp#=mp240814_aff
#-----
!EXTRA    &IN($resmues#),&OUT(Temp1),@APPROX=0.0
DENORE=DENSITY
DENWAS=0
NI=NI_AFF
If(CLASS>2)
NI=0
END
ROCK70=0
MCL=0
MUESTREO=0
IF(FLAG!=ABSENT())
MUESTREO=1
END
ERASE(NI_AFF)
GO
#-----
# selecciona campos a usar
#-----
!SELCOP  &IN(Temp1),&OUT(Temp2),*F1(IJK),*F2(XC),*F3(YC),*F4(ZC),
          *F5(XINC),*F6(YINC),*F7(ZINC),*F8(DENORE),*F
          *F11(FE),*F12(MGO),*F13(SIO2),*F14(AL2O3),*F
          *F16(ROCK10),*F17(ROCK13),

```



```

#-----
# selecciona campos a usar
#-----
!SELCOP  &IN(Temp1),&OUT(Temp2),*F1(IJK),*F2(XC),*F3(YC),*F4(ZC),
          *F5(XINC),*F6(YINC),*F7(ZINC),*F8(DENORE),*F9
          *F11(FE),*F12(MGO),*F13(SIO2),*F14(AL2O3),*F1
          *F16(ROCK10),*F17(ROCK13),
          *F18(ROCK14),*F19(ROCK20),*F20(ROCK24),*F21(ROCK30),
          *F22(ROCK40),*F23(ROCK42),*F24(ROCK43),*F25(ROCK44),
          *F26(ROCK50),*F27(ROCK60),*F28(ROCK70),*F29(ROCK80),
          *F30(MCL),*F31(MUESTREO),
          *F32(XMORIG),
          *F33(YMORIG),*F34(ZMORIG),*F35(NX),*F36(NY),*F37(NZ),
          @KEEPALL=1.0

!MGSORT  &IN(Temp2),&OUT(Temp3),*KEY1(IJK),@ORDER=1.0

!EXTRA   &IN($mc|mues#),&OUT(Temp4),@APPROX=0.0
DENORE=DENSITY
DENWAS=0
MCL=1
MUESTREO=1

GO

!IJKGEN  &PROTO($resmues#),&IN(temp4),
          &OUT(temp5),*X(XC),*Y(YC),*Z(ZC),@PSMODEL=1.0

!SELCOP  &IN(Temp5),&OUT(Temp6),*F1(IJK),*F2(XC),*F3(YC),*F4(ZC),
          *F5(XINC),*F6(YINC),*F7(ZINC),*F8(DENORE),*F9
          *F11(FE),*F12(MGO),*F13(SIO2),*F14(AL2O3),*F1
          *F16(ROCK10),*F17(ROCK13),
          *F18(ROCK14),*F19(ROCK20),*F20(ROCK24),*F21(ROCK30),
          *F22(ROCK40),*F23(ROCK42),*F24(ROCK43),*F25(ROCK44),
          *F26(ROCK50),*F27(ROCK60),*F28(ROCK70),*F29(ROCK80),
          *F30(MCL),*F31(MUESTREO),*F32(XMORIG),
          *F33(YMORIG),*F34(ZMORIG),*F35(NX),*F36(NY),*F37(NZ),
          @KEEPALL=1.0

!MGSORT  &IN(Temp6),&OUT(Temp7),*KEY1(IJK),@ORDER=1.0

!ADDMOD  &IN1(Temp3),&IN2(Temp7),&OUT($mmp#)

```

**Ilustración 41 Rutina en datamine para crear modelo de las muestras.**

## 4.5 SIMULACION DE MODELOS

Las simulaciones condicionales son una combinación de Kriging y de muestreo tipo Monte Carlo que entrega una serie de modelos de leyes para agregar la variabilidad perdida agregando al valor estimado por kriging simple, un residuo de media cero y varianza igual a la varianza de kriging simple. Esto permite que la relación entre un dato y un valor simulado sea correcta, reproduciendo la variabilidad espacial

Entre las aplicaciones de los métodos de simulación Gaussiano están:

- Análisis de riesgo: cálculo del VAN en cada realización
  
- Categorización de recursos y reservas
  
- Diseño de rajo óptimo
  
- Planificación minera: ¿qué variabilidad de leyes se espera en la planta?
  
- Control de leyes: ¿cuál es la decisión más oportuna para cada bloque: mandar a planta o a botadero?
  
- Reconciliación de leyes mina / planta

En el caso, se evalúa la variabilidad de las leyes y por ende su destino, además de la variabilidad en el VAN para cada uno de los escenarios. Cada nodo simulado nos entregará una cantidad de valores alternativos de leyes que combinados representan el rango de valores posibles para ese punto en el depósito. El proceso de simulación se realizó con Datamine RM.

## **PROCESO DE SIMULACIÓN DE LOS MODELOS**

Se consideran los siguientes pasos:

1. Generar un prototipo: consiste en usar un modelo que será la base para las simulaciones, este prototipo debe contar con un origen, unas dimensiones de bloques y el número de subceldas que se debe obtener en cada dirección X, Y y Z

2. Declusterin los datos por el método de celdas: Es el proceso de ajustar el conjunto completo de datos, es decir, eliminando o ponderando puntos de datos en áreas densamente muestreadas, para obtener un conjunto de muestras más representativo y uniformemente espaciado. El proceso DECLUST proporciona dos métodos para hacer esto, con ambos métodos que requieren una cuadrícula 3D regular, que en nuestro caso es 12.5 x 12.5 x 7 , para colocar sobre los datos de muestra. Los dos métodos son:

Selección de muestra: seleccione una sola muestra de cada celda de la cuadrícula.

Peso reducido: asigne a cada muestra un peso basado en la cantidad de muestras en la celda de la cuadrícula

Si se elige el método de Selección de muestra, DECLUSO proporciona una selección de cuatro formas de asignar el valor a la celda de la cuadrícula:

- Seleccione una muestra al azar dentro de cada celda de la grilla. Se genera una nueva muestra aleatoria para cada ejecución.
- Seleccione una muestra al azar dentro de cada celda de la grilla. Se genera la misma muestra 'aleatoria' para cada ejecución.
- Seleccione la muestra más cercana al centro de celda de la grilla.
- Calcule el valor promedio de todas las muestras dentro de la celda de la cuadrícula. Nosotros usaremos esta opción.

### 3. Inicia la Simulación Condicional

El proceso SGSIM en datamine, crea una grilla regular de puntos condicionalmente simulados usando la simulación gaussiana secuencial.

Se pueden generar múltiples realizaciones (simulaciones) en una sola ejecución del proceso. Las principales entradas son:

- un archivo de datos de muestra (X, Y, Z y campo de grado) y el modelo de variograma correspondiente
- la definición de la grilla de puntos de salida

Hay una opción de métodos de kriging:

kriging simple, ordinario, simple con un promedio variable localmente, con una deriva externa o Cokriging ubicado con una calificación secundaria.

Los principales resultados son: Un archivo de puntos (XPT, YPT, ZPT, grado y número de realización) que contiene los puntos simulados. Un archivo de modelo de bloque. Esto contiene la misma información que el archivo de puntos, excepto que cada realización es un campo separado en el modelo.

CAMPO	DESCRIPCION
XPT	X coordenada del punto simulado
YPT	Y Coordenada del punto simulado
ZPT	Z Coordenada del punto simulado
SIMNUM	Número de la Simulación
GRADO	Variable simulada
XPPPC	Número de puntos por celda principal en la dirección X
YPPPC	Número de puntos por celda principal en la dirección Y
ZPPPC	Número de puntos por celda principal en la dirección Z
XMORIG1	X origen del modelo
YMORIG1	Y origen del modelo
ZMORIG1	Z origen del modelo
XINC1	Tamaño de celda principal en la dirección X
YINC1	Tamaño de celda principal en la dirección Y
ZINC1	Tamaño de celda principal en la dirección Z
NX1	Número de celdas principales en la dirección X
NY1	Número de celdas principales en la dirección Y
NZ1	Número de celdas principales en la dirección Z

**Tabla 3 Campos modelos simulados.**

#### 4. Crea Los modelos Simulados

Mediante el proceso CSMODEL se lleva a cabo la creación de los modelos, se ingresa una grilla regular de puntos simulados (PUNTOS) según lo creado por SGSIM para realizaciones múltiples y se Obtienen un archivo de modelo de salida (SIMMOD) que promedia los puntos simulados que se encuentran dentro de cada celda principal dando una calificación promedio simulada para cada realización crea, el archivo de modelo de salida (STATMOD) proporciona las estadísticas, los cuantiles y la proporción y el grado de corte superior para cada celda principal y el archivo de reservas de salida (RESERVAS) entrega las toneladas, el grado y el límite superior del metal para el modelo total.

```

## Prototype for 1nd SGSIM process
!PROTOM &OUT(proto),@ROTMOD=0.0
N
N
1756.24
-212.73
30.56
2.5
2.5
3.5
222
449
32

-----
## Declustering by the cell method
!STATS &IN(samples),&OUT(stat_samples),"F1(NI),
  *WEIGHT(LENGTH)
!DECLUST &IN(samples),&OUT(declus_samples),"X(X),"Y(Y),"Z(Z),
  @METHOD=4.0,@XGRID=12.5,@YGRID=12.5,@ZGRID=7.0,
  @XORIG=1756.24,@YORIG=-212.73,@ZORIG=30.56,@CENTRE=0.0
!STATS &IN(declus_samples),&OUT(stat_declus_samples),"F1(NI),
  *WEIGHT(DCWEIGHT)

-----
## Start the Conditional simulations - SGSIM (NSIM=30)
## The transform of the raw data to Normal score is carried into.
!SGSIM &IN(declus_samples),&MODPARM(FIT_nsim),&PROTO(proto),
  &POINTS(POINTSTEMP1),&MODEL(BMTEMP1),
  *X(X),"Y(Y),"Z(Z),"GRADE(NI),"DCWGT(DCWEIGHT),@MINGRADE=0.0079,
  @MAXGRADE=3.35,@STRANTYPE=1.0,@MINSIMGR=0.0079,@MAXSIMGR=3.35,
  @LOTAIL=1.0,@LOPAR=2.0,@UPTAIL=1.0,@UPPAR=2.0,@NSIM=50,
  @XPPPC=1.0,@YPPPC=1.0,@ZPPPC=1.0,@SEED=51931,@MINDATPT=3.0,
  @MAXDATPT=10.0,@MAXSIMPT=10.0,@SSTRAT=0.0,@MULTGRID=3.0,
  @MAXPERDC=0.0,@SDIST1=14.0,@SDIST2=14.0,@SDIST3=7.0,
  @SANGLE1=22,@SANGLE2=85,@SANGLE3=14,@KTYPE=1.0,@VMODNUM=1.0,
  @DBGLEVEL=1.0

## Copy records different to ABSENT "-"
!COPY &IN(BMTEMP1),&OUT(BM_sgsim_n1),
  SIM1->0.0<+
!COPY &IN(POINTSTEMP1),&OUT(POINTS_sgsim_n1),
  NI->0.0<+

-----
## Create Conditional Simulations Models
!CSMODEL &POINTS(POINTS_sgsim_n1),&CUTOFF(CUTOFF1),&QUANTILE(QUANTILE1),
  &SIMMOD(SIMMOD),&STATMOD(STATMOD),&RESERVE(RESERVE),
  &PLOT(GTPlot),"GRADE(NI),@XPPPC=1.0,@YPPPC=1.0,@ZPPPC=1.0,
  @DENSITY=1.0,@GPLOT=1,@TPLOT=1,@MPLOT=1,@GTPlot=1

!DELETE &IN(POINTSTEMP1)
!DELETE &IN(BMTEMP1)

!END SGSIM

-----
## Validation: spatial covariance
# Nota: no funciona esta parte porque NSCORE trabaja hasta con 50.000 datos.
!let $n#=0
!loop1:let $n#={ $n#+1}
!if $n#>5, goto endloop1

!NSCORE &IN(BM_sgsim_n1),&OUT(ns$n#),&TRANDIST(tran$n#),
  *GRADE(SIM$n#),@MINGRADE=0.0079
!EXTRA &IN(ns$n#),&OUT(Temp$n#)
SIM=$n#
GO
!SELCOP &IN(Temp$n#),&OUT(ns$n#),"F1(SIM),"F2(XC),"F3(YC),
  *F4(ZC),"F5(NS_SIM$n#),@KEEPALL=0.0

!DELETE &IN(Temp$n#)

!goto loop1
!endloop1:rem

-----

```

**Ilustración 42 Proceso de simulación condicional.**

Desde el punto de vista geoestadístico, las simulaciones condicionales se construyen de manera tal que cumplan con ciertos requisitos básicos:

- El modelo obtenido reproduce el histograma de los datos originales utilizados en la simulación, en este caso los compositos de 3.5m. Esto significa que los datos simulados, debieran presentar un histograma cuya forma, valores máximo y mínimo, percentiles, mediana, media, varianza, etc., sean similares a los valores correspondientes de los compositos utilizados.
- También debe reproducir los modelos de variogramas Gaussianos y las leyes originales (ya que la técnica utilizada es la Gaussiana Secuencial), reproduciendo así la complejidad de la variabilidad espacial de la mineralización, y la conectividad de valores altos y bajos de ley según lo describe el modelo de variograma utilizado.

Todas las simulaciones se construyeron en grillas tan finas cómo fue posible. El volumen que cada punto simulado representa es idéntico al volumen de los compositos en el stockpile. La grilla de los nodos simulados fue de 3.5m x 3.5m x 3.5m, suficientemente amplia como para permitir su manejo práctico, según la capacidad computacional disponible, y al mismo tiempo pequeña como para obtener una cantidad suficiente de nodos para ser eventualmente promediados al tamaño de la SMU considerada (en este caso 7 m x 7 m x 3.5m).

La simulación Gaussiana Secuencial sigue los mismos lineamientos básicos del Krigeage multiGaussiano, y está basada en un Krigeage simple de la variable normalizada (Gaussiana). La simulación se realiza utilizando como dominio de simulación el stockpile SP1EM, y considerando únicamente el elemento de interes; dada la naturaleza antrópica del stock y la pérdida de continuidad geológico/estructural.

Se obtuvieron 30 simulaciones para el elemento. Dentro del volumen correspondiente al SP1EM, hay aproximadamente 13.9 millones de nodos simulados. En general, los parámetros incluyeron un máximo de entre 3 y 10 compositos al simular, además entre 1 y 10 nodos previamente simulados. La región de búsqueda se orientó según el modelo de variograma, y

aplicando radios de búsqueda de 14mx14mx7m; también se utilizó el algoritmo de mallas múltiples (multi-grilla).

## **4.6 VALIDACIÓN DE LOS MODELOS SIMULADOS**

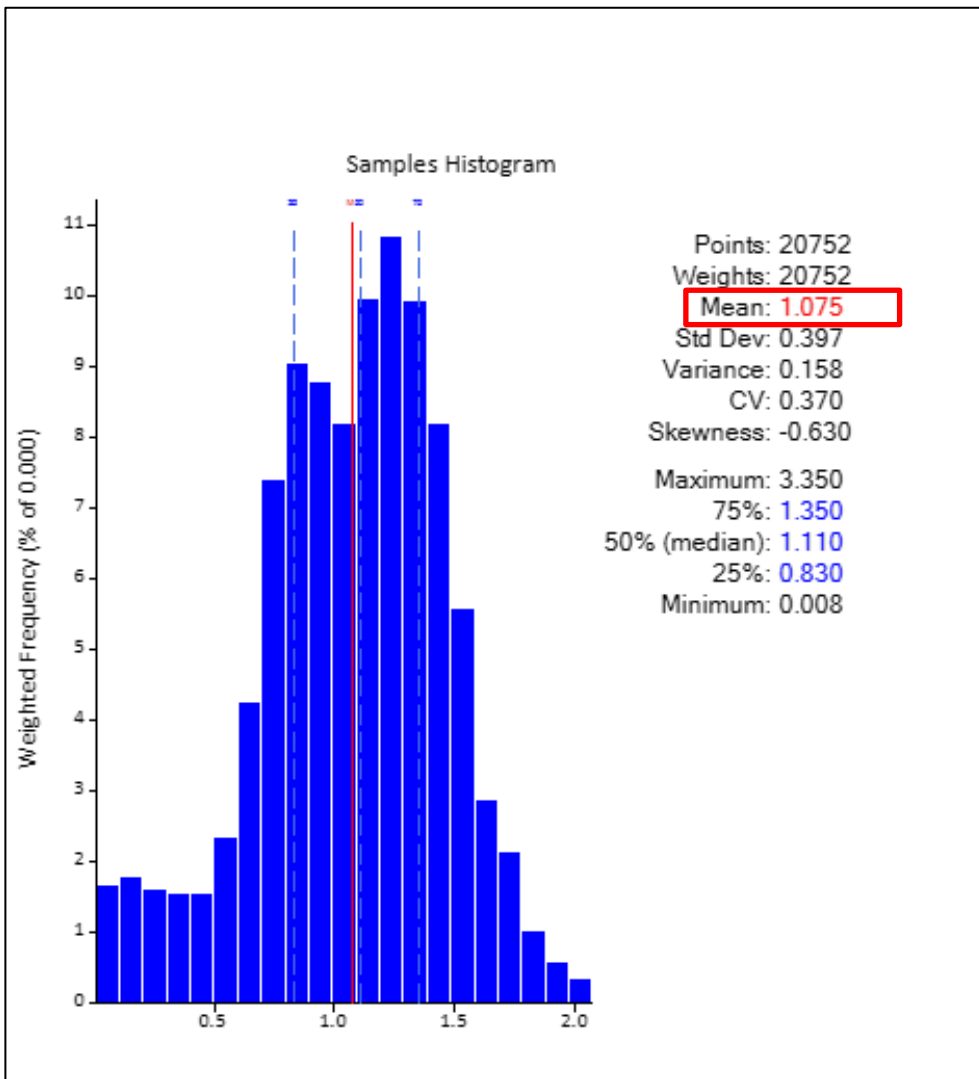
La validación de los Modelos de Simulación comprendió tres etapas diferentes:

### **4.6.1 Validación Estadística**

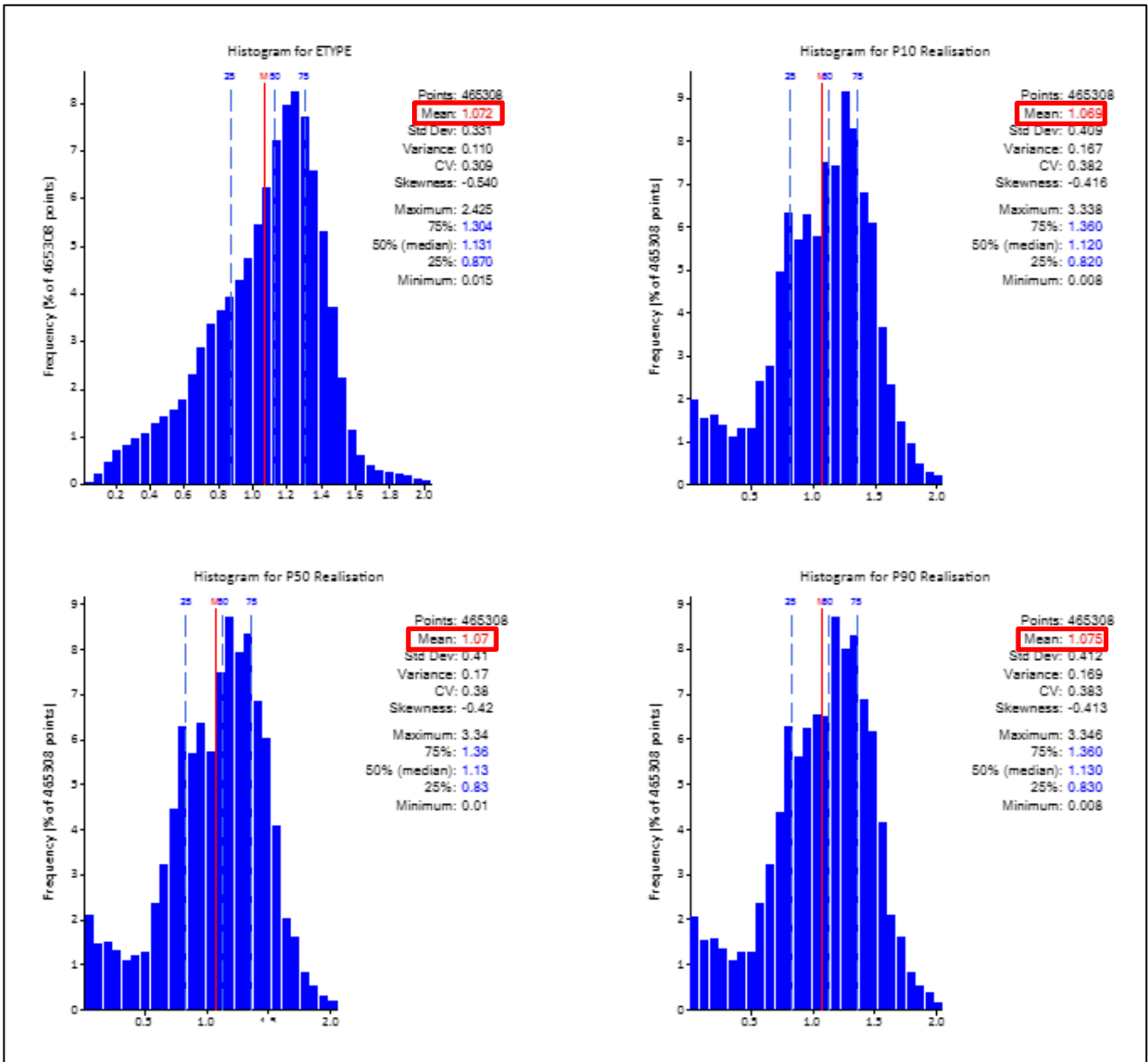
Validación de las estadísticas de las simulaciones versus las estadísticas correspondientes a los compositos utilizados

A continuación se muestran los histogramas de las muestras versus los modelos simulados resaltando la reproducibilidad de la media para los modelos.



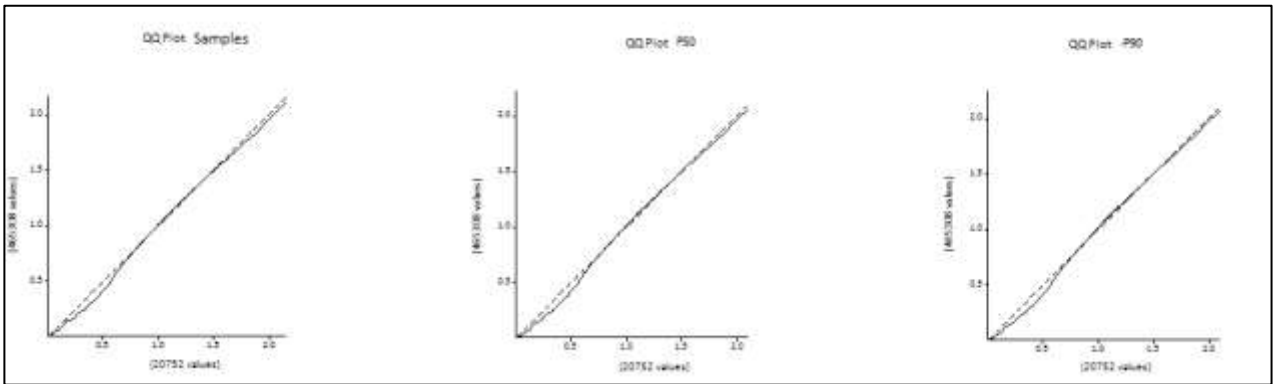


**Ilustración 43 Histograma de las muestras.**



**Ilustración 44 Histograma de las simulaciones Etype, P10, P50 y P90.**

La Ilustración 44 muestra un gráfico cuantil-cuantil (Q-Q) que compara la distribución de leyes simuladas versus las correspondientes a los compositos, simulación P50. Obsérvese como la simulación tiene una distribución muy similar a la distribución de los compositos de 3.5m utilizados.



**Ilustración 45 Validación - gráficos cuantil-cuantil entre la distribución de leyes de las realizaciones P10, P50 y P90 vs la correspondiente distribución de leyes de los composites.**

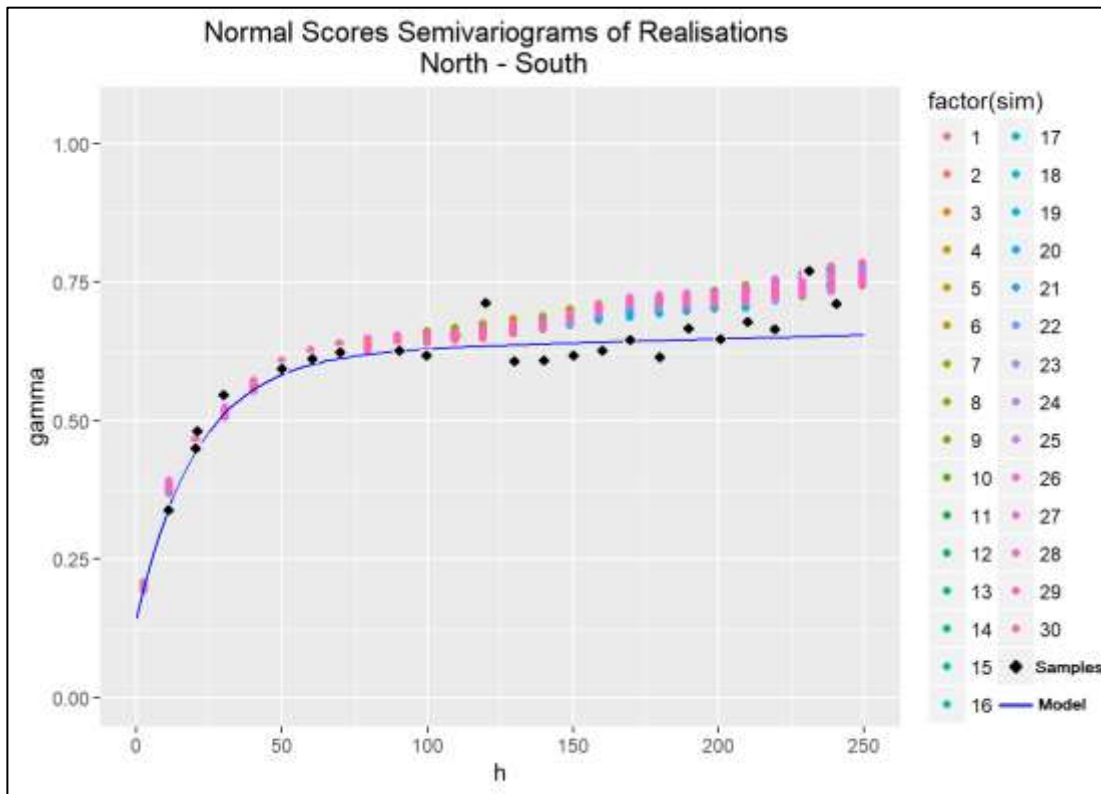
<b>DATA</b>	<b>Model</b>	<b>MINIMUM</b>	<b>MAXIMUM</b>	<b>MEAN</b>	<b>VARIANCE</b>	<b>STANDDEV</b>
<b>Samples</b>	20746	0.01	3.35	1.07731275	0.15763992	0.39703894
<b>SIM1</b>	465308	0.0079112	3.3441	1.07433822	0.16918424	0.41132012
<b>SIM2</b>	465308	0.0079351	3.338577	1.07445774	0.16645389	0.40798761
<b>SIM3</b>	465308	0.0079016	3.338828	1.0742664	0.16667309	0.40825616
<b>SIM4</b>	465308	0.0079767	3.337197	1.07464232	0.16954667	0.41176045
<b>SIM5</b>	465308	0.0079064	3.348243	1.06865367	0.16865595	0.41067743
<b>SIM6</b>	465308	0.0079527	3.343724	1.07032141	0.16905385	0.41116159
<b>SIM7</b>	465308	0.0079112	3.346737	1.06964979	0.16676398	0.40836745
<b>SIM8</b>	465308	0.0079655	3.345983	1.07158228	0.16708595	0.40876148
<b>SIM9</b>	465308	0.0079112	3.337322	1.06933443	0.16615993	0.40762719
<b>SIM10</b>	465308	0.0079256	3.324519	1.07281684	0.1678339	0.40967536
<b>SIM11</b>	465308	0.0079048	3.338452	1.06915164	0.16712735	0.40881212
<b>SIM12</b>	465308	0.0079256	3.345983	1.07228004	0.16852659	0.4105199
<b>SIM13</b>	465308	0.007924	3.348368	1.07096391	0.16616613	0.4076348
<b>SIM14</b>	465308	0.0079112	3.298536	1.07149568	0.16953082	0.41174121
<b>SIM15</b>	465308	0.0079128	3.344477	1.07236182	0.16724611	0.40895735
<b>SIM16</b>	465308	0.0079064	3.325147	1.07425525	0.16886128	0.41092734
<b>SIM17</b>	465308	0.0079048	3.348117	1.07100872	0.16882073	0.410878
<b>SIM18</b>	465308	0.0079463	3.349624	1.07261286	0.16878451	0.41083392
<b>SIM19</b>	465308	0.0079	3.346611	1.07187394	0.16900691	0.4111045
<b>SIM20</b>	465308	0.0079527	3.317615	1.07195247	0.16864932	0.41066935
<b>SIM21</b>	465308	0.0079303	3.344979	1.07319249	0.17051796	0.4129382
<b>SIM22</b>	465308	0.007908	3.306444	1.07061408	0.16833662	0.41028845
<b>SIM23</b>	465308	0.0079048	3.349875	1.07343957	0.16805404	0.40994395
<b>SIM24</b>	465308	0.0079415	3.336946	1.07522468	0.16747658	0.40923902
<b>SIM25</b>	465308	0.0079048	3.341088	1.07418011	0.17047186	0.41288238
<b>SIM26</b>	465308	0.0079016	3.35	1.07497074	0.16642856	0.40795657
<b>SIM27</b>	465308	0.0079016	3.343473	1.06669212	0.16821352	0.41013841
<b>SIM28</b>	465308	0.0079112	3.343473	1.07250759	0.1670404	0.40870576
<b>SIM29</b>	465308	0.0079192	3.345983	1.07464057	0.16943412	0.41162377
<b>SIM30</b>	465,308	0.0079	3.348243	1.07276583	0.16796012	0.40982938

**Ilustración 46 Resumen de las estadísticas de los modelos vs las muestras.**

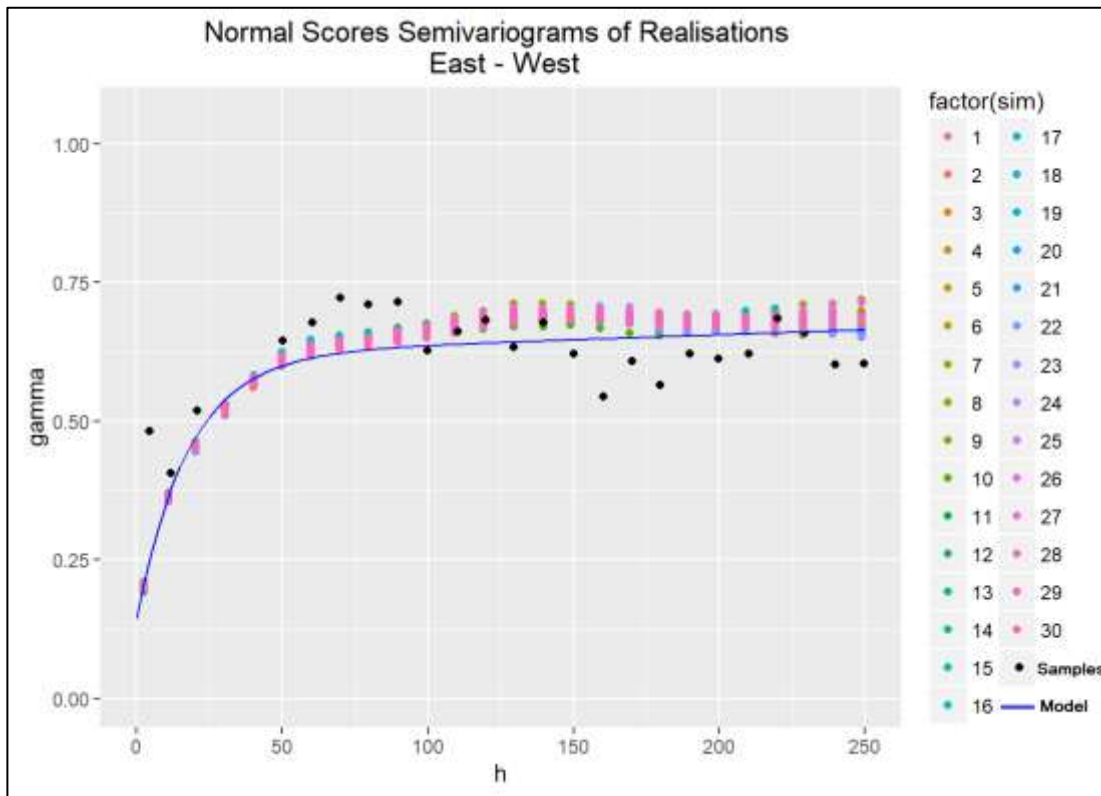
#### **4.6.2 Validación de la Variabilidad Espacial**

Validación de los modelos de variogramas obtenidos a partir de los nodos simulados, comparándolos con los modelos de variogramas respectivos obtenidos a partir de los compositos

Este chequeo permite verificar que efectivamente las simulaciones reproducen correctamente la variabilidad espacial y global según los modelos obtenidos a partir de los datos originales (en su versión Gaussiana). En general, los resultados indican que las realizaciones reproducen bien los modelos de variabilidad espacial presentes en los compositos. Las figuras 3 y 4 muestran una comparación entre los semi-variogramas de los modelos de simulación condicional versus los modelos teóricos en las principales direcciones.



**Ilustración 47 Validación – reproducción de los semi-variogramas en dirección norte-sur.**



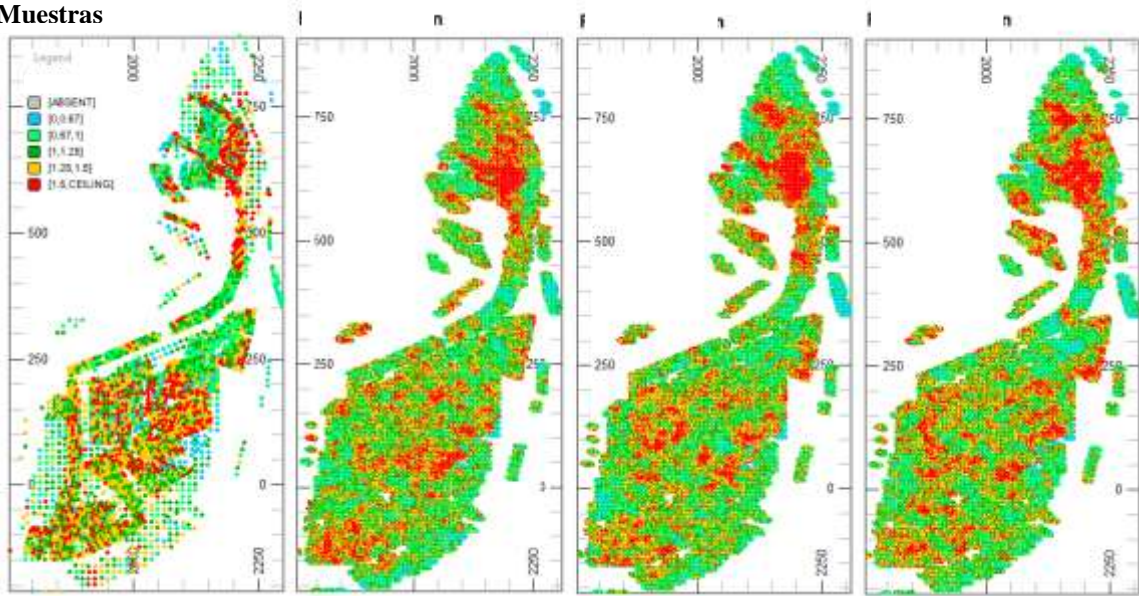
**Ilustración 48 Validación – reproducción de los semi-variogramas en dirección este-oeste.**

### 4.6.3 Validación Gráfica

Validación gráfica de los resultados, comparando los pozos versus los nodos simulados, y observando si la distribución de las leyes simuladas corresponde bien con las tendencias y leyes respectivas de los compositos al interior del stockpile.

La Ilustración a continuación muestra un comparativo gráfico de la distribución espacial de leyes de níquel para tres realizaciones versus la correspondiente distribución de leyes de los compositos.

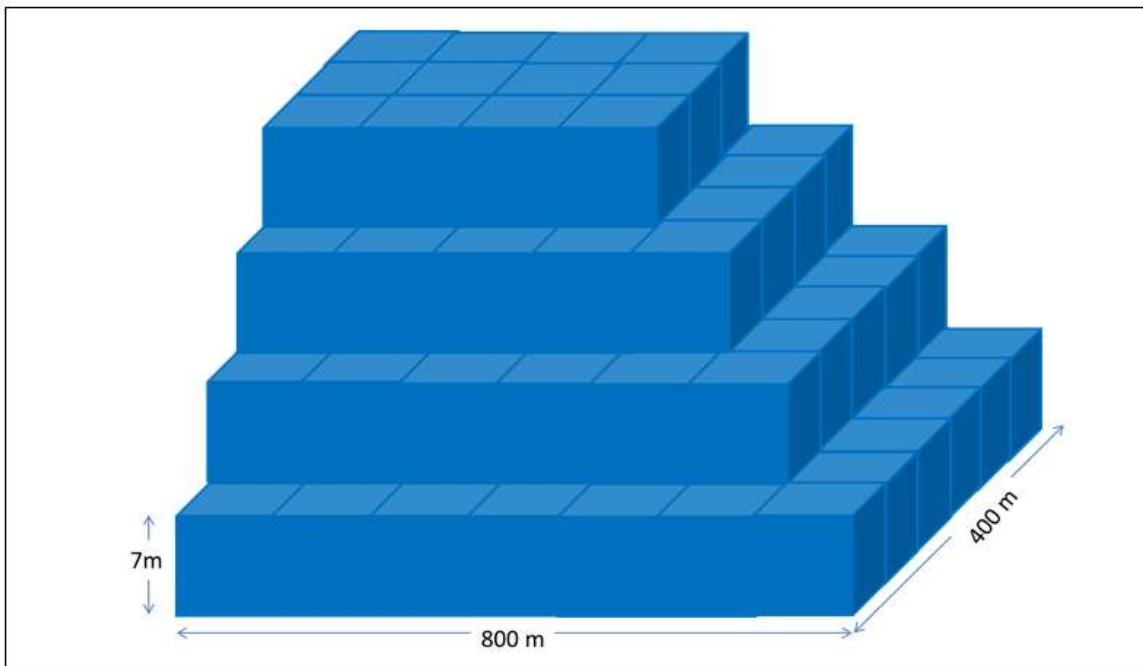
## Muestras



**Ilustración 49 Validación – distribución espacial de leyes para tres realizaciones P10, P50 y P90.**

### 5. PLAN MINERO

Para entender mejor la estrategia inicial de minería del *stock pile*, es necesario hacer claridad acerca de la formación del mismo. Hay que recordar que el stock pile de estudio es la formación de un material que fue removido de la mina, el cual en el momento de su extracción no tenía la ley media suficiente para ser proceda. Por lo tanto, este material se almacenó en una zona de la mina.



**Ilustración 50** Formación y dimensionamiento del *stock pile*.

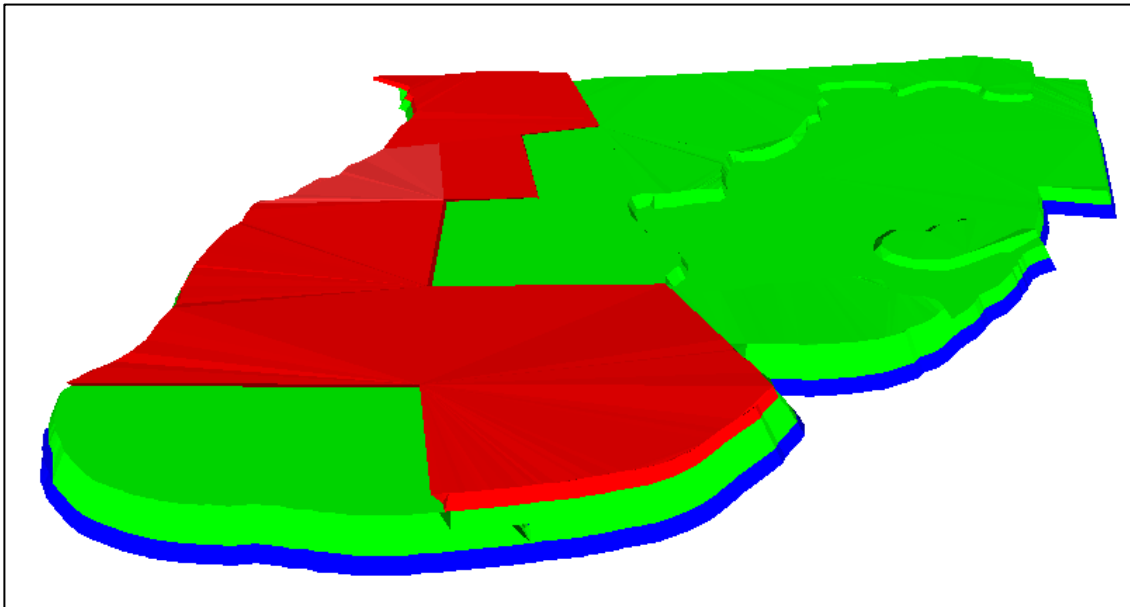
Este stock se empezó a construir en un terreno in-situ a la cota media de 77 m, con una extensión de 800m de largo por 400 m de ancho y un nivel cada



7 m de altura hasta llegar a la cota 119. Solo existe una entrada en el *stock pile* y es también la salida del mismo.

## 5.1 METODOLOGÍA PARA EL PLAN MINERO DEL MODELO HISTÓRICO

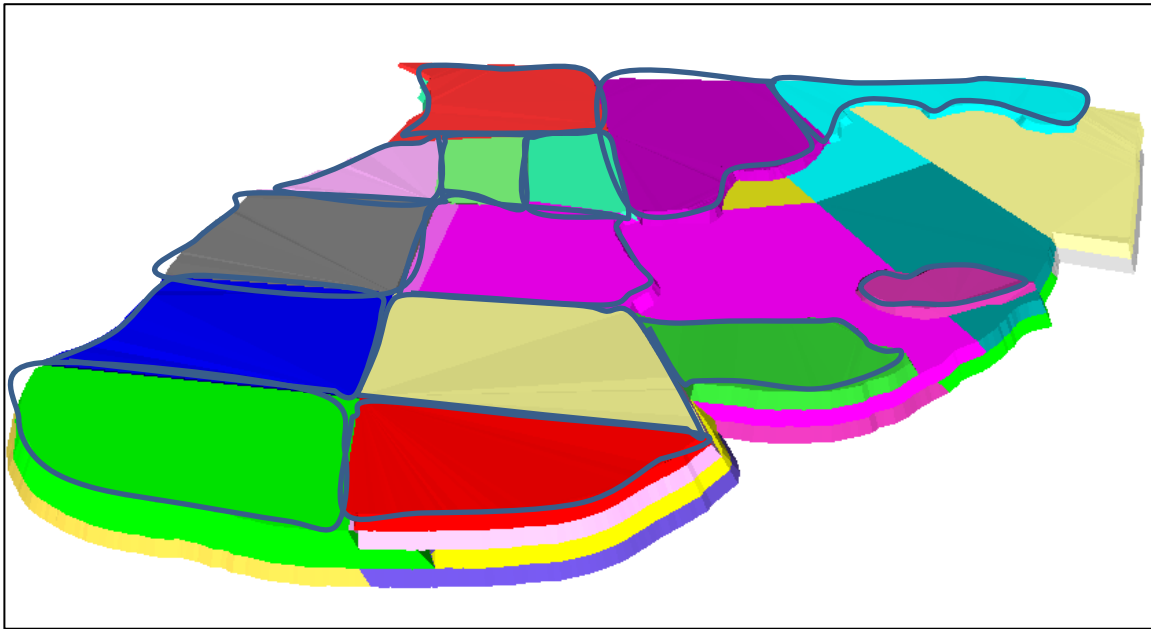
El plan minero con el modelo Histórico, correspondía a la creación de fase de minería (anual y mensual) sobre las cuales se generaban perímetros, los cuales representan unas toneladas de material y una calidad ponderada del mismo.



**Ilustración 51 Plan minero con fases.**

La construcción de las fases se generaba en el mismo orden de creación del *stock pile*, y se minaría de forma descendente en la vertical. La información de cada fase y perímetro correspondía a la información histórica reportada

para cada nivel de 7 metros y todo el material evaluado con los perímetros tenía como destino final la planta de proceso.



**Ilustración 52 Plan minero con fases divididas por mes y perímetros.**

El proceso de evaluación de los perímetros se hace por medio de una rutina en datamine, el cual entrega el tonelaje y la ley promedio ponderada de cada perímetro.

El orden de salida depende del nivel en el que está ubicado el perímetro y su distancia hasta la salida.

```

#-----
# PERIMETROS ESPEJO
#-----
!LET $NF#=7
!LET $N#=1
!O2:REM
!IF $N# > $NF#, GOTO 01

!EXTRA &IN($PERIM$N##),&OUT($PERIM$N##_2),@APPROX=0.0
ZP2=ZP+14
PV2=PVALUE+0.1
ZP=ZP2
PVALUE=PV2
GO
!EXTRA &IN($PERIM$N##),&OUT($PERIM$N##_3),@APPROX=0.0
ZP3=ZP-14
PV3=PVALUE-0.1
ZP=ZP3
PVALUE=round(PV3,1)
GO

!APPEND &IN1($PERIM$N##_2),&IN2($PERIM$N##_3),&OUT($PERIM$N##_4),
@SEQUENCE=0.0,@PROTODD=0.0
!SORTX &IN($PERIM$N##_4),&OUT($PERIM$N##_5),*KEY1(PVALUE),*KEY2(PTN),
@ORDER=1.0,@KEYSFRST=1.0
!PROPER &PERIMIN($PERIM$N##_5),&PERIMOUT($PERIM$N##_6),@MODE=0.0,
@AREA=0.0,@CLOSE=1.0,@CLOCKWISE=1.0,@VPLANE=1.0,
@TOL=0.0,@REDUCE=0.0,@EXTEND=0.0,@CROSS=0.0

#-----
!MODRES &IN($surf$N##MOD),&PERIMIN($PERIM$N##_6),
&RESULTS($PERIM$N##_7),@DENSITY=1.0,@ZVALUE=0.0,
@PAIRS=1.0,@FULLCELL=0.0
Y

!SELCOP &IN($PERIM$N##_7),&OUT($PERIM$N##_8),*F1(DENSITY),*F2(VOLUME),
*F3(TONNES),*F4(VOL1),*F5(NI),*F6(Fe),
*F7(MGO),*F8(SIO2),*F9(AL2O3),*F10(CO),
*F11(FILLVOL),*F12(ROCK10),*F13(ROCK13),
*F14(ROCK14),*F15(ROCK20),*F16(ROCK24),*F17(ROCK30),
*F18(ROCK40),*F19(ROCK42),*F20(ROCK430),*F21(ROCK431),*F22(ROCK44),
*F23(ROCK50),*F24(ROCK60),*F25(ROCK70),*F26(ROCK80),
*F27(MCL),*F28(MUESTREO),*F29(MODEL),*F30(PERIMIN),
*F31(PERIMID),
@KEEPALL=1.0

!EXTRA &IN($PERIM$N##_8),&OUT($PERIM$N##_9),@APPROX=0.0
LEVEL=DECODE(MODEL)
FASE;a8="$surf$N##"
XPT=$N#
YPT=$N#
ZPT=$N#
IF (VOL1==absent())
VOL1=0
END
GO

!COPY &IN($PERIM$N##_9),&OUT($PERIM$N##_10),
VOL1>1.0<+

!LET $N#=$N#+1
!LET $M#=INT($N#)
!GOTO 02
!O1:REM

!LET $N#=1
!LET $M#=2
!O4:REM
!IF $M# > $NF#,GOTO 03
!APPEND &IN1($PERIM$M##_10),&IN2($PERIM$M##_10),&OUT(TEMP),
@SEQUENCE=0.0,@PROTODD=0.0
!MGSORT &in(TEMP),&out($PERIM$M##_10),*KEY1(PERIMID)

!LET $N#=$N#+1
!LET $M#=INT($N#)
!LET $M#=$M#+1
!LET $M#=INT($M#)
!GOTO 04
!O3:REM

```

```

!EXTRA &IN($PERIM$NF##_10),&OUT(Temp20)
MCL=0
IF (MUESTREO==1)
MCL=1
END
TONM=(TONNES*MCL)
PM=TONM/TONNES
SM=SI02/MGO
MAT: a8="WSTB"
IF (NI>=0.6)
MAT="ORE"
END
IF (NI<0.6 AND SM>=2.5)
MAT="WSTA"
END
LOADHRS=TONNES/718.4541

CONC2: a40=join(string(LEVEL),"0",string(PERIMID))
GO
!MGSORT &in(Temp20),&out(Temp21),"KEY1(FASE),"KEY2(PERIMID)
!SELCOP &IN(Temp21),&OUT(per_$MES#),"F1(PERIMID),"F2(LEVEL),
"F3(TONNES),"F4(NI),"F5(FE),"F6(MGO),"F7(SI02),
"F8(AL2O3),"F9(CO),"F10(ROCK10),"F11(ROCK13),
"F12(ROCK14),"F13(ROCK20),"F14(ROCK24),"F15(ROCK30),
"F16(ROCK40),"F17(ROCK42),"F18(ROCK430),"F19(ROCK431),
"F20(ROCK44),"F21(ROCK50),"F22(ROCK60),"F23(ROCK70),
"F24(ROCK80),"F25(LOADHRS),"F26(FASE),"F27(SM),"F28(MAT),
"F29(TONM),"F30(PM),"F31(CONC2), @KEEPALL=1.0
!OUTPUT &IN(per_$MES#),"F1(PERIMID),"F2(LEVEL),
"F3(TONNES),"F4(NI),"F5(FE),"F6(MGO),"F7(SI02),
"F8(AL2O3),"F9(CO),"F10(ROCK10),"F11(ROCK13),
"F12(ROCK14),"F13(ROCK20),"F14(ROCK24),"F15(ROCK30),
"F16(ROCK40),"F17(ROCK42),"F18(ROCK430),"F19(ROCK431),
"F20(ROCK44),"F21(ROCK50),"F22(ROCK60),"F23(ROCK70),
"F24(ROCK80),"F25(LOADHRS),"F26(FASE),"F27(SM),"F28(MAT),
"F29(TONM),"F30(PM),"F31(CONC2),@CSV=1.0,@NODD=0.0
per_$MES#.csv
!END

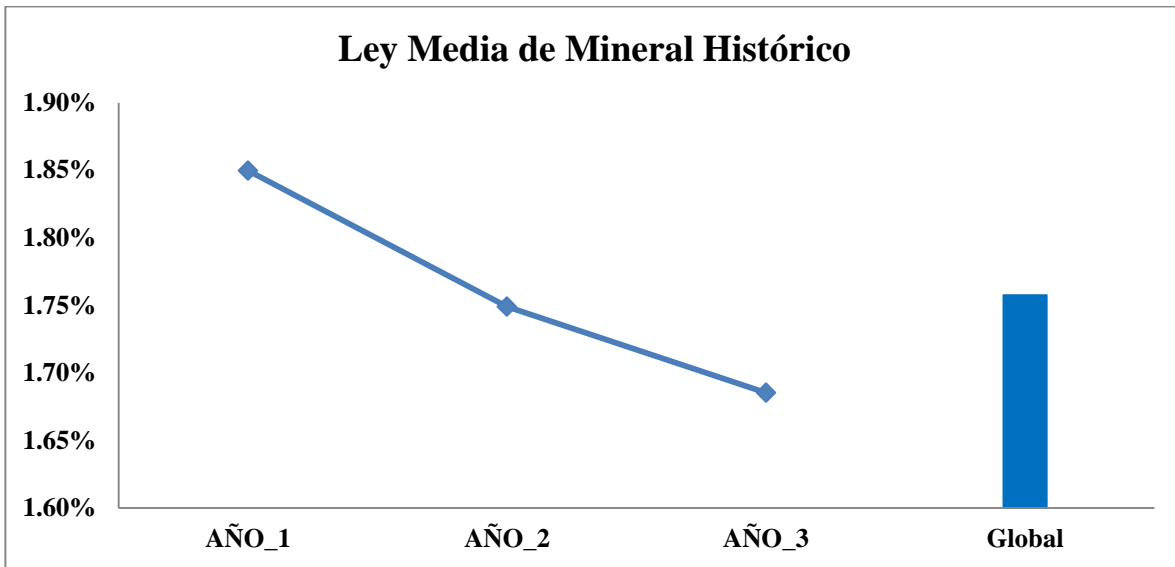
```

**Ilustración 53 Rutina evaluación de Perímetros.**

PERIMID	LEVEL	TONNES	NI	FASE	MAT
2	91	1405.06069	1.313955	No.1	ORE
3	91	6772.89893	1.209369	No.1	ORE
6	91	9420.43935	1.073602	No.1	ORE
7	91	5977.89726	1.141317	No.1	ORE
9	91	25.812232	1.101652	No.1	ORE

**Ilustración 54 Resultado de evaluación de perímetros.**

### 5.1.1 Tonelaje y calidad del material en el modelo histórico



**Ilustración 55 Ley media del material de interés para el modelo Histórico.**

Para el modelo histórico, la ley media del material que se minaría durante los 3 años es de 1.74%.

### 5.1.2 Distribución de Toneladas para el Modelo Histórico

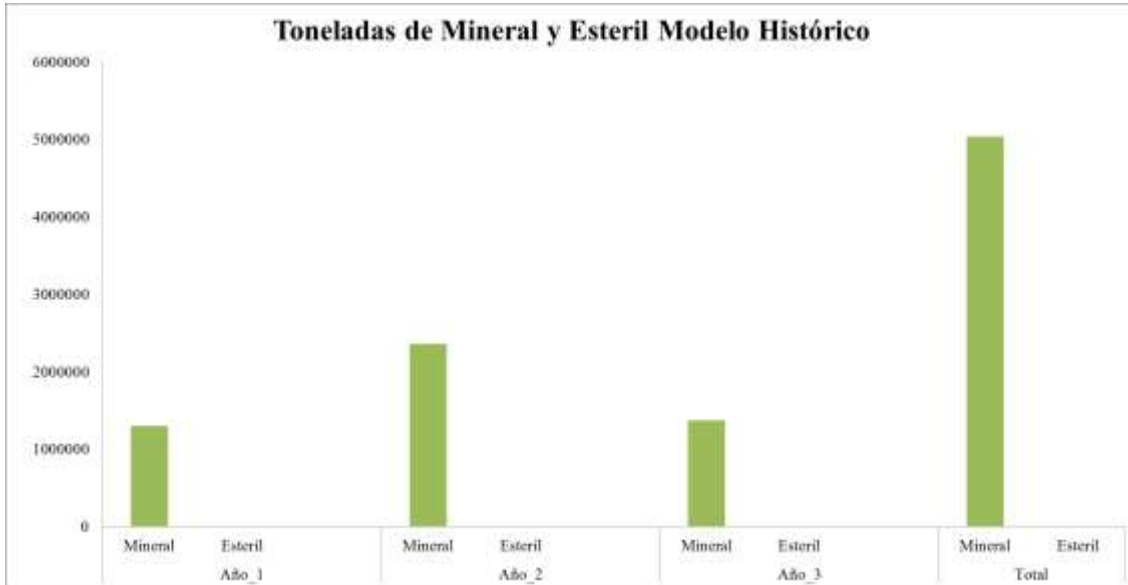
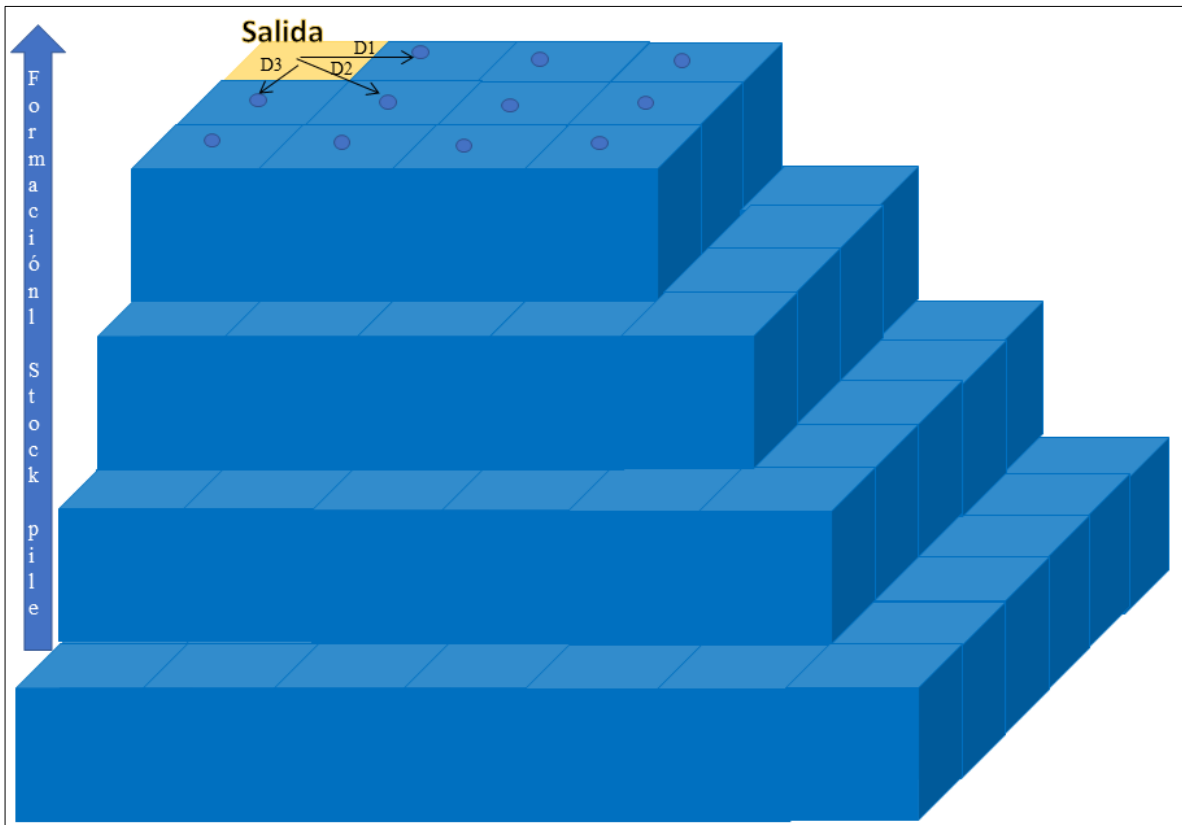


Ilustración 56 Tonelaje de mineral y estéril para modelo histórico.

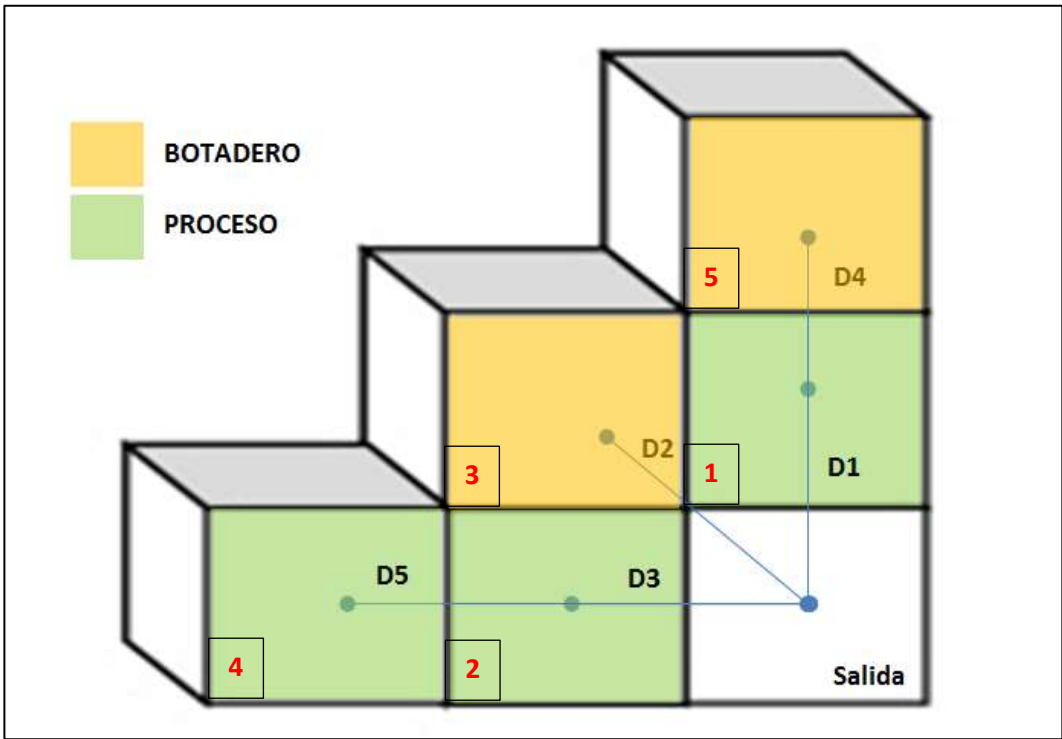
En el modelo histórico, todo el material que estaba dispuesto en el *stock pile* tendría como destino final la Planta.

## 5.2 METODOLOGÍA DEL PLAN MINERO PARA MODELO DE MUESTRAS Y LOS MODELOS SIMULADOS

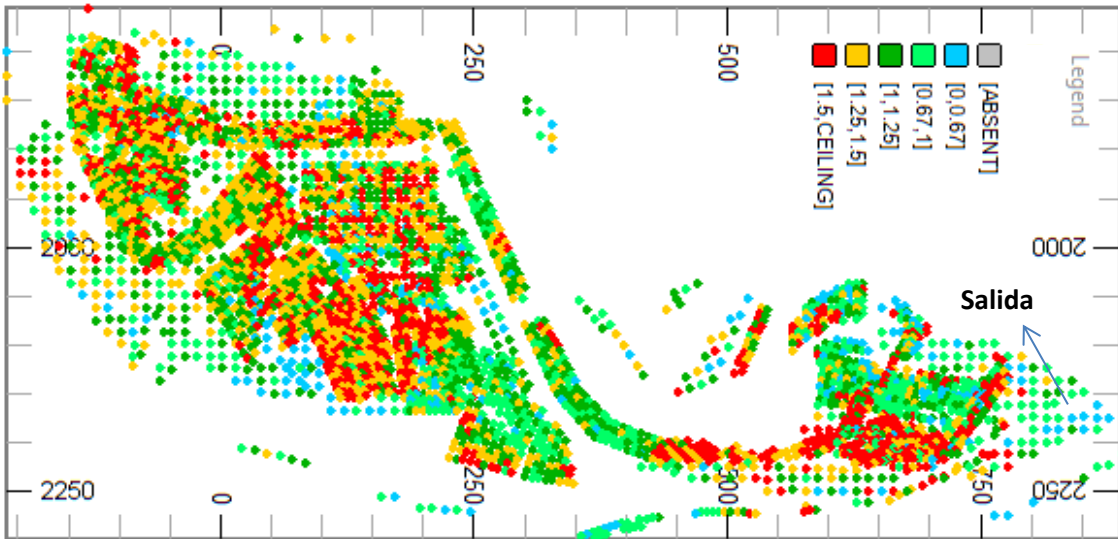
La estrategia de minería para estos modelo es minar en orden descendente banco a banco, bloque a bloque en cada nivel de 3.5m, el orden de salida estará definido por la distancia del bloque a la salida y luego por el destino del material, recordando que el material que va al proceso será el material con ley mayor o igual a 1% y el material menor a 1% irá al botadero.



**Ilustración 57 Estrategia de minería bloque a bloque en los modelos simulados.**



**Ilustración 58** Asignación de destino y orden de salida de cada bloque en los modelos simulados.

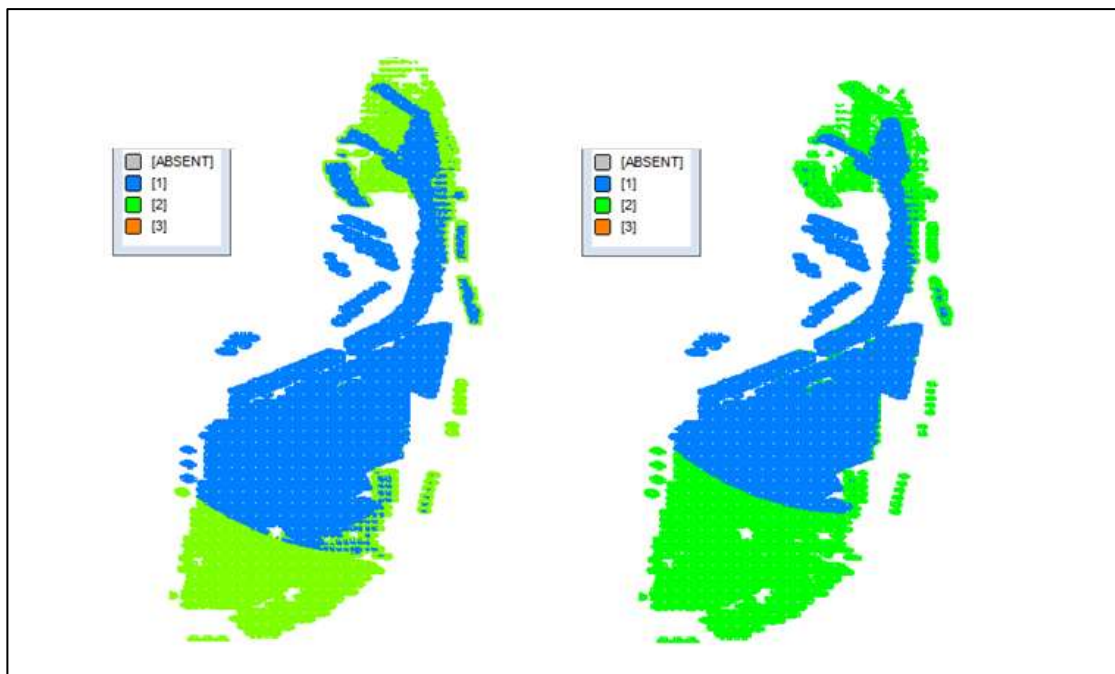


**Ilustración 59** Salida del frente de minería.



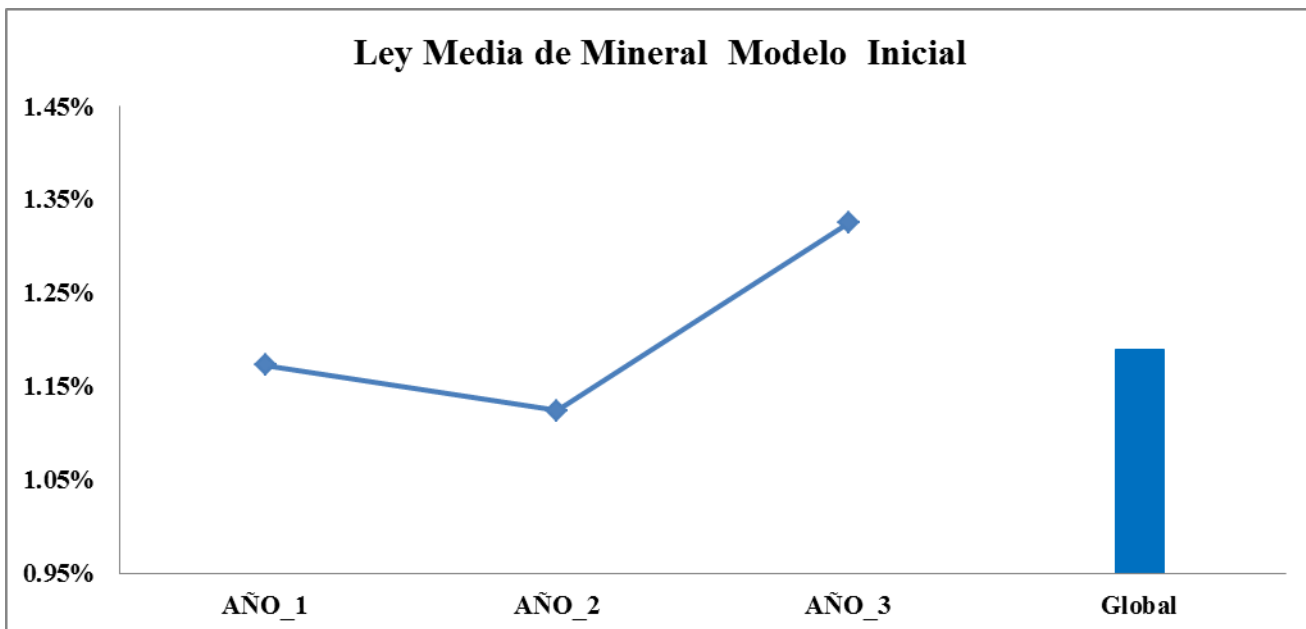
La Ilustración 58 muestra la estrategia de minería de cada uno de los bloques, una vez identificada el punto de salida, se calculará la distancia desde el centro de cada bloque al punto de salida, luego se asignará el destino del bloque de acuerdo a la ley, bloques con ley mayor o igual a 1% irán al Proceso y bloques con ley menor a 1% irán al botadero de estéril. De acuerdo a esto, el orden de salida de los bloques será: 1. mayor Nivel (Coordenada Z), menor distancia al punto de salida, en radios de giro y destino del bloque (Proceso). El número de bloques minado para cada periodo está restringido a la capacidad instalada por periodo.

En la ilustración a continuación se observan los límites de minería entre el año 1 (azul) y el año 2 (verde).



**Ilustración 60 Modelos P10 y P90.**

### 5.2.1 Tonelaje y Calidad del Modelo inicial (Muestras)



**Ilustración 61 Ley Media del material de interés para el modelo inicial.**

La ley media del modelo inicial, para el total de material que se minará en los 3 años es de 1.25%.

## 5.2.2 Distribución de Toneladas para el Modelo Inicial (Muestras)

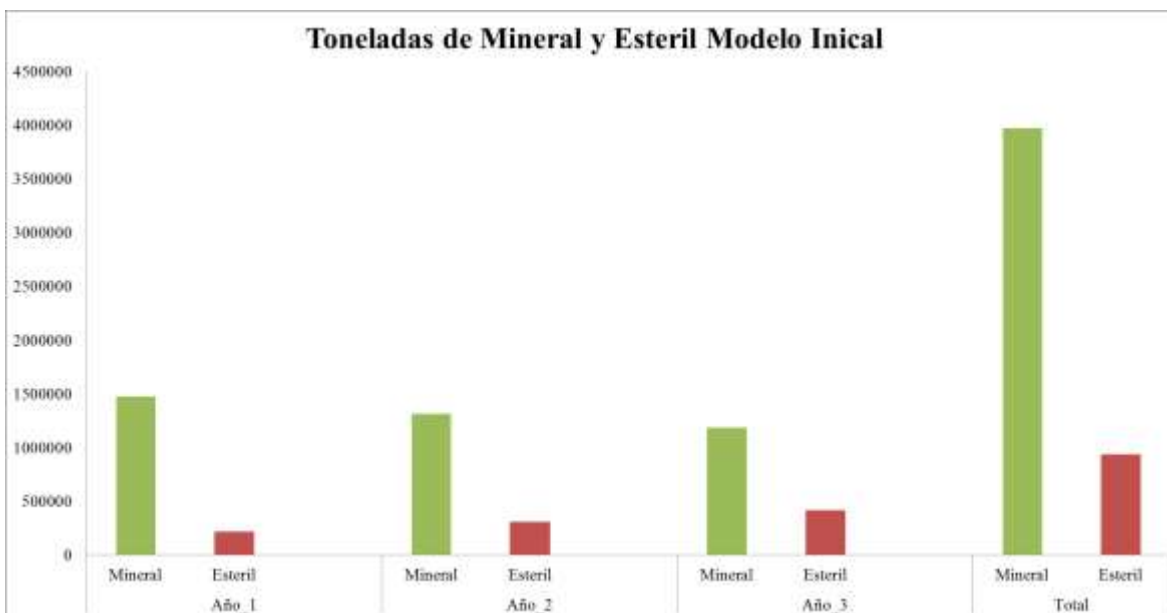
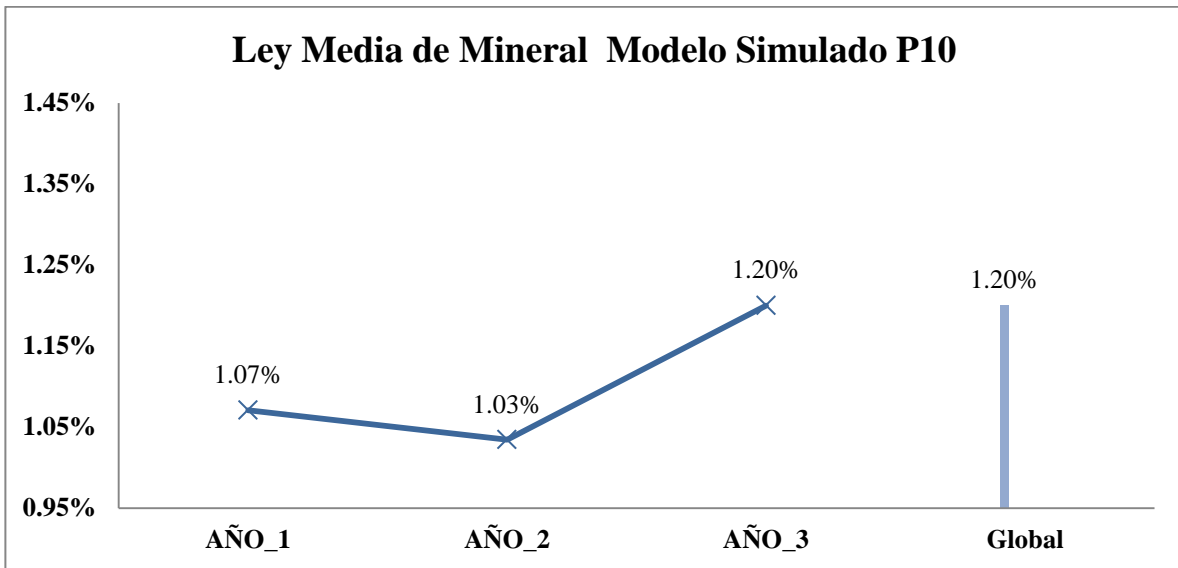


Ilustración 62 Tonelaje de mineral y estéril para modelo inicial.

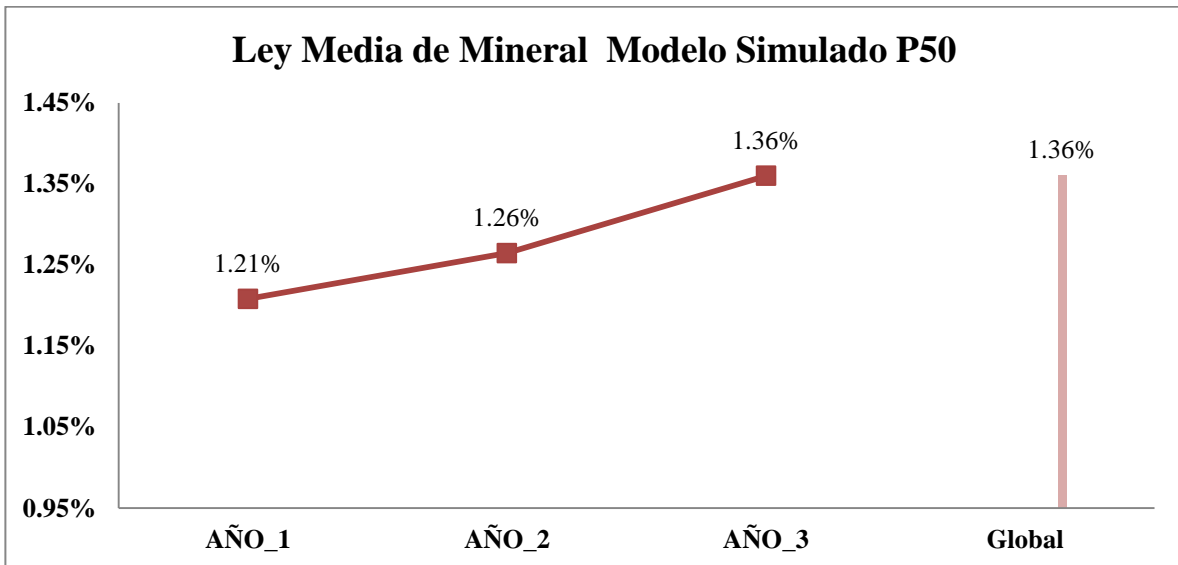
La cantidad de material estéril y mineral, refleja que el material depositado en el *stock pile* contiene 4.000.000 de toneladas mineral (ley de corte mayor o igual a 1%) y 900.000 toneladas de estéril (ley media menor a 1%).

## 5.2.3 Tonelaje y calidad del Modelos Simulados

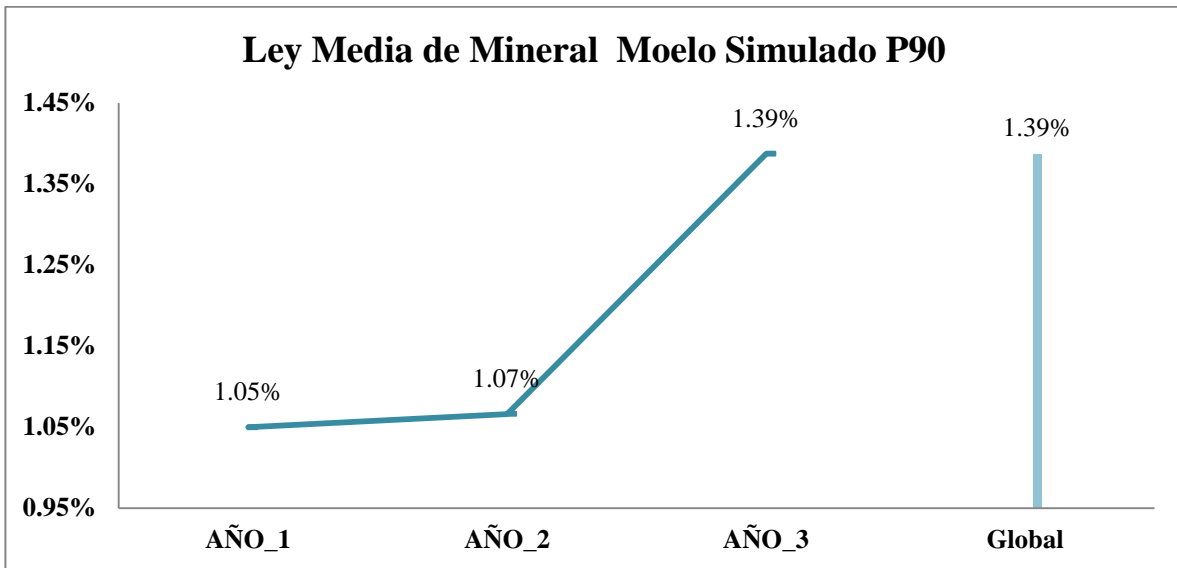
A continuación se muestran la estimación de leyes para los modelos simulados P10, P50 y P90.



**Ilustración 63 Ley media del material de interés para el modelo simulado P10.**



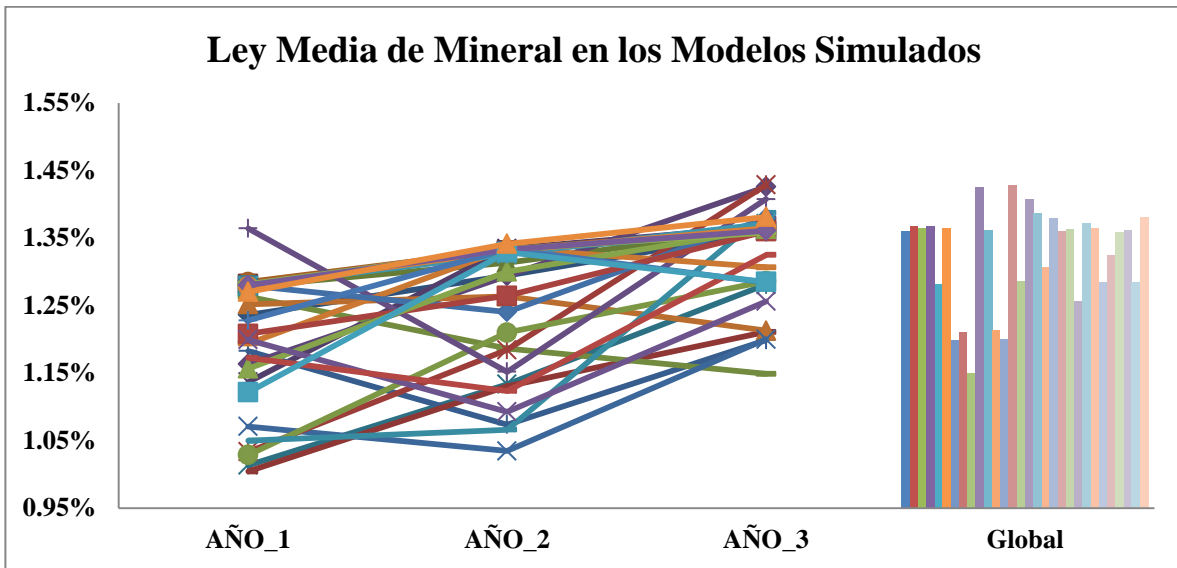
**Ilustración 64 Ley media del material de interés para el modelo simulado P50.**



**Ilustración 65 Ley media del material de interés para el modelo simulado P90.**

Las leyes media de mineral son 1.20%, 1.36% y 1.39%, para los modelos simulados P10, P50 y P90, respectivamente. Se identifica que las leyes medias de los modelos simulados, varían significativamente con respecto a las leyes entregadas por el modelo histórico (1.74%).

La grafica a continuación, resume la Ley media de cada año de minado para cada uno de los modelos simulados.



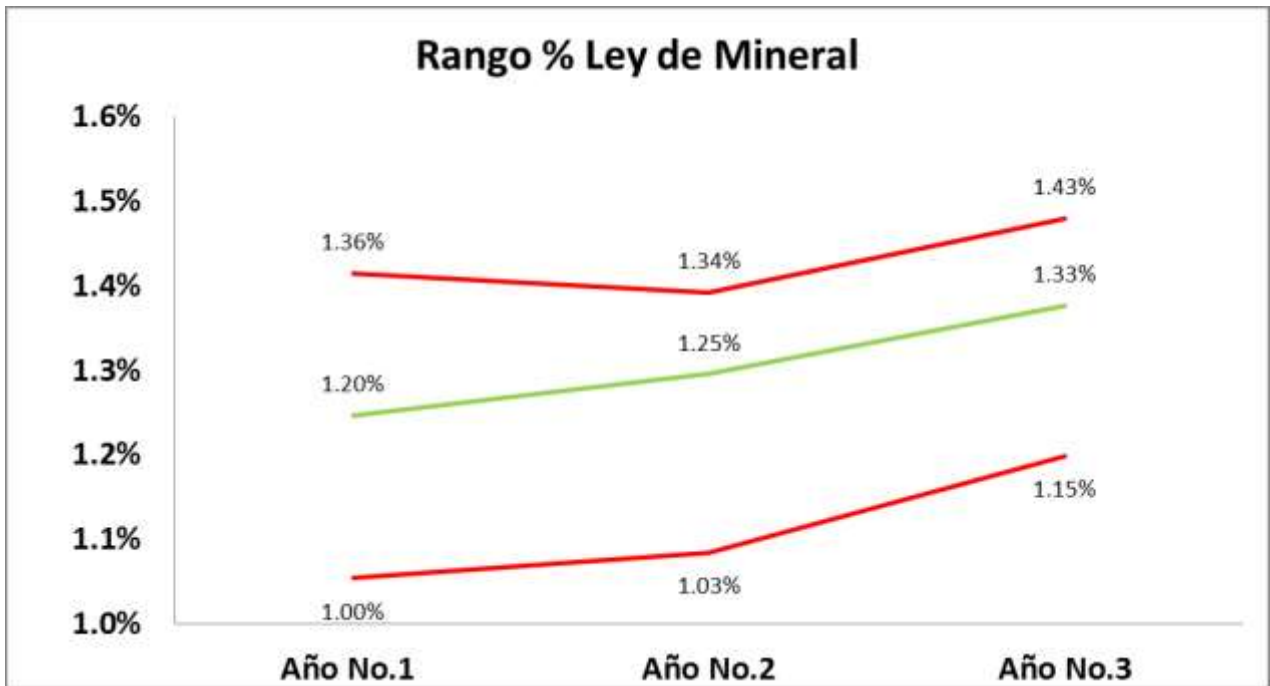
**Ilustración 66 Resumen ley media del material de interés para los modelos simulados.**

En la siguiente tabla se presentan los 30 modelos simulados con la ley correspondiente para cada año y la ley ponderada total, además del percentil 10, percentil 50 y percentil 90 de las leyes.

MODELO	AÑO_1	AÑO_2	AÑO_3	GLOBAL	PERCENTIL
9	1.26%	1.19%	1.15%	1.15%	
7	1.18%	1.07%	1.20%	1.20%	
13	1.07%	1.03%	1.20%	1.20%	P10
8	1.00%	1.13%	1.21%	1.21%	
12	1.25%	1.26%	1.21%	1.21%	
22	1.20%	1.09%	1.26%	1.26%	
5	1.01%	1.13%	1.28%	1.28%	
25	1.23%	1.33%	1.28%	1.28%	
29	1.12%	1.33%	1.29%	1.29%	
15	1.03%	1.21%	1.29%	1.29%	
18	1.19%	1.33%	1.31%	1.31%	
26	1.17%	1.12%	1.32%	1.32%	
27	1.28%	1.33%	1.36%	1.36%	
1	1.24%	1.29%	1.36%	1.36%	
20	1.21%	1.26%	1.36%	1.36%	P50
11	1.28%	1.33%	1.36%	1.36%	
28	1.28%	1.33%	1.36%	1.36%	
21	1.16%	1.30%	1.36%	1.36%	
24	1.28%	1.33%	1.36%	1.36%	
6	1.28%	1.33%	1.36%	1.36%	
3	1.28%	1.31%	1.36%	1.36%	
4	1.14%	1.33%	1.37%	1.37%	
2	1.28%	1.33%	1.37%	1.37%	
23	1.28%	1.33%	1.37%	1.37%	
19	1.28%	1.24%	1.38%	1.38%	
30	1.27%	1.34%	1.38%	1.38%	
17	1.05%	1.07%	1.39%	1.39%	P90
16	1.36%	1.15%	1.41%	1.41%	
10	1.16%	1.29%	1.43%	1.43%	
14	1.03%	1.18%	1.43%	1.43%	

**Tabla 4 Resumen ley media del material de interés para todo los modelos**

La ley media de las simulaciones oscila entre 1.15% y 1.43% de material de interés y la ley media del modelo inicial (muestras) es alrededor de 1.25%, si se compara esta ley con la ley que se tenía en el modelo histórico la diferencia es de -0.49%.



**Ilustración 67 Rango de ley de mineral de los modelos simulados.**

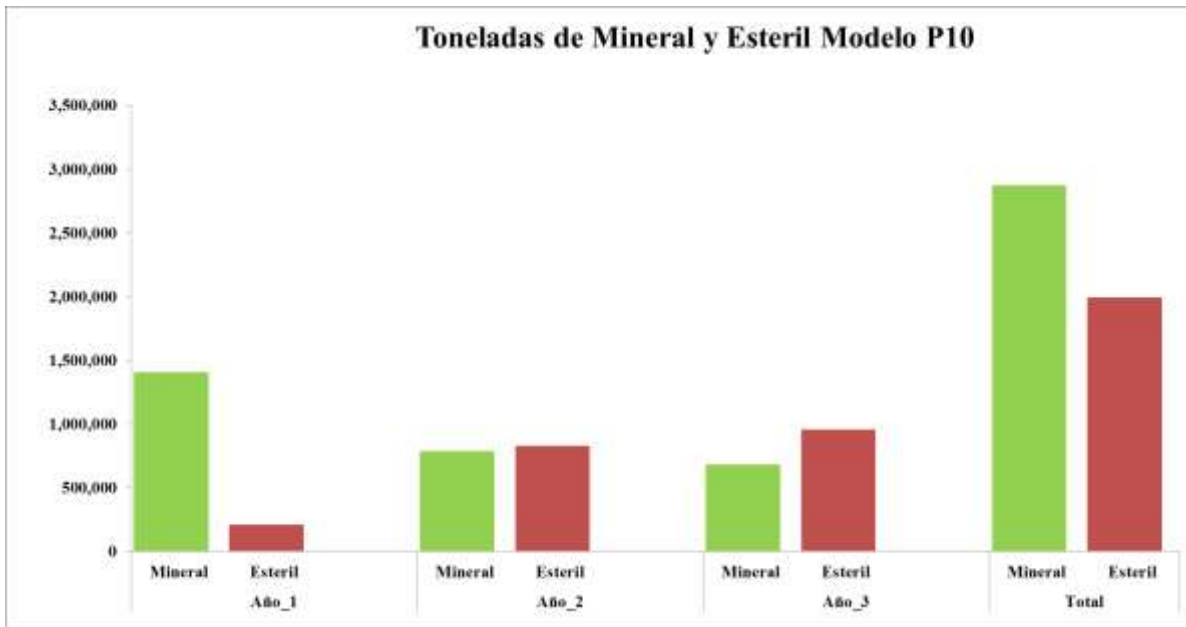
Los límites de las leyes de los modelos simulados para los 3 periodos de minería son:

Limites inferiores son 1.00% y 1.15% Limites superiores 1.36% - 1.43% .

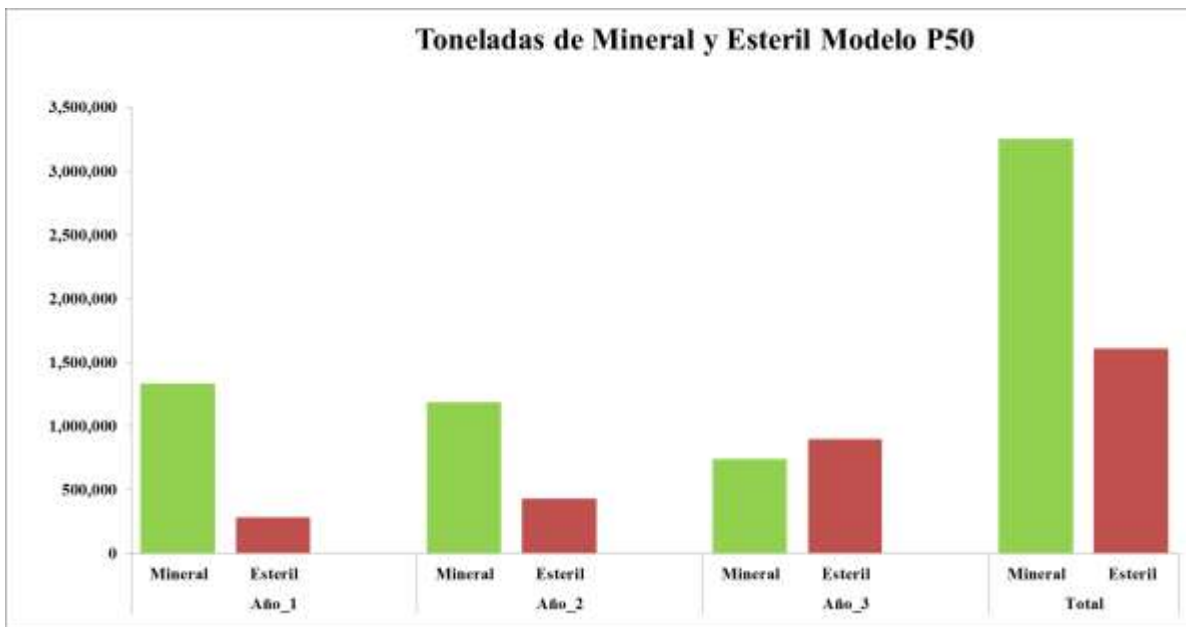
#### **5.2.4 Distribución de Toneladas para el Modelo Simulados**

A continuación se muestran la estimación de tonelaje para los modelos P10, P50 y P90 y la distribución de estéril y mineral para cada año.

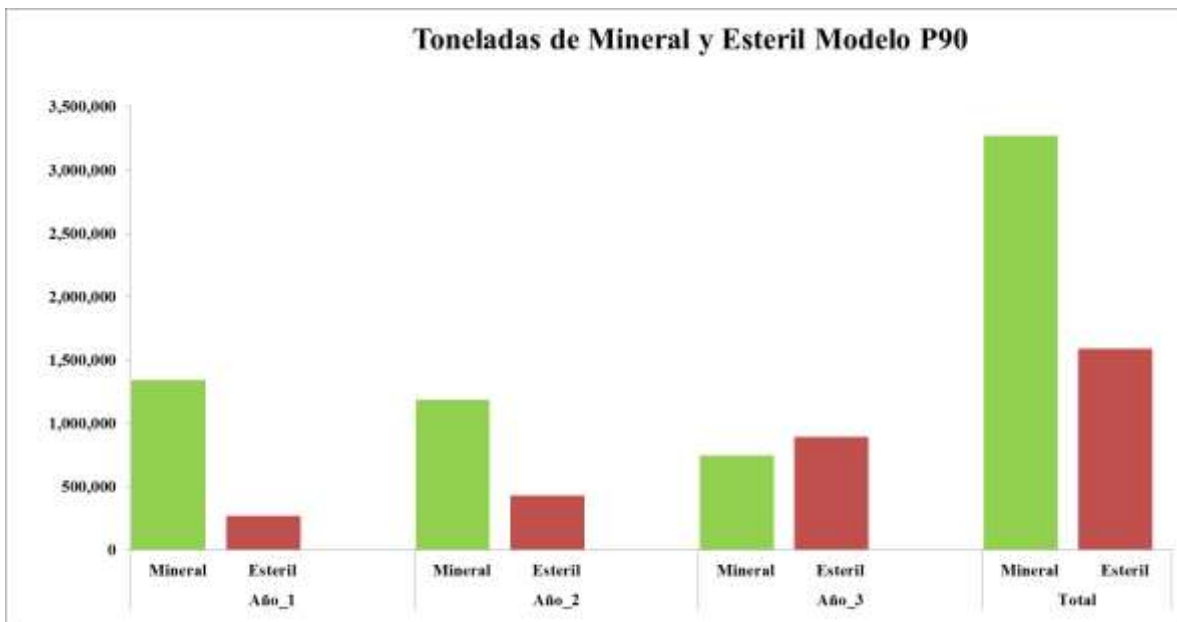




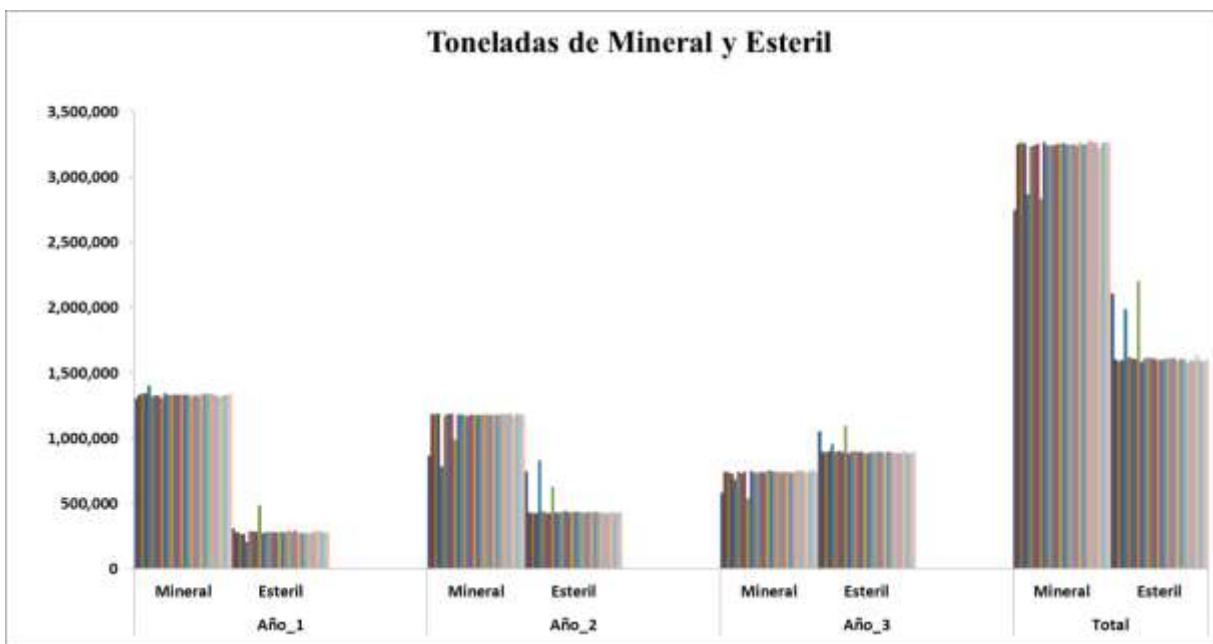
**Ilustración 68** Tonelaje de mineral y estéril para modelo simulado P10.



**Ilustración 69** Tonelaje de mineral y estéril para modelo simulado P50.



**Ilustración 70 Tonelaje de mineral y estéril para modelo simulado P90.**



**Ilustración 71 Resumen de tonelaje de mineral y estéril de los modelos simulados.**

Los datos históricos aseguraban un inventario de 5.000.000 de toneladas de mineral con una ley media de 1.74%, sin embargo con la simulación de los

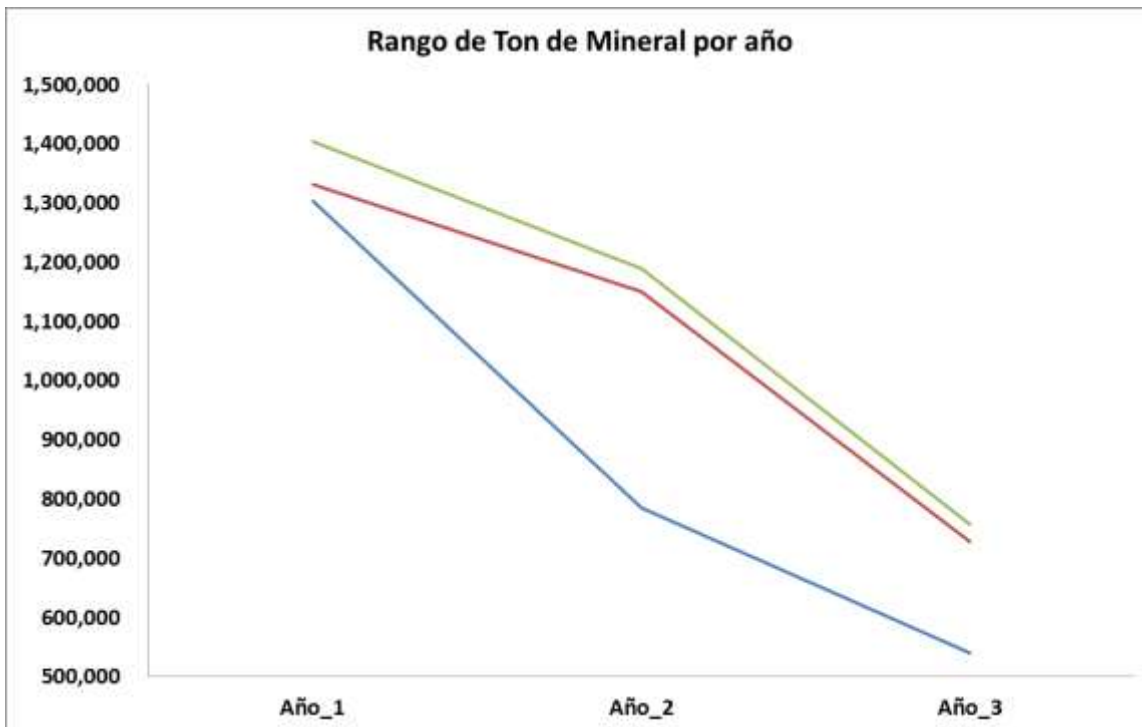
modelos se evidencia que existen 2 clases de material (estéril y Mineral) y que son en promedio 3.400.000 de toneladas de mineral con un a ley media de 1.26% y 1.500.000 toneladas de estéril.

En la tabla a continuación se identifican el percentil 10, 50 y 90 del material clasificado como mineral en los modelos simulados.

MODELO	Mineral	Estéril	PERCENTIL
1	2749004	2108170	
9	2832725	2204449	
5	2869004	1988170	P10
27	3220677	1636497	
6	3234199	1622975	
20	3238428	1618746	
12	3240915	1616259	
13	3243602	1613572	
7	3245145	1612029	
11	3245254	1611920	
18	3246292	1610882	
17	3248222	1608952	
22	3249013	1608161	
19	3250734	1606440	
14	3250977	1606197	P50
8	3252725	1604449	
30	3252751	1604422	
2	3253625	1603549	
23	3253985	1603189	
15	3257037	1600137	
4	3259004	1598170	
16	3259824	1597350	
26	3260987	1596187	
28	3261152	1596022	
21	3264220	1592954	
25	3264616	1592558	
3	3268627	1588547	P90
29	3270217	1586957	
10	3271879	1585294	
24	3280323	1576851	

**Tabla 5 Resumen de tonelaje de mineral y estéril.**

La grafica a continuación muestra la distribución de toneladas de mineral en el *stock pile* durante los 3 años, siendo los límites para el primera año 1.200.000 y 1.400.000 toneladas y para el año tres, 550.000 y 800.000 toneladas.



**Ilustración 72 Rango de toneladas de mineral para los modelos simulados.**

### **5.3 ESTIMACION CAPACIDAD DE CARGUÍO INSTALDA Y REQUERIDA**

El periodo estimado para ejecutar la minería en este *stock pile* es de 3 años; los recursos disponibles para este proceso son:

Una retro excavadora Hitachi EX1200 y 4 camiones Caterpillar 773

A continuación se discrimina el cálculo de la capacidad de cargue instalada y requerida.

Se definen los parámetros necesarios para esta estimación:

Periodo a trabajar (3 años), disponibilidad, uso, % de lluvia y productividad, esto con el objetivo de identificar con cuanta capacidad se cuenta y si ésta cubre el requerimiento de minería.

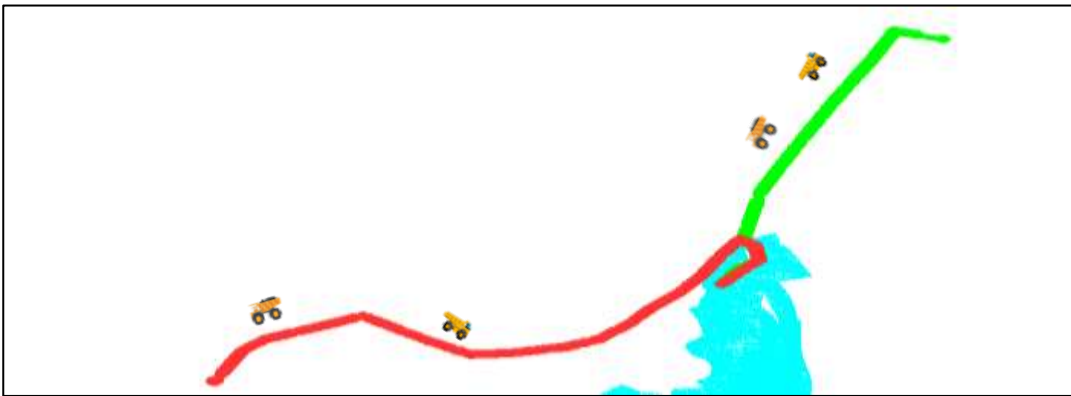
CAPACIDAD DE CARGUE	Año 1	Año 2	Año 3	Total
DÍAS CALENDARIOS	365	365	365	1095
HORAS LLUVIA	703	703	703	2108.16
HORAS DÍAS	24	24	24	24
DISPONIBILIDAD %	90%	90%	90%	90%
UTILIZACIÓN %	80%	80%	80%	80%
PRODUCTIVIDAD (TON/H)	282	282	282	282
HORAS OPERATIVAS	5801	5801	5801	17404
PRODUCCIÓN ACARREO INSTALADO	1,635,95 0	1,635,950	1,635,950	4,907,850
CAPACIDAD DE ACARREO SECUENCIADA EN MODELOS	1,616,22 9	1,612,405	1,634,540	4,863,174
NO. EQUIPOS	1	1	1	1

**Tabla 6 Capacidad de cargue.**

Como se observa en la tabla anterior, la capacidad de acarreo instalada está por encima de lo que se requerirá para minar, teniendo en cuenta que el *stock pile* tiene 4.800.000 de toneladas y la capacidad instalada es de 4.907.000.

## 5.4 CAPACIDAD DE ACARREO INSTALADA Y REQUERIDA

Al igual que en el cargue, para el acarreo también se definen los parámetros necesarios para la estimación de la flota de acarreo instalada y la requerida para ejecutar la minería.



**Ilustración 73 Simulación de ciclo de acarreo.**

CAPACIDAD DE ACARREO	Año 1	Año 2	Año 3	
DIAS CALENDARIOS		365	365	365
HORAS LLUVIA		703	703	703
HORAS DIAS		24	24	24
DISPONIBILIDAD %		90%	90%	90%
UTILIZACION %		80%	80%	80%
PRODUCTIVIDAD TON/H		77	77	77
HORAS OPERATIVAS		5801	5801	5801
PRODUCCION INSTALADA		446,696	446,696	446,696
No. De Camiones	4	4	4	
CAPACIDAD DE ACARREO INSTALADA		1,786,782	1,786,782	1,786,782
<b>PLAN DE PRODUCCIÓN MODELO SIMULADO P50</b>				
Estéril (ton)		290,733	436,804	891,209
Distancia (Km)		6	6	6
Velocidad		10	10	10
tiempo (h)		0.6	0.6	0.6
Payload		38	38	38
Productividad		63	63	63
Producción		367412	367412	367412
Número de Camiones		1	1	2
Mineral (ton)		1,319,496	1,175,608	743,324
Distancia (Km)		5.5	5.5	5.5
Velocidad (km/H)		12	12	12
tiempo (h)		0.46	0.46	0.46
Payload		38	38	38
Productividad		82.9	82.9	82.9
Producción		480976	480976	480976
Número de Camiones		3	2	2
CAPACIDAD DE ACARREO REQUERIDO		1,610,229	1,612,412	1,634,533
No. De Camiones		4	4	4

**Tabla 7 Capacidad de acarreo.**

Como se observa en la tabla anterior, se hizo el respectivo análisis de ciclo para los camiones que tenía por destino el botadero y los camiones que se dirigirán a la planta de proceso, obteniendo que los equipos necesarios para

la actividad de acarreo son exactamente los 4 camiones de los que se dispone.



## CAPITULO 6

---

### 6. ANALISIS ECONOMICO

Una vez obtenidos los modelos, se puede revisar la distribución de tonelaje por destino (Mineral y estéril) y las leyes asociadas a las mismas entre el modelo histórico, el modelo inicial (muestras) y los modelos simulados.

Variables económicas para la obtención de VAN de cada modelo.

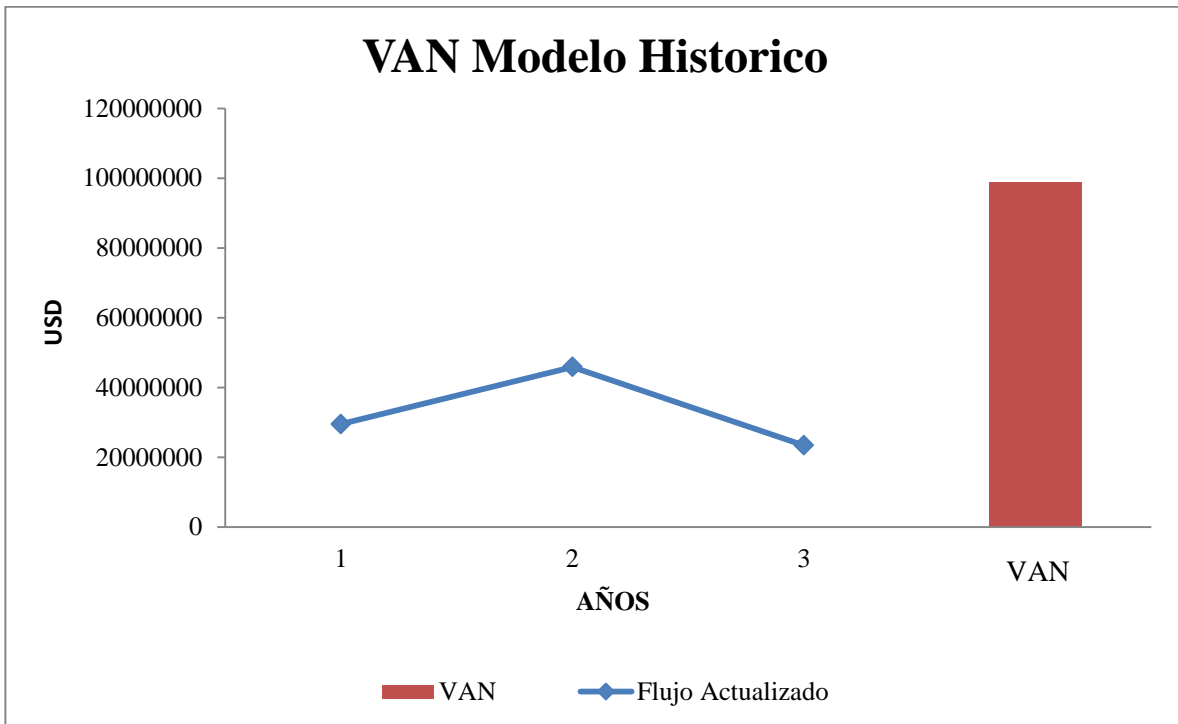
<b>Parametros Económicos</b>	Precio	15000	USD/Ton
	Descuento por Venta	15%	
	Costo Mina	4	USD/Ton
	Costo Planta	2	USD/Ton
	Recuperación	90%	
	Costo Oportunidad	10%	

**Ilustración 74 Variables económicas para estimación del VAN.**

## 6.1 ANÁLISIS ECONÓMICO MODELO HISTÓRICO

<b>Parametros Económicos</b>	Precio		15000	USD/Ton			
	Descuento por Venta		15%				
	Costo Mina		2	USD/Ton			
	Costo Planta		1	USD/Ton			
	Recuperación		90%				
	Costo Oportunidad		10%				
<b>AÑOS</b>					<b>1</b>	<b>2</b>	
						<b>3</b>	
Plan de Producción	Ley (%)				1.85%	1.75%	1.69%
	Tonelaje Mineral				1,303,323	2,356,096	1,373,097
	Tonelaje Roca						
Valorización	Ingreso	USD			32,495,773	55,546,492	31,191,055
	Costo Mina	USD			-	-	-
	Costo Planta	USD			1,303	2,356	1,373
	Inversión						
Flujos	Flujo Caja				32,494,470	55,544,136	31,189,682
	Flujo Actualizado				29,540,427	45,904,245	23,433,270
<b>VAN</b>					<b>98,877,942</b>		

**Ilustración 75 Variables económicas modelo histórico.**



**Ilustración 76 VAN modelo histórico.**

## 6.2 ANÁLISIS ECONÓMICO DE MODELO INICIAL (MUESTRAS)

<b>Parametros Económicos</b>	Precio		15000	USD/Ton			
	Descuento por Venta		15%				
	Costo Mina		2	USD/Ton			
	Costo Planta		1	USD/Ton			
	Recuperación		90%				
	Costo Oportunidad		10%				
<b>AÑOS</b>					<b>1</b>	<b>2</b>	
						<b>3</b>	
Plan de Producción	Ley (%)				1.17%	1.12%	1.32%
	Tonelaje Mineral				1,320,969	1,189,241	750,777
	Tonelaje Roca				289,260	423,171	883,756
Valorización	Ingreso	USD			20,880,744	18,010,839	13,407,782
	Costo Mina	USD			579	846	1,768
	Costo Planta	USD			1,321	1,189	751
	Inversión						
Flujos	Flujo Caja				20,878,845	18,008,804	13,405,264
	Flujo Actualizado				18,980,768	14,883,309	10,071,573
<b>VAN</b>					<b>43,935,650</b>		

**Ilustración 77 Variables económicas modelo inicial.**

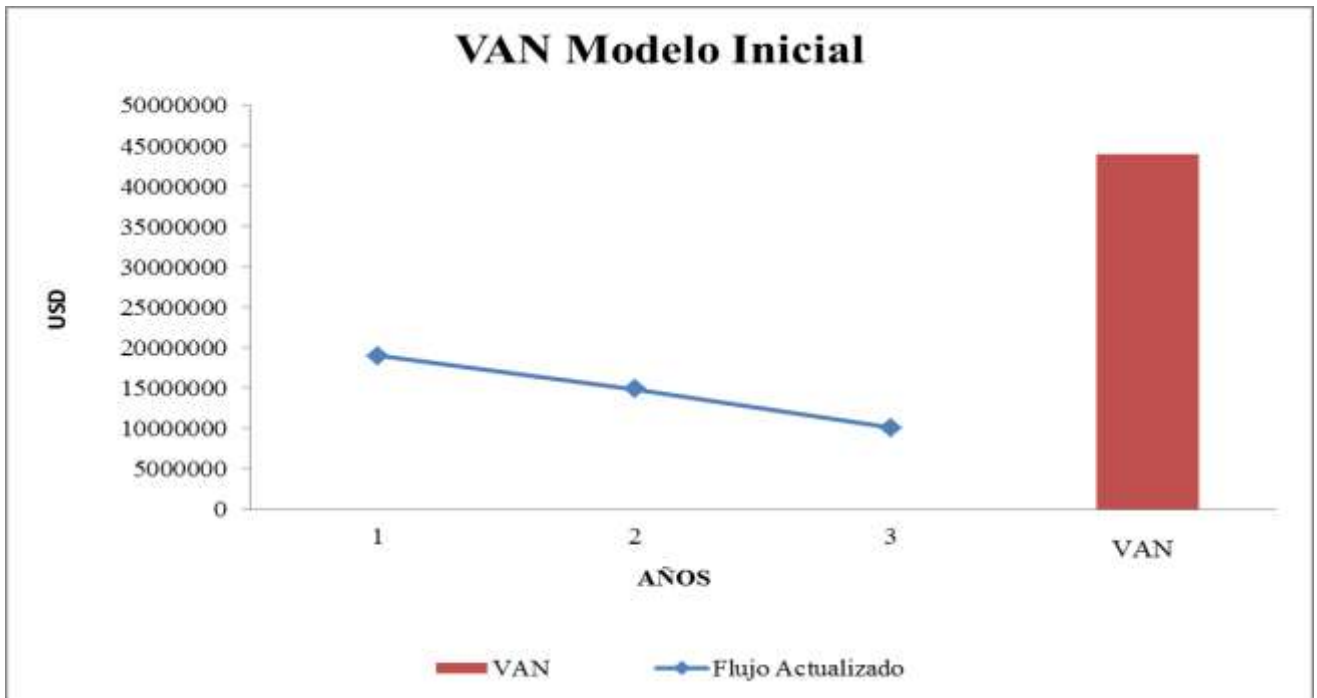


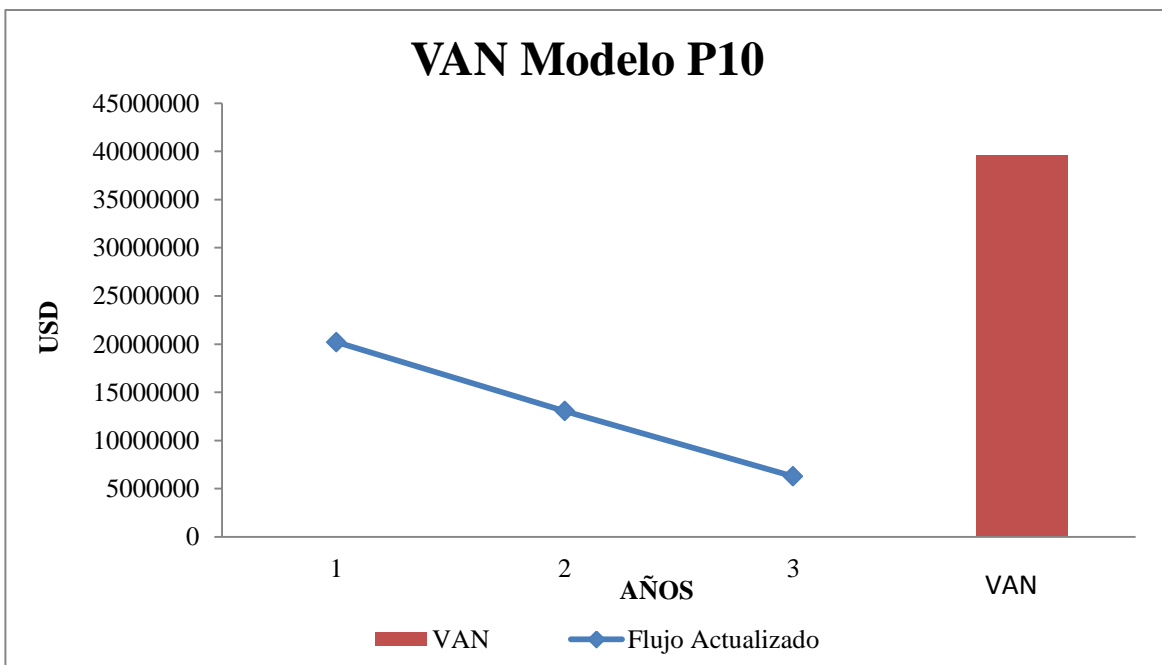
Ilustración 78 VAN modelo inicial.

### 6.3 ANÁLISIS ECONÓMICO DE LOS MODELO SIMULADOS

A continuación se muestran la estimación de costos para los modelos P10, P50 y P90 con respecto al VAN

<b>Parametros Económicos</b>	Precio	15000	USD/Ton		
	Descuento por Venta	15%			
	Costo Mina	2	USD/Ton		
	Costo Planta	1	USD/Ton		
	Recuperación	90%			
Costo Oportunidad	10%				
<b>AÑOS</b>					
		<b>1</b>	<b>2</b>		
		<b>3</b>			
Plan de Producción	Ley (%)	1.26%	1.19%	1.15%	
	Tonelaje Mineral	1,305,778	987,053	539,894	
	Tonelaje Roca	484,451	625,359	1,094,639	
Valorización	Ingreso	USD	22,235,033	15,785,099	8,361,673
	Costo Mina	USD	969	-723	1,109
	Costo Planta	USD	1,306	987	540
	Inversión				
Flujos	Flujo Caja		22,232,759	15,784,835	8,360,024
	Flujo Actualizado		20,211,599	13,045,318	6,281,009
<b>VAN</b>			<b>39,537,927</b>		

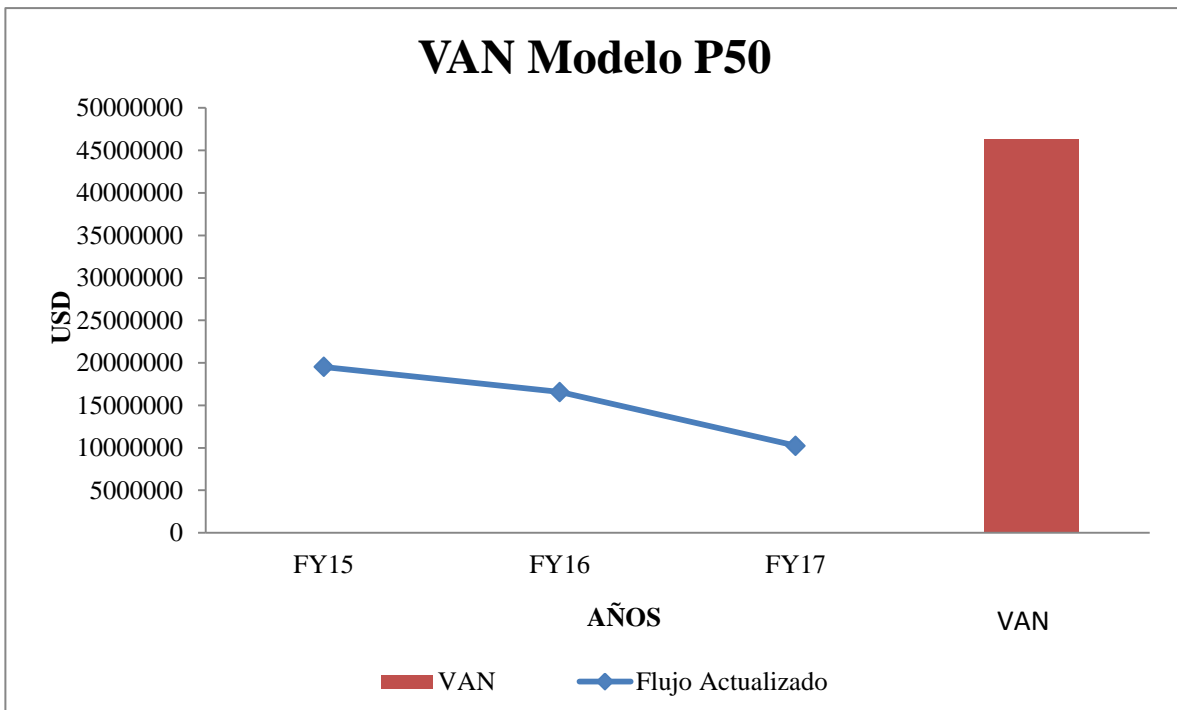
**Ilustración 79 Variables económicas modelo simulado P10.**



**Ilustración 80 VAN Modelo simulado P10.**

Parametros Económicos	Precio	15000	USD/Ton		
	Descuento por Venta	15%			
	Costo Mina	2	USD/Ton		
	Costo Planta	1	USD/Ton		
	Recuperación	90%			
AÑOS		FY15	FY16	FY17	
Año		1	2	3	
Plan de Producción	Ley (%)	1.208%	1.26%	1.36%	
	Tonelaje Mineral	1,319,496	1,175,608	743,324	
	Tonelaje Roca	290,733	436,804	891,209	
Valorización	Ingreso	USD	21,487,445	20,040,506	13,627,232
	Costo Mina	USD	581	-1,478	296
	Costo Planta	USD	1,319	1,176	743
	Inversión				
Flujos	Flujo Caja		21,485,544	20,040,808	13,626,193
	Flujo Actualizado		19,532,312	16,562,651	10,237,561
VAN			46,332,524		

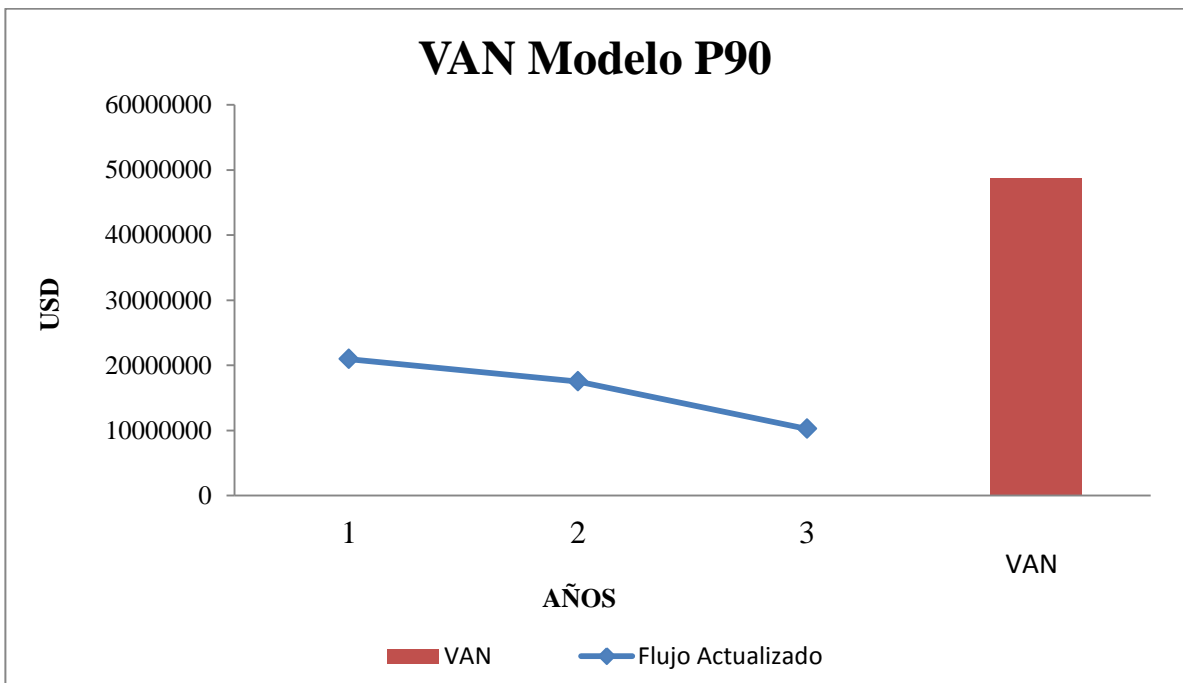
**Ilustración 81 Variables económicas modelo simulado P50.**



**Ilustración 82 VAN modelo simulado P50.**

<b>Parametros Económicos</b>	Precio	15000	USD/Ton		
	Descuento por Venta	15%			
	Costo Mina	2	USD/Ton		
	Costo Planta	1	USD/Ton		
	Recuperación	90%			
	Costo Oportunidad	10%			
<b>AÑOS</b>		1	2	3	
<b>Año</b>		1	2	3	
Plan de Producción	Ley (%)	1.28%	1.33%	1.37%	
	Tonelaje Mineral	1,333,114	1,180,199	740,311	
	Tonelaje Roca	277,115	432,213	894,221	
Valorización	Ingreso	USD	23,040,300	21,184,582	13,647,324
	Costo Mina	USD	554	-1,496	308
	Costo Planta	USD	1,333	1,180	740
	Inversión				
Flujos	Flujo Caja		23,038,413	21,184,898	13,646,275
	Flujo Actualizado		20,944,012	17,508,180	10,252,649
<b>VAN</b>		<b>48,704,841</b>			

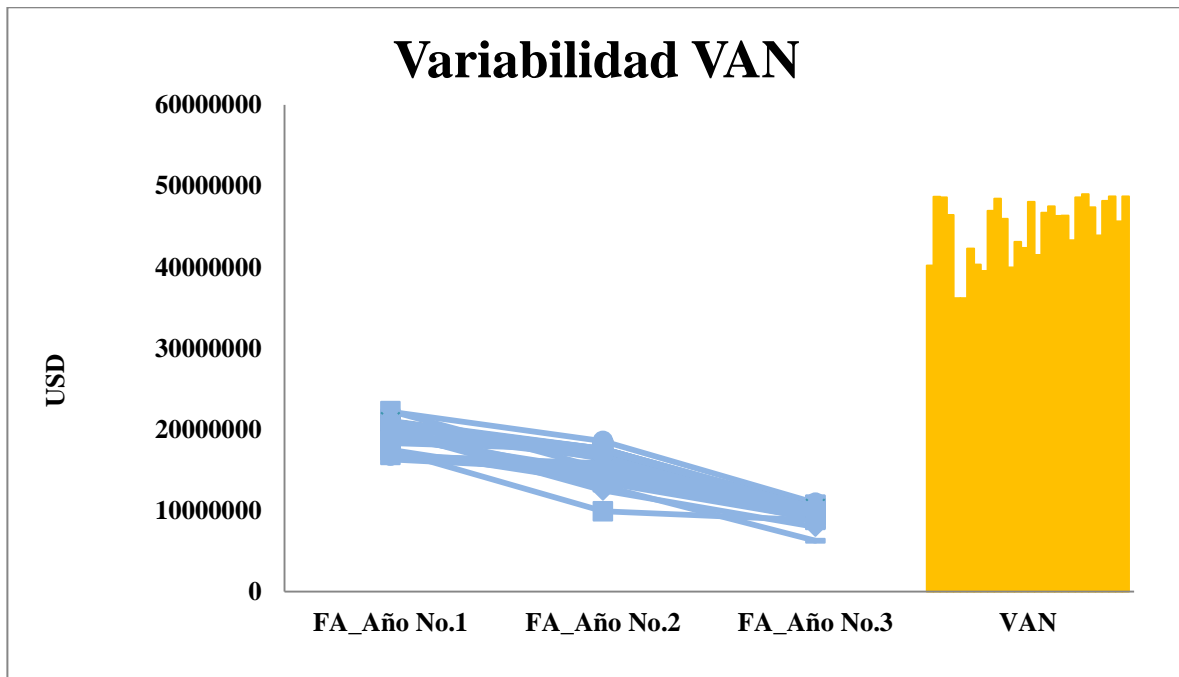
**Ilustración 83 Variables económicas modelo simulado P90.**



**Ilustración 84 VAN modelo simulado P90.**



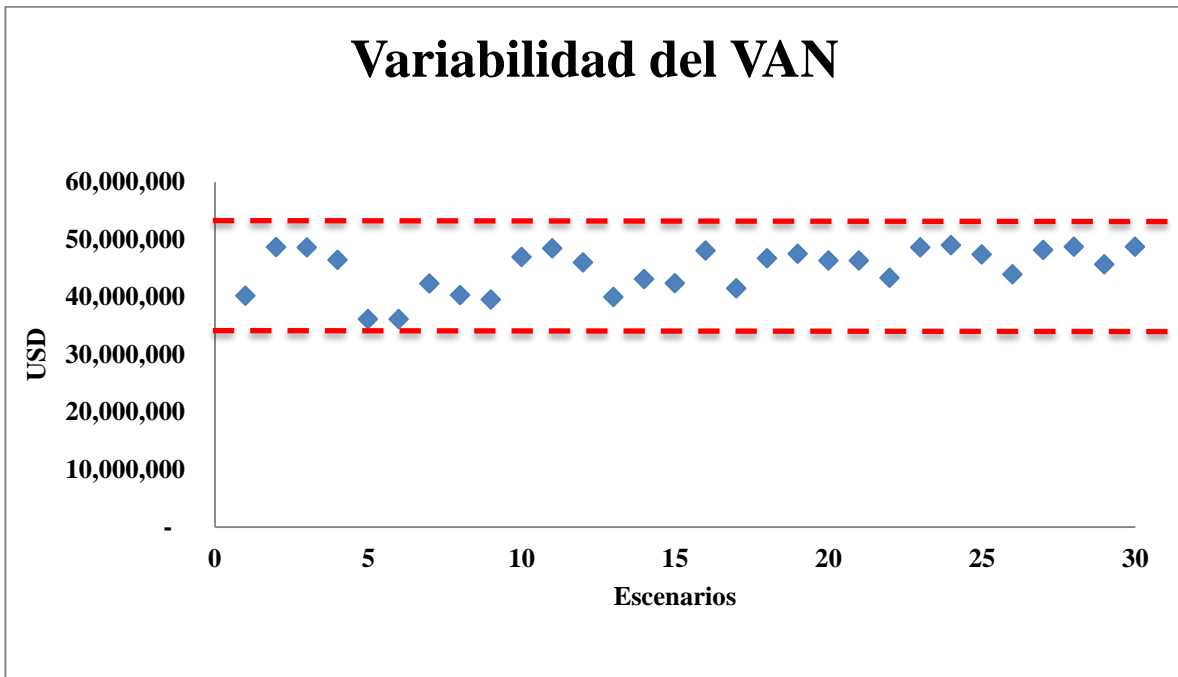
A continuación se resumen el valor del VAN para cada uno de los 30 modelos con sus respectivos flujos actualizados.



**Ilustración 85 Resumen VAN de los modelos simulados.**

En esta grafica se puede observar en azul (línea) flujos actualizados para cada uno de los 30 modelos simulados, al igual que el valor del VAN (barras naranjada).

En resumen, En la gráfica a continuación se observa que el VAN para los modelos simulados oscila entre 32.000.000 y 52.000.000 millones de dólares



**Ilustración 86 Rango VAN de los modelos simulados.**

MODELO	FA Año No.1	FA Año No.2	FA Año No.3	VAN	PERCENTIL
5	17,433,803	9,913,582	8,825,416	36,172,801	
6	22,169,955	18,559,097	10,943,050	36,172,801	
9	20,211,599	13,045,318	6,281,009	39,537,927	p10
13	17,476,904	13,476,998	9,024,665	39,978,567	
1	19,747,844	12,471,481	7,986,172	40,205,497	
8	16,316,163	14,953,018	9,072,687	40,341,868	
17	17,136,335	13,963,553	10,402,117	41,502,004	
7	19,230,764	14,175,253	8,902,535	42,308,553	
15	16,780,056	15,842,617	9,775,762	42,398,435	
14	16,853,366	15,606,351	10,668,091	43,127,808	
22	19,644,995	14,308,899	9,371,717	43,325,611	
26	18,980,768	14,885,274	10,072,701	43,938,744	
29	18,319,925	17,486,586	9,843,620	45,650,132	
12	20,429,043	16,552,976	9,008,135	45,990,154	
20	19,532,312	16,562,651	10,237,561	46,332,524	p50
21	18,943,622	17,143,506	10,276,202	46,363,330	
4	18,716,455	17,617,528	10,109,133	46,443,116	
18	19,264,030	17,569,680	9,895,274	46,728,985	
10	19,108,029	17,026,351	10,835,956	46,970,336	
25	20,078,639	17,584,377	9,713,480	47,376,496	
19	20,891,769	16,357,949	10,266,727	47,516,445	
16	22,244,212	15,123,728	10,702,192	48,070,131	
27	20,735,904	17,329,160	10,095,568	48,160,633	
11	20,791,948	17,495,020	10,171,465	48,458,432	
3	21,017,460	17,338,282	10,256,030	48,611,772	
23	20,924,451	17,424,789	10,270,152	48,619,392	
2	20,944,012	17,508,180	10,252,649	48,704,841	27
30	20,809,097	17,614,247	10,314,322	48,737,667	
28	20,832,190	17,616,877	10,296,152	48,745,219	
24	21,032,441	17,612,899	10,363,596	49,008,936	

**Tabla 8 Resumen VAN y flujos actualizados para cada modelo.**

El Valor en riesgo para la compañía Var (5%) es de 8 millones de dólares, calculados como el VAN medio menos el percentil P5.

### 7. CONCLUSIONES

✓ Los *stock pile* considerados en los planes de vida de mina son yacimientos artificiales a los cuales se le debe garantizar su correcto conocimiento, es decir:

1. Definir variables de diseño (Bancos).
2. Sectorizar la ubicación de los materiales que conformaran el stock.
3. Reducir la dilución del material en el proceso de construcción, uso de equipos de soporte en labores de empuje de material y tratamiento de los pisos del mismo.
4. Hacer seguimiento a todos los diseños de construcción de stock.

La información histórica con la que se contaba inicialmente del modelo de *stock pile*, estaba sobreestimando las leyes y el tipo de material. Se puede resumir entonces, que durante la creación del *stock pile*, no se designaron los recursos necesarios para hacer un adecuado control y seguimiento del material que se estaba depositando.

✓ Con el proceso de simulación de los modelos se pudo reproducir el comportamiento de las muestras; generando la posibilidad de evaluar varios escenarios de su posible comportamiento, sin embargo la ley media de las muestras y los modelos simulados, reflejan un 30% menos de ley con respecto a la considerada en la información histórica.

La campaña de muestreo realizada cambió el escenario de minar un material categorizado como 100% procesable, a considerar y ejecutar un proceso minero en un material diluido.

✓ El VAN obtenido de la secuencia minera, para el modelo construido con la información histórica es cerca de US \$ 98.000.000, después de la realización de la campaña de muestreo, se reflejó una caída importante en la ley del material, la secuencia minera correspondiente a este modelo arroja un VAN de US \$ 43.000.000; teniendo en cuenta que las secuencias mineras tienen las mismas premisas, se puede evidenciar el impacto que tiene, no realizar el debido control sobre los materiales que se consideran reservas reprocesarles. Ahora bien, para los modelos simulados el VAN oscila entre US \$ 32.000.000 y US \$ 52.000.000, Realizar el minado de este *stock pile*, genera un valor en riesgo para la compañía de US \$ 8.000.000 millones de dólares. Ahora se deberá comparar este valor, con el costo-beneficio que generaría destinar los recursos a la extracción de un yacimiento in-situ, que se encuentra a 45 km de la planta.

### 8. BIBLIOGRAFIA

- ✓ Mohammad Waqar, Ali Asad, Roussos Dimitrakopoulos, *Optimal production scale of open pit mining operations with uncertain metal supply and long-term stockpiles*, Resources Policy, Volume 37, Issue 1, March 2012, Pages 81-89
  
- ✓ J.E. Everett, *Simulation to reduce variability in iron ore stockpiles*, Mathematics and Computers in Simulation, Volume 43, Issue 3, 1997, Pages 563-568.
  
- ✓ Yu Li, Erkan Topal & David Williams, *Waste rock dumping optimisation using mixed integer programming (MIP)*, International Journal of Mining, Reclamation and Environment, Volume 27, 2013 - Issue 6, Pages 425-436.
  
- ✓ Sara KASMAEE, Javad GHOLAMNEJAD, Alireza YARAHMADI, Hosein MOJTAHEDZADEH, *Reserve estimation of the high phosphorous stockpile at the Choghart iron mine of Iran using geostatistical modeling*, Mining Science and Technology (China), Volume 20, Issue 6, 2010, Pages 855-860.
  
- ✓ S. Ramazan, R. Dimitrakopoulos, *Production scheduling with uncertain supply a new solution to the open pit mining problem*, 2010.

- ✓ E. Moreno a , M. Rezakhah b , A. Newman b, F. Ferreira, Linear models for stockpiling in open-pit mine production scheduling problems, 2016.
  
- ✓ Aldo Castro, Monitoreo y Modelación 3D en Línea en Acopios de Mineral, 2015.
  
- ✓ A. Giubergia, V. Gil, Y. Mansilla, D. Narváez, M. Bertello, M. Besso, Simulación aplicada al cálculo de capacidades de almacenamiento y *stock piles*, 2016.
  
- ✓ Francisco Cabrejos, Diseño y operación de *stock piles* en operaciones mineras, 2013.
  
- ✓ J. E. Everett, Diseño de *stock pile* para minimizar el impacto ambiental, 2000.
  
- ✓ J.E. Everett & M. Kampermaif, Manejo continuo de stock pile para reducir residuos en la industria minera, 2000.
  
- ✓ Yu Li, Erkan Topal & David Williams, Optimización de botaderos de estéril mediante programación entera, 2000.

- ✓ J.E. Everett, Simulación para reducir la variabilidad del mineral de Hierro en los *Stock pile*, 1997.
  
- ✓ Emery X., Geoestadística, Universidad de Chile, 2013.
  
- ✓ Dimitrakopoulos & Godoy, Grade Control and Simulation Methods, 2014.
  
- ✓ M. Monsalvo, Marco teórico conceptual de la Geoestadística, 2015.
  
- ✓ Burrough, P. A. Principles of Geographical Information Systems for Land Resources Assessment. New York: Oxford University Press. 1986.
  
- ✓ Heine, G. W. "A Controlled Study of Some Two-Dimensional Interpolation Methods". COGS Computer Contributions 3 (n.º 2): 60–72. 1986.
  
- ✓ McBratney, A. B. y R. Webster. "Choosing Functions for Semi-variograms of Soil Properties and Fitting Them to Sampling Estimates". Journal of Soil Science 37: 617–639. 1986.
  
- ✓ Oliver, M. A. "Kriging: A Method of Interpolation for Geographical Information Systems". International Journal of Geographic Information Systems 4: 313–332. 1990.



✓ Press, W. H., S. A. Teukolsky, W. T. Vetterling y B. P. Flannery. Numerical Recipes in C: The Art of Scientific Computing. New York: Cambridge University Press. 1988.

✓ Royle, A. G., F. L. Clausen y P. Frederiksen. "Practical Universal Kriging and Automatic Contouring". Geoprocessing 1: 377–394. 1981.