



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

**TAMAÑO ÓPTIMO DE EXPLOTACIÓN EN FUNCIÓN DE PARÁMETROS  
ECONÓMICOS**

**MEMORIA PARA OPTAR AL TÍTULO DE INGENIERO CIVIL DE MINAS**

**CRISTIAN ALEJANDRO TOLEDO CÁRDENAS**

**PROFESOR GUÍA:  
MARIO SOLARI MARTINI**

**MIEMBROS DE LA COMISIÓN:  
JULIAN ORTIZ CABRERA  
ANTONIO COUBLE CERVIÑO**

**SANTIAGO DE CHILE**

**NOVIEMBRE 2010**

RESUMEN DE LA MEMORIA  
PARA OPTAR AL TÍTULO DE  
INGENIERO CIVIL DE MINAS  
POR: CRISTIAN TOLEDO C.  
FECHA: 05/11/2010  
PROF. GUÍA: Sr. MARIO SOLARI M.

## “TAMAÑO ÓPTIMO DE EXPLOTACIÓN EN FUNCIÓN DE PARÁMETROS ECONÓMICOS”

La selección de la tasa de producción y consecuentemente de la vida del yacimiento es una decisión crucial en el desarrollo de un proyecto minero. Este factor determina la producción, la inversión y los costos operativos los que a su vez determinan el valor económico y la viabilidad del proyecto.

Normalmente, para cada proyecto en particular se busca la vida útil que optimiza el resultado económico. Este trabajo intenta buscar tendencias generales mediante un análisis teórico general, en comparación a otras formulas empíricas desarrolladas por varios autores.

El estudio desarrolla la parametrización del Valor Actual Neto de un yacimiento de cobre a ser explotado a rajo abierto en función de la vida útil del mismo. A partir de esta fórmula se intenta obtener una expresión para la vida útil que optimiza el Valor Actual Neto en función de los parámetros económicos más importantes. Las expresiones resultan bastante complejas, por lo que debe usarse aproximaciones, con éxito variable. Finalmente, los resultados se comparan a un caso real.

Estas son las principales conclusiones del estudio:

- La vida óptima económica es independiente de las reservas del yacimiento.
- Los valores del VAN son muy similares para un extenso rango de vida en torno al máximo, lo que permite la selección en ese rango considerando otros factores.
- La vida óptima es muy sensible al precio del cobre y disminuye cuando este aumenta, siendo aún más sensible cuando se consideran precios del cobre crecientes o decrecientes en el tiempo.
- Con menor sensibilidad, la vida útil económica aumenta cuando crece la inversión por unidad de producción, los costos fijos y variables ó la tasa de descuento.
- Para los rangos usuales de inversión, costos de operación y precios de estimación de hoy, la vida óptima económica varía entre 20 - 30 años.

La experiencia muestra que la gran mayoría de las operaciones se amplía y extiende su vida útil considerablemente más allá de las estimaciones originales. Un análisis sustentado en el análisis teórico previo indica que se debiera privilegiar los ritmos de explotación más intensos dentro del rango óptimo, ya que estos generan mejores resultados económicos que potenciales ampliaciones futuras.

## **Agradecimientos**

Llegar a este punto no ha sido fácil, el camino recorrido ha sido complicado, sin embargo, en el trayecto una gran cantidad de personas me ayudaron con palabras de aliento, apoyo, compañerismo, amistad y cariño, haciendo que las dificultades que se presentaron fueran superadas con éxito.

En primer lugar quiero agradecer a toda mi familia por el apoyo y comprensión incondicional desde siempre, en especial a mis padres y a mis abuelos que son mis segundos padres. Gracias a ellos soy lo que soy.

Dar las gracias a mis amigos y compañeros universidad, a los todos los mineros, en especial a Pame, Lili y Javier, con quienes pasé largas horas del día y de la noche compartiendo momentos inolvidables. Gracias a ellos la convivencia y el día a día era excelente. Sin lugar a dudas los mejores recuerdos de la Escuela.

A Claudia que este último año ha estado presente acompañándome y ayudándome en esta etapa final de la carrera. No puedo dejar de agradecer a Gabriel, el que lleva 7 meses creciendo, quien es mi motivación de cada día para seguir adelante y hacer las cosas lo mejor posible.

Agradecer a mi profesor guía, Mario Solari, por su paciencia, disposición, comprensión y apoyo durante la totalidad del desarrollo de la memoria.

No sólo a los nombrados aquí les agradezco, sino también a cada uno que de alguna forma me ayudo a llegar a esta meta.

# Índice

Índice .....	4
1. Introducción .....	12
1.1 Objetivos .....	14
1.1.1 General .....	14
1.1.2 Específicos .....	14
1.2 Alcance .....	14
1.2.1 Leyes de corte .....	14
1.3 Metodología .....	15
1.3.1 Análisis Teórico.....	15
1.3.2 Análisis Práctico.....	15
2. Análisis Teórico.....	16
2.1 Supuestos .....	16
2.2 Casos de Estudio.....	17
2.2.1 Caso 1: Precio Fijo, Sin Impuestos, Sin tasa de actualización.....	18
2.2.2 Caso 2: Precio Fijo, Con Impuestos, Sin tasa de actualización .....	20
2.2.3 Caso 3: Precio Fijo, Sin Impuestos, Con tasa de actualización .....	20
2.2.4 Caso 4: Precio Fijo, Con Impuestos, Con tasa de actualización.....	24
2.2.5 Caso 5: Precio Variable, Sin Impuestos, Sin tasa de actualización .....	28
2.2.6 Caso 6: Precio Variable, Con Impuestos, Sin tasa de actualización .....	31
2.2.7 Caso 7: Precio Variable, Sin Impuestos, Con tasa de actualización .....	32
2.2.8 Caso 8: Precio Variable, Con Impuestos, Con tasa de actualización .....	37
2.2.9 Resultados generales de los casos. ....	41
3. Parte Práctica. ....	43
3.1 Descripción Faena .....	43
3.2 Presentación de los Datos.....	44
3.3 Parámetros para Expresión Vida Óptima .....	46
3.3.1 Factor Costos Fijos.....	46
3.3.2 Factor de Inversión.....	47
3.3.3 Valor de la Tonelada.....	47
3.3.4 Costos Variables .....	47
3.3.5 Tabla Resumen .....	48
3.4 Validación de los resultados teóricos.....	49

3.4.1	Comparación de la fórmula contra los flujos de caja.....	50
3.4.2	Reservas .....	51
3.4.3	Precio.....	55
3.4.4	Inversión.....	60
3.4.5	Costos Fijos.....	66
3.4.6	Costos Variables .....	71
3.4.7	Tasa de Descuento .....	74
3.4.8	Impuesto .....	77
3.4.9	Comentarios Generales.....	80
3.5	Estimación Vida Óptima.....	80
3.5.1	Caso 1 .....	80
3.5.2	Caso 3 .....	80
3.5.3	Caso 5 .....	81
3.5.4	Caso 7 .....	81
3.6	Comparación de VAN .....	81
4.	Otros Análisis.....	83
4.1	Caso Práctico Extrapolado.....	83
4.2	Caso Potenciales Reservas .....	88
5.	Análisis y Conclusiones.....	90
6.	Bibliografía .....	95
7.	Anexos.....	96

## Índice de Tablas

Tabla 1: Rangos de Variables a analizar.....	17
Tabla 2: Datos de Producción.....	44
Tabla 3: Costos Variables.....	44
Tabla 4: Costos Fijos Administrativos y Gerencia.....	45
Tabla 5: Tonelaje de productos que generan ingresos.....	45
Tabla 6: Perfil de precios de Cu.....	45
Tabla 7: Inversiones.....	46
Tabla 8: Resumen Parámetros a utilizar.....	48
Tabla 9: Comparación Fórmula y Flujos de Caja.....	50
Tabla 10: Forma de Estimación de Inversiones para distintos ritmos de explotación.....	84
Tabla 11: Formas de estimación de Costos para diferentes ritmos de producción.....	84
Tabla 13: Costos para diferentes ritmos de explotación.....	85
Tabla 14: Precios del Cobre para distintos periodos.....	85
Tabla 12: Inversiones para diferentes ritmos de explotación.....	85
Tabla 15: Parámetros para realizar el flujo de caja.....	86
Tabla 16: VAN y vidas útiles para distintos ritmos de producción.....	86
Tabla 17: Vidas Útiles para Distintos ritmos de producción y reservas.....	89

## Índice de Gráficos

Gráfico 1: Vida óptima según inversión .....	19
Gráfico 2: Vida Óptima según Costos Fijos.....	19
Gráfico 3: Vida óptima vs Inversión .....	21
Gráfico 4: Vida Óptima vs Costos Fijos.....	22
Gráfico 5: Vida Óptima vs Costos Variables .....	22
Gráfico 6: Vida Óptima vs Valor de la Tonelada.....	23
Gráfico 7: Vida Óptima vs Tasa de Descuento .....	23
Gráfico 8: Vida Óptima Vs Inversión .....	25
Gráfico 9: Vida Óptima Vs Costos Fijos .....	25
Gráfico 10: Vida Óptima Vs Costos Variables.....	26
Gráfico 11: Vida Óptima Vs Valor de la Tonelada .....	27
Gráfico 12: Vida Óptima Vs Tasa de Descuento.....	27
Gráfico 13: Vida Óptima Vs Impuestos .....	28
Gráfico 14: Vida Óptima Vs Inversión .....	29
Gráfico 15: Vida Óptima Vs Inversión, Pendiente.....	30
Gráfico 16: Vida Óptima Vs Costos Fijos .....	30
Gráfico 17: Pendientes Precio Cu, Costos Fijos.....	31
Gráfico 18: Pendientes Precio Cu, Inversión	
Gráfico 19: Pendientes Precio Cu, Costos Fijos.....	33
Gráfico 20: Pendientes Precio Cu, Costos Variables	
Gráfico 21: Pendientes Precio Cu, Precio Cu	33
Gráfico 22: Pendientes Precio Cu, Tasa de descuento.....	34
Gráfico 23: Vida Óptima Vs Inversión .....	34
Gráfico 24: Vida Óptima Vs Costos Fijos .....	35
Gráfico 25: Vida Óptima Vs Costos Variables.....	35
Gráfico 26: Vida Óptima Vs Precio .....	36
Gráfico 27: Vida Óptima Vs Tasa de Descuento.....	36
Gráfico 28: Vida Óptima Vs Inversión .....	37
Gráfico 29: Vida Óptima Vs Costos Fijos .....	38
Gráfico 30: Vida Óptima Vs Costos Variables.....	38
Gráfico 31: Vida Óptima Vs Precio .....	39
Gráfico 32: Vida Óptima Vs Tasa de Descuento.....	39

Gráfico 33: Vida Óptima Vs Impuestos .....	40
Gráfico 34: VAN según reservas caso 1 .....	51
Gráfico 35: VAN según reservas caso 2 .....	52
Gráfico 36: VAN según reservas caso 3 .....	52
Gráfico 37: VAN según reservas caso 4 .....	53
Gráfico 38: VAN según reservas caso 5 .....	53
Gráfico 39: VAN según reservas caso 6 .....	54
Gráfico 40: VAN según reservas caso 7 .....	54
Gráfico 41: VAN según reservas caso 8 .....	55
Gráfico 42: VAN según precio caso 1 .....	55
Gráfico 43: VAN según precio caso 2 .....	56
Gráfico 44: VAN según precio caso 5 .....	56
Gráfico 45: VAN según precio caso 6 .....	57
Gráfico 46: VAN según precio caso 3 .....	57
Gráfico 47: VAN según precio caso 4 .....	58
Gráfico 48: VAN según precio caso 7 .....	58
Gráfico 49: VAN según precio caso 8 .....	59
Gráfico 50: Vida óptima según precio Cu caso 3	
Gráfico 51: Vida óptima según precio Cu caso 4 .....	59
Gráfico 52: Vida óptima según precio Cu caso 7	
Gráfico 53: Vida óptima según precio Cu caso 8 .....	59
Gráfico 54: VAN según inversión caso 1 .....	60
Gráfico 55: VAN según inversión caso 2 .....	61
Gráfico 56: VAN según inversión caso 5 .....	61
Gráfico 57: VAN según inversión caso 6 .....	62
Gráfico 58: Vida óptima según Inversión caso 1 y 3	
Gráfico 59: Vida óptima según Inversión caso 5 y 6 .....	62
Gráfico 60: VAN según inversión caso 3 .....	63
Gráfico 61: VAN según inversión caso 4 .....	63
Gráfico 62: VAN según inversión caso 7 .....	64
Gráfico 63: VAN según inversión caso 8 .....	64
Gráfico 64: Vida óptima según Inversión caso 3	
Gráfico 65: Vida óptima según Inversión caso 4 .....	65

Gráfico 66: Vida óptima según Inversión caso 7	
Gráfico 67: Vida óptima según Inversión caso 8 .....	65
Gráfico 68: VAN según costos fijos caso 1.....	66
Gráfico 69: VAN según costos fijos caso 2.....	66
Gráfico 70: VAN según costos fijos caso 5.....	67
Gráfico 71: VAN según costos fijos caso 6.....	67
Gráfico 72: Vida óptima según costos fijos caso 1 y 2	
Gráfico 73: Vida óptima según costos fijos caso 5 y 6 .....	68
Gráfico 74: VAN según costos fijos caso 3.....	68
Gráfico 75: VAN según costos fijos caso 4.....	69
Gráfico 76: VAN según costos fijos caso 7.....	69
Gráfico 77: VAN según costos fijos caso 8.....	70
Gráfico 78: Vida óptima según costos fijos caso 3	
Gráfico 79: Vida óptima según costos fijos caso 4 .....	70
Gráfico 80: Vida óptima según costos fijos caso 7	
Gráfico 81: Vida óptima según costos fijos caso 8 .....	71
Gráfico 82: VAN según costos variables caso 3.....	71
Gráfico 83: según costos variables caso 4.....	72
Gráfico 84: VAN según costos variables caso 7 .....	72
Gráfico 85: VAN según costos variables caso 8.....	73
Gráfico 86: Vida óptima según costos variables caso 3	
Gráfico 87: Vida óptima según costos variables caso 4 .....	73
Gráfico 88: Vida óptima según costos variables caso 7	
Gráfico 89: Vida óptima según costos variables caso 8 .....	74
Gráfico 90 : VAN según Tasa de descuento caso 3.....	74
Gráfico 91: VAN según Tasa de descuento caso 4 .....	75
Gráfico 92: VAN según Tasa de descuento caso 7 .....	75
Gráfico 93: VAN según Tasa de descuento caso 8 .....	76
Gráfico 94: Vida óptima según Tasa Actualización caso 3	
Gráfico 95: Vida óptima según Tasa Actualización caso 4 .....	76
Gráfico 96: Vida óptima según Tasa Actualización caso 7	
Gráfico 97: Vida óptima según Tasa Actualización caso 8 .....	77
Gráfico 98: VAN según Impuesto caso 2 .....	77

Gráfico 99: VAN según Impuesto caso 6 .....	78
Gráfico 100: VAN según Impuesto caso 4 .....	78
Gráfico 101: VAN según Impuesto caso 8 .....	79
Gráfico 102: Vida óptima según Costos Variables caso 2	
Gráfico 103: Vida óptima según Costos Variables caso 6 .....	79
Gráfico 104: Vida óptima según Costos Variables caso 4	
Gráfico 105: Vida óptima según Costos Variables caso 8 .....	79
Gráfico 106: Comparación VAN Caso Base y Caso 1	
Gráfico 107: Comparación VAN Caso Base y Caso 3 .....	82
Gráfico 108: Comparación VAN Caso Base y Caso 5	
Gráfico 109: Comparación VAN Caso Base y Caso 7 .....	82
Gráfico 110: VAN para diferentes ritmos de explotación .....	87
Gráfico 111: VAN para distintas reservas potenciales. ....	88

## Lista de Definición de Símbolos

$a$  = Pendiente del precio del cobre

$c$  = Factor de Costos Fijos [US\$/ton]

$c_v$  = Costos variables [US\$/ton]

$I$  = Inversión [US\$/anual]

$i$  = Factor de Inversión [US\$/ton]

$f$  = Impuestos

$k$  = Recuperación · Ley = Ctte

$n$  = Vida óptima [años]

$P_{Cu} = P_0 + a \cdot j$

$R$  = Reservas [ton]

$ROE$  = Ritmo Óptimo Económico

$r$  = Tasa de Descuento

$T$  = Tonelaje [ton/anual]

$v$  = Valor de la tonelada =  $Ley_{Cu} \cdot Rec_{Cu} \cdot 22,04$ [US\$/ton]

$VAN$  = Valor Actual Neto

$VOE$  = Vida Óptima Económica

# 1. Introducción

Determinar la capacidad de producción óptima o la vida óptima económica de explotación de un yacimiento es de gran importancia. Un bajo ritmo de extracción no se beneficia de la economía de escala y genera ingresos lentamente, mientras un ritmo de extracción demasiado intenso, demanda una gran inversión que tal vez no alcance a recuperarse, dado que disminuye la vida de la mina y además implica un alto riesgo.

La mayoría de las compañías poseen como política considerar tiempos de vida entre 7 a 12 años para los yacimientos de tamaño reducido y de 15 a 20 años, o más, para los yacimientos de gran tamaño. Para los yacimientos de gran tamaño se fundamenta en los siguientes criterios:

- Reducir el impacto ante fluctuaciones importantes del precio del cobre en el proyecto.
  - El periodo de amortización del equipamiento minero y la planta de beneficio es más o menos 15 a 20 años
  - No es atractivo reclutar trabajadores por un periodo menor que el tiempo anteriormente referido
- Por mencionar algunos.

Existen varias fórmulas empíricas para determinar la vida óptima de un yacimiento a cielo abierto, siendo las más importantes descritas en las líneas siguientes.

La regla de H.K. Taylor (1976), que se puede aplicar, según su autor, a cualquier tipo de yacimiento mineral, independientemente del método de explotación. La fórmula para la Vida Óptima de Explotación (VOE<sup>1</sup>) que presenta es:

$$VOE[\text{años}] = 6,5 \times \sqrt[4]{Reservas[Mton]}$$

Otro ingeniero canadiense, Brian Mackenzie (1982), también propuso fórmulas similares a la de Taylor, pero distinguiendo si la explotación se realiza por métodos subterráneos o cielo abierto. La expresión propuesta por Mackenzie que se muestra a continuación es para el Ritmo Óptimo de Explotación (ROE)<sup>2</sup> de un yacimiento explotado a cielo abierto y para un ritmo de producción hasta 60 millones [ton/año].

$$ROE[\text{ton/año}] = 5,63 \times (Reservas[\text{ton}])^{0,756}$$

Estas fórmulas son increíblemente sencillas e interesantes, pero sus autores no especifican la base estadística o método empleado para su determinación.

Además, se agrega un tercer autor, López Jimeno (1986), que tras una recopilación de datos de explotaciones mineras de cobre, plomo-zinc y oro, tanto en operación como en desarrollo, efectuó diversos análisis de regresión para ajustar unas curvas del tipo potencial  $y = a \cdot x^b$ , donde “y” es la vida estimada de explotación y “x” las reservas explotables. A continuación se muestra la expresión obtenida:

$$VOE[\text{años}] = 5,35 \times (Reservas[Mton])^{0,273}$$

---

<sup>1</sup> VOE: Vida Óptima Económica, Vida Útil que hace máximo el VAN del proyecto.

<sup>2</sup> ROE: Ritmo Óptimo económico, Ritmo de explotación que hace máximo el VAN del Proyecto

Las expresiones empíricas mencionadas anteriormente son una guía que fueron obtenidas mediante el benchmarking de faenas mineras, por cual deben ser aplicadas con cierta precaución, además de que estas fórmulas presentan algunos defectos que se producen por la omisión de factores que afectan el óptimo económico, tales como:

- Leyes de cobre
- Tonelaje de Prestripping
- Recuperaciones metalúrgicas y leyes de concentrado
- Inversiones y costos de producción
- Precio del Cobre

Para ilustrar una aplicación de las tres expresiones antes mencionadas se desarrollará un ejercicio simple para un yacimiento de cobre de 645 millones de toneladas de reservas explotado a cielo abierto

Para Taylor (1976):

$$VOE[años] = 6,5 \times \sqrt[4]{Reservas[Mton]} = 6,5 \times \sqrt[4]{645 [Mton]}$$

$$VOE[años] = 32,8$$

Para Mackenzie (1982):

$$ROE[ton/año] = 5,63 \times (Reservas[ton])^{0,756} = 5,63 \times (645.000.000[ton])^{0,756}$$

$$ROE \left[ \frac{ton}{año} \right] = 25.735.674 [ton/año]$$

$$VOE[años] = \frac{Reservas}{ROE}$$

$$VOE[años] = 25,0$$

López Jimeno (1986):

$$VOE[años] = 5,35 \times (Reservas[Mton])^{0,273} = 5,35 \times (645[Mton])^{0,273}$$

$$VOE[años] = 31,3$$

Como vemos las tres expresiones dan valores lógicos y semejantes, pero ¿Por cuál de todas nos decidimos?

En esta memoria se pretende introducir las variables económicas más importantes en el estudio de la vida óptima de un yacimiento de cobre explotado a cielo abierto y conocer en forma y tendencias varía ésta.

## **1.1 Objetivos**

### **1.1.1 General**

Conocer en qué forma y con qué tendencias varia el tamaño óptimo de explotación de un yacimiento de cobre a cielo abierto en función de parámetros económicos.

Si bien se estudia sólo cobre como mineral principal, la metodología y los resultados podrían ser aplicados en yacimientos de otros minerales, con pequeños ajustes.

### **1.1.2 Específicos**

- Identificar la relación entre el tamaño óptimo de explotación y el precio del cobre, tasa de retorno, inversiones y costos.
- Comparar los resultados del estudio teórico del tamaño de explotación óptimo con un caso real de la práctica.

## **1.2 Alcance**

El alcance de la presente memoria se enmarca en realizar un estudio conceptual del tamaño de explotación en que se logra el mayor beneficio económico para un yacimiento de cobre a cielo abierto.

Este estudio tiene carácter conceptual y se realizará de manera sencilla de modo de apreciar las relaciones entre las variables económicas de mayor interés (precio del cobre, tasa de actualización, etc.) y la vida óptima económica del yacimiento.

La herramienta de análisis a utilizar será el VAN para medir el beneficio económico del yacimiento ante fluctuaciones de las variables económicas mencionadas

Durante el estudio se han realizado aproximaciones y simplificaciones para hacer más sencillo el análisis, por lo que algunos resultados no son del todo exactos. Sin embargo, la exactitud que se logra es suficiente para lo importante del estudio que son las tendencias que tienen las variables en función de la vida óptima.

### **1.2.1 Leyes de corte**

Este trabajo, permite que el estudio realizado sea reproducible para distintas leyes de corte. Esto debido a que los resultados que se obtienen son independientes de las reservas, lo cual hace que la metodología se emplee para otros tamaños de reservas caracterizadas por una ley de corte.

## **1.3 Metodología**

Se decidió estructurar el trabajo en 2 subestructuras específicas correspondientes a un análisis teórico y un análisis práctico, orientados al cumplimiento de los objetivos.

### **1.3.1 Análisis Teórico**

El análisis teórico se desarrolla en dos etapas

#### **1.3.1.1 Parametrización**

En esta etapa, se parametrizará el VAN, en función de parámetros económicos de manera de obtener una expresión que los relacione de manera sencilla y de interpretación simple.

Como el fin de este estudio es obtener la vida óptima económica, es necesario derivar la expresión obtenida e igualar a cero, de este modo se consigue una expresión para la vida óptima económica.

#### **1.3.1.2 Análisis**

En este ítem, se buscará identificar cómo y cuánto es la variación de la vida óptima económica versus las variables de estudio, dentro de los rangos de valores del mercado actual.

### **1.3.2 Análisis Práctico**

#### **1.3.2.1 Caso base**

Como aplicación, se realizará una evaluación en base a una operación real de una faena de la cual se tiene información del ritmo de explotación además del perfil de costos e inversiones. Esta información permite comparar resultados reales de la operación con el estudio teórico realizado.

#### **1.3.2.2 Análisis de Casos**

Con los datos reales se extrapolarán inversiones y costos a ritmos de explotación distintos, estas extrapolaciones se realizarán mediante estimaciones. Una vez hecho esto se compararán los VAN de cada ritmo de explotación.

## 2. Análisis Teórico

En este capítulo se desarrollará una parametrización del VAN, la que será la herramienta de análisis económico para encontrar la Vida Óptima de explotación. La expresión del VAN es la siguiente:

$$VAN = -I + \sum_{i=1}^n \frac{\text{Flujo de Caja}}{(1+r)^i}$$

Se analizarán 8 escenarios para el cálculo del VAN, partiendo desde uno muy simple y aumentando cada vez la complejidad del estudio. En cada uno de los escenarios se analizará los parámetros que influyen en la determinación de la vida óptima económica.

La vida óptima se obtendrá mediante la maximización del VAN. Lo que se realizará de la siguiente manera:

- Expresar el VAN en función de los parámetros a estudiar
- Derivar la expresión respecto a la vida útil (n)
- Igualar a cero la derivada del VAN
- Encontrar el valor de n, que hace que el VAN sea máximo
- La vida útil óptima encontrada estará en función de parámetros económicos, con los cuales se realizará un estudio de la relación de cada uno respecto a la vida óptima encontrada.

### 2.1 Supuestos

El análisis se ha preparado considerando una serie de simplificaciones de modo de facilitar el estudio y poder realizar observaciones sobre los parámetros a estudiar.

A continuación se enumeran los supuestos:

- Tonelaje anual constante durante la vida del yacimiento
- Ley de cobre constante durante la vida del yacimiento
- Recuperaciones metalúrgicas constantes
- Los costos fijos anuales de operación se expresan en función de las reservas del yacimiento

$$\text{Costos Fijos} = R \cdot c$$

- La inversión se calcula como función del tonelaje de explotación anual

$$I = i \cdot T$$

- El tonelaje se relaciona con la vida óptima “n” de la siguiente manera

$$T = R / n$$

- Se utiliza una tasa de impuesto fija (f), la cual simplifica el complejo cálculo de los impuestos y del royalty minero.

A pesar de los supuestos mencionados, el estudio es válido, ya que el contexto en que se enmarca es a nivel de perfil, donde los resultados indican orientaciones a seguir o descartar algunos caminos.

Bajo los supuestos descritos se establece que los flujos de caja utilizados en la evaluación económica del proyecto quedarán definidos como se describe a continuación:

$$\text{Flujo de Caja} = \text{Ingresos} - \text{Costos Fijos} - \text{Costos Variables} - \text{Impuestos}$$

$$\text{Flujo de Caja} = P_{Cu} \cdot T \cdot \text{Ley}_{Cu} \cdot \text{Rec}_{Cu} \cdot 22,04 - R \cdot c - T \cdot c_v - \left( T \cdot k \cdot P_{Cu} - R \cdot c - T \cdot c_v - \frac{i \cdot T}{n} \right) \cdot f$$

$$\text{Flujo de Caja} = P_{Cu} \cdot T \cdot k - R \cdot c - T \cdot c_v - \left( T \cdot k \cdot P_{Cu} - R \cdot c - T \cdot c_v - \frac{i \cdot T}{n} \right) \cdot f$$

Por lo que la expresión del VAN con impuestos queda de la siguiente manera:

$$\text{VAN} = -i \cdot T + \sum_{j=1}^n \frac{(T \cdot k \cdot P_{Cu} - R \cdot c - T \cdot c_v) - \left( T \cdot k \cdot P_{Cu} - R \cdot c - T \cdot c_v - \frac{i \cdot T}{n} \right) \cdot f}{(1+r)^j}$$

La expresión anterior es la más completa que se ha considerado, y dependiendo del caso a estudiar algunos términos no estarán presentes.

## 2.2 Casos de Estudio.

En este capítulo se mostrará los casos que se analizarán con las respectivas variables involucradas. Además, se presentará la fórmula que se consiguió para la vida óptima, el desarrollo algebraico del cómo se obtuvo la fórmula se encuentra en los anexos.

También se mostrará las tendencias de la vida óptima frente a cada una de las variables que se ven involucradas en cada caso.

Para realizar los gráficos con las tendencias mencionadas, se tomaron los siguientes rangos de las variables. Y cada curva que se grafica se realiza fijando en el promedio los valores de los parámetros y variando sólo el que se desea estudiar.

Tabla 1: Rangos de Variables a analizar

Factor Inversión	[US\$/tpd]	16.000	28.000
Factor Costos Fijos	[US\$/t_reservas]	0,08	0,14
Costos Variables	[US\$/ton]	9	13
Precio Cobre	[US\$/lb]	1,6	2,4
Tasa de Descuento	%	6	12
Tasa de Impuesto	%	35	42

Los rangos de valores mencionados fueron estimados a partir de un número limitado de faenas de referencia que muestran el mercado actual de la gran minería a cielo abierto.

### 2.2.1 Caso 1: Precio Fijo, Sin Impuestos, Sin tasa de actualización

Este es el caso más sencillo que se estudiará. Además, algunos autores sostienen que el análisis debiese hacerse sin actualización, esto debido a que las empresas poseen varios yacimientos los cuales deben reponerse por lo cual, el flujo sería un continuo en el tiempo.

El VAN para este caso queda definido por la expresión siguiente:

$$VAN = -i \cdot T + \sum_{j=1}^n (T \cdot v - R \cdot c - T \cdot c_v)$$

Y al derivar respecto a  $n$  la expresión anterior se obtiene la siguiente ecuación:

$$\frac{\partial VAN}{\partial n} = \frac{i \cdot R}{n^2} - R \cdot c = 0$$

En este caso se obtiene la siguiente expresión para la vida óptima.

$$n = \sqrt{\frac{i}{c}}$$

En el término anterior, se aprecia que las únicas variables que influyen en la vida óptima son el factor de inversión ( $i$ ) y el factor de costos fijos anuales de operación ( $c$ ). Además, sorprende observar que la vida óptima sea independiente del tamaño de las reservas.

Las gráficas siguientes especifican cómo se comporta la VOE respecto de las variables inversión y costos fijos en caso de una tasa de descuento nula, ausencia de impuestos y precio fijo

Se observa que altos costos de inversión implican tamaños menores de explotación, y por ende, vidas más extendidas

En el gráfico que sigue también notamos que el rango en que se mueve la vida óptima para este escenario, es entre 20 y 25 años.

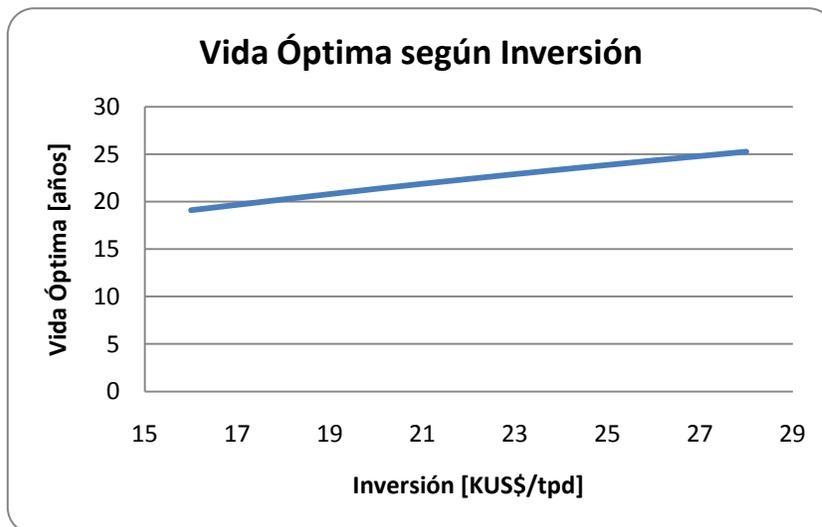


Gráfico 1: Vida óptima según inversión

Por otra parte, la vida óptima tiende a disminuir a medida que los costos fijos anuales de operación aumentan, para disolver estos costos fijos sobre un tonelaje mayor. Además, la vida óptima tiende a ser lineal y constante a medida que los costos crecen, no así para costos bajos donde pequeñas variaciones de éste provocan fluctuaciones mayores.

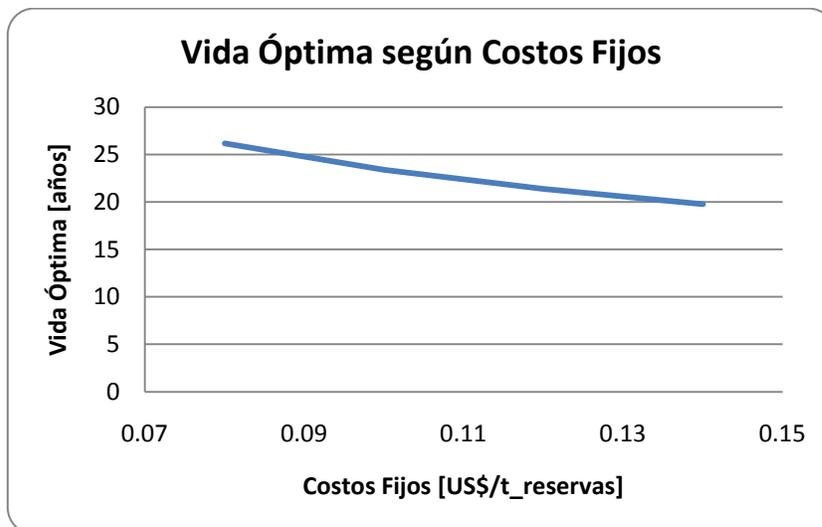


Gráfico 2: Vida Óptima según Costos Fijos

### 2.2.2 Caso 2: Precio Fijo, Con Impuestos, Sin tasa de actualización

En este caso se agrega el efecto que produce los impuestos en los flujos de cajas. Al incorporar este efecto la expresión para el VAN queda como sigue:

$$VAN = -i \cdot T + \sum_{j=1}^n (T \cdot v - R \cdot c - T \cdot c_v) - (T \cdot v - R \cdot c - T \cdot c_v - \frac{i \cdot T}{n}) \cdot f$$

Entonces, la relación que permitirá definir la Vida óptima, se obtendrá de la siguiente expresión.

$$\frac{\partial VAN}{\partial n} = \frac{i \cdot R}{n^2} \cdot (1 - f) - R \cdot c \cdot (1 - f) = 0$$

La fórmula que se obtiene para la vida óptima es la siguiente:

$$n = \sqrt{\frac{i}{c}}$$

La expresión obtenida es exactamente igual a la conseguida en el caso 1, en que no se consideraba el impuesto. Por lo que la tasa de impuesto, en caso de no existir tasa de actualización es irrelevante para la obtención de la vida óptima del yacimiento.

El análisis de sensibilidad a las variables es similar al realizado para el caso 1.

### 2.2.3 Caso 3: Precio Fijo, Sin Impuestos, Con tasa de actualización

En este caso se incorpora la tasa de actualización, para incorporar el valor del dinero en el tiempo. Con esta variable sumada, el estudio, se hace más cercano a la realidad, pero también se hace más complejo el análisis de las expresiones obtenidas del VAN

La expresión para el VAN queda como sigue:

$$VAN = -i \cdot T + (T \cdot v - R \cdot c - T \cdot c_v) \cdot \sum_{i=1}^n \frac{1}{(1+r)^i}$$

Este caso presenta complicaciones para obtener una expresión sencilla, ya que al desarrollar la expresión nos encontramos con el siguiente resultado:

$$VAN = -i \cdot \frac{R}{n} + \left( \frac{R}{n} \cdot v - R \cdot c - \frac{R}{n} \cdot c_v \right) \cdot \left[ \frac{1 - (1+r)^{-n}}{r} \right]$$

Esta expresión presenta la variable "n" tanto en el denominador como en el exponente lo que hace muy difícil encontrar una solución; sin embargo, como el propósito de este trabajo es realizar un análisis en cuanto a las tendencias que presentan las variables de estudio y no a la magnitud exacta, se ha optado por realizar una aproximación lineal<sup>3</sup> del factor de actualización,

<sup>3</sup> El detalle de la aproximación se encuentra en la parte anexos.

de modo de obtener una ecuación lineal para n, el resultado conseguido se muestra a continuación:

$$\left[ \frac{1 + (1 + r)^{-n}}{r} \right] \approx (0,7 - 3,6r) \cdot n + 6,5r + 1,6$$

Con la aproximación anterior, la vida óptima queda representada de la siguiente forma.

$$n = \sqrt{\frac{(10i - (v - c_v) \cdot (6,5r + 1,6))}{c \cdot (0,7 - 3,6r)}}$$

En esta fórmula aparecen otras variables además del factor de inversión y el factor de costos fijos. Surgen ahora las variables, costos variables ( $c_v$ ), valor de la tonelada ( $v$ ) y la tasa de actualización ( $r$ ).

En este caso la forma en que se relacionan las variables con la vida óptima no es tan fácil de predecir. En los siguientes gráficos se mostrará esta dependencia.

Como se muestra en el gráfico 3, el factor de inversión hace variar la vida óptima igual que en los casos anteriores, es decir, al aumentar la inversión la vida óptima se incrementa, además si se compara con el caso 1 (sin actualizar) se observa un crecimiento de la vida óptima más pronunciado en el caso 3.

Además, se observa como al introducir la tasa de descuento el rango en que se mueve la vida óptima aumenta de 20 - 25 años a 20–35 años

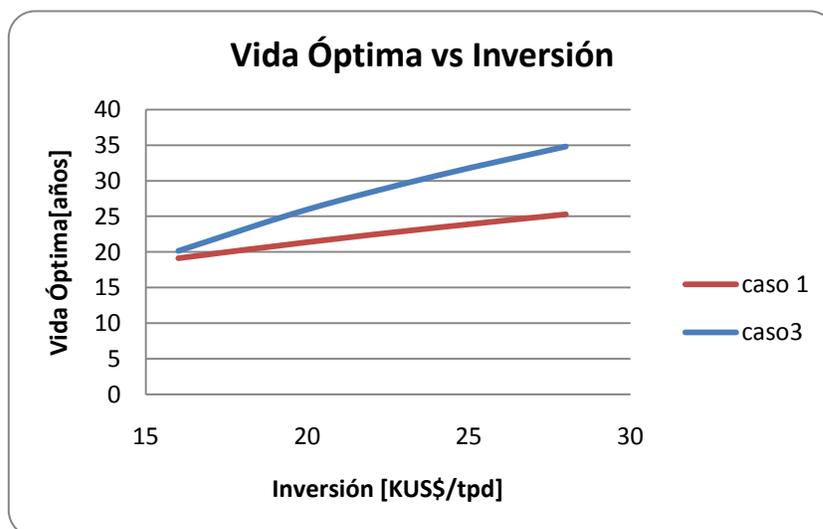


Gráfico 3: Vida óptima vs Inversión

El factor de costos fijos se relaciona disminuyendo la vida óptima a medida que se incrementa éste. Al comparar con el caso 1 sólo se observa un desplazamiento hacia arriba por parte del caso 3, pero la tendencia es similar. Gráficamente se observa a continuación.

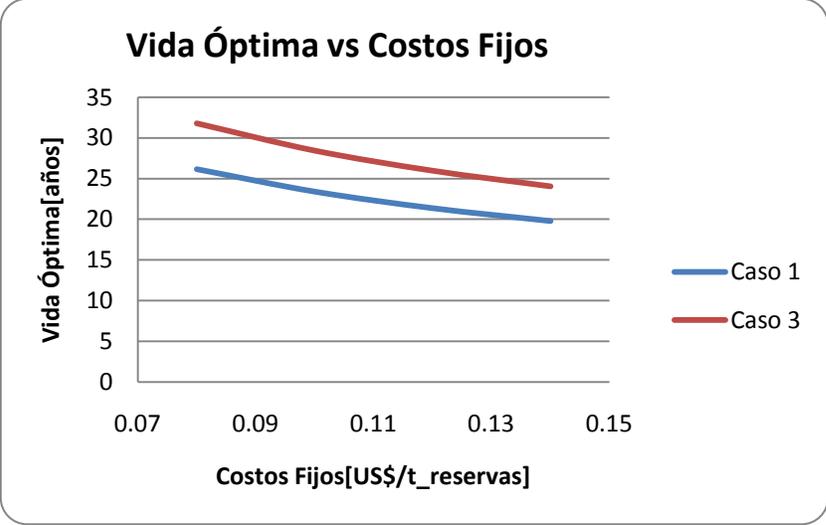


Gráfico 4: Vida Óptima vs Costos Fijos

Al introducir la tasa de descuento en el análisis, los costos variables comienzan a ser importantes. Se aprecia que al aumentar el costo variable por tonelada, la vida óptima se incrementa linealmente.

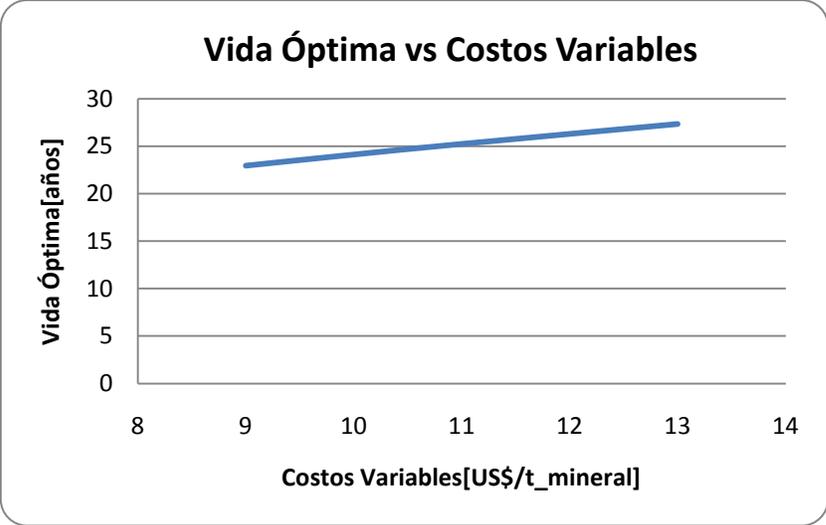


Gráfico 5: Vida Óptima vs Costos Variables

El impacto que tiene el precio del cobre sobre la vida óptima es su disminución a medida que el precio aumenta. Es decir, la vida tiende a ser más breve para los yacimientos de alta ley.

Se nota una fuerte variación de la vida óptima en un rango que va de los 30 a los 15 años.

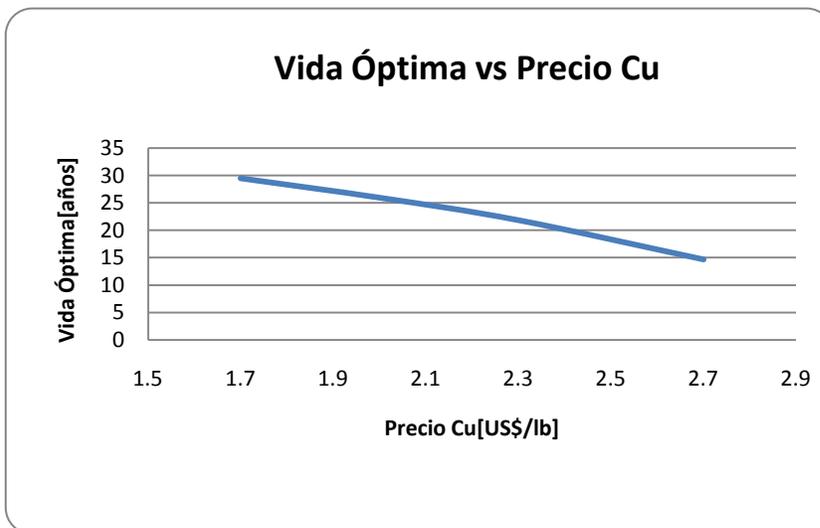


Gráfico 6: Vida Óptima vs Valor de la Tonelada

Por último para este caso, se analizará la influencia que tiene la tasa de descuento en la vida óptima. Como se muestra en el gráfico se aprecia que a medida que aumenta la tasa de descuento, lo mismo hace la vida óptima.

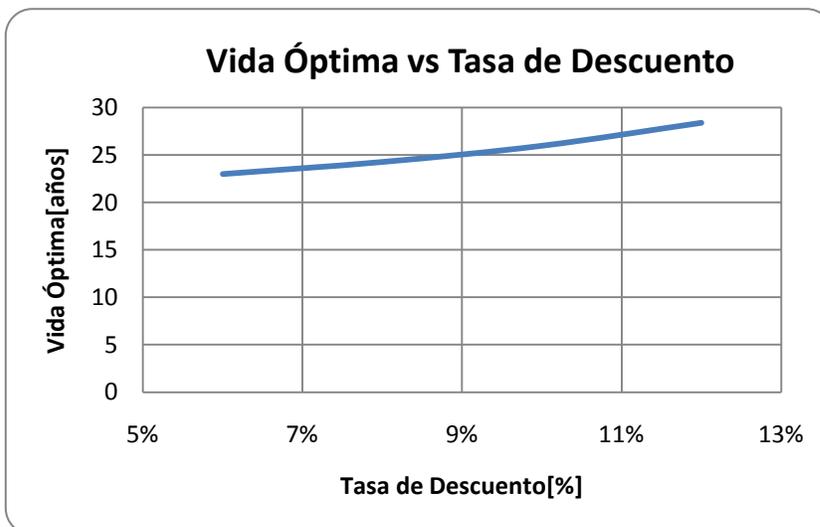


Gráfico 7: Vida Óptima vs Tasa de Descuento

## 2.2.4 Caso 4: Precio Fijo, Con Impuestos, Con tasa de actualización

Este caso es de mayor complejidad, ya que al incluir el impuesto como parámetro, el desarrollo se hace difícil de resolver.

La ecuación de partida es la siguiente.

$$VAN = -i \cdot T + \sum_{j=1}^n \frac{(T \cdot v - R \cdot c - T \cdot c_v) - (T \cdot v - R \cdot c - T \cdot c_v - \frac{i \cdot T}{n}) \cdot f}{(1+r)^j}$$

Como se mencionó anteriormente, el impuesto y la tasa de descuento complican el análisis ya que se llega a la fórmula que se muestra a continuación:

$$\begin{aligned} \frac{\partial VAN}{\partial n} = & -R \cdot c \cdot (1-f) \cdot (0,7 - 3,6r) \cdot n^3 \\ & + [i \cdot R - i \cdot R \cdot f(0,7 - 3,6r) - R(v - c_v)(1-f)(6,5r + 1,6)] \cdot n \\ & - 2 \cdot i \cdot R \cdot f \cdot (6,5r + 1,6) = 0 \end{aligned}$$

Como vemos conseguir una solución para la vida óptima es complejo, ya que se genera una ecuación de tercer grado, cuya solución analítica es difícil de obtener.

Con motivo de obtener resultados, se aplica la siguiente estrategia:

1. Obtener una expresión del tipo:  $A \cdot n^3 + B \cdot n + C = 0$ , donde A, B y C son función de las variables del problema.
2. Luego resolver, esta ecuación obteniendo un resultado para la vida óptima, bajo esas condiciones específicas.
3. Para ver los impactos de las variables, se modifican de a una a la vez, lo que cambia las condiciones específicas, obteniéndose:  $A' \cdot n^3 + B' \cdot n + C' = 0$ , lo que genera otro resultado de vida óptima.
4. Iterar los puntos 1 al 3, las veces que sea necesario.

Por lo que para realizar el estudio del caso se debe resolver para varios escenarios, y en cada uno de ellos se modifica la variable a estudiar de manera de observar su comportamiento. Los resultados obtenidos en los distintos análisis de escenarios entregan las tendencias acerca de los parámetros involucrados.

Al aumentar la inversión se observa un comportamiento creciente de la vida óptima. En el gráfico que se muestra a continuación, se puede apreciar los casos anteriormente descritos y se observa que para los casos 3 y 4 (casos con tasa de descuento) un crecimiento más pronunciado respecto de los casos en que no hay tasa de descuento.

Se nota que al incluir los impuestos el rango en que se mueve la vida óptima aumenta aun más

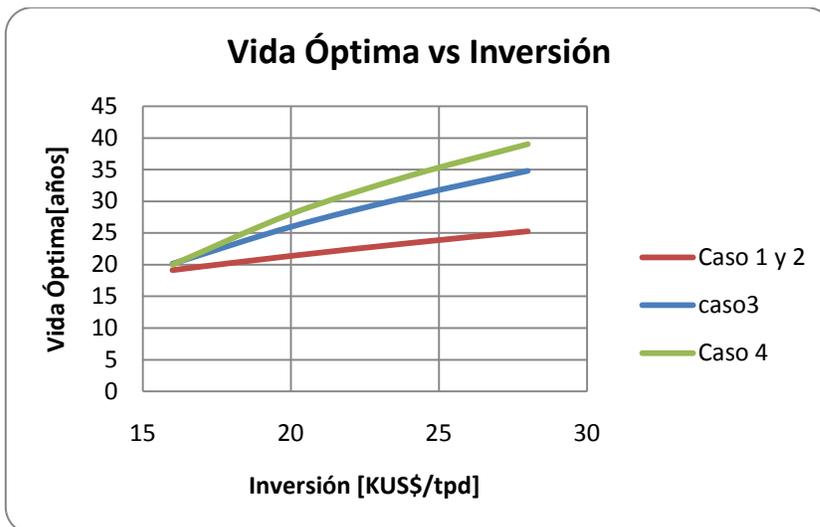


Gráfico 8: Vida Óptima Vs Inversión

La relación entre costos fijos y vida óptima es inversa. Se observa un desplazamiento hacia arriba de la curva a medida que se avanza en la adición de parámetros involucrados en los casos 3 (tasa de actualización) y caso 4 (tasa de actualización e impuestos), sin embargo la tendencia y velocidad de crecimiento es similar.

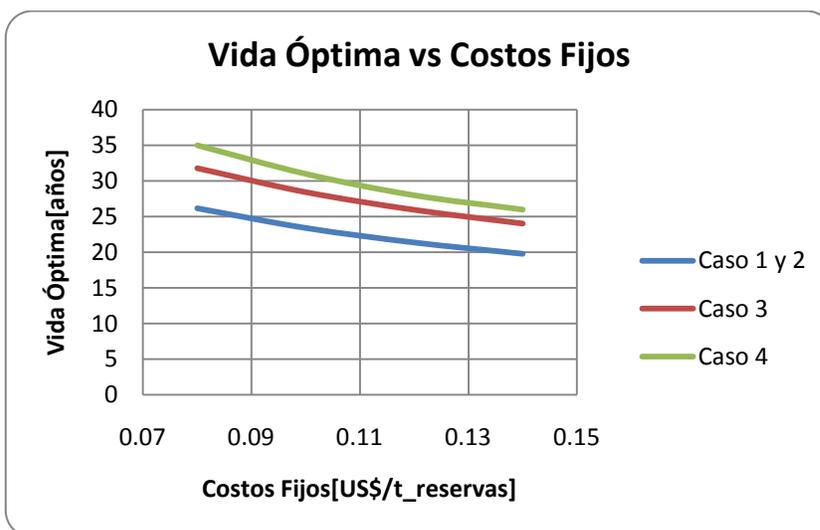


Gráfico 9: Vida Óptima Vs Costos Fijos

La relación de los costos variables con la vida óptima se mueve en la misma dirección. Además al comparar con el caso anterior se nota que la tendencia es la misma, también se ve una pequeña convergencia a un valor común para valores de costos variables alto, lo que hace pensar en una disminución en el impacto que tiene el impuesto cuando los costos variables son muy grandes.

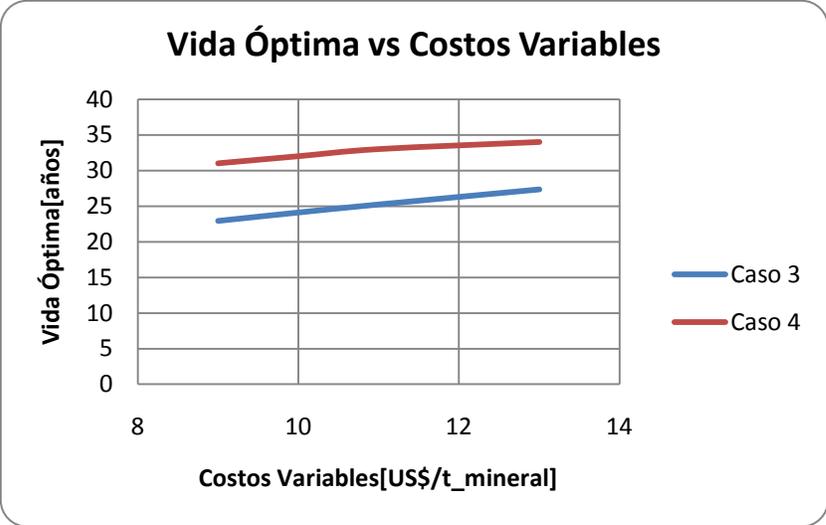


Gráfico 10: Vida Óptima Vs Costos Variables

El precio del cobre, en ambos casos la tendencia es a disminuir la vida óptima a medida que el valor de la tonelada aumenta, y los dos casos muestran una tendencia similar.

Aunque al disminuir precios se observa una pequeña convergencia a un determinado año. Esto podría explicarse, debido a que la única diferencia entre ambos casos es el impuesto, entonces cuando el precio del cobre es pequeño, el impuesto es poco significativo; esto debido a que al haber precios bajos, bajos serán también los beneficios, por ende el impuesto será muy pequeño, lo que lleva a que los casos se vuelvan parecidos en este rango.

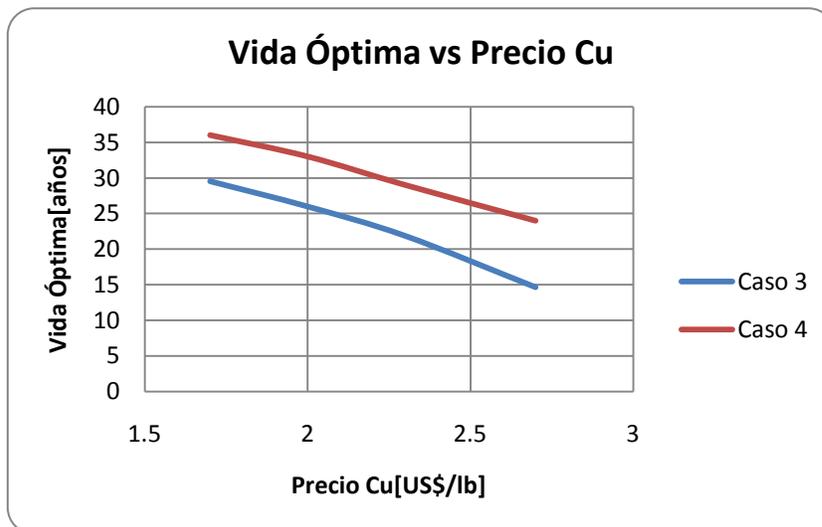


Gráfico 11: Vida Óptima Vs Valor de la Tonelada

La vida óptima en función de la tasa, a pesar de mostrarse distintas se aprecia una tendencia al alza al aumentar esta variable como se muestra a continuación.

Se observa una convergencia cuando la tasa comienza a disminuir a cero.

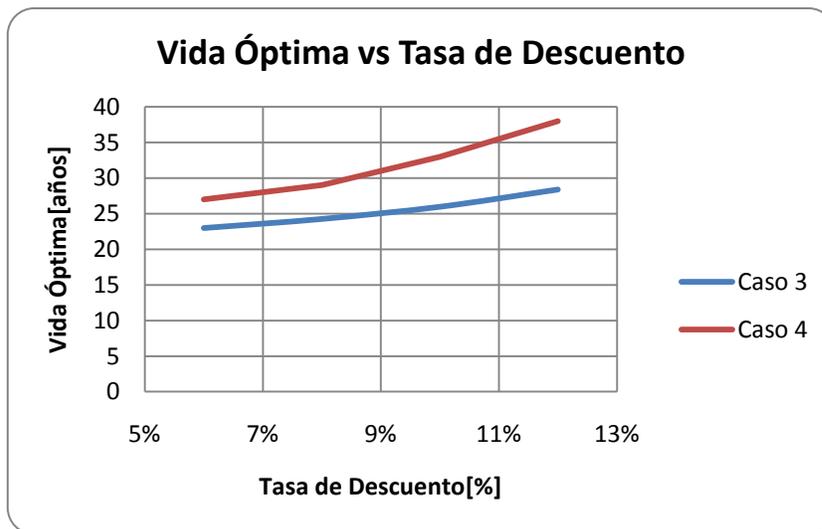


Gráfico 12: Vida Óptima Vs Tasa de Descuento

Por último la tasa de impuestos, se muestra en el siguiente gráfico, se aprecia un aumento suave, casi invariable de la vida óptima.

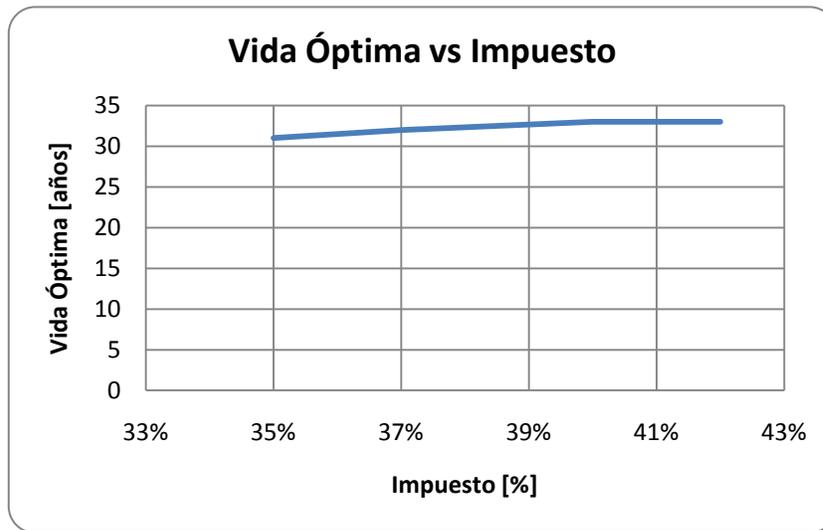


Gráfico 13: Vida Óptima Vs Impuestos

### 2.2.5 Caso 5: Precio Variable, Sin Impuestos, Sin tasa de actualización

En los siguientes casos, se introduce una modificación en el análisis del precio, ya que hasta este momento los análisis se han desarrollado con un precio fijo del cobre, por lo que, para darle una variabilidad en el tiempo, se ha modelado de forma lineal, como se muestra a continuación:

$$P_{Cu} = P_0 + a \cdot t_i$$

La pendiente ( $a$ ) es el incremento o decrecimiento del precio en un período ( $t_i$ ) y  $P_0$  corresponde a un precio fijo dado.

Con esto la expresión de partida queda de la siguiente manera:

$$VAN = -i \cdot T + \sum_{i=1}^n (T \cdot k \cdot (P_0 + a \cdot i) - Rc - Tc_v)$$

La ecuación para encontrar el óptimo se muestra a continuación:

$$\frac{\partial VAN}{\partial n} = \frac{i \cdot R}{n^2} + \frac{R \cdot k \cdot a}{2} - R \cdot c = 0$$

Con la expresión anterior se encuentra la solución para la vida óptima.

$$n = \sqrt{\frac{2 \cdot i}{2c - k \cdot a}}$$

Como vemos la fórmula es independiente de las reservas y también del precio dado del cobre.

Es importante destacar, que el resultado obtenido es una generalización del caso 1, puesto que si en este caso se da un valor igual a cero a la pendiente del precio del cobre ( $a$ ), se vuelve al caso en que el precio del cobre es fijo, que corresponde al caso 1

Los parámetros influyentes siguen siendo el factor de inversión y el factor de costos fijos, además se suman la constante ( $k$ ) y la pendiente del precio que no varían durante el análisis.

Para este análisis, las constante ( $k$ ) y ( $a$ ) permanecerán fijas y no se les realizará mayor análisis, respecto a la pendiente ( $a$ ), es necesario mencionar que los casos estudiados es considerando un precio en disminución, es decir, con la pendiente negativa de valor  $-0,01$ ; y para un precio en aumento con pendiente positiva de valor  $0,01$

El estudio de cada uno de estos parámetros se realiza a continuación.

En primer lugar la inversión, al igual que los casos anteriores su tendencia es idéntica a los casos anteriores. Y si se compara los casos no actualizados (casos 1, 2 y 5) y actualizados (casos 3 y 4) se nota una mayor pendiente en sus curvas en éstos últimos.

Además, como ya se mencionó, el caso 1 es un caso particular del caso 5 cuando la pendiente es igual a cero provocando que el precio sea fijo. Por lo que modificar la pendiente, ya sea positiva o negativamente, tiene sólo un cambio en el desplazamiento de la curva del caso 5 pero el comportamiento de ésta sigue siendo el mismo.

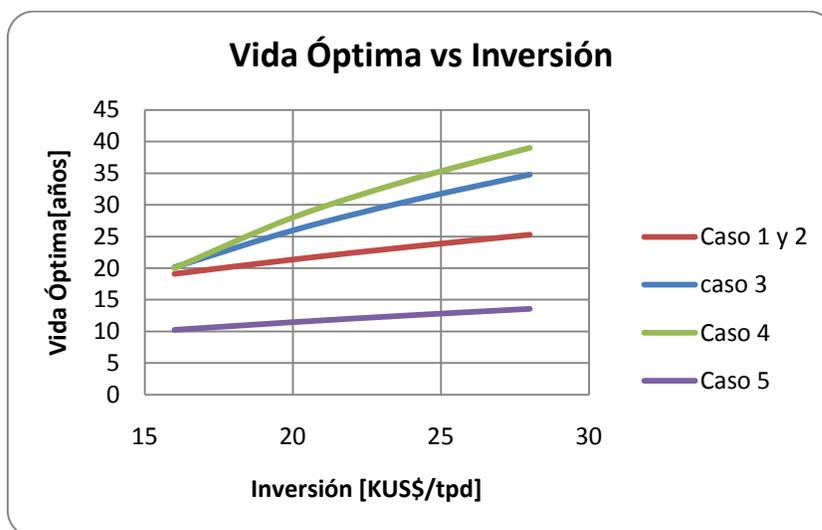


Gráfico 14: Vida Óptima Vs Inversión

En el siguiente grafico se compara el caso 5 para distintas pendientes del precio del cobre. Notándose, la diferencia entre los rangos en que se mueve la vida óptima siendo menor para el caso en que el precio disminuye, y rangos mayores cuando el precio crece.

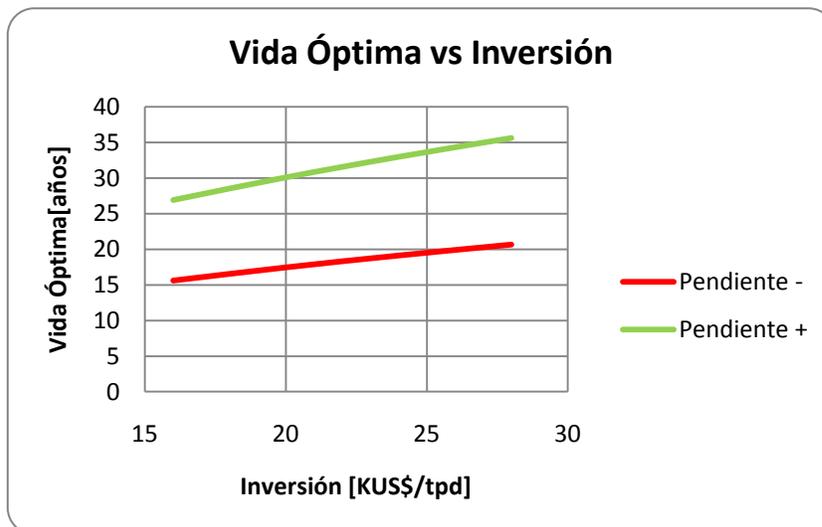


Gráfico 15: Vida Óptima Vs Inversión, Pendiente

Se muestra a continuación el análisis del factor de costos fijos, en este caso la curva el comportamiento es igual a los casos anteriores. La tendencia de las curvas es la misma, ya sea en casos actualizados y no actualizados.

También, al igual que para la inversión, este caso 5 es un caso particular del caso 1, en que la pendiente del precio del cobre se hace cero.

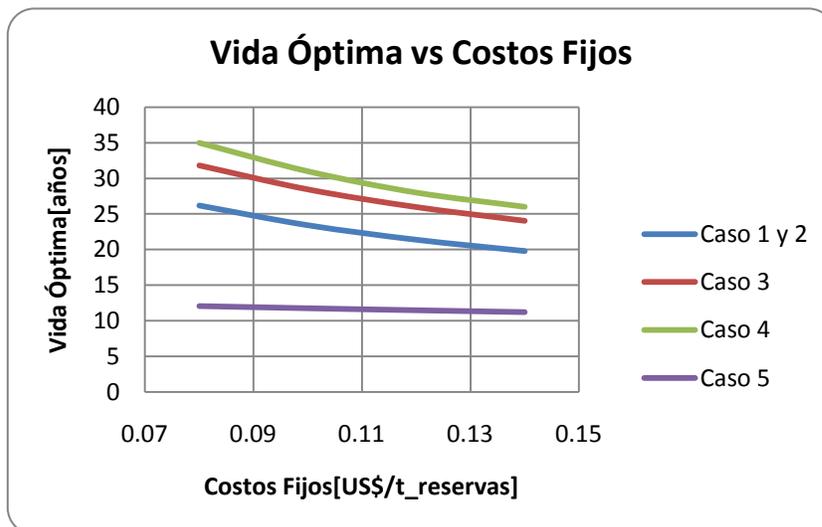


Gráfico 16: Vida Óptima Vs Costos Fijos

En el siguiente grafico se observan las diferencias para el caso 5, cuando la pendiente del precio del cobre es positiva o negativa. Notándose, una gran diferencia en los rangos de la vida óptima económica, siendo entre 25 – 50 años para precios crecientes y sólo entre 15 – 20 para precios decrecientes.

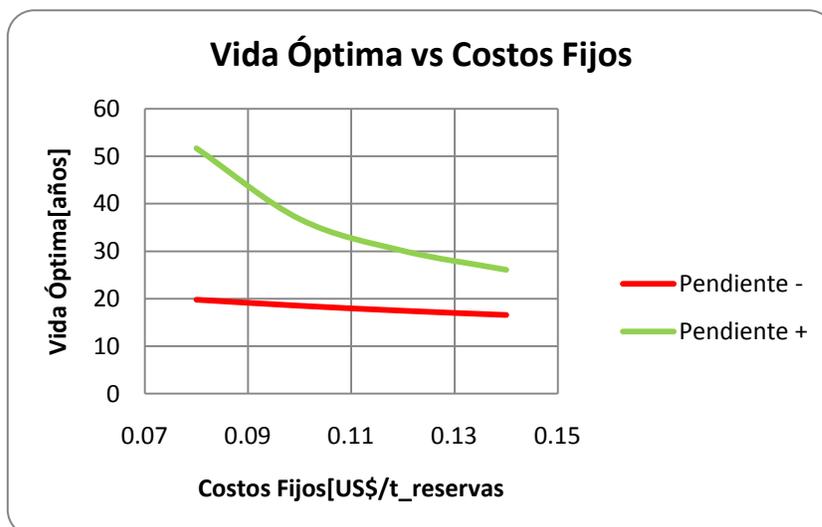


Gráfico 17: Pendientes Precio Cu, Costos Fijos

### 2.2.6 Caso 6: Precio Variable, Con Impuestos, Sin tasa de actualización

El caso 6, introduce el análisis del impuesto en el estudio. La expresión para el VAN queda como sigue:

$$VAN = -i \cdot T + \sum_{j=1}^n (T \cdot k \cdot P_{cu} - R \cdot c - T \cdot c_v) - (T \cdot k \cdot P_{cu} - R \cdot c - T \cdot c_v - \frac{i \cdot T}{n}) \cdot f$$

La derivada de la expresión anterior es la siguiente:

$$\frac{\partial VAN}{\partial n} = \frac{i \cdot R}{n^2} \cdot (1 - f) + \frac{R \cdot k \cdot a \cdot (1 - f)}{2} - R \cdot c \cdot (1 - f) = 0$$

La fórmula que se obtiene para la expresión de vida óptima es la que se muestra a continuación:

$$n = \sqrt{\frac{2 \cdot i}{2c - k \cdot a}}$$

La expresión obtenida es exactamente igual a la conseguida en el caso anterior, en que no se considera el impuesto en el análisis.

Entonces, se puede decir que el impuesto no es de relevancia en la obtención de la vida óptima cuando no hay tasa de actualización.

Los análisis en cuanto a las variables son exactamente los mismos hechos para el caso 5.

### 2.2.7 Caso 7: Precio Variable, Sin Impuestos, Con tasa de actualización

En este caso además de la variación del precio del cobre, se suma la tasa de actualización para su impacto en la vida óptima. La expresión para el VAN se muestra a continuación.

$$VAN = -i \cdot T + T \cdot k \cdot \sum_{i=1}^n \frac{P_0 + a \cdot i}{(1+r)^i} - (R \cdot c + T \cdot c_v) \cdot \sum_{i=1}^n \frac{1}{(1+r)^i}$$

En este caso además de la complicación de la forma del factor de actualización se suma otro término difícil de analizar, el cual se aproximó de la manera que sigue (en detalle en anexos):

$$\left[ \frac{(1+r) - (1+r)^{-n} \cdot (nr + r + 1)}{r^2} \right] \approx (16,6r + 2,0) \cdot n - 75r + 1,4$$

Con esto se llega a la expresión siguiente:

$$\frac{\partial VAN}{\partial n} = \frac{i \cdot R}{n^2} - \frac{R \cdot k \cdot a}{n^2} \cdot [1,4 - 75r] - R \cdot c \cdot (0,7 - 3,6r) - \frac{6,5r + 1,6}{n^2} \cdot [R \cdot k \cdot P_0 - R \cdot c_v]$$

Con lo cual se obtiene que la vida óptima es:

$$n = \sqrt{\frac{10i - (k \cdot P_0 - c_v) \cdot (65r + 16) - a \cdot k \cdot (14 - 750r)}{c \cdot (7 - 36r)}}$$

En la fórmula, no se observa claramente el efecto que tienen en la vida óptima las variables que influyen. Para ver su impacto se realiza el estudio gráfico.

Antes de iniciar el estudio de cada variable involucrada se analizará el impacto que tiene la pendiente del precio del cobre en cada parámetro, para esto se observan los gráficos que siguen:

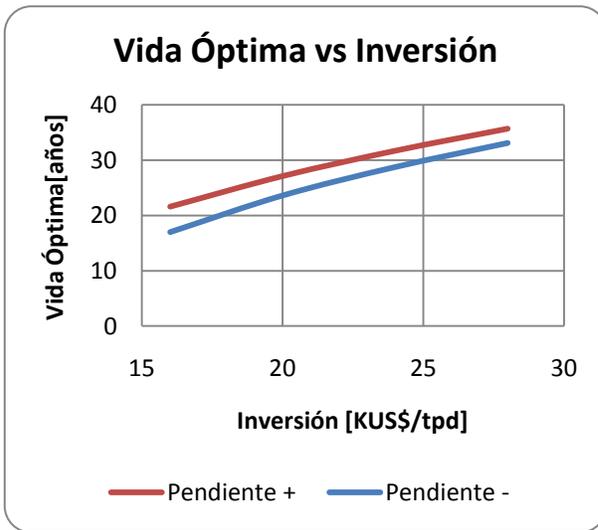


Gráfico 18: Pendientes Precio Cu, Inversión

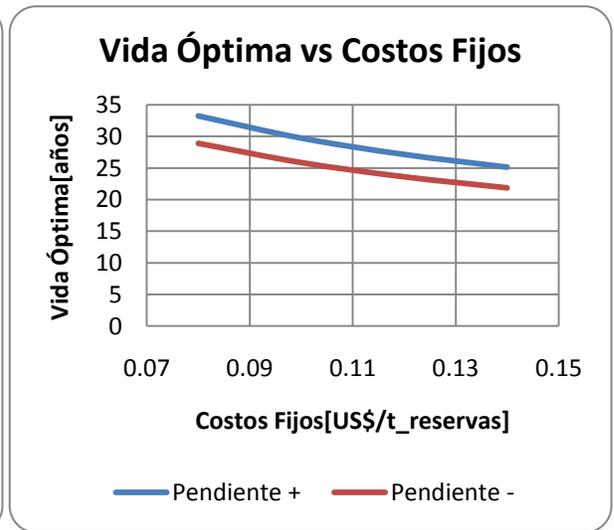


Gráfico 19: Pendientes Precio Cu, Costos Fijos

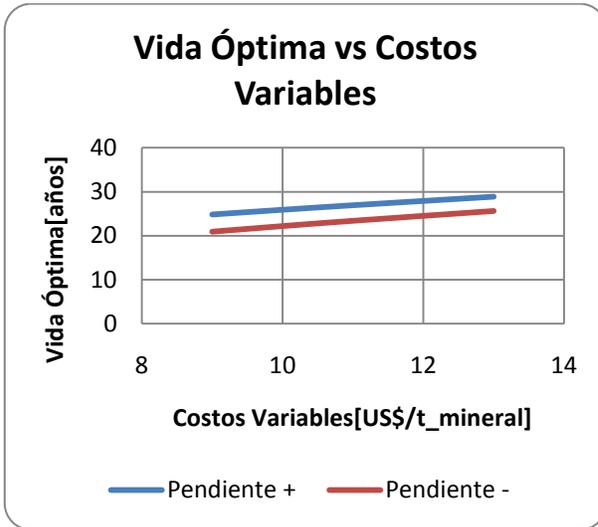


Gráfico 20: Pendientes Precio Cu, Costos Variables

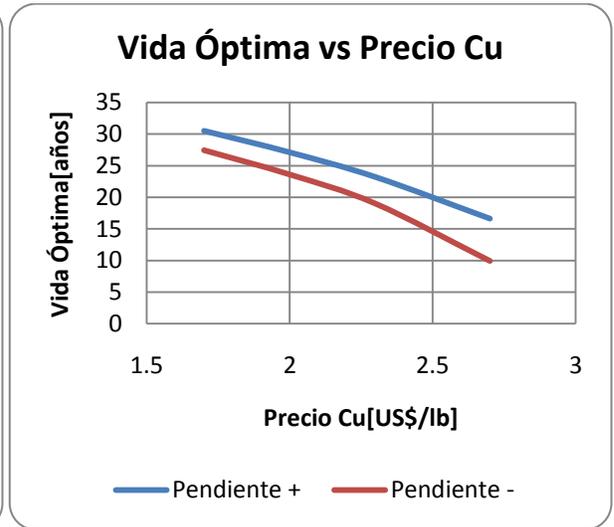


Gráfico 21: Pendientes Precio Cu, Precio Cu

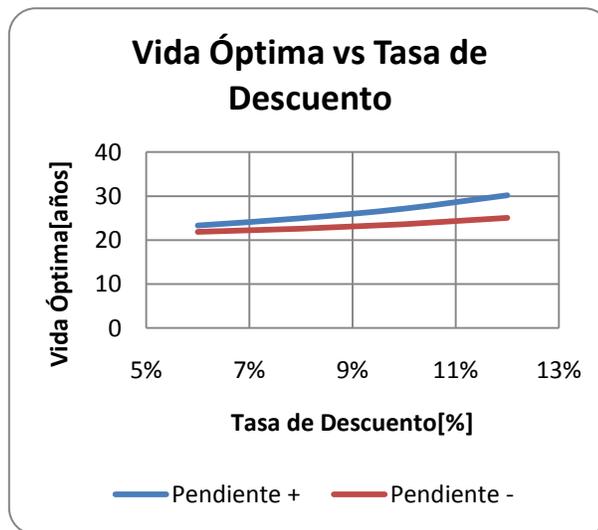


Gráfico 22: Pendientes Precio Cu, Tasa de descuento

Como vemos, la variación de los rangos de vida óptima es menor en este caso, donde existe tasa de actualización, frente a cambios de signo de la pendiente del precio. Sin embargo, sin embargo sigue existiendo el desplazamiento de la vida óptima a rangos mayores cuando el precio es creciente

Ahora se detalla el estudio para cada variable, tomando como base la pendiente negativa.

Para la inversión el comportamiento es el mismo que los casos anteriores, y presenta mayor similitud con los casos en que existe tasa de actualización.

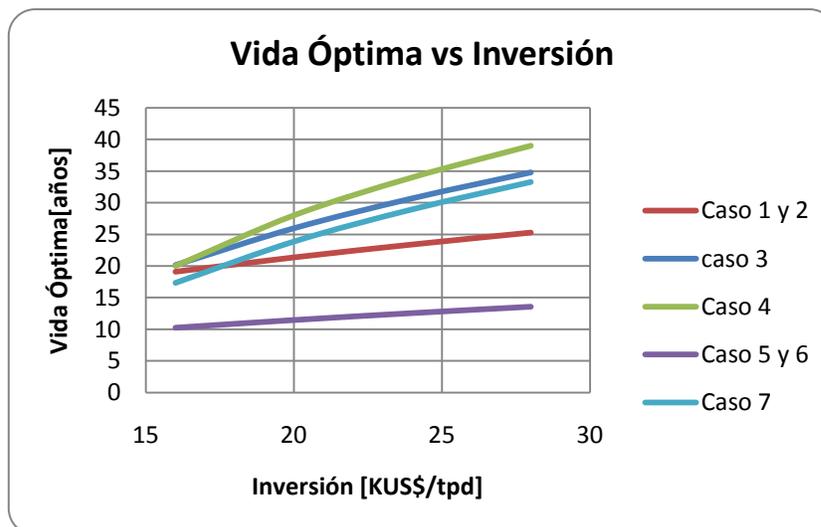


Gráfico 23: Vida Óptima Vs Inversión

En el caso de los costos fijos, la tendencia es idéntica a las anteriores, teniendo variaciones de las curvas sólo en magnitudes.

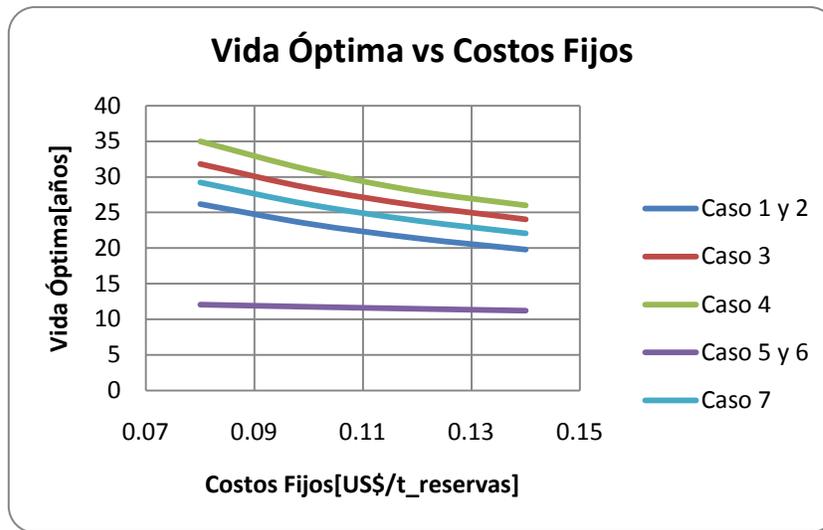


Gráfico 24: Vida Óptima Vs Costos Fijos

Los costos variables se comportan de la misma manera que los anteriores, diferenciándose en sus magnitudes obtenidas para las vidas óptimas.

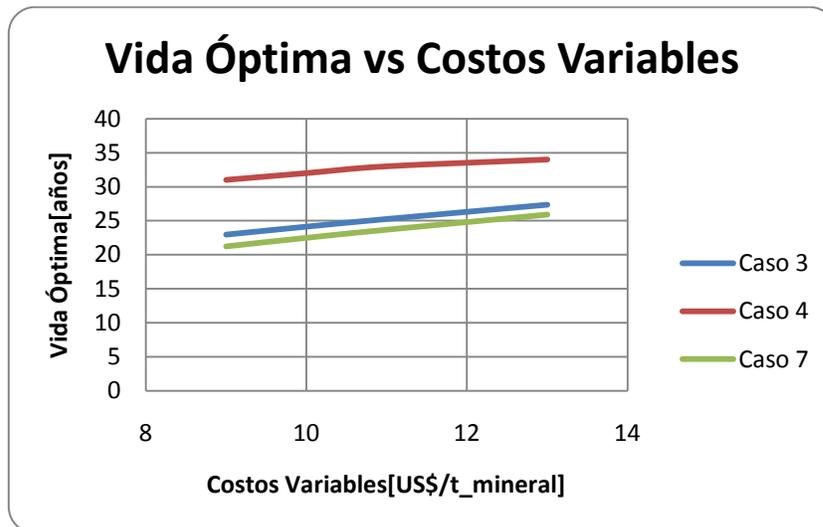


Gráfico 25: Vida Óptima Vs Costos Variables

Para el precio del cobre la tendencia sigue siendo idéntica a los casos anteriores, lo que da consistencia al análisis. Además, nuevamente se observa la leve convergencia para precios de cobre pequeños.

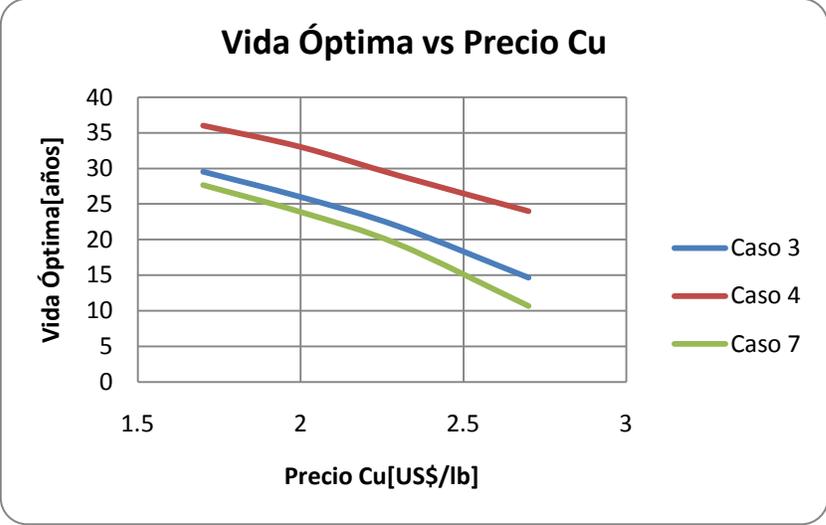


Gráfico 26: Vida Óptima Vs Precio

Por último, al igual que los casos anteriores la tasa de descuento impacta aumentando la vida óptima a medida que esta variable crece.

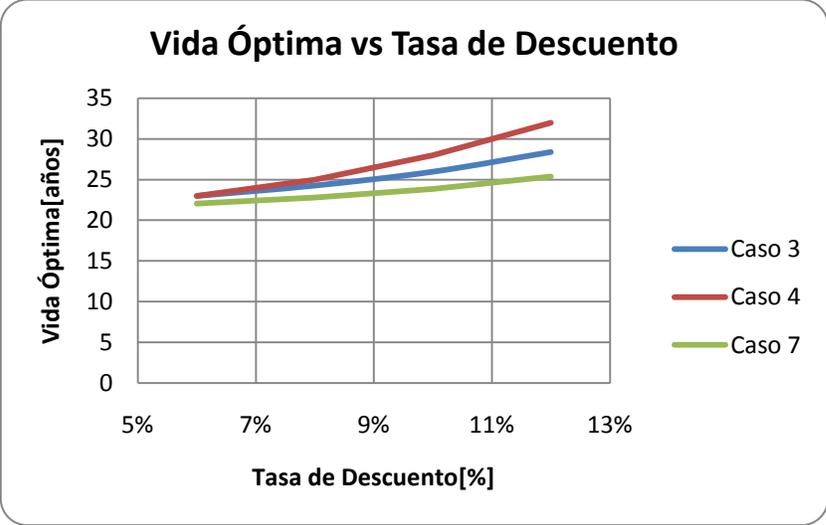


Gráfico 27: Vida Óptima Vs Tasa de Descuento

### 2.2.8 Caso 8: Precio Variable, Con Impuestos, Con tasa de actualización

Este es el último caso que se estudiara en esta memoria. Es también el caso que involucra el mayor número de variables que afectan la vida óptima. La expresión para el VAN queda de la siguiente manera:

$$VAN = -i \cdot T + \sum_{j=1}^n \frac{(T \cdot k \cdot P_{cu} - R \cdot c - T \cdot c_v) - (T \cdot k \cdot P_{cu} - R \cdot c - T \cdot c_v - \frac{i \cdot T}{n}) \cdot f}{(1+r)^j}$$

Y la derivada de esta expresión se muestra a continuación:

$$\begin{aligned} \frac{\partial VAN}{\partial n} = & -c \cdot (1-f) \cdot (0,7 - 3,6r) \cdot n^3 \\ & + \{i - k \cdot a \cdot (1-f) \cdot [-75r + 1,4] - i \cdot f \cdot (0,7 - 3,6r) + (c_v - k \cdot P_0) \cdot (1-f) \\ & \cdot (6,5r + 1,6)\} \cdot n - 2 \cdot i \cdot f \cdot (6,5r + 1,6) = 0 \end{aligned}$$

La complejidad para resolver y obtener una expresión simple de analizar se hace muy difícil, por lo que al igual que en el caso 4, sólo se logra llegar hasta este punto y hacer el estudio sin una expresión definida para la vida óptima.

El comportamiento que tiene la inversión con respecto a la vida óptima es concordante a los casos anteriores, observándose una mayor similitud con el caso 4, en que la diferencia entre ambos es la variabilidad del precio del cobre.

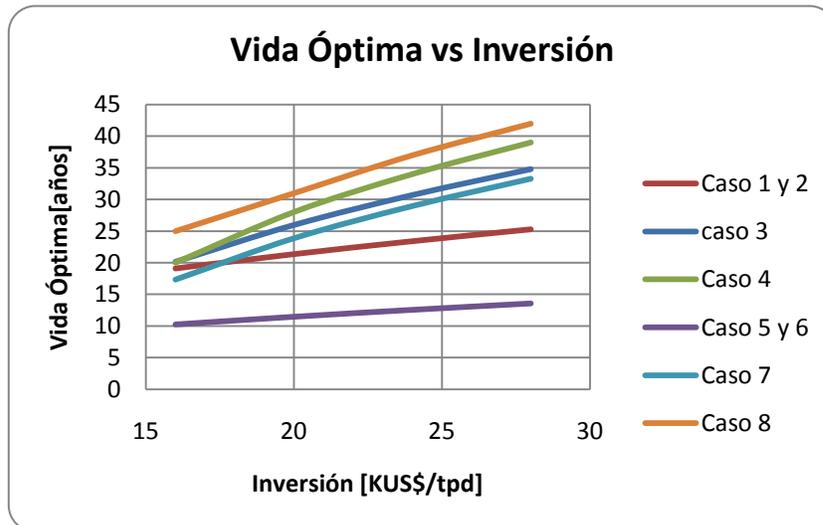


Gráfico 28: Vida Óptima Vs Inversión

Para el caso de los costos fijos, la tendencia de la vida óptima sigue siendo decreciente a medida que se aumenta éste parámetro. Y más concordante con el caso 4.

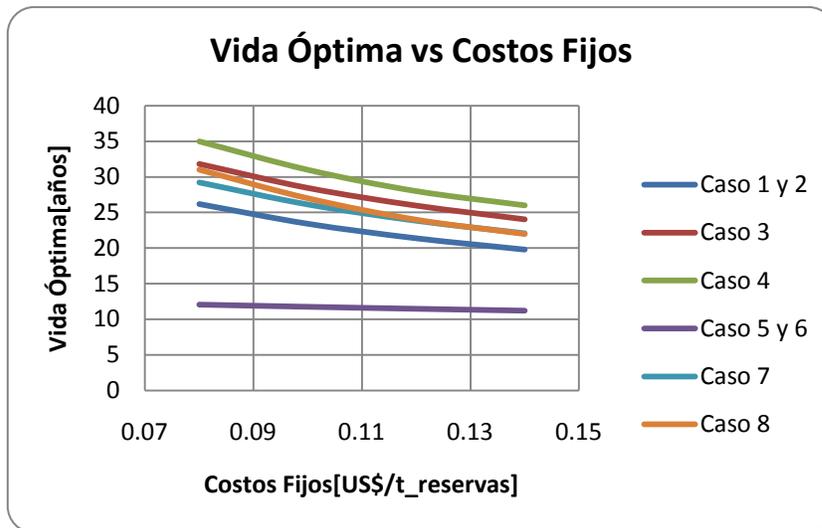


Gráfico 29: Vida Óptima Vs Costos Fijos

Los costos variables solo tienen impacto cuando está la tasa de actualización, y su comportamiento ha sido el mismo para todos los casos, manteniéndose la pendiente inclusive.

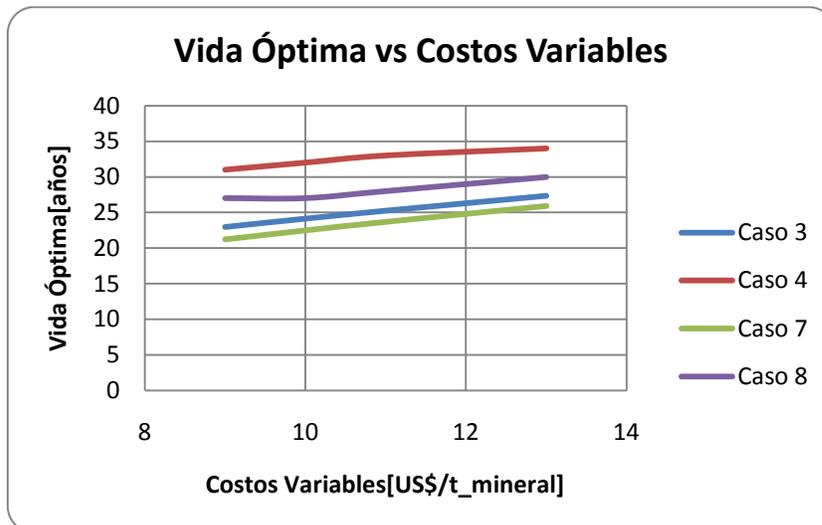


Gráfico 30: Vida Óptima Vs Costos Variables

Para el precio del cobre la tendencia se mantiene, teniendo una mayor semejanza entre los casos 3 y 7, que son donde no existe impuesto, y entre los casos 4 y 8 donde si existe impuesto.

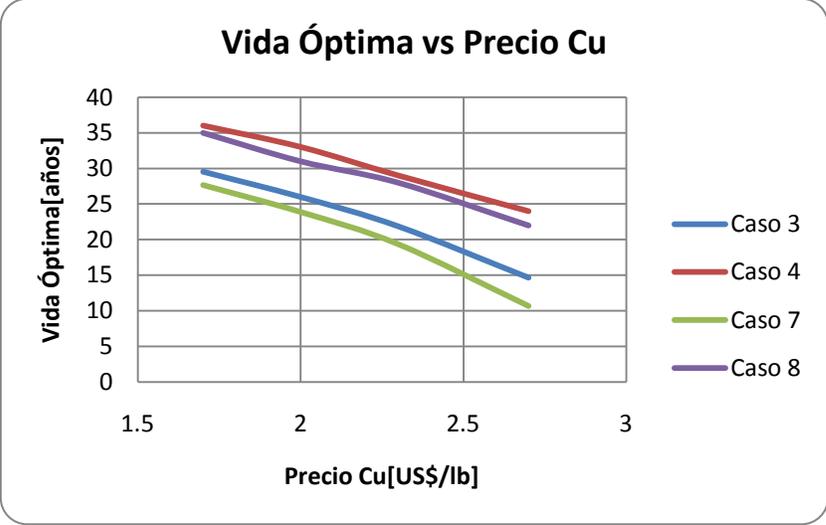


Gráfico 31: Vida Óptima Vs Precio

Para la tasa de descuento, en los casos analizados la tendencia es similar, aumentando la vida óptima a medida que la tasa crece. La convergencia cuando la tasa tiende a cero se sigue notando en todos los casos.

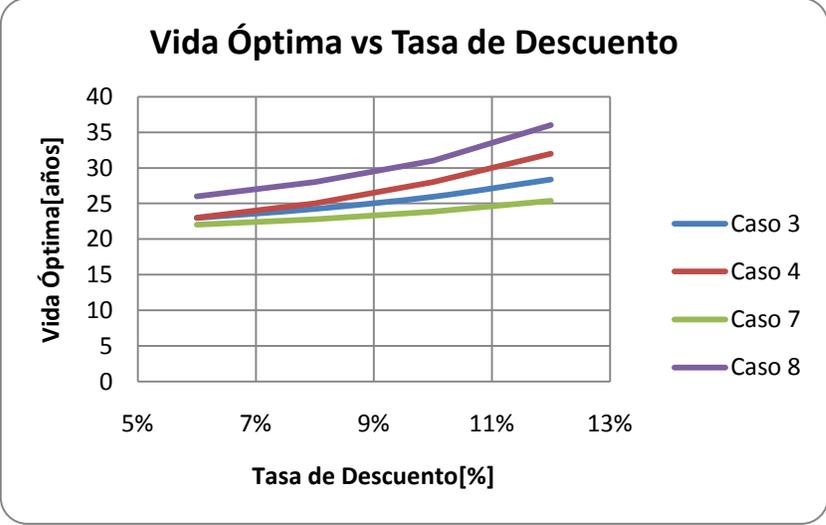


Gráfico 32: Vida Óptima Vs Tasa de Descuento

El aumento del porcentaje de impuestos, tiene un efecto creciente sobre la vida óptima. El impacto no es tan significativo ya que la pendiente de aumento no es alta.

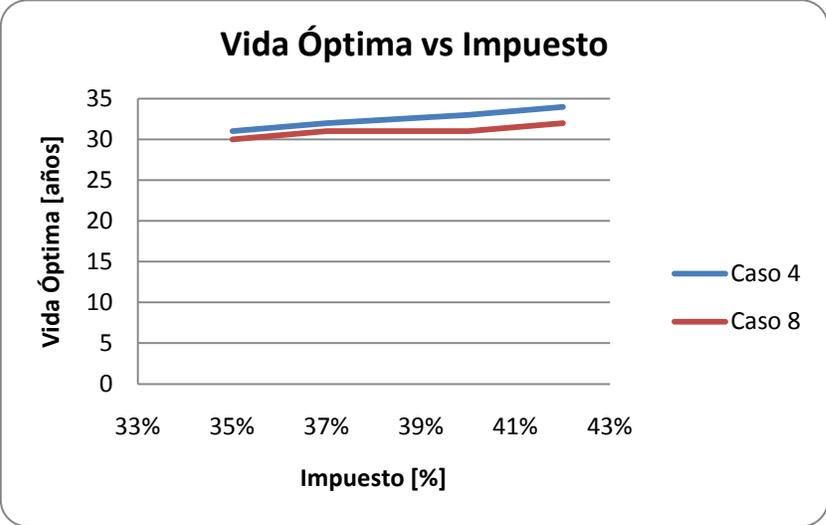


Gráfico 33: Vida Óptima Vs Impuestos

## 2.2.9 Resultados generales de los casos.

Se observa muy claramente que la vida óptima económica no depende del tamaño de las reservas del yacimiento, ya que en los resultados obtenidos no se observó la aparición de este parámetro. Esto tiene una gran ventaja, ya que hace que el análisis pueda ser reproducido para cualquier tamaño de reservas.

Las variables que aparecen en todos los casos, independiente haya o no actualización son el factor de inversión y el de costos fijos.

En los casos analizados, se tienen los siguientes resultados para cada una de las variables.

### 1. Inversión:

- La vida óptima aumenta a medida que la inversión crece.
- Las pendientes son mayores en los casos en que existe tasa de descuento.
- La vida óptima es mayor, en magnitud, en los casos que existe impuesto
- La explicación al aumento de la vida óptima con el aumento de la inversión puede deberse a que inversiones grandes necesitan vidas prolongadas para recuperar lo invertido, e inversiones pequeñas se recuperan en vidas más cortas.

### 2. Costos Fijos

- La vida óptima disminuye según aumentan los costos fijos.
- La diferencia principal entre los casos es la magnitud de las curvas, las cuales se incrementan a medida que se incorporan variables las variables en el análisis.
- Se aprecia que la vida óptima tiende a disminuir a medida que el factor de costos fijos aumenta, lo que es coincidente con lo que se esperaría en la realidad, esto debido a que si los costos fijos son altos no es conveniente que la vida del yacimiento sea muy prolongada debido al gasto anual constante, y si los costos fijos son bajos ocurre lo contrario.

### 3. Costos Variables

- Los costos variables sólo impactan en la vida óptima cuando existe tasa de actualización.
- El impacto es aumentar la vida óptima conforme esta variable crece.
- El comportamiento es similar en los 4 casos analizados.
- Este movimiento afín con la vida óptima se explica debido a que al tener un costo por tonelada elevado se esperaría que el tonelaje de explotación sea pequeño para disminuir el costos variable total lo que conlleva a un aumento de la vida óptima, y si el valor del costo variable es bajo los ritmos de explotación se hacen mayores provocando que la vida óptima se reduzca.

#### 4. Precio del Cobre

- Esta variable también aparece sólo cuando la tasa de actualización es distinta de cero.
- El comportamiento de la vida óptima respecto al precio es decreciente a medida que este último aumenta.
- La sensibilidad de estos parámetros es alta, debido a que pequeñas variaciones en el precio, provoca cambios grandes en la vida óptima
- La razón por la que la vida óptima decrece a medida que esta variable aumenta se puede explicar por lo siguiente, si tenemos un precio de cobre alto, el valor de la tonelada será alto, por lo que convendría extraer grandes cantidades de mineral anual lo que conllevaría a reducir los años de explotación, con esto se aumenta el valor de los flujos anuales afectados por la tasa de descuento, teniendo un mayor valor los primeros años.

#### 5. Pendiente del Precio

- La variación del precio del cobre se introduce en los casos: 5, 6, 7 y 8.
- En los casos en que no existe tasa de actualización (5 y 6) una pendiente negativa provoca que el rango en que se mueve la vida óptima sea entre 15 – 25 años. Cuando la pendiente es positiva, es decir, un precio creciente el rango es mayor, y se mueve entre 25 – 40 aproximadamente.
- Cuando está presente la tasa de actualización las diferencias de los rangos de vida óptima son pequeños. Esto ocurre principalmente por el factor de actualización.
- En los casos 7 y 8, con tasa de actualización, la diferencia entre los rangos, en que se mueve la vida óptima, son alrededor de 4 años mayor para precios crecientes

#### 6. Tasa de Descuento

- La vida óptima aumenta conforme aumenta la tasa de descuento.
- Se observa que hay una convergencia hacia una determinada vida óptima cuando la tasa tiende a cero
- Es necesario hacer una observación importante sobre la pendiente que tiene la vida óptima respecto a esta variable, debido a las aproximaciones hechas para el factor de actualización, puede que no sea realmente el comportamiento.

#### 7. Impuesto

- La vida óptima tiende a aumentar a medida que la variable crece, sin embargo la tasa de aumento no es tan grande, es decir, no es muy sensible a los impuestos.
- La diferencia cuando el precio es fijo y variable no es tan grande.

### **3. Parte Práctica.**

En este capítulo del trabajo se analizará una faena real de mina a cielo abierto, de la cual se cuenta con la información costos e inversiones de los procesos.

#### **3.1 Descripción Faena**

La faena a estudiar se encuentra ubicada en el distrito de Sierra Gorda. Corresponde a un yacimiento de cobre sulfurado como mineral principal y oro como subproducto. Será explotado mediante cielo abierto, a un ritmo de 98.000 tpd durante 18 años y el primer año es de Ramp-up, el cual se extrae en promedio a 12.000 tpd.

A continuación se muestra las características de las operaciones:

1. Mina:

Consiste en un chancador primario, transporte y Stockpile.

2. Planta:

Consiste en los siguientes procesos:

- Molienda:
  - 1 Molino SAG, Es necesario mencionar que el molino SAG usado, es el de mayor capacidad en el mercado actual.
  - 2 Molino de bolas con chancador de pebbles
- Flotación y espesamiento de concentrados
- Depósitos de relaves de alta densidad

### 3.2 Presentación de los Datos.

Se mostrará los datos que serán de utilidad para realizar el análisis.

Producción de la mina.

Tabla 2: Datos de Producción

Movimiento mina	kton	2.270.115
Mineral tratado	kton	645.536
REM		3,5
Ley de cobre	%	0,53
Ley de oro	g/t	0,21
Ley de molibdeno	%	0,01
Recuperaciones		
Recuperación de cobre	%	89,2%
Recuperación de oro	%	77,1%
Concentrado producido	ton	11.074.843
Leyes de concentrado		
Ley Cu en concentrado	%	27%
Ley Au en concentrado	g/t	8,7
Ley de concentrado Mo	%	50%

Los costos que tiene esta faena se muestran en la tabla siguiente.

Tabla 3: Costos Variables

		Costo Variable	Costo fijo
Mina y ChC	kUS\$/año	2.140.769	354.553
	US\$/ton	0,94	
Planta	kUS\$	2.795.643	330.419
	US\$/ton_min	4,33	
Puerto	kUS\$	48.292	94.504
	US\$/ton_conc	4,36	
TC (Promedio)	US\$/ton	95	
RC (Promedio)	¢/lb	9,5	

Y los gastos fijos corresponden a los siguientes ítems:

Tabla 4: Costos Fijos Administrativos y Gerencia

Planificación y Desarrollo	KUS\$	120.508
Gerencia y Administración	KUS\$	605.259

Los ingresos que se tienen en esta faena provienen tanto del cobre como de los subproductos que posee.

Tabla 5: Tonelaje de productos que generan ingresos

Cu fino producido	tCuf	3.043.056
Cobre fino pagable	tCuf	2.931.428
Subproductos (pagable)		
Oro	kozt	2.969
Molibdeno	Klb	56.761
Plata	kozt	17.577
Cobre equivalente	tCuf	634.804
Total cobre fino equivalente	tCuf	3.677.861

El precio con que se hace el estudio se muestra en la siguiente tabla:

Tabla 6: Perfil de precios de Cu

Periodo	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11	12	13	14	15	16	17	18	19
Precio [US\$/lb]	2,4	2,5	2,6	2,7	2,5	2,2	1,9	1,7	1,7	1,7	1,7	1,7	1,7	1,7	1,7	1,7	1,7	1,7	1,7

Por lo que, el precio promedio es de 1,95 US\$/lb el cual será el usado para estudiar los casos en que el precio se mantiene fijo.

Y para los casos en que el precio varía linealmente se usa la expresión siguiente:

$$\text{Precio Cobre} = P_0 + a \cdot t = 2,4 - 0,05 \cdot t$$

Donde:

$$a = \text{pendiente} = -0,05$$

$$t = \text{Periodo}$$

Notar que la pendiente es negativa, lo que inducirá a obtener vidas óptimas menores que las obtenidas para precios crecientes, como se observó en el capítulo anterior.

Las inversiones necesarias para la explotación se detallan en la siguiente tabla.

Tabla 7: Inversiones

General	kUS\$	17.869
Mina	kUS\$	25.358
Chancado	kUS\$	70.449
Planta concentradora	kUS\$	265.485
Relaves	kUS\$	75.737
Concentraducto	kUS\$	53.288
Planta de filtro y embarque de concentrado	kUS\$	88.208
Sistema de impulsión de agua	kUS\$	227.242
Infraestructura y servicios	kUS\$	88.306
Costos Indirectos	kUS\$	257.278
Infraestructura adm. Owner (línea eléctrica)	kUS\$	93.928
Owner cost (equipo de proyecto e insumos)	kUS\$	67.589
Prestripping + P&D	kUS\$	183.396
Eq.Mina	kUS\$	245.308
Formación compañía e indirectos del dueño	kUS\$	161.519
Subtotal sin contingencias	kUS\$	1.920.961
Contingencias	kUS\$	108.000
<b>TOTAL</b>	<b>kUS\$</b>	<b>2.028.961</b>

### 3.3 Parámetros para Expresión Vida Óptima

Ahora con los datos del acápite anterior, se procede a calcular los términos necesarios para realizar la estimación de la vida óptima con las expresiones obtenidas en el capítulo 2.

#### 3.3.1 Factor Costos Fijos.

Con la tabla de los costos, se deduce que los Costos Fijos correspondiente a Mina y Chancado, Planta y Puerto, tienen un valor de kUS\$ 779.476 por año y a esto se le suma los gastos fijos de: Planificación y Desarrollo, Gerencia y Administración que ascienden a kUS\$ 725.767. Lo que en total da un monto de kUS\$ 1.505.243 durante los 18 años que dura la explotación del proyecto. Por lo que el monto anual es de kUS\$ 83.625

También, se conoce que las reservas de mineral del yacimiento son de 645.536 kton, con estos datos se puede obtener el factor de costos fijos.

$$Factor\ de\ Costos\ Fijos = \frac{Costos\ Fijos}{Reservas} = \frac{83.625 [KUS\$]}{645.536 [kton]} = 0,13\ US\$/ton$$

Este factor corresponde al valor anual.

### 3.3.2 Factor de Inversión.

Para este factor se utiliza la tabla de inversiones, la que nos indica que la inversión total corresponde a un total de kUS\$ 2.028.961 para toda la explotación del proyecto.

Y la producción se da como input en la descripción de la faena y corresponde a 98.000 tpd.

$$\text{Factor de Inversión} = \frac{\text{Inversión}}{\text{Producción}} = \frac{2.028.961 \text{ [KUS$]}}{98[\text{kton}]} = 20.704 \text{ US\$/ton}$$

Este valor corresponde para un tonelaje diario, por lo que cuando se utiliza en el análisis se debe pasar al valor anual, correspondiente a 57,2 US\$/ton

### 3.3.3 Valor de la Tonelada

El valor de la tonelada está sujeto al precio, a la recuperación y a la ley de cobre.

Para el caso de la ley, como existen otros minerales que suman valor al yacimiento y el análisis se hace sólo para el cobre, se calcula una ley equivalente de cobre de 0,64%, para realizar el estudio, este cálculo se realiza con la tabla de ingresos, donde se indica el cobre fino equivalente.

Esta modificación no resta validez al análisis.

Entonces, el valor de tonelada para este caso, es:

$$\text{Valor Tonelada} = \text{Ley} \cdot \text{Rec} \cdot \text{Precio} = 0,64 \cdot 89,2 \cdot 1,95 \cdot 0,2204 = 24,5 \text{ US\$/ton}$$

### 3.3.4 Costos Variables

Los costos variables, son los que se detallan en la tabla N°3, y para cada operación es el siguiente:

- Mina: 4,23 US\$/ton\_mineral
- Planta: 4,33 US\$/ton\_mineral
- Puerto: 0,09 US\$/ton\_mineral
- TC: 2,01 US\$/ton\_mineral
- RC: 1,2 US\$/ton\_mineral

Con lo que se obtiene un costo total del yacimiento de 11,9 US\$/ton\_mineral

### 3.3.5 Tabla Resumen

Como en los datos reales no se entrega información sobre la tasa de impuestos que se aplica, se tomará como supuesto para los análisis impuestos de un 40%.

Tabla 8: Resumen Parámetros a utilizar

Reservas	645.536.000	[ton]
REM	3,5	
Precio Cu(Casos $P_{Cu}$ Fijo) <sup>4</sup>	1,95	[US\$/lb]
Precio Cu (Casos $P_{Cu}$ Variable) <sup>5</sup>	2,4	[US\$/lb]
Pendiente Precio Cu=a	-0,05	
Ley de Cu Equivalente	0,64%	[%]
Ley de Cu concentrado	27%	
Recuperación Cu	89,2%	[%]
Factor inversión [i]	20.704	[US\$/tpd]
Factor costos fijos	0,13	[US\$/ton]
Costo mina	0,94	[US\$/t_extraida]
Costo planta	4,33	[US\$/tt]
Costo puerto	4,36	[US\$/ton_con]
TC	95	[US\$/ton_con]
RC	9,5	[cUS\$/lb]
Tasa de descuento	8	[%]
Impuestos	40	[%]

<sup>4</sup> Precio Promedio del cobre, ya que para estos casos el precio se mantiene constante.

<sup>5</sup> Precio Inicial del Cobre,  $P_{Cu}=P_0+a*t$ , este precio corresponde a  $P_0$

### **3.4 Validación de los resultados teóricos**

En este capítulo se comparará el comportamiento de las distintas expresiones obtenidas en el capítulo teórico para cada caso analizado.

Para esto, se realizará el cálculo tradicional de flujos de cajas descontados para la obtención del VAN para un abanico de vidas útiles de explotación, de esta forma se determinará el máximo para luego ser comparado con lo obtenido con las fórmulas.

Los datos usados para la generación de ambos resultados son reales y corresponden al proyecto minero descrito anteriormente.

Planteado este escenario se comparará los casos estudiados.

### 3.4.1 Comparación de la fórmula contra los flujos de caja.

En este subcapítulo se realizará la comparación de la vida óptima estimada mediante las fórmulas obtenidas anteriormente versus la calculada mediante los flujos de caja.

Tabla 9: Comparación Fórmula y Flujos de Caja

	Expresión Encontrada	Fórmula	Flujos de Caja
Caso 1	$n = \sqrt{\frac{i}{c}}$	21 años	21 años
Caso 2	$n = \sqrt{\frac{i}{c}}$	21 años	21 años
Caso 3	$n = \sqrt{\frac{(10i - (v - c_v) \cdot (65r + 16))}{c \cdot (7 - 36r)}}$	25 años	14 años
Caso 4	No Hay	33 años	14 años
Caso 5	$n = \sqrt{\frac{2 \cdot i}{2c - k \cdot a}}$	17 años	17 años
Caso 6	$n = \sqrt{\frac{2 \cdot i}{2c - k \cdot a}}$	17 años	17 años
Caso 7	$n = \sqrt{\frac{10i - (k \cdot P_0 - c_v) \cdot (65r + 16) - a \cdot k \cdot (14 - 750r)}{c \cdot (7 - 36r)}}$	19 años	11 años
Caso 8	No Hay	28 años	12 años

Como se aprecia, en los casos que no presentan tasa de actualización (casos 1,2,5,6) la concordancia entre la fórmula y los flujos de caja es total.

En los casos donde existe tasa de descuento (casos 3,4,7,8), hay una diferencia entre las vidas óptimas obtenidas, esta diferencia se debe principalmente a la aproximación hecha para encontrar la solución al problema.

Las diferencias mayores se presentan en los casos donde está presente, además de la tasa de actualización, el impuesto. Estas discrepancias se generan por la aparición de términos cúbicos que hacen que la solución no sea bien resuelta, sino como se explicó en el capítulo anterior.

Si bien las diferencias que existen entre fórmula y el flujo de cajas son considerables en algunos casos, lo importante es la tendencia que tienen estas, como se revisarán en detalle más adelante

### 3.4.2 Reservas

Al analizar la vida óptima en función de las reservas, según la expresión obtenida para este caso, no debiera haber variación en la vida óptima.

Y en el caso de cálculo de flujos de cajas, al evaluar el escenario base a distintos tamaños de reservas, la vida óptima no varía, sino que se obtienen distintos VAN para la misma vida óptima. Aumentando su valor conforme aumentan las reservas.

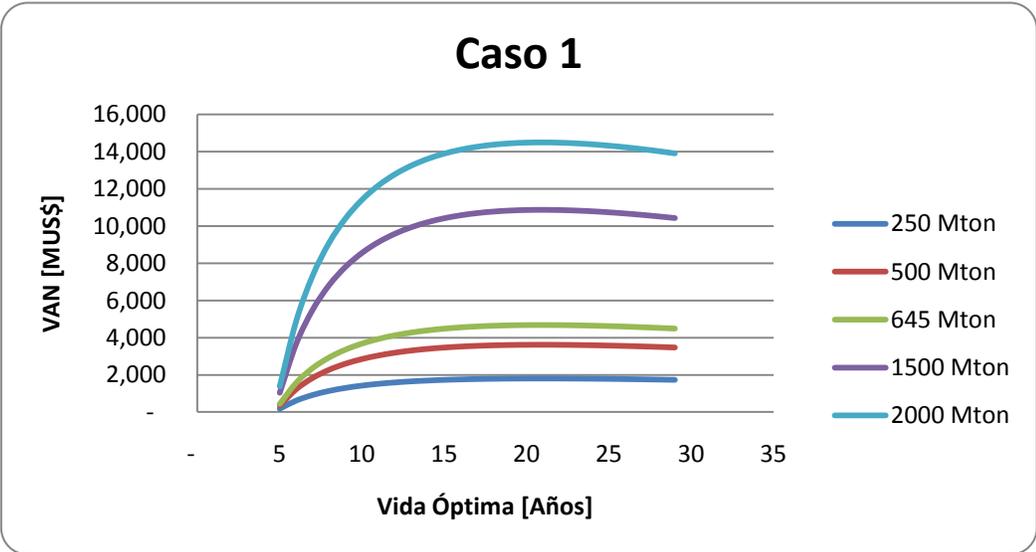


Gráfico 34: VAN según reservas caso 1

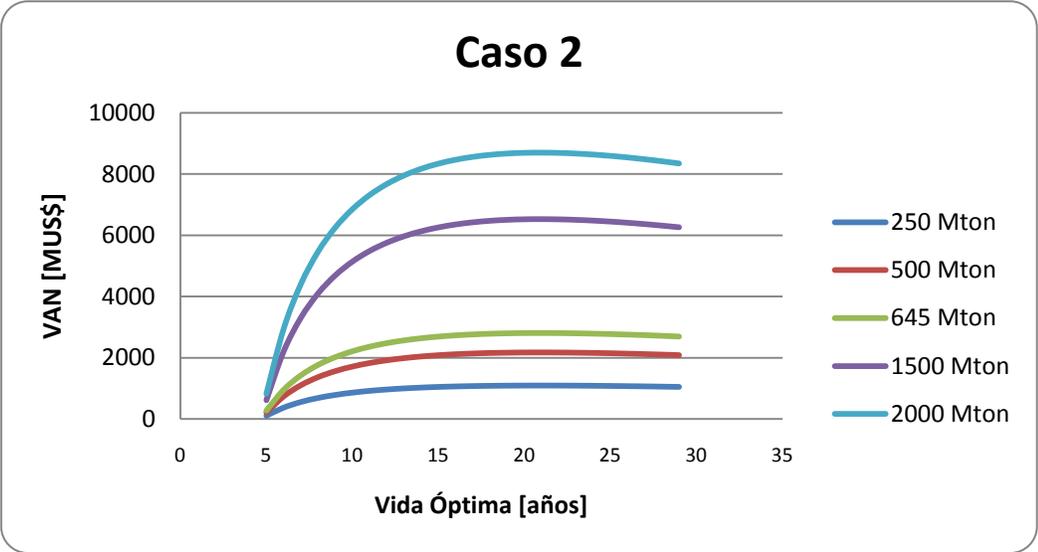


Gráfico 35: VAN según reservas caso 2

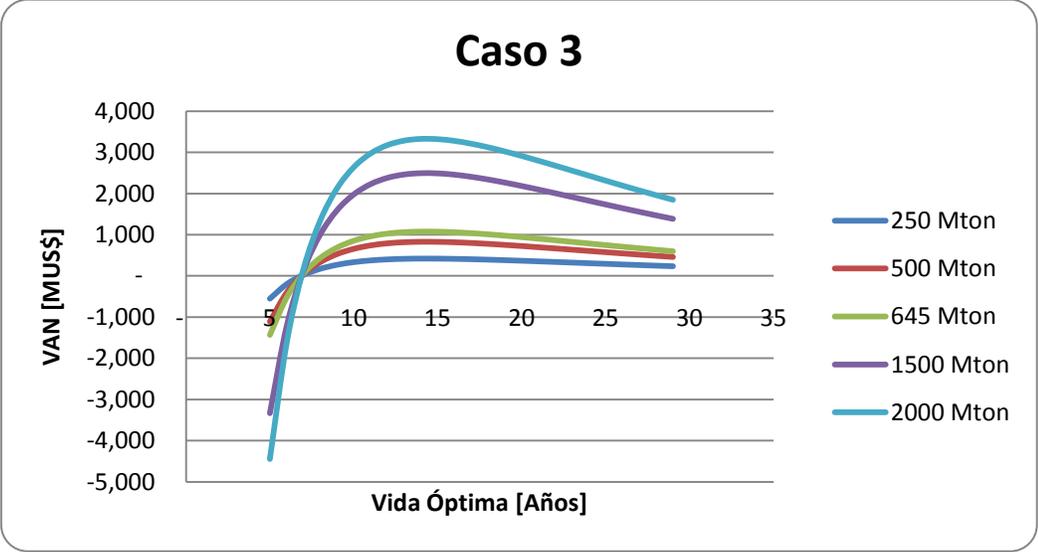


Gráfico 36: VAN según reservas caso 3

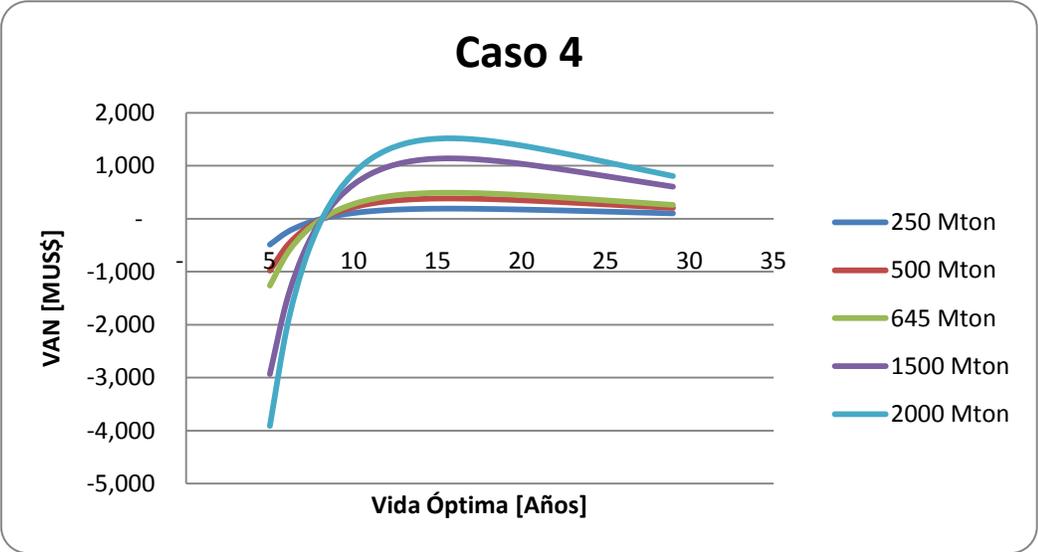


Gráfico 37: VAN según reservas caso 4

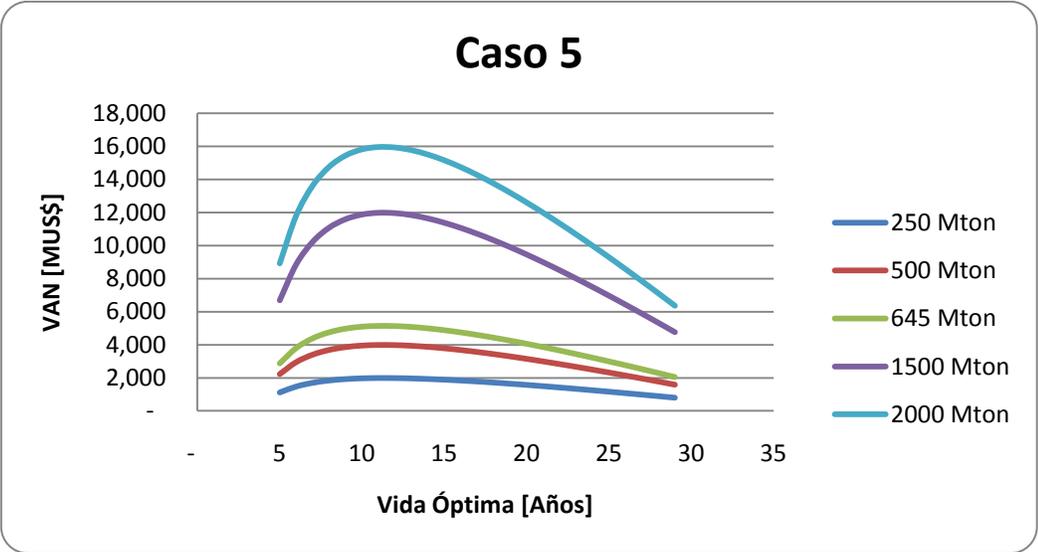


Gráfico 38: VAN según reservas caso 5

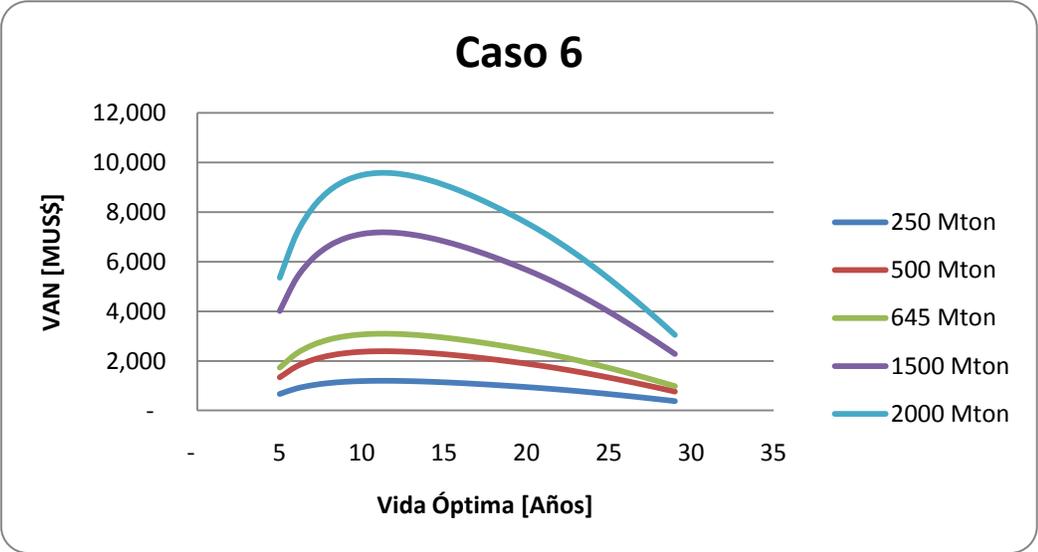


Gráfico 39: VAN según reservas caso 6

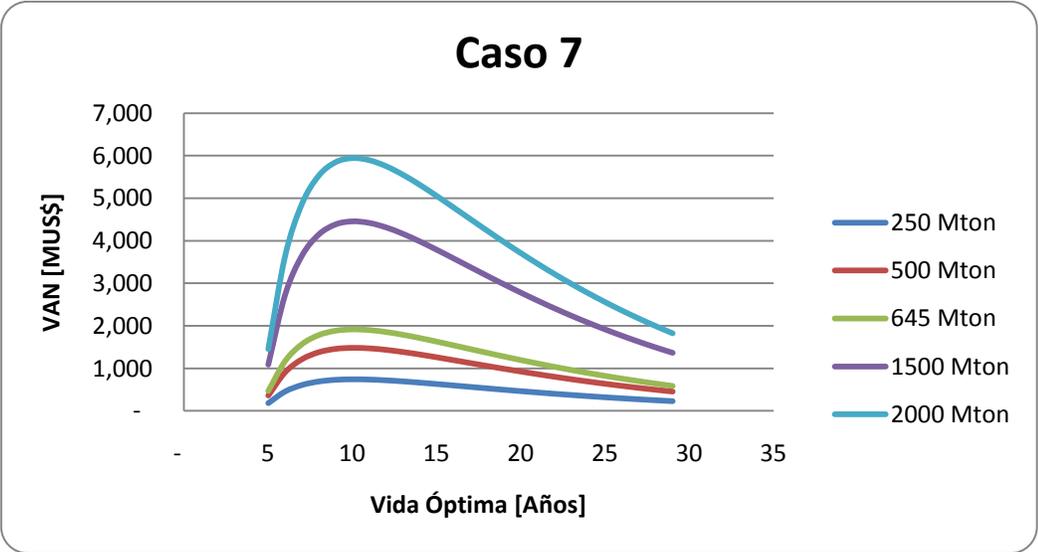


Gráfico 40: VAN según reservas caso 7

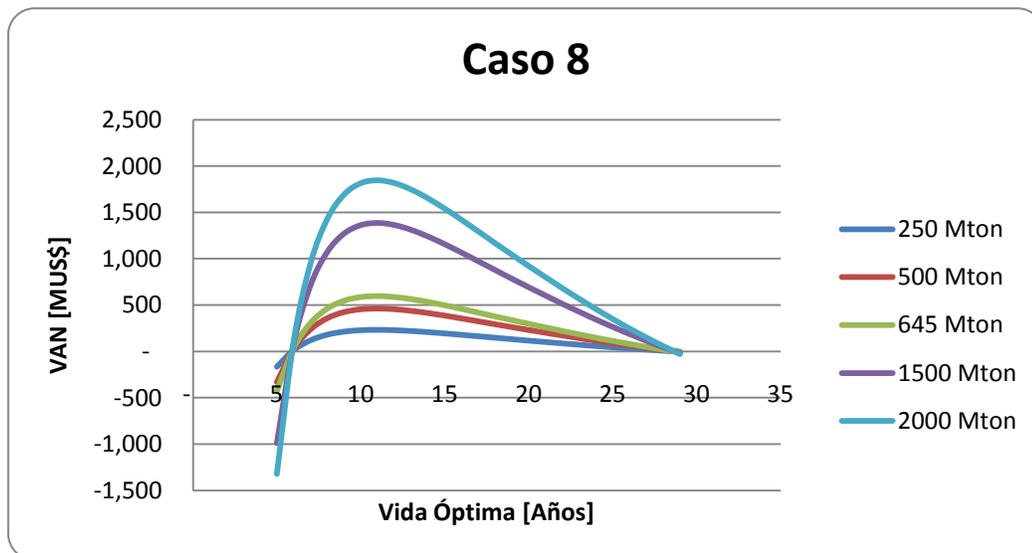


Gráfico 41: VAN según reservas caso 8

En los gráficos anteriores se observa que la decisión de un año específico como vida óptima no es tan rigurosa, ya que elegir un año posterior o anterior no representan cambios significativos en el VAN, sobre todo en los casos donde no existe tasa de actualización.

### 3.4.3 Precio

La variable precio del cobre tiene un impacto en la vida óptima sólo en los casos donde existe tasa de descuento. Si se recuerda el análisis teórico, esta variable disminuye la vida óptima cuando el valor del precio del cobre aumenta.

Para los casos en que no existe tasa de actualización, las curvas son las que se mostrarán a continuación:

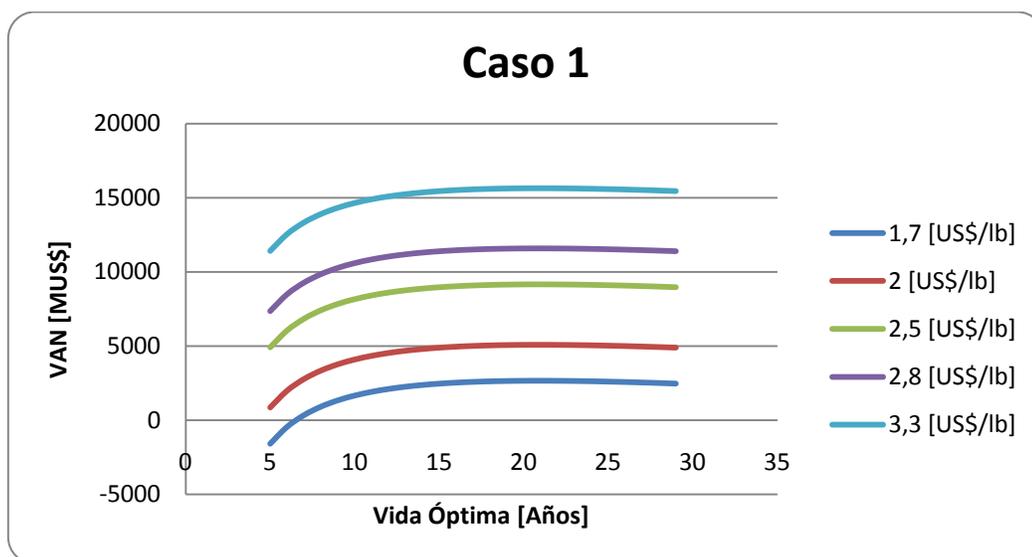


Gráfico 42: VAN según precio caso 1

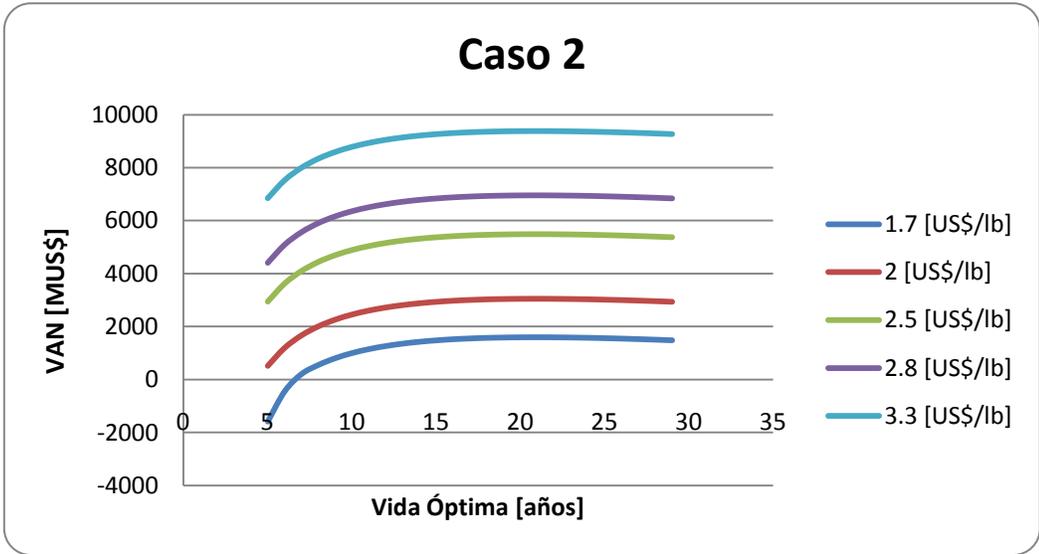


Gráfico 43: VAN según precio caso 2

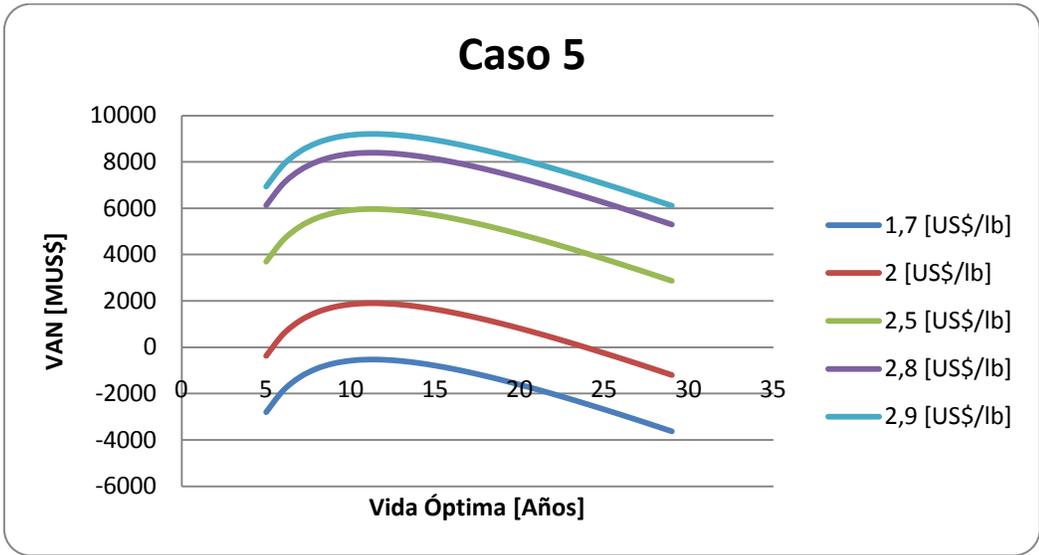


Gráfico 44: VAN según precio caso 5

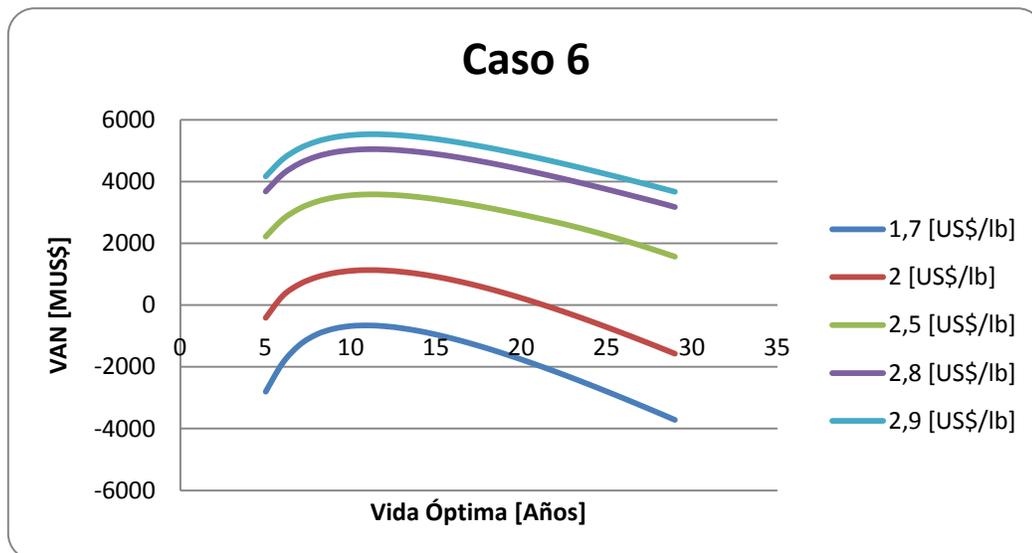


Gráfico 45: VAN según precio caso 6

En estos casos la vida óptima permanece invariante a los cambios de precio, lo que se ve reflejado en la fórmula que se consiguió para estos casos.

En los casos, que si está presente la tasa de descuento se nota que hay un desplazamiento en la vida óptima.

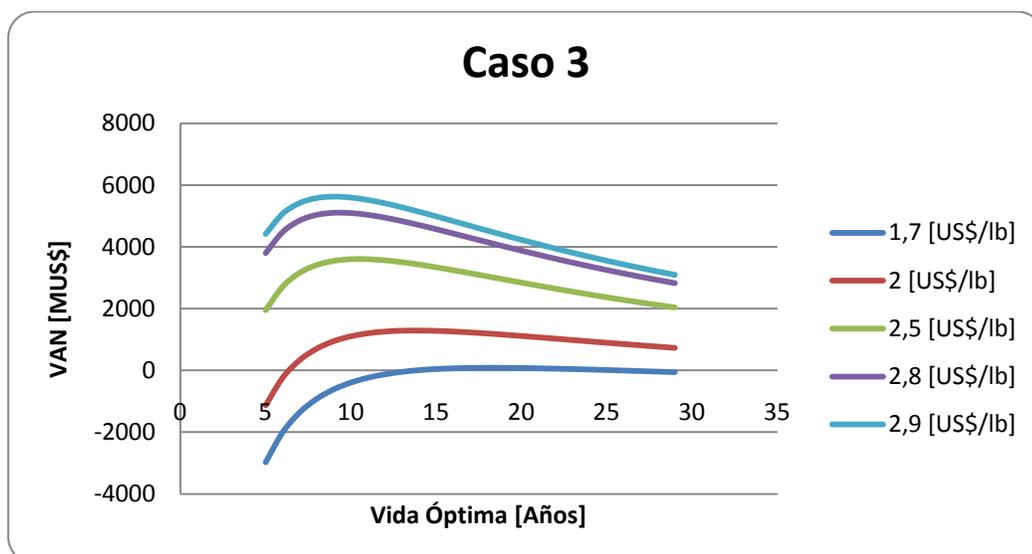


Gráfico 46: VAN según precio caso 3

### Caso 4

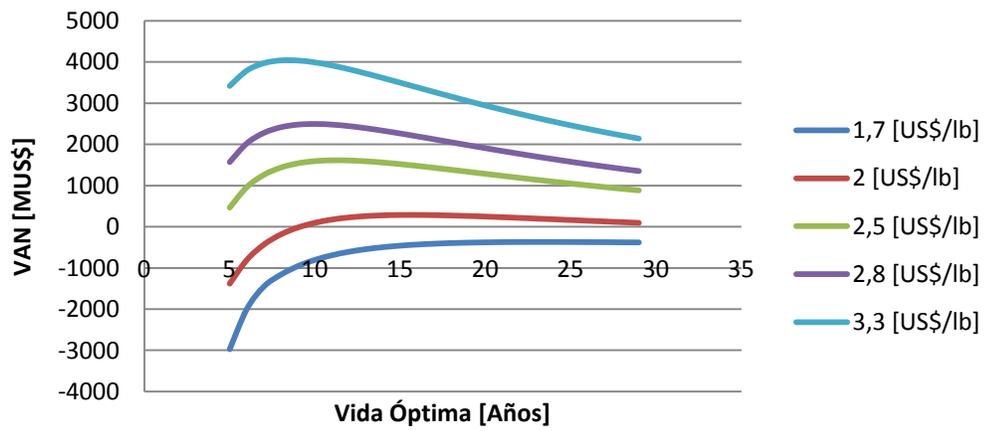


Gráfico 47: VAN según precio caso 4

### Caso 7

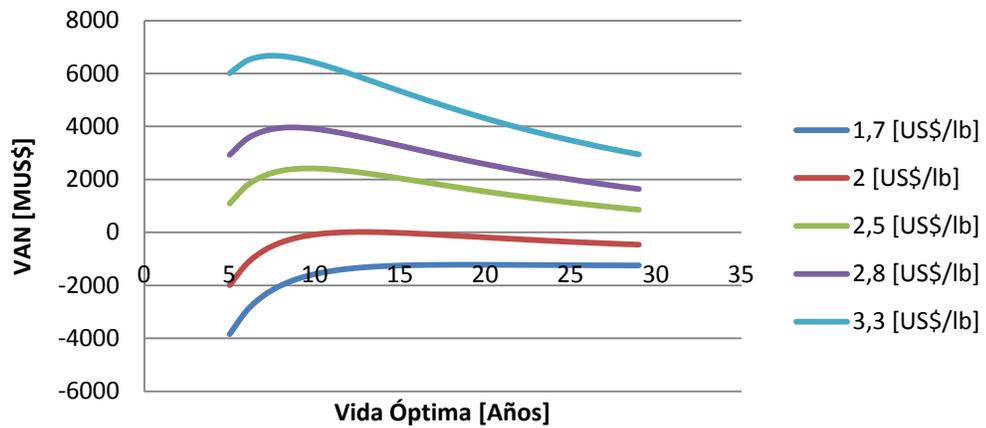


Gráfico 48: VAN según precio caso 7

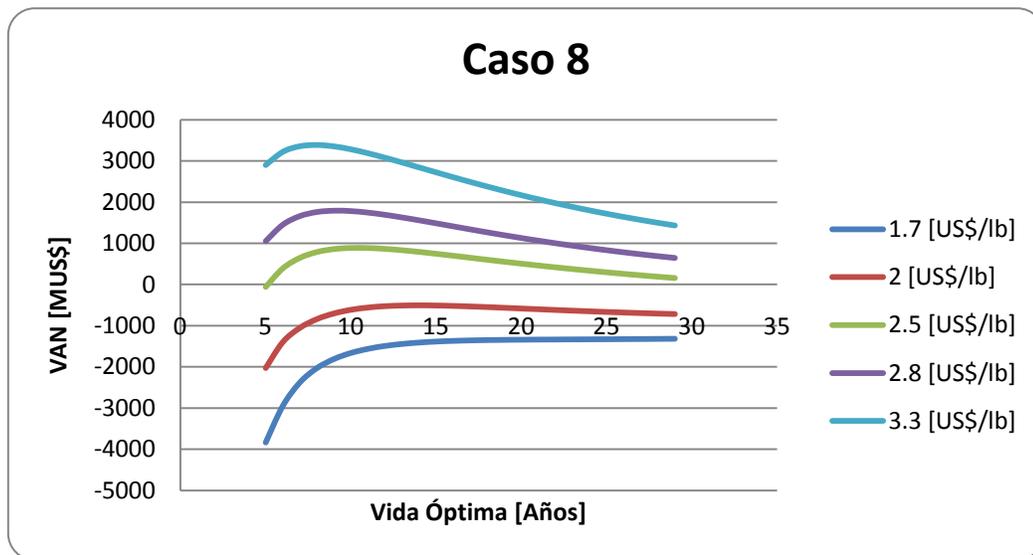


Gráfico 49: VAN según precio caso 8

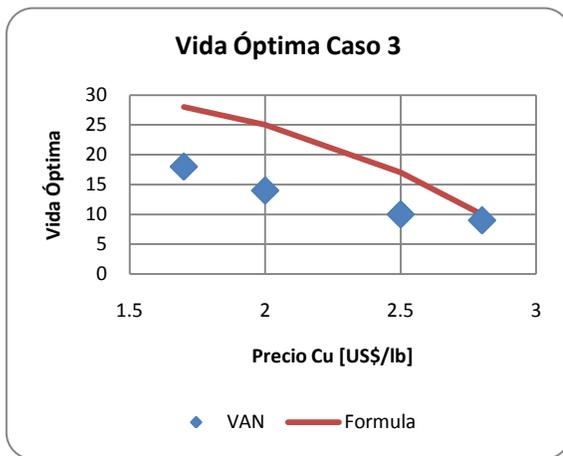


Gráfico 50: Vida óptima según precio Cu caso 3

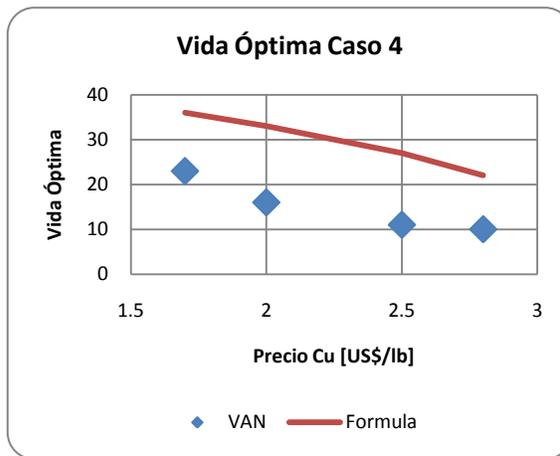


Gráfico 51: Vida óptima según precio Cu caso 4

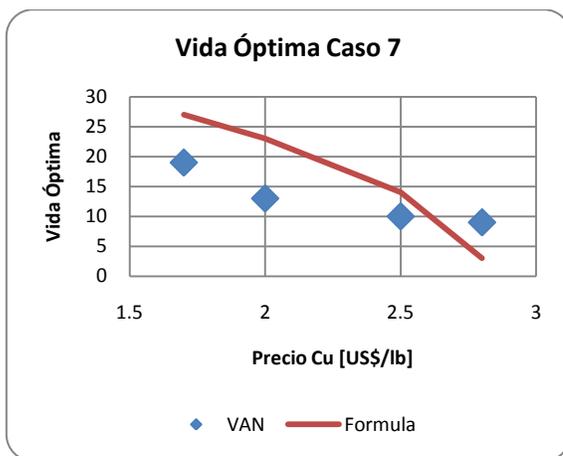


Gráfico 52: Vida óptima según precio Cu caso 7

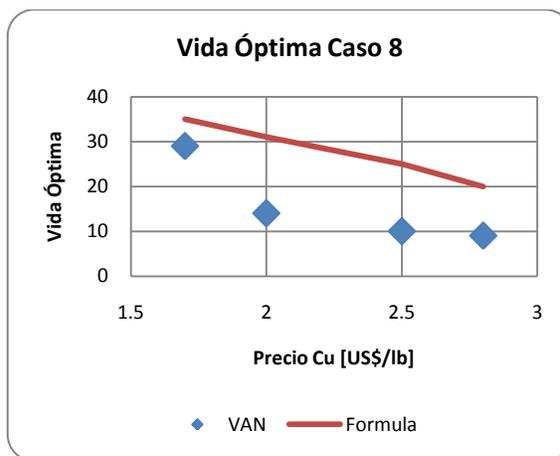


Gráfico 53: Vida óptima según precio Cu caso 8

En estos casos, la fórmula no concuerda con la vida óptima obtenida mediante los flujos de caja, sin embargo, la tendencia que presentan ambas curvas son semejantes.

Además es importante notar la sensibilidad a la variabilidad del precio, ya que independiente si la vida óptima varía o no, el cambio de magnitud del VAN obtenido para cada curva es enorme, lo cual ya se había notado en la parte teórica.

### 3.4.4 Inversión

Esta es una variable que si se encuentra en la fórmula, por lo que la vida óptima se debiese mover según lo descrito en la parte teórica, es decir, a medida que el factor de inversión aumenta la vida óptima se desplace a valores de mayor tamaño.

Los flujos de caja se muestran a continuación:

Para los casos en que la tasa de actualización es cero, la concordancia para la vida óptima entre fórmula y flujos de caja es total.

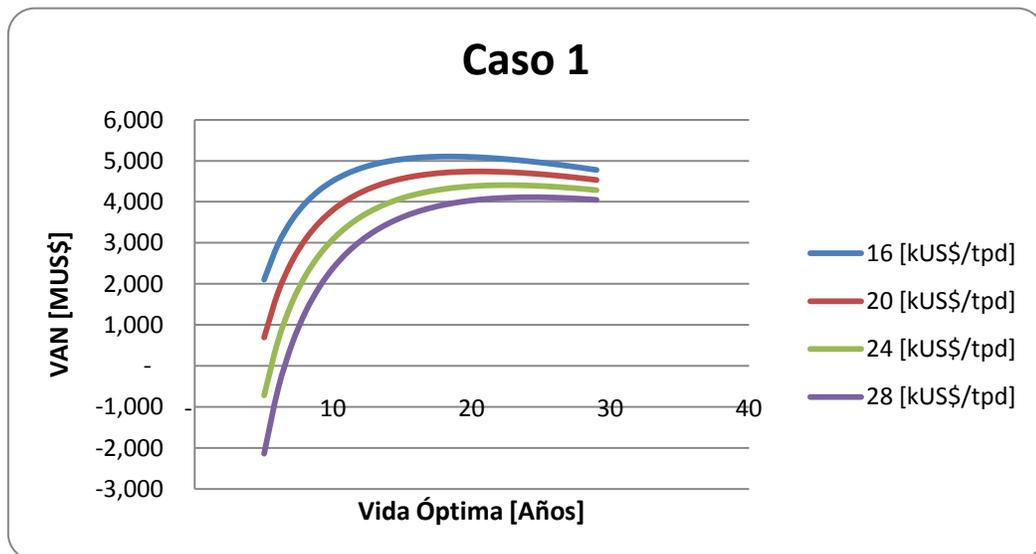


Gráfico 54: VAN según inversión caso 1

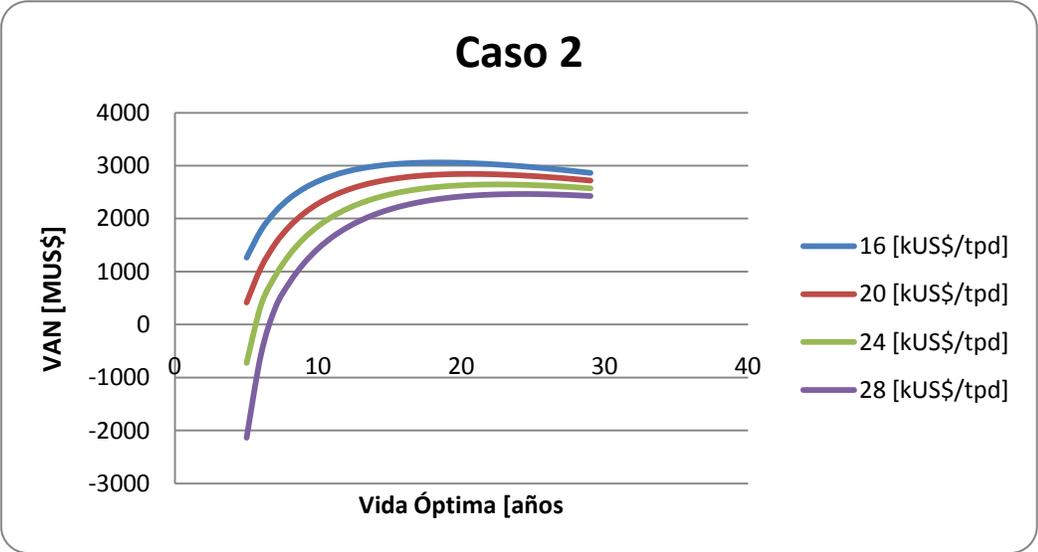


Gráfico 55: VAN según inversión caso 2

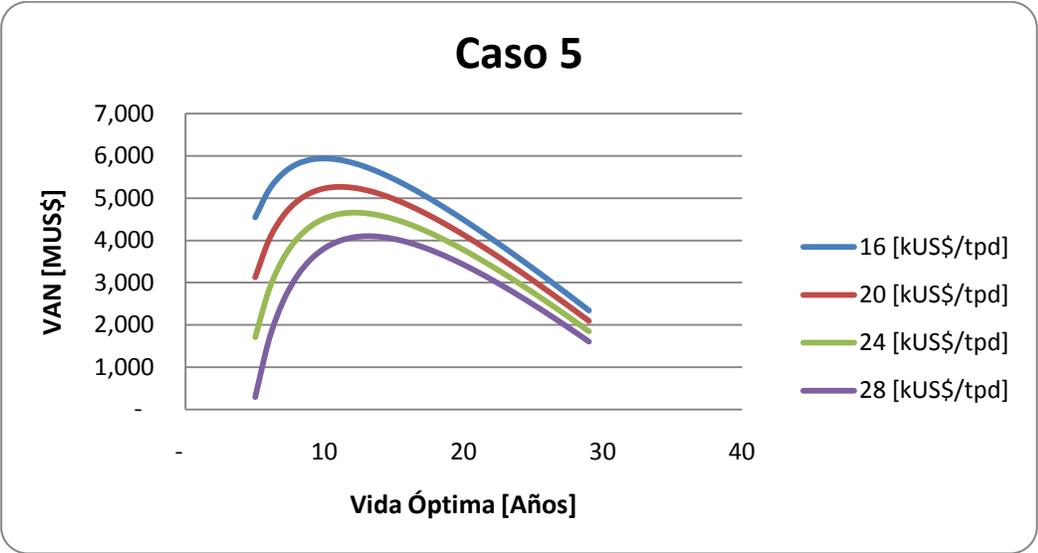


Gráfico 56: VAN según inversión caso 5

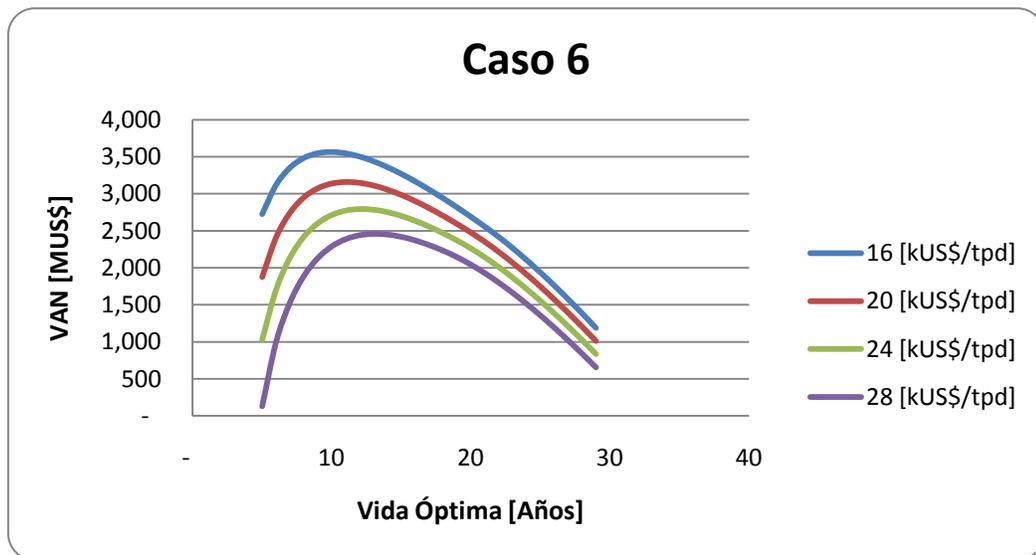


Gráfico 57: VAN según inversión caso 6

Como se nota en los gráficos anteriores, la vida óptima se desplaza hacia la derecha, a medida que la inversión aumenta. Además, el rango en que el VAN tiene un valor elevado es amplio para los casos 1 y 2 donde el precio permanece fijo. En cambio, cuando el precio es variable, el rango es más acotado. Con esto, cuando el precio es variable el abanico de vidas óptima que otorgan VAN similares es menor.

A continuación, muestra gráficamente la concordancia total entre fórmula teórica y flujos de caja.

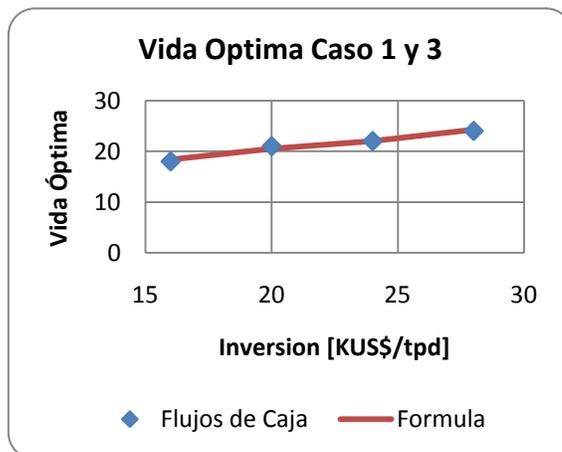


Gráfico 58: Vida óptima según Inversión caso 1 y 3

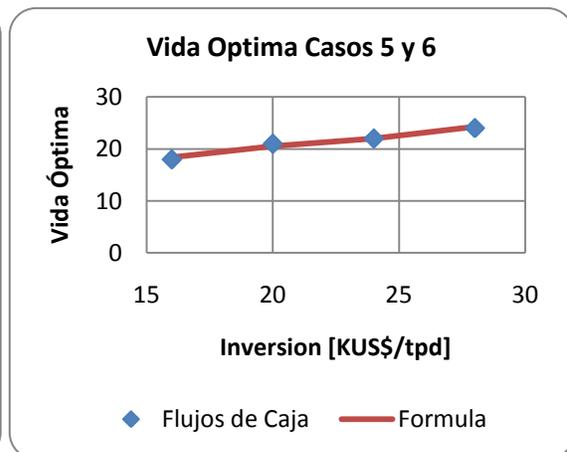


Gráfico 59: Vida óptima según Inversión caso 5 y 6

Los casos que se muestran a continuación, son con tasa de actualización, aquí si presentan variaciones en la vida óptima.

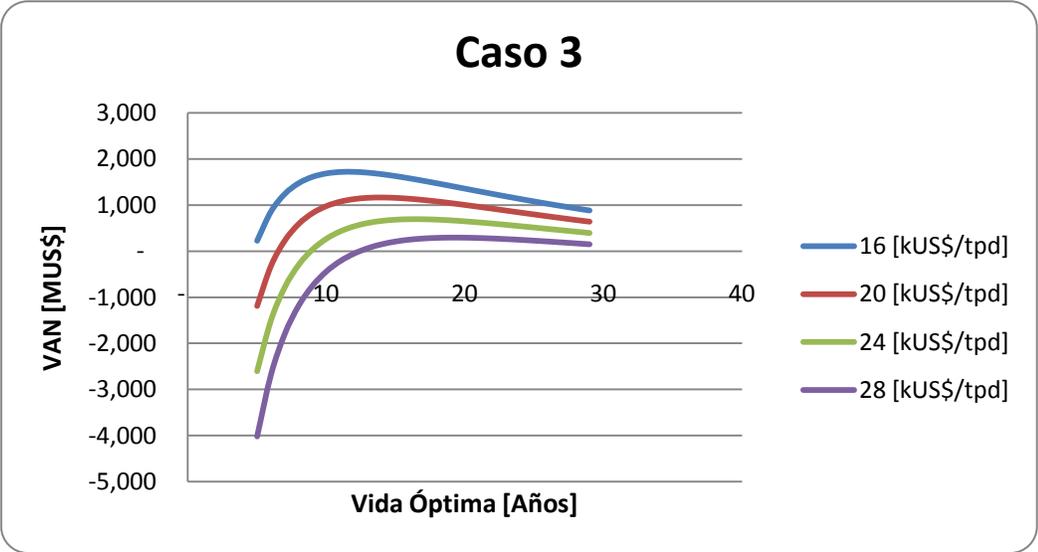


Gráfico 60: VAN según inversión caso 3

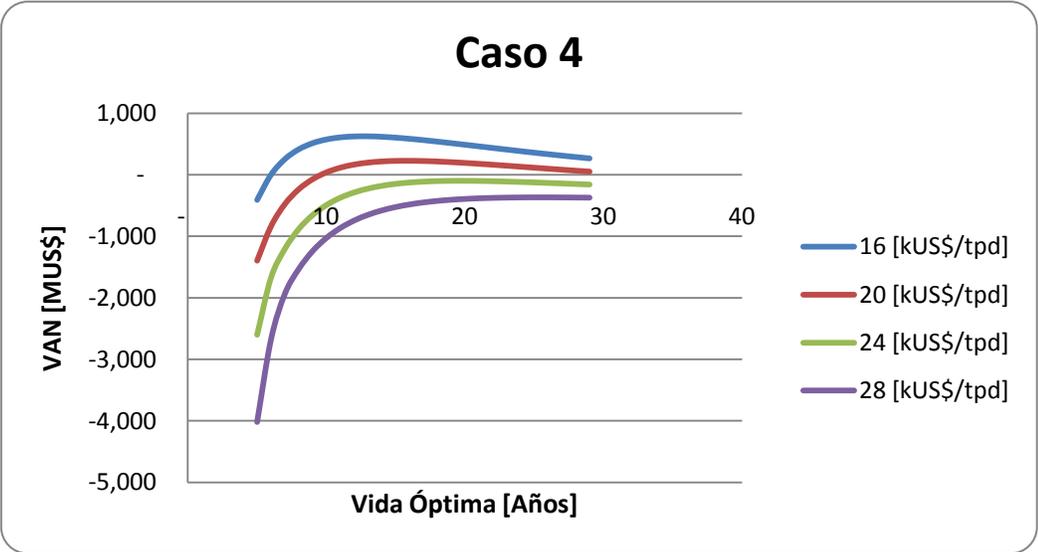


Gráfico 61: VAN según inversión caso 4

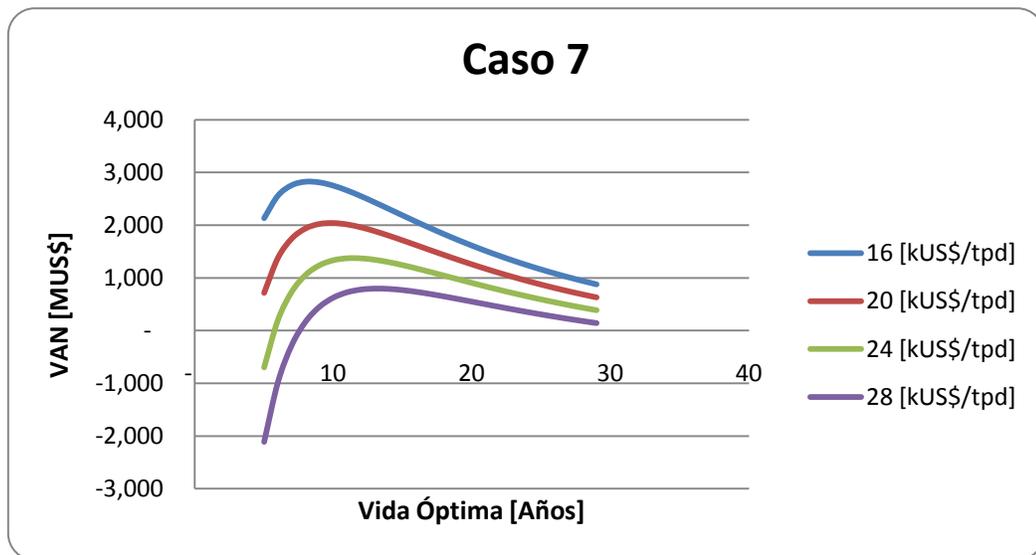


Gráfico 62: VAN según inversión caso 7

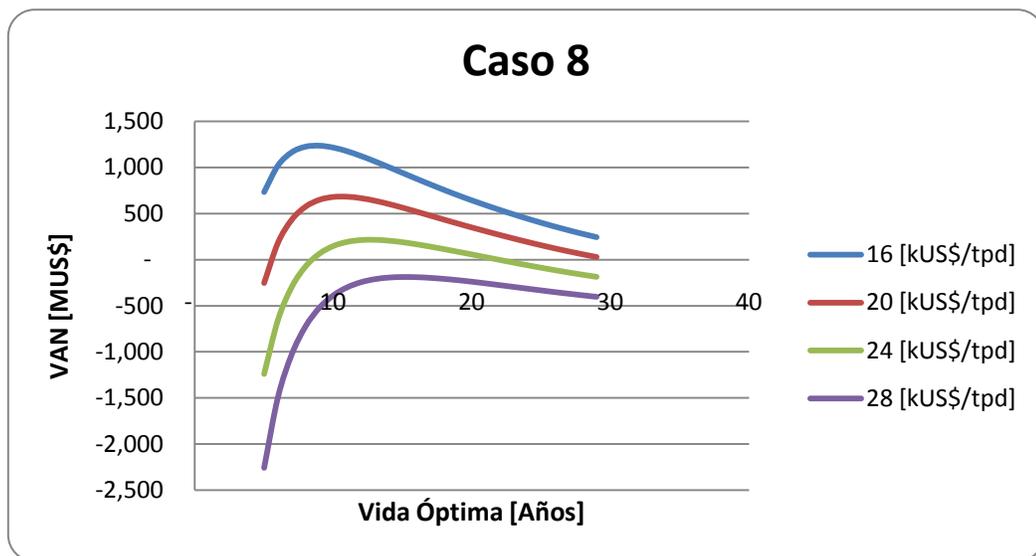


Gráfico 63: VAN según inversión caso 8

Las diferencias entre los resultados obtenidos a partir de las fórmulas donde existe tasa de descuento y los flujos de caja descontados, se muestran gráficamente a continuación.

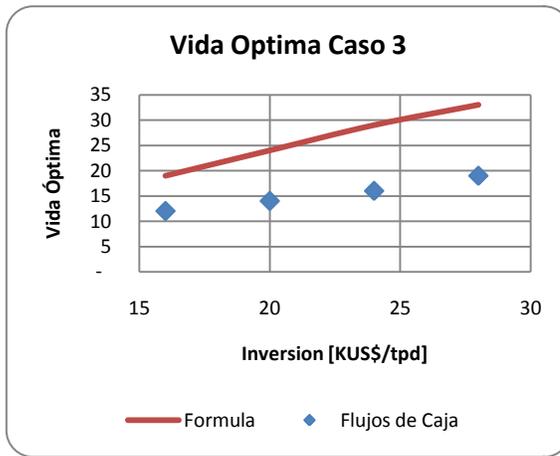


Gráfico 64: Vida óptima según Inversión caso 3

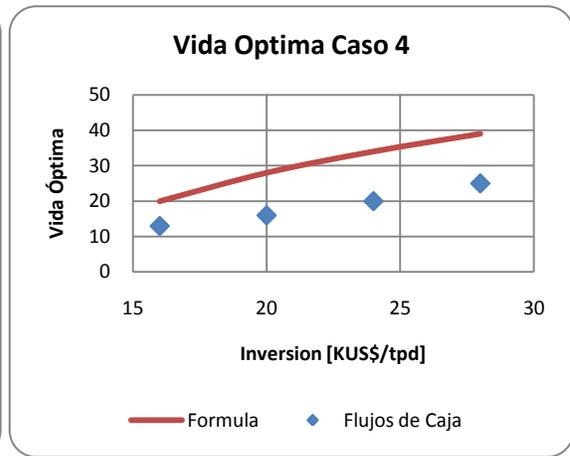


Gráfico 65: Vida óptima según Inversión caso 4

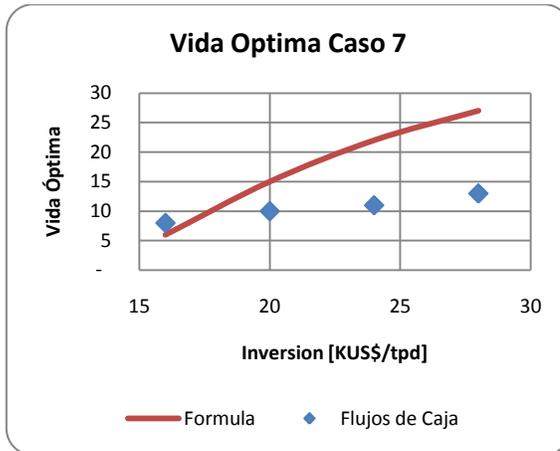


Gráfico 66: Vida óptima según Inversión caso 7

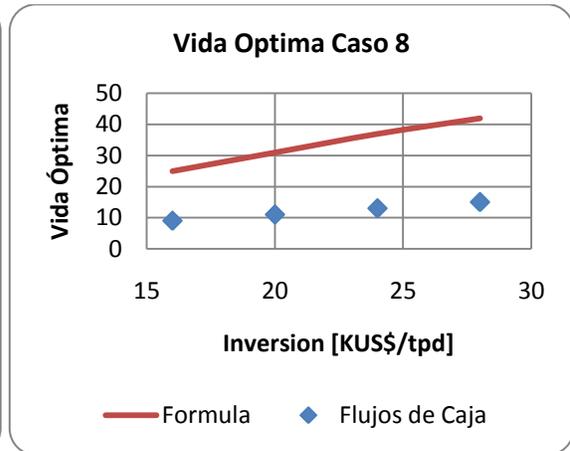


Gráfico 67: Vida óptima según Inversión caso 8

Como se observa, las diferencias que presentan las vidas óptimas obtenidas por medio de la fórmula y los flujos de caja, son considerables, sin embargo lo importante a rescatar es que la tendencia entre ambas curvas son de un gran parecido.

### 3.4.5 Costos Fijos

Los costos fijos tienen un impacto en la vida óptima en todos los casos estudiados, los flujos de caja corroboran esta tendencia.

Como se observa en todos los gráficos las vidas óptimas, se mueven hacia la izquierda a medida que los costos crecen.

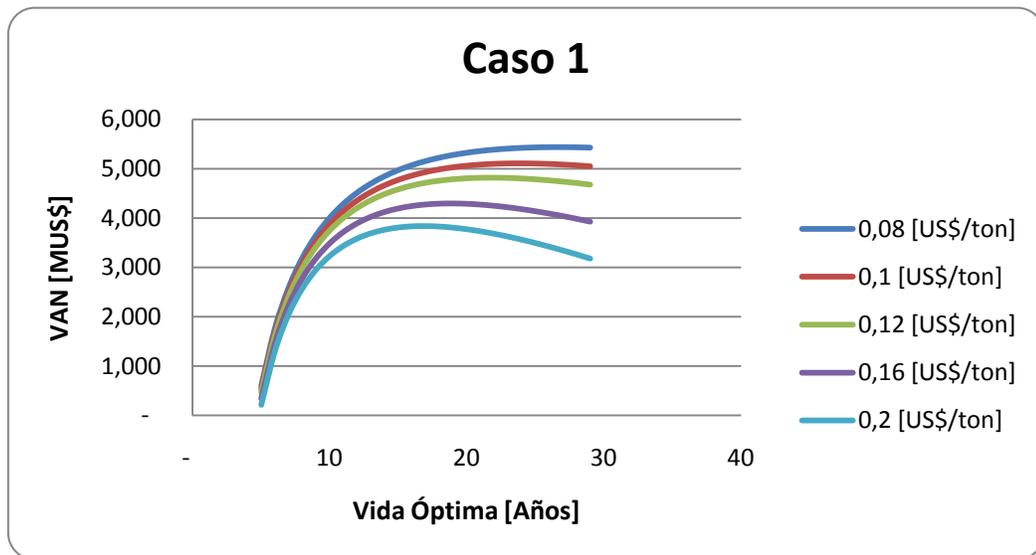


Gráfico 68: VAN según costos fijos caso 1

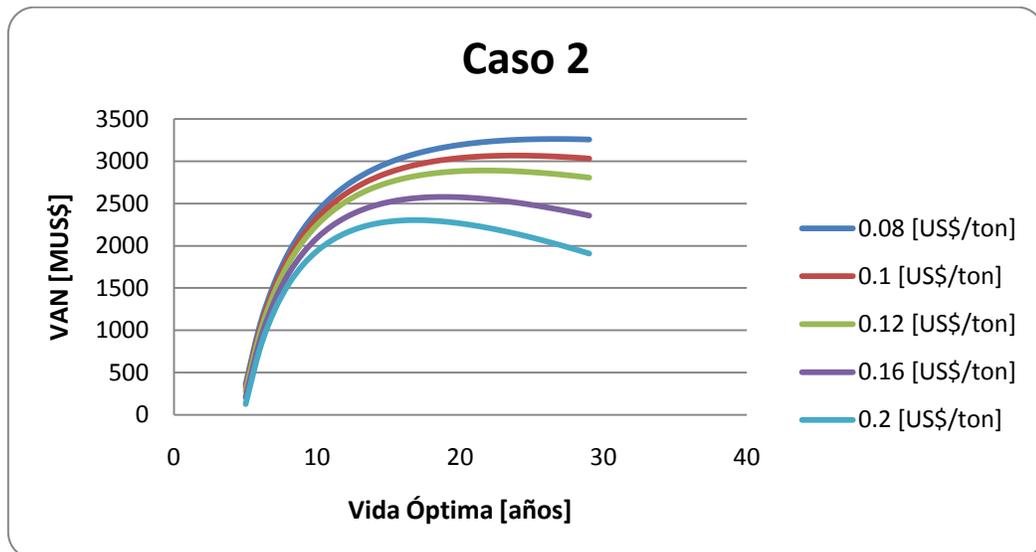


Gráfico 69: VAN según costos fijos caso 2

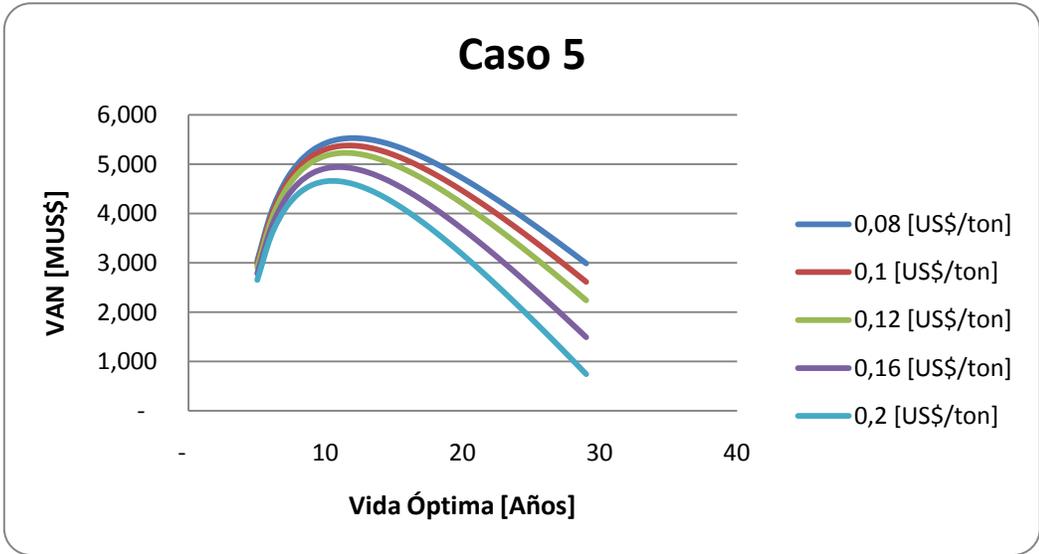


Gráfico 70: VAN según costos fijos caso 5

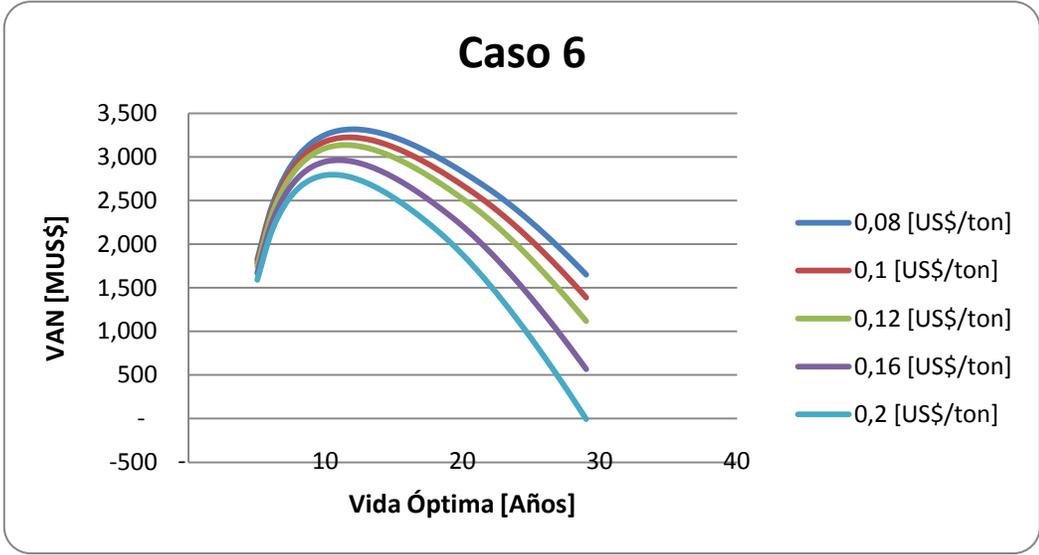


Gráfico 71: VAN según costos fijos caso 6

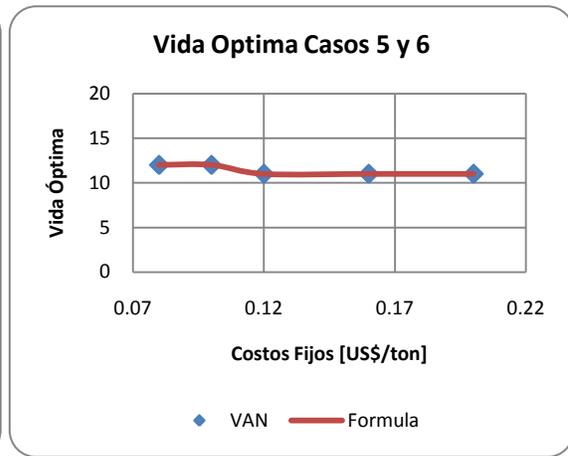
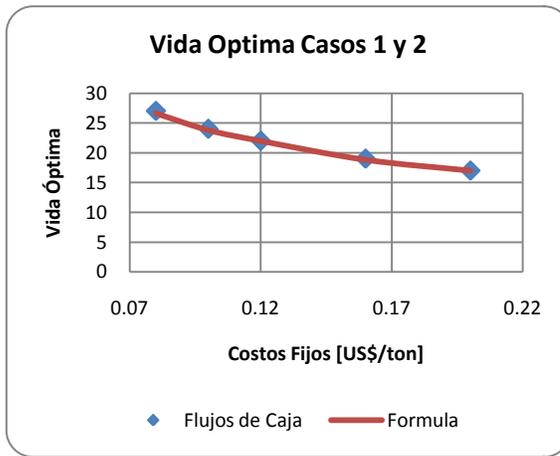


Gráfico 72: Vida óptima según costos fijos caso 1 y 2

Gráfico 73: Vida óptima según costos fijos caso 5 y 6

Como vemos, nuevamente para los casos en que no está presente la tasa de actualización, la coincidencia de resultados es total. Y las variaciones de la vida óptima frente a modificaciones de esta variable son las observadas en la parte teórica.

Para los casos en que existe tasa de actualización.

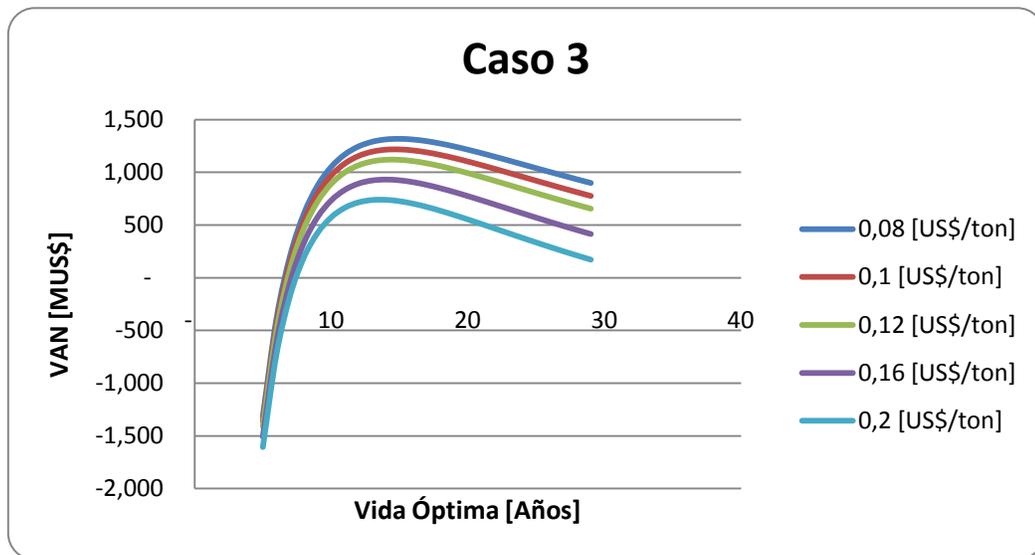


Gráfico 74: VAN según costos fijos caso 3

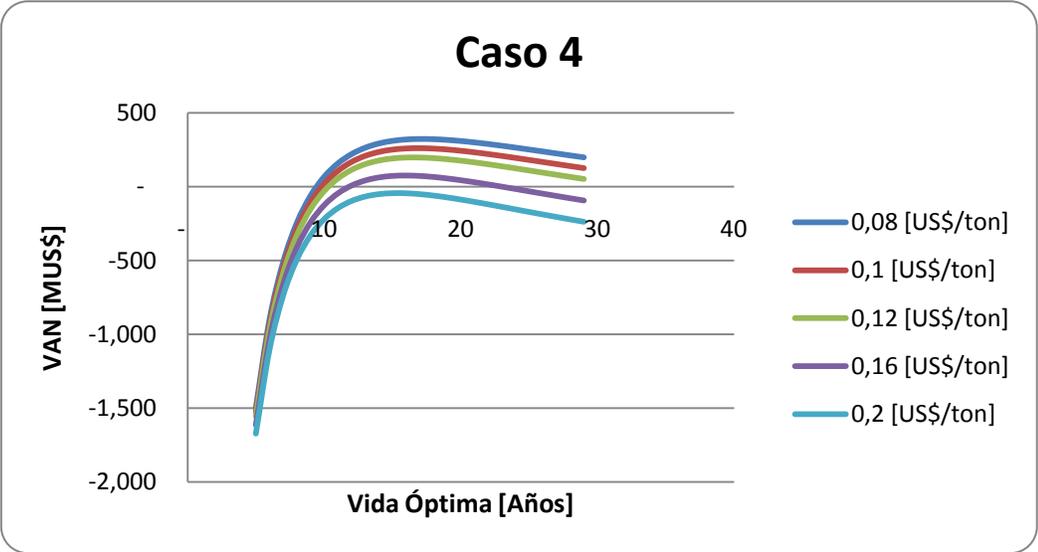


Gráfico 75: VAN según costos fijos caso 4

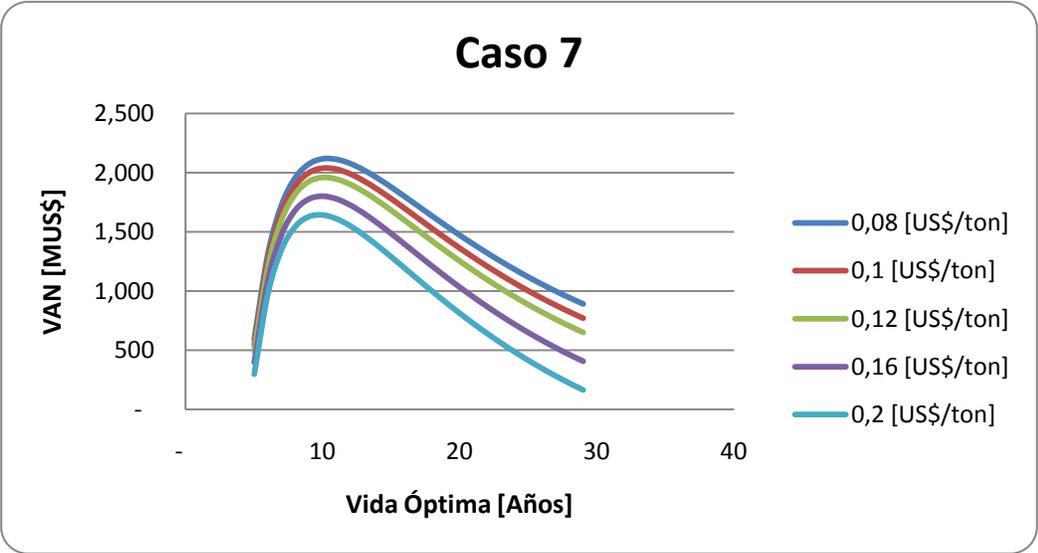


Gráfico 76: VAN según costos fijos caso 7

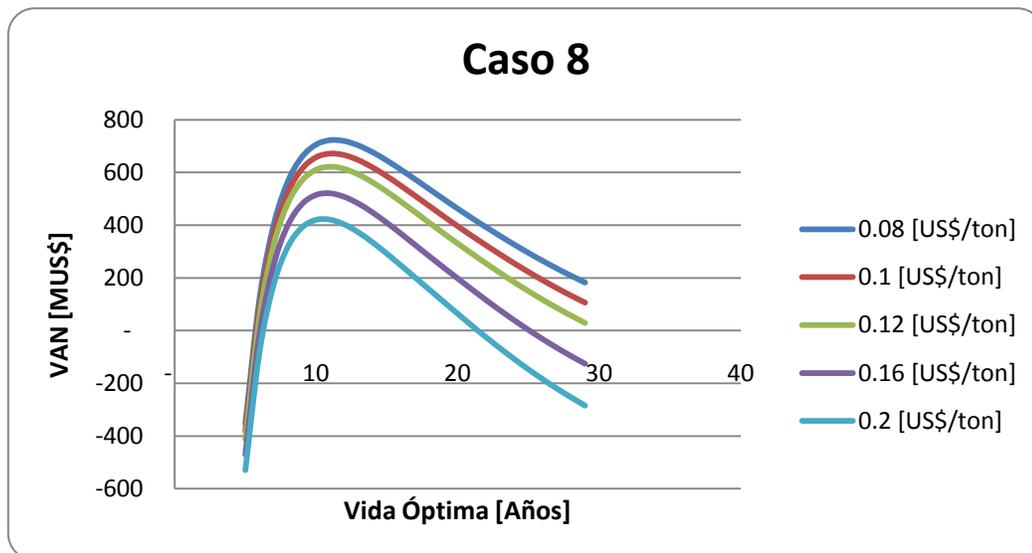


Gráfico 77: VAN según costos fijos caso 8

Veamos las diferencias entre las fórmulas y los flujos de caja.

Como se observa en los gráficos que siguen, para los casos donde la tasa de actualización es distinta de cero, existe una diferencia de resultados. Acentuándose más cuando las vidas óptimas son mayores, debido a que el efecto producido por la aproximación es mayor. Pero nuevamente, la tendencia sigue siendo la misma, sólo con distintas pendientes.

La vida óptima para los flujos de caja disminuye levemente al aumentar los costos fijos.

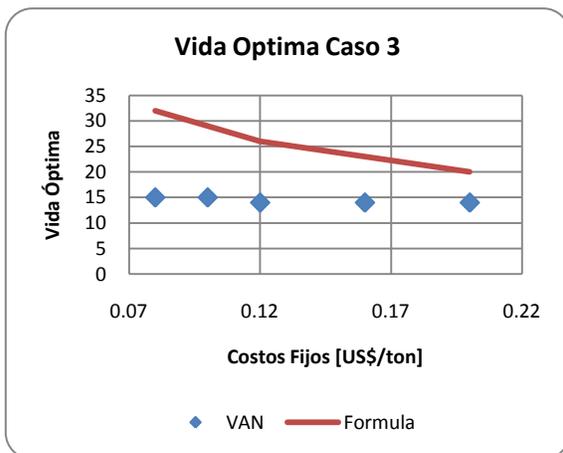


Gráfico 78: Vida óptima según costos fijos caso 3

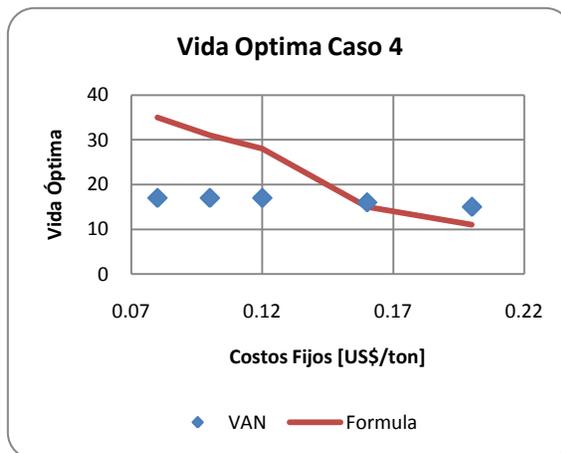


Gráfico 79: Vida óptima según costos fijos caso 4

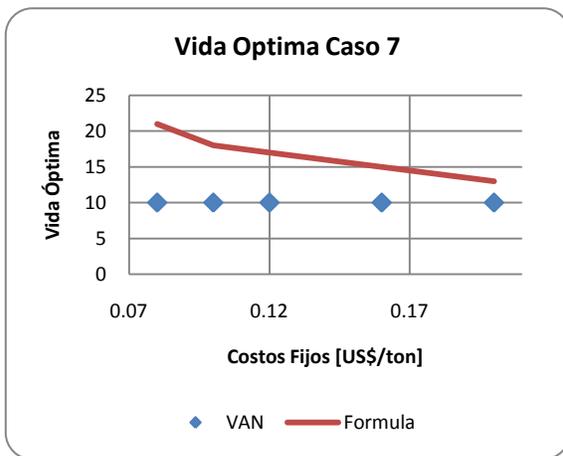


Gráfico 80: Vida óptima según costos fijos caso 7

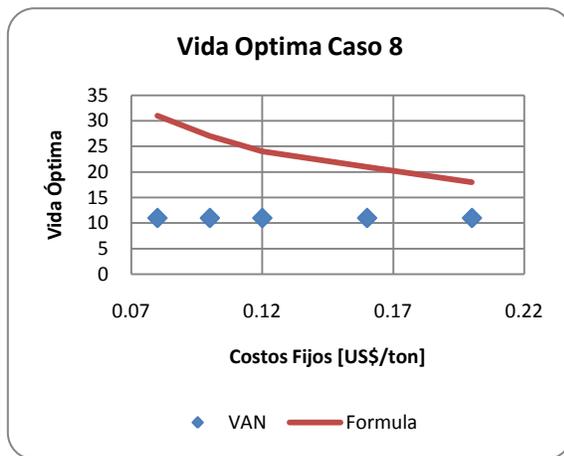


Gráfico 81: Vida óptima según costos fijos caso 8

### 3.4.6 Costos Variables

Los costos variables solo impactan en la vida óptima, cuando está presente la tasa de descuento.

Por lo que los casos analizados a continuación son donde la tasa es distinta de cero. Y se observa que el efecto producido por esta variable es aumentar la vida óptima conforme los costos variables crecen.

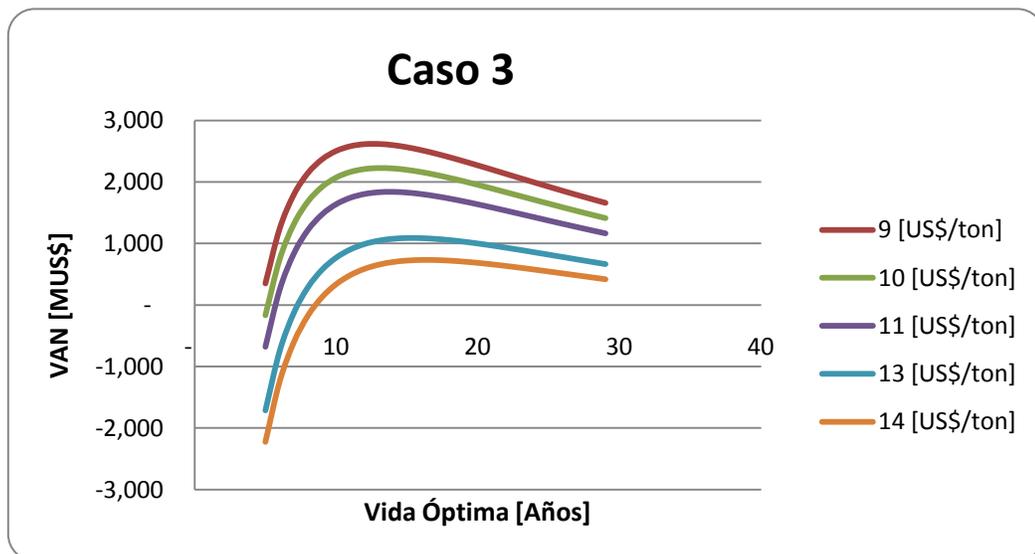


Gráfico 82: VAN según costos variables caso 3

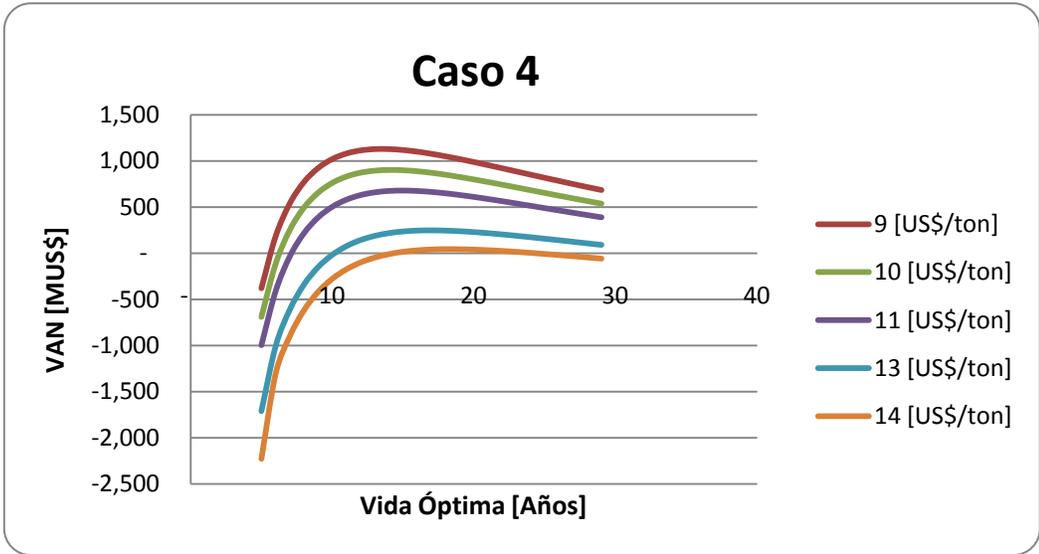


Gráfico 83: según costos variables caso 4

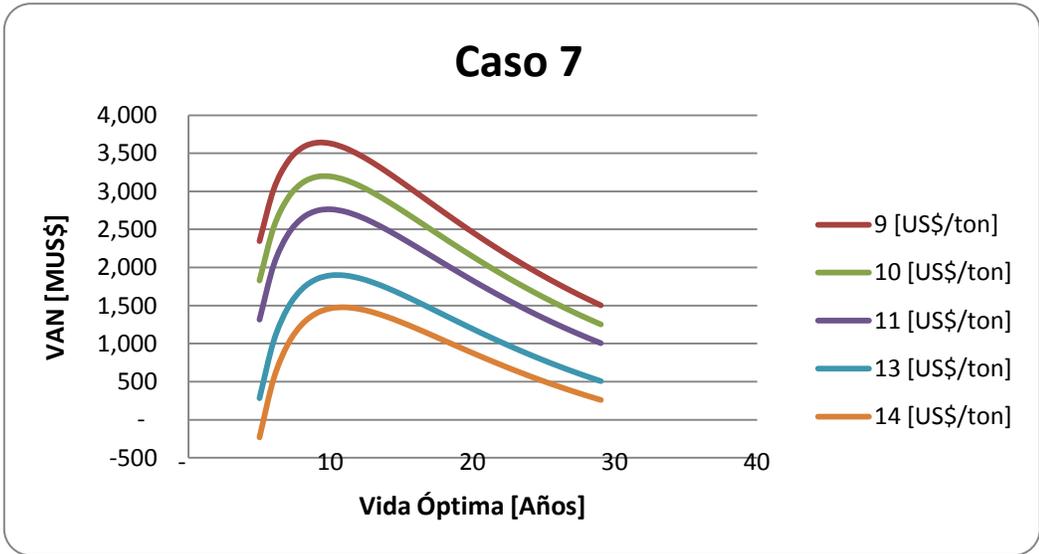


Gráfico 84: VAN según costos variables caso 7

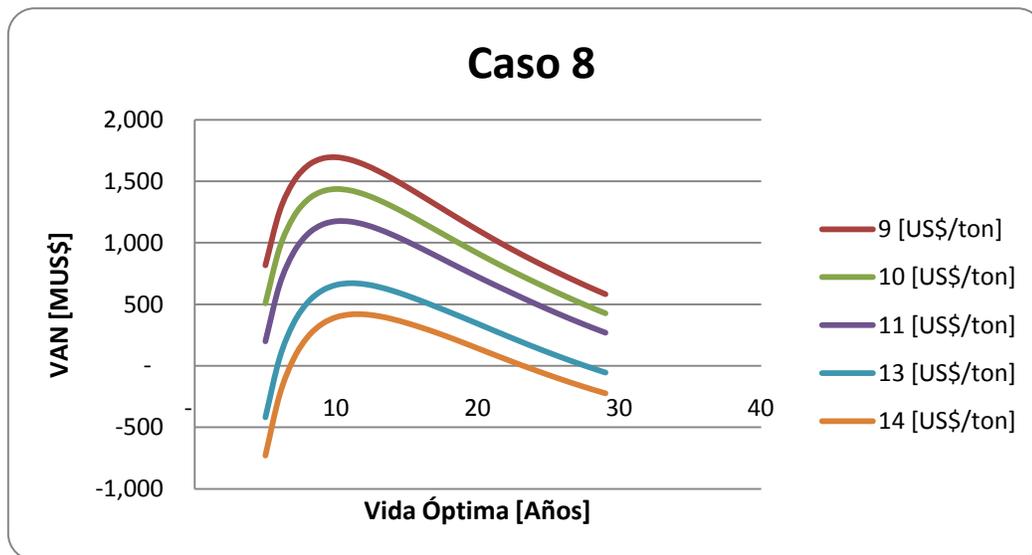


Gráfico 85: VAN según costos variables caso 8

La comparación entre fórmula y flujos de caja es la siguiente.

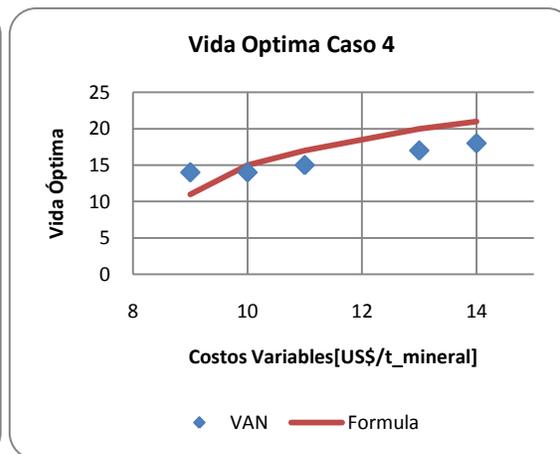
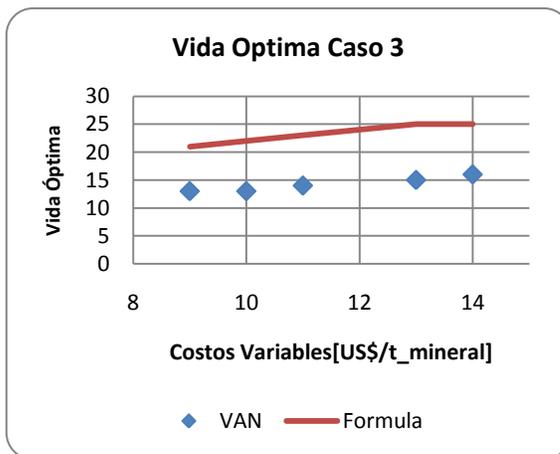


Gráfico 86: Vida óptima según costos variables caso 3    Gráfico 87: Vida óptima según costos variables caso 4

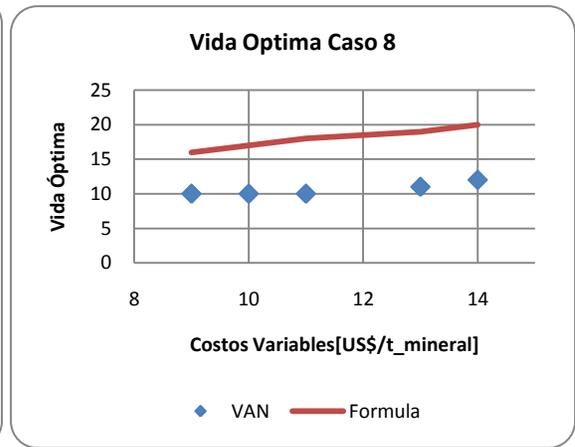
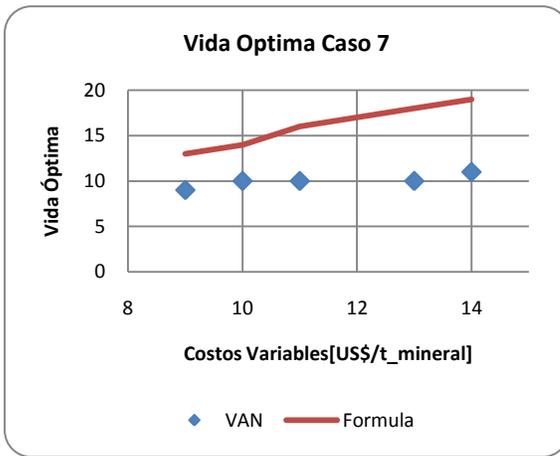


Gráfico 88: Vida óptima según costos variables caso 7 Gráfico 89: Vida óptima según costos variables caso 8

### 3.4.7 Tasa de Descuento

A continuación se muestra el impacto que tiene la tasa de descuento sobre la vida óptima

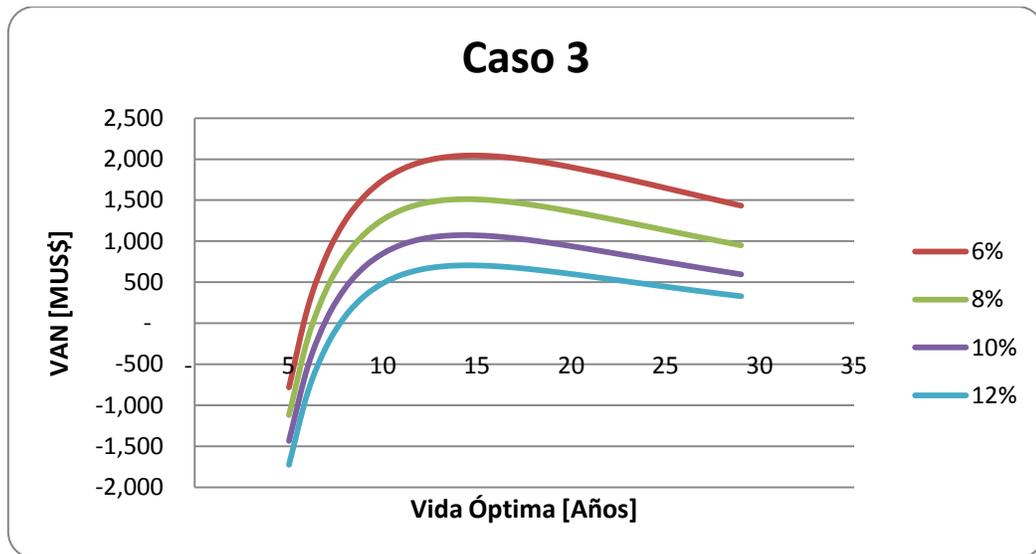


Gráfico 90 : VAN según Tasa de descuento caso 3

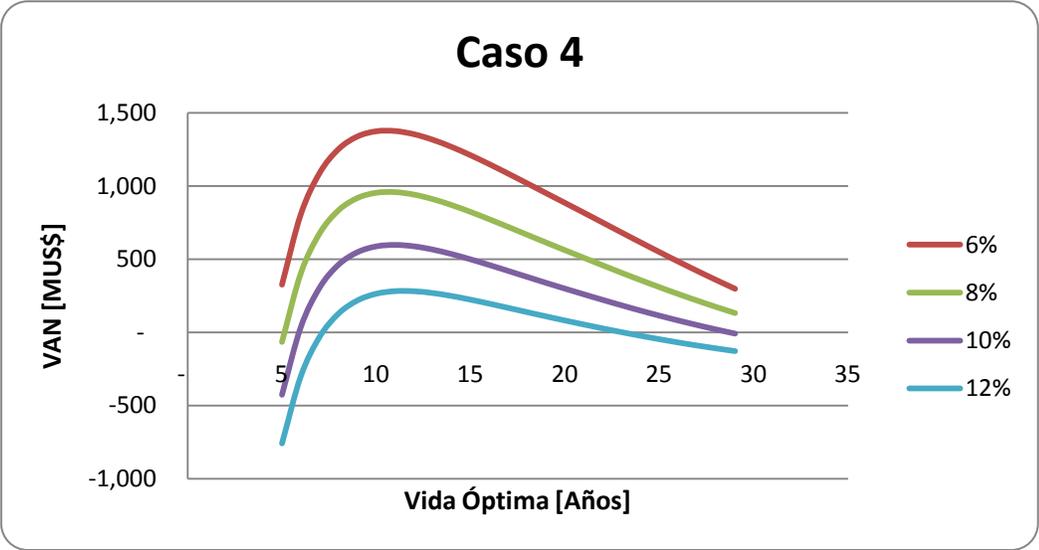


Gráfico 91: VAN según Tasa de descuento caso 4

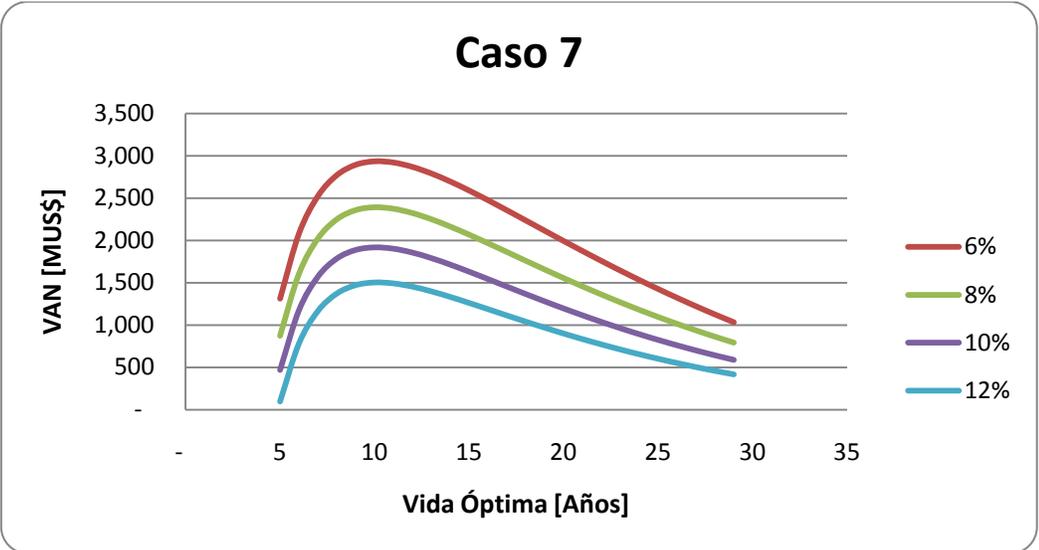


Gráfico 92: VAN según Tasa de descuento caso 7

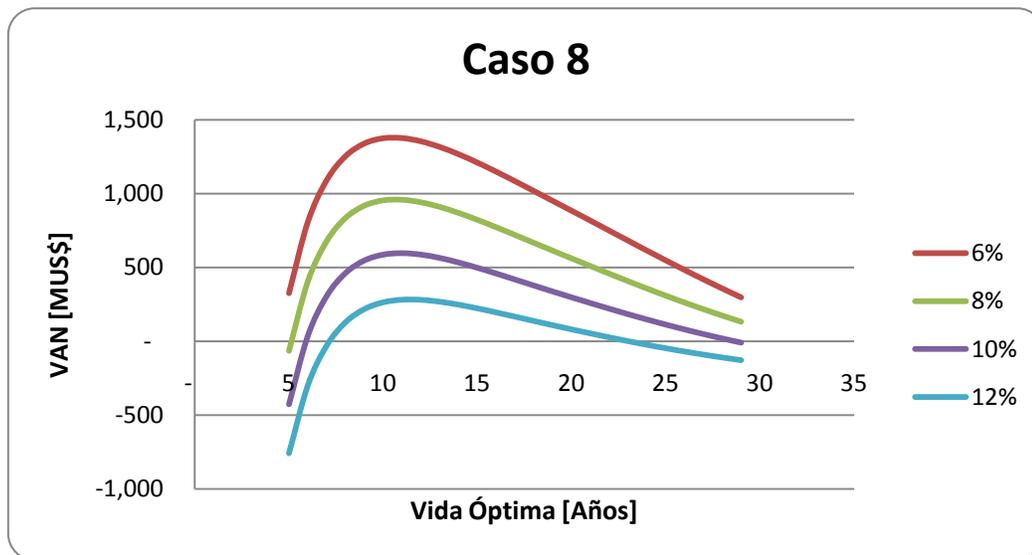


Gráfico 93: VAN según Tasa de descuento caso 8

Y la diferencia entre fórmula y flujos es considerable, como se observa a continuación. Estas diferencias son originadas debido a la aproximación realizada para este factor.

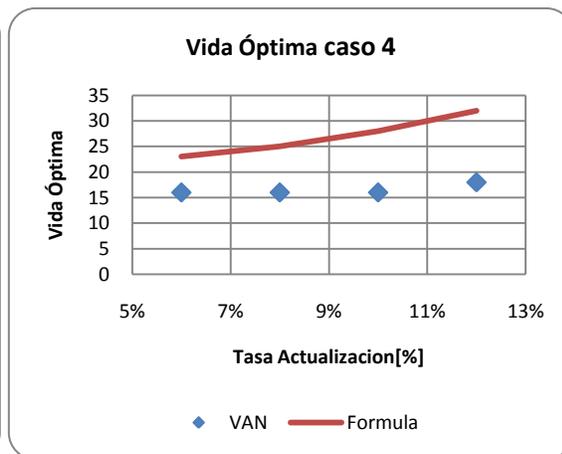
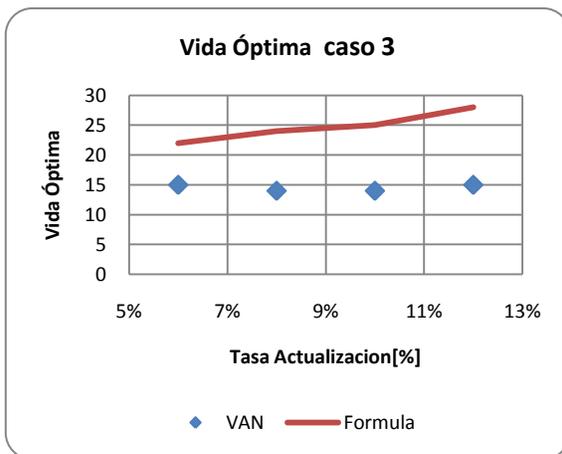


Gráfico 94: Vida óptima según Tasa Actualización caso 3

Gráfico 95: Vida óptima según Tasa Actualización caso 4

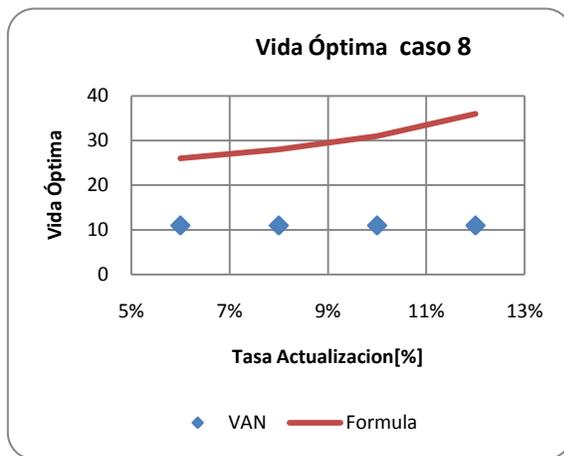
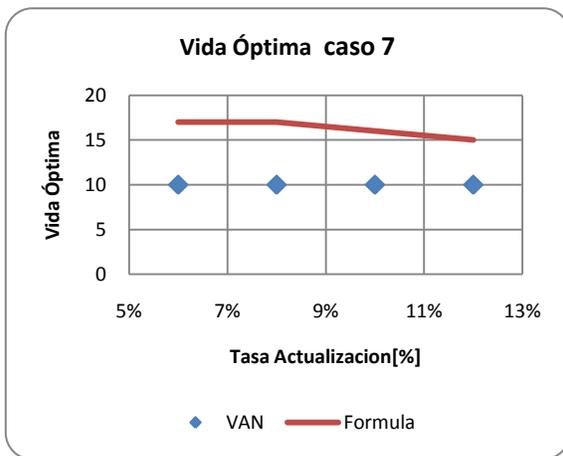


Gráfico 96: Vida óptima según Tasa Actualización caso 7 Gráfico 97: Vida óptima según Tasa Actualización caso 8

### 3.4.8 Impuesto

Por último el caso del impuesto, los casos analizados son sólo 4, como se observa a continuación.

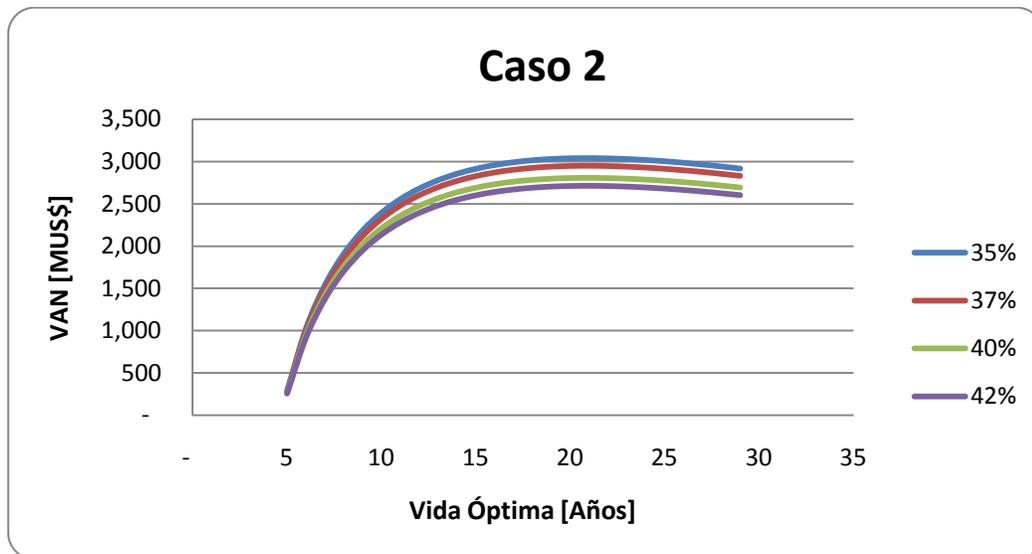


Gráfico 98: VAN según Impuesto caso 2

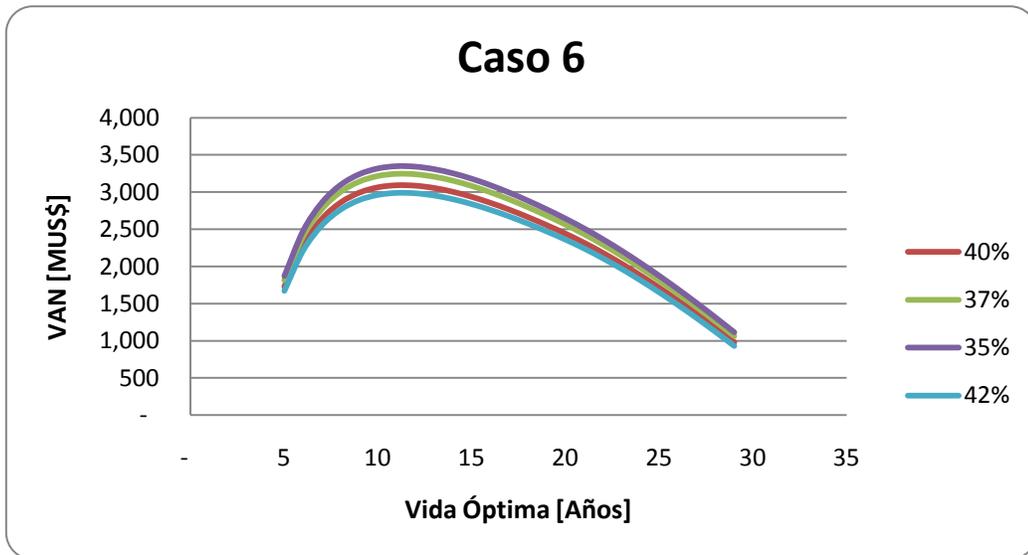


Gráfico 99: VAN según Impuesto caso 6

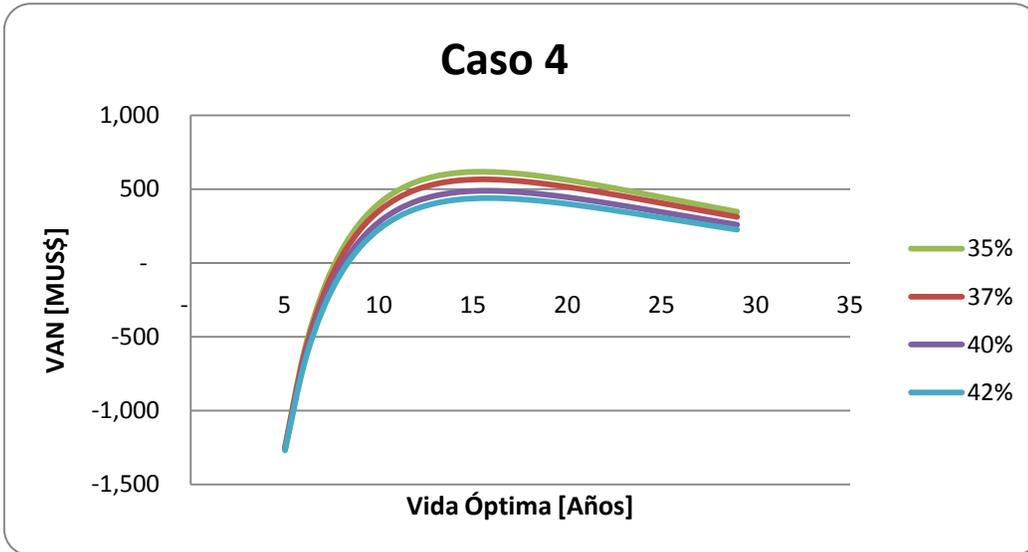


Gráfico 100: VAN según Impuesto caso 4

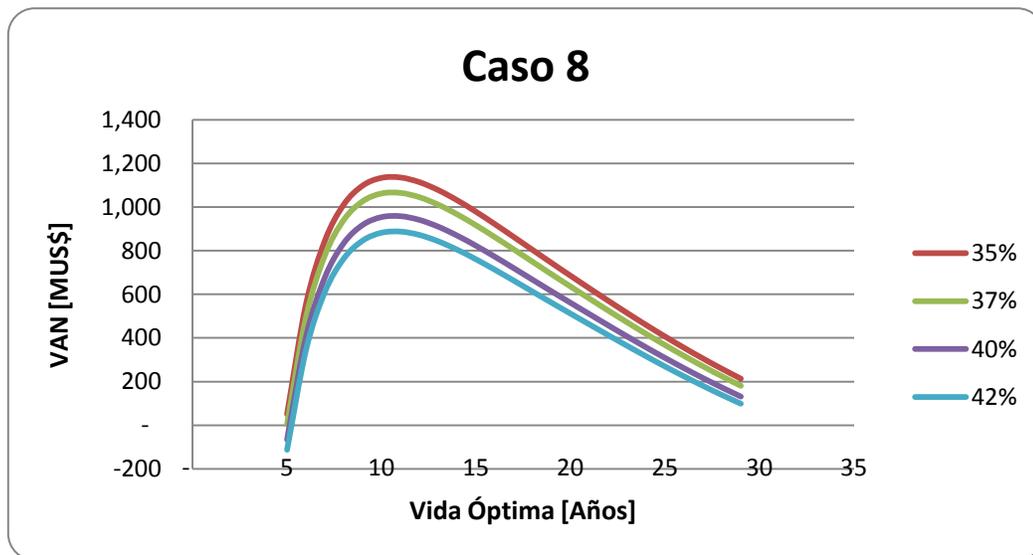


Gráfico 101: VAN según Impuesto caso 8

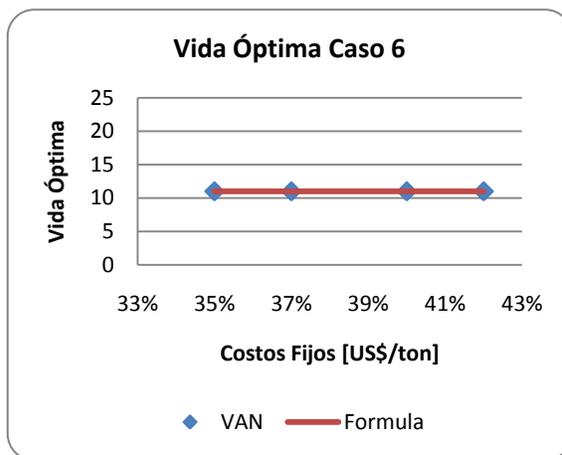
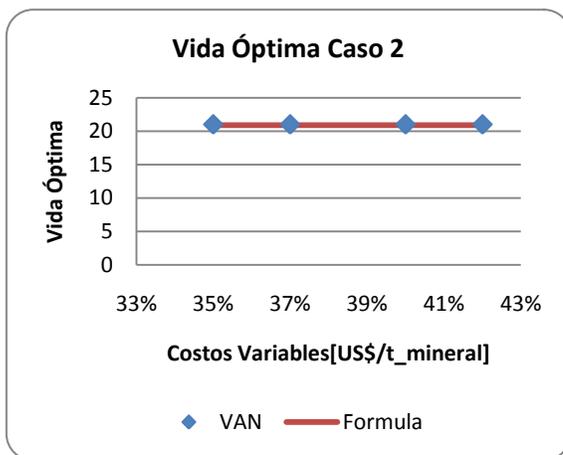


Gráfico 102: Vida óptima según Costos Variables caso 2

Gráfico 103: Vida óptima según Costos Variables caso 6

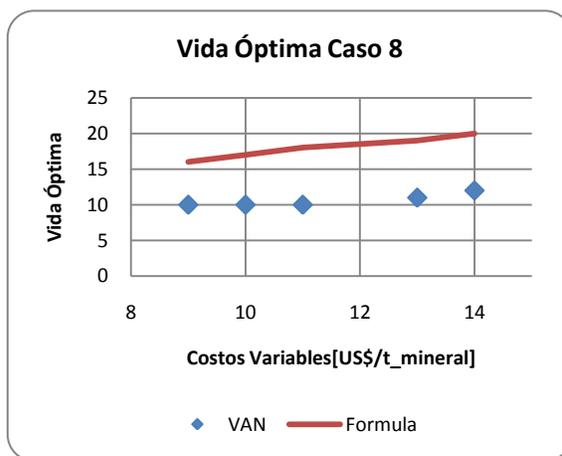
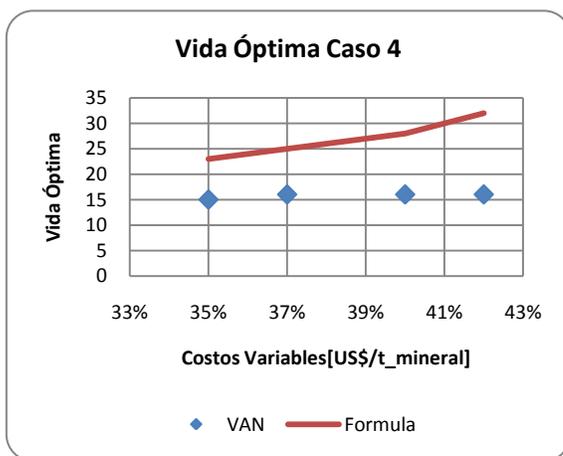


Gráfico 104: Vida óptima según Costos Variables caso 4

Gráfico 105: Vida óptima según Costos Variables caso 8

### 3.4.9 Comentarios Generales

Con los resultados, de los puntos anteriores se puede deducir que:

- Si bien en los casos en que existe tasa de descuento, la vida óptima real (la que se consigue con los flujos de caja) es distinta a la que se obtiene con la fórmula propuesta, lo importante es que la tendencia se mantiene idéntica entre ambas, lo que da consistencia al análisis del comportamiento de la vida óptima frente a la variación de los parámetros.
- La diferencia que existe en los casos con tasa de descuento, se debe principalmente a las aproximaciones realizadas para este factor.
- Se observa que cuando las vidas óptimas son pequeñas, las diferencias entre fórmula y flujos de caja, se reducen, esto se debe principalmente a que el efecto producido por el factor de actualización es menor cuando la vida óptima es corta.
- Para los casos en que el precio es variable, la sensibilidad de la vida óptima frente a variaciones en los parámetros, es mayor que en los casos en que el precio se mantiene fijo.
- La fórmula satisface, los requerimientos para realizar el estudio de la tendencia de la vida óptima frente a variaciones de los parámetros indicados.

### 3.5 Estimación Vida Óptima.

Con los antecedentes mencionados en el punto 3.3, se procederá a calcular la vida óptima para cada caso estudiado.

Los casos con impuestos no se considerarán en este estudio, debido a que no se tiene información del valor real de éste.

#### 3.5.1 Caso 1

$$n = \sqrt{\frac{i}{c}} = \sqrt{\frac{57,2 \text{ US\$ / ton}}{0,13 \text{ US\$ / ton}}} = 21 \text{ años}$$

#### 3.5.2 Caso 3

$$n = \sqrt{\frac{(10i - (v - c_v) \cdot (65r + 16))}{c \cdot (7 - 36r)}} \\ = \sqrt{\frac{(10 \cdot 57,2 - (24,5 - 11,9) \cdot (65 \cdot 0,08 + 16))}{0,13 \cdot (7 - 36 \cdot 0,08)}} = 24 \text{ años}$$

### 3.5.3 Caso 5

$$n = \sqrt{\frac{2 \cdot i}{2c - k \cdot a}} = \sqrt{\frac{2 \cdot 57,2}{2 \cdot 0,13 - 0,64 \cdot 89,2 \cdot -0,05}} = 11 \text{ años}$$

### 3.5.4 Caso 7

$$n = \sqrt{\frac{10i - (k \cdot P_0 - c_v) \cdot (65r + 16) - a \cdot k \cdot (14 - 750r)}{c \cdot (7 - 36r)}}$$

$$= \sqrt{\frac{10 \cdot 57,2 - (12,5 \cdot P_0 - 11,9) \cdot (65 \cdot 0,08 + 16) + 0,05 \cdot 12,5 \cdot (14 - 750 \cdot 0,08)}{0,13 \cdot (7 - 36 \cdot 0,08)}}$$

$$= 17 \text{ años}$$

## 3.6 Comparación de VAN

A continuación se mostrará y comparará los distintos VAN obtenidos, para las vidas óptimas estimada en el punto anterior.

El caso base representa a la faena evaluada en un periodo de 19 años, donde la mina esta a un ritmo de 98.000 tpd desde el año 2, el primer año se explota a un ritmo de 11.700 tpd, lo que equivale a un 12% del ritmo en régimen.

Los otros casos, se calcula el VAN para los distintos años obtenidos en el capítulo 3.5, agregando el primer año de ramp-up de un 12% del tonelaje en régimen.

### Caso base

En este caso con los datos mencionados en los puntos anteriores, se realiza un flujo de caja con el fin de obtener el VAN de este caso. A continuación se muestra los valores del VAN[MUS\$].

	Sin Actualizar	Actualizado
Precio Fijo:	4.616	1.161
Precio Variable:	4.505	1.609

Como se muestra a continuación, se observa que en los casos obtenidos con la fórmula se obtiene un VAN mayor que el que se consigue con la planificación de la faena, a excepción del caso 3.

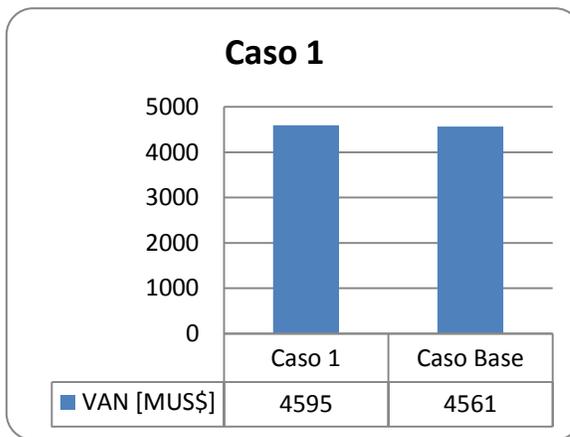


Gráfico 106: Comparación VAN Caso Base y Caso 1

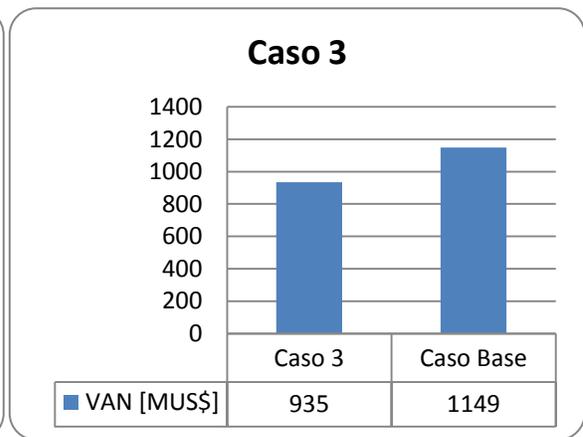


Gráfico 107: Comparación VAN Caso Base y Caso 3

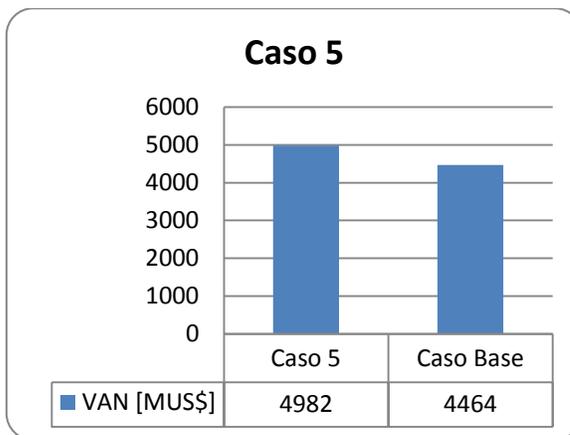


Gráfico 108: Comparación VAN Caso Base y Caso 5

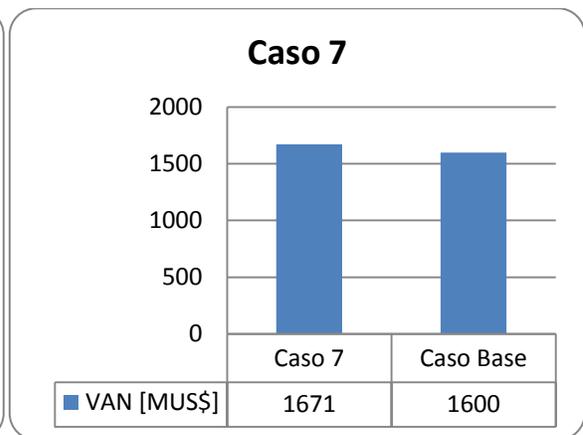


Gráfico 109: Comparación VAN Caso Base y Caso 7

Como observamos en los gráficos comparativos, en los casos 1, 5 y 7 el VAN que se consigue con una vida óptima obtenida mediante la fórmula es mayor que la del caso base.

Esta diferencia se debe principalmente a que la vida útil del yacimiento en el caso base no es la que maximiza el VAN.

Como se vio en el capítulo 3.4, en los casos donde hay tasa de actualización (casos 3 y 7) no hay una concordancia entre fórmula y realidad, es por esto que en estos casos el VAN mayor lo obtiene el que se encuentra más próximo de la vida útil que maximiza el VAN. En el caso 3, el caso base se encuentra más cercano a la vida óptima real por lo que esto se observa en el gráfico al comparar los VAN conseguidos. Y para el caso 7, es éste el que se encuentra más próximo a la vida óptima, generando un VAN más elevado que el caso base.

Si se considera el caso 7 como el más real, debido a las variables que considera en el análisis, se puede inferir que aun se pueden realizar mejoras para lograr maximizar el VAN del caso base.

## 4. Otros Análisis

### 4.1 Caso Práctico Extrapolado

En este capítulo, se realizará una extrapolación de los datos mencionados anteriormente, de modo de obtener datos para distintas capacidades de producción, de esta forma se hará una comparación para identificar el tamaño óptimo de explotación o lo que equivale a la vida óptima económica.

Se toma como caso base, el descrito en el capítulo 3 correspondiente a un ritmo de 98ktpd, y en función de éste se obtienen los casos extrapolados a comparar.

La forma en que se estimaran los costos e inversiones serán basados en los estudios hechos por O'Hara y Suboleski (1992), que sugieren que las curvas de costos de inversión y operativos pueden ser razonablemente aproximados a ecuaciones exponenciales con la forma general

$$\text{Costo} = K \cdot t^x$$

Donde:

K = Constante específica al costo particular

t = Producción [tpd]

x = exponente que varía :

0,5.a 0,7 = típico rango para costos de inversión

0,7 a 0,9 = típico rango para costos de operación en US\$/año

Por lo que para este caso usaremos,

- Proporcional al tonelaje (x=1)

$$I_x = I_{98} \cdot (T_x/T_{98})$$

- Por Factor 0,6 (x=0,6)

$$I_x = I_{98} \cdot (T_x/T_{98})^{0,6}$$

Donde:

$I_x$  = Inversión a estimar

$T_x$  = Tamaño de explotación deseado

$I_{98}$  = Inversión Base

$T_{98}$  = Tamaño de explotación Base

Estas formas de estimar proporcionan una guía de la magnitud de los valores, que para el alcance del estudio son válidas.

Los ítems a extrapolar y la forma en que se harán se detalla a continuación:

**Tabla 10: Forma de Estimación de Inversiones para distintos ritmos de explotación**

<b>INVERSIONES</b>	
General	Se mantiene Constante para todos los Tamaños de Explotación
Mina	Se mantiene Constante para todos los Tamaños de Explotación
Chancado	Por Factor 0,6
Planta concentradora	Por Factor 0,6, pero como el SAG es el de mayor capacidad en el mercado, para capacidades mayores al caso base se deben invertir en 2 Molinos de la mitad de la capacidad deseada
Relaves	Por Factor 0,6
Concentraducto	Por Factor 0,6
Planta de filtro y embarque de concentrado	Por Factor 0,6
Sistema de impulsión de agua	Por Factor 0,6
Infraestructura y servicios	Se mantiene Constante para todos los Tamaños de Explotación
Costos Indirectos	Es el mismo % con respecto a la inversión total
Infraestructura Adm. Owner (línea eléctrica)	Se mantiene Constante para todos los Tamaños de Explotación
Owner cost (equipo de proyecto e insumos)	Se mantiene Constante para todos los Tamaños de Explotación
Prestripping + P&D	Se mantiene Constante para todos los Tamaños de Explotación
Equipos Mina	Proporcional al tonelaje
Formación compañía e indirectos del dueño	Se mantiene Constante para todos los Tamaños de Explotación
Contingencias	Es el mismo % con respecto a la inversión total

**Tabla 11: Formas de estimación de Costos para diferentes ritmos de producción**

Costos	
Costos Fijos	Por Factor 0,9
Costos Variables	Proporcional al tonelaje

Con estas aclaraciones se calcula los valores para las distintas capacidades.

Para la inversión se tiene lo siguiente:

Tabla 12: Inversiones para diferentes ritmos de explotación

INVERSIONES para diferentes ritmos de explotación													
		70	80	90	98	110	120	130	150	175	200	225	250
General	kUS\$	18	18	18	18	18	18	18	18	18	18	18	18
Mina	kUS\$	25	25	25	25	25	25	25	25	25	25	25	25
Chancado	kUS\$	58	62	67	70	76	80	83	91	100	108	116	124
Planta concentradora	kUS\$	217	235	252	265	375	396	415	452	496	537	577	614
Relaves	kUS\$	62	67	72	76	81	86	90	98	107	116	125	133
Concentraducto	kUS\$	44	47	51	53	57	60	63	69	75	82	88	93
Planta de filtro y embarque de concentrado	kUS\$	72	78	84	88	95	100	105	114	125	135	145	155
Sistema de impulsión de agua	kUS\$	186	201	216	227	244	257	269	293	322	349	374	399
Infraestructura y servicios	kUS\$	88	88	88	88	88	88	88	88	88	88	88	88
Costos Indirectos	kUS\$	224	236	248	257	285	296	308	329	356	381	406	430
Infraestructura adm. Owner (línea eléctrica)	kUS\$	94	94	94	94	94	94	94	94	94	94	94	94
Owner cost (equipo de proyecto e insumos)	kUS\$	68	68	68	68	68	68	68	68	68	68	68	68
Prestripping + P&D	kUS\$	183	183	183	183	183	183	183	183	183	183	183	183
Eq.Mina	kUS\$	175	200	225	245	275	300	325	375	438	501	563	626
Formación compañía e indirectos del dueño	kUS\$	162	162	162	162	162	162	162	162	162	162	162	162
Subtotal sin contingencias	kUS\$	1.675	1.766	1.853	1.921	2.125	2.212	2.296	2.460	2.657	2.847	3.032	3.211
Contingencias	kUS\$	94	99	104	108	119	124	129	138	149	160	170	181
<b>TOTAL</b>	<b>kUS\$</b>	<b>1.769</b>	<b>1.865</b>	<b>1.957</b>	<b>2.029</b>	<b>2.245</b>	<b>2.336</b>	<b>2.425</b>	<b>2.598</b>	<b>2.807</b>	<b>3.007</b>	<b>3.202</b>	<b>3.392</b>

Y para lo referente a costos:

Tabla 13: Costos para diferentes ritmos de explotación

Costos Para diferentes Ritmos de explotación													
		70	80	90	98	110	120	130	150	175	200	225	250
Costos Variables	kUS\$/año	302	346	389	423	475	519	562	648	756	864	972	1.080
Costos Fijos	kUS\$/año	1.112	1.254	1.394	1.505	1.670	1.806	1.941	2.208	2.537	2.860	3.180	3.497

Los precios y parámetros económicos son los mismos usados en el capítulo 3.

Precio Cu:

Tabla 14: Precios del Cobre para distintos periodos

Periodo	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11	12	13	14	15	16	17	18	19
Precio [US\$/lb]	2,4	2,5	2,6	2,7	2,5	2,2	1,9	1,7	1,7	1,7	1,7	1,7	1,7	1,7	1,7	1,7	1,7	1,7	1,7

Para periodos mayores se toma como precio largo plazo 1,7 US\$/lb

El resto de los parámetros se indican en la tabla siguiente:

**Tabla 15: Parámetros para realizar el flujo de caja**

Reservas	645.536.000	[ton]
REM	3,5	
Ley de Cu Equivalente	0,64%	[%]
Ley de Cu concentrado	27%	
Recuperación Cu	89,20%	[%]
Tasa de descuento	8	[%]
Impuestos	40	[%]

Con los nuevos datos de costos e inversiones se calculan los flujos de caja para cada escenario. Obteniéndose los resultados que se presentan a continuación.

**Tabla 16: VAN y vidas útiles para distintos ritmos de producción**

Vida Útil	Producción [tpd]	VAN [MUS\$]
25	70	232
22	80	323
20	90	399
18	98	516
16	110	424
15	120	459
14	130	479
12	150	510
10	175	533
9	200	500
8	225	452
7	250	408

Como se observa en la tabla el máximo VAN se obtiene a un ritmo de explotación de 175 ktpd, lo que equivale a una vida óptima de 10 años. Si se recuerda la tabla 9, del capítulo 3.4.1, la vida óptima real <sup>6</sup> que se obtiene para el caso 7 es similar a la que se obtiene en esta oportunidad.

<sup>6</sup> Calculada mediante la iteración de flujos de caja

En el grafico 102, el cambio que se nota en el paso de 98 a 110 ktpd, es debido a que, como se dijo anteriormente, la inversión en la concentradora cambia, debido a la inversión en 2 SAG de la mitad de capacidad en vez de uno de de mayor capacidad, esto debido a que 98ktpd se opera con el SAG más grande del mercado.

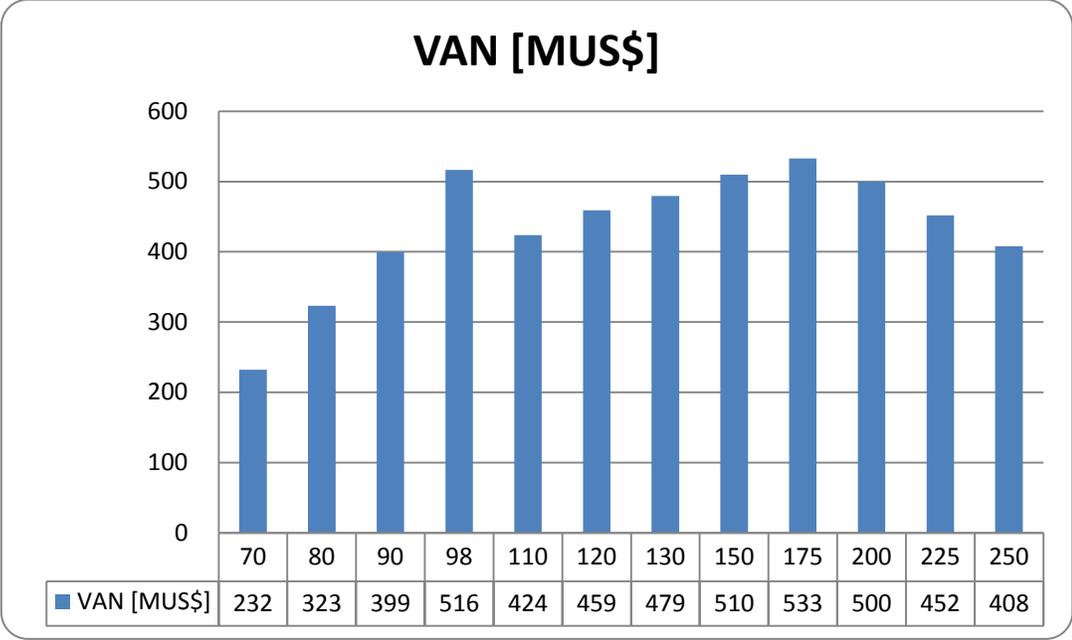


Gráfico 110: VAN para diferentes ritmos de explotación

Gráficamente, se visualiza que los resultados obtenidos para los ritmos de explotación de 98, 150, 175 ktpd no presentan grandes diferencias en cuanto al VAN que consiguen. Por lo que la decisión en la elección del tamaño de explotación, va más allá del análisis del VAN.

La elección de un ritmo de 98ktpd, se puede deber a consideraciones que se mencionaron al comienzo de esta memoria, que dicen relación con la elección de vidas útiles en torno a los 20 años, en desmedro de la opción de 10 años, a pesar de que el VAN es ligeramente mayor.

Al elegir la vida de menor tamaño, se resguarda el proyecto ante posibles eventos que lo pudiesen afectar negativamente.

## 4.2 Caso Potenciales Reservas

Cuando se realiza un proyecto y se define su tamaño de explotación y vida útil, con esto se toma la decisión de realizarlo con las consideraciones estudiadas en su caso, ya sean económicas o de operación, con el objetivo de obtener la mejor rentabilidad económica posible.

Que la explotación se haga efectiva no quiere decir que las exploraciones del mismo yacimiento se detienen, sino que se siguen realizando nuevos sondeos de nuevos sectores o mejorando la calidad de los muestreos de los ya sondeados.

Estas nuevas exploraciones, la mayoría de las veces conducen a aumentar las reservas con que inicialmente se había diseñado la explotación del yacimiento, por lo que la vida útil se ve incrementada, obteniéndose un VAN nuevo.

Pero si ocurre este caso, ya hemos realizado las inversiones y planificaciones para el tamaño inicial, por lo que el ritmo de explotación al aumentar las reservas será el mismo, y lo más probable será que ese ritmo ya no será un ritmo óptimo.

En el capítulo anterior (4.1) se tenía varios ritmos de explotación con que se obtenían VAN altos donde la decisión era complicada, veamos qué pasa con ellos en el caso de descubrirse nuevas reservas.

Supongamos 2 casos:

- Las reservas se incrementan en la mitad del original
- Las reservas aumentan al doble.

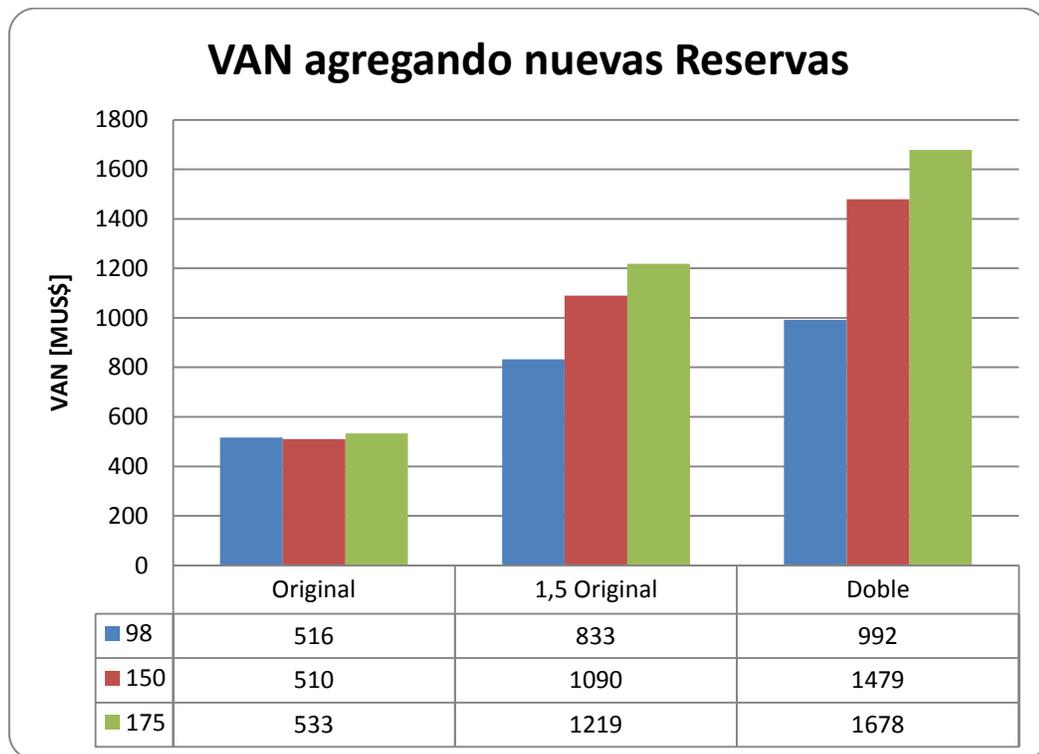


Gráfico 111: VAN para distintas reservas potenciales.

Como vemos, al considerar en el análisis las potenciales reservas la elección del ritmo de explotación mayor, se hace más fuerte.

Y las vidas útiles conseguidas son:

**Tabla 17: Vidas Útiles para Distintos ritmos de producción y reservas**

Ritmo de Explotación [tpd]	Vida Útil [años]		
	Original	1,5 Original	Doble
98.000	18	27	36
150.000	12	18	24
175.000	10	15	20

Con estos análisis la decisión de desarrollar proyectos con ritmos de explotación intensos, tiene argumentos económicos suficientes. Todas estas decisiones estarán sujetas a que tan bien se conoce el yacimiento en que se desarrolla el proyecto.

## 5. Análisis y Conclusiones.

El estudio realizado ha permitido obtener resultados interesantes sobre la vida óptima económica.

- La vida óptima económica es independiente de las reservas que posee el yacimiento.
- Los valores del VAN que se encuentran alrededor del VAN máximo son muy similares, por lo que se puede tener un rango de vida óptima económica, y elegir el más factible.
- Para las condiciones actuales, el rango en que se mueve la vida óptima económica es entre 20 - 30 años aproximadamente

Con el análisis de las tendencias de la vida óptima económica frente a parámetros económicos, se pudo conocer el comportamiento que tiene ésta frente a las variaciones que tienen los parámetros.

El comportamiento que presenta se resume a continuación:

### ✓ Inversión:

- La vida óptima económica aumenta a medida que la inversión crece, y viceversa
- La sensibilidad de la vida óptima, depende de la existencia o no de tasa de descuento. En caso de existir tasa de descuento la variación es de 1,4 años aproximadamente por cada 1[KUS\$/tpd] de inversión, en cambio cuando no hay tasa la variación es de sólo 0,4 años aproximadamente.
- El rango en que se mueve la vida óptima para este parámetro es entre 20 y 35 años para los casos con tasa de actualización, dependiendo de cada caso
- Para los casos sin tasa de actualización, el rango es menor, para precio fijo es entre 20 -25 años y para precio variable el rango disminuye a 10 -15 años.

### ✓ Costos Fijos:

- La vida óptima económica disminuye a medida que los costos fijos crecen, y viceversa
- La sensibilidad de la vida óptima, es similar para todos los casos excepto los casos 5 y 6 (precio variable, sin actualizar). La variación de años por cada 0,1 [US\$/t\_reservas] es de 0,2 años aproximadamente para los casos 5 y 6; y para el resto de los casos es 1,5 años aproximadamente.
- El rango en que varia la vida óptima es entre 20 – 35 años dependiendo del caso.
- Los únicos casos que se salen de este rango son los caso 5 y 6 (precio variable, con tasa de actualización), en que el rango es menor, con valores entre 10 – 14 años.

✓ Costos Variables

- La vida óptima económica aumenta a medida que los costos variables crecen, y viceversa
- Esta variable solo impacta a la vida óptima cuando existe tasa de descuento
- La sensibilidad de la vida óptima es la misma para cualquier caso, y la variación es de 1 año por cada [US\$/t\_mineral] aproximadamente
- El rango en que se mueve la vida óptima es de 20 – 35 años dependiendo del caso

✓ Precio del Cobre.

- La vida óptima económica disminuye a medida que el precio del cobre crece, y viceversa
- La vida óptima es sumamente sensible a este parámetro, la variación es muy similar en todos los casos, y es de 15 años por cada [US\$/lb] aproximadamente.
- El rango que se mueve la vida óptima es el más amplio de todos y es entre 10 – 36 años.

✓ Pendiente del precio del cobre

- Cuando no hay tasa de descuento la diferencia entre tomar un precio creciente o decreciente es grande, lo que provoca rangos distintos de la vida óptima.
- Cuando existe tasa de descuento, la diferencia es menor.
- Precios crecientes generan rangos de vida óptimas mayores, en cambio precios decrecientes vidas más cortas.

✓ Tasa de Descuento

- La vida óptima económica aumenta a medida que la tasa de descuento crece, y viceversa
- El rango en que se mueve la vida óptima es entre 20 – 35 años.

✓ Impuesto

- La vida óptima económica aumenta a medida que la tasa de descuento crece, y viceversa
- El impacto que tiene sobre la vida óptima es menor, las variaciones que genera son mínimas.
- El rango en que se mueve la vida óptima es entre 27 - 32 años.

En lo que respecta a resultados entregados por la fórmula para la vida óptima, estos concuerdan perfectamente con lo que se obtiene con los flujos de caja cuando la tasa de descuento es igual a cero, sin embargo, esto sólo es útil para hacer análisis de tendencias o de casos simplificados, ya que evaluar un proyecto sin tasa de descuento no es adecuado.

Cuando tenemos el caso en que existe tasa de descuento, que ya se acerca a la realidad de evaluación, la fórmula para la obtención de la vida óptima no concuerda con los resultados que arrojan los flujos de caja calculados, sin embargo estas diferencias no invalidan en ningún caso las tendencias en que varía la vida óptima frente a cambios en los parámetros económicos. Sino que la fórmula refleja perfectamente los movimientos que realiza la vida óptima.

El desplazamiento de la curva de vida óptima que se observa cuando se incluye en el análisis la tasa de descuento, es generada por la aproximación que se realiza del factor de actualización, por lo que, se recomienda buscar una mejor aproximación de manera que las diferencias originadas sean aceptables. Si se logra esto, las fórmulas obtenidas pasarían a de ser una herramienta de análisis de tendencias a ser una herramienta activa en la planificación del yacimiento, indicando el tamaño óptimo de explotación; por lo tanto esto agregaría un mayor valor al proyecto.

Si se toma la expresión para la vida óptima del caso 7 como la más representativa de la realidad, ya que a pesar de que no tiene impuesto (como se vio el impacto es muy menor) si posee un precio de cobre variable y tasa de descuento y comparamos los resultados que se obtiene con esta expresión contra los enunciados al comienzo de la memoria para los datos utilizados en esta memoria, tenemos lo siguiente:

❖ Caso 7:

$$n = \sqrt{\frac{10i - (k \cdot P_0 - c_v) \cdot (65r + 16) - a \cdot k \cdot (14 - 750r)}{c \cdot (7 - 36r)}}$$

$$= \sqrt{\frac{10 \cdot 57.2 - (12,5 \cdot P_0 - 11,9) \cdot (65 \cdot 0,08 + 16) + 0,05 \cdot 12,5 \cdot (14 - 750 \cdot 0,08)}{0,13 \cdot (7 - 36 \cdot 0,08)}}$$

$$= 17 \text{ años}$$

❖ Para Taylor (1976):

$$VOE[\text{años}] = 6,5 \times \sqrt[4]{Reservas[\text{Mton}]} = 6,5 \times \sqrt[4]{645 [\text{Mton}]}$$

$$VOE[\text{años}] = 32,8$$

❖ Para Mackenzie (1982):

$$ROE[\text{ton/año}] = 5,63 \times (Reservas[\text{ton}])^{0,756} = 5,63 \times (645.000.000[\text{ton}])^{0,756}$$

$$ROE \left[ \frac{\text{ton}}{\text{año}} \right] = 25.735.674 [\text{ton/año}]$$

$$VOE[\text{años}] = \frac{Reservas}{ROE}$$

$$VOE[\text{años}] = 25,0$$

❖ López Jimeno (1986):

$$VOE[\text{años}] = 5,35 \times (\text{Reservas}[\text{Mton}])^{0,273} = 5,35 \times (645[\text{Mton}])^{0,273}$$

$$VOE[\text{años}] = 31,3$$

Como se nota, las vidas estimadas por los distintos métodos son las que normalmente se usan en el mercado, sin embargo al comparar respecto a los VAN que se obtiene evaluando a las distintas vidas útiles se tienen los siguientes resultados.

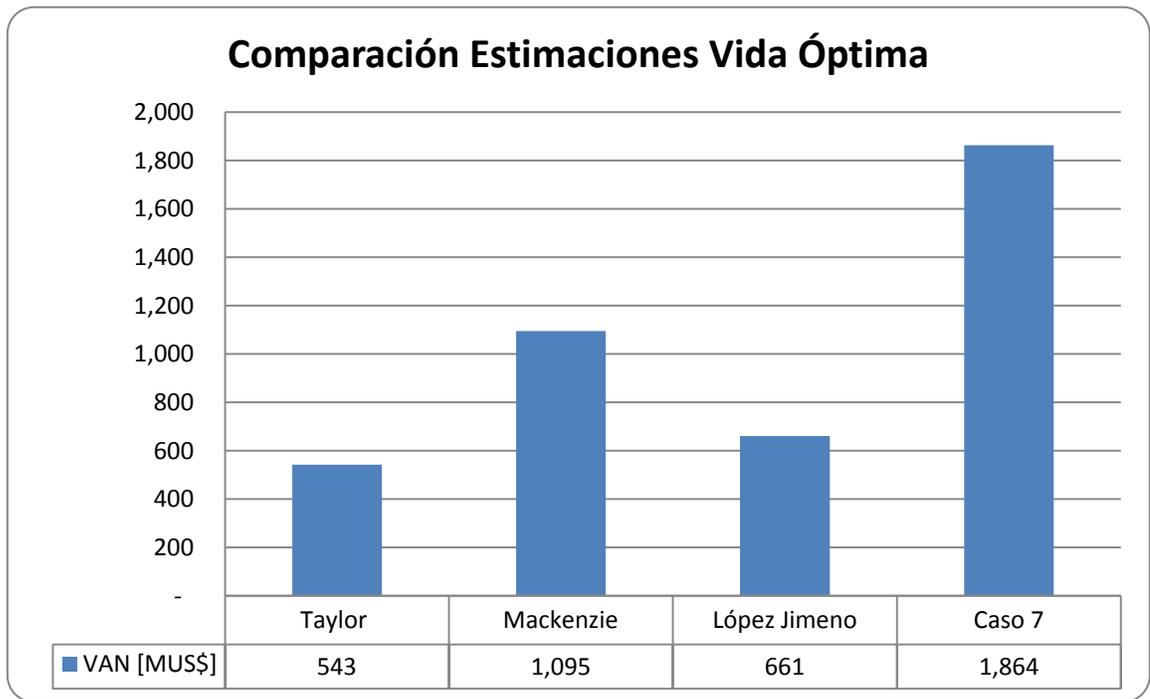


Gráfico 112: Comparación de VAN para estimaciones de VOE

Se observa claramente que a pesar de las deficiencias que presenta el caso 7, se obtiene una vida óptima y ritmo de explotación que maximiza el VAN. Además, este resultado es logrado mediante un análisis económico y no mediante estudios empíricos lo cuales no buscan maximizar el beneficio.

En resumen, los estudios realizados en la presente memoria nos indican que la industria minera debiera apuntar a ritmos de explotación intensos, sin temor de obtener vidas cortas, ya que como se ha reflejado en la experiencia, los yacimientos por lo general aumentan sus reservas cuando éstos ya están en explotación, como han sido los casos de El Tesoro, El Abra, Chuqui por nombrar algunos.

Por otra parte, los resultados obtenidos en este trabajo son consistentes y apuntan a mejorar la estimación de una variable tan determinante en la rentabilidad y factibilidad de un proyecto, como lo es el ritmo óptimo de explotación o vida óptima.

Para finalizar, se recomienda buscar mejores aproximaciones para el factor de actualización de esta manera se podría llegar a estimar la vida óptima con una mayor precisión y certeza.

## 6. Bibliografía

- (1) Bustillo, Manuel. *Manual de evaluación y diseño de explotaciones mineras*
- (2) Rosselot, Juan. *Sistema de estimación de costos para proyectos (Memoria para optar al título de Ingeniero Civil de Minas, Universidad de Chile)*
- (3) Andrés Kettlun L. *Evaluación por Simulación de un Proyecto en la Minería del Cobre Usando la Teoría de Opciones.*
- (4) Smith, Lawrence. *Economic Evaluation and Optimization of Mineral Project*
- (5) Millan, Augusto. *Evaluación y Factibilidad de proyectos Mineros*
- (6) Dagdelen, K. *Open Pit Optimization – Strategies for improving Economics of Mining Projects Through Mine Planning*
- (7) McCarthy, P L. *Setting Plant Capacity*

## 7. Anexos

### A. Cálculo de aproximaciones

#### A.1 Factor de actualización

Al tratar de resolver y obtener una expresión para la vida óptima, se encuentra un gran problema de cálculo, ya que se tiene la siguiente expresión.

$$VAN = -i \cdot \frac{R}{n} + \sum_{j=1}^n \frac{\text{Flujo Anual}}{(1+r)^j}$$

La cual posee la vida óptima (n) en el exponente y denominador, lo cual hace muy difícil encontrar una expresión sencilla y útil de analizar. Por lo que se opta por buscar una aproximación lineal, ya que con ésta se obtiene una expresión apta para ser estudiada

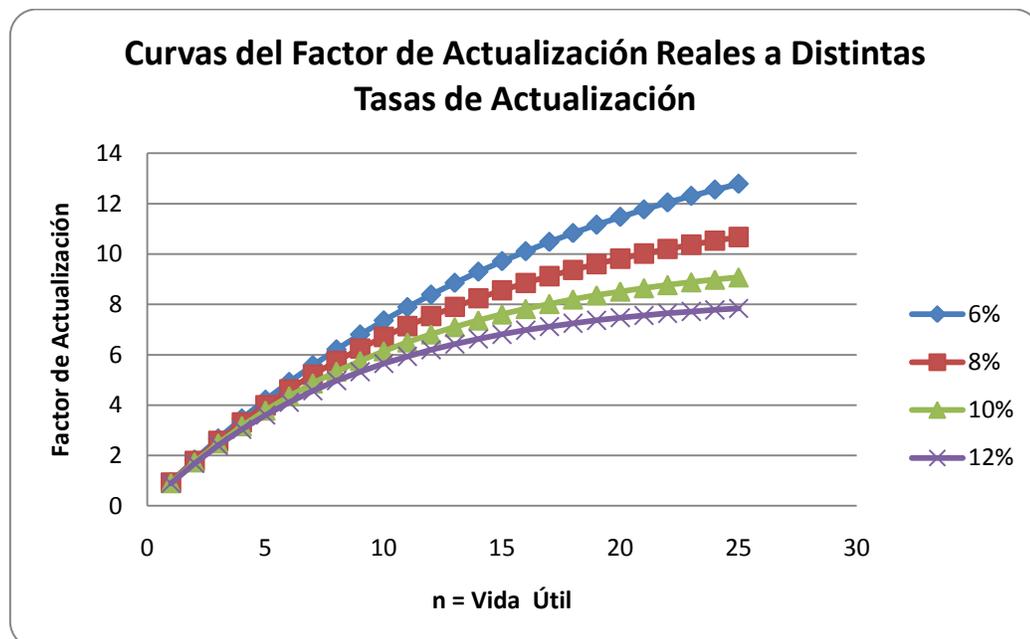
Lo que se desea aproximar es el siguiente factor. Correspondiente al factor de actualización.

$$\sum_{i=1}^n \frac{1}{(1+r)^i} = \left[ \frac{1 - (1+r)^{-n}}{r} \right]$$

A continuación se explica la metodología que se empleó para encontrar una aproximación del factor de actualización que permita realizar un análisis de manera sencilla y práctica. Para esta aproximación se utilizó "Microsoft Office Excel2007".

##### 7.1.1 Acotación del espacio a estudiar

Como los proyectos en general se evalúan en un rango de tasas de actualización, por lo que se optó por reducir el rango en que es válida la aproximación, para tasas entre 6% a 12%. Se graficó el factor de actualización para 4 diferentes tasas: 6%, 8%, 10% y 12%.



Con esto se realiza una regresión lineal para cada curva, lográndose ecuaciones del tipo:

$$y = a \cdot n + b$$

Obteniéndose para:

$$r = 6\% \quad y = 0,4798 \cdot n + 1,9066$$

$$r = 8\% \quad y = 0,3874 \cdot n + 2,126$$

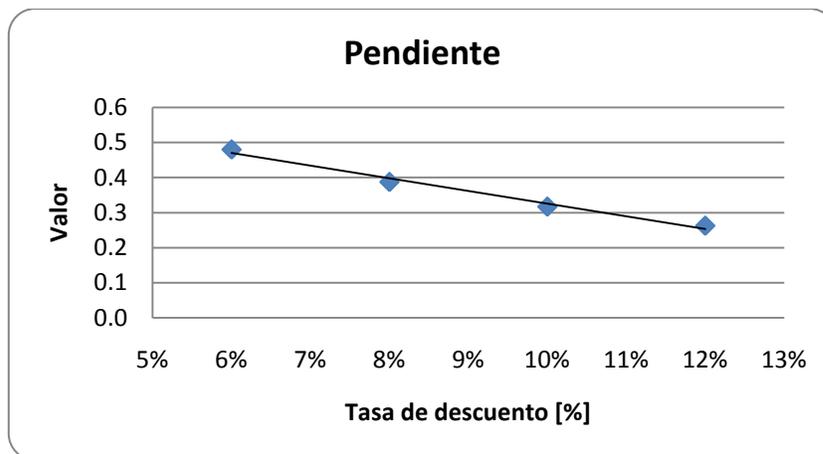
$$r = 10\% \quad y = 0,3171 \cdot n + 2,2464$$

$$r = 12\% \quad y = 0,2629 \cdot n + 2,3012$$

Pero como se necesita una expresión que esté en función tanto de la vida útil ( $n$ ) y la tasa de descuento ( $r$ ), se procede a realizar una linealización de las pendientes y del coeficiente de posición.

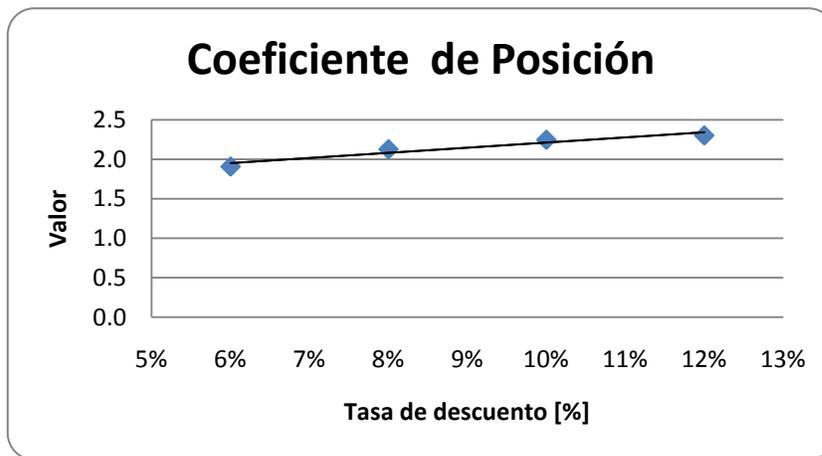
Para la pendiente se tiene el siguiente resultado:

$$y = -3,6x + 0,7$$



Y para el coeficiente de posición

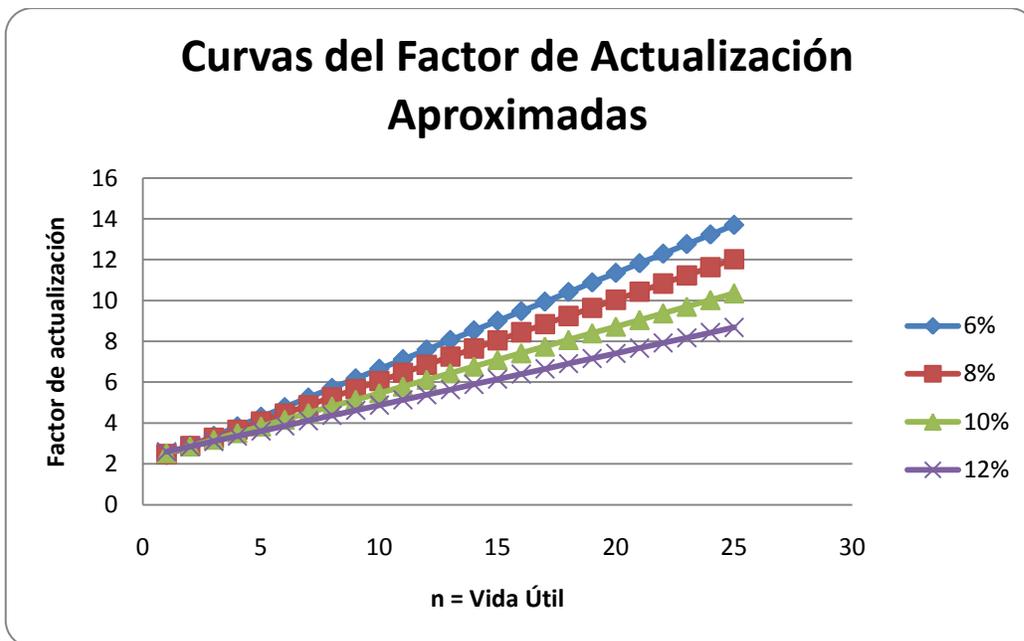
$$y = 6,5x + 1,6$$



Con estas linealizaciones, se construye la aproximación lineal en función de la tasa de descuento y de la vida útil.

$$\left[ \frac{1 - (1 + r)^{-n}}{r} \right] \approx (0,7 - 3,6r) \cdot n + 6,5r + 1,6$$

Gráficamente se obtienen las siguientes curvas.



Es necesario decir que esta linealización del factor de actualización fue la que mejor se aproximó, ya que se intentó con otras constantes, obteniéndose resultados de menor precisión.

## 7.2 Factor de Variación del Precio del Cobre

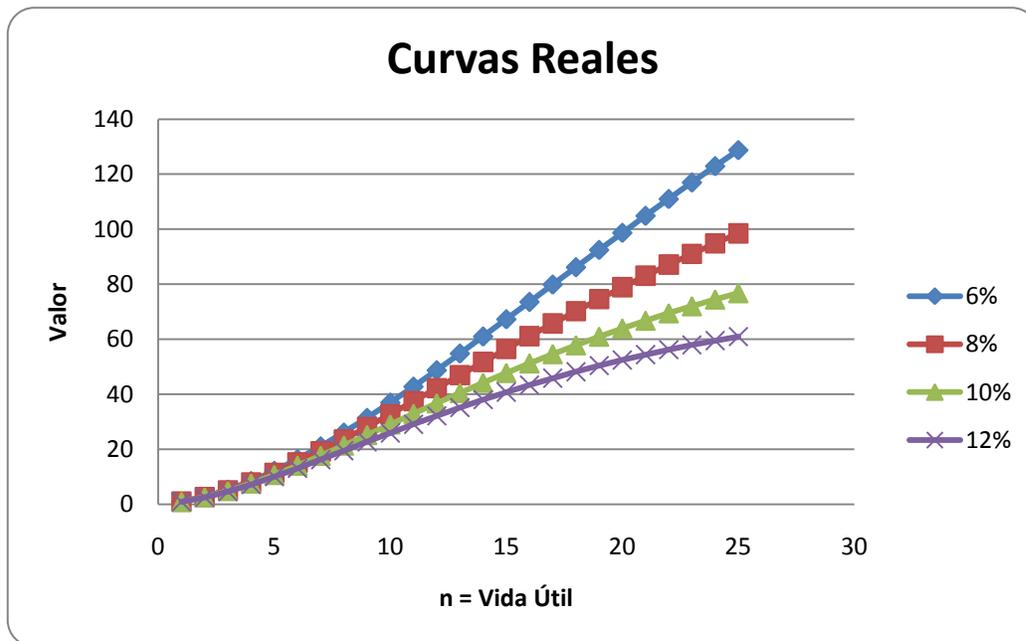
Otra expresión que es necesaria aproximar, es el siguiente.

$$\sum_{i=1}^n \frac{i}{(1+r)^i} = \left[ \frac{(1+r) - (1+r)^{-n} \cdot (nr + r + 1)}{r^2} \right]$$

Esta expresión aparece al actualizar el precio variable

Para realizar se realizó el mismo procedimiento que para el factor de actualización.

Se construyó las curvas para distintas tasas de descuento. Se acoto a las tasas 6% a 12%



Con las curvas graficadas se linealizaron éstas, obteniéndose las siguientes rectas.

$$r = 6\% \quad y = 5,6225 \cdot n - 15,046$$

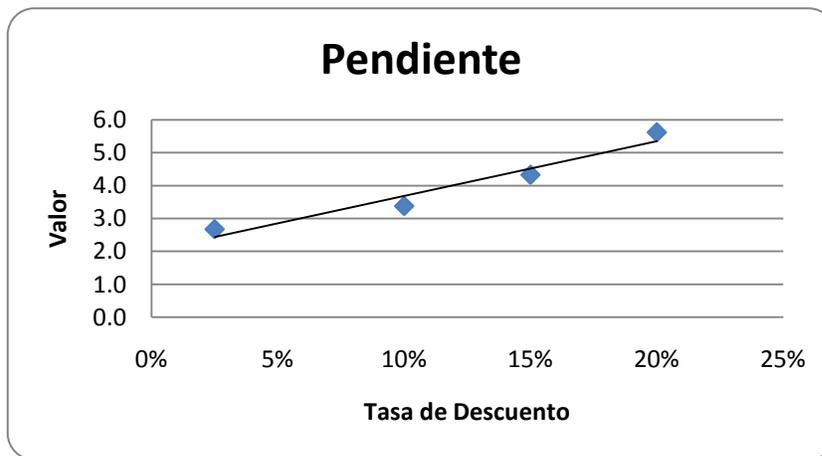
$$r = 8\% \quad y = 4,3282 \cdot n - 8,8102$$

$$r = 10\% \quad y = 3,3788 \cdot n - 4,5729$$

$$r = 12\% \quad y = 2,673 \cdot n - 1,6883$$

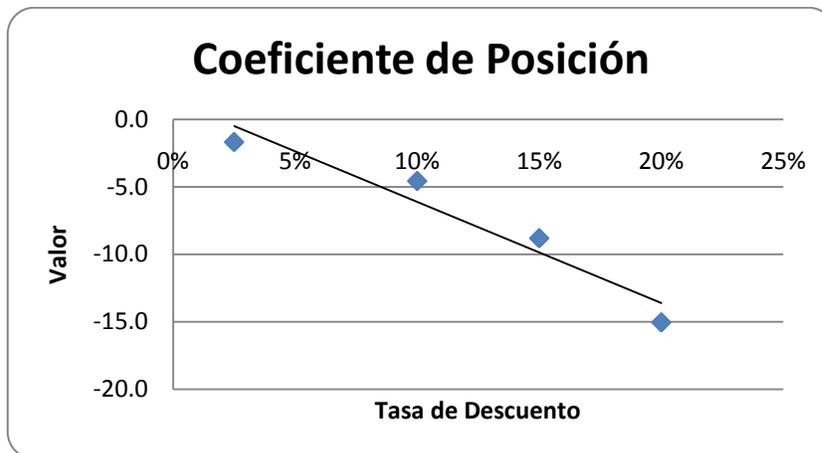
Luego, se buscó una linealización de la pendiente, resultando:

$$y = 16,636x + 2,0251$$



Y para el coeficiente de posición:

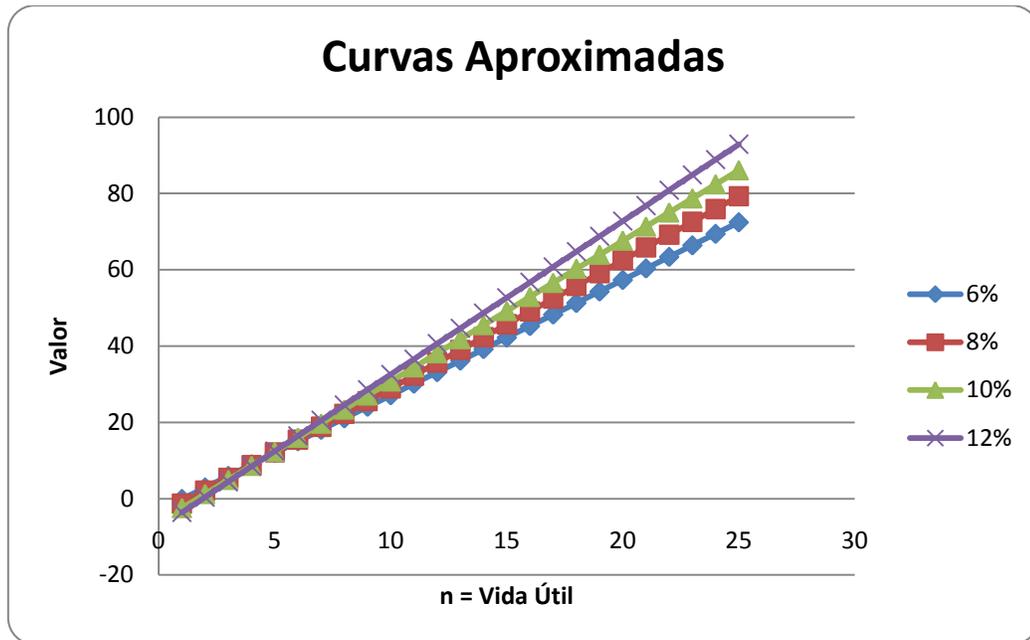
$$y = -74,992x + 1,376$$



Con ambas linealizaciones se construyó la aproximación para la expresión del inicio, obteniéndose la siguiente:

$$\left[ \frac{(1+r) - (1+r)^{-n} \cdot (nr+r+1)}{r^2} \right] \approx (16,6r+2,0) \cdot n - 75r + 1,4$$

Con la expresión encontrada anteriormente se logran conseguir las siguientes curvas.



## 8. Obtención de las Expresiones para la vida óptima

### B.1 Caso 1: Precio Fijo, Sin Impuestos, Sin tasa de actualización

$$VAN = -I + \sum_{i=1}^n F_i$$

$$VAN = -i \cdot T + \sum_{i=1}^n (T \cdot v - R \cdot c - T \cdot c_v)$$

$$VAN = -i \cdot T + (T \cdot v - R \cdot c - T \cdot c_v) \cdot n$$

$$VAN = -i \cdot \frac{R}{n} + \left( \frac{R}{n} \cdot v - R \cdot c - \frac{R}{n} \cdot c_v \right) \cdot n$$

$$\frac{\partial VAN}{\partial n} = \frac{i \cdot R}{n^2} - R \cdot c$$

A partir de la expresión anterior, se busca el óptimo del VAN igualando la ecuación a cero:

$$\frac{\partial VAN}{\partial n} = \frac{i \cdot R}{n^2} - R \cdot c = 0$$

Resolviendo para  $n$  se obtiene la fórmula para la vida óptima:

$$n = \sqrt{\frac{i}{c}}$$

## B.2 Caso 2: Precio Fijo, Con Impuestos, Sin tasa de actualización

$$VAN = -I + \sum_{j=1}^n F_j$$

$$VAN = -i \cdot T + \sum_{j=1}^n (T \cdot v - R \cdot c - T \cdot c_v) - (T \cdot v - R \cdot c - T \cdot c_v - \frac{i \cdot T}{n}) \cdot f$$

$$VAN = -i \cdot T + \sum_{j=1}^n (T \cdot v - R \cdot c - T \cdot c_v) \cdot (1 - f) + \frac{i \cdot T \cdot f}{n}$$

Se reemplaza  $T = \frac{R}{n}$

$$VAN = -i \cdot \frac{R}{n} + \left( \frac{R}{n} \cdot v - R \cdot c - \frac{R}{n} \cdot c_v \right) \cdot (1 - f) \cdot n + i \cdot \frac{R}{n} \cdot f$$

$$VAN = i \cdot \frac{R}{n} \cdot (f - 1) + R \cdot v \cdot (1 - f) - R \cdot c \cdot n \cdot (1 - f) - R \cdot c_v \cdot (1 - f)$$

$$\frac{\partial VAN}{\partial n} = \frac{i \cdot R}{n^2} \cdot (1 - f) - R \cdot c \cdot (1 - f)$$

Se busca el óptimo, para esto se hace  $\frac{\partial VAN}{\partial n} = 0$

$$\frac{\partial VAN}{\partial n} = \frac{i \cdot R}{n^2} \cdot (f - 1) - R \cdot c \cdot (f - 1) = 0$$

Resolviendo para  $n$  se obtiene la fórmula para la vida óptima

$$n = \sqrt{\frac{i}{c}}$$

## B.3 Caso 3: Precio Fijo, Sin Impuestos, Con tasa de actualización

$$VAN = -i \cdot T + \sum_{i=1}^n \frac{T \cdot v - R \cdot c - T \cdot c_v}{(1 + r)^i}$$

$$VAN = -i \cdot T + (T \cdot v - R \cdot c - T \cdot c_v) \cdot \sum_{i=1}^n \frac{1}{(1+r)^i}$$

$$VAN = -i \cdot \frac{R}{n} + \left( \frac{R}{n} \cdot v - R \cdot c - \frac{R}{n} \cdot c_v \right) \cdot \left[ \frac{1 - (1+r)^{-n}}{r} \right]$$

Se usa la siguiente aproximación para los factores de actualización:

$$\left[ \frac{1 + (1+r)^{-n}}{r} \right] \approx (0,7 - 3,6r) \cdot n + 6,5r + 1,6$$

$$VAN = -i \cdot \frac{R}{n} + \left( \frac{R}{n} \cdot v - R \cdot c - \frac{R}{n} \cdot c_v \right) \cdot [(0,7 - 3,6r) \cdot n + 6,5r + 1,6]$$

$$VAN = -i \cdot \frac{R}{n} + \left( \frac{R}{n} \cdot v - R \cdot c - \frac{R}{n} \cdot c_v \right) \cdot [(0,7 - 3,6r) \cdot n + 6,5r + 1,6]$$

$$VAN = -i \cdot \frac{R}{n} + \left( \frac{R}{n} \cdot (v - c_v) - R \cdot c \right) \cdot [(0,7 - 3,6r) \cdot n + 6,5r + 1,6]$$

$$VAN = -i \cdot \frac{R}{n} + R \cdot (v - c_v) \cdot (0,7 - 3,6r) + \frac{R}{n} \cdot (v - c_v) \cdot (6,5r + 1,6) - R \cdot c \cdot (0,7 - 3,6r) \cdot n - R \cdot c \cdot (6,5r + 1,6)$$

$$\frac{\partial VAN}{\partial n} = \frac{i \cdot R}{n^2} - \frac{R}{n^2} \cdot (v - c_v) \cdot (6,5r + 1,6) - R \cdot c \cdot (0,7 - 3,6r)$$

A partir de la expresión anterior, se busca el óptimo del VAN igualando la ecuación a cero:

$$\frac{\partial VAN}{\partial n} = \frac{i \cdot R}{n^2} - \frac{R}{n^2} \cdot (v - c_v) \cdot (6,5r + 1,6) - R \cdot c \cdot (0,7 - 3,6r) = 0$$

Resolviendo para  $n$  se obtiene la fórmula para la vida óptima

$$n = \sqrt{\frac{(10i - (v - c_v) \cdot (6,5r + 1,6))}{c \cdot (7 - 36r)}}$$

#### B.4 Caso 4: Precio Fijo, Con Impuestos, Con tasa de actualización

$$VAN = -I + \sum_{j=1}^n F_j$$

$$VAN = -i \cdot T + \sum_{j=1}^n \frac{(T \cdot v - R \cdot c - T \cdot c_v) - (T \cdot v - R \cdot c - T \cdot c_v - \frac{i \cdot T}{n}) \cdot f}{(1+r)^j}$$

$$VAN = -i \cdot T + \sum_{j=1}^n \frac{(T \cdot v - R \cdot c - T \cdot c_v) \cdot (1-f) + \frac{i \cdot T \cdot f}{n}}{(1+r)^j}$$

$$VAN = -i \cdot T + \left[ (T \cdot v - R \cdot c - T \cdot c_v) \cdot (1-f) + \frac{i \cdot T \cdot f}{n} \right] \cdot \sum_{j=1}^n \frac{1}{(1+r)^j}$$

$$VAN = -i \cdot T + \left[ (T \cdot v - R \cdot c - T \cdot c_v) \cdot (1-f) + \frac{i \cdot T \cdot f}{n} \right] \cdot \left[ \frac{1 - (1+r)^{-n}}{r} \right]$$

Se usa la siguiente aproximación para la aproximación del factor de actualización :

$$\left[ \frac{1 + (1+r)^{-n}}{r} \right] \approx (0,7 - 3,6r) \cdot n + 6,5r + 1,6$$

$$VAN = -i \cdot T + \left[ T \cdot (v - c_v) \cdot (1-f) - R \cdot c \cdot (1-f) + \frac{i \cdot T \cdot f}{n} \right] \cdot [(0,7 - 3,6r) \cdot n + 6,5r + 1,6]$$

Se reemplaza  $T = \frac{R}{n}$

$$VAN = -i \cdot \frac{R}{n} + \left[ \frac{R}{n} \cdot (v - c_v) \cdot (1-f) - R \cdot c \cdot (1-f) + \frac{i \cdot R \cdot f}{n^2} \right] \cdot [0,7 - 3,6r \cdot n + 6,5r + 1,6]$$

$$\begin{aligned} VAN = & -i \cdot \frac{R}{n} + \frac{R}{n} \cdot (v - c_v) \cdot (1-f) \cdot (0,7 - 3,6r) \cdot n - R \cdot c \cdot (1-f) \cdot (0,7 - 3,6r) \cdot n + \frac{i \cdot R \cdot f}{n^2} \\ & \cdot (0,7 - 3,6r) \cdot n + \frac{R}{n} \cdot (v - c_v) \cdot (1-f) \cdot (6,5r + 1,6) - R \cdot c \cdot (1-f) \\ & \cdot (6,5r + 1,6) + \frac{i \cdot R \cdot f}{n^2} \cdot (6,5r + 1,6) \end{aligned}$$

$$\begin{aligned} VAN = & -i \cdot \frac{R}{n} + R \cdot (v - c_v) \cdot (1-f) \cdot (0,7 - 3,6r) - R \cdot c \cdot (1-f) \cdot (0,7 - 3,6r) \cdot n + \frac{i \cdot R \cdot f}{n} \\ & \cdot (0,7 - 3,6r) + \frac{R}{n} \cdot (v - c_v) \cdot (1-f) \cdot (6,5r + 1,6) - R \cdot c \cdot (1-f) \\ & \cdot (6,5r + 1,6) + \frac{i \cdot R \cdot f}{n^2} \cdot (6,5r + 1,6) \end{aligned}$$

$$\begin{aligned} \frac{\partial VAN}{\partial n} = & \frac{i \cdot R}{n^2} - R \cdot c \cdot (1-f) \cdot (0,7 - 3,6r) - \frac{i \cdot R \cdot f}{n^2} \cdot (0,7 - 3,6r) - \frac{R}{n^2} \\ & \cdot (v - c_v) \cdot (1-f) \cdot (6,5r + 1,6) - \frac{2 \cdot i \cdot R \cdot f}{n^3} \cdot (6,5r + 1,6) \end{aligned}$$

Se busca el óptimo, para esto se hace  $\frac{\partial VAN}{\partial n} = 0$

$$\frac{\partial VAN}{\partial n} = \frac{i \cdot R}{n^2} - R \cdot c \cdot (1 - f) \cdot (0,7 - 3,6r) - \frac{i \cdot R \cdot f}{n^2} \cdot (0,7 - 3,6r) - \frac{R}{n^2} \cdot (v - c_v) \cdot (1 - f) \cdot (6,5r + 1,6) - \frac{2 \cdot i \cdot R \cdot f}{n^3} \cdot (6,5r + 1,6) = 0$$

$$\frac{\partial VAN}{\partial n} = -R \cdot c \cdot (1 - f) \cdot (0,7 - 3,6r) \cdot n^3 + [i \cdot R - i \cdot R \cdot f(0,7 - 3,6r) - R(v - c_v)(1 - f)(6,5r + 1,6)] \cdot n - 2 \cdot i \cdot R \cdot f \cdot (6,5r + 1,6) = 0$$

No se obtiene una expresión para la vida óptima

### B.5 Caso 5: Precio Variable, Sin Impuestos, Sin tasa de actualización

$$VAN = -I + \sum_{i=1}^{n=vidaUtil} F_i$$

$$VAN = -i \cdot T + \sum_{i=1}^n (T \cdot k \cdot P_{cu} - Rc - Tc_v)$$

Se reemplaza  $P_{cu} = P_0 + a \cdot t_i$

$$VAN = -i \cdot T + \sum_{i=1}^n (T \cdot k \cdot (P_0 + a \cdot i) - Rc - Tc_v)$$

$$VAN = -i \cdot T + T \cdot k \cdot \sum_{i=1}^n (P_0 + a \cdot i) - (R \cdot c + T \cdot c_v) \cdot n$$

$$VAN = \frac{-i \cdot R}{n} + \frac{R}{n} \cdot k \cdot \left[ P_0 \cdot n + a \cdot \sum_{i=1}^n i \right] - \left( R \cdot c + \frac{R}{n} \cdot c_v \right) \cdot n$$

$$VAN = \frac{-i \cdot R}{n} + \frac{R}{n} \cdot k \cdot \left[ P_0 \cdot n + a \cdot \left( \frac{n^2 + n}{2} \right) \right] - R \cdot c \cdot n + R \cdot c_v$$

$$VAN = \frac{-i \cdot R}{n} + R \cdot k \cdot P_0 + \frac{R \cdot k \cdot a \cdot n}{2} + \frac{R \cdot k \cdot a}{2} - R \cdot c \cdot n + R \cdot c_v$$

$$\frac{\partial VAN}{\partial n} = \frac{i \cdot R}{n^2} + \frac{R \cdot k \cdot a}{2} - R \cdot c$$

A partir de la expresión anterior, se busca el óptimo del VAN igualando la ecuación a cero:

$$\frac{\partial VAN}{\partial n} = \frac{i \cdot R}{n^2} + \frac{R \cdot k \cdot a}{2} - R \cdot c = 0$$

Resolviendo para  $n$  se obtiene la fórmula para la vida óptima :

$$n = \sqrt{\frac{2 \cdot i}{2c - k \cdot a}}$$

## B.6 Caso 6: Precio Variable, Con Impuestos, Sin tasa de actualización

$$VAN = -I + \sum_{j=1}^{n=vidaUtil} F_j$$

$$VAN = -i \cdot T + \sum_{j=1}^n (T \cdot k \cdot P_{cu} - R \cdot c - T \cdot c_v) - (T \cdot k \cdot P_{cu} - R \cdot c - T \cdot c_v - \frac{i \cdot T}{n}) \cdot f$$

$$VAN = -i \cdot T + \sum_{j=1}^n (T \cdot k \cdot P_{cu} - R \cdot c - T \cdot c_v) \cdot (1 - f) + \frac{i \cdot T \cdot f}{n}$$

$$VAN = -i \cdot T + \sum_{j=1}^n T \cdot k \cdot P_{cu} \cdot (1 - f) - R \cdot c \cdot (1 - f) - T \cdot c_v \cdot (1 - f) + \frac{i \cdot T \cdot f}{n}$$

Se reemplaza  $P_{cu} = P_0 + a \cdot j$

$$VAN = -i \cdot T + T \cdot k \cdot (1 - f) \cdot \sum_{j=1}^n (P_0 + a \cdot j) - R \cdot c \cdot n \cdot (1 - f) - T \cdot c_v \cdot n \cdot (1 - f) + i \cdot T \cdot f$$

$$VAN = -i \cdot T + T \cdot k \cdot P_0 \cdot n \cdot (1 - f) + T \cdot k \cdot a \cdot (1 - f) \cdot \sum_{j=1}^n j - R \cdot c \cdot n \cdot (1 - f) - T \cdot c_v \cdot n \cdot (1 - f) + i \cdot T \cdot f$$

$$VAN = -i \cdot T + T \cdot k \cdot P_0 \cdot n \cdot (1 - f) + T \cdot k \cdot a \cdot (1 - f) \cdot \left( \frac{n^2 + n}{2} \right) - R \cdot c \cdot n \cdot (1 - f) - T \cdot c_v \cdot n \cdot (1 - f) + i \cdot T \cdot f$$

Se reemplaza  $T = \frac{R}{n}$

$$VAN = -i \cdot \frac{R}{n} + \frac{R}{n} \cdot k \cdot P_0 \cdot n \cdot (1-f) + \frac{R}{n} \cdot k \cdot a \cdot (1-f) \cdot \frac{n^2}{2} + \frac{R}{n} \cdot k \cdot a \cdot \frac{n}{2} \cdot (1-f) - R \cdot c \cdot n \\ \cdot (1-f) - \frac{R}{n} \cdot c_v \cdot n \cdot (1-f) + i \cdot \frac{R}{n} \cdot f$$

$$VAN = -i \cdot \frac{R}{n} + R \cdot k \cdot P_0 \cdot (1-f) + R \cdot k \cdot a \cdot (1-f) \cdot \frac{n}{2} + R \cdot k \cdot a \cdot \frac{1}{2} \cdot (1-f) - R \cdot c \cdot n \\ \cdot (1-f) - R \cdot c_v \cdot (1-f) + i \cdot \frac{R}{n} \cdot f$$

$$\frac{\partial VAN}{\partial n} = \frac{i \cdot R}{n^2} + \frac{R \cdot k \cdot a \cdot (1-f)}{2} - R \cdot c \cdot (1-f) - \frac{i \cdot R \cdot f}{n^2}$$

$$\frac{\partial VAN}{\partial n} = \frac{i \cdot R}{n^2} \cdot (1-f) + \frac{R \cdot k \cdot a \cdot (1-f)}{2} - R \cdot c \cdot (1-f)$$

Se busca el óptimo, para esto se hace  $\frac{\partial VAN}{\partial n} = 0$

$$\frac{\partial VAN}{\partial n} = \frac{i \cdot R}{n^2} \cdot (1-f) + \frac{R \cdot k \cdot a \cdot (1-f)}{2} - R \cdot c \cdot (1-f) = 0$$

$$\frac{\partial VAN}{\partial n} = \frac{i}{n^2} + \frac{k \cdot a}{2} - c = 0$$

Resolviendo para  $n$  se obtiene la fórmula para la vida óptima :

$$n = \sqrt{\frac{2 \cdot i}{2c - k \cdot a}}$$

## B.7 Caso 7: Precio Variable, Sin Impuestos, Con tasa de actualización

$$VAN = -I + \sum_{i=1}^{n=vidaUtil} F_i$$

$$VAN = -i \cdot T + \sum_{i=1}^n \frac{(T \cdot k \cdot P_{Cu} - R \cdot c - T \cdot c_v)}{(1+r)^i}$$

$$VAN = -i \cdot T + T \cdot k \cdot \sum_{i=1}^n \frac{P_0 + a \cdot i}{(1+r)^i} - (R \cdot c + T \cdot c_v) \cdot \sum_{i=1}^n \frac{1}{(1+r)^i}$$

$$VAN = \frac{-i \cdot R}{n} + \frac{R}{n} \cdot k \left[ P_0 \cdot \sum_{i=1}^n \frac{1}{(1+r)^i} + a \cdot \sum_{i=1}^n \frac{i}{(1+r)^i} \right] - \left( R \cdot c + \frac{R}{n} \cdot c_v \right) \cdot \sum_{i=1}^n \frac{1}{(1+r)^i}$$

$$VAN = \frac{-i \cdot R}{n} + \frac{R \cdot k \cdot a}{n} \cdot \sum_{i=1}^n \frac{i}{(1+r)^i} - \left( R \cdot c + \frac{R \cdot c_v}{n} - \frac{R \cdot k \cdot P_0}{n} \right) \cdot \sum_{i=1}^n \frac{1}{(1+r)^i}$$

$$VAN = \frac{-i \cdot R}{n} + \frac{R \cdot k \cdot a}{n} \cdot \left[ \frac{(1+r) - (1+r)^{-n} \cdot (nr+r+1)}{r^2} \right] - \left( R \cdot c + \frac{R \cdot c_v}{n} - \frac{R \cdot k \cdot P_0}{n} \right) \cdot \left[ \frac{1 - (1+r)^{-n}}{r} \right]$$

Se usan las siguientes aproximaciones para los factores de actualización:

$$\left[ \frac{1 - (1+r)^{-n}}{r} \right] \approx (0,7 - 3,6r) \cdot n + 6,5r + 1,6$$

$$\left[ \frac{(1+r) - (1+r)^{-n} \cdot (nr+r+1)}{r^2} \right] \approx (16,6r+2,0) \cdot n - 75r + 1,4$$

$$VAN = \frac{-i \cdot R}{n} + \frac{R \cdot k \cdot a}{n} \cdot [(16,6r+2,0) \cdot n - 75r + 1,4] - \left( R \cdot c + \frac{R \cdot c_v}{n} - \frac{R \cdot k \cdot P_0}{n} \right) \cdot [(0,7 - 3,6r) \cdot n + 6,5r + 1,6]$$

$$VAN = \frac{-i \cdot R}{n} + \frac{R \cdot k \cdot a}{n} \cdot [1,4 - 75r] + R \cdot k \cdot a \cdot (16,6r+2,0) - R \cdot c \cdot (0,7 - 3,6r) \cdot n - R \cdot c_v \cdot (0,7 - 3,6r) + R \cdot k \cdot P_0 \cdot (0,7 - 3,6r) - \frac{6,5r + 1,6}{n} \cdot [R \cdot k \cdot P_0 - R \cdot c_v] - (6,5r + 1,6) \cdot R \cdot c$$

$$\frac{\partial VAN}{\partial n} = \frac{i \cdot R}{n^2} - \frac{R \cdot k \cdot a}{n^2} \cdot [1,4 - 75r] - R \cdot c \cdot (0,7 - 3,6r) - \frac{6,5r + 1,6}{n^2} \cdot [R \cdot k \cdot P_0 - R \cdot c_v]$$

A partir de la expresión anterior, se busca el óptimo del VAN igualando la ecuación a cero :

$$\frac{\partial VAN}{\partial n} = \frac{i \cdot R}{n^2} - \frac{R \cdot k \cdot a}{n^2} \cdot [1,4 - 75r] - R \cdot c \cdot (0,7 - 3,6r) - \frac{R \cdot (6,5r + 1,6)}{n^2} \cdot [k \cdot P_0 - c_v] = 0$$

Resolviendo para  $n$  se obtiene la fórmula para la vida óptima :

$$n = \sqrt{\frac{10i - (k \cdot P_0 - c_v) \cdot (65r + 16) - a \cdot k \cdot (14 - 750r)}{c \cdot (7 - 36r)}}$$

## B.8 Caso 8: Precio Variable, Con Impuestos, Con tasa de actualización

$$VAN = -I + \sum_{j=1}^{n=vidaUtil} F_j$$

$$VAN = -i \cdot T + \sum_{j=1}^n \frac{(T \cdot k \cdot P_{Cu} - R \cdot c - T \cdot c_v) - (T \cdot k \cdot P_{Cu} - R \cdot c - T \cdot c_v - \frac{i \cdot T}{n}) \cdot f}{(1+r)^j}$$

$$VAN = -i \cdot T + \sum_{j=1}^n \frac{(T \cdot k \cdot P_{Cu} - R \cdot c - T \cdot c_v) \cdot (1-f) + \frac{i \cdot T \cdot f}{n}}{(1+r)^j}$$

$$VAN = -i \cdot T + T \cdot k \cdot (1-f) \cdot \sum_{j=1}^n \frac{P_{Cu}}{(1+r)^j} - \left[ (R \cdot c + T \cdot c_v) \cdot (1-f) - \frac{i \cdot T \cdot f}{n} \right] \cdot \sum_{j=1}^n \frac{1}{(1+r)^j}$$

Se reemplaza  $P_{Cu} = P_0 + a \cdot j$

$$VAN = -i \cdot T + T \cdot k \cdot (1-f) \cdot \sum_{j=1}^n \frac{P_0 + a \cdot j}{(1+r)^j} - \left[ (R \cdot c + T \cdot c_v) \cdot (1-f) - \frac{i \cdot T \cdot f}{n} \right] \cdot \sum_{j=1}^n \frac{1}{(1+r)^j}$$

$$VAN = -i \cdot T + T \cdot k \cdot P_0 \cdot (1-f) \cdot \sum_{j=1}^n \frac{1}{(1+r)^j} + T \cdot k \cdot a \cdot (1-f) \cdot \sum_{j=1}^n \frac{j}{(1+r)^j} - \left[ (R \cdot c + T \cdot c_v) \cdot (1-f) - \frac{i \cdot T \cdot f}{n} \right] \cdot \sum_{j=1}^n \frac{1}{(1+r)^j}$$

$$VAN = -i \cdot T + T \cdot k \cdot a \cdot (1-f) \cdot \sum_{j=1}^n \frac{j}{(1+r)^j} - \left[ (R \cdot c + T \cdot c_v - T \cdot k \cdot P_0) \cdot (1-f) - \frac{i \cdot T \cdot f}{n} \right] \cdot \sum_{j=1}^n \frac{1}{(1+r)^j}$$

$$VAN = -i \cdot T + T \cdot k \cdot a \cdot (1-f) \cdot \left[ \frac{(1+r) - (1+r)^{-n} \cdot (nr + r + 1)}{r^2} \right] - \left[ (R \cdot c + T \cdot c_v - T \cdot k \cdot P_0) \cdot (1-f) - \frac{i \cdot T \cdot f}{n} \right] \cdot \left[ \frac{1 - (1+r)^{-n}}{r} \right]$$

Se usan las siguientes aproximaciones para los factores de actualización:

$$\left[ \frac{1 - (1+r)^{-n}}{r} \right] \approx (0,7 - 3,6r) \cdot n + 6,5r + 1,6$$

$$\left[ \frac{(1+r) - (1+r)^{-n} \cdot (nr + r + 1)}{r^2} \right] \approx (16,6r + 2,0) \cdot n - 75r + 1,4$$

$$VAN = -i \cdot T + T \cdot k \cdot a \cdot (1-f) \cdot [(16,6r + 2,0) \cdot n - 75r + 1,4] \\ - \left[ (R \cdot c + T \cdot c_v - T \cdot k \cdot P_0) \cdot (1-f) - \frac{i \cdot T \cdot f}{n} \right] \cdot [(0,7 - 3,6r) \cdot n + 6,5r + 1,6]$$

Se reemplaza  $T = \frac{R}{n}$

$$VAN = \frac{-i \cdot R}{n} + \frac{R \cdot k \cdot a}{n} \cdot (1-f) \cdot [(16,6r + 2,0) \cdot n - 75r + 1,4] \\ - \left[ \left( R \cdot c + \frac{R \cdot c_v}{n} - \frac{R \cdot k \cdot P_0}{n} \right) \cdot (1-f) - \frac{i \cdot R \cdot f}{n^2} \right] \cdot [(0,7 - 3,6r) \cdot n + 6,5r + 1,6]$$

$$VAN = \frac{-i \cdot R}{n} + \frac{R \cdot k \cdot a}{n} \cdot (1-f) \cdot [(16,6r + 2,0) \cdot n - 75r + 1,4] \\ - \left[ R \cdot c \cdot (1-f) + \frac{R}{n} \cdot (c_v - k \cdot P_0) \cdot (1-f) - \frac{i \cdot R \cdot f}{n^2} \right] \\ \cdot [(0,7 - 3,6r) \cdot n + 6,5r + 1,6]$$

$$VAN = \frac{-i \cdot R}{n} + \frac{R \cdot k \cdot a}{n} \cdot (1-f) \cdot [-75r + 1,4] - \frac{R \cdot k \cdot a}{n} \\ \cdot (1-f) \cdot (16,6r + 2,0) \cdot n - R \cdot c \cdot (1-f) \cdot (0,7 - 3,6r) \cdot n - \frac{R}{n} \cdot (c_v - k \cdot P_0) \\ \cdot (1-f) \cdot (0,7 - 3,6r) \cdot n + \frac{i \cdot R \cdot f}{n^2} \cdot (0,7 - 3,6r) \cdot n - R \cdot c \cdot (1-f) \\ \cdot (6,5r + 1,6) - \frac{R}{n} \cdot (c_v - k \cdot P_0) \cdot (1-f) \cdot (6,5r + 1,6) - \frac{i \cdot R \cdot f}{n^2} \cdot (6,5r + 1,6)$$

$$VAN = \frac{-i \cdot R}{n} + \frac{R \cdot k \cdot a}{n} \cdot (1-f) \cdot [-75r + 1,4] - R \cdot k \cdot a \\ \cdot (1-f) \cdot (16,6r + 2,0) - R \cdot c \cdot (1-f) \cdot (0,7 - 3,6r) \cdot n - R \cdot (c_v - k \cdot P_0) \\ \cdot (1-f) \cdot (0,7 - 3,6r) + \frac{i \cdot R \cdot f}{n} \cdot (0,7 - 3,6r) + R \cdot c \cdot (1-f) \\ \cdot (6,5r + 1,6) - \frac{R}{n} \cdot (c_v - k \cdot P_0) \cdot (1-f) \cdot (6,5r + 1,6) - \frac{i \cdot R \cdot f}{n^2} \cdot (6,5r + 1,6)$$

$$\frac{\partial VAN}{\partial n} = \frac{i \cdot R}{n^2} - \frac{R \cdot k \cdot a \cdot (1-f) \cdot [-75r + 1,4]}{n^2} - R \cdot c \cdot (1-f) \cdot (0,7 - 3,6r) - \frac{i \cdot R \cdot f \cdot (0,7 - 3,6r)}{n^2} + \frac{R \cdot (c_v - k \cdot P_0) \cdot (1-f) \cdot (6,5r + 1,6)}{n^2} - \frac{2 \cdot i \cdot R \cdot f \cdot (6,5r + 1,6)}{n^3}$$

$$\frac{\partial VAN}{\partial n} = \frac{1}{n^2} \cdot \{i - k \cdot a \cdot (1-f) \cdot [-75r + 1,4] - i \cdot f \cdot (0,7 - 3,6r) + (c_v - k \cdot P_0) \cdot (1-f) \cdot (6,5r + 1,6)\} - c \cdot (1-f) \cdot (0,7 - 3,6r) - \frac{2 \cdot i \cdot f \cdot (6,5r + 1,6)}{n^3}$$

Se busca el óptimo, para esto se hace  $\frac{\partial VAN}{\partial n} = 0$

$$\frac{\partial VAN}{\partial n} = n \cdot \{i - k \cdot a \cdot (1-f) \cdot [-75r + 1,4] - i \cdot f \cdot (0,7 - 3,6r) + (c_v - k \cdot P_0) \cdot (1-f) \cdot (6,5r + 1,6)\} - c \cdot (1-f) \cdot (0,7 - 3,6r) \cdot n^3 - 2 \cdot i \cdot f \cdot (6,5r + 1,6) = 0$$

En este caso tampoco se obtiene una expresión para la vida óptima.

## 9. Tablas de Valores del VAN, Capítulo 3.4

Tabla 18: Resultados Vida Óptima variando Reservas - Caso 1

Años	Variando Reservas				
	VAN				
	250 Mton	500 Mton	645 Mton	1500 Mton	2000 Mton
	250	500	645	1500	2000
5	171	342	441	1,027	1,369
6	611	1,223	1,577	3,668	4,891
7	916	1,833	2,364	5,499	7,332
8	1,137	2,274	2,934	6,823	9,097
9	1,302	2,603	3,358	7,810	10,413
10	1,427	2,853	3,681	8,560	11,414
11	1,523	3,046	3,930	9,139	12,185
12	1,598	3,196	4,123	9,588	12,784
13	1,656	3,313	4,274	9,939	13,252

14	1,702	3,404	4,391	10,211	13,615
15	1,737	3,474	4,481	10,421	13,895
16	1,763	3,527	4,550	10,581	14,108
17	1,783	3,566	4,600	10,699	14,265
18	1,797	3,594	4,636	10,782	14,376
19	1,806	3,612	4,659	10,836	14,447
20	1,811	3,621	4,672	10,864	14,486
21	1,812	3,624	4,675	10,872	14,496
22	1,810	3,620	4,670	10,861	14,482
23	1,806	3,611	4,659	10,834	14,446
24	1,799	3,598	4,641	10,793	14,391
25	1,790	3,580	4,618	10,740	14,320
26	1,779	3,559	4,591	10,676	14,235
27	1,767	3,534	4,559	10,602	14,137
28	1,753	3,507	4,524	10,520	14,027
29	1,738	3,477	4,485	10,430	13,906

Tabla 19: Resultados Vida Óptima variando Precio - Caso 1

Años	Variando Precio				
	VAN				
	1.7 [US\$/lb]	2 [US\$/lb]	2.5 [US\$/lb]	2.8 [US\$/lb]	3.3 [US\$/lb]
5	- 1,589	848	4,909	7,346	11,407
6	- 452	1,985	6,046	8,482	12,544
7	336	2,773	6,834	9,270	13,331
8	906	3,342	7,404	9,840	13,901
9	1,330	3,767	7,828	10,265	14,326
10	1,653	4,090	8,151	10,588	14,649
11	1,902	4,339	8,400	10,837	14,898
12	2,096	4,533	8,594	11,030	15,091
13	2,247	4,683	8,744	11,181	15,242
14	2,364	4,801	8,862	11,298	15,360
15	2,454	4,891	8,952	11,389	15,450
16	2,523	4,960	9,021	11,457	15,519
17	2,574	5,010	9,072	11,508	15,569
18	2,609	5,046	9,107	11,544	15,605
19	2,633	5,069	9,130	11,567	15,628
20	2,645	5,082	9,143	11,580	15,641
21	2,648	5,085	9,146	11,583	15,644
22	2,644	5,080	9,141	11,578	15,639
23	2,632	5,069	9,130	11,567	15,628
24	2,614	5,051	9,112	11,549	15,610
25	2,592	5,028	9,089	11,526	15,587
26	2,564	5,001	9,062	11,499	15,560
27	2,532	4,969	9,030	11,467	15,528
28	2,497	4,933	8,995	11,431	15,492
29	2,458	4,895	8,956	11,392	15,454

Tabla 20: Resultados Vida Óptima variando Inversión - Caso 1

Años	Variando Inversión			
	VAN			
	16 [kUS\$/tpd]	20 [kUS\$/tpd]	24 [kUS\$/tpd]	28 [kUS\$/tpd]
5	2,106	691	- 724	- 2,139
6	2,965	1,786	607	- 572
7	3,555	2,544	1,534	523
8	3,976	3,092	2,208	1,323
9	4,285	3,499	2,713	1,927
10	4,516	3,808	3,101	2,394
11	4,689	4,046	3,403	2,760
12	4,820	4,230	3,641	3,051
13	4,917	4,373	3,829	3,285
14	4,989	4,483	3,978	3,473
15	5,040	4,568	4,096	3,625
16	5,074	4,631	4,189	3,747
17	5,094	4,678	4,261	3,845
18	5,102	4,709	4,316	3,923
19	5,101	4,729	4,356	3,984
20	5,092	4,738	4,384	4,030
21	5,075	4,738	4,401	4,064
22	5,052	4,731	4,409	4,088
23	5,024	4,717	4,409	4,102
24	4,992	4,697	4,402	4,107
25	4,955	4,672	4,389	4,106
26	4,915	4,642	4,370	4,098
27	4,871	4,609	4,347	4,085
28	4,824	4,572	4,319	4,066
29	4,775	4,531	4,288	4,044

Tabla 21: Resultados Vida Óptima variando Costos Fijos - Caso 1

Variando Costos Fijos					
VAN					
Años	0.08 [US\$/ton]	0.1 [US\$/ton]	0.12 [US\$/ton]	0.16 [US\$/ton]	0.2 [US\$/ton]
5	603	539	474	345	216
6	1,772	1,695	1,617	1,462	1,307
7	2,592	2,502	2,412	2,231	2,050
8	3,195	3,091	2,988	2,781	2,575
9	3,652	3,535	3,419	3,187	2,954
10	4,007	3,878	3,749	3,490	3,232
11	4,288	4,146	4,004	3,720	3,436
12	4,514	4,359	4,204	3,894	3,584
13	4,697	4,529	4,361	4,025	3,690
14	4,846	4,666	4,485	4,123	3,762
15	4,969	4,775	4,582	4,194	3,807
16	5,070	4,863	4,657	4,244	3,831
17	5,153	4,933	4,714	4,275	3,836
18	5,221	4,989	4,756	4,291	3,827
19	5,276	5,031	4,786	4,295	3,805
20	5,321	5,063	4,805	4,288	3,772
21	5,357	5,086	4,814	4,272	3,730
22	5,384	5,100	4,816	4,248	3,680
23	5,405	5,108	4,811	4,217	3,623
24	5,420	5,110	4,800	4,180	3,561
25	5,429	5,106	4,784	4,138	3,492
26	5,434	5,098	4,762	4,091	3,420
27	5,434	5,086	4,737	4,040	3,343
28	5,431	5,070	4,708	3,985	3,262
29	5,425	5,050	4,676	3,927	3,178

Tabla 22: Resultados Vida Óptima variando Reservas - Caso 2

Años	Variando Reservas				
	VAN				
	250 Mton	500 Mton	645 Mton	1500 Mton	2000 Mton
5	103	205	265	616	821
6	367	734	946	2,201	2,934
7	550	1,100	1,419	3,299	4,399
8	682	1,365	1,760	4,094	5,458
9	781	1,562	2,015	4,686	6,248
10	856	1,712	2,209	5,136	6,848
11	914	1,828	2,358	5,483	7,311
12	959	1,918	2,474	5,753	7,671
13	994	1,988	2,564	5,963	7,951
14	1,021	2,042	2,634	6,127	8,169
15	1,042	2,084	2,689	6,253	8,337
16	1,058	2,116	2,730	6,349	8,465
17	1,070	2,140	2,760	6,419	8,559
18	1,078	2,156	2,782	6,469	8,625
19	1,084	2,167	2,796	6,501	8,668
20	1,086	2,173	2,803	6,519	8,692
21	1,087	2,174	2,805	6,523	8,698
22	1,086	2,172	2,802	6,517	8,689
23	1,083	2,167	2,795	6,501	8,667
24	1,079	2,159	2,785	6,476	8,635
25	1,074	2,148	2,771	6,444	8,592
26	1,068	2,135	2,754	6,406	8,541
27	1,060	2,120	2,735	6,361	8,482
28	1,052	2,104	2,714	6,312	8,416
29	1,043	2,086	2,691	6,258	8,344

Tabla 23: Resultados Vida Óptima variando Precio - Caso 2

Años	Variando Precio				
	VAN				
	1.7 [US\$/lb]	2 [US\$/lb]	2.5 [US\$/lb]	2.8 [US\$/lb]	3.3 [US\$/lb]
5	- 1,589	509	2,945	4,407	6,844
6	- 452	1,191	3,627	5,089	7,526
7	202	1,664	4,100	5,562	7,999
8	543	2,005	4,442	5,904	8,341
9	798	2,260	4,697	6,159	8,596
10	992	2,454	4,891	6,353	8,789
11	1,141	2,603	5,040	6,502	8,939
12	1,257	2,720	5,156	6,618	9,055
13	1,348	2,810	5,247	6,709	9,145
14	1,418	2,880	5,317	6,779	9,216
15	1,473	2,935	5,371	6,833	9,270
16	1,514	2,976	5,412	6,874	9,311
17	1,544	3,006	5,443	6,905	9,342
18	1,566	3,028	5,464	6,926	9,363
19	1,580	3,042	5,478	6,940	9,377
20	1,587	3,049	5,486	6,948	9,384
21	1,589	3,051	5,488	6,950	9,386
22	1,586	3,048	5,485	6,947	9,384
23	1,579	3,041	5,478	6,940	9,377
24	1,569	3,031	5,467	6,929	9,366
25	1,555	3,017	5,454	6,916	9,352
26	1,538	3,000	5,437	6,899	9,336
27	1,519	2,981	5,418	6,880	9,317
28	1,498	2,960	5,397	6,859	9,295
29	1,475	2,937	5,373	6,835	9,272

Tabla 24: Resultados Vida Óptima variando Inversión - Caso 2

Años	Variando Inversión			
	VAN			
	16 [kUS\$/tpd]	20 [kUS\$/tpd]	24 [kUS\$/tpd]	28 [kUS\$/tpd]
5	1,263	415	- 724	- 2,139
6	1,779	1,072	364	- 572
7	2,133	1,527	920	314
8	2,386	1,855	1,325	794
9	2,571	2,100	1,628	1,156
10	2,710	2,285	1,861	1,436
11	2,814	2,428	2,042	1,656
12	2,892	2,538	2,184	1,831
13	2,950	2,624	2,297	1,971
14	2,993	2,690	2,387	2,084
15	3,024	2,741	2,458	2,175
16	3,044	2,779	2,514	2,248
17	3,056	2,807	2,557	2,307
18	3,061	2,826	2,590	2,354
19	3,061	2,837	2,614	2,390
20	3,055	2,843	2,630	2,418
21	3,045	2,843	2,641	2,439
22	3,031	2,838	2,646	2,453
23	3,015	2,830	2,646	2,461
24	2,995	2,818	2,641	2,464
25	2,973	2,803	2,633	2,464
26	2,949	2,785	2,622	2,459
27	2,923	2,765	2,608	2,451
28	2,895	2,743	2,591	2,440
29	2,865	2,719	2,573	2,426

Tabla 25: Resultados Vida Óptima variando Costos Fijos - Caso 2

Variando Costos Fijos					
VAN					
Años	0.08 [US\$/ton]	0.1 [US\$/ton]	0.12 [US\$/ton]	0.16 [US\$/ton]	0.2 [US\$/ton]
5	362	323	284	207	130
6	1,063	1,017	970	877	784
7	1,555	1,501	1,447	1,339	1,230
8	1,917	1,855	1,793	1,669	1,545
9	2,191	2,121	2,051	1,912	1,773
10	2,404	2,327	2,249	2,094	1,939
11	2,573	2,488	2,402	2,232	2,062
12	2,708	2,615	2,522	2,336	2,150
13	2,818	2,717	2,617	2,415	2,214
14	2,908	2,799	2,691	2,474	2,257
15	2,981	2,865	2,749	2,517	2,284
16	3,042	2,918	2,794	2,546	2,298
17	3,092	2,960	2,828	2,565	2,302
18	3,133	2,993	2,854	2,575	2,296
19	3,166	3,019	2,871	2,577	2,283
20	3,193	3,038	2,883	2,573	2,263
21	3,214	3,051	2,889	2,563	2,238
22	3,231	3,060	2,890	2,549	2,208
23	3,243	3,065	2,887	2,530	2,174
24	3,252	3,066	2,880	2,508	2,136
25	3,257	3,064	2,870	2,483	2,095
26	3,260	3,059	2,857	2,455	2,052
27	3,261	3,051	2,842	2,424	2,006
28	3,259	3,042	2,825	2,391	1,957
29	3,255	3,030	2,805	2,356	1,907

**Tabla 26: Resultados Vida Óptima variando Reservas - Caso 3**

	Variando Reservas				
	VAN				
Años	250 Mton	500 Mton	645 Mton	1500 Mton	2000 Mton
5	- 556	- 1,112	- 1,435	- 3,337	- 4,449
6	- 204	- 408	- 527	- 1,225	- 1,633
7	20	41	53	123	164
8	168	336	433	1,007	1,343
9	266	531	685	1,593	2,124
10	330	660	851	1,979	2,639
11	371	743	958	2,228	2,971
12	397	793	1,023	2,380	3,173
13	410	821	1,059	2,462	3,283
14	416	831	1,072	2,493	3,325
15	415	829	1,070	2,488	3,318
16	409	819	1,056	2,456	3,275
17	401	802	1,034	2,405	3,207
18	390	780	1,006	2,339	3,119
19	377	755	973	2,264	3,018
20	364	727	938	2,181	2,909
21	349	698	901	2,095	2,793
22	334	668	862	2,005	2,673
23	319	638	823	1,914	2,552
24	304	608	784	1,823	2,430
25	289	577	745	1,732	2,309
26	274	547	706	1,642	2,190
27	259	518	668	1,554	2,072
28	245	489	631	1,468	1,957
29	231	461	595	1,384	1,845

Tabla 27: Resultados Vida Óptima variando Precio - Caso 3

		Variando Precio				
		VAN				
Años		1.7 [US\$/lb]	2 [US\$/lb]	2.5 [US\$/lb]	2.8 [US\$/lb]	2.9 [US\$/lb]
5	-	2,976	1,128	1,951	3,798	4,414
6	-	2,001	232	2,716	4,484	5,074
7	-	1,359	335	3,160	4,855	5,419
8	-	921	704	3,412	5,037	5,579
9	-	614	945	3,544	5,103	5,623
10	-	396	1,101	3,597	5,094	5,593
11	-	240	1,199	3,597	5,035	5,515
12	-	129	1,255	3,561	4,944	5,405
13	-	50	1,281	3,500	4,832	5,276
14		5	1,287	3,424	4,706	5,133
15		41	1,277	3,336	4,572	4,984
16		64	1,256	3,242	4,433	4,830
17		77	1,227	3,143	4,293	4,676
18		82	1,192	3,042	4,152	4,522
19		80	1,153	2,941	4,014	4,371
20		74	1,112	2,840	3,878	4,223
21		65	1,069	2,741	3,745	4,079
22		53	1,025	2,644	3,615	3,939
23		39	981	2,549	3,490	3,804
24		24	936	2,457	3,369	3,673
25		8	893	2,367	3,252	3,547
26	-	9	850	2,281	3,139	3,425
27	-	26	808	2,197	3,031	3,309
28	-	43	767	2,117	2,926	3,196
29	-	61	727	2,039	2,826	3,088

Tabla 28: Resultados Vida Óptima variando Inversión - Caso 3

Variando Inversión				
VAN				
Años	16 [kUS\$/tpd]	20 [kUS\$/tpd]	24 [kUS\$/tpd]	28 [kUS\$/tpd]
5	228	- 1,187	- 2,602	- 4,017
6	859	- 320	- 1,499	- 2,678
7	1,241	231	- 780	- 1,790
8	1,473	589	- 295	- 1,180
9	1,610	824	38	- 748
10	1,684	976	269	- 438
11	1,715	1,072	429	- 214
12	1,717	1,128	538	- 51
13	1,699	1,155	611	67
14	1,667	1,162	657	151
15	1,626	1,154	682	211
16	1,577	1,135	693	251
17	1,524	1,108	692	276
18	1,469	1,076	683	290
19	1,412	1,040	667	295
20	1,355	1,001	647	294
21	1,298	961	624	287
22	1,241	919	598	276
23	1,185	878	570	263
24	1,131	836	542	247
25	1,078	795	512	229
26	1,027	755	483	210
27	977	715	453	191
28	929	676	424	171
29	882	638	394	151

Tabla 29: Resultados Vida Óptima variando Costos Fijos - Caso 3

		Variando Costos Fijos				
		VAN				
Años	0.08 [US\$/ton]	0.1 [US\$/ton]	0.12 [US\$/ton]	0.16 [US\$/ton]	0.2 [US\$/ton]	
5	- 1,314	- 1,363	- 1,412	- 1,510	- 1,607	
6	- 387	- 443	- 499	- 611	- 724	
7	210	147	84	- 41	- 167	
8	606	537	468	330	192	
9	871	797	723	574	425	
10	1,050	971	892	733	574	
11	1,169	1,085	1,001	833	665	
12	1,244	1,156	1,068	892	716	
13	1,289	1,197	1,105	922	739	
14	1,311	1,216	1,121	930	740	
15	1,316	1,218	1,120	924	727	
16	1,310	1,209	1,108	906	704	
17	1,294	1,190	1,087	880	672	
18	1,271	1,166	1,060	848	636	
19	1,244	1,136	1,028	812	596	
20	1,214	1,104	994	774	554	
21	1,181	1,069	957	734	511	
22	1,146	1,033	919	693	466	
23	1,110	996	881	652	422	
24	1,074	958	842	610	378	
25	1,038	921	804	570	335	
26	1,002	884	766	529	293	
27	967	848	728	490	251	
28	932	812	692	451	211	
29	898	777	656	414	172	

Tabla 30: Resultados Vida Óptima variando Tasa de Descuento - Caso 3

		Variando Tasa Descuento				
		VAN				
Años		6%	8%	10%	12%	0%
5	-	781	- 1,123	- 1,436	- 1,725	442
6		192	- 185	- 527	- 839	1,578
7		828	420	53	- 278	2,366
8		1,255	820	433	88	2,936
9		1,546	1,088	686	330	3,361
10		1,745	1,267	852	489	3,684
11		1,878	1,384	959	591	3,933
12		1,963	1,456	1,024	654	4,126
13		2,014	1,496	1,059	689	4,277
14		2,039	1,512	1,073	703	4,394
15		2,043	1,511	1,071	704	4,485
16		2,033	1,497	1,057	694	4,554
17		2,011	1,472	1,035	676	4,604
18		1,981	1,441	1,007	654	4,640
19		1,943	1,404	974	628	4,663
20		1,901	1,363	939	599	4,676
21		1,854	1,320	901	569	4,679
22		1,805	1,275	863	538	4,674
23		1,754	1,228	824	507	4,663
24		1,701	1,181	784	476	4,645
25		1,648	1,134	745	445	4,622
26		1,594	1,087	707	415	4,595
27		1,540	1,041	669	385	4,563
28		1,486	995	632	356	4,527
29		1,433	950	595	328	4,489

Tabla 31: Resultados Vida Óptima variando Costos Variables - Caso 3

Años	Variando Costos Variables				
	VAN				
	9 [US\$/ton]	10 [US\$/ton]	11 [US\$/ton]	13 [US\$/ton]	14 [US\$/ton]
5	350	- 166	- 681	- 1,712	- 2,228
6	1,236	739	241	- 753	- 1,251
7	1,791	1,311	831	- 129	- 610
8	2,144	1,681	1,217	290	- 174
9	2,368	1,920	1,472	576	128
10	2,504	2,071	1,638	772	339
11	2,581	2,162	1,743	905	486
12	2,614	2,209	1,803	993	587
13	2,617	2,225	1,832	1,047	655
14	2,598	2,218	1,838	1,078	698
15	2,563	2,195	1,826	1,090	721
16	2,517	2,159	1,802	1,088	731
17	2,462	2,115	1,769	1,076	730
18	2,401	2,065	1,729	1,056	720
19	2,336	2,010	1,683	1,031	704
20	2,268	1,951	1,635	1,001	684
21	2,199	1,891	1,583	968	660
22	2,130	1,830	1,531	932	633
23	2,060	1,769	1,478	895	604
24	1,990	1,707	1,424	857	574
25	1,922	1,646	1,370	819	543
26	1,854	1,586	1,317	780	512
27	1,788	1,526	1,265	742	481
28	1,723	1,468	1,213	704	449
29	1,660	1,411	1,163	666	418

Tabla 32: Resultados Vida Óptima variando Reservas - Caso 4

Variando Reservas						
VAN						
Años	250 Mton	500 Mton	645 Mton	1500 Mton	2000 Mton	
5	- 489	- 979	- 1,263	- 2,936	- 3,915	
6	- 260	- 520	- 670	- 1,559	- 2,079	
7	- 110	- 220	- 284	- 661	- 881	
8	- 9	- 18	- 24	- 55	- 73	
9	60	120	155	361	481	
10	108	216	278	647	863	
11	141	281	363	844	1,125	
12	163	325	419	975	1,300	
13	177	353	456	1,060	1,413	
14	185	370	477	1,109	1,479	
15	189	378	487	1,133	1,510	
16	189	379	489	1,136	1,515	
17	187	375	484	1,125	1,500	
18	184	367	474	1,102	1,470	
19	179	357	461	1,071	1,429	
20	172	345	445	1,034	1,379	
21	165	331	427	992	1,323	
22	158	316	407	947	1,263	
23	150	300	387	900	1,200	
24	142	284	366	851	1,135	
25	134	267	345	801	1,069	
26	125	250	323	751	1,002	
27	117	234	302	701	935	
28	109	217	280	652	869	
29	100	201	259	603	804	

Tabla 33: Resultados Vida Óptima variando Precio - Caso 4

		Variando Precio				
		VAN				
Años		1.7 [US\$/lb]	2 [US\$/lb]	2.5 [US\$/lb]	2.8 [US\$/lb]	3.3 [US\$/lb]
5	-	2,976	1,385	462	1,570	3,418
6	-	2,001	809	960	2,021	3,790
7	-	1,453	436	1,259	2,276	3,970
8	-	1,162	187	1,438	2,412	4,037
9	-	954	19	1,540	2,476	4,035
10	-	802	96	1,593	2,492	3,989
11	-	689	174	1,613	2,476	3,915
12	-	605	225	1,609	2,439	3,823
13	-	541	258	1,589	2,388	3,720
14	-	493	276	1,559	2,328	3,610
15	-	457	285	1,520	2,262	3,497
16	-	429	286	1,477	2,192	3,383
17	-	409	281	1,431	2,121	3,270
18	-	394	272	1,382	2,048	3,159
19	-	383	260	1,333	1,977	3,050
20	-	376	246	1,284	1,906	2,943
21	-	371	231	1,235	1,837	2,840
22	-	368	215	1,186	1,769	2,740
23	-	367	197	1,139	1,703	2,644
24	-	367	180	1,092	1,640	2,552
25	-	368	163	1,047	1,578	2,463
26	-	370	145	1,004	1,519	2,377
27	-	372	128	961	1,462	2,295
28	-	375	111	921	1,407	2,217
29	-	378	94	881	1,354	2,141

Tabla 34: Resultados Vida Óptima variando Inversión - Caso 4

		Variando Inversión			
		VAN			
Años	16 [kUS\$/tpd]	20 [kUS\$/tpd]	24 [kUS\$/tpd]	28 [kUS\$/tpd]	
5	- 411	- 1,397	- 2,602	- 4,017	
6	- 1	- 838	- 1,675	- 2,678	
7	252	- 477	- 1,206	- 1,936	
8	413	- 236	- 884	- 1,533	
9	513	- 72	- 657	- 1,241	
10	574	40	- 493	- 1,027	
11	608	117	- 375	- 866	
12	623	167	- 288	- 744	
13	625	199	- 226	- 651	
14	617	218	- 181	- 580	
15	603	227	- 149	- 525	
16	585	229	- 127	- 482	
17	563	225	- 112	- 450	
18	539	218	- 104	- 425	
19	514	207	- 100	- 406	
20	488	194	- 99	- 393	
21	462	180	- 101	- 383	
22	435	165	- 105	- 376	
23	409	149	- 111	- 371	
24	384	133	- 118	- 368	
25	359	117	- 125	- 367	
26	334	100	- 133	- 367	
27	310	84	- 142	- 368	
28	287	68	- 151	- 370	
29	265	53	- 160	- 372	

Tabla 35: Resultados Vida Óptima variando Costos Fijos - Caso 4

		Variando Costos Fijos				
		VAN				
Años	0.08 [US\$/ton]	0.1 [US\$/ton]	0.12 [US\$/ton]	0.16 [US\$/ton]	0.2 [US\$/ton]	
5	- 1,497	- 1,526	- 1,555	- 1,614	- 1,673	
6	- 901	- 935	- 969	- 1,036	- 1,104	
7	- 511	- 549	- 587	- 662	- 737	
8	- 247	- 288	- 329	- 412	- 495	
9	- 63	- 108	- 152	- 242	- 331	
10	65	18	- 30	- 125	- 220	
11	156	106	55	- 45	- 146	
12	219	166	113	8	- 98	
13	262	207	152	42	- 68	
14	291	234	177	63	- 52	
15	309	250	191	73	- 45	
16	318	257	197	76	- 46	
17	321	259	197	73	- 52	
18	320	256	193	66	- 61	
19	315	250	185	56	- 74	
20	308	242	176	44	- 88	
21	298	231	164	30	- 104	
22	287	219	151	15	- 120	
23	275	207	138	0	- 137	
24	263	193	124	- 16	- 155	
25	250	180	109	- 31	- 172	
26	237	166	95	- 47	- 189	
27	223	152	80	- 63	- 206	
28	210	138	66	- 78	- 223	
29	197	124	52	- 93	- 239	

Tabla 36: Resultados Vida Óptima variando Tasa de Descuento - Caso 4

		Variando Tasa Descuento				
		VAN				
Años		6%	8%	10%	12%	0%
5	-	930	- 1,264	- 1,570	- 1,852	265
6	-	325	- 671	- 985	- 1,272	947
7		73	- 284	- 605	- 895	1,420
8		343	- 24	- 350	- 641	1,762
9		530	155	- 175	- 466	2,017
10		660	279	- 54	- 344	2,210
11		750	363	30	- 258	2,360
12		810	420	87	- 198	2,476
13		849	456	125	- 157	2,566
14		872	477	148	- 129	2,637
15		882	487	161	- 111	2,691
16		883	489	166	- 100	2,732
17		876	484	166	- 95	2,763
18		864	474	161	- 94	2,784
19		848	461	153	- 95	2,798
20		828	445	143	- 99	2,805
21		806	427	131	- 105	2,807
22		782	408	117	- 112	2,805
23		756	387	103	- 119	2,798
24		730	366	89	- 127	2,787
25		702	345	74	- 135	2,773
26		675	323	59	- 143	2,757
27		647	302	44	- 152	2,738
28		619	281	30	- 160	2,716
29		591	259	15	- 168	2,693

Tabla 37: Resultados Vida Óptima variando Costos Variables - Caso 4

		Variando Costos Variables				
		VAN				
Años	9 [US\$/ton]	10 [US\$/ton]	11 [US\$/ton]	13 [US\$/ton]	14 [US\$/ton]	
5	- 380	- 690	- 999	- 1,712	- 2,228	
6	181	- 117	- 416	- 1,012	- 1,311	
7	538	250	- 38	- 614	- 902	
8	771	493	215	- 342	- 620	
9	923	654	385	- 152	- 421	
10	1,021	761	501	- 19	- 279	
11	1,081	830	578	76	- 176	
12	1,114	871	628	142	- 102	
13	1,129	893	658	187	- 49	
14	1,129	901	673	216	- 12	
15	1,119	898	677	235	14	
16	1,101	887	672	244	30	
17	1,078	870	662	246	39	
18	1,050	849	647	244	42	
19	1,020	824	629	237	41	
20	988	798	608	228	37	
21	955	770	585	216	31	
22	921	741	561	202	23	
23	886	711	537	188	13	
24	852	682	512	172	2	
25	817	652	486	156	- 10	
26	783	622	461	139	- 22	
27	750	593	436	122	- 34	
28	717	564	411	106	- 47	
29	685	536	387	89	- 60	

Tabla 38: Resultados Vida Óptima variando Reservas - Caso 5

Variando Reservas					
VAN					
Años	250 Mton	500 Mton	645 Mton	1500 Mton	2000 Mton
5	1,115	2,230	2,876	6,689	8,918
6	1,476	2,953	3,809	8,858	11,811
7	1,703	3,406	4,393	10,217	13,623
8	1,845	3,690	4,760	11,070	14,759
9	1,931	3,861	4,981	11,584	15,446
10	1,977	3,954	5,101	11,863	15,817
11	1,995	3,990	5,147	11,970	15,960
12	1,991	3,982	5,137	11,947	15,930
13	1,971	3,942	5,085	11,826	15,768
14	1,938	3,876	4,999	11,627	15,502
15	1,894	3,788	4,887	11,365	15,153
16	1,842	3,684	4,753	11,053	14,737
17	1,783	3,566	4,600	10,699	14,265
18	1,718	3,437	4,433	10,310	13,747
19	1,649	3,297	4,254	9,892	13,189
20	1,575	3,150	4,063	9,449	12,599
21	1,497	2,995	3,863	8,985	11,980
22	1,417	2,834	3,656	8,502	11,336
23	1,334	2,668	3,441	8,003	10,671
24	1,248	2,497	3,221	7,491	9,988
25	1,161	2,322	2,995	6,966	9,288
26	1,072	2,143	2,765	6,430	8,573
27	981	1,961	2,530	5,884	7,845
28	888	1,777	2,292	5,330	7,106
29	795	1,589	2,050	4,768	6,357

Tabla 39: Resultados Vida Óptima variando Precio - Caso 5

		Variando Precio				
		VAN				
Años		1.7 [US\$/lb]	2 [US\$/lb]	2.5 [US\$/lb]	2.8 [US\$/lb]	2.9 [US\$/lb]
5	-	2,807	370	3,691	6,127	6,940
6	-	1,873	563	4,624	7,061	7,873
7	-	1,289	1,148	5,209	7,646	8,458
8	-	922	1,515	5,576	8,013	8,825
9	-	700	1,737	5,798	8,234	9,047
10	-	580	1,856	5,918	8,354	9,166
11	-	534	1,902	5,963	8,400	9,212
12	-	544	1,893	5,954	8,391	9,203
13	-	596	1,841	5,902	8,338	9,151
14	-	682	1,755	5,816	8,253	9,065
15	-	795	1,642	5,703	8,140	8,952
16	-	929	1,508	5,569	8,006	8,818
17	-	1,081	1,355	5,416	7,853	8,665
18	-	1,249	1,188	5,249	7,686	8,498
19	-	1,429	1,008	5,069	7,506	8,318
20	-	1,619	818	4,879	7,315	8,128
21	-	1,819	618	4,679	7,116	7,928
22	-	2,027	410	4,471	6,908	7,720
23	-	2,241	195	4,257	6,693	7,505
24	-	2,462	25	4,036	6,473	7,285
25	-	2,688	251	3,810	6,247	7,059
26	-	2,919	482	3,579	6,016	6,828
27	-	3,153	717	3,344	5,781	6,593
28	-	3,392	955	3,106	5,543	6,355
29	-	3,634	1,197	2,864	5,301	6,113

Tabla 40: Resultados Vida Óptima variando Inversión - Caso 5

Variando Inversión				
VAN				
Años	16 [kUS\$/tpd]	20 [kUS\$/tpd]	24 [kUS\$/tpd]	28 [kUS\$/tpd]
5	4,542	3,128	1,713	298
6	5,199	4,020	2,841	1,662
7	5,585	4,575	3,564	2,554
8	5,804	4,920	4,035	3,151
9	5,910	5,124	4,338	3,552
10	5,937	5,230	4,522	3,815
11	5,908	5,264	4,621	3,978
12	5,835	5,245	4,656	4,066
13	5,729	5,185	4,641	4,097
14	5,598	5,093	4,587	4,082
15	5,446	4,974	4,502	4,031
16	5,277	4,834	4,392	3,950
17	5,094	4,678	4,261	3,845
18	4,899	4,506	4,113	3,720
19	4,695	4,323	3,950	3,578
20	4,482	4,129	3,775	3,421
21	4,263	3,926	3,589	3,252
22	4,037	3,716	3,394	3,072
23	3,806	3,498	3,191	2,883
24	3,570	3,276	2,981	2,686
25	3,330	3,048	2,765	2,482
26	3,087	2,815	2,543	2,271
27	2,840	2,578	2,316	2,054
28	2,591	2,338	2,086	1,833
29	2,339	2,095	1,851	1,607

Tabla 41: Resultados Vida Óptima variando Costos Fijos - Caso 5

	Variando Costos Fijos				
	VAN				
Años	0.08 [US\$/ton]	0.1 [US\$/ton]	0.12 [US\$/ton]	0.16 [US\$/ton]	0.2 [US\$/ton]
5	3,040	2,975	2,911	2,782	2,653
6	4,006	3,928	3,851	3,696	3,541
7	4,623	4,533	4,442	4,261	4,081
8	5,022	4,919	4,816	4,609	4,402
9	5,276	5,160	5,044	4,811	4,579
10	5,428	5,299	5,170	4,912	4,653
11	5,506	5,364	5,222	4,938	4,654
12	5,529	5,374	5,219	4,909	4,599
13	5,509	5,341	5,173	4,838	4,502
14	5,456	5,275	5,094	4,733	4,371
15	5,375	5,182	4,988	4,601	4,213
16	5,273	5,066	4,860	4,447	4,034
17	5,153	4,933	4,714	4,275	3,836
18	5,018	4,786	4,553	4,088	3,624
19	4,870	4,625	4,380	3,889	3,398
20	4,712	4,454	4,196	3,679	3,163
21	4,544	4,273	4,002	3,460	2,918
22	4,369	4,085	3,801	3,233	2,665
23	4,187	3,890	3,593	2,999	2,405
24	3,998	3,688	3,379	2,759	2,139
25	3,805	3,482	3,159	2,514	1,868
26	3,606	3,271	2,935	2,264	1,592
27	3,404	3,055	2,707	2,009	1,312
28	3,197	2,836	2,474	1,751	1,028
29	2,988	2,613	2,239	1,490	741

Tabla 42: Resultados Vida Óptima variando Reservas - Caso 6

Variando Reservas					
VAN					
Años	250 Mton	500 Mton	645 Mton	1500 Mton	2000 Mton
5	669	1,338	1,726	4,013	5,351
6	886	1,772	2,285	5,315	7,086
7	1,022	2,043	2,636	6,130	8,174
8	1,107	2,214	2,856	6,642	8,856
9	1,158	2,317	2,989	6,951	9,268
10	1,186	2,373	3,061	7,118	9,490
11	1,197	2,394	3,088	7,182	9,576
12	1,195	2,389	3,082	7,168	9,558
13	1,183	2,365	3,051	7,096	9,461
14	1,163	2,325	3,000	6,976	9,301
15	1,137	2,273	2,932	6,819	9,092
16	1,105	2,211	2,852	6,632	8,842
17	1,070	2,140	2,760	6,419	8,559
18	1,031	2,062	2,660	6,186	8,248
19	989	1,978	2,552	5,935	7,914
20	945	1,890	2,438	5,669	7,559
21	897	1,794	2,314	5,382	7,176
22	845	1,689	2,179	5,067	6,756
23	788	1,576	2,033	4,727	6,303
24	727	1,455	1,877	4,365	5,820
25	664	1,327	1,712	3,982	5,309
26	597	1,193	1,540	3,580	4,774
27	527	1,054	1,360	3,162	4,216
28	455	910	1,173	2,729	3,638
29	380	760	981	2,281	3,041

Tabla 43: Resultados Vida Óptima variando Precio - Caso 6

		Variando Precio				
		VAN				
Años		1.7 [US\$/lb]	2 [US\$/lb]	2.5 [US\$/lb]	2.8 [US\$/lb]	2.9 [US\$/lb]
5	-	2,807	409	2,214	3,676	4,164
6	-	1,873	305	2,775	4,237	4,724
7	-	1,289	685	3,126	4,588	5,075
8	-	951	909	3,346	4,808	5,295
9	-	769	1,042	3,479	4,941	5,428
10	-	682	1,114	3,551	5,013	5,500
11	-	663	1,137	3,578	5,040	5,527
12	-	690	1,124	3,572	5,034	5,522
13	-	754	1,080	3,541	5,003	5,490
14	-	846	1,012	3,490	4,952	5,439
15	-	960	922	3,422	4,884	5,371
16	-	1,094	812	3,341	4,803	5,291
17	-	1,244	686	3,250	4,712	5,199
18	-	1,407	546	3,150	4,612	5,099
19	-	1,582	394	3,042	4,504	4,991
20	-	1,766	231	2,927	4,389	4,877
21	-	1,959	59	2,807	4,269	4,757
22	-	2,160	122	2,683	4,145	4,632
23	-	2,368	312	2,550	4,016	4,503
24	-	2,581	508	2,407	3,884	4,371
25	-	2,800	710	2,254	3,748	4,235
26	-	3,024	918	2,093	3,610	4,097
27	-	3,252	1,131	1,924	3,469	3,956
28	-	3,484	1,348	1,747	3,326	3,813
29	-	3,720	1,570	1,564	3,175	3,668

Tabla 44: Resultados Vida Óptima variando Inversión - Caso 6

	Variando Inversión			
	VAN			
Años	16 [kUS\$/tpd]	20 [kUS\$/tpd]	24 [kUS\$/tpd]	28 [kUS\$/tpd]
5	2,725	1,877	1,028	129
6	3,119	2,412	1,704	997
7	3,351	2,745	2,139	1,532
8	3,482	2,952	2,421	1,891
9	3,546	3,074	2,603	2,131
10	3,562	3,138	2,713	2,289
11	3,545	3,159	2,773	2,387
12	3,501	3,147	2,794	2,440
13	3,438	3,111	2,785	2,458
14	3,359	3,056	2,752	2,449
15	3,267	2,984	2,701	2,418
16	3,166	2,901	2,635	2,370
17	3,056	2,807	2,557	2,307
18	2,939	2,704	2,468	2,232
19	2,817	2,594	2,370	2,145
20	2,689	2,477	2,263	2,043
21	2,558	2,353	2,143	1,928
22	2,418	2,217	2,011	1,801
23	2,268	2,070	1,868	1,662
24	2,107	1,913	1,715	1,514
25	1,939	1,747	1,554	1,357
26	1,762	1,574	1,384	1,192
27	1,578	1,393	1,207	1,019
28	1,386	1,206	1,023	839
29	1,189	1,013	834	653

Tabla 45: Resultados Vida Óptima variando Costos Fijos - Caso 6

Variando Costos Fijos					
VAN					
Años	0.08 [US\$/ton]	0.1 [US\$/ton]	0.12 [US\$/ton]	0.16 [US\$/ton]	0.2 [US\$/ton]
5	1,824	1,785	1,746	1,669	1,592
6	2,403	2,357	2,311	2,218	2,125
7	2,774	2,720	2,665	2,557	2,448
8	3,013	2,951	2,889	2,765	2,641
9	3,166	3,096	3,026	2,887	2,747
10	3,257	3,179	3,102	2,947	2,792
11	3,304	3,219	3,133	2,963	2,793
12	3,317	3,224	3,131	2,946	2,760
13	3,305	3,205	3,104	2,903	2,701
14	3,273	3,165	3,056	2,840	2,623
15	3,225	3,109	2,993	2,760	2,528
16	3,164	3,040	2,916	2,668	2,420
17	3,092	2,960	2,828	2,565	2,302
18	3,011	2,871	2,732	2,453	2,174
19	2,922	2,775	2,628	2,333	2,034
20	2,827	2,672	2,517	2,204	1,878
21	2,727	2,564	2,400	2,061	1,708
22	2,621	2,448	2,271	1,906	1,527
23	2,507	2,321	2,131	1,740	1,334
24	2,383	2,184	1,982	1,564	1,130
25	2,251	2,039	1,823	1,379	918
26	2,111	1,886	1,657	1,186	698
27	1,963	1,726	1,483	986	470
28	1,810	1,559	1,303	779	236
29	1,650	1,386	1,117	566	5

Tabla 46: Resultados Vida Óptima variando Reservas - Caso 7

Variando Reservas					
VAN					
Años	250 Mton	500 Mton	645 Mton	1500 Mton	2000 Mton
5	182	364	469	1,092	1,455
6	455	911	1,175	2,732	3,643
7	609	1,218	1,571	3,653	4,870
8	692	1,384	1,785	4,151	5,534
9	731	1,462	1,887	4,387	5,850
10	743	1,486	1,917	4,458	5,944
11	737	1,474	1,901	4,421	5,895
12	719	1,438	1,855	4,315	5,753
13	694	1,388	1,791	4,164	5,552
14	664	1,328	1,714	3,985	5,314
15	632	1,263	1,630	3,790	5,054
16	598	1,196	1,542	3,587	4,783
17	564	1,127	1,454	3,381	4,508
18	529	1,059	1,366	3,177	4,236
19	496	992	1,280	2,976	3,968
20	463	927	1,196	2,781	3,708
21	432	864	1,115	2,592	3,457
22	402	804	1,037	2,412	3,216
23	373	746	963	2,239	2,985
24	346	691	892	2,074	2,766
25	320	639	825	1,918	2,557
26	295	590	761	1,769	2,359
27	271	543	700	1,628	2,171
28	249	498	643	1,495	1,993
29	228	456	589	1,369	1,825

Tabla 47: Resultados Vida Óptima variando Precio - Caso 7

		Variando Precio				
		VAN				
Años		1.7 [US\$/lb]	2 [US\$/lb]	2.5 [US\$/lb]	2.8 [US\$/lb]	3.3 [US\$/lb]
5	-	3,841	- 1,993	1,086	2,933	6,012
6	-	2,951	- 1,183	1,765	3,534	6,482
7	-	2,382	- 688	2,137	3,832	6,656
8	-	2,005	- 380	2,328	3,953	6,661
9	-	1,750	- 191	2,408	3,967	6,566
10	-	1,575	- 78	2,418	3,915	6,410
11	-	1,454	- 16	2,382	3,821	6,219
12	-	1,371	- 12	2,318	3,702	6,008
13	-	1,315	- 17	2,236	3,567	5,786
14	-	1,277	- 6	2,143	3,425	5,562
15	-	1,252	- 16	2,043	3,279	5,338
16	-	1,236	- 45	1,941	3,132	5,118
17	-	1,228	- 78	1,838	2,988	4,904
18	-	1,223	- 113	1,737	2,847	4,698
19	-	1,222	- 150	1,638	2,711	4,499
20	-	1,224	- 186	1,542	2,580	4,308
21	-	1,226	- 222	1,450	2,454	4,126
22	-	1,229	- 257	1,362	2,333	3,952
23	-	1,232	- 291	1,277	2,218	3,787
24	-	1,236	- 324	1,197	2,109	3,629
25	-	1,239	- 354	1,120	2,005	3,479
26	-	1,242	- 383	1,048	1,906	3,337
27	-	1,244	- 411	979	1,812	3,202
28	-	1,246	- 437	913	1,723	3,073
29	-	1,248	- 461	852	1,639	2,951

Tabla 48: Resultados Vida Óptima variando Inversión - Caso 7

	Variando Inversión			
	VAN			
Años	16 [kUS\$/tpd]	20 [kUS\$/tpd]	24 [kUS\$/tpd]	28 [kUS\$/tpd]
5	2,134	719	- 696	- 2,111
6	2,562	1,383	204	- 975
7	2,761	1,750	739	- 271
8	2,826	1,942	1,058	173
9	2,813	2,026	1,240	454
10	2,750	2,043	1,336	628
11	2,659	2,016	1,373	730
12	2,550	1,961	1,371	782
13	2,432	1,888	1,344	799
14	2,309	1,804	1,299	793
15	2,186	1,714	1,243	771
16	2,064	1,622	1,179	737
17	1,945	1,528	1,112	696
18	1,829	1,436	1,043	650
19	1,719	1,346	974	602
20	1,613	1,259	905	552
21	1,512	1,175	838	501
22	1,416	1,094	773	451
23	1,325	1,018	710	402
24	1,239	945	650	355
25	1,158	875	592	309
26	1,081	809	537	265
27	1,009	747	485	223
28	940	688	435	183
29	876	632	388	144

Tabla 49: Resultados Vida Óptima variando Costos Fijos - Caso 7

Variando Costos Fijos					
VAN					
Años	0.08 [US\$/ton]	0.1 [US\$/ton]	0.12 [US\$/ton]	0.16 [US\$/ton]	0.2 [US\$/ton]
5	592	543	494	396	298
6	1,316	1,260	1,204	1,091	979
7	1,729	1,666	1,603	1,478	1,352
8	1,958	1,890	1,821	1,683	1,545
9	2,074	2,000	1,925	1,777	1,628
10	2,117	2,038	1,958	1,800	1,641
11	2,112	2,029	1,945	1,777	1,609
12	2,077	1,989	1,901	1,725	1,549
13	2,021	1,930	1,838	1,654	1,471
14	1,953	1,858	1,763	1,572	1,382
15	1,877	1,779	1,680	1,484	1,288
16	1,796	1,695	1,594	1,392	1,190
17	1,714	1,611	1,507	1,300	1,093
18	1,632	1,526	1,420	1,208	997
19	1,551	1,443	1,335	1,119	903
20	1,472	1,362	1,252	1,032	812
21	1,395	1,283	1,172	948	725
22	1,321	1,208	1,095	868	642
23	1,250	1,136	1,021	791	562
24	1,183	1,067	951	719	487
25	1,118	1,001	884	649	415
26	1,057	939	820	584	347
27	999	880	760	522	283
28	944	824	703	463	223
29	892	771	650	408	166

Tabla 50: Resultados Vida Óptima variando Tasa de Descuento - Caso 7

	Variando Tasa Descuento				
	VAN				
Años	6%	8%	10%	12%	0%
5	1,311	873	470	98	2,879
6	2,079	1,606	1,176	783	3,812
7	2,522	2,023	1,572	1,165	4,397
8	2,770	2,250	1,786	1,371	4,764
9	2,893	2,359	1,888	1,470	4,985
10	2,934	2,392	1,919	1,502	5,105
11	2,920	2,375	1,903	1,491	5,151
12	2,868	2,325	1,857	1,453	5,142
13	2,791	2,252	1,792	1,397	5,089
14	2,696	2,165	1,715	1,332	5,004
15	2,589	2,069	1,631	1,261	4,891
16	2,474	1,967	1,544	1,187	4,757
17	2,356	1,864	1,455	1,113	4,604
18	2,235	1,760	1,367	1,039	4,437
19	2,113	1,656	1,281	968	4,257
20	1,993	1,555	1,197	899	4,066
21	1,874	1,457	1,116	834	3,867
22	1,757	1,361	1,038	771	3,659
23	1,643	1,269	964	711	3,444
24	1,532	1,180	893	655	3,224
25	1,425	1,095	825	602	2,998
26	1,321	1,014	761	551	2,767
27	1,221	936	701	504	2,532
28	1,125	862	643	459	2,294
29	1,032	792	589	417	2,052

Tabla 51: Resultados Vida Óptima variando Vostos Variables - Caso 7

Variando Costos Variables					
VAN					
Años	9 [US\$/ton]	10 [US\$/ton]	11 [US\$/ton]	13 [US\$/ton]	14 [US\$/ton]
5	2,345	1,830	1,314	283	- 232
6	3,027	2,530	2,032	1,038	540
7	3,394	2,914	2,434	1,473	993
8	3,574	3,111	2,647	1,720	1,256
9	3,639	3,191	2,743	1,847	1,399
10	3,630	3,196	2,763	1,897	1,464
11	3,572	3,153	2,734	1,896	1,477
12	3,482	3,077	2,672	1,861	1,455
13	3,373	2,980	2,588	1,803	1,410
14	3,250	2,870	2,490	1,730	1,350
15	3,121	2,752	2,384	1,647	1,279
16	2,987	2,630	2,273	1,559	1,202
17	2,853	2,507	2,160	1,468	1,121
18	2,720	2,383	2,047	1,375	1,039
19	2,588	2,262	1,936	1,283	957
20	2,460	2,143	1,827	1,193	876
21	2,336	2,028	1,720	1,104	796
22	2,216	1,917	1,617	1,019	719
23	2,100	1,809	1,518	936	645
24	1,989	1,706	1,423	856	573
25	1,883	1,607	1,331	780	504
26	1,781	1,512	1,244	707	439
27	1,683	1,422	1,160	637	376
28	1,590	1,335	1,081	571	316
29	1,501	1,253	1,005	508	259

Tabla 52: Resultados Vida Óptima variando Reservas - Caso 8

		Variando Reservas				
		VAN				
Años	250 Mton	500 Mton	645 Mton	1500 Mton	2000 Mton	
5	- 165	- 330	- 426	- 991	- 1,322	
6	14	28	36	84	112	
7	119	237	306	711	948	
8	179	358	461	1,073	1,431	
9	212	424	546	1,271	1,694	
10	227	454	586	1,363	1,817	
11	231	462	596	1,386	1,848	
12	227	454	586	1,363	1,818	
13	218	437	564	1,311	1,748	
14	207	413	533	1,239	1,653	
15	193	385	497	1,156	1,541	
16	178	355	458	1,065	1,420	
17	162	324	418	971	1,295	
18	146	292	377	877	1,169	
19	130	261	337	783	1,044	
20	115	230	297	691	922	
21	100	200	258	601	801	
22	85	171	220	513	683	
23	71	142	183	426	568	
24	57	114	147	343	457	
25	44	88	113	263	350	
26	31	62	80	186	248	
27	19	38	49	113	151	
28	7	15	19	44	59	
29	- 4	- 7	- 9	- 21	- 28	

Tabla 53: Resultados Vida Óptima variando Precio - Caso 8

		Variando Precio				
		VAN				
Años		1.7 [US\$/lb]	2 [US\$/lb]	2.5 [US\$/lb]	2.8 [US\$/lb]	3.3 [US\$/lb]
5	-	3,841	- 2,028	- 57	1,051	2,899
6	-	2,951	- 1,398	390	1,451	3,220
7	-	2,382	- 1,052	645	1,662	3,356
8	-	2,032	- 838	787	1,762	3,387
9	-	1,810	- 701	859	1,794	3,353
10	-	1,662	- 611	886	1,784	3,281
11	-	1,562	- 556	884	1,747	3,186
12	-	1,492	- 524	863	1,694	3,077
13	-	1,444	- 508	830	1,629	2,961
14	-	1,409	- 504	790	1,559	2,841
15	-	1,385	- 507	745	1,486	2,721
16	-	1,369	- 517	697	1,412	2,603
17	-	1,357	- 530	648	1,338	2,488
18	-	1,349	- 546	599	1,265	2,376
19	-	1,344	- 563	551	1,195	2,268
20	-	1,340	- 581	505	1,127	2,164
21	-	1,337	- 598	460	1,062	2,066
22	-	1,335	- 616	417	1,000	1,971
23	-	1,333	- 633	375	940	1,881
24	-	1,331	- 649	335	884	1,796
25	-	1,328	- 664	296	830	1,714
26	-	1,326	- 678	259	779	1,637
27	-	1,323	- 691	223	730	1,564
28	-	1,320	- 704	189	685	1,495
29	-	1,317	- 715	157	641	1,429

Tabla 54: Resultados Vida Óptima variando Inversión - Caso 8

Variando Inversión				
VAN				
Años	16 [kUS\$/tpd]	20 [kUS\$/tpd]	24 [kUS\$/tpd]	28 [kUS\$/tpd]
5	733	- 253	- 1,239	- 2,256
6	1,020	184	- 653	- 1,490
7	1,164	434	- 295	- 1,025
8	1,224	576	- 72	- 721
9	1,235	650	65	- 520
10	1,214	680	147	- 387
11	1,174	683	192	- 300
12	1,123	667	211	- 244
13	1,064	639	214	- 211
14	1,003	604	205	- 194
15	940	564	188	- 188
16	877	521	165	- 190
17	815	477	140	- 198
18	755	434	112	- 209
19	698	391	84	- 223
20	643	349	55	- 239
21	590	308	26	- 257
22	540	268	- 4	- 276
23	491	230	- 33	- 295
24	445	192	- 61	- 315
25	400	156	- 88	- 334
26	358	122	- 115	- 352
27	318	89	- 140	- 370
28	280	58	- 164	- 387
29	244	29	- 187	- 403

Tabla 55: Resultados Vida Óptima variando Costos Fijos - Caso 8

		Variando Costos Fijos				
		VAN				
Años	0.08 [US\$/ton]	0.1 [US\$/ton]	0.12 [US\$/ton]	0.16 [US\$/ton]	0.2 [US\$/ton]	
5	- 353	- 383	- 412	- 471	- 529	
6	121	87	53	- 14	- 82	
7	400	363	325	249	174	
8	565	524	483	400	317	
9	658	614	569	480	391	
10	705	658	610	515	420	
11	722	672	621	521	420	
12	719	666	613	508	402	
13	702	647	592	482	372	
14	676	619	562	448	334	
15	645	586	527	409	291	
16	610	549	489	368	246	
17	573	511	449	325	201	
18	536	473	409	282	155	
19	499	434	369	240	109	
20	462	396	330	198	64	
21	427	360	293	157	19	
22	392	324	255	116	- 25	
23	359	289	219	77	- 68	
24	326	255	184	39	- 108	
25	295	222	150	2	- 147	
26	264	191	117	- 32	- 185	
27	236	161	86	- 65	- 220	
28	208	133	57	- 96	- 253	
29	182	106	29	- 126	- 285	

Tabla 56: Resultados Vida Óptima variando Tasa de Descuento - Caso 8

	Variando Tasa Descuento								
	VAN								
Años	6%		8%		10%		12%		0%
5	325	-	66	-	427	-	759	-	1,727
6	807		404		36	-	299		2,287
7	1,090		677		306	-	29		2,638
8	1,252		834		462		129		2,858
9	1,338		918		547		218		2,991
10	1,374		954		586		264		3,063
11	1,375		958		596		282		3,091
12	1,353		941		587		281		3,085
13	1,315		909		564		268		3,054
14	1,266		869		533		248		3,002
15	1,209		822		497		223		2,935
16	1,147		771		458		196		2,854
17	1,083		719		418		167		2,763
18	1,017		666		377		138		2,662
19	950		613		337		109		2,554
20	883		560		297		81		2,440
21	816		508		259		53		2,316
22	749		457		221		27		2,181
23	681		406		183		1		2,034
24	614		356		148	-	24		1,878
25	547		308		113	-	47		1,714
26	482		261		80	-	69		1,541
27	419		216		49	-	90		1,361
28	357		173		19	-	110		1,174
29	297		131	-	9	-	128		982

Tabla 57: Resultados Vida Óptima variando Costos Variables - Caso 8

Años	Variando Costos Variables				
	VAN				
	9 [US\$/ton]	10 [US\$/ton]	11 [US\$/ton]	13 [US\$/ton]	14 [US\$/ton]
5	817	508	198	- 420	- 729
6	1,256	957	659	62	- 236
7	1,500	1,212	924	348	60
8	1,629	1,351	1,072	516	238
9	1,686	1,417	1,148	610	341
10	1,696	1,436	1,176	656	396
11	1,676	1,424	1,173	670	419
12	1,635	1,392	1,149	662	419
13	1,582	1,346	1,111	640	405
14	1,520	1,292	1,064	608	380
15	1,453	1,232	1,011	569	348
16	1,383	1,169	955	526	312
17	1,313	1,105	897	481	273
18	1,242	1,040	838	435	231
19	1,172	976	780	388	187
20	1,103	913	723	340	142
21	1,037	852	667	292	97
22	972	793	613	244	53
23	910	736	560	196	9
24	851	680	507	150	- 34
25	794	626	456	106	- 75
26	738	574	406	63	- 114
27	684	523	359	21	- 153
28	632	474	313	- 18	- 189
29	582	427	268	- 56	- 224