

# Análise de sensibilidade na otimização de cava

**BARBOSA, C. C. T.<sup>1</sup>, CAMPOS, PEDRO H. A. <sup>2</sup>**

<sup>1</sup>CSN Mineração – Casa de Pedra, Planejamento de Longo Prazo, email:  
caio\_ufop@yahoo.com.br / caio.barbosa.cb1@csn.com.br

<sup>2</sup>Universidade Federal de Minas Gerais (UFMG), Departamento de Engenharia de Minas, email: pedrocampos@demin.ufmg.br

## RESUMO

Compreender como parâmetros de ângulo de talude, recuperação de lavra e diluição de mina podem influenciar indicadores de lucro e receita de uma cava final é de suma importância no momento de tomada de decisões estratégicas em cenários de recessão ou euforia devido à uma variação no preço do minério de ferro. Este trabalho realiza uma análise fundamentalista e técnica acerca destes parâmetros e mostra como a sustentabilidade nas operações mineiras é uma opção que traz além de benefícios intangíveis, também uma lucratividade atraente. Foi realizada uma análise de sensibilidade, através do *spider plot* e sob condição de *ceteris paribus*, dos parâmetros de ângulo de talude, preço do minério de ferro, custo de lavra, diluição e recuperação de lavra nos indicadores de valor presente líquido, lucro, receita e tonelagem de minério. Foi perceptível a grande influência do preço e como a tomada de decisão estratégica deve ser voltada para lavras mais aderentes e sustentáveis.

**PALAVRAS-CHAVE:** cava final; análise de sensibilidade; minério de ferro; *ceteris paribus*.

## ABSTRACT

Understanding how slope angle, mining recovery and mine dilution parameters can influence profit and revenue indicators of a final pit is of paramount importance when making strategic decisions in recession scenarios or euphoria due to a variation in the price of the iron ore. This work performs a fundamental and technical analysis on these parameters and shows how sustainability in mining operations is an option that brings, in addition to intangible benefits, also attractive profitability. A sensitivity analysis was carried out, using the spider plot and under *ceteris paribus* conditions, of the parameters of slope angle, iron ore price, mining cost, dilution and mining recovery in the indicators of net present value, profit, revenue and ore tonnage. It was noticeable the great influence of the price and how strategic decision-making should be adopted for more adherent and intelligent farming.

**KEYWORDS:** final pit; sensitivity analysis; iron ore; *ceteris paribus*.

## INTRODUÇÃO

A análise de sensibilidade é uma abordagem amplamente empregada em diversos campos, incluindo economia, engenharia, finanças e pesquisa operacional. Seu objetivo é avaliar o efeito das alterações nos parâmetros ou variáveis de um modelo matemático nos resultados obtidos. Essa técnica busca compreender de que maneira o modelo é afetado quando os valores das variáveis independentes são modificados, possibilitando a identificação de quais exercem maior e menor influência nos resultados (Saltelli, A. et al, 2000).

Segundo Raad (2015) determinar os limites da cava final é um dos grandes desafios de um projeto de mineração. Os limites precisam ser considerados desde o início do projeto de lavra e sempre revisados até a exaustão da mina. Definir as porções de minério do depósito que podem ser economicamente lavradas é um outro desafio (Bustillo, R.M. et al, 1997). Além destes é preciso compreender quais fatores, como ângulo de talude e custo de movimentação, possuem maior influência sobre indicadores como receita e lucro, para que melhores decisões estratégicas sejam tomadas sob a ótica de variações de momento de mercado para o minério de ferro.

As decisões estratégicas de uma grande mineradora influenciam diretamente seus lucros, a saúde da mineradora, o meio ambiente e as comunidades. Ter em mãos análises que fundamentam a melhor estratégia é de suma importância para garantir uma boa operacionalidade e continuidade dos negócios.

Uma decisão de executar uma lavra predatória pode ocasionar em redução drástica da vida útil da mina. O arranjo de uma cava final é definido normalmente utilizando o preço mais próximo da realidade do bem mineral no mercado. Em variações menores do que este valor, serão geradas cavas menores que buscam áreas de maior teor e menor relação estéril minério (Hustrulid, W. et al, 2006).

É possível conceber que a menor variação do preço do platts (minério de ferro drenado a 62% de ferro global) influencia diretamente decisões tomadas nas operações de forma imediata pela alta gerência, como a de não estabilizar taludes, executar lavra predatória avançando única e exclusivamente as porções mais ricas.

A principal aplicação de uma análise de sensibilidade através do spider plot é determinar o impacto econômico dos parâmetros de modelo mais críticos (Marshall, 1999).

## **METODOLOGIA**

O estudo foi baseado em cinco parâmetros, onde o intuito é a verificação da maior influência sobre o Valor Presente Líquido (VPL) e outros indicadores como lucro, receita e reserva de cada cava otimizada. A tabela abaixo mostra as variáveis escolhidas e a variação positiva e negativa a partir de um caso base. Todos os parâmetros variam de -20% até +20%, com exceção da variável 'Recuperação de mina', que considera as variações de -10%, -5%, caso base, +5% e +10%. Isso se deve à menor variabilidade desta variável, que representa uma realidade nas operações de lavra.

**Tabela 1 – Definição das variações de cada parâmetro.** A variação do parâmetro 'Recuperação de mina' é estabelecida pelos valores em (\*)

nº	Parâmetro	-20% (-10%*)	-10% (-5%*)	Caso Base	+10% (+5%*)	+20% (+10%*)
1	Preço platts	80	90	100	110	120
2	Ângulo talude	32	36	40	44	48
3	Diluição de mina	4.0%	4.5%	5.0%	5.5%	6.0%
4	Recuperação de mina *	81%	86%	90%	95%	99%
5	Custo lavra	6.8	7.65	8.5	9.35	10.2

O modelo geológico utilizado considera uma base de dados de minério de ferro (hematitas, itabiritos, magnetitas, goethitas entre outros) com teor de corte de 36% na região do Quadrilátero Ferrífero em Minas Gerais - Brasil. O caso base considera as atuais circunstâncias de mercado com um preço platts em US\$100,00 por tonelada de produto, o ângulo de talude de 40°, considerado mediano em escavações na região do quadrilátero, a diluição de mina em 5%, a recuperação de mina em 90% por um padrão utilizado em minerações de ferro do Quadrilátero Ferrífero, e por fim um custo de lavra de 8.5 US\$/t, equivalente a uma média geral trazida por experiências de grande e pequeno porte.

Fixado o caso base, a partir dele foram gerados 20 outros cenários variando cada uma das variáveis individualmente (*ceteris paribus*) conforme mostra a tabela 2.

**Tabela 2 – Informações de cada cenário simulado**

Cen.	Preço Platts (US\$/t)	Ângulo (º)	Diluição mina	Rec. Mina	Custo Lavra (US\$/t)
1	100	40	5%	90%	8.5
2	100	40	5%	90%	<b>6.8</b>
3	100	40	5%	90%	<b>7.65</b>
4	100	40	5%	90%	<b>9.35</b>
5	100	40	5%	90%	<b>10.2</b>
6	100	40	5%	<b>81%</b>	8.5
7	100	40	5%	<b>86%</b>	8.5
8	100	40	5%	<b>95%</b>	8.5
9	100	40	5%	<b>99%</b>	8.5
10	100	40	<b>4.0%</b>	90%	8.5
11	100	40	<b>4.5%</b>	90%	8.5
12	100	40	<b>5.5%</b>	90%	8.5
13	100	40	<b>6.0%</b>	90%	8.5
14	100	<b>32</b>	5%	90%	8.5
15	100	<b>36</b>	5%	90%	8.5
16	100	<b>44</b>	5%	90%	8.5
17	100	<b>48</b>	5%	90%	8.5
18	<b>80</b>	40	5%	90%	8.5
19	<b>90</b>	40	5%	90%	8.5

20	<b>110</b>	40	5%	90%	8.5
21	<b>120</b>	40	5%	90%	8.5

Além dos 21 cenários acima, foram simulados neste estudo três outros cenários, descritos na tabela abaixo, baseados em experiências operacionais e verificando a influência da interação de duas ou mais variáveis diferentes do caso base.

**Tabela 3 – Informação dos cenários com mais de uma variável com modificação**

Cen.	Preço Platts (US\$/t)	Ângulo (°)	Diluição mina	Rec. Mina	Custo Lavra (US\$/t)
22	<b>120</b>	40	<b>6.0%</b>	<b>81%</b>	<b>10.2</b>
23	<b>80</b>	40	<b>4.0%</b>	<b>99%</b>	8.5
24	100	<b>32</b>	<b>4.0%</b>	<b>99%</b>	<b>10.2</b>

A euforia do mercado é retratada no cenário 22, o qual apresenta um platts alto, havendo uma tendência das operações se descontrolarem buscando a maximização da lavra de minério pela incessante busca de produção, representado pelo custo mais alto, uma maior diluição e menor recuperação de mina.

O cenário 23 aponta um valor mais baixo do platts que apresenta uma recessão no mercado, com operações mais resilientes buscando maior aderência aos planos, cuidados nas operações, consequentemente reduzindo a diluição e aumentando a recuperação de mina, porém mantendo o custo de lavra aderente ao programa orçamentário.

O cenário 24 transmite uma empresa que busca excelência em suas operações utilizando métodos mais conservadores em taludes, garantindo estabilidade, cuidados na operação de perfuração, desmonte, carregamento e transporte, sugerindo um menor ângulo de talude, custo operacional maior, menor diluição e maior recuperação.

A otimização foi executada no software NPV Scheduler 4 da Datamine Softwares que define a cava final pelo algoritmo de Lerch-Grossmann (1965). Outras variáveis como recuperação de usina, custo de processamento, custos adicionais, produção anual e taxa de retorno (para definição do valor presente líquido) estão descritos no quadro 1.

**Quadro 1 – Valoração de variáveis fixas**

Item	Valor
Custos de processo, transporte e outros	US\$57.00/t
Recuperação de usina	50%
Produção anual	20 Mt
Taxa de retorno anual	10%
Teor de corte	36%

O teor de corte é fixo, não modifica independente de qualquer variável: todo material acima de 36% de ferro é minério e abaixo é estéril.

Nenhuma poligonal de limite foi utilizada, desta forma o software realiza a busca por todo o modelo geológico.

Foi utilizada função objetivo buscando maximização do fluxo de caixa.

## RESULTADOS

A tabela 4 mostra os resultados de cada indicador avaliado em função das variáveis. Foram eleitos quatro indicadores: valor presente líquido, lucro (custo menos receita), receita total e reserva.

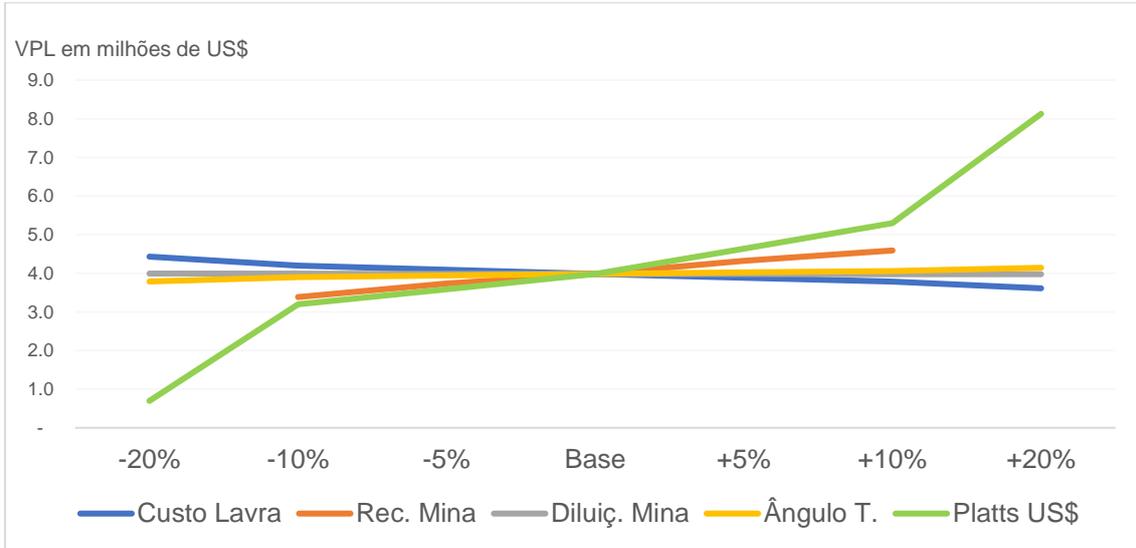
Tabela 4 – Resultados de cada cenário

		Cenário e indicadores				
		Cenário	VPL (milhões US\$)	Lucro (Receita - Custo) milhões US\$	Receita (milhões US\$)	Reserva (milhões toneladas)
Variáveis	Base	Cenário 1	4.0	70.4	282.8	4.5
	Custo Lavra	Cenário 2	4.4	81.5	290.6	4.6
		Cenário 3	4.2	75.9	286.9	4.5
		Cenário 4	3.8	65.1	278.8	4.4
		Cenário 5	3.6	60.0	274.3	4.3
		Rec. Mina	Cenário 6	3.4	58.1	250.4
	Cenário 7		3.7	64.9	268.5	4.4
	Cenário 8		4.3	77.3	301.1	4.5
	Cenário 9		4.6	82.9	315.3	4.5
	Diluic. Mina	Cenário 10	4.0	70.6	282.9	4.5
		Cenário 11	4.0	70.5	282.8	4.5
		Cenário 12	4.0	70.3	282.7	4.5
		Cenário 13	4.0	70.2	282.7	4.5
	Ângulo T.	Cenário 14	3.8	63.6	270.2	4.3
		Cenário 15	3.9	67.2	277.3	4.4
		Cenário 16	4.1	72.6	287.0	4.5
		Cenário 17	4.1	74.8	291.1	4.6
	Platts US\$	Cenário 18	0.7	17.4	185.0	3.7
		Cenário 19	3.2	42.7	242.5	4.3
		Cenário 20	5.3	99.1	319.3	4.6
		Cenário 21	8.1	128.4	353.4	4.6
	Euforia	Cenário 22	5.3	98.2	309.5	4.5
	Recessão	Cenário 23	1.0	23.2	215.5	3.9
	Aderente	Cenário 24	4.0	64.7	291.8	4.2

Quatro gráficos comparativos foram construídos no intuito de avaliar a sensibilidade de cada variável em função dos indicadores.

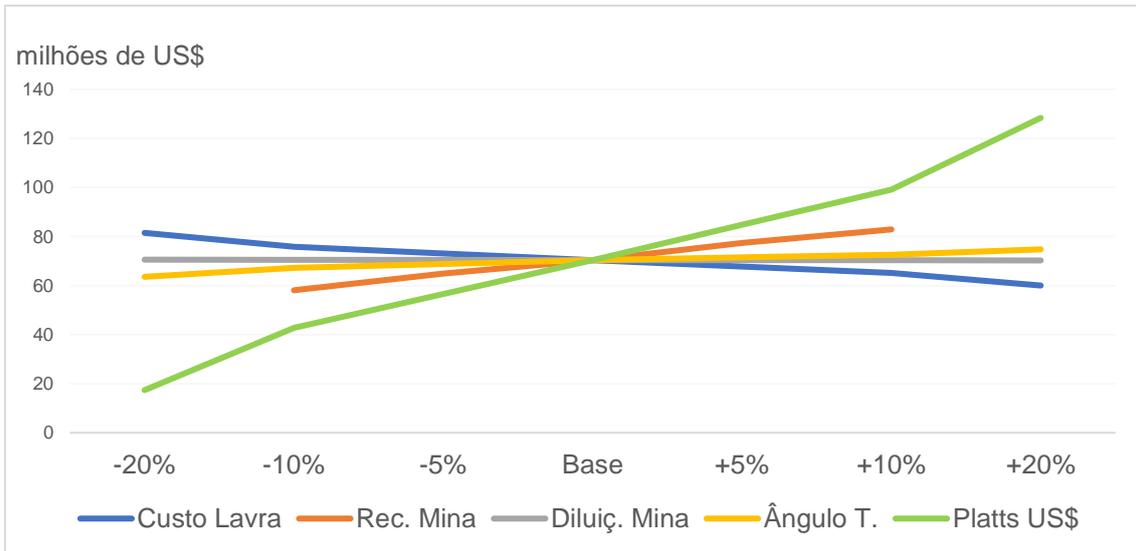
A figura 1 diz respeito à sensibilidade em relação ao VPL indicando claramente que o preço do platts é destoante em função das outras variáveis.

**Figura 1 - Sensibilidade de cada variável em função do VPL**

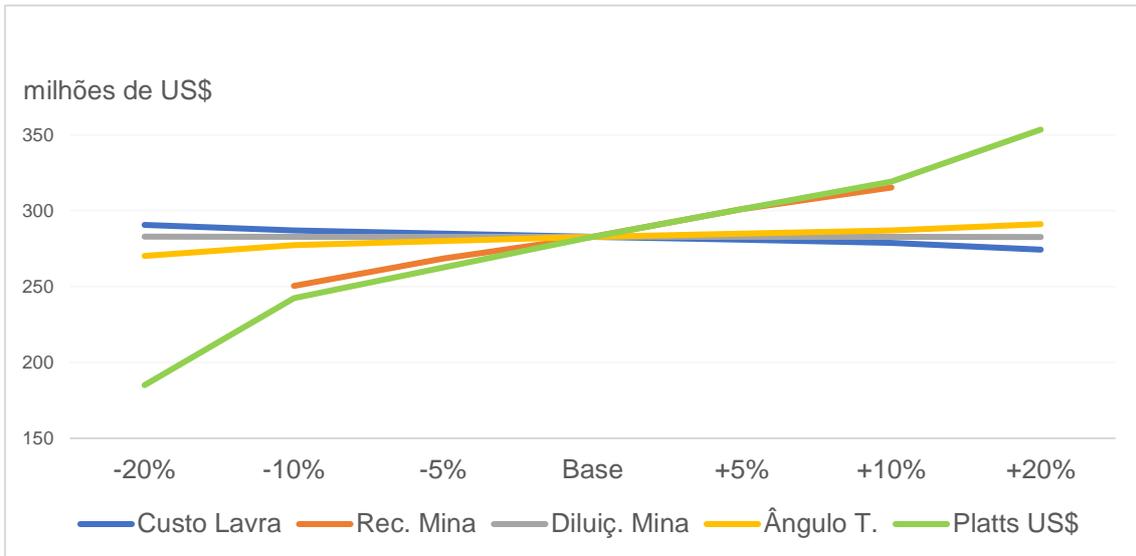


As figuras 2, 3 e 4 confirmam o grande impacto do valor do platts sobre os indicadores. O gráfico na figura 4 chama atenção para um valor de platts baixo ocasionando uma forte queda na reserva, justificável em tempos de recessão a lavra de minérios de teores mais altos e a contenção de custos com estéril.

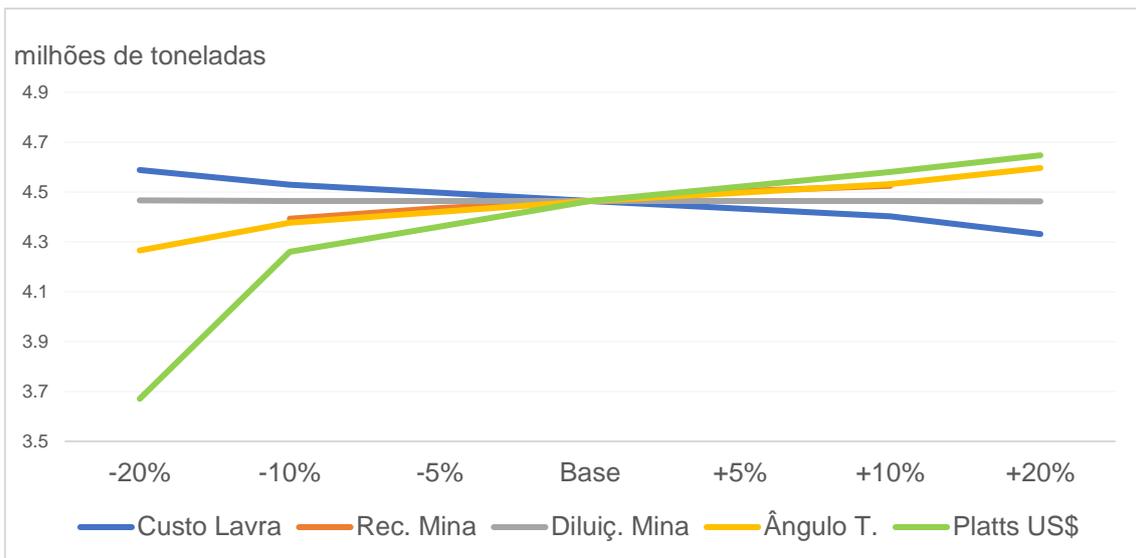
**Figura 2 - Sensibilidade de cada variável em função do Lucro (Receita - Custo) nas cavas em milhões de dólares**



**Figura 3 - Sensibilidade das variáveis em função da Receita (em milhões de dólares) em cada cava**



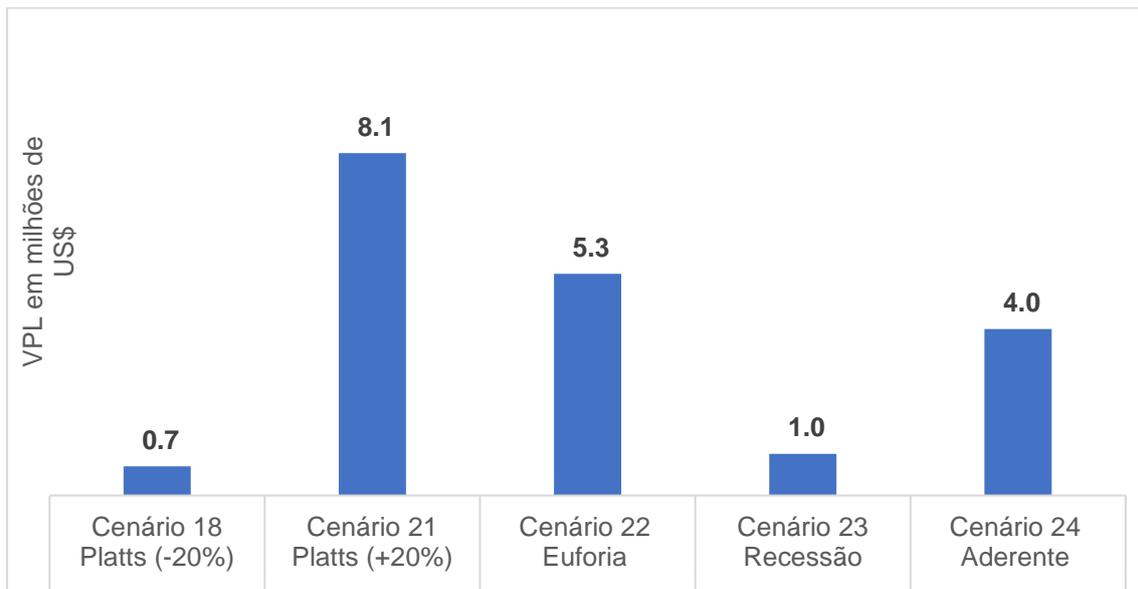
**Figura 4 - Sensibilidade de cada variável em função da reserva (milhões de toneladas) gerada em cada cava**



A figura 5 estabelece relação comparativa dos cenários de euforia, recessão e aderência com o valor do platts, mostrando que numa recessão há uma grande perda no valor presente líquido. O cenário que busca excelência operacional obtém ganho próximo ao cenário de euforia. O cenário 21 mostra o valor do platts muito alto sem levar em consideração que nesta ocasião gera um cenário de euforia que ocasiona na mudança de outras variáveis trazendo o VPL mais próximo da realidade.

A lavra que leva em consideração padrões de taludes aderentes e mais estáveis geram segurança nas operações, menor taxa de acidentes, além de ganhos intangíveis como melhor recuperação após um período de chuva, segurança para os colaboradores e aumento do fator de segurança dos taludes.

**Figura 5 - Valor presente líquido em função dos cenários de euforia, recessão e aderente comparado com a variação do platts**



## DISCUSSÃO DOS RESULTADOS

O ângulo de talude possui a menor influência sobre os indicadores apontados pelos números obtidos neste experimento, tornando viável geometrias de cava com parâmetros geotécnicos conservadores. Diluição e recuperação seguem com baixa influência em detrimento das outras variáveis.

A execução de lavra em excelência exposta pelo cenário 24 projeta ganhos sem grande influência no VPL conforme mostra o gráfico na figura 5.

O platts é o grande impactante no VPL, no lucro, nas receitas e na reserva apresentados pelas figuras 1, 2, 3 e 4 respectivamente. O parâmetro de menor influência é a diluição de mina. De forma intermediária, o custo de lavra e recuperação de mina intervêm nos indicadores. O ângulo de talude tem relevância apenas na reserva, mas não no VPL, receita e lucro, pois a função objetivo do otimizador utilizada neste experimento foi a maximização do fluxo de caixa.

Quando analisados cenários em que vários fatores são ajustados (figura 5), um tende a minimizar o impacto do outro, gerando resultados menos extremos (seja positivo ou negativo) ao contrário da análise *ceteris paribus* que gera uma variabilidade maior nos resultados.

## CONSIDERAÇÕES FINAIS

O cenário 24 é o de excelência operacional que gera resultados bem próximos a de uma euforia, de 4,5 e 5,3 milhões de dólares respectivamente apresentados na figura 5. Torna clara a importância da alta gerência de tomar decisões estratégicas voltadas à sustentabilidade do negócio visando não unilateralmente o lucro e VPL máximo, mas também a segurança das operações e à aderência aos projetos.

## REFERÊNCIAS

SALTELLI, A., TARANTOLA, S. & CAMPOLONGO, F. **Sensitivity analysis as an ingredient of modeling**. Statistical Science 15 n° 4, Institute of Mathematical Statistics, Beachwood, Ohio. p. 377-395. 2000.

RAAD, C.V., PERONI, R. L. **Otimização de cava a céu aberto através do algoritmo de Lerchs-Grossmann: estudo comparativo entre os softwares LG3D e Minesight**. XXVII SIC - Salão de Iniciação Científica. Porto Alegre RS. Universidade Federal do Rio Grande do Sul. 2015

BUSTILLO, R.M. et alii. **Manual de evaluación y diseño de explotaciones mineras** Madrid: Entorno Grafico, 1997.

Marshall, H. E. **Technology Management Handbook**. Boca Raton: CRC Press LLC. 1999.

HUSTRULID, W. et alii. **Open pit mine planning and design** (2. ed.). London, UK: Taylor & Francis, 2006. 494p.

LERCHS, H., GROSSMANN, L. F. **Optimum design of open-pit mines**. Transactions, Canadian Mining and Metallurgical Bulletin, Montreal, Canada, v. LXVIII, p.17-24, 1965.