



APLICAÇÃO DE TÉCNICAS DE GEOESTATÍSTICA EM DADOS ECONÔMICOS GEOLOCALIZADOS

FREITAS, F.L.¹; SAMPAIO, C.H.²; ARAÚJO, C.P.³; KUCKARTZ, B.T.⁴

¹Eng. Minas, LAPROM/UFRGS, Porto Alegre, RS, Brasil

² Professor Serra Hunter Eng. Minas, Departament d'Enginyeria Minera, Industrial i TIC,
Universitat Politècnica de Catalunya Barcelona Tech Barcelona, Espanha

³ Química, LPM/UFRGS, Porto Alegre, RS, Brasil

⁴ Eng. Minas, LPM/UFRGS, Porto Alegre, RS, Brasil

RESUMO

O artigo analisa a possibilidade do uso de ferramentas geoestatísticas no tratamento de variáveis econômico-financeira no ambiente da exploração mineral de jazidas de carvão a céu aberto. A utilização de dados econômico financeiros geolocalizados podem substituir as habituais relações estéril/minério como auxiliares nas decisões de planejamento de curto e médio prazo. Relocações de frentes de mineração, aproveitamento de áreas marginais e utilização de locais de extração alternativos dependem da economicidade da área alvo. Na mineração de carvão a céu aberto estas decisões são suportadas pela comparação da relação estéril/minério com o valor padrão estabelecido na avaliação econômica do projeto. Valores de OPEX calculados a partir da relação minério, valoram e preservam esta relação, acrescentando ainda os custos de transporte interno. Neste contexto a discretização do OPEX pode ser feita de duas formas, interpolando as variáveis geológicas e calculando o valor do custo ou interpolando diretamente o valor localizado do OPEX. A primeira com maior precisão, a segunda com maior presteza. O trabalho conclui pela utilidade do método em situações de jazimento semelhante ao estudado.

PALAVRA-CHAVE: OPEX; Avaliação econômica; geoestatística em carvão.

ABSTRAT

The text analyzes the possibility of using geostatistical treatment tools of economic variables in the open-pit coal deposits environment. The use of geolocalized financial data may replace the usual stripping ratio as ancillary to short- and medium-term planning decisions. Reallocate cuts, utilization of marginal areas and use of alternative extraction sites depends on the economics of the target area. In open pit coal mining, these decisions are supported by the comparison between the stripping ratio with the standard project value. OPEX values calculated from the stripping ratio, value and preserve this relation, adding also the internal transportation costs. In this context, the OPEX discretization can be done in two ways, by interpolating the geological variables and calculating the cost value or by directly interpolating the localized OPEX value. The first is accurate, the second quick. The paper concludes by the usefulness of the method in similar deposit to that studied.

Keywords: OPEX; Economic evaluation; coal geostatistical.

1.1 INTRODUÇÃO

As técnicas modernas de determinação da geometria da lavra de corpos minerais costumam utilizar dados de custos diretos e de receita como forma de ordenar a extração e o alcance da lavra de corpos minerais. Exemplos destes métodos são o do Algoritmo de Lerchs-Grossmann e o do “Cone Flutuante”, como descrito por Hustrulid (2013). Nestes os blocos alvo do método são valorados pelo Valor Líquido ou Net Value (NV), obtido pela diferença da possível receita obtida pelo minério contido e os seus custos de extração. O pressuposto lógico nestes métodos é que a extração de um bloco depende da extração do bloco vizinho e/ou sobreposto, estando implícito, portanto, o critério de localização, mesmo que relativa. Esses dois conceitos primários são determinantes na definição da cava e, posteriormente, seu sequenciamento.

A utilização do georreferenciamento das amostras, bem como a análise do custo local (OPEX), acrescentam informações importantes aos resultados finais, abrangendo não só a conformação da geometria da lavra e a indicação da viabilidade econômica do projeto, mas também onde, espacialmente, esta viabilidade ocorre, seus limites econômicos e reservas marginais. Para tanto é necessário utilizar ferramentas de geoestatística para interpolação dos dados existente, de modo a construir um grid que permita o traçado de isolinhas das variáveis de interesse.

Autores como Torries (2008), Gentry & O'neil (1984), reconhecem como indicador de viabilidade econômica, entre outros, o cálculo do Valor Presente Líquido do Fluxo de Caixa Descontado (VPL). Neste estão contemplados custos, receitas, impostos e margens determinadas pelo investidor. A constituição dos dados que compõe o VPL é de múltipla origem e nem sempre disponíveis para todos os níveis hierárquicos da Empresa. Alguns desses dados são de cunho estratégicos e reservados como a composição da Taxa de Desconto. O VPL normalmente se refere ao projeto como um todo, simulando seu valor ao longo da vida útil da operação.

Examinando-se a equação que determina o VPL de um fluxo descontado, verifica-se que esta pode ser desmembrada em três parcelas, conforme visto na eq. 1.

$$VPL = \sum_{t=1}^n \frac{RL_t}{(1+i)^t} - \sum_{t=1}^n \frac{CAPEX_t}{(1+i)^t} - \sum_{t=1}^n \frac{OPEX_t}{(1+i)^t} \quad (1)$$

Sendo: $\sum_{t=1}^n \frac{RL_t}{(1+i)^t}$ correspondendo ao fluxo descontado das receitas líquidas;
 $\sum_{t=1}^n \frac{CAPEX_t}{(1+i)^t}$ correspondendo ao fluxo descontado das inversões de capital e
 $\sum_{t=1}^n \frac{OPEX_t}{(1+i)^t}$ correspondendo ao fluxo descontado dos custos operacionais.

As parcelas referentes ao RL e ao CAPEX podem ser entendidas como valores constantes, quando forem referidas a um projeto com investimentos determinados, contratos com entregas fixas a preços pré-estabelecidos. Os valores referentes ao OPEX estão ligados a geometria da jazida, sua litologia, espessuras, teores, dados dependentes da geolocalização da amostragem. Estes últimos ainda podem ser decompostos em decorrentes dos custos de extração e outro dos custos de transporte interno.

Examinados os conceitos estabelecidos na literatura como Sinclair & Blackwell (2004), em especial Journal & Huijbregts (1978), as variáveis passíveis de interpolação são as denominadas aditivas e neste conceito não se incluem as variáveis econômicas.

Estabelecido isto, não é teratológico o exame da variável custo total, embora não aditiva, pelas mesmas ferramentas que examinam as geológicas e, seu resultado, comparado com o obtido por tratamento matemático das geológicas previamente estimadas. Verificada a presença de distorção e o grau de erro incorrido, avalia-se a utilidade dos dados gerados para um possível aproveitamento qualitativo. A pesquisa da interpolação direta das variáveis de custo em comparação da interpolação prévia das variáveis geológicas e posterior cálculo dos custos de operação justifica-se pelo número de operações necessárias para realização das duas operações. A economia de tempo e facilidade de operação é significativa no tratamento de grandes números de variáveis quando o tratamento direto não produza distorções importantes.

Para efeitos do desenvolvimento deste artigo será considerada como premissa o projeto de exploração de uma jazida de carvão a céu aberto, amostrada em malha regular, georeferenciada, onde foram coletados dados de espessura do minério, intercalantes e de cobertura. Os custos atribuídos estão expressos em unidades monetárias e são hipotéticos. Como simplificação do presente artigo o sistema de beneficiamento empregado será o de cominuição, não implicando em alterações de recuperação do minério ao longo da jazida.

As variáveis econômicas, utilizada “ad hoc”, serão a da parcela unitárias do OPEX desmembrada do cálculo do VPL, referente aos custos operacionais unitários associados a remoção e deposição das camadas de estéril, extração do minério e transporte até a usina de tratamento, do hipotético do projeto de mineração de carvão retro citado.

2. METODOLOGIA

Para avaliar a proposta serão utilizados dados de uma jazida mineral onde foram amostradas, em malha regular georreferenciada, espessuras de carvão e espessuras do estéril sobrejacente. Os dados analisados foram obtidos a partir 82 furos em malha não regular, com aproximadamente 4 km por 3,8 km, oriundos de áreas hoje já mineradas na Jazida de Candiota e são típicos das camadas de carvão encontrada na região. Detalham parte do jazimento deste minério encontrado na Camada Candiota. Os dados de localização foram alterados e os perfis de sondagem pertencem a áreas já mineradas. A partir destes dados foram calculados valores de relação estéril minério, distância do transporte interno e de custo total. No cálculo do OPEX, representado pelo somatório dos COP_Tra e COP_Min, foram utilizados custos já praticados, referidos a mesma base temporal, omitida esta data no intuito de preservação de sigilo industrial.

- Custos operacionais de transporte, $COP_Tra = Dst \times 0,3 + 0,15 \text{ \$/m}^3$
- Custo operacionais de Mineração, $COP_Min = (EST_T / CV - T) \times 0,8 \text{ \$/m}^3$

Para examinar a premissa de que os valores econômicos guardam relação com os dados geológicos, será verificada a existência de correlação entre a variável relação estéril/minério e o custo operacional referido no mesmo ponto. Serão também testados o efeito do agrupamento sobre os dados, a correlação entre as variáveis de custo e geológicas e calculados os variogramas experimentais destas grandezas.

Determinadas a continuidade espacial das variáveis de espessura, será gerado, por krigagem, um grid de estimativa das citadas variáveis geológicas. Em seguimento serão calculadas, a distância de transporte, a relação estéril minério e o custo unitário

total. O grid utilizado será de 75 m X 75 m, espaço que permite um planejamento adequado de descobertura e extração do minério. O modelo de krigagem utilizado é o de krigagem ordinária em blocos, com a pesquisa de 5 amostras em todos os eixos e raio de busca de 320m. O resultado é um mapa onde estão localizados os valores de OPEX (OPEX_CAL) calculados a partir das variáveis geológicas interpoladas. O mesmo grid será utilizado para a interpolação dos dados de custo total, gerando um mapa de OPEX krigado (OPEX_KRIG). Serão comparados os dados de interpolação das variáveis geológicas com os dados originais, os dados de OPEX calculados a partir dos geológicos estimados e do OPEX estimado diretamente. A fig. 1 demonstra a metodologia.

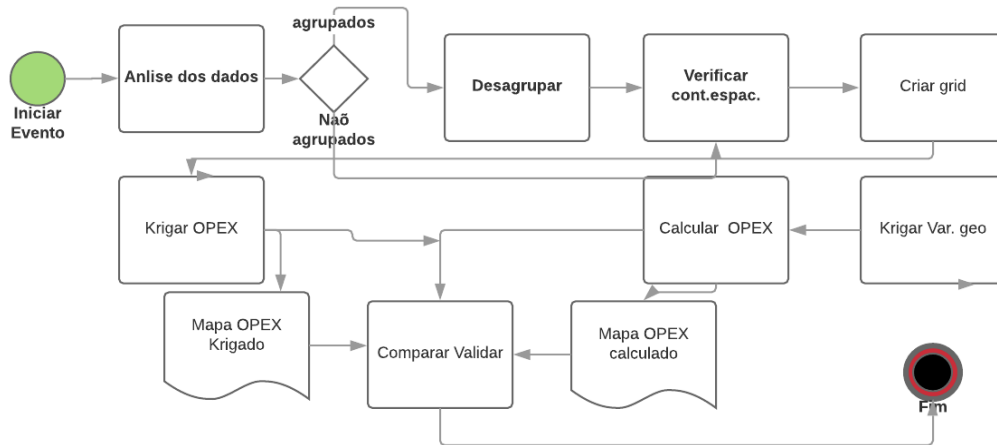


Figura 1 Fluxograma da metodologia

3. RESULTADOS

A figura 2 mostra a distribuição geolocalizada dos valores original de OPEX, bem como o histograma destes dados.

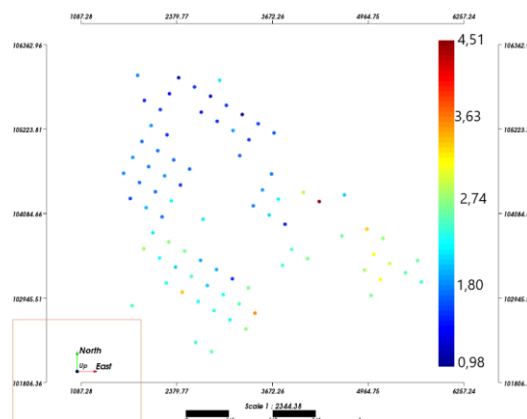


Figura 2 Distribuição espacial e histograma do OPEX original

O quadro a seguir, Tab. 1, demonstra a distribuição estatísticas das variáveis de espessura da cobertura (EST_T), espessura do minério (CV_T) e custo de mineração e transporte (OPEX).

Tabela 1 Estatística dos dados originais de EST_T, CV_T e OPEX

	EST_T	CV_T	OPEX
Nº da Amostras	82	82	82
Média	13,80	5,45	2,24
Variância	42,98	0,49	0,37
Mínimo	0,10	2,41	0,99
Máximo	35,07	7,71	4,55

3.1 DESAGRUPAMENTO

Conforme assevera Isaak & Srivastava (1989), no cálculo da estatística de uma amostra, é necessário verificar se a localização das amostragens influencia de forma homogênea no cálculo da média e, por conseguinte, nos demais parâmetros de dispersão.

Verifica-se pelos valores apresentados na Tab. 2, que a diferença entre as médias dos dados de CV_T agrupados e desagrupados foi de 0,1%, não indicando influência significativa pelo agrupamento. Da mesma forma a variável EST_T não apresenta distorção por agrupamento, já que a diferença entre as médias agrupada/desagrupada foi de 4%. Os dados foram desagrupados pelo método do Vizinho Mais Próximo, em um grid de 75 m x 75 m, com range de 350 m.

Tabela 2 Valores dos dados agrupados e desagrupados pelo método do Vizinho Mais Próximo

Variável	CV_T			EST_T		
	Original	Desagrupado	Varição	Original	Desagrupado	Varição
Média	5,447	5,450	0,999	13,80	14,337	0,96
Variância	0,468	0,486	0,962	45,398	42,983	1,06

3.2 CORRELAÇÃO

A análise do “Scatter plot” das variáveis originais, mostrado na figura 3, apresenta correlação entre Estéril/Minério e Custo Total de 87%.

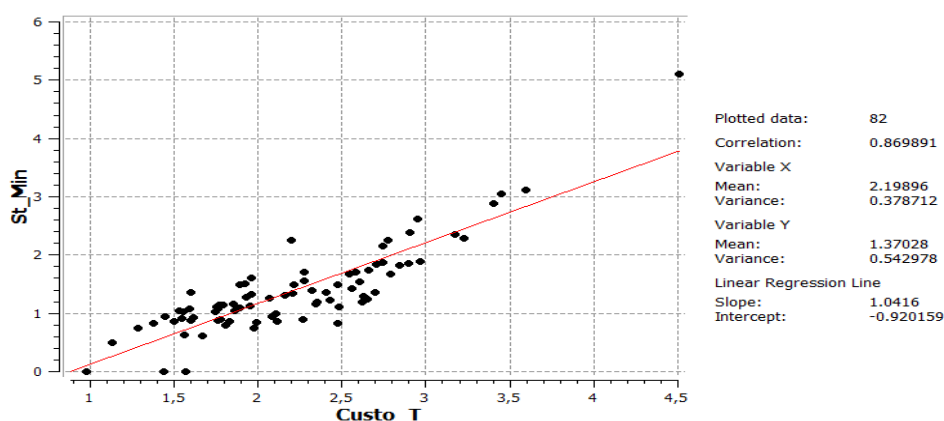


Figura 3 Scatter plot das variáveis Estéril/Minério x Custo Total

Os valores mostram que os dados possuem correlação significativa. Ressalta-se que no valor da variável OPEX está agregado o valor do custo de transporte interno, função independente da relação Estéril/Minério e que pode ser responsável por parte da diferença de 13% na correlação.

3.3 CONTINUIDADE ESPACIAL – VARIOGRAMAS

O quadro a seguir, Tab. 3, mostra os resultados destas varreduras, na forma de variogramas experimentais:

Tabela 3 Dados dos Variogramas experimentais das variáveis originais

Variável	ESP_T	CV_T	OPEX
Tipo	Esférico	Esférico	Esférico
Nugget	10	0	0,05
Sill	32,9	0,48	0,32
Range	750	325	1825

3.4 ESTIMAÇÃO

A partir dos dados obtidos por krigagem da espessura do estéril e da espessura do minério foram calculadas, com os mesmos valores aplicados para obtenção do OPEX original, os valores de Estéril/inério, distância de transporte, custos de transporte interno, custos de extração e deposição e, somados, obtidos os custos operacionais calculados (OPEX_CAL). Este valor pode ser cotejado com o obtido pela krigagem direta do OPEX original. A Fig. 4 mostra o resultado destes valores dispostos espacialmente.

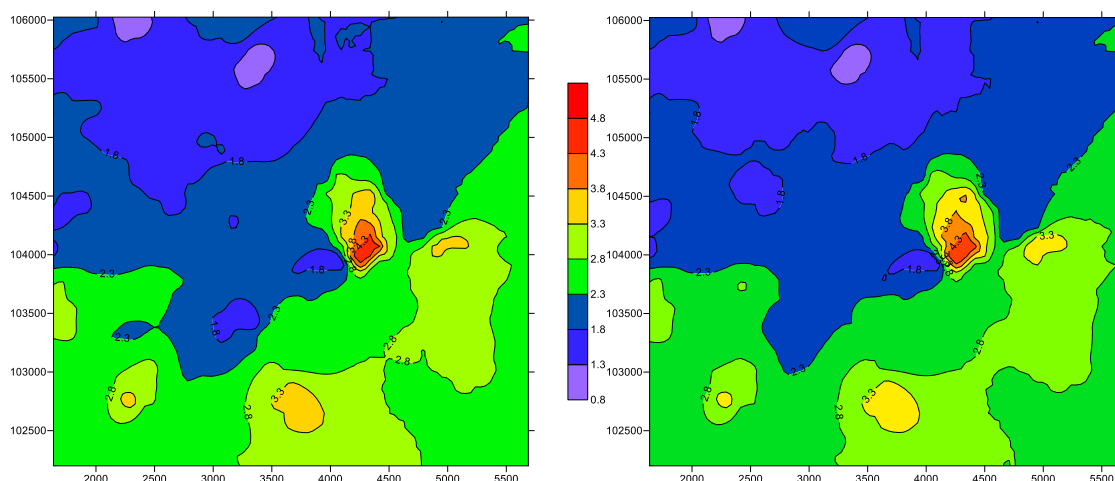


Figura 4 Mapa do OPEX Calculado a esquerda e OPEX Krigado a direita (Stanford Geostatistical Modeling Software)

A comparação visual dos dois mapas revela similitude em grau suficiente para afirmar que as informações de ambos podem ser utilizadas com mesma ordem de precisão.

3.5 VALIDAÇÃO

Para validar os resultados foram comparados os 3 histogramas de OPEX, dos dados originais (HD), Krigados de forma direta (OPEX_Krig) e o calculado a partir das variáveis geológicas krigadas (OPEX_CAL). A forte coerência dos dados de média e variância podem ser observadas na Tab. 4:

Tabela 4 Histogramas do OPEX Original(HD) Krigados (Krig) e Calculados (Cal)

	Histogramas			Δ		
	HD	OPEX_Krig	OPEX_Cal	OPEX_Krig/ HD	OPEX_Cal/ HD	OPEX_Cal /OPEX_Krig
Média	2,24	2,3	2,25	1,03	1,00	0,99
Vari.	0,37	0,33	0,31	0,87	0,82	0,94

Foram verificadas as correlações dos três conjuntos de dados por meio dos seus “scatter-plot”. Os resultados mostraram que a correlação entre os dados krigados diretamente e os calculados foi de expressivos 99%. A Tab. 5 mostras os dados de correlação:

Tabela 5 Dados de correlação entre os OPEX Original(HD) Krigados (Krig) e Calculados (Cal)

	Scaterplot x/y		
	HD/Krig	HD/Cal	Krig/Cal
Correlação	0,9578	0,9717	0,99
Media X	2,24	2,24	2,3
Var x	0,37	0,37	0,33
MediaY	2,3	2,25	2,25
Var y	0,33	0,31	0,31
Slop	0,89	0,88	0,96
Intersec	0,23	0,22	0,04

Na análise da Deriva foi executado com fatias de 450 m. Os valores do OPEX Calculados confrontados com os Krigados, tanto em x como em y, são mostrados na Fig. 4. Comparados, os dados do OPEX_krig estão levemente deslocados no sentido de valorizar os teores, nos dois eixos.

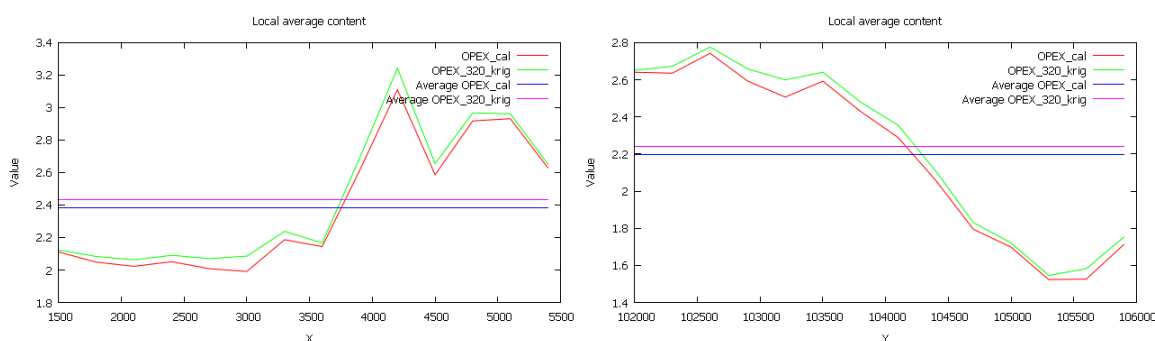


Figura 5 Análise de Deriva do OPEX Calculado e Krigado

A desenvolvimento da demonstração indica que os valores de correlação entre os dados de OPEX calculados com a os dados de OPEX krigados diretamente são de 99,15 %. A correlação entre os dados de OPEX estimados por cálculo e os dados originais é de 97,17%. A correlação entre os dados calculados a partir dos reais krigados e os originais é de 95,78%. Examinadas as derivas da variável OPEX obtidas, verifica-se a atenuação

nas duas estimativas, com tendência a uma leve supervalorização das médias com maior expressão na estimação por krigagem direta do OPEX.

A construção de mapas com linhas de mesmo OPEX podem ser realizados tanto pelo método de krigagem direta do OPEX como pelo obtido pelo cálculo das variáveis reais krigadas. O erro, no caso demonstrado, permite a avaliação qualitativa da área em questão. No caso em foco a economia de tempo no cálculo com o uso da krigagem direta não é expressiva em virtude do número relativamente pequeno de sondagens. Esta economia pode ocorrer quando a análise for de grande quantidade de dados. Ressalta-se, por importante, que a comparação com os dados de campo é imprescindível para a avaliação final. Da mesma forma a verificação do peso do custo do transporte interno na composição do OPEX é importante, pois se expressivo pode enviesar as estimativas.

4. CONCLUSÃO

A possibilidade utilização do OPEX krigado em lugar da tradicional relação estéril/minério permite a rápida avaliação de alternativas de produção levando em conta não só os custos de extração como os de transporte interno. Mapas gerados com esta informação permitem um domínio das operações superior a visualização do REM. A propriedade de fatoração do VPL em parcelas correspondentes a receitas, inversões de capital, custos de extração e custo de transporte permite a comparação de pontos georreferenciados com matrizes construídas através de análise de sensibilidade do OPEX ou do VPL. Nestas matrizes podem ser variados, dois a dois, estes itens do fluxo. A localização de áreas mais ou menos sensíveis a estas variações podem orientar o planejamento de curto e longo prazo ou recomendar o aproveitamento de reservas marginais no caso de modificações de preço, investimentos, destino do transporte interno ou custos. As demonstrações indicam que para jazidas semelhantes às que serviram a este estudo o método de krigagem direta do OPEX, embora conservando a restrição de variável não aditiva, tem precisão semelhante ao cálculo a partir das variáveis geológicas interpoladas. Para jazidas diferentes ou onde os custos variam de forma expressivas localmente, o método deve ser testado na sua precisão.

5. REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS

Gentry, Donald W., e Thomas J. O'neil. *Mine Investment Analysis*. Society of Mining Engineers, 1984.

Isaak, Eduard H., e R. Mohan Srivastava. *An Introduction to Applied Geostatistics*. Oxford University Press, 1989.

Journel, André G., e Charles J. Huijbregts. *Mining Geostatistics*. Academic Press, 1978.

Sinclair, Alastair J., e Garston H. Blackwell. *Applied Mineral Inventory Estimation*. Cambridge Universe Press, 2004.

Torries, Thomas. *Evaluating Mineral Projects: Applications and Misconceptions*. Society for Mining, Metallurgy, and Exploration, 2008.

W.Hustrulid, M.Kuchta and R.Martin. *Open Pit Mine Planning & Design*. 2 vols. London: CRC Press, 2013.