

MINISTÉRIO DE MINAS E ENERGIA
SECRETARIA DE GEOLOGIA, MINERAÇÃO E TRANSFORMAÇÃO MINERAL
SERVIÇO GEOLÓGICO DO BRASIL – CPRM
DIRETORIA DE GEOLOGIA E RECURSOS MINERAIS



PLATAFORMA DE SUPORTE AO PLANEJAMENTO DA
PESQUISA E PRODUÇÃO MINERAL

PLANO DE TRABALHO

SUBPROGRAMA AVALIAÇÃO DO POTENCIAL
GEOECONÔMICO REGIONAL (APGR)

Agosto / 2021

SUMÁRIO

1. ANTECEDENTES.....	2
2. OBJETIVOS.....	3
2.1 OBJETIVO DO SUBPROGRAMA.....	3
2.2 OBJETIVO DO PROJETO.....	3
3. FUNDAMENTOS.....	3
3.1. TÉCNICAS DE AVALIAÇÃO ECONÔMICA.....	5
4. METODOLOGIA.....	6
4.1. AVALIAÇÃO ECONÔMICA.....	6
4.2.1 SISTEMAS MINERAIS.....	8
4.2.2 LEI DE ZIPF.....	10
6. ATRIBUIÇÕES.....	12
7. CRONOGRAMA.....	13

1. ANTECEDENTES

O Projeto *Avaliação do Potencial Geoeconômico da Província de Carajás* integra subprograma *Avaliação do Potencial Geoeconômico Regional (APGR)*, inserido no Programa Plataforma para o Planejamento da Pesquisa e Produção Mineral (PLATAFORMA) conduzido pelo Serviço Geológico do Brasil (SGB-CPRM). Este Projeto foi motivado por alguns fatos, e eventos, que desencadearam a iniciativa de estruturação deste Plano de Trabalho.

No início do segundo semestre de 2020, em uma reunião com *Marcio Remédio*, Diretor da Diretoria de Geologia e Recursos Minerais (DGM) do SGB-CPRM, da qual participavam *Felipe Tavares* (Chefe da Divisão de Geologia Econômica - DIGECO) e *Gilberto Calaes* (Assessor da DGM), foi lançada uma reflexão sobre a complexidade e a importância da estimativa de valor do potencial geoeconômico de uma determinada região. O desafio de construir uma metodologia eficaz e de aplicá-la à região amazônica foi particularmente discutido. Após essa reunião, foi confirmado que o tema tem convergências com a linha de trabalho da DIGECO, assim como com as diretrizes que estavam sendo estabelecidas para o Programa PLATAFORMA, cujo Plano Diretor (CALAES, 2020) estava sendo elaborado na ocasião.

A equipe da DIGECO, com colaboração da Divisão de Geofísica e Sensoriamento Remoto (DISEGE), vem desenvolvendo relevantes trabalhos na área de modelamento do potencial mineral, especialmente no que tange a estimativa de recursos não descobertos. Neste contexto vale ressaltar a substancial bibliografia já reunida sobre o tema, os estudos que vêm sendo realizados pelos seus integrantes e trabalhos publicados (COSTA ET. AL., 2019; 2021, QUEIROZ ET. AL., 2020), assim como a interação com experiências de outras instituições, tais como o *United States Geological Survey (USGS)*, com o qual foi realizado um workshop sobre *Three-part Mineral Resource Assessment*, em 2019.

A perspectiva de aliar esforços entre as equipes da DIGECO e da PLATAFORMA motivou a criação desse subgrupo de trabalho, visando articular a expertise que vem sendo desenvolvida pela DIGECO com as metodologias de avaliação econômica de recursos e reservas – um dos temas de destaque para a equipe da PLATAFORMA.

Como resultado dos fatos e eventos aqui citados, decidiu-se constituir, no âmbito do Programa PLATAFORMA, o subprograma *Avaliação de Potencial Geoeconômico Regional (APGR)*. A Província Mineral de Carajás, situada no Estado do Pará, foi selecionada para a realização da experiência piloto, uma vez que é uma Província amplamente estudada pelo SGB e pelos integrantes da equipe de implementação do projeto. Soma-se a isso o fato de possuir quantidade e qualidade de dados necessários para a aplicação das metodologias propostas.

2. OBJETIVOS

2.1 OBJETIVO DO SUBPROGRAMA

O objetivo específico do projeto se articula com o objetivo geral do subprograma, o de consubstanciar uma metodologia consistente e robusta a ser replicada em diferentes províncias geoeconômicas e distritos mineiros já consolidados, assim como em qualquer recorte territorial que apresente potencial para hospedar novas ocorrências de recursos minerais. A avaliação de potencial geoeconômico regional propiciará a obtenção e disponibilização de elementos informativos de suporte para estudos e planos estratégicos relacionados a políticas públicas, assim como a programas de investimentos em pesquisa e produção mineral.

É importante ressaltar que os produtos de modelagem do potencial mineral são especialmente importantes nas tomadas de decisões relativas à exploração mineral em seu estágio inicial. Tais produtos são gerados a partir da utilização de técnicas estatísticas integradas à abordagem de Sistemas Minerais (SM). Em etapas subsequentes tal avaliação subsidiará o modelamento prospectivo regional em ambiente de Sistemas de Informações Geográficas (SIG).

2.2 OBJETIVO DO PROJETO

O objetivo principal deste plano de trabalho é a avaliação do potencial geoeconômico da *Província Mineral de Carajás*, situada no sudeste do estado do Pará, com a utilização de modelos previsionais e de avaliação econômica. Estimativas de valor para depósitos minerais, incluindo recursos ainda não descobertos, serão produzidas para substâncias como ferro, manganês, cobre, níquel, EGP e ouro.

3. FUNDAMENTOS

Os riscos associados à descoberta de novos depósitos minerais vêm se expandindo ao longo do tempo. Verifica-se, no entanto, que apesar do aumento de investimento em pesquisa mineral, a taxa de novas descobertas não vem crescendo de maneira correspondente, aumentando consideravelmente o custo médio por descoberta (Fig. 01). Uma forma eficaz de mitigar esses riscos, sobretudo nas etapas iniciais da prospecção mineral, é gerar modelos previsionais integrando informações e conhecimentos relacionados a critérios geológicos e modelos metalogenéticos.

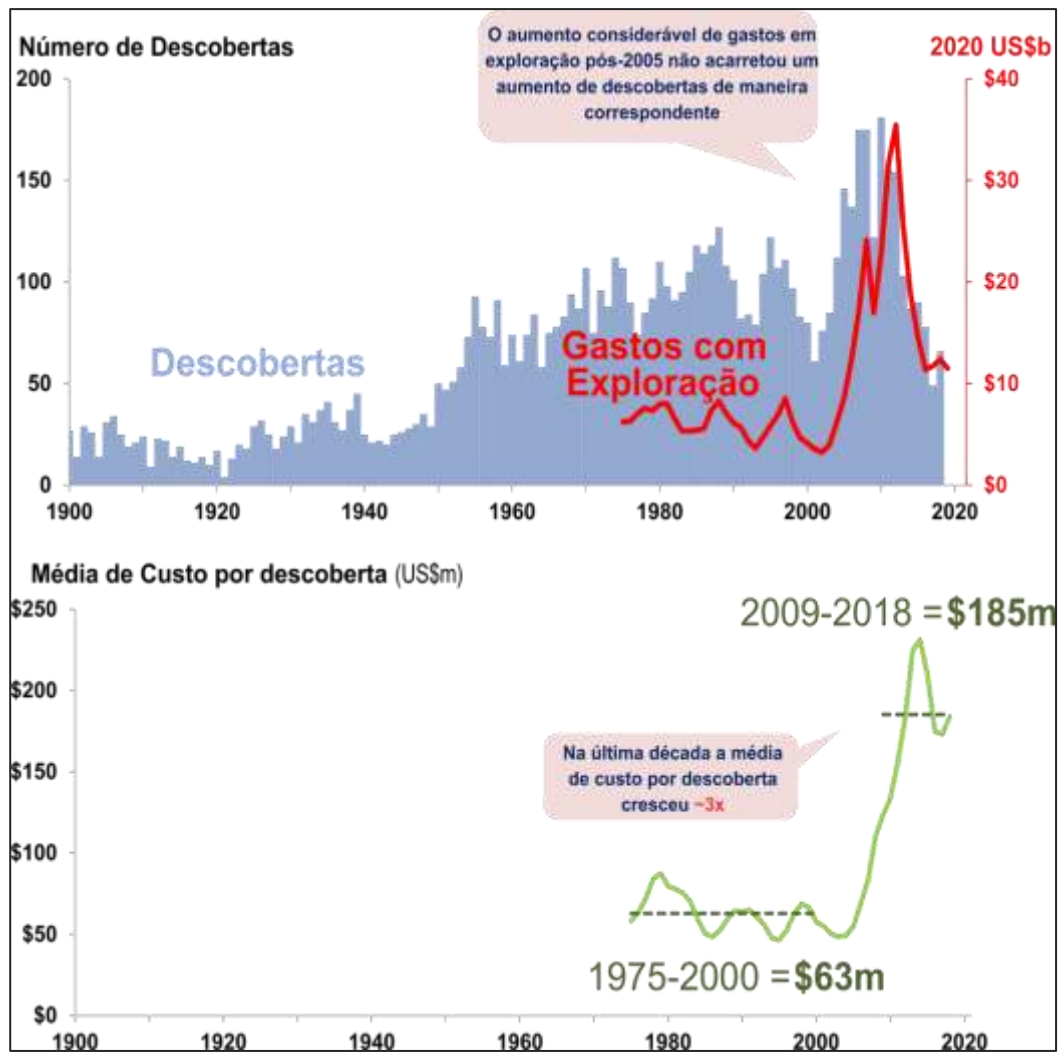


Figura 01: Histórico do a) Número de descobertas por ano e da b) Média de Custo por Descoberta, em milhões de dólares-US\$ (Modificado de SCHODDE, 2020).

A este respeito cabe assinalar o *Capítulo 1 do Plano Diretor* (PD; CALAES ET AL., 2020) da PLATAFORMA, em que as atividades de exploração mineral tendem:

“A descobrir, primeiramente, os depósitos de maior dimensão e teor, mais próximos da superfície e dos mercados. Portanto, os depósitos melhores e mais fáceis de serem encontrados são usualmente descobertos, aproveitados e exauridos primeiramente. Conseqüentemente, o processo contínuo de depleção, acompanhado de esforços de exploração cada vez mais intensivos, pressiona o custo do suprimento mineral, através do tempo”

Entretanto, na medida em que avanços geocientíficos e tecnológicos “neutralizam os efeitos da depleção”, observa-se que “a contínua interação das forças de mercado, depleção e tecnologia - na busca permanente por uma posição ideal de equilíbrio - ocasiona ciclos de aprimoramentos ou de deteriorações, nas condições econômicas do processo de suprimento mineral, com oscilações na posição competitiva de determinados segmentos produtivos”.

O referido PD destaca também que a exploração mineral é a “*etapa de base da cadeia da indústria mineral*” e necessita de vigorosos estímulos, em um contexto de crescente competitividade internacional na atração de investimentos para a identificação, descoberta e avaliação de depósitos minerais - cada vez mais complexos, seja pelas tendências de profundidade crescente, teor decrescente ou ainda de maior distanciamento em relação a mercados. Ressalta-se ainda que:

“(...) *dentre os vários estímulos mundialmente considerados para a promoção de investimentos em exploração mineral, e conseqüente reposição de reservas minerais em atendimento às demandas de mercado, sobressaem, cada vez mais, a geração e difusão de informação, conhecimento e aprendizado*” (CALAES ET AL., 2020).

3.1. TÉCNICAS DE AVALIAÇÃO ECONÔMICA

Conforme assinalado por CALAES (1992), técnicas específicas de avaliação econômica são empregadas para converter informações e experiências disponíveis - relativas a projetos e programas de investimento - em estimativas de rentabilidade e de risco, além de propiciar a comparação e a seleção entre várias alternativas disponíveis.

As técnicas de avaliação econômica são exercidas por meio de modelos próprios que incorporam inúmeros parâmetros relacionados à geologia e exploração mineral, às técnicas e planos de produção (lavra e processamento), às previsões de mercado, às estimativas de custos de investimento e de operação e às políticas e regulamentações governamentais, relativas a regimes de acesso à propriedade mineral, tributação, desenvolvimento sustentável e infraestruturas econômicas e sociais. Tais modelos de avaliação econômica permitem traduzir um vasto elenco de parâmetros em um pequeno número de indicadores de suporte à tomada de decisões.

Um dos pré-requisitos indispensáveis à condução de um processo de avaliação econômica de potencial mineral é a sua *modelagem econômico-financeira*, com suporte em softwares específicos ou em recursos de planilha eletrônica, tais como *Microsoft Excel*. O modelo deve ser desenvolvido de forma que os valores assumidos para os parâmetros-chave, possam ser facilmente alterados, com estimação de indicadores de geração de valor, segundo diferentes cenários geoeconômicos.

Conforme assinalado por CALAES (2005), presentemente, as técnicas de avaliação de depósitos minerais e de empreendimentos da indústria mineral vêm se difundindo e se tornando ainda mais efetivas, mediante a articulação com fundamentos e modelos de planejamento estratégico, que se encontram expressos em vasta bibliografia de inúmeros autores tais como M. Porter, A Hax e H. Majluf, A. Rappaport, Copeland, Koller e Murrin, Dixit e Pindyck, Roussel, Saad e Bohlin e Kaplan e Norton.

4. METODOLOGIA

O item 4.5 do PD da PLATAFORMA (CALAES ET AL., 2020) sugere “as bases metodológicas a serem preliminarmente consideradas na elaboração de estudos de potencial econômico de recortes territoriais específicos” e assinala que “tais estudos contarão sempre com a integração e cooperação de áreas específicas do SGB-CPRM”. Os anexos 6 (*Bases Metodológicas para Estudos de Potencial Geoeconômico Regional*) e 7 (*Bases Metodológicas para Mapas de Prospectividade*) do referido PD apresentam o alinhamento conceitual preliminar para a metodologia a ser adotada nos estudos de APGR.

4.1. AVALIAÇÃO ECONÔMICA

Base conceitual: O valor do potencial mineral de um determinado recorte territorial será estimado mediante a abordagem de valor atual da geração de resultados econômicos presumidos, resultante da produção futura de bens minerais, em bases sustentáveis e competitivas. Tal abordagem terá por fundamento a percepção de recursos e reservas existentes e admitidos existir, por ocasião do correspondente estudo de avaliação.

Bens minerais: Cada um dos referidos estudos deverá considerar os bens minerais já produzidos no respectivo recorte territorial, bem como aqueles que embora não produzidos, apresentem potencial para tanto, com base: i) em depósitos já conhecidos; ou ii) em perspectivas geológicas fundamentadas em ocorrências cadastradas e outras hipóteses de futuras descobertas, conforme indicações balizadas pelo conhecimento geológico da correspondente região.

Produção Presumida: Primeiramente será efetuada a projeção estimada de produção dos referidos bens minerais, levando-se em consideração os seguintes componentes:

- **Componente 1:** empreendimentos já implantados e que se encontram em operação.
- **Componente 2:** empreendimentos relacionados a depósitos descobertos e já considerados economicamente viabilizados (*Reservas*), e que se referem a projetos em fase de desenvolvimento mineiro, em andamento ou em fases iniciais ou finais de implementação.
- **Componente 3:** empreendimentos relacionados a depósitos já conhecidos e ainda não considerados economicamente viabilizados (*Recursos Conhecidos*) e que se referem a projetos em fase de exploração mineral, em fase de avaliação econômica ou ainda que, mesmo com trabalhos de exploração mineral concluídos, permaneçam condicionados a restrições de mercado, de ordenamento territorial e/ou de licenciamento ambiental.
- **Componente 4:** empreendimentos que presumivelmente poderão vir a ser implementados, com base em depósitos minerais ainda não descobertos (*Recursos Hipotéticos*), mas que podem ser admitidos com base em acurada avaliação dos indicadores

de prospectividade fornecidos pelo atual conhecimento geocientífico relativo ao correspondente recorte territorial.

Base de Estimativa da Produção: Em relação a qualquer um dos quatro componentes, a estimativa de produção futura será efetuada a partir de informações e conhecimentos providos pela Plataforma, com base nas seguintes principais fontes:

- **Componente 1:** Agência Nacional de Mineração - ANM (Cadastro Mineiro, Relatórios de Pesquisa e Relatórios Anuais de Lavra e Sumário Mineral), Instituto Brasileiro de Mineração – IBRAM, e conhecimento corrente disponível.
- **Componentes 2 e 3:** Associação Brasileira de Empresas de Pesquisa Mineral e Mineração - ABPM, Agência para o Desenvolvimento e Inovação do Setor Mineral Brasileiro - ADIMB e ANM (Cadastro Mineiro); conhecimento corrente disponível relativo à caracterização de projetos de exploração mineral; e banco de dados de Projetos de E&P mineral, integrado a PLATAFORMA.
- **Componente 4:** DIGECO/ SGB-CPRM - conhecimento geocientífico e geoeconômico e avaliação de prospectividade do recorte territorial em análise, com base em avaliação quantitativa e modelamento do potencial mineral.

As demais feições da metodologia de avaliação econômica do potencial mineral de um determinado recorte territorial encontram-se sumarizadas no *Anexo 6 do PD* e compreendem basicamente os seguintes tópicos:

Horizonte de projeção

Parametrização

- Parametrização geoeconômica e econômico-mineral dos depósitos minerais admitidos no processo de avaliação
 - Mercados e preços dos bens minerais
 - Indicadores e estimativas de produção e de obtenção de resultados anuais líquidos
 - Estimativa de riscos de descoberta de depósitos e de conversão de Recursos em Reservas.

Modelagem

- Projeção de Investimentos e de Resultado Anual Líquido
- Projeção de Fluxo de Caixa
- Custo de capital / Taxa de desconto e determinação da geração de valor esperado.

4.2. ESTIMATIVA E CARACTERIZAÇÃO DE RECURSOS NÃO DESCOBERTOS

4.2.1 SISTEMAS MINERAIS

Consolidada desde a década de 70 para a indústria do petróleo, a abordagem de SM, foi inicialmente aplicada para a prospecção mineral por WYBORN *ET AL.* (1994) em terrenos proterozoicos da Austrália e, após mais de duas décadas, passou a ser ampliada e consolidada para as etapas iniciais da exploração mineral por diversos autores ao redor do mundo (KNOX-ROBINSON & WYBORN, 1997; HRONSKY, 2004; BARNICOAT, 2007; HRONSKY & GROVES, 2008; MCCUAIG *ET AL.*, 2010 E MCCUAIG & HRONSKY, 2014; QUEIROZ *ET AL.*, 2020). Esta abordagem entende o depósito mineral em diversas escalas como parte de um sistema mineralizante maior, que transfere energia e massa até a deposição e preservação do minério.

O objetivo é traduzir os processos críticos para formação do minério em feições mapeáveis, identificando os *footprints* da mineralização na escala de trabalho. Na aplicação desse conceito, a escala de trabalho deve ser combinada com a escala de processos geológicos relevantes para a gênese do minério e com a resolução espacial do banco de dados disponível para pesquisa. Em escala litosférica, a formação de um depósito depende da atuação de três elementos críticos: *fertilidade, geodinâmica e arquitetura favorável da litosfera*, além de condições para preservação do minério (Fig. 02). Assim como para o sistema petrolífero, esses elementos podem ser diferenciados com base nos processos envolvidos na mobilização do fluido mineralizado a partir da fonte, incluindo o transporte, a acumulação e a preservação durante a subsequente história geológica (Fig. 03 MAGOON AND DOW, 1994; WYBORN *ET AL.* 1994, MCCUAIG, T.C., HRONSKY, J.M.A., 2014).

A aplicação do conceito de SM para *avaliação do potencial geoeconômico regional* implica que depósitos minerais formados por processos geológicos semelhantes, mesmo que contenham variações, devem ser agrupados em um único modelo ou clã (*e.g.* depósitos dos tipos ouro orogênico, pórfiro ou IOCG).

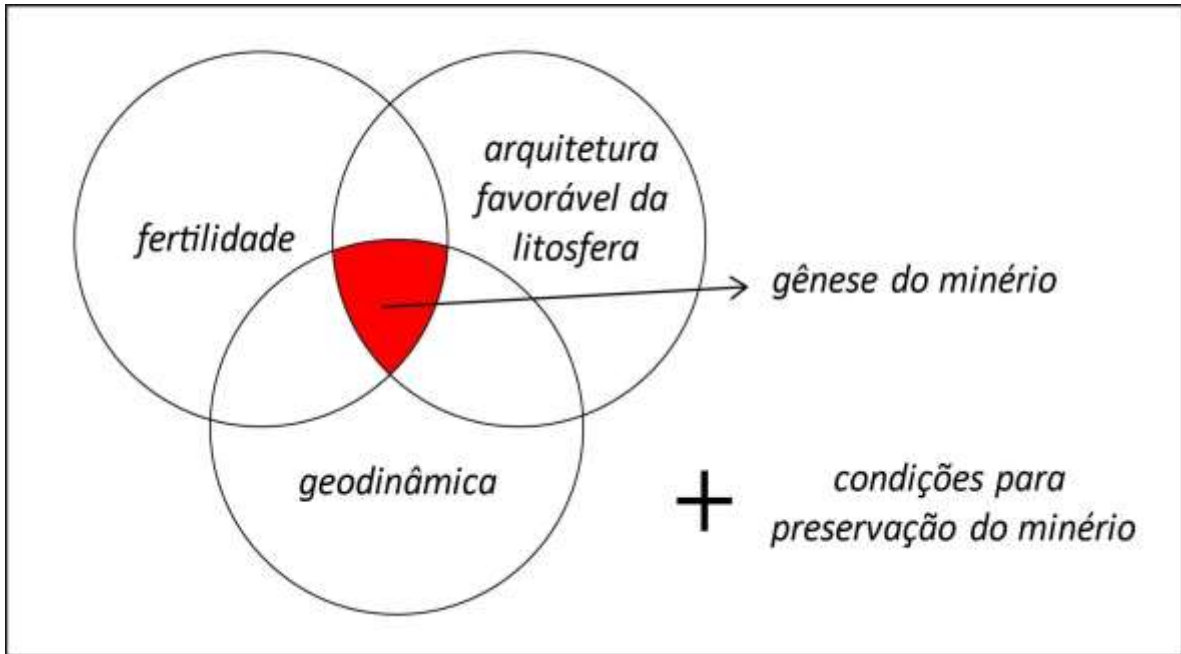


Figura 02: Elementos críticos para a formação e preservação de um sistema mineral segundo MCCUAIG & HRONSKY (2014).

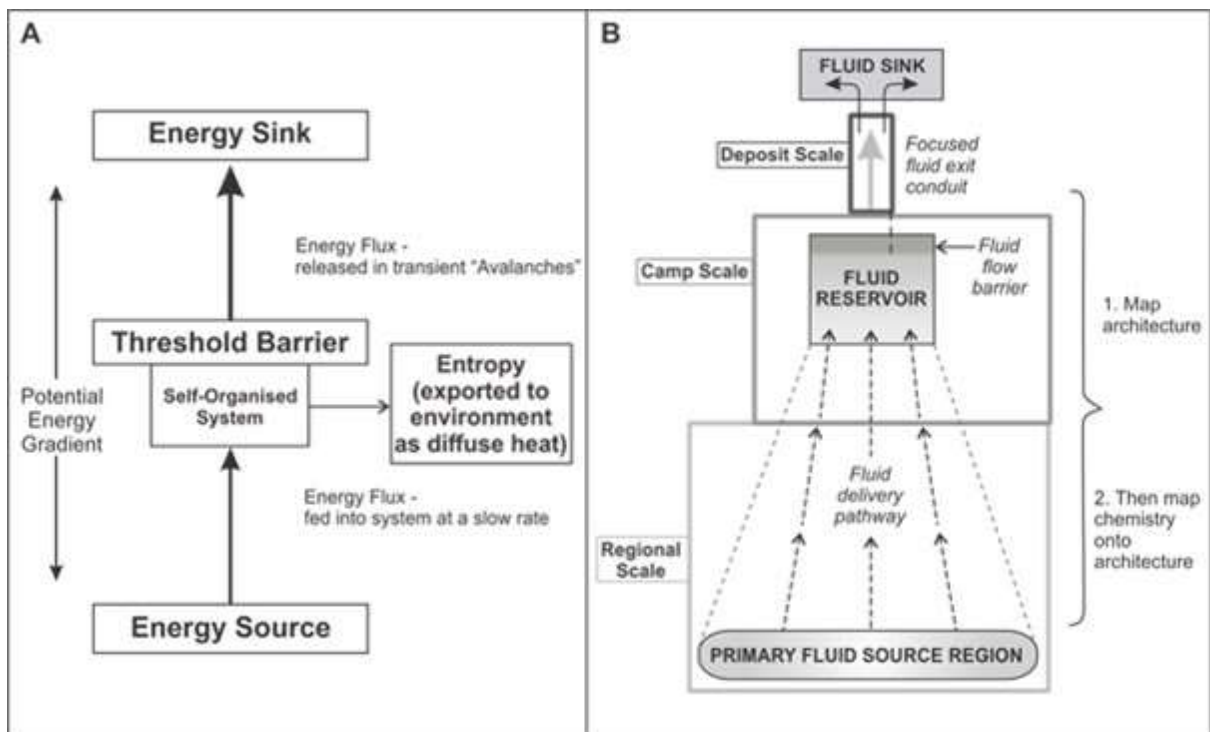


Figura 03: MCCUAIG, T.C., HRONSKY, J.M.A., 2014. The mineral system concept: the key to exploration targeting. Soc. Econ. Geol. Special Pub. 18, 153–176.

4.2.2 LEI DE ZIPF

Comportamentos complexos são regularmente observados na natureza. Essa complexidade geralmente se relaciona a sistemas governados por um grande número de componentes. Em alguns casos, um sistema existe em um estado desequilibrado, antes que a energia se auto organize espontaneamente de uma maneira aparentemente imprevisível com foco na maximização da entropia.

Nestes sistemas, eventos de liberação de energia podem eventualmente ocorrer em um comportamento de lei de potência invariável em escala, quando um limite é excedido. Este tipo específico de sistema complexo é definido como Sistema Crítico Auto-Organizado (SOC). Muitos sistemas naturais e fatores socioeconômicos, como o tamanho dos terremotos (GUTENBERG E RICHTER 1944; NEWMAN 2004), diâmetro de crateras lunares (NEUKUM E IVANOV 1994), frequência de uso de palavras (ESTOUP 1916), citações científicas (PRICE 1965) e populações das cidades (NEWMAN 2004) atuam como SOC.

Os sistemas de formação de minério também atuam essencialmente como sistemas SOC. Em geologia econômica, entendemos esses processos dentro do contexto do conceito de SM, que inclui fatores geológicos como fonte, transporte e acumulação de minério (Fig. 03). Conjuntos de dados robustos em todo o mundo mostram que a distribuição de frequência de tamanho dos depósitos minerais dentro de uma província tende a seguir uma lei de potência, especificamente a *Lei de Zipf* com constante de decaimento (k) próxima a 1 (DAVIES ET AL. 2018; GUJ ET AL. 2011; LISITSIN 2016; MAMUSE AND GUJ 2011; PALIWAL ET AL. 1986; YIGIT 2011; COSTA ET AL., 2019). A *lei de Zipf* é uma forma de distribuição das leis de potência e assume que os processos de formação de minério atuam como um sistema SOC, podendo ser empregada para estimar a quantidade de determinado minério que ainda não foi descoberta em uma região.

Esta distribuição é aplicável quando eventos maiores são raros, enquanto eventos menores são frequentes (YIGIT, 2011). Matematicamente, a quantidade x segue a lei da potência, se sua densidade de probabilidade $p(x)$ pode ser descrita como:

$$p(x) \propto x^{-\alpha}$$

Onde α é um parâmetro de escala. A equação resulta em um *heavy-tailed*, onde a probabilidade tende a zero lentamente para a direita. Apesar dos valores baixos, a *cauda* contém uma quantidade significativa de probabilidade (ALSTOTT ET AL. 2014).

COSTA ET AL. (2019) utilizaram a *Lei de Zipfs* para estimar a quantidade de ouro ainda não descoberta no Quadrilátero Ferrífero, chegando ao valor de 749 t para uma maturidade estimada de 65% para a província (Fig. 04).

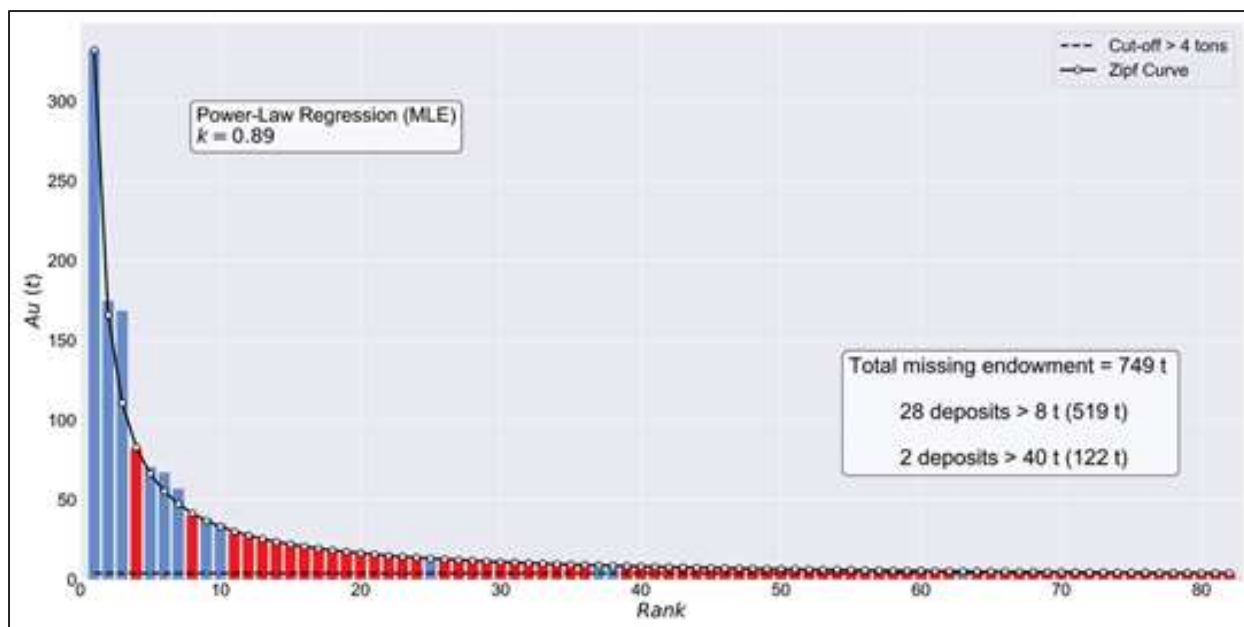


Figura 04: Exemplo da aplicação da Lei de Zipf no Quadrilátero Ferrífero, estimando uma quantidade de 749 t de ouro ainda não descobertos, compreendendo 28 depósitos maiores que 8 t (totalizando 519 t) e 2 depósitos maiores que 40 t (totalizando 122 t) (COSTA ET AL., 2019).

5. FONTES DE INFORMAÇÃO/ ACESSOS

Os conteúdos informativos a serem supridos pela PLATAFORMA envolverão, não apenas dados, informações e conhecimentos geocientíficos e tecnológicos relacionados aos processos de descoberta, avaliação e aproveitamento dos recursos minerais da região envolvida, como também os planos de informação relacionados aos correspondentes aspectos econômicos, territoriais, socioeconômicos e socioambientais relativos à cadeia de atividades da indústria mineral na área em análise.

Cabe ressaltar que os planos de informação que integram a Plataforma contêm elementos informativos referentes às geociências e indústria mineral, além de aspectos transversais aos mesmos com foco principal na exploração mineral. As principais bases e fontes de informação estão listadas a seguir:

- Projetos geológicos do SGB;
- Base de dados de recursos minerais - RECMIN do GeoSGB (<https://geosgb.cprm.gov.br/>);
- Banco de dados de Projetos de Exploração e Produção Mineral (integrado à PLATAFORMA)

6. ATRIBUIÇÕES

- Etapa 1 – Parametrização Geoeconômica.

Qualificar geologicamente o BD de Projetos de pesquisa e exploração mineral.

Equipe: Antônia Railline da Costa Silva, Giovanna Novello, José Luciano Stropper (SUREG-BE, SUREG-PA).

- Etapa 2 – Estimativa/ validação dos parâmetros geoeconômicos e econômico-minerais dos depósitos relacionados a recursos e reservas conhecidos.

Fase 1 - Componente 1: depósitos em produção;

Fase 2 - Componente 2: depósitos (*status* Reservas), ainda não em produção;

Fase 3 - Componente 3: depósitos (*status* Recursos), já conhecidos.

Equipe: José Luciano Stropper + Gilberto Calaes + Gustavo Alexandre Silva (SUREG PA, DGM, SUREG RE).

- Etapa 3 – Estimativa e caracterização de depósitos relativos a Recursos não descobertos.

Equipe: Iago Costa, Felipe Tavares, Lila Queiroz - (DGM, DIGECO).

- Etapa 4 – Obtenção de informações de mercados.

Equipe: Gilberto Calaes, Gustavo Alexandre Silva (DGM, SUREG RE).

- Etapa 5 – Modelagem e avaliação Econômica.

Equipe: Gilberto Calaes, Gustavo Alexandre Silva (DGM, SUREG RE).

- Etapa 6 – Realização dos estudos de avaliação econômica dos depósitos considerados.

Fase 1 - Componente 1: depósitos em produção;

Fase 2 - Componente 2: depósitos (*status* Reservas), ainda não em produção;

Fase 3 - Componente 3: depósitos (*status* Recursos), já conhecidos;

Fase 4 – Componente 4: Recursos não descobertos.

Equipe: Gilberto Calaes, Gustavo Alexandre Silva - (DGM, SUREG RE).

Observação: Em cada componente serão definidos o número de depósitos presumíveis por substância mineral, assim como os parâmetros médios relativos: porte de reservas/ recursos, teor, recuperação da lavra e no beneficiamento, CAPEX e OPEX, etc.

- **Etapa 7 – Consolidação: Avaliação de Cenários.**
 - Valor esperado para a APGR;
 - Análise sensibilidade de riscos e incertezas,
 - Análise de impactos e riscos ambientais;
 - Proposição de políticas públicas para o desenvolvimento do conhecimento e do aproveitamento dos recursos minerais da Província Carajás;
 - Bases para o planejamento estratégico de investimentos em E&P mineral;
 - Subsídios para o planejamento de P,D&I;
 - Subsídios para o OTGM;
 - Subsídios para o Planejamento do Desenvolvimento Regional Sustentável e Competitivo.

Equipe: Antônia Railline da Costa Silva, Felipe Tavares, Gilberto Calaes, Gustavo Alexandre Silva, Iago Costa, José Luciano Stropper, Lila Queiroz - (SUREG BE, SUREG PA, SUREG RE, DIGECO, DGM).

7. CRONOGRAMA

O cronograma apresentado na Tabela 1 foi elaborado em sintonia com a metodologia apresentada no item 4 e as etapas e fases de trabalho assinaladas no item 6. O mês 1 corresponde a agosto de 2021 e a entrega dos produtos finais encontra-se programada para março de 2022.

ETAPA	MÊS 1	MÊS 2	MÊS 3	MÊS 4	MÊS 5	MÊS 6	MÊS 7	MÊS 8
ETAPA 1								
ETAPA 2								
ETAPA 3								
ETAPA 4								
ETAPA 5								
ETAPA 6								
ETAPA 7								

REFERÊNCIAS

ALSTOTT J., BULLMORE E., PLENZ D. 2014. Powerlaw: a python package for analysis of heavy-tailed distributions. PLoS One, 9(1), 1-11. <https://doi.org/10.1371/journal.pone.0085777>

BARNICOAT, A.C. 2007. Mineral systems and exploration science: linking fundamental controls on ore deposition with the exploration process. In: Andrew, C.J. (Eds.), Digging Deeper: Proceedings of the Ninth Biannual SGA Meeting, Dublin, Ireland 20th-23rd August 2007, p1407-1410.

CALAES, G. D., 1992. Planejamento Econômico no Setor Mineral e Estratégias de Investimento na Elaboração e Avaliação de Projetos de Mineração, Apostila de seminário realizado, em cooperação com UFMG, para equipe da DIPEM/DNPM - Departamento Nacional da Produção Mineral. Diamantina-MG.

CALAES, G., D., 2005. Planejamento Estratégico do Desenvolvimento Mineral Sustentável e Competitivo – Dois Caso de Não Metálicos no Rio de Janeiro. 298f. Tese de Doutorado. Departamento de Geologia do Instituto de Geociências da UFRJ, Rio de Janeiro.

CALAES, G. D., TAVARES F. M., SILVA G.A., STROPPER J. L., DE ALMEIDA L. F. B., SOUZA M. J., BARBOSA JUNIOR P. C., MENEZES R. G., WOSNIAK R. 2020. Plano Diretor para Desenvolvimento e Implementação da Plataforma de Suporte ao Planejamento da Pesquisa e Produção Mineral, SGB-CPRM/DGM.

COSTA, I. S. L., DA SILVA, G. F., FERREIRA, M. V. 2019. Application of Zipf's law to estimate undiscovered Gold endowment in the Quadrilátero Ferrífero Province, Brazil. Journal of the Geological Survey of Brazil vol. 2, nº 3, 165-172.

COSTA, I. S. L., DA SILVA, G. F., FERREIRA, M. V., DAVIE, R.S., 2021. How much gold remains to be discovered in the Quadrilátero Ferrífero? In: IX Simpósio Brasileiro de Exploração Mineral, edição *online*.

DAVIES R.S., GROVES D.I., TRENCH A., SYKES J., STANDING J.G. 2018. Entering an immature exploration search space: assessment of the potential orogenic gold endowment of the Sandstone Greenstone Belt, Yilgarn Craton, by application of Zipf's law and comparison with the adjacent Agnew Goldfield. Ore Geology Reviews, 94, 326-350. <https://doi.org/10.1016/j.oregeorev.2018.01.020>.

ESTOUP J.B. 1916. Gammes sténographiques: méthode et exercices pour l'acquisition de la vitesse. Paris, Institut Sténographique de France, 142 p.

GROVES D. I., & SANTOSH S. 2015. Province-scale commonalities of some world-class gold deposits: Implications for mineral exploration. Geoscience Frontiers Volume 6, Issue 3, May 2015, Pages 389-399.

GUJ P., FALLON M., MCCUAIG T.C., FAGAN R. 2011. A time-series audit of Zipf's Law as a measure of terrane endowment and maturity in mineral exploration. Economic Geology, 106(2), 241-259. <https://doi.org/10.2113/econgeo.106.2.241>.

GUTENBERG B., RICHTER C.F. 1944. Frequency of earthquakes in California. Bulletin of the Seismological Society of America, 34(4), 185-188. Haldar S.K. 2018. Mineral exploration: principles and applications. Elsevier, 370 p

HRONSKY, J.M.A. 2004. The science of exploration targeting. In: Muhling, J., Goldfarb, R., Vielreicher, N., Bierlein, F., Stumpfl, E., Groves, D., Kenworthy, S. (Eds.), SEG2004—Predictive Mineral Discovery Under Cover. SEG2004 Conference, Perth, Centre for Global Metallogeny, The University of Western Australia, Publication, vol. 33, pp. 129–133.

HRONSKY J. M. A. & GROVES D. I., 2008. Science of targeting: definition, strategies, targeting and performance measurement, Australian Journal of Earth Sciences, 55:1, 3-12, DOI: 10.1080/08120090701581356.

KNOX-ROBINSON, C.M., WYBORN, L.A.I. 1997. Towards a holistic exploration strategy: using Geographic Information Systems as a tool to enhance exploration. Aust. J. Earth Sci. 44, 453–463.

LISITSIN V.A. 2016. Rank-Size statistical assessments of undiscovered gold endowment in the Bendigo and Stawell Zones (Victoria) and the Mossman Orogen (Queensland), Australia: comparison with threepart assessment results. Natural Resources Research, 25(3), 269-282. <https://doi.org/10.1007/s11053-015-9286-8>.

MAGOON, L.B., DOW, W.G. 1994. The petroleum system. In: Magoon, L.B., Dow, W.G. (Eds.), The Petroleum System: From Source to Trap. American Association of Petroleum Geologists Memoir, 60, pp. 3–24.

MAMUSE A., GUJ P. 2011. Rank statistical analysis of nickel sulphide resources of the Norseman-Wiluna Greenstone Belt, Western Australia. Mineralium Deposita, 46(3), 305-318. <https://doi.org/10.1007/s00126-011-0333-z>.

MCCUAIG, T.C., BERESFORD, S., HRONSKY, J. 2010. Translating the mineral systems approach into an effective exploration targeting system: Ore Geology Reviews, v. 38, pag 128–138.

MCCUAIG, T.C., HRONSKY, J. 2014. The Mineral System Concept: The Key to Exploration Targeting Society of Economic Geologists, Special Publication 18. Pag 153-175.

NEUKUM G., IVANOV B.A. 1994. Crater size distributions and impact probabilities on Earth from lunar, terrestrial-planet, and asteroid cratering data. In: Gehrels T. (ed.). Hazards due to comets and asteroids. University of Arizona Press, Tucson, p. 359-416.

NEWMAN M.E.J. 2004. Power laws, Pareto distributions and Zipf's law. *Contemporary Physics*, 46(5), 323-351. <https://doi.org/10.1080/00107510500052444>.

PALIWAL H.V., BHATNAGAR S.M., HALDAR S.K. 1986. Lead-zinc resource prediction in India: an application of Zipf's law. *Mathematical Geology*, 18(6), 539-549. <https://doi.org/10.1007/BF00914254>.

PORWAL, A., CARRANZA, E.J.M., 2015. Introduction to the Special Issue: GIS-based mineral potential modelling and geological data analyses for mineral exploration. *Ore Geology Reviews* 71, 477–483. <https://doi.org/10.1016/j.oregeorev.2015.04.017>.

PRICE D.J.S. 1965. Networks of scientific papers. *Science*, 149, 510-515. <https://doi.org/10.1126/science.149.3683.510>.

QUEIROZ, L.C., TAVARES, F. M., MARINHO, M.S., MARQUES, E.D. BASTOS, C.F., SOUZA, A. S., FREITAS, F.M. 2020. Mapa de Favorabilidade para Ouro Orogênico: Quadrilátero Ferrífero Central. Belo Horizonte: CPRM - Serviço Geológico do Brasil, 2020. 1 mapa, color, 1,5 m x 90 cm. Escala 1:100.000. - Estratigrafia, arquitetura crustal e recursos minerais do Quadrilátero Ferrífero.

SCHODDE, R. 2020. The challenges and opportunities for geophysics for making discoveries under cover. *Proceedings of the PDAC 2020*. Toronto, Canada.

WYLBORN L. A. I., HEINRICH C. A., JAQUES A. L. 1994. Australian Proterozoic mineral systems: essential ingredients and mappable criteria. In: Hallenstein PC (ed) *Australian mining looks north – the challenges and choices*. Australian Institute of Mining and Metallurgy Publication Series 5, p109-115.

YIGIT O. 2011. Discovered and undiscovered gold endowment of Turkey: a quantitative mineral resource assessment using GIS and rank statistical analysis. *Mineralium Deposita*, 47(5), 521-534. <https://doi.org/10.1007/s00126-011-0392-1>.