



Universidade de São Paulo
Instituto de Geociências

Projeto de Pesquisa
PIBIC-CNPq
(Edital)

INTELIGÊNCIA ARTIFICIAL NA EXPLORAÇÃO MINERAL PARA GRAFITA: CONCEITOS, MÉTODOS E APLICAÇÃO

(Artificial Intelligence in mineral exploration for graphite: concepts, methods and application)

Candidato
Gabriel Góes Rocha de Lima

Orientador
Prof. Dr. Caetano Juliani

Maio de 2021

INTRODUÇÃO

A exploração industrial de bens minerais, excluindo-se neste conceito o garimpo, tem enorme importância econômica e gera um grande número de empregos diretos e indiretos em todo mundo e, em especial após a revolução industrial, a demanda por produtos minerais tem crescido continuamente e em altas taxas.

A revolução tecnológica e a evolução dos produtos industriais tem, adicionalmente, exigido o uso de um número crescente de elementos químicos provenientes da mineração. Em especial, a indústria verde necessita de alguns elementos químicos especiais, como as terras raras, cério, rênio e paládio, dentre muitos outros, mas também define novos usos para produtos minerais comuns, como o lítio, o vanádio, o cobalto e a grafita, por exemplo.

A grafita natural, tradicionalmente utilizada na produção de diversos tipos de refratários e lubrificantes, tintas, baterias, eletrodos, indústria nuclear e células de combustível, já tem sido considerado um elemento crítico para indústria há algum tempo, dada à pequena quantidade de depósitos exploráveis existentes no mundo e à concentração destes depósitos na China. O surgimento do uso da grafita em produtos de alta tecnologia, como em baterias de íons de lítio para veículos elétricos, equipamentos de larga escala para acumulação de energia e o grafeno, tornam hoje a grafita um produto de alto valor econômico de um grande potencial econômico para a indústria mineral. Com a expansão atual da produção de veículos elétricos e do uso de energia eólica, além de materiais de alta tecnologia, estima-se altas taxas de crescimento na demanda para os próximos anos e aumentos expressivos dos preços a médio prazo, como pode ser visto nas figuras 1 e 2.

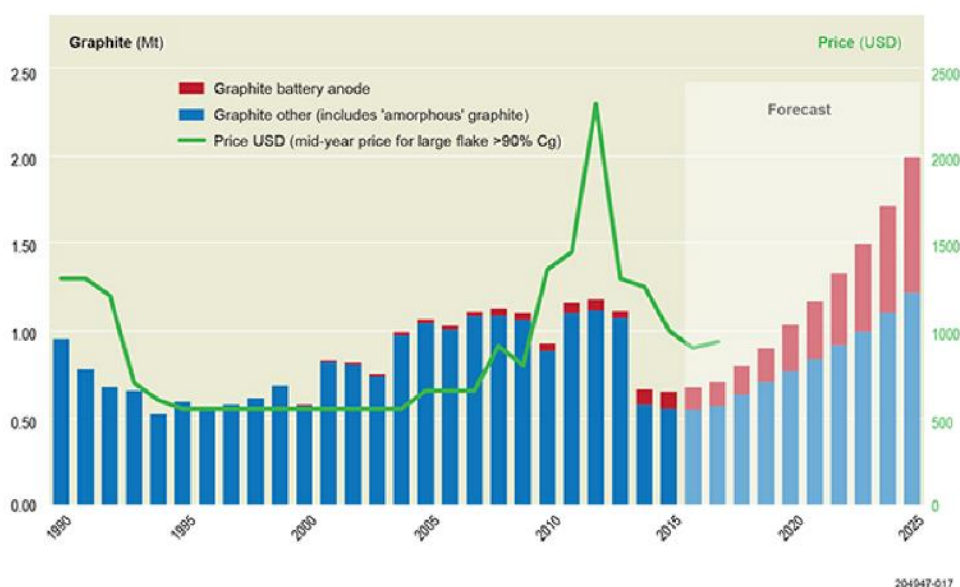


Figura 1 – Histórico e projeções na demanda e preços para a grafita, segundo Keeling (2017).

A exploração mineral da grafita é um novo desafio para a indústria mineral e para a economia. Um conjunto variado de parâmetros deve ser considerado na sua busca, como o conteúdo de grafita nas rochas, a granulação, o grau metamórfico, alterações hidrotermais, o grau de cristalinidade da grafita, a localização e o tamanho dos depósitos, dentre vários outros fatores.

Natural graphite demand by end-user applications out to 2027

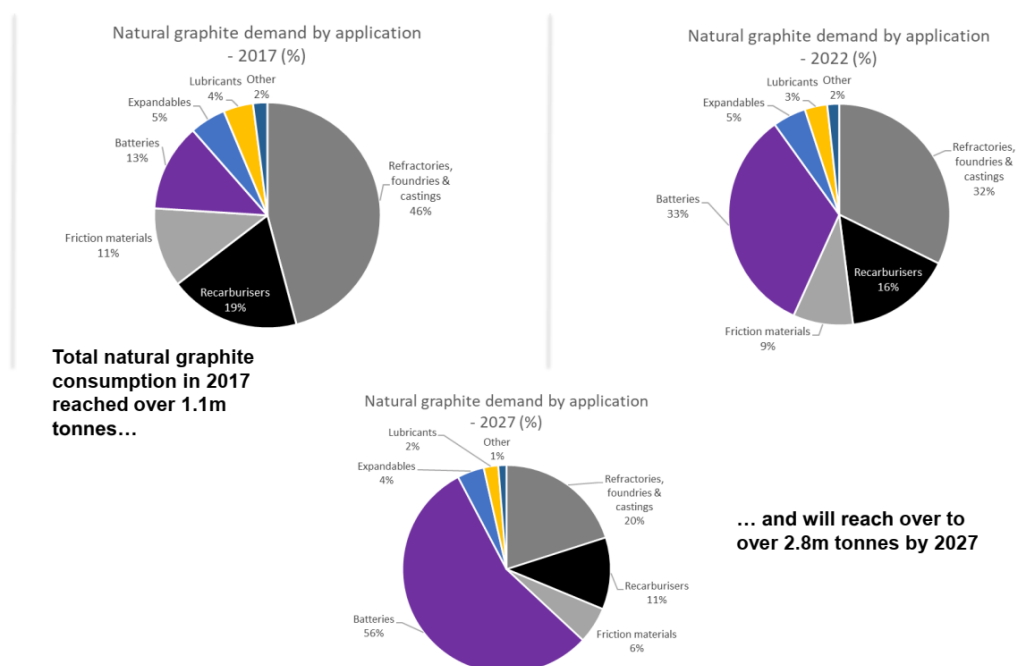


Figura 2 – Projeções na demanda e preços para a grafita por diferentes segmentos, destacando o incremento do uso na indústria verde, segundo Levich (2018).

A seleção de áreas potenciais para ocorrência de depósitos minerais por métodos indiretos, satelitais e aerotransportados, em conjunto com dados geológicos diversos, tem sido mais recentemente muito otimizada com o uso de **Inteligência Artificial**. Esta técnica tem apresentado excelentes resultados na exploração dos mais diversos *commodities* minerais e deve ser uma das áreas de grande desenvolvimento e investimentos nos próximos anos.

Este projeto visa o estudo dos conceitos e métodos de Inteligência Artificial que podem ser aplicados na exploração mineral para grafita (Fig. 3) de qualidade para uso pela indústria de alta tecnologia, avaliando e sistematizando métodos e procedimentos que possam ser utilizados pelas empresas de mineração que buscam este *commodity* mineral. O sucesso nestas atividades reveste-se de importância ao país e à sociedade, por meio da geração de empregos, recursos e divisas, justificando esta proposta.

Esse projeto de iniciação científica é a continuidade e a segunda fase do projeto “Inteligência Artificial, *Machine Learning* e *Deep Learning* em exploração mineral e geologia econômica: usos e aplicações” que foi aprovado no edital 2020 e executado pelo candidato, e faz parte dos esforços do Instituto de Geociências em desenvolver esta área de ensino e pesquisa, juntamente com o recém criado Laboratório Inteligência Artificial do IGc, o **Intelli+Geo**.

1 CONTEXTUALIZAÇÃO DO PROBLEMA

Os recursos minerais são imprescindíveis à humanidade e o bem estar social, a urbanização, os meios de transporte e o desenvolvimento de veículos elétricos, comunicação, energia e geração de energias alternativas, eletrodomésticos, agricultura e todos demais segmentos industriais fundamentam-se na produção mineral.

Os depósitos minerais são anomalias geoquímicas na crosta terrestre que se distribuem preferencialmente em determinadas épocas geológicas e terrenos específicos e são, estatisticamente, poucos os grandes depósitos que garantem o suprimento da maior parte das demandas pelos produtos minerais.



Figura 2 – Exemplos ilustrativos de grafita natural de alta qualidade de alguns locais do mundo, incluindo projetos de exploração mineral no Alasca e no Canadá (duas fotos inferiores).

O acesso aos recursos minerais na crosta terrestre é limitado pela profundidade, pois é muito difícil identificar os depósitos minerais sem indícios na superfície (*blinded deposits*), o

que exige o uso de métodos indiretos para sua localização. Os corpos de minério de grafita, de modo geral, encontram-se na superfície ou próximos a ela, mas como usualmente tem sulfetos associados, eles são fácil- e intensamente intemperizados e capeados por camadas de solo, dificultando a sua descoberta. Entretanto, diversos indícios dos corpos e camadas de rochas grafitosas podem ser identificados em levantamentos gamaespectométricos aerotransportados e imagens multiespectrais satelitais, pois tipicamente essas rochas apresentam teores relativamente altos de urânio e de enxofre, e resultam em solos pouco férteis que resultam em modificações na cobertura vegetal, dentre outros aspectos. Além disso, os depósitos de grafita de boa qualidade devem apresentar grafita com uma granulação e um grau de cristalinidade mínimos, o que somente ocorre em alguns ambientes geológicos e tipos de rochas específicos, como terrenos de fácies granulito. Esse conjunto de variáveis pode ser analisado por meio do uso de **Inteligência Artificial** na exploração mineral, definindo algoritmos que possam ser aplicados em diferentes regiões. O desenvolvimento deste projeto é também importante pois, segundo Pistilli (2019), o uso da **Inteligência Artificial** tem revolucionado a exploração mineral no mundo nos últimos poucos anos e, certamente, será uma ferramenta imprescindível na busca de depósitos minerais. Assim, este é o momento de desenvolvimento destas pesquisas, tanto como áreas de estudo, como pelo potencial de empregabilidade e empreendedorismo para geólogos nos próximos anos.

O Brasil é um importante produtor de grafita (Simandl *et al.*, 2015; Barrera, 2019), ocupando atualmente a segunda posição global (Fig. 3) e a demanda pelo produto deverá aumentar muito nos próximos anos, mesmo considerando-se a crise econômica devida ao Covid-19 (Stibballs, 2020), proporcionando novas oportunidades de negócios no país.

A identificação de fatores e parâmetros geológicos regionais ou locais que possam fornecer indícios para exploração mineral tem sido uma busca constante por meio de *pathfinders*, *footprints*, minerais residuais, minerais transportados, alteração hidrotermal, vetores mineralógicos e químicos, estruturas ígneas, sedimentares e tectônicas, tipos de suítes de rochas, associações e rochas, ambiente geológico de formação, dentre inúmeros outros fatores.

Dadas as dificuldades enfrentadas pela exploração mineral, com altos custos e grande conjunto de variáveis, e as complexidades dos sistemas geológicos, as técnicas de *Machine Learning/Deep Learning* e de **Inteligência Artificial** tem se mostrado a ferramenta mais eficiente para solucionar os maiores desafios da indústria mineral primária: encontrar novos

depósitos minerais econômicos e otimizar/reduzir os custos da exploração mineral, o que motiva esta proposição de pesquisa.

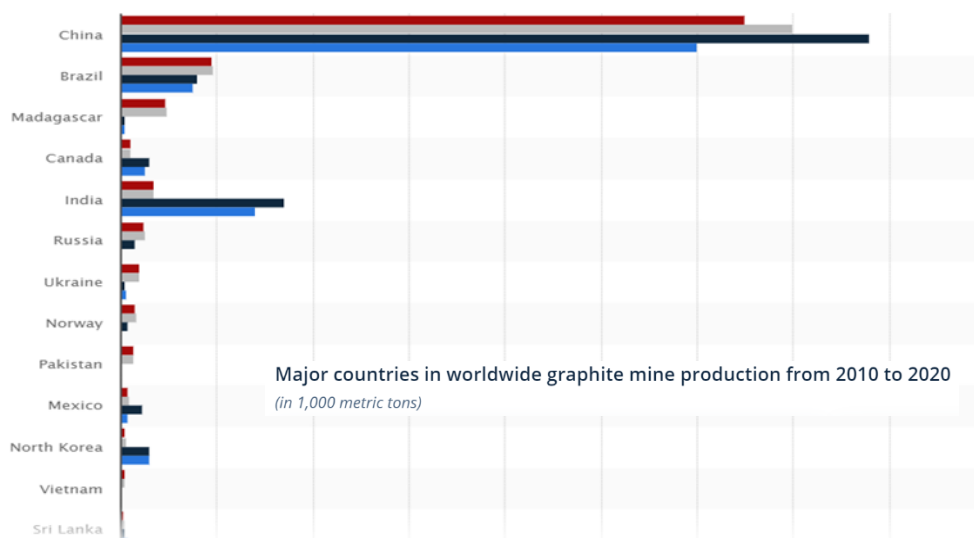


Figura 3 – Principais produtores de grafita, segundo o site Statista. As barras em azul correspondem ao ano de 2010, as pretas 2015, as cinzas 2019 e as vermelhas 2020. (<https://www.statista.com/statistics/267366/world-graphite-production/#:~:text=China%20was%20the%20leading%20graphite,650%2C000%20metric%20tons%20of%20graphite>, em 20/05/2021).

Nos últimos anos, o número de trabalhos de prospecção mineral suportados pelas técnicas de inteligência computacional vem crescendo muito, tanto para elaboração de mapas litológicos preditivos (Kuhn *et al.*, 2018; Harris & Grunsky, 2015; Costa *et al.*, 2019) como na exploração mineral (Prado *et al.*, 2020). Este projeto de pesquisa foca a aplicação de *Machine Learning* em uma área específica da exploração mineral, ainda sem publicações a respeito, que é a identificação de unidades de rochas grafitosas ainda não mapeadas geologicamente, as quais podem hospedar depósitos de grafita. Assim, este projeto é também inovador no campo da exploração mineral e na aplicação de Inteligência Artificial na exploração mineral.

2 OBJETIVO

O objetivo desta pesquisa é propiciar ao aluno o aprendizado dos conceitos e fazer com que ele desenvolva de forma inovadora sua formação por meio da avaliação de problemas em geologia econômica e exploração mineral e sobre aplicações potenciais de técnicas de Inteligência Artificial (IA), Aprendizado de Máquina Supervisionado e não supervisionado e de Ciência dos Dados para exploração de grafita.

Trata-se, portanto, de um projeto de inovação em segmentos tradicionais das geociências, em sintonia com as fronteiras de desenvolvimento científico mundial e da indústria mineral, de grande potencial profissionalizante para o aluno e para o ensino.

3 JUSTIFICATIVAS

Os resultados da aplicação de *Machine Learning* e de Inteligência Artificial na exploração mineral tem sido altamente efetiva na indústria mineral, o que tem desenvolvido um novo mercado de trabalho para geólogos, incluindo a criação de novas empresas de consultoria, tipicamente constituídas por profissionais multidisciplinares. De fato, segundo a empresa Lucintel (*Lucintel – Insights that Matter*, 2020), estima-se um mercado global de cerca de US \$71 bilhões em 2014, com taxas de crescimento de 26%/ano em 2019 na área de Inteligência Artificial no mundo.

Esta é uma janela de oportunidades para renovação e revitalização das geociências, com o desenvolvimento de ferramentas inovadoras na exploração mineral e de aprendizado do candidato. Apresenta também potencial de fortalecimento das relações Universidade–Empresas e Pesquisa–Empresa, além de formação aos alunos com foco na inovação, empreendedorismo e criação de novas áreas de trabalho, a exemplo do sucesso da empresa *GoldSpot Discoveries Inc. – Unlocking the value of discovery through A.I.* (*GoldSpot Discoveries Inc.*, 2020).

4 MÉTODOS

a) Revisão bibliográfica: será feita na Biblioteca do IGc-USP e nos sistemas SIBI-USP, buscando-se a compilação de artigos sobre os conceitos e aplicações de *Machine Learning*, *Deep Learning* e Inteligência Artificial em geologia econômica e exploração mineral e na exploração para grafita. Afora as referências tradicionais, muitas das informações disponíveis encontram-se em *sites* e cursos *online*, o que constituirá objeto complementar nestes levantamentos.

b) Avaliação de informações geológicas: a aplicabilidade dos conceitos depende do tipo do minérios de grafita, do tipo do depósito, da geologia e da disponibilidade de dados. Desta forma, serão buscadas informações sobre estes aspectos em regiões/áreas, com foco no sul de Minas Gerais e nordeste do Estado de São Paulo, onde são conhecidas ocorrências de unidades grafitosas de alto grau metamórfico e zonas de cisalhamentos, atributos estes

favoráveis à ocorrência de mineralizações econômicas de grafita. Também serão buscados exemplos de sucesso na exploração mineral com *Machine Learning*, *Deep Learning* e Inteligência Artificial para outros bens minerais, orientando os estudos e os potenciais de aplicação na região em estudo e para o *commodity* grafita.

c) Estudos dos métodos e algoritmos: esta etapa visa a sistematização do método de estudo e do tratamento dos dados. Serão buscados conjuntos de dados reais ou sintéticos para treinamento do bolsista.

d) Elaboração de relatórios, materiais didáticos e divulgação dos resultados: na finalização dos estudos os estudos serão sistematizados em materiais didáticos para divulgação. Os resultados parciais e finais deverão ser apresentados em simpósios de iniciação científica e em eventos técnico–científicos, como os congressos e simpósios promovidos pelas associações científicas.

5 FUNDAMENTAÇÃO CIENTÍFICA

O termo *Artificial Intelligence (A.I.)* foi criado por John McCarthy, Marvin L. Minsky, Nathaniel Rochester e Claude E. Shannon em 1955, quando propuseram a criação de um projeto de pesquisa sobre o tema no *Dartmouth College* em Hanover, em *New Hampshire* (EUA) (McCarthy *et al.*, 2006).

A Inteligência artificial (I.A.) constitui um conjunto de procedimentos que permitem a simulação de processos de inteligência humana em computadores, por meio da análise de dados e códigos de *software*. A Inteligência Artificial na maioria das áreas, incluindo as geociências, é limitada à análise de dados com objetivos específicos (*Narrow A.I.*) e inclui sistemas especialistas. *Machine Learning* são práticas mais básicas em I.A. que utilizam algoritmos diversos na análise de dados e que aprendem com os dados por processos supervisionados ou não, e definem previsões orientativas decisões e escolhas, como a seleção de uma subárea para desenvolvimento de exploração mineral para um determinado *commodity* mineral. *Deep Learning* é um técnica distinta que utiliza algoritmos que simulam redes neurais, onde cada dado conecta-se com outros a uma certa distância variável, definindo níveis discretos de conexão multivariada e direções (vetores) de propagação dos dados, correlações, etc.

Muito embora essa ciência venha se desenvolvendo desde os anos 50–60, foi somente com o avanço da tecnologia e, em especial com a disseminação de uso de computadores,

aumento do poder de processamento das GPUs e barateamento do *hardware* a partir de 2015 que as pesquisas e as aplicações sobre o tema puderam avançar muito significativamente e rapidamente (Smith *et al.*, 2006; Copeland, 2016).

Um esquema da evolução da ciência é mostrado na Figura 5, destacando a técnica do *Deep Learning*, baseada em redes neurais, que representa os maiores avanços atuais (Copeland, 2016).

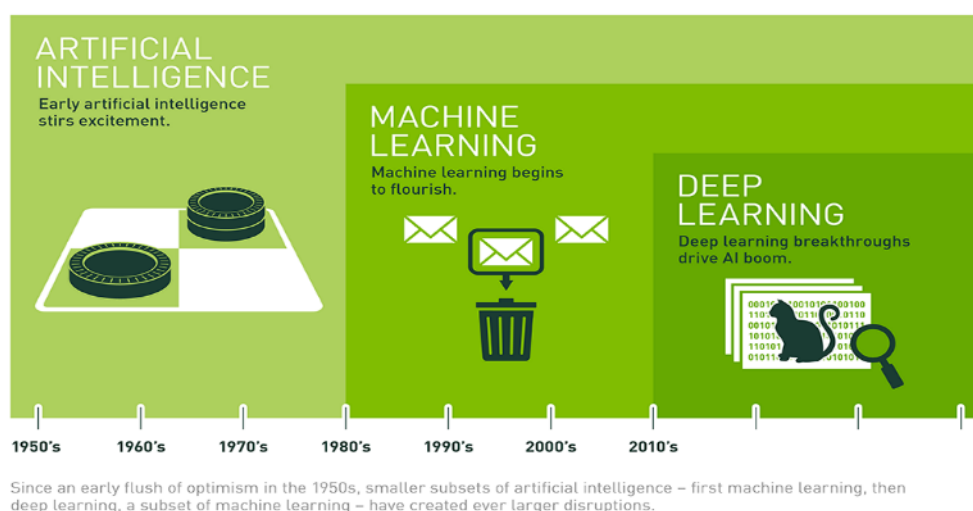


Figura 5 – Evolução da ciência de análise dos dados por Inteligência Artificial, segundo Copeland (2016).

Mais informações sobre o tema e diversas publicações podem ser encontradas em:

- University of Washington - Paul G. Allen School of Computer Science & Engineering (https://www.cs.washington.edu/about_us/)
- Google A.I. (<https://ai.google/about/>)
- Microsoft Cognitive Services (<https://azure.microsoft.com/en-ca/services/cognitive-services/>)
- IBM Watson Assistant (<https://www.ibm.com/cloud/watson-assistant/>)
- Amazon A.I. (<https://aws.amazon.com/pt/ai/>)

Os tipos de dados, suas qualidades e validação, são fundamentais no sucesso das aplicações. No caso das geociências, as complexidades inerentes, às inter-relações e correlações positivas ou negativas, influência de variáveis discretas ou associação de variáveis, a compreensão do significado da qualidade e do significado dos dados, é essencial para definição dos processamentos e para as interpretações. Para tanto, uma sólida formação em Geologia é muito importante. No caso da exploração mineral, os modelos geológicos e sua coerência com processos físicos e químicos, bem como com os tipos de processos mineralizantes são também essenciais. Desta forma, o mal entendimento de que o uso de I.A. seria um fator que conduziria à redução da área de atuação e de trabalho do geólogo não

procede, pois o conhecimento geológico de alto nível é essencial para o sucesso dos modelos interpretativos. Assim, a propagação do uso de I.A. nas geociências, como focado neste projeto em exploração mineral e geologia econômica, tem como principal objetivo a descoberta mais rápida de novos depósitos minerais, devido à redução de áreas no terreno em exploração, custos significativamente mais baixos e ainda por apresentar potencial de descoberta de indícios de depósitos minerais não aflorantes (*blinded deposits*), onde os levantamentos convencionais não permitem a identificação de qualquer evidência.

A aplicação destes métodos depende dos tipos de depósitos minerais. Serão utilizados como base os trabalhos de Dentith & Barrett (2003) e Simandl *et al.* (2015) para definição dos parâmetros significativos para os algoritmos. Se possível, será testada uma área com ocorrências conhecidas de grafita de alto grau metamórfico.

Nas figuras 6 a 8 podem ser observados exemplos de procedimentos a serem adotados nesta pesquisa, segundo a *GoldSpot Discoveries Inc. – Unlocking the value of discovery through A.I.* (GoldSpot Discoveries Inc., 2020).

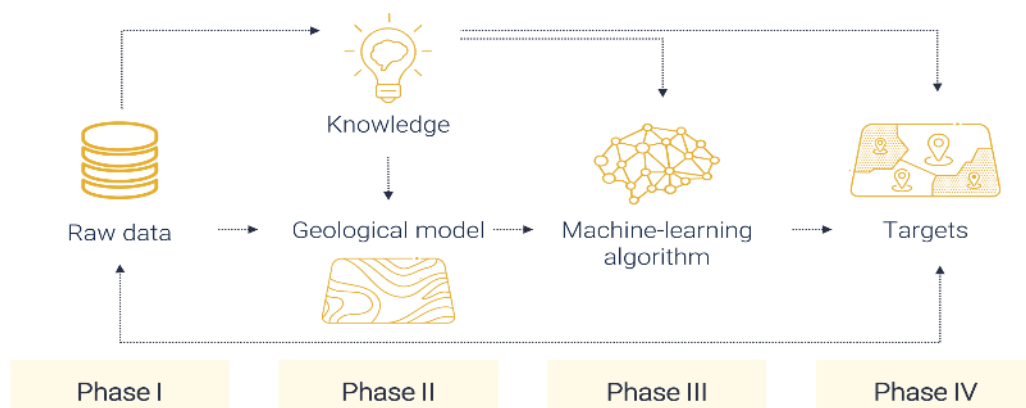


Figura 6 – Fases de desenvolvimentos da aplicação de *Machine Learning*, *Deep Learning* e Inteligência Artificial na exploração mineral, segundo a *GoldSpot Discoveries Inc. – Unlocking the value of discovery through A.I.* (GoldSpot Discoveries Inc., 2020).

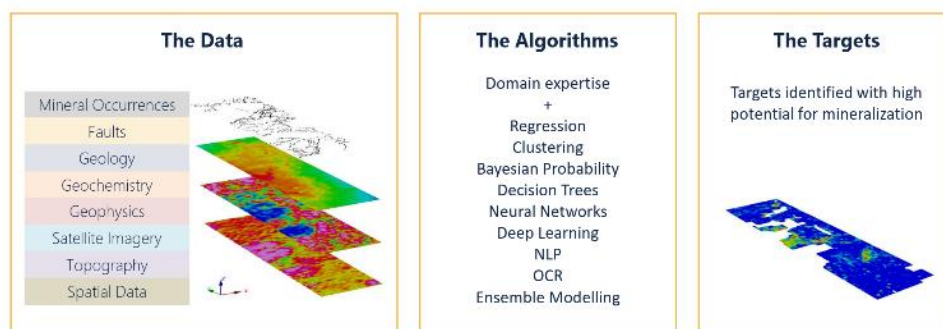


Figura 7 – Exemplos de dados e algoritmos utilizados na definição de alvos para exploração mineral, segundo a *GoldSpot Discoveries Inc. – Unlocking the value of discovery through A.I.* (GoldSpot Discoveries Inc., 2020). A redução de área e do tempo da exploração mineral, além da identificação de variáveis fundamentais pouco visíveis ou não visíveis e suas inter-relações,

são fundamentais na redução do custo e no sucesso da atividade de pesquisa.

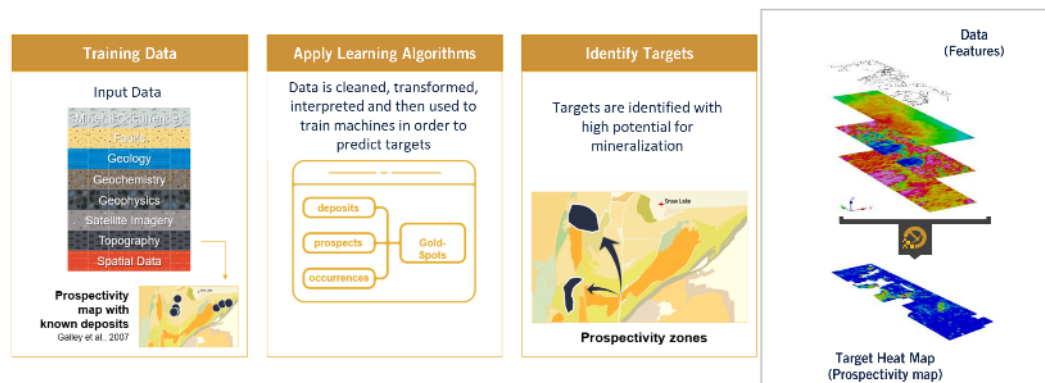


Figura 8 – Exemplo de aplicação da técnica proposta neste projeto de pesquisa na exploração mineral, com a definição de alvos potenciais, segundo os métodos da *GoldSpot Discoveries Inc.* – *Unlocking the value of discovery through A.I.* (GoldSpot Discoveries Inc., 2020).

6 CRONOGRAMA DE ATIVIDADES

As atividades previstas nesta pesquisa de iniciação científica se visto cronograma das atividades, sendo considerado o mês 1 agosto de 2020 para início das atividades.

Atividade	Mês											
	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11	12
Pesquisa bibliográfica												
Estudo dos conceitos												
Estudo dos métodos												
Estudo da geologia												
Elaboração de textos e relatórios												

7 VIABILIDADE

Esse projeto de Iniciação Científica depende, em essência, de dados bibliográficos e estudos, mas pode contar para eventuais necessidades de recursos financeiros com a reserva técnica da bolsa de produtividade em pesquisa do orientador.

Terá ainda apoio do Laboratórios de Inteligência Artificial do Instituto de Geociências – Intelli+Geo e, eventualmente, de empresas de mineração a serem contatadas. De acordo com a evolução, não se descartam proposições complementares ao InovaUSP.

REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS

- BARRERA, P. (2019) 9 Top Graphite-mining Countries. [https://investingnews.com/daily/resource-investing/battery-metals-investing/graphite-investing/top-graphite-producing-countries-china-india-brazil-canada/]
- COPELAND, M. (2016) What's the difference between Artificial Intelligence, Machine Learning and Deep Learning? [https://blogs.nvidia.com/blog/2016/07/29/whats-difference-artificial-intelligence-machine-learning-deep-learning-ai/]
- COSTA, I., TAVARES, F., OLIVEIRA, J. (2019) Predictive lithological mapping through Machine Learning methods: a case study in the Cinzento Lineament, Carajás Province, Brazil. *Journal of the Geological Survey of Brazil*, 2(1): 26–36.
- DENTITH, M., BARRETT, D. (2003) Geophysical exploration for graphite at Uley, South Australia. *ASEG Extended Abstracts, Geophysical Signatures of South Australian Mineral Deposits*, 3: 47-58, DOI: 10.1071/ASEGSpec12_04.
- GOLDSPOT DISCOVERIES INC. (2020) Unlocking the value of discovery through A.I. [https://goldspot.ca/]
- HARRIS, J.R., GRUNSKY, E.C. (2015) Predictive lithological mapping of Canada's North using Random Forest classification applied to geophysical and geochemical data. *Computers & Geosciences*, 80: 9-25.
- KEELING, J. (2017) Graphite: properties, uses and South Australian resources. *MESA Journal*, 84: 28–41.
- KUHN, S., CRACKNELL, M.J., READING, A.M. (2018). Lithologic mapping using Random Forests applied to geophysical and remote-sensing data: A demonstration study from the Eastern Goldfields of Australia. *Geophysics*, 83(4), B183–B193.]
- MCCARTHY, J., MINSKY, M.L., ROCHESTER, N., SHANNON, C.E. (2006) A Proposal for the Dartmouth Summer Research Project on Artificial Intelligence August 31, 1955 by John McCarthy, Marvin L. Minsky, Nathaniel Rochester, and Claude E. Shannon. *AI Magazine*, 27(4): 12-14.
- LEVICH, B. (2018) Prospects for Natural Graphite Flake Markets. [https://www.tirupatigraphite.co.uk/pdf/Fast-market-Graphite-Market-report.pdf]
- LUCINTEL – Insights that Matter (2020) Artificial Intelligence Market Report: Trends, forecast and competitive analysis. [https://www.lucintel.com/artificial-intelligence-market.aspx#/]
- PISTILLI, M. (2019) How Artificial Intelligence and Machine Learning are revolutionizing mineral exploration. [https://investingnews.com/innspired/machine-learning-revolutionizing-mineral-exploration/]
- PRADO, E.M.G., SOUZA FILHO, C.R. DE, CARRANZA, E.J.M., MOTTA, J.G. (2020) Modeling of Cu-Au prospectivity in the Carajás mineral province (Brazil) through Machine Learning: Dealing with imbalanced training data. *Ore Geology Reviews*, 124: 103611.
- SIMANDL, G.J., PARADIS, S., and AKAM, C. (2015) Graphite deposit types, their origin, and economic significance. In: Simandl, G.J. and Neetz, M., (Eds.), *Symposium on Strategic and Critical Materials Proceedings*, November 13-14, 2015, Victoria, British Columbia, British Columbia Ministry of Energy and Mines, British Columbia Geological Survey Paper 2015-3, pp. 163-171.
- SMITH, C., MCGUIRE, B., HUANG, T., YANG, G. (2006) The History of Artificial Intelligence. History of Computing Course CSEP 590A, University of Washington.
- STIBBALLS, S. (2020) EV Outlook 2020: Watch These Trends, Regions and Policies. [https://investingnews.com/daily/resource-investing/battery-metals-investing/cobalt-investing/electric-vehicle-outlook/]