



PROSPECÇÃO DE METAIS-BASE A PARTIR DE NANOPÁRTICULAS METÁLICAS EMITIDAS DE MINERALIZAÇÕES PROFUNDAS

¹ Ilan Sousa Figueirêdo (SENAI CIMATEC) – ilan.figueiredo@gmail.com; ² Mário Pereira Carvalho (SENAI CIMATEC) - geomcarvalho@gmail.com; ³ Jeancarlo Pereira dos Anjos (SENAI CIMATEC) – jeancarlo.anjos@fiob.org.br; ⁴ Allan Fruchting (NEXA Resource) – allan.fruchting@nexaresources.com; ⁵ Fernando Henrique Baia (NEXA Resource) – fernando.baia@nexaresources.com; Lílian Lefol Nani Guarieiro (SENAI CIMATEC) - lilian.guarieiro@fiob.org.br.

Resumo:

A prospecção geoquímica é amplamente utilizada para descobrir depósitos minerais. A prospecção de aerossóis visa localizar depósitos minerais, sendo capaz de coletar nanopartículas minerais emitidas e transportadas a partir de depósitos profundos. O objetivo deste artigo foi realizar uma revisão bibliográfica sobre o tema identificando os modelos de sistemas utilizados, método experimental de coleta e de correlação de dados. O método mais utilizado consiste na instalação de coletores de geogases no solo, equipados com um dispositivo que captura as nanopartículas que são posteriormente analisadas por Microscopia de Transmissão Eletrônica. Os estudos encontrados mostraram excelentes correlações espaciais entre a coleta de nanopartículas, em superfície e mineralizações subterrâneas, localizadas em diferentes países.

Palavras-Chaves: prospecção; metais-base; nanopartículas; aerossóis; mineralizações profundas.

BASE-METAL PROSPECTION BY THE COUNTING OF METALIC NANOPARTICLES EMANATED FROM DEEP MINERALIZATIONS

Abstract:

Geochemical prospectation is widely used to discover mineral deposits. The aerosols prospectation, proposed in the 80's, aims to locate deep mineral deposits. The aerosols, or geogases, are capable to transport mineral nanoparticles emanated from deep deposits. The objective of this paper is to make a bibliography review about this method. The method consists in the installation of geogases collectors in the soil, equipped with a device that capture the nanoparticles which are later analyzed by Electron Transmission Microscopy. The results showed excellent spatial correlations with underground mineralizations located in China, Mongolia, New Zealand, the United States, Australia, Germany, Uzbekistan, among other countries.

Keywords: prospectation; base-metals; nanoparticles; aerosols; deep mineralizations.



1. INTRODUÇÃO

Atualmente, a prospecção geoquímica de metais-base é realizada através da coleta de sedimentos de corrente e/ou do horizonte B do solo, que são posteriormente enviados para laboratório onde são analisados por Espectroscopia de Absorção Atômica, Espectrometria de Fluorescência de Raios X, Espectroscopia de Emissão Atômica, dentre outras. Este tipo de prospecção geoquímica tem uma limitação de detecção vertical, uma vez que depósitos minerais mais profundos, situados a centenas de metros de profundidade, dificilmente são detectados. Outra limitação deste método de prospecção é decorrente da ocorrência de solos transportados, onde a coleta do material não reflete a geologia de subsuperfície [1].

No início da década de 1980, foi desenvolvido, na Suécia, um método inédito de prospecção geoquímica de solos baseado na captura de nanopartículas minerais transportadas por aerossóis, também chamados de geogases [2]. O geogás demonstrou-se capaz de transportar partículas minerais emanadas de mineralizações subterrâneas, associadas à zonas de alteração hidrotermal, ou de cisalhamento, localizadas em profundidades de até mil metros.

Os resultados obtidos em trabalhos executados na China, Mongólia, Nova Zelândia, Estados Unidos, Austrália, Alemanha e Uzbequistão, apresentaram excelentes correlações espaciais entre nanopartículas coletadas, em superfície, e as mineralizações subterrâneas já conhecidas e mapeadas. Essas correlações se verificaram mesmo através de solos transportados e de rochas de baixíssima permeabilidade, dispostos entre os corpos mineralizados, em subsuperfície, e os coletores de geogases, na superfície [2,19].

Diante disso, este trabalho teve como objetivo foi realizar uma revisão bibliográfica sobre o tema identificando os modelos de sistemas utilizados, método experimental de coleta e de correlação de dados.

2. METODOLOGIA

Este trabalho foi conduzido pela implementação de procedimentos técnicos sistemáticos para a coleta de informações científicas, as coletas empregaram diversas bases de dados com parâmetros confiáveis de reprodutibilidade que pudessem permitir trabalhar com questões acadêmicas e depósito de patentes em diferentes idiomas.

A prospecção tecnológica foi realizada no período entre os dias 02 de janeiro de 2018 a 31 de janeiro de 2018. A busca foi ajustada para abranger trabalhos realizados em diferentes países durante qualquer período de publicação, apesar de nos últimos 10 anos ser considerado de maior interesse para a pesquisa. Os softwares EXCEL® da Microsoft e Mendeley foram utilizados, conjuntamente, para compilar e organizar os dados coletados dos bancos de dados para ambas áreas: questões acadêmicas e depósito de patentes. O processo de busca sistemático deu-se início por meio da criação de filtros e estratégias de busca em bibliotecas eletrônicas. A sistematização foi realizada nas seguintes bibliotecas: (i) Espacenet, (ii) INPI, (iii) Thomson, (iv) Scopus, (v) Web of Science, (vi) CAPES e (vii) Science



Direct e (viii) Scielo. A formação da *string* de busca aplicou funcionalidades como aspas, truncamento e operadores booleanos.

A *string* com os descritores de busca utilizados nas revistas indexadas da academia assumiu a seguinte configuração: “Ascending Gas” OR Geogas OR Nanoparticle AND Ore OR Metal OR Min* AND Concealed AND Deposit. Todo o processo de pesquisa foi disposto para buscar somente no(s) título e/ou resumo e/ou palavras-chaves.

As metodologias aplicadas as bases INPI e Espacenet foram conduzidas conforme o comportamento das mesmas. Dessa maneira, para a base INPI a *string* aplicada foi: Minério OR Mineração OR Metal AND Depósito. Já para o Espacenet, apenas o termo geogás foi utilizado na busca. Todos esses termos também foram configurados para pesquisarem somente nas áreas de título e resumo.

3. RESULTADOS E DISCUSSÃO

Na prospecção realizada, foram encontrados 501 trabalhos nas configurações citadas previamente. A Tabela 1 apresenta os resultados obtidos nas etapas de busca nas bases selecionadas.

Tabela 1. Resultado geral da prospecção de anterioridade tecnológica

Fonte	Documentos Encontrados	Documentos Obtidos/Interesse	Documentos Não Obtidos
Spacenet (patente)	24	7	-
INPI (patente)	-	-	-
Thomson (patente)	1	1*	-
Scopus (artigo)	97	19	9
Web of Science (artigo)	-	-	-
CAPEL (artigo)	100	9**	-
Science Direct (artigo)	269	8**	-
SciELO (artigo)	-	-	-
Referencias (artigos)	10	5	6
Total	501	31	15

* Documento já localizado pelo banco de dados Espacenet.

** Artigos já identificados em outras bases

Referências (artigos) - trabalhos acadêmicos referenciados na RSL e não localizados pela sistemática.

Os documentos não obtidos se dão pela razão da não obtenção de licenças dos respectivos bancos bibliográficos.

A Tabela 2 apresenta os trabalhos acadêmicos de interesse que foram identificados e baixados das bibliotecas eletrônicas. Todos esses abordam conceitualmente e experimentalmente a tecnologia do coletor de geogás.



Tabela 2. Artigos selecionados

Artigo	Ano	Fator de Impacto	Ref.
Geogas prospecting: a new tool in the search for concealed mineralizations	1990	0,302	[2]
Experimental observation of the nano-scale particles in geogas matters and its geological significance	1997	1,989	[3]
Nanoscale metals in Earthgas and mobile forms of metals in overburden in wide-spaced regional exploration for giant deposits in overburden terrains	1997	2,464	[4]
Geogas prospecting ± an ideal industrial application of PIXE	1999	1,109	[5]
Progress in the collection of Geogas in China	2008	2,017	[6]
TEM observation of geogas-carried particles from the Changkeng concealed gold deposit, Guangdong Province, South China	2009	2,464	[7]
Simulation of adsorption of gold nanoparticles carried by gas ascending from the Earth's interior in alluvial cover of the middle-lower reaches of the Yangtze River	2010	2,687	[8]
Nonconventional Geochemical Exploration of Gold Deposits in Xinjiang and Henan Provinces , China Nonconventional Geochemical Exploration of Gold Deposits	2010	2,262	[9]
Particles carried by ascending gas flow at the Tongchanghe copper mine, Guizhou Province, China	2010	1,989	[10]
TEM study of geogas-transported nanoparticles from the Fankou lead-zinc deposit, Guangdong Province, South China	2013	2,464	[11]
Mechanism of the migration of gold in desert regolith cover over a concealed gold deposit	2014	2,017	[12]
TEM observations of particles based on sampling in gas and soil at the Dongshengmiao polymetallic pyrite deposit, Inner Mongolia, Northern China	2015	2,464	[13]
Study of Carbon-Bearing Particles in Ascending Geogas Flows in the Dongshengmiao Polymetallic Pyrite Deposit, Inner Mongolia, China	2014	0,830	[14]
Geochemical exploration for concealed deposits at the periphery of the Zijinshan copper-gold mine, southeastern China	2015	2,464	[15]
Sulfur-containing particles emitted by concealed sulfide ore deposits: An unknown source of sulfur-containing particles in the atmosphere	2015	5,318	[16]
TEM study on particles transported by ascending gas flow in the Kaxiutata iron deposit, Inner Mongolia, North China	2015	2,017	[17]
Characteristics of soil particles in the Xiaohulishan deposit, Inner Mongolia, China	2016	2,464	[18]
Tracing the Source of Metals in Geogas from Metal Deposits in a Loess-covered Region 1 Overview of Geology and Geography	2016	0,400*	[19]
Nanogeochemistry for Mineral Exploration Through Covers	2016	0,400*	[20]
Geochemical challenges of diverse regolith-covered terrains for mineral exploration in China	2016	3,095	[21]
Study of particles from the kafang copper deposit in Gejiu city, Yunnan	2017	2,017	[22]
Research on Geogas Particles from Bingba Copper Deposit in Guanling County of Guizhou Province	2017	0,966**	[23]
Identification of metal sources in Geogas from the Wangjiazhuang copper deposit, Shandong, China: Evidence from lead isotopes	2017	2,464	[24]
The research of particles carried by ascending gas flow from Qingmingshan Cu-Ni sulfide deposit in Guangxi Province	2017	1,148	[25]

*Fator de Impacto 2014

**Fator de Impacto 2011

A Tabela 3 apresenta as patentes selecionados de interesse do projeto.

Tabela 3. Patentes selecionadas

N	Título	IPC
1	Method for indicating concealed deposits	G01V9/00 G01N33/24
2	Device for gathering geogas particles of concealed metal ores	G01N1/14
3	Drilling tool for gathering geogas of concealed metal ores	E21B49/08 G01N1/24
4	Efficiency-adjustable dynamic geogas prospecting method	G01V9/00
5	Geochemical geogas prospecting and sampling device	G01N1/22 G01N1/10
6	Experiment device for simulating radon conveying performed by geogas	G01N33/00
7	Radon gas-geogas combined measurement method for extracting deep uranium mineralization information	G01N33/00

IPC – Classificação Internacional de Patente

O maior número de documentos, tanto acadêmicos como de depósito de patentes, são chineses (90%). Dos 31 documentos, 28 são da China, 2 da Suécia e 1 da Grã-Bretanha. Entretanto, a língua inglesa continua predominante nas publicações, sendo que 67,34% dos artigos e patentes se encontram na língua inglesa e 32,35% na língua chinesa.

A Universidade Sun Yat-Sen de Guangdong e a Universidade de Geociência em Beijing são as entidades de pesquisa mais produtivas da área com 7 publicações (representando 29,16%) e 3 publicações (representando 12,5%), respectivamente. Além disso, pode-se notar que a Universidade de Tecnologia em Chengdu foi a única instituição que publicou artigo e depositou patente.

Uma das primeiras experiências com a prospecção geoquímica de geogases foi realizada no norte da Suécia, perto da fronteira finlandesa [2].

De uma forma geral, a prospecção geoquímica de geogases consiste na captura de nanopartículas minerais em pequenos grids instalados na parte superior de coletores soterrados no solo e posteriormente analisados por Microscopia Eletrônica de Transmissão (MET).

Existem na literatura diversos tipos coletores de geogases. Porém, os mais aplicados experimentalmente são os passivos, que não estimulam a sucção do geogás para o seu interior do coletor, e os ativos, que produzem o efeito inverso. Entretanto, este trabalho se resumiu a pesquisar os coletores passivos, pois foi o mais frequente na RSL, com 65,21% de aparições entre os experimentos identificados.

Observou-se que os coletores passivos mais utilizados são de plástico e apresentam na sua estrutura o formato de um funil inverso, medindo, em regra, 30 cm de diâmetro, na base, 10 cm de diâmetro, no topo, e 50 cm de altura. São instalados em poços escavados no solo, a uma profundidade de 60 cm, independentemente do tipo de horizonte. Na extremidade superior desses coletores



são instalados TEM grids, que são pequenas grades de 3 mm de diâmetro onde as nanopartículas minerais ficam retidas.

Em média, após 45 dias do início da instalação dos coletores, esses são recolhidos e os TEM grids retirados e encaminhados para a Microscopia Eletrônica de Transmissão, quando as nanopartículas minerais retidas são quantificadas.

Um estudo realizado no norte da Suécia, aplicou cerca de 30 coletores geoquímico no solo, ao longo de uma linha de aproximadamente 200 m de comprimento, acima de uma mineralização de cobre-níquel já conhecida para validação do protótipo coletor. A duração da exposição foi de cerca de três meses e os resultados foram muito positivos [2]. A mineralização já conhecida é composta por uma rocha sã e coberta por um depósito glacial com uma espessura de 1 a 2 metros. A posição da mineralização de cobre-níquel é claramente identificada pela maior concentração de níquel nos núcleos da perfuração realizada, e através desses dados o estudo correlacionou espacialmente a concentração de níquel coletada pelos 30 TEM grids. Os resultados demonstraram que ocorreu um transporte ativo de geogás a partir da mineralização. Os dados demonstraram que o fluxo de matéria da mineralização é extremamente pequeno e possível de medir somente por métodos avançados. Os dados obtidos justificaram a necessidade de que o tempo de exposição dos grids deva ser longo.

Um interessante experimento com a geoquímica de geogases foi realizado no campo geotermal de Rotokawa, na Nova Zelândia, quando foram constatadas anomalias de nanopartículas de aluminossilicatos, em superfície, relacionadas à ocorrência de falhas geológicas, em subsuperfície, refletindo o lixiviamento que os aluminossilicatos sofreram por ação dessas falhas [2].

Em uma prospecção de geogases realizada na China, os coletores capturaram nanopartículas metálicas que foram transportadas pelos geogases, a partir de corpos sulfetados, em profundidade, percolando através de Dioritos colocados entre os corpos sulfetados e a superfície onde os coletores foram dispostos [19].

Ainda na China, foram coletadas nanopartículas metálicas, em superfície, provenientes de mineralizações situadas a 1.000 metros de profundidade [14].

Mais uma vez na China, foi calculada uma correlação quantitativa de 65%, entre corpos de sulfetos metálicos (predominantemente pirita) em subsuperfície e as nanopartículas capturadas em superfície. Esta foi a única menção encontrada na literatura, de uma correlação quantitativa [13].

4. CONCLUSÕES

Em dezenove artigos técnicos, foram de solos, a prospecção de geogases mostra-se muito mais abrangente e preciso, pois tem um limite de detecção vertical mais amplo e independe da ocorrência de solos transportados e/ou de rochas impermeáveis situados entre a superfície e a geologia subterrânea.



Por fim, atualmente a China é o país em destaque na tecnologia dos coletores geoquímicos de gases, com 90% das publicações. Este dispositivo de prospecção apresenta um forte potencial exploratório por apresentar excelentes resultados de correlação espacial e viabilidade econômica.

Descritos trinta diferentes cenários geológicos onde a prospecção geoquímica de geogases foi utilizada, em países como China, Mongólia, Nova Zelândia, Estados Unidos, Austrália, Alemanha e Uzbequistão. Em todos esses cenários, as correlações espaciais, obtidas entre os teores de nanopartículas minerais transportadas por geogases até a superfície e os teores percentuais dos corpos mineralizados atravessados por furos de sonda, em subsuperfície, foram excelentes.

Os trabalhos analisados mostraram que foram coletadas nanopartículas que teriam sido transportadas verticalmente pelos geogases, através de rochas de baixíssima permeabilidade; solos transportados; e profundidades de até 1.000 metros.

Pode-se inferir que este método é aplicável para qualquer tipo de mineralização associada à zonas de alteração hidrotermal ou à zonas de cisalhamento, havendo sido detectadas anomalias de metais-base, além de ouro e silicatos. Frente aos métodos convencionais de prospecção geoquímica.

5. REFERÊNCIAS

1. LICHT, O. A. B.; MELLO, C. S. B.; SILVA, C. R. Prospecção Geoquímica. SBGQ, 2007.
2. KRISTIANSSON, Krister. Geogas prospecting: A new tool in the search for concealed mineralizations. *Endeavor, New Series*, v. 14, p. 28-33, 1990.
3. CHUNHAN, Ong et al. Experimental observation of the nano-scale particles in geogas matters and its geological significance. **Science in China Series D: Earth Sciences**, v. 41, n. 3, p. 325-329, 1998.
4. WANG, Xueqiu et al. Nanoscale metals in Earthgas and mobile forms of metals in overburden in wide-spaced regional exploration for giant deposits in overburden terrains. **Journal of Geochemical Exploration**, v. 58, n. 1, p. 63-72, 1997.
5. MALMQVIST, L.; KRISTIANSSON, K.; KRISTIANSSON, P. Geogas prospecting—an ideal industrial application of PIXE. **Nuclear Instruments and Methods in Physics Research Section B: Beam Interactions with Materials and Atoms**, v. 150, n. 1-4, p. 484-490, 1999.
6. WANG, Ming-qj; GAO, Yu-yan; LIU, Ying-han. Progress in the collection of Geogas in China. **Geochemistry: Exploration, Environment, Analysis**, v. 8, n. 2, p. 183-190, 2008.
7. CAO, Jianjin et al. TEM observation of geogas-carried particles from the Changkeng concealed gold deposit, Guangdong Province, South China. **Journal of Geochemical Exploration**, v. 101, n. 3, p. 247-253, 2009..
8. CAO, J. J. et al. Simulation of adsorption of gold nanoparticles carried by gas ascending from the Earth's interior in alluvial cover of the middle-lower reaches of the Yangtze River. **Geofluids**, v. 10, n. 3, p. 438-446, 2010.
9. SHANFANG, Li; ZONGHUA, Wu; JIMIN, Liu. Nonconventional geochemical exploration of gold deposits in Xinjiang and Henan provinces, China. **International Geology Review**, v. 35, n. 11, p. 1030-1036, 1993.



10. CAO, JianJin et al. Particles carried by ascending gas flow at the Tongchanghe copper mine, Guizhou Province, China. **Science China Earth Sciences**, v. 53, n. 11, p. 1647-1654, 2010.
11. WEI, Xiaojun et al. TEM study of geogas-transported nanoparticles from the Fankou lead-zinc deposit, Guangdong Province, South China. **Journal of Geochemical Exploration**, v. 128, p. 124-135, 2013.
12. YE, Rong; ZHANG, Bimin; WANG, Yong. Mechanism of the migration of gold in desert regolith cover over a concealed gold deposit. **Geochemistry: Exploration, Environment, Analysis**, p. 2013-228, 2014.
13. LUO, Songying et al. TEM observations of particles based on sampling in gas and soil at the Dongshengmiao polymetallic pyrite deposit, Inner Mongolia, Northern China. **Journal of Geochemical Exploration**, v. 158, p. 95-111, 2015.
14. HU, Guai et al. Study of Carbon-Bearing Particles in Ascending Geogas Flows in the Dongshengmiao Polymetallic Pyrite Deposit, Inner Mongolia, China. **Resource Geology**, v. 65, n. 1, p. 13-26, 2015.
15. ZHANG, Bimin et al. Geochemical exploration for concealed deposits at the periphery of the Zijinshan copper-gold mine, southeastern China. **Journal of Geochemical Exploration**, v. 157, p. 184-193, 2015.
16. CAO, J. Jinh et al. Sulfur-containing particles emitted by concealed sulfide ore deposits: an unknown source of sulfur-containing particles in the atmosphere. **Atmospheric Chemistry and Physics**, v. 15, n. 12, p. 6959-6969, 2015.
17. DAI, Dongle et al. TEM study on particles transported by ascending gas flow in the Kaxiutata iron deposit, Inner Mongolia, North China. **Geochemistry: Exploration, Environment, Analysis**, p. 2013-263, 2015.
18. WANG, Zhengyang et al. Characteristics of soil particles in the Xiaohulishan deposit, Inner Mongolia, China. **Journal of Geochemical Exploration**, v. 169, p. 30-42, 2016.
19. WAN, W. et al. Tracing the Source of Metals in Geogas from Metal Deposits in a Loess-covered Region 1 Overview of Geology and Geography. **Bulletin of Mineralogy, Petrology and Geochemistry**, v. 35, n. 6, p. 1290-1297, 2016.
20. WANG, X.-Q.; ZHANG, B.; YE, R. Nanogeochemistry for Mineral Exploration Through Covers. **Bulletin of Mineralogy Petrology and Geochemistry**, v. 35, n. 1, p. 43-51, 2016.
21. XUEQIU, Wang et al. Geochemical challenges of diverse regolith-covered terrains for mineral exploration in China. **Ore Geology Reviews**, v. 73, p. 417-431, 2016.
22. LI, Dewei et al. Study of particles from the Kafang copper deposit in Gejiu city, Yunnan. **Geochemistry: Exploration, Environment, Analysis**, p. geochem2017-903, 2017.
23. CAO, J. et al. Research on Geogas Particles from Bingba Copper Deposit in Guanling County of Guizhou Province. **Journal of Jilin University (Earth Science Edition)**, v. 47, n. 1, p. 95-205, 2017.
24. WAN, Wei et al. Identification of metal sources in Geogas from the Wangjiazhuang copper deposit, Shandong, China: Evidence from lead isotopes. **Journal of Geochemical Exploration**, v. 172, p. 167-173, 2017.
25. YINGKUI, Li et al. The research of particles carried by ascending gas flow from Qingmingshan Cu-Ni sulfide deposit in Guangxi Province. **ACTA PETROLOGICA SINICA**, v. 33, n. 3, p. 831-842, 2017.