

Avaliação do potencial de solubilização de fósforo pelo *Aspergillus terreus*

Assessment of phosphorus solubilization potential by *Aspergillus terreus*

Evaluación del potencial de solubilización del fósforo por *Aspergillus terreus*

Recebido: 13/11/2021 | Revisado: 22/11/2021 | Aceito: 24/11/2021 | Publicado: 07/12/2021

Glaber Luiz da Rocha Ferreira

ORCID: <https://orcid.org/0000-0003-0963-0351>
Universidade Federal de Goiás, Brasil
E-mail: glalberocha@gmail.com.br

José Daniel Gonçalves Vieira

ORCID: <https://orcid.org/0000-0001-5434-4915>
Universidade Federal de Goiás, Brasil
E-mail: jdgvieira62@gmail.com

Resumo

A biossolubilização é uma das tecnologias mais inovadora e promissora utilizada na recuperação de solos, totalmente aplicável aos rejeitos de mineração, apesar da imensa incapacidade das mineradoras de alcançarem a totalidade no aproveitamento de seus minerais, devido a métodos considerados falíveis no processo de mineração. Este estudo vislumbrou a possibilidade da aplicação da solubilização do fósforo presente no rejeito do minério de ferro pelo *Aspergillus terreus*. Os ensaios analíticos propostos no estudo indicaram uma solubilização máxima de 87,77% do fósforo pelo *A. terreus* a partir do rejeito do minério de ferro, correspondendo a uma concentração de 286,38 mg L⁻¹ de fósforo solúvel, ocorrido a um período de 168 horas de processo de biossolubilização, e assim, contribuindo a uma solubilização média de 1,70 mg h⁻¹ de fósforo pela biomassa fúngica. Complementando, as imagens microfotográficas obtidas pela MEV e MET revelaram por meio de análise os aspectos morfológicos e estruturais do micélio e da composição celular do fungo, demonstrando a eficiente solubilização do fósforo pelo *A. terreus*. As informações reveladas por este estudo demonstram a eficiente solubilização do componente fósforo presente no rejeito do minério de ferro pelo fungo, resultando numa excelente tecnologia, e sugestiva aplicação na mineração, como uma alternativa para redução de custos de produção, favorecendo a sustentabilidade do sistema de mineração, e assim, contribuindo numa melhor qualidade do minério de ferro e numa provável finalidade do fósforo solúvel, como exemplo, na produção de fertilizantes fosfatados.

Palavras-chave: Fósforo; Biossolubilização; Solubilização; *Aspergillus terreus*; Rejeito de minério de ferro.

Abstract

Biosolubilization is one of the most innovative and promising technologies used in soil recovery, fully applicable to mining tailings, despite the immense incapacity of mining companies to achieve full use of their minerals, due to methods considered fallible in the mining process. This study envisioned the possibility of applying the solubilization of phosphorus present in iron ore tailings by *Aspergillus terreus*. The analytical tests proposed in the study indicated a maximum solubilization of 87,77% of the phosphorus by *A. terreus* from the iron ore tailings, corresponding to a concentration of 286,38 mg L⁻¹ of soluble phosphorus, occurring within a period of 168 hours of biosolubilization process, and thus, contributing to an average solubilization of 1,70 mg h⁻¹ of phosphorus by the fungal biomass. In addition, the microphotographic images obtained by SEM and TEM revealed, through analysis, the morphological and structural aspects of the mycelium and the cellular composition of the fungus, demonstrating the efficient solubilization of phosphorus by *A. terreus*. The information revealed by this study demonstrates the efficient solubilization of the phosphorus component present in the iron ore waste by the fungus, resulting in an excellent technology, and suggestive application in mining, as an alternative to reduce production costs, favoring the sustainability of the iron ore system. mining, and thus, contributing to a better quality of iron ore and a probable use of soluble phosphorus, for example, in the production of phosphate fertilizers.

Keywords: Phosphorus; Biosolubilization; Solubilization; *Aspergillus terreus*; Iron ore tailings.

Resumen

La biosolubilización es una de las tecnologías más innovadoras y prometedoras utilizadas en la recuperación de suelos, plenamente aplicable a los relaves mineros, a pesar de la inmensa incapacidad de las empresas mineras para lograr el pleno aprovechamiento de sus minerales, debido a métodos considerados falibles en el proceso minero. Este estudio visualizó la posibilidad de aplicar la solubilización del fósforo presente en relaves de mineral de hierro por *Aspergillus terreus*. Las pruebas analíticas propuestas en el estudio indicaron una solubilización máxima del 87,77% del fósforo por *A. terreus* de los relaves de mineral de hierro, correspondiente a una concentración de 286,38 mg L⁻¹ de fósforo soluble, ocurriendo en un período de 168 horas de biosolubilización. proceso, contribuyendo así a una solubilización media de 1,70 mg h⁻¹ de fósforo por la biomasa fúngica. Además, las imágenes microfotográficas

obtidas por MEB y MET revelaron, mediante análisis, los aspectos morfológicos y estructurales del micelio y la composición celular del hongo, demostrando la eficiente solubilización del fósforo por *A. terreus*. La información revelada por este estudio demuestra la eficiente solubilización del componente fósforo presente en los residuos de mineral de hierro por el hongo, resultando en una excelente tecnología, y sugerente aplicación en minería, como alternativa para reducir costos de producción, favoreciendo la sustentabilidad del hierro. minería, contribuyendo así a una mejor calidad del mineral de hierro y un probable uso de fósforo soluble, por ejemplo, en la producción de fertilizantes fosfatados.

Palabras clave: Fósforo; Biosolubilización; Solubilización; *Aspergillus terreus*; Relaves de mineral de hierro.

1. Introdução

O esgotamento do minério de ferro em todo o mundo tem trazido grandes preocupações, já que é a matéria-prima mais importante para a indústria siderúrgica, e principal recurso para atendimento de diversas demandas de bens e materiais da população e do desenvolvimento industrial. O minério de ferro é designado geralmente como alto ou baixo grau com base no seu teor de ferro, sendo que os minérios de alta qualidade, os quais são encontrados com teor de fósforo (P) inferior a 0,07% P, são considerados comercialmente os mais desejados, e estão se esgotando muito rapidamente, tornando-se essencial como único recurso a exploração e beneficiamento de minérios de baixo teor (Tudu et al. 2018; Ofoegbu, 2019).

O minério de ferro de baixo teor existe em grande abundância no mundo todo, mais a sua baixa qualidade se deve a alta concentração de P incorporado ao minério de ferro, tendo esse elemento um efeito deletério sob a formação do aço, não satisfazendo aos requisitos necessários para produção de ferro (Zhang et al. 2018). O fósforo está presente em quase toda a cadeia produtiva do ferro e do aço, o mesmo tende a concentrar-se no ferro durante o processo extrativo, uma vez que é capaz de passar de sua forma oxidada para sua forma elementar, estando no ferro metálico após a redução mineral. Devido aos processos atuais de produção de ferro, como exemplo por via operação de alto-forno, a alta temperatura favorece que o fósforo seja totalmente absorvido pelo ferro fundido (Rath et al. 2018).

Com a exaustão gradual do minério de ferro de alta qualidade, o que significa numa das principais preocupações da indústria siderúrgica, o setor de mineração deverá se adequar a uma mineração seletiva sob o aspecto de realizar o beneficiamento do minério de ferro de baixa qualidade, o que é inevitável, sendo a remoção do fósforo do minério de ferro a principal base do uso do minério com alto teor de fósforo para o processo de fabricação de ferro (Zhao et al. 2018). Pereira e Papini (2015), em seus estudos não conseguem estabelecer com precisão como o fósforo é encontrado no minério de ferro, sendo sugerido pelos autores que fósforo ocorre, provavelmente, no minério de ferro na forma de fosfato, se encontrando adsorvido na superfície da partícula ou ocluído nos microporos, é sugerido também que o fósforo esteja localizado dentro da estrutura dos oxihidróxidos ou como um mineral fosfato (Rachappa et al. 2015).

O principal e mais frequente da classe dos fosfatos é a apatita, $\text{Ca}_5(\text{PO}_4)(\text{F}, \text{Cl}, \text{OH})$, mais outros fosfatos podem ser encontrados em depósitos de minério de ferro, como: a wavellite, $\text{Al}_3(\text{PO}_4)_2(\text{OH})_3 \cdot 5(\text{H}_2\text{O})$; a senegalite, $\text{Al}_3(\text{PO}_4)(\text{OH})_3(\text{H}_2\text{O})$; a turquesa, $\text{CuAl}_6(\text{PO}_4)_4(\text{OH})_{8,5}(\text{H}_2\text{O})$; a strengite, $\text{Fe}^{3+}(\text{PO}_4) \cdot 2(\text{H}_2\text{O})$; o Rockbridgeite, $\text{Fe}^{2+}0,75\text{Mn}^{2+}0,25\text{Fe}^{3+}4(\text{PO}_4)_3(\text{OH})_5$; a frondelita, $\text{Mn}^{2+}\text{Fe}^{3+}4(\text{PO}_4)_3(\text{OH})_5$; o gorceixite, $\text{BaAl}_3(\text{PO}_4)_2(\text{OH})_5 \cdot 2(\text{H}_2\text{O})$; o barrandite, $(\text{Al}, \text{Fe})\text{PO}_4 \cdot 2(\text{H}_2\text{O})$; o variscite, $\text{Al}(\text{PO}_4) \cdot 2(\text{H}_2\text{O})$. No Brasil, os fosfatos wavellite, senegalita e turquesa são principalmente encontrados nos minérios de ferro (Pereira e Papini, 2015).

Segundo Taylor et al. (1988), a exploração de depósitos de minério de ferro de baixo teor provavelmente suplementaria as reservas cada vez menores de minérios de ferro de alto teor no futuro, e por isso, para que tenhamos a disponibilidade contínua deste recurso mineral se faz necessário o desenvolvimento de novos métodos e sistemas, almejando refazer e usar os minérios de ferro de baixa qualidade até então inutilizáveis e, portanto, inexplorados, e também oferecer uma possível oportunidade de aproveitamento econômico para o elemento fósforo removido do minério de ferro.

Em função disso, diversos esforços de pesquisa têm sido focados almejando a remoção de fósforo do minério de ferro

com alto teor de fósforo, e assim, numa tentativa de reduzir o teor de fósforo a níveis aceitáveis (Pereira e Papini, 2015). Diversos são os processos empregados na remoção de fósforo de minérios de ferro, incluindo a separação por magnetização de torrefação (Cao et al. 2018; Zhang et al. 2019), redução direta à base de carvão (Zhao et al., 2018), tratamento térmico (Zhang et al. 2018; Zhao et al. 2018), tratamento por micro-ondas (Cai et al. 2018; Kim et al. 2018), tratamento ultra-sônico (He et al. 2018), lixiviação ácida (Xiang et al. 2018; Cai et al. 2018), lixiviação alcalina (Guo et al. 2015; Zhang et al. 2019), aglomeração seletiva (Yang et al. 2018), e flotação (Tudu et al. 2018; Zhang et al. 2019).

Na busca por tecnologias ambientalmente saudáveis para a indústria de mineração, os processos biológicos como a biolixiviação é encarada como sendo uma das soluções mais promissoras e certamente a mais revolucionária para resolução desses tipos de problema. A biolixiviação ou biossolubilização é considerada um tratamento biológico realizado por micro-organismos, que tem como resultante de seu metabolismo, a geração de produtos químicos como ácido mineral, ácidos orgânicos, polímeros e enzimas. Estes subprodutos químicos atacam o rejeito contido no minério, promovendo a sua dissolução e produzindo sua remoção seletiva (Chime et al. 2011).

Considerando o processo de biossolubilização, temos que uma parcela importante de micro-organismos considerados edáficos possuem a habilidade de mineralizar fosfatos orgânicos e de solubilizar fosfatos inorgânicos presentes no solo, e assim permitindo a liberação de fósforo assimilável pelas plantas (Godin, 2013). Vários são os micro-organismos que têm sido utilizados com considerável eficiência na solubilização de fosfato, a título de exemplo as bactérias (Tahir et al. 2018; Paul e Sinha, 2016; Liu et al. 2015; Solanki et al. 2018; Ghosh et al. 2016; Wei et al. 2018) e os fungos (Mendes et al. 2014; Xiao et al. 2015; Li et al. 2015; Li et al. 2016; Jain et al. 2017). Por esse motivo, este estudo fará uso do *Aspergillus terreus*, isolado do rejeito de minério de ferro, almejando desfosforar o rejeito de minério de ferro e biossolubilizar o fósforo em meio líquido, e assim, contribuindo na viabilização de novos estudos biotecnológicos.

2. Metodologia

A amostra de minério de ferro obtida foi proveniente de uma mineradora, localizada na cidade de Catalão, Goiás (18° 16' 43" de latitude Sul e 47° 88' 22" de longitude Oeste). Sendo separada aproximadamente uma porção de 10 kg do resíduo gerado sob o solo da mineradora para posterior realização dos estudos de solubilização do fósforo pelo *Aspergillus terreus*.

O experimento foi realizado no Laboratório de Microbiologia Ambiental e Biotecnologia da Universidade Federal de Goiás - UFG - Campus Goiânia. O trabalho a seguir tem como objetivo realizar um estudo de caso quantitativo, com o objetivo de avaliar as condições inerentes à avaliação do potencial de solubilização de fósforo do rejeito de minério de ferro pelo *Aspergillus terreus*.

2.1 Material biológico

O material biológico utilizado neste artigo foi o *Aspergillus terreus*, resultado do isolamento da amostra de rejeito de minério de ferro, conforme descrito no artigo experimental "Solubilization of Phosphorus by Isolated Fungus of Iron ore Tailings", no Journal of Earth and Environmental Sciences Research, identificado com o DOI: [https://doi.org/10.47363/JEESR/2020\(2\)134](https://doi.org/10.47363/JEESR/2020(2)134).

2.2 Biossolubilização de fósforo em meio contendo minério de ferro

A amostra de rejeito de minério de ferro foi submetida a digestão ácida, com a dissolução de 1 g de amostra para 10 mL de ácido sulfúrico concentrado em cadinho de porcelana em chapa aquecedora, até evaporação incompleta do ácido, em seguida foi filtrada para balão volumétrico de 100 mL e avolumado com água destilada. A concentração de fósforo solúvel no meio foi medida utilizando o equipamento Spectro kit (Alfakit), visando conhecer o conteúdo de fosfato e fósforo na amostra, e em seguida definição da concentração de fósforo para o estudo de solubilização de fósforo pelo *Aspergillus terreus*.

Foi verificado na amostra de minério de ferro uma concentração de 279.44 mg L⁻¹ de fosfato ou 91.18 mg L⁻¹ de fósforo em 1g de minério de ferro. Por isso, foram preparados vinte e dois frascos de Erlenmeyers contendo 357.9 mg de minério de ferro em 100 mL de solução, correspondendo a 1000 mg L⁻¹ de fosfato ou 326.3 mg L⁻¹ de fósforo, com pH em 7.0 ± 0.2 esterilizados a 121 °C por 20 min. Em cada frasco de Erlenmeyer foi adicionado 3 fragmentos de 4 mm do inóculo fúngico cultivado em placas de Petri, e incubados a 30 ± 2 °C e 130 rpm por 7 dias. Foi retirado um frasco de Erlenmeyer no dia, correspondendo ao tempo zero, e três frascos de Erlenmeyers em períodos de 24 horas.

Foram coletadas amostras de cada frasco de Erlenmeyer após o período de 7 dias de incubação e avaliado quanto a concentração de fósforo solúvel, com a utilização do Spectro kit (Alfakit); a atividade de fosfatase ácida, a partir da utilização do kit comercial (Labtest®); a produção de biomassa pela medição de conteúdo de massa seca (IAL, 2008); e ao potencial hidrogeniônico (IAL, 2008).

2.3 Análise de Microscopia Eletrônica de Varredura (MEV)

Os pellets do micro-organismo obtidos no estudo da biossolubilização de fósforo, foram analisados via MEV em microscópio JEOL (JSM 6610), equipado com EDS Thermo scientific NSS special imaging. As amostras foram submetidas a técnicas especiais de preparação, como fixação em glutaraldeído, desidratação em concentrações ascendentes de acetona, secagem pelo ponto crítico de CO₂ Autosamdri®, montagem da amostra em “Stub”, e recobrimento de filmes de ouro na amostra pelo sistema de evaporação conhecido como “sputtering” (Denton Vacuum, Desk V), para posterior condução no MEV, visando a realização de observações morfológicas externas do micro-organismo e captura de imagens.

2.4 Análise de Microscopia Eletrônica de Transmissão (MET)

Consecutivamente ao estudo de biossolubilização de fósforo, foram coletados fragmentos do micro-organismo em formato de pellets, foram analisados via MET em microscópio JEOL (JEM 2100) operado com 100 KeV, equipado com EDS Thermo Scientific. Para as análises via MET, as amostras foram submetidas a técnicas especiais de preparação, como fixação do material em glutaraldeído, pós-fixação em tetróxido de ósmio, desidratação em concentrações ascendente de acetona, infiltração em resina, e por fim a polimerização, para posterior condução no MET, visando a realização de observações morfológicas internas ao micro-organismo e captura de imagens.

3. Resultados e Discussão

A amostra de rejeito de minério de ferro revelou possuir uma concentração de 91.18 mg L⁻¹ de fósforo em 1 g de rejeito de minério de ferro, equivalendo a um teor de 9.12% de fósforo, sendo considerado então um minério de baixa qualidade, devido possuir uma concentração superior a 0.07% de fósforo na composição do minério de ferro, conforme descrito por Ofoegbu (2019), e assim, sendo considerado impróprio para fabricação de aço.

O *Aspergillus terreus* demonstrou ter grande potencial na solubilização de fósforo que se encontrava incorporada ao minério de ferro, conforme apresentado na Tabela 1, revelando uma biossolubilização máxima de 877.67 mg L⁻¹ de fosfato e 286.38 mg L⁻¹ de fósforo, o que corresponde a uma solubilização total de 87.77% do fósforo presente no minério de ferro, e restando ainda na amostra de minério de ferro 12.23% de fósforo que não foi solubilizado, o que é condizente a um percentual de 1.12% de fósforo que ainda permanece aderida ao minério de ferro. Na Figura 1A, é possível observar uma crescente solubilização do fósforo a partir da amostra de minério de ferro, o que representa uma significativa interação do micro-organismo no processo de transformação do fósforo insolúvel na sua forma solúvel, e assim, ocorrendo a estabilização da solubilização do fósforo a partir de 168 h de processo. Foi detectado uma solubilização média de 1,70 mg h⁻¹ de fósforo pelo processo de biossolubilização.

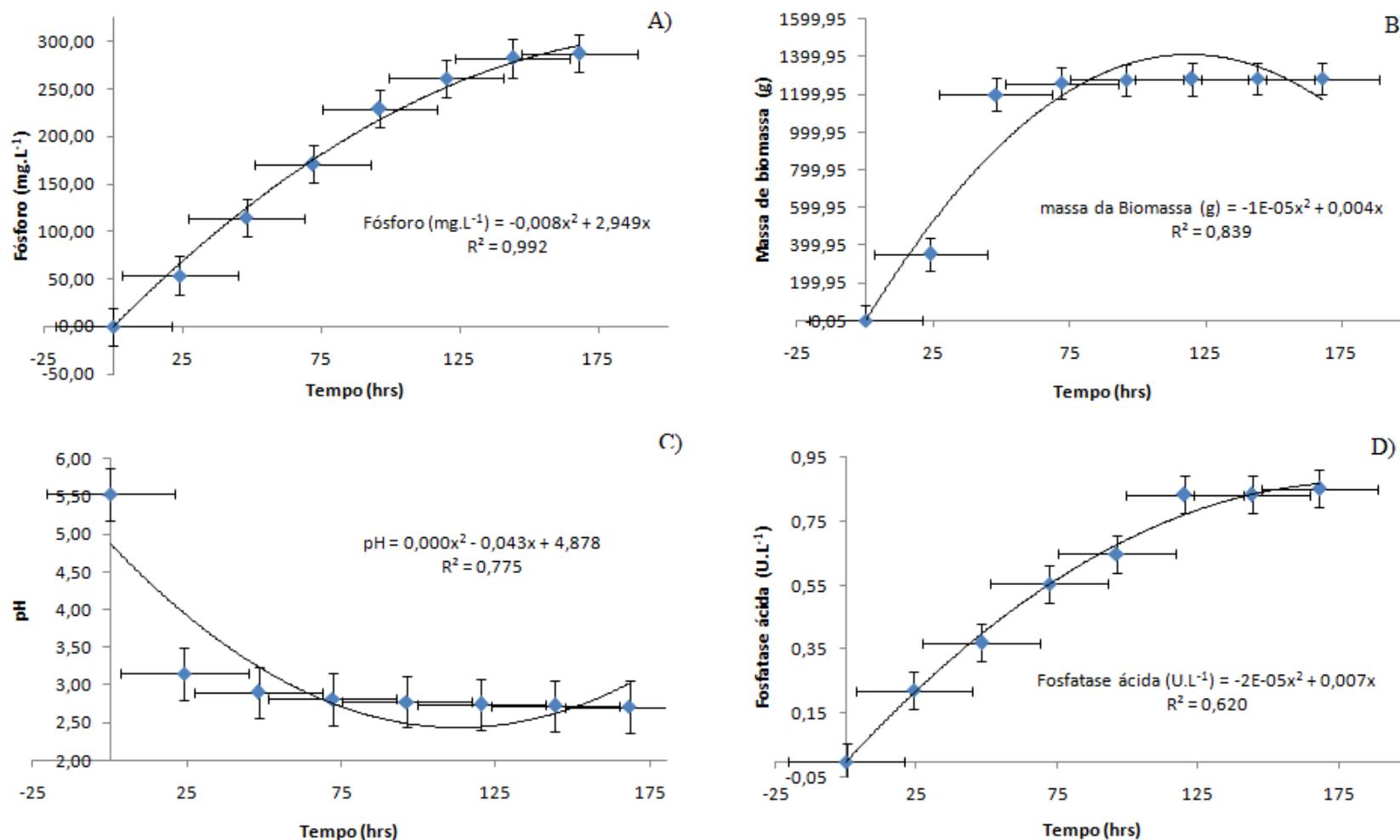
Tabela 1: Evolução do potencial e verificação dos mecanismos de solubilização de fósforo pela estirpe fúngica.

Tempo (hrs)	[PO ₄ ³⁻] solúvel (mg L ⁻¹) ± dp	[P] solúvel (mg L ⁻¹) ± dp	Redução de P no minério de ferro %	Produção de biomassa (mg) ± dp	Velocidade de crescimento (mg h ⁻¹)	pH ± dp	Fosfatase ácida (U L ⁻¹) ± dp
0	0.00 ± 0.00	0.00 ± 0.00	0.00	0.0 ± 0.0	0.0	5.53 ± 0.00	0.000 ± 0.000
24	170.33 ± 5.03	55.58 ± 1.64	17.03	354.7 ± 0.2	14.8	3.15 ± 0.02	0.198 ± 0.028
48	353.33 ± 7.77	115.29 ± 2.53	35.33	1201.6 ± 0.6	25.0	2.90 ± 0.02	0.377 ± 0.047
72	516.33 ± 7.02	168.48 ± 2.29	51.63	1261.8 ± 1.4	17.5	2.81 ± 0.04	0.543 ± 0.039
96	710.67 ± 8.50	231.89 ± 2.78	71.07	1278.7 ± 1.3	13.3	2.78 ± 0.01	0.685 ± 0.037
120	803.00 ± 7.21	262.02 ± 2.35	80.30	1282.1 ± 1.0	10.7	2.75 ± 0.04	0.833 ± 0.037
144	864.67 ± 7.51	282.14 ± 2.45	86.47	1284.0 ± 0.8	8.9	2.73 ± 0.04	0.840 ± 0.011
168	877.67 ± 4.93	286.38 ± 1.61	87.77	1284.4 ± 1.1	7.6	2.71 ± 0.03	0.852 ± 0.019

dp: desvio-padrão

Fonte: Autores.

Figura 1: Representação gráfica dos ensaios físico-químicos para verificação do potencial de solubilização de fósforo.



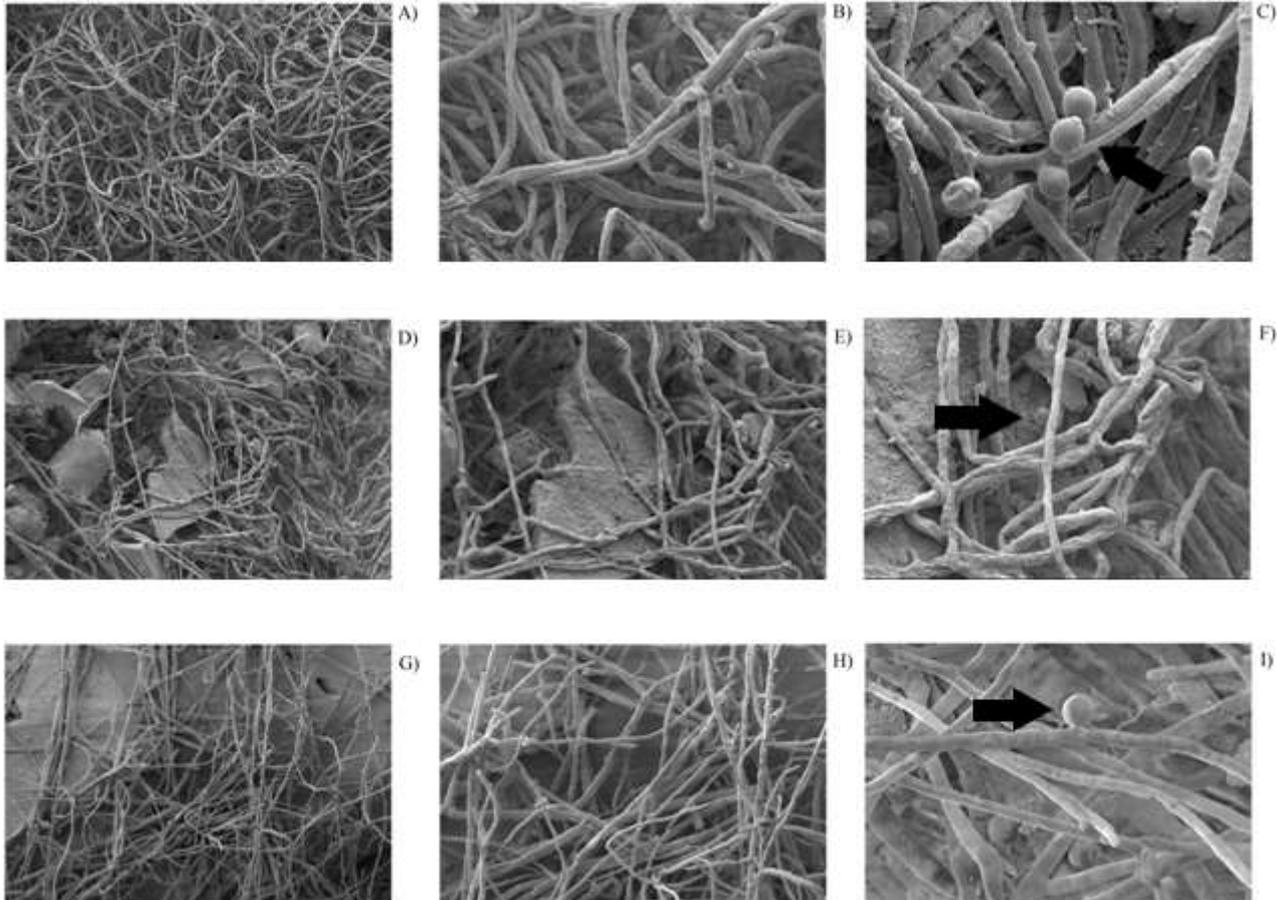
Fonte: Autores.

Segundo os resultados apresentados pela Tabela 1, o *Aspergillus terreus* apresentou um ótimo desempenho na produção de biomassa, sendo observado aumento progressivo na massa do fungo, resultando numa massa final de 1284.4 mg de biomassa. Quanto a velocidade de desenvolvimento da massa micelial fúngica, foi evidenciado uma ordem inversa, ou seja, um crescimento nas primeiras 48 h, e ocorrendo posteriormente uma diminuição progressiva na produção de biomassa, apresentando redução da capacidade de assimilação da fonte de fósforo na forma inorgânica e insolúvel. A Figura 1B confirma a eficiente capacidade de produção de biomassa frente a solubilização de fósforo, sendo verificado o início da estabilização de produção de biomassa a partir de 120 h do processo de biossolubilização.

A solubilização do fósforo se deu através de estratégias bioquímicas exercida pelo *A. terreus*, como na produção de ácidos orgânicos, corroborando diretamente na dissolução do fósforo insolúvel presente no minério de ferro. Tanto o pH como a fosfatase ácida contribuem como ótimos marcadores de eficácia na biossolubilização, uma vez que demonstram uma boa correlação. Devido a isso a solubilização de fósforo pelo fungo demonstrou ótima correlação quanto a diminuição do potencial hidrogeniônico como no aumento da atividade enzimática de fosfatase ácida, conforme é averiguado na Tabela 1. Segundo Godin (2013); Mendes et al. (2014); Li et al. (2016); Wei et al. (2018); Xiang et al. (2018), a liberação de fosfatase ácida está diretamente envolvida na produção de ácidos orgânicos, condição esta responsável pela redução do pH, e assim, este tipo de correlação demonstrada pela Figura 1C e 1D evidenciam exatamente o comportamento de redução do pH e de liberação de fosfatase ácida no meio, que seja pela liberação de prótons ou pela produção de ácidos orgânicos, é considerado com sendo o principal mecanismo empregado na solubilização do fósforo a partir do minério de ferro.

As imagens geradas pelo MEV, demonstradas na Figura 2, exibem as microfotografias da estrutura externa do *Aspergillus terreus*, contribuindo com as observações dos aspectos morfológicos e estruturais do micélio fúngico após o contato com o minério de ferro. As imagens referem-se aos períodos de tempo zero, 72 e 168 h do processo de solubilização do fósforo. As imagens obtidas exibem uma grande quantidade de estruturas filamentosas de tamanho variável, que se concentram juntas ao minério de ferro (Figuras 2A, 2D e 2G). Essas estruturas demonstraram grande interação com o minério de ferro, que em conjunto com a atividade enzimática, na forma de fosfatase ácida, se confirmou ótima capacidade de solubilizar o fósforo na forma inorgânica e insolúvel (Figuras 2B, 2E e 2H). As Figuras 2C, 2F e 2I, na etapa final da solubilização do fósforo, revelaram a presença de esporângios em desenvolvimento em meio aos filamentos, e assim, promovendo a fixação e perpetuação da espécie fúngica no meio, através da reprodução.

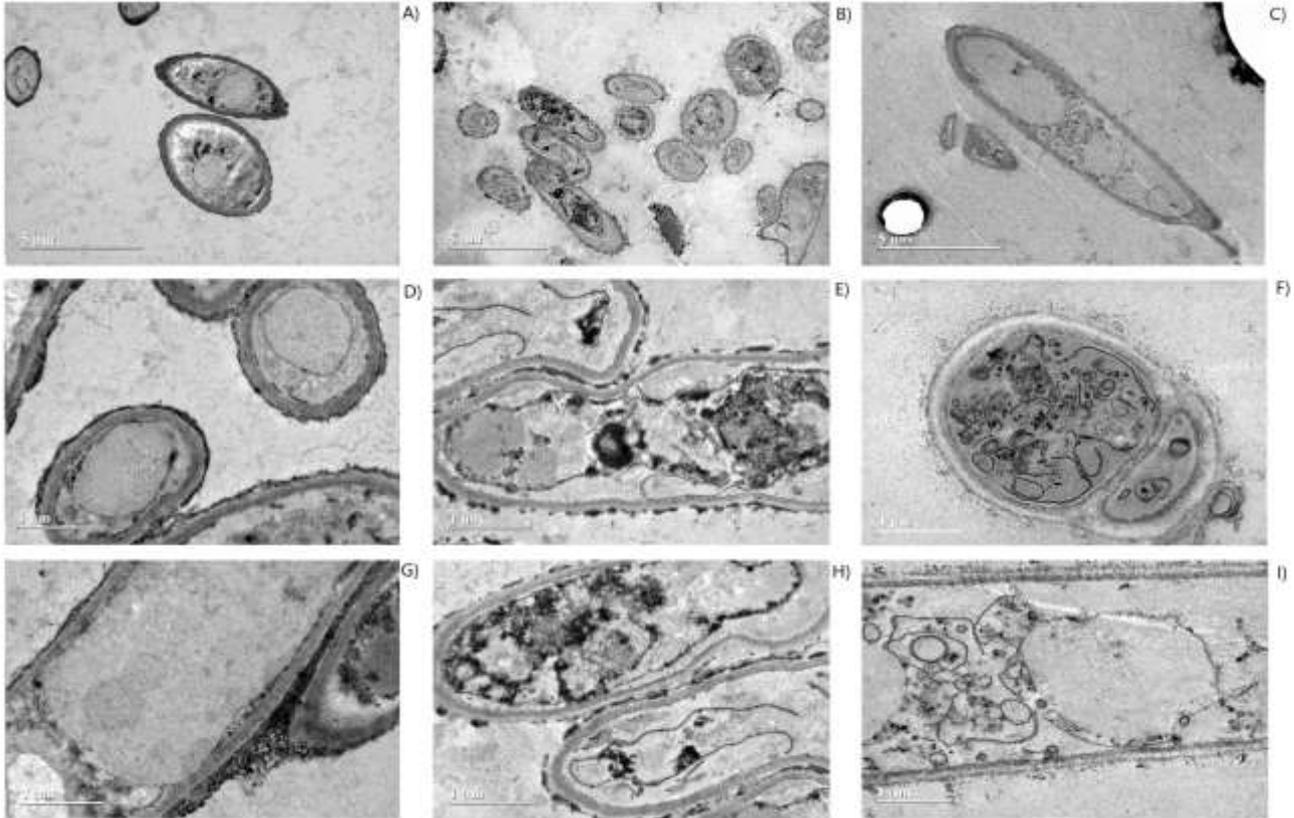
Figura 2: Imagens das observações morfológicas externas do fungo por MEV, representando a solubilização do fósforo no minério de ferro: A, B e C no tempo zero; D, E e F no tempo de 72 h; e G, H e I no tempo de 168 h. Imagens com resolução do fungo de (A) x500 e 50 μm , (B) x1000 e 10 μm , (C) x3500 e 5 μm , (D) x500 e 50 μm , (E) x1000 e 10 μm , (F) x2000 e 10 μm , (G) x500 e 50 μm , (H) x1000 e 10 μm , (I) x3500 e 5 μm .



Fonte: Autores

Com a finalidade de observar a morfologia e a dispersão das amostras fúngicas, e consequente averiguação da solubilidade e liberação de íons fósforo para a solução, foram obtidas as microfotografias da estrutura interna das células do *Aspergillus terreus*, através da microscopia eletrônica de transmissão (MET). As imagens obtidas pela MET, demonstradas na Figura 3A, B e C, indicam a presença de estruturas aparentemente “vazias”, globulares ou ovais, não apresentando estrutura interna aparente, que seja compatível com a presença de um sistema vacuolar bastante desenvolvido. A ausência dessas organelas contribui para a não realização da atividade de osmoregulação, do controle da composição citoplasmática e armazenamento intracelular de materiais pela biomassa fúngica, o que permite que o fósforo seja solubilizado no meio líquido em que se encontra.

Figura 3: Imagens das observações morfológicas internas do fungo por MET, representando a solubilização do fósforo no minério de ferro: A, B e C no tempo zero; D, E e F no tempo de 72 h; e G, H e I no tempo de 168 h. Imagens com resolução do fungo de (A) x1500 e 5 µm, (B) x1200 e 5 µm, (C) x1500 e 5 µm, e (D) x5000 e 1 µm, (E) x5000 e 1 µm, (F) x5000 e 1 µm, (G) x5000 e 1 µm, (H) x5000 e 1 µm, e (I) x5000 e 1 µm.



Fonte: Autores.

Na Figura 3D e G, demonstram a parede celular do fungo que é formada por diversas camadas, apresentando uma camada interna translúcida elétron densa, e isso se deve principalmente a constituição desta parede celular, que segundo a Bertolazzi et al. (2018), esta estrutura é geralmente formada por açúcares, proteínas, quitina e cinzas, com destaque para o β -1,3 glucanos que se encontram em grande quantidade nas extremidades das hifas. As imagens das Figuras 3E e H evidenciam um grande número de grânulos de polifosfatos, apresentados encapsulados em vesículas eletro densas, servindo como reservatório de fósforo, que segundo Kornberg et al. (1999), atua como uma fonte alternativa de ligações de alta energia e também como um tampão contra condições alcalinas e contra metais. Já as imagens 3F e I é perceptível o rompimento dos vacúolos e desorganização dos conteúdos celulares, além de também na fragmentação da parede celular, como na diminuição de sua espessura e organização, o que pode ser considerado um indicativo de degeneração celular. É sugestiva a interpretação que durante o processo de solubilização de fósforo ocorre uma intensa síntese que é promovida pela membrana plasmática, ou seja, um aumento progressivo da síntese e volume citoplasmático, e uma hipertrofia e movimento dos vacúolos, com uma intensa ativação geral de metabolismo, como exemplo, exercida pela atividade enzimática de fosfatase ácida.

4. Conclusão

Em conformidade com as informações deste estudo, a solubilização do fósforo pelo *Aspergillus terreus*, ou seja, proveniente do minério de ferro, obtido na mineradora de Catalão, resultou numa eficiente solubilização do fósforo inorgânico

e insolúvel, demonstrando ser uma tecnologia promissora e sugestiva em sua aplicação, constituindo como alternativa para reduzir custos de produção e estabelecer uma condição de sustentabilidade do sistema de mineração, contribuindo numa melhor qualidade do minério de ferro e numa provável utilização do fósforo solúvel, como por exemplo, na produção de fertilizantes fosfatados. É sugestível que para futuros estudos seja observado a viabilização da extração do fósforo solubilizado, como exemplo, o uso de microalgas, para uma possível produção de fertilizantes fosfatados.

Referências

- Bertolazi, A. A., da Silva Folli-Pereira, M., Caione G., Passamani, L. Z., Colodete, C. M., de Souza, S. B., Ramos, A. C., Rasool, N., Júnior, G. F. S., & Schoninger, E. L. (2018). Linking Plant Nutritional Status to Plant-AMF Interactions. *Microorganisms for Sustainability*, Chapter 16, 351-384. https://doi.org/10.1007/978-981-10-5514-0_16
- Cai, X., Qian, G., Zhang, B., Chen, Q., & Hu, C. (2018). Selective Liberation of High-Phosphorous Oolitic Hematite Assisted by Microwave Processing and Acid Leaching. *Minerals*, (8): 1-13. <https://doi.org/10.3390/min8060245>
- Cao, Y., Zhang, Y., & Sun, T. (2018). Dephosphorization Behavior of High-Phosphorus Oolitic Hematite-Solid Waste Containing Carbon Briquettes during the Process of Direct Reduction-Magnetic Separation. *Metals*, (8): 1-11. <https://doi.org/10.3390/met8110897>
- Chime, T. O., Menkiti, M. C., & Onukwuli, O. D. (2011). Biodephosphorization of iron ore using *Acidithiobacillus ferrooxidans*. *NY Sci J*, (1): 1-6. <https://doi.org/10.7537/3979ny0401>
- Delvasto, P., Valverde, A., Ballester, A., Munoz, J. A., González, F., Blazquez, M. L., Igual, J. M., & García-Balboa, C. (2008). Diversity and activity of phosphate bioleaching bacteria from a high-phosphorus iron ore. *Hydrometallurgy*, (3): 124-129. <https://doi.org/10.1016/j.hydromet.2008.02.007>
- Ghosh, R., Barman, S., Mukherjee, R., & Mandal, N. C. (2016). Role of phosphate solubilizing *Burkholderia spp.* for successful colonization and growth promotion of *Lycopodium cernuum L.* (*Lycopodiaceae*) in lateritic belt of Birbhum district of West Bengal, India. *Microbiol Res*, (183): 80-91. <https://doi.org/10.1016/j.micres.2015.11.011>
- Godin, A. M. (2013). Soil nutrient status and fungal community structure of high and low phosphatase microsites in a mixed Douglas-fir paper birch stand (T). University of British Columbia. Retrieved from <https://open.library.ubc.ca/collections/ubctheses/24/items/1.0165655>
- Guo, L., Gao, J., Zhong, Y., Gao, H., & Guo, Z. (2015). Phosphorus removal of high phosphorous oolitic iron ore with acid-leaching fluidized-reduction and melt-separation process. *ISIJ International*, (9): 1806-1815. <https://doi.org/10.2355/isijinternational.ISIJINT-2015-135>
- He, C. C., Hu, C. Y., & Lo, S. L. (2018). Integrating chloride addition and ultrasonic processing with electrocoagulation to remove passivation layers and enhance phosphate removal. *Sep Purif Technol*, (201): 148-155. <https://doi.org/10.1016/j.seppur.2018.03.011>
- IAL - Instituto Adolfo Lutz (2008). Normas Analíticas do Instituto Adolfo Lutz. v. 1: Métodos químicos e físicos para análise de alimentos, 4ª edição, 1ª edição digital, São Paulo: IMESP, p. 1020.
- Jain, R., Saxena, J., & Sharma, V. (2017). The ability of two fungi to dissolve hardly soluble phosphates in solution. *Mycology*, (2): 104-110. <https://doi.org/10.1080/21501203.2017.1314389>
- Kim, B. J., Cho, K. H., Lee, S. G., Park, C. Y., Choi, N. C., & Lee, S. (2018). Effective Gold Recovery from Near-Surface Oxide Zone Using Reductive Microwave Roasting and Magnetic Separation. *Metals*, (8): 1-11. <https://doi.org/10.3390/met8110957>
- Kornberg, A., Rao, N. N., & Ault-Riché, D. (1999). Inorganic Polyphosphate: A Molecule of Many Functions. *Annual Review of Biochemistry*, (23): 1-18. <https://doi.org/10.1146/annurev.biochem.68.1.89>
- Li, X., Luo, L., Yang, J., & Li, B. (2015). Mechanisms for solubilization of various insoluble phosphates and activation of immobilized phosphates in different soils by an efficient and salinity-tolerant *Aspergillus niger* strain An2. *Appl Biochem Biotechnol*, (5): 2755-2768. <https://doi.org/10.1007/s12010-014-1465-2>
- Li, Z., Bai, T., Dai, L., Wang, F., Tao, J., Meng, S., Hu, Y., Wang, S., & Hu, S. (2016). A study of organic acid production in contrasts between two phosphate solubilizing fungi: *Penicillium oxalicum* and *Aspergillus niger*. *Sci Rep*, (1): 1-8. <https://doi.org/10.1038/srep25313>
- Liu, Z., Li, Y. C., Zhang, S., Fu, Y., & Fan, X. (2015). Characterization of phosphate-solubilizing bacteria isolated from calcareous soils. *Appl Soil Ecol*, (96): 217-224. <https://doi.org/10.1016/j.apsoil.2015.08.003>
- Mendes, G. O., Zafra, D. L., Vassilev, N. B., Silva, I. R., Jr Ribeiro, J. I., & Costa, M. D. (2014). Biochar enhances *Aspergillus Niger* rock phosphate solubilization by increasing organic acid production and alleviating fluorid toxicity. *Microb Biotechnol*, (10): 3081-3085. <https://doi.org/10.1128/AEM.00241-14>
- Nautyal, C. S. (1999). An efficient microbiological growth médium for screening phosphate solubilizing micro-organisms. *FEMS Microbiol Lett*, (1): 265-270. <https://doi.org/10.1111/j.1574-6968.1999.tb13383.x>
- Ofoegbu, S. U. (2019). Characterization studies on Agbaja iron ore: a high-phosphorus content ore. *SN Appl Sci*, (1): 1-11. <https://doi.org/10.1007/s42452-019-0218-9>
- Paul, D., & Sinha, S. N. (2016). Isolation and characterization of phosphate solubilizing bacterium *Pseudomonas aeruginosa* KUPSB12 with antibacterial potential river Ganga, India. *Ann of Agrar Sci*, (1): 130-136. <https://doi.org/10.1016/j.aasci.2016.10.001>

- Pereira, A. C., & Papini, R. M. (2015). Processes for phosphorus removal from iron ore – a review. *REM: Rev Esc Minas*, (3): 331-335. <http://dx.doi.org/10.1590/0370-44672014680202>
- Rachappa, S., Prakash, Y., & Amit (2015). Iron ore recovery from low grade by using advance methods. *Proc Earth Planet Sci*, (11): 195-197. <https://doi.org/10.1016/j.proeps.2015.06.024>
- Rath, S. S., Rao, D. S., Tripathy, A., & Biswal, S. K. (2018). Biomass briquette as an alternative reductant for low grade iron ore resources. *Biomass and Bioenergy*, (108): 447-454. <https://doi.org/10.1016/j.biombioe.2017.10.045>
- Solanki, M., Kumbu, B. S., & Nehra, K. (2018). Molecular diversity of phosphate solubilizing bacteria isolated from the rhizosphere of chickpea, mustard and wheat. *Ann Agrar Sci*, (4): 458-563. <https://doi.org/10.1016/j.aasci.2018.05.007>
- Tahir, M., Khalid, U., Ijaz, M., Shah, G. M., Naeem, M. A., Shahid, M., Mahmood, K., Ahmad, N., & Kareem, F. (2018). Combined application of bio-organic phosphate and phosphorus solubilizing bacteria (*Bacillus* strain MWT 14) improve the performance of bread wheat with low fertilizer input under an arid climate. *Braz J Microbiol*, (1): 15-24. <https://doi.org/10.1016/j.bjm.2017.11.005>
- Taylor, D. J. C., Page, D. C., & Geldenhuys, P. (1988). Iron and steel in South Africa. *J. S. Afr. Inst. Min. Metall.*, (3): 73-95. https://hdl.handle.net/10520/AJA0038223X_1819
- Tudu, K., Kumar, S., & Mandre, N. (2018). Enhanced recovery of low-grade iron ore by selective flocculation method. *J Disper Sci Technol*, (8): 1075-1079. <https://doi.org/10.1080/01932691.2017.1382371>
- Verma, S. C., Ladha, J. K., & Tripathi, A. K. (2001). Evaluation of plant growth promoting and colonization ability of endophytic diazotrophs from deep water Rice. *J Biotechnol* (91): 127-141. [https://doi.org/10.1016/S0168-1656\(01\)00333-9](https://doi.org/10.1016/S0168-1656(01)00333-9)
- Wei, Y., Zhao, Y., Shi, M., Cao, Z., Lu, Q., Yang, T., Fan, Y., & Wei, Z. (2018). Effect of organic acids production and bacterial community on the possible mechanism of phosphorus solubilization during composting with enriched phosphate-solubilizing bacteria inoculation. *Bioresour Technol*, (247): 190-199. <https://doi.org/10.1016/j.biortech.2017.09.092>
- Xiang, X. Y., Xia, W. T., Yuan, X. L., Yin, J. G., & An, J. (2018). Removal of Phosphorus from High Phosphorus Iron Ores in Wushan Mountain by Crosscurrent Acid Leaching. *Solid State Phenomena*, (279): 222-229. <https://doi.org/10.4028/www.scientific.net/SSP.279.222>
- Xiao, C., Wu, X., & Chi, R. (2015). Dephosphorization of high-phosphorus iron ore using different sources of *Aspergillus niger* strains. *Appl Biochem Biotechnol*, (176): 518-528. <https://doi.org/10.1007/s12010-015-1592-4>
- Yang, B., Huang, P., Shaoxian, S., Luo, H., & Zhang, Y. (2018). Hydrophobic agglomeration of apatite fines induced by sodium oleate in aqueous solutions. *Results in Physics*, (9): 970-977. <https://doi.org/10.1016/j.rinp.2018.03.049>
- Zhang, H., Zhang, Z., Luo, L., & Yu, H. (2019). Behavior of Fe and P during reduction magnetic roasting-separation of phosphorus-rich oolitic hematite. *Energy Sources, Part A: Recovery, utilization, and Environmental Effects*, (41): 47-64. <https://doi.org/10.1080/15567036.2018.1496195>
- Zhang, L., Machiela, R., Das, P., Zhang, M., & Eisele, T. (2019). Dephosphorization of unroasted oolitic ores through alkaline leaching at low temperature. *Hidrometallurgy*, (184): 95-102. <https://doi.org/10.1016/j.hydromet.2018.12.023>
- Zhang, Y., Xue, Q., Wang, G., & Wang, J. (2018). The Effect of Temperature and Additive on Transport and Transformation of P of High-Phosphorus Iron Ore During Carbothermic Reduction. In: Hwang JY. et al. (eds) 9th International Symposium on High-Temperature Metallurgical Processing. TMS 2018. *The Minerals, Metals & Materials Series*, 855-868. https://doi.org/10.1007/978-3-319-72138-5_82
- Zhao, Y., Sun, T., Zhao, H., Li, X., & Wang, X. (2018). Effects of CaCO₃ as Additive on Coal-based Reduction of High-phosphorus Oolitic Hematite Ore. *ISIJ International* (58): 1768–1774. <https://doi.org/10.2355/isijinternational.ISIJINT-2018-186>
- Zhao, J., Chen, Z., Zuo, H., Wang, J., & Xue, Q. (2018). Research on Reaction Mechanism of Vacuum Carbon Thermal Reduction and Dephosphorization in High Phosphate Iron Ore. *Metals*, (12): 1-17. <https://doi.org/10.3390/met8121003>