



DESLAMAGEM E FLOTO-ELUTRIAÇÃO DE REJEITOS FINOS DE CARVÃO

SILVEIRA, J.R.M¹, AMARAL FILHO, J.R.² RUBIO, J.¹

¹Universidade Federal do Rio Grande do Sul (UFRGS), Departamento de Engenharia de Minas, Laboratório de Tecnologia Mineral e Ambiental. e-mail: jeanrmsilveira@gmail.com; jrubio@ufrgs.br

²University of Cape Town, Department of Chemical Engineering, CeBER. e-mail: juarez.amaralfilho@uct.ac

RESUMO

O carvão ROM brasileiro apresenta elevados teores de cinzas e de enxofre precisa ser beneficiado para atender aos padrões de queima das termelétricas nacionais. Após as operações de beneficiamento, parte do material energético é recuperado e, dependendo da eficiência do processo, até 65% da massa da alimentação é disposta como rejeito em bacias ou barragens de rejeitos. O objetivo deste trabalho foi verificar a possibilidade de recuperação do material combustível em rejeitos finos de carvão (camadas Barro Branco e Bonito) em etapas de classificação granulométrica (deslamagem) e floto-elutriação, com e sem a injeção de microbolhas, em escala de bancada. A melhor combinação de processos foi deslamagem em frações menores que 250 micrometros, injeção de microbolhas por despressurização de ar saturado em água (4 bar) e floto-elutriação, com óleo de pinho (600 g.ton⁻¹) e óleo Diesel (1500 g.ton⁻¹), operando com uma velocidade superficial 0.84 cm.s⁻¹ e uma velocidade do ar de 0,17 cm.s⁻¹. Os melhores resultados mostraram que é possível obter concentrados com características dentro dos padrões de queima da termelétrica Jorge Lacerda, com uma recuperação mássica de 38% da matéria carbonosa, com um teor de cinzas de 38% e um teor de enxofre total de 1,5%.

PALAVRAS-CHAVE: Deslamagem Floto-elutriação, Bolhas intermediárias, Rejeitos de carvão.

ABSTRACT

The Brazilian ROM has high levels of ash and sulfur and must be washed-up to meet the standards of burning of the national thermoelectric plants. After processing, part of the energy material is recovered and, depending on process efficiency, up to 65% of the feed mass is disposed as tailings in tailings ponds or tailings dams. The objective of this work was to verify the possibility of recovering the energetic material in fine coal tailings (Barro Branco and Bonito layers) by a combination of sizing (desliming) and floto-elutriation stages, with and without microbubble injection, at bench scale. The best alternative was feed desliming in <250 microns, microbubble injection by water-saturated air (4 bar) and floto-elutriation, with pine oil (600 g.ton⁻¹) and diesel oil (1500 g.ton⁻¹), operating at a superficial velocity of 0.84 cm.s⁻¹ and an air flow velocity of 0.17 cm.s⁻¹. The best results showed concentrates with characteristics within the burning patterns of the Jorge Lacerda thermoelectric plant, with a mass recovery of 38% of the carbonaceous matter, with an ash content of 38% and a total sulfur content of 1,5 %.

KEY WORDS: Desliming, floto-elutriation, microbubbles, coal waste

1. INTRODUÇÃO

O carvão run-of-mine (ROM) brasileiro apresenta elevados teores de cinzas e de enxofre, sendo necessário o seu beneficiamento, para atender aos padrões de queima das termelétricas nacionais (Kalkreuth et al., 2010; Mohanty et al., 2002; Amaral Filho, 2013). Uma típica planta de beneficiamento de carvão ROM na região carbonífera de Santa Catarina geralmente é dividida em três diferentes circuitos, os quais são separados de acordo com o tamanho de partícula, conforme descrito a seguir:

- o circuito de concentração de grossos o qual é geralmente composto por jigagem ou meio denso;
- o circuito de beneficiamento de finos onde são utilizados espirais ou mesas concentradoras;
- e o circuito de beneficiamento de ultrafinos utilizando flotação.

Os rejeitos do circuito de grossos são enviados para o módulo de rejeitos e os rejeitos provenientes dos circuitos finos e ultrafinos são encaminhados para lagoas de decantação onde o material é previamente desaguado e posteriormente encaminhado para o módulo de rejeitos ocupando espaço e causando os já tão conhecidos impactos ambientais (Silva et al., 2010; Weiler et al., 2016).

Ainda que estas operações unitárias de concentração mineral tenham como objetivo a diminuição do teor de cinzas e de enxofre do produto final, é comum haver perdas de material energético durante o beneficiamento (Rubio, 1988). De acordo com Amaral Filho (2014), o material fino depositado nos módulos de rejeito da região ainda possui uma considerável quantidade de carvão energético. A floto-elutriação (técnica que combina princípios da flotação e da elutriação), com ou sem a adição de bolhas, surge como uma alternativa ao processamento de rejeitos finos de carvão mineral, porque gera uma perda menor de material do que os separadores gravimétricos comuns como o hidrociclone e as espirais (Mankosa et al, 2003). Conforme Paiva e Rubio (2015), esta gera uma melhor dispersão de partículas grossas do que em células de flotação convencionais além de proporcionar uma melhor recuperação de finos.

O Hydrofloat[®], é um separador de leito fluidizado que opera com menor turbulência do que as células convencionais o que leva a formação de condições hidrodinâmicas mais favoráveis para o beneficiamento de partículas maiores que 250 micrometros (Galvin et al. 2014; Fosu et al. 2015). A floto-elutriação, opera com a injeção contínua de ar comprimido para favorecer as condições de fluxo não turbulentas e um processo de flotação com a máxima seletividade, além disso atua, no contato em contracorrente polpa/bolhas formando um leito fluidizado com elevado teor de sólidos onde ocorre a colisão e adesão de múltiplas bolhas, reduzindo a densidade aparente das partículas grossas. O transbordo do elutriado aumenta a recuperação desses agregados formados (Kohmuench et al 2006).

O uso de novas alternativas para o reaproveitamento de rejeitos, principalmente os provenientes da Camada Barro Branco, seria uma opção no auxílio de reabilitação de áreas degradadas e melhor reaproveitamento do material, uma vez que essa camada está se exaurindo (Sampaio et al, 2011; Gomes et al, 1998).

O objetivo deste trabalho foi estudar a recuperação de material combustível em rejeitos finos de carvão (oriundos de espirais separadoras) através do processo de FE, visando agregar valor econômico a uma fração material descartada sem valor agregado.

2. MATERIAIS E MÉTODOS

As amostras foram caracterizadas, quanto à densidade, teor de cinzas e de enxofre total. No intuito de recuperar um material com reduzido teor de cinzas e enxofre, testes de floto-elutriação, Figura 1, com e sem a injeção de bolhas intermediárias (BI's) foram realizados conforme descrito por Paiva e Rubio (2015).

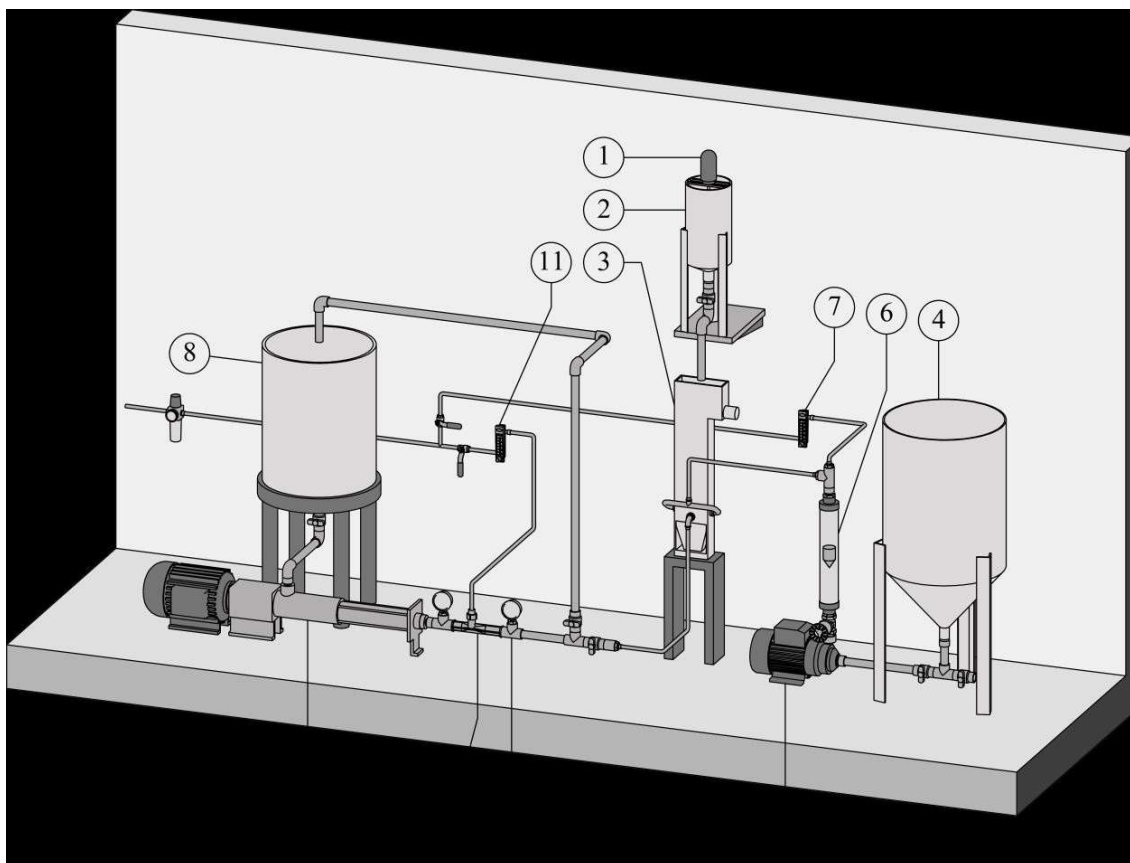


Figura 1 - Esquema ilustrativo do equipamento . Floto-elutriador (Hydrofloat) com sistema de injeção de bolhas. 1. Agitador mecânico; 2. Tanque de condicionamento da polpa; 3. Floto-elutriador (Hydrofloat); 4. Tanque de água de elutriação; 5. Bomba centrífuga; 6. Rotâmetro de água; 7. Rotâmetro de ar; 8. Tanque de solução para geração de bolhas intermediárias (BI); 9. Bomba peristáltica; 10. Tubo venturi; 11. Rotâmetro de ar; 12. Manômetro de verificação de perda de carga.

As polpas de alimentação foram preparadas em um tanque de fundo cônico com 15 cm de diâmetro sob agitação (1050 rpm) com 25% de sólidos e pH 10, ajustado com uma solução 20% de silicato de sódio. Óleo diesel e óleo de pinho foram utilizados como coletor e espumante respectivamente. Os regentes foram definidos com base nas condições operacionais utilizadas nas plantas de beneficiamento da região. Óleo de pinho foi utilizado como espumante na concentração de 600 g.ton⁻¹ e tempo de condicionamento de 2 minutos. Como coletor foi utilizada uma emulsão de 5% de óleo diesel(preparada com a mistura entre água deionizada e o óleo diesel sob agitação de 20000 rpm por 30 minutos) na concentração de 1500 g.ton⁻¹ com tempo de condicionamento de 3 minutos. A água de elutriação utilizada nos testes teve seu pH ajustado para 10 com a solução de 20% de silicato de sódio, e óleo de pinho (100 ppm) foi adicionado para diminuir a tensão superficial

melhorando a interação bolha/partícula. Após o condicionamento, a polpa foi alimentada, por gravidade ao Hydrofloat®. A floto-elutriação ocorreu com uma velocidade superficial de 0.84 cm.s⁻¹ e a velocidade do ar de 0,17 cm.s⁻¹.

As injeções de bolhas intermediárias como auxiliares da flotação foram realizadas nos tempos 0, 3, 5 e 7,5 minutos do ensaio. As bolhas intermediárias foram geradas através do bombeamento de água a pH 10 por uma bomba através de um venturi com 1 mm de diâmetro, que gerava uma perda de carga de 4 atm. Neste venturi era injetado ar comprimido a uma vazão de 500 ml.min⁻¹.

Os testes tiveram duração de 10 minutos cada e ao final desse tempo foram coletados os concentrados e os rejeitos de carvão. Esses produtos foram filtrados em um filtro à vácuo e logo após levados a estufa a 50 °C durante 24 horas, para a secagem. Após secos os produtos foram raspados dos papéis filtros, homogeneizados e quarteados para que se fizessem os testes de teor de cinzas e de enxofre total. Ainda para fins de comparação foram avaliadas a recuperação de matéria carbonosa, a recuperação de cinzas e de enxofre dos concentrados, calculados pelas equações abaixo (Yaşar *et al*, 2018):

Recuperação de matéria carbonosa:

$$CR(\%) = \frac{\left(\frac{M_c}{M_a}\right) \times (100 - C_{zc})}{(100 - C_{za})} \times 100 \quad (1)$$

Rejeição de Cinzas:

$$AR(\%) = \frac{1 - [(M_c) \times (C_{zc})]}{M_a \times C_{za}} \times 100 \quad (2)$$

Rejeição de Enxofre:

$$SR(\%) = \frac{1 - [(M_c) \times (S_c)]}{(M_a) \times (S_a)} \times 100 \quad (3)$$

onde M_C: massa do concentrado, M_A: massa da alimentação, C_{zc}: teor de cinzas do concentrado, C_{za}: teor de cinzas da alimentação, S_c: teor de enxofre do concentrado, S_a: teor de enxofre da alimentação.

3. RESULTADOS E DISCUSSÃO

De acordo com Paiva e Rubio (2016), as partículas ultrafinas influenciam negativamente no processo de floto-elutriação, portanto ensaios de deslamagem foram realizados nos produtos que alimentaram o Hydrofloat®.

A caracterização da alimentação da floto- elutriação é apresentada na Tabela 1 abaixo.

Tabela 1. Caracterização do material obtido após as etapas de deslamagem (remoção das partículas menores que 250 micrometros) realizadas na Camada Barro Branco e Camada Bonito.

Alimentação	Camada Barro Branco	Camada Bonito
Teor de cinzas (%)	61	70
Teor de enxofre (%)	2,5	4,8

Os produtos obtidos com a floto-elutriação, assistida ou não com bolhas intermediárias, nas camadas Barro Branco e Bonito são apresentados na Tabela 2.

Tabela 2. Teores de cinza e enxofre da alimentação do HF e dos produtos da floto-elutriação sem BI's e com BI's para as Camada Barro Branco e Camada Bonito. Condições: óleo de pinho (polpa) = 100 ppm; óleo de pinho (água de elutriação) = 100 ppm; óleo diesel emulsionado 5% = 1500 g.ton⁻¹; vazão de ar = 500 ml.min⁻¹;

vazão de água = 2.5 L.min⁻¹; tempo de condicionamento = 5 min; tempo de elutriação = 10 min. Once: Cz alim: teore de cinzas na alimentação; Cz fl: tero de cinzas do concentrado/floto-elutriado; Cz af; teor de cinzas do rejeito/sedimento; S alim: teor de enxofre da alimentação; S alim: teor de enxofre da alimentação; S af: teor de enxofre do rejeito/sedimento e S fl: teor de enxofre do concentrado/floto-elutriado.

Teste		Rec. mássica (%)	Cz alim (%)	Cz af (%)	Cz fl. (%)	S alim (%)	S af (%)	S fl (%)
Camada	Sem BI's	27	61	70	38	2,5	2,8	1,9
Barro	Com BI's	38	61	75	38	2,5	2,4	1,5
Branco								
Camada	Sem BI's	47	70	71	68	4.8	4.8	4,4
Bonito	Com BI's	33	70	71	67	4.8	4.9	3,7

Os resultados para a Camada Barro Branco demonstram que houveram os melhores resultados onde foi utilizada deslamagem seguida de floto-elutriação com auxílio de BI's, que gerou um concentrado com 38% de recuperação em massa, 38% de teor de cinzas e 1,5% de enxofre total, atingindo os parâmetros de combustão da termelétrica Jorge Lacerda, que opera com carvões que apresentem até 43% de cinzas e 2,3% de enxofre (Sampaio, 2011). Quando comparadas as recuperações mássicas nos testes com e sem adição de bolhas intermediárias na Camada Barro Branco, nota-se que houve um aumento desta no caso onde houve a presença de BI's.

Os resultados para a Camada Bonito demonstram que os melhor resultado foi obtido onde foi utilizada deslamagem seguida de floto-elutriação com auxílio de BI's, que gerou um concentrado com 33% de recuperação em massa e 67% de teor de cinzas e 3,7% de enxofre total. A Tabela 2, mostra que para os rejeitos de carvão da Camada Bonito o mesmo comportamento é observado, ou seja, há um aumento de recuperação mássica com a adição de BI's.

A Tabela 3 mostra que a floto-elutriação com bolhas intermediárias apresentou recuperação de matéria carbonosa de 60% para a Camada Barro Branco. Essa condição também mostrou elevadas rejeições de cinzas e de enxofre de 70% e 76%, o que leva a um produto final conforme apresentado na Tabela 2 com características que o tornariam aceitável pela indústria, para a blendagem com carvões de melhor qualidade ou até mesmo queima direta.

Isto ocorre, segundo Paiva e Rubio (2016) porque, no caso das frações finas, o arraste hidráulico na floto-elutriação permitiu uma boa recuperação, mas não nas frações intermediárias, principalmente devido ao baixo holdup de ar nessa célula (da ordem de 3,2 ±0,9 % volume ar/líquido). Em função disso, com a adição extra de óleo de pinho ocorre um aumento do holdup de ar, por causa da menor tensão superficial água/ar e uma recuperação seletiva para partículas portadoras de matéria carbonosa.

Tabela 3. Recuperação de matéria carbonosa e rejeição de cinzas e de enxofre dos concentrados de floto-elutriação da Camada Barro Branco e Camada Bonito.

Teste	Microbolhas ou bolhas intermediárias	Recuperação de material carbonosa (%)	Rejeição de cinzas (%)	Rejeição de enxofre(%)
Camada Barro	Sem BI's	43	83	80

Branco	Com BI's	60	70	76
Camada	Sem BI's	28	55	53
Bonito	Com BI's	46	68	67

De acordo com os dados da Tabela 3, o material proveniente da Camada Bonito mostrou a maior recuperação de matéria carbonosa de 46%, assim como as maiores rejeições de cinzas e de enxofre 68% e 67% para os testes realizados com BI's. Esses resultados para ambas as camadas mostra que a deslamagem seguida de floto-elutriação causa o arraste de partículas finas que são as frações mais ricas em enxofre e cinzas.

Em relação à recuperação de enxofre, foi observado que nos testes sem BI's 80% do enxofre da alimentação permaneceu no sedimento, enquanto que os testes com a injeção de BI's 70% do enxofre da alimentação permaneceu no sedimento. O que indica que com a injeção de bolhas, parte do enxofre e das cinzas são deslocados para o produto, devido ao arraste de partículas com média a alta densidade (Bu *et al*, 2017; Ni *et al*, 2015).

4. CONCLUSÕES

Os resultados gerais dos estudos realizados permitiram estabelecer as seguintes conclusões:

1. Foi desenvolvido um procedimento de estudos combinando deslamagem de frações ultrafinas (250 micrômetros) e floto-elutriação, em escala laboratorial.
2. A deslamagem permitiu diminuir as frações finas e ultrafinas que oneram o processo de floto-elutriação;
3. As recuperações mássicas e metalúrgicas das frações maiores foram elevadas, devido ao transporte de massa via adesão bolhas/partículas, assistida pela ação de elutriação do maior fluxo ascendente de água e pelo tamanho maior das bolhas;
4. Houve um grau de arraste de partículas que dependeu da distribuição de tamanhos e densidade das partículas minerais.
5. A floto-elutriação é uma técnica que deve ser adaptada para cada mineral e, de forma geral opera com uma menor taxa superficial de bolhas, com bolhas maiores e, portanto com uma menor eficiência de captura de partículas. Neste estudo. especial, adição de um tensoativo para diminuir o tamanho das bolhas, permitiu aumentar o "hold up" de ar aumentando a recuperação de partículas finas e grossas portadoras de matéria carbonosa (hidrofóbicas).

5. AGRADECIMENTOS

Os autores agradecem aos órgãos de pesquisa CNPq e CAPES pelo aporte financeiro, a UFRGS e as Carboníferas Criciúma e Metropolitana.

6. REFERÊNCIAS

Amaral Filho, Juarez Ramos do. Aproveitamento de rejeitos de carvão em Santa Catarina, Brasil. 2014. 150f. Tese (Doutorado em Tecnologia Mineral e Ambiental) – Escola de Engenharia, Universidade Federal do Rio Grande do Sul, Porto Alegre.

Bu, X., Ni, C., Xie, G., Peng, Y., Ge, L., Sha, J., 2017. Preliminary study on foreign slime for the gravity separation of coarse coal particles in a teeter bed separator. *International Journal of Mineral Processing* 160, 76–80. <https://doi.org/10.1016/j.minpro.2017.01.009>

Fosu, S., Awatey, B., Skinner, W., Zanin, M., 2015. Flotation of coarse composite particles in mechanical cell vs. the fluidised-bed separator (The HydroFloat™). *Minerals Engineering* 77, 137–149. <https://doi.org/10.1016/j.mineng.2015.03.011>

Galvin, K.P., Harvey, N.G., Dickinson, J.E., 2014. Fluidized bed desliming in fine particle flotation – Part III flotation of difficult to clean coal. *Minerals Engineering* 66–68, 94–101. <https://doi.org/10.1016/j.mineng.2014.02.008>

Gomes, Aramis Pereira et al . Carvão fóssil. *Estud. av.*, São Paulo , v. 12, n. 33, p. 89-106, Aug. 1998 . <http://www.scielo.br/scielo.php?script=sci_arttext&pid=S0103-40141998000200006&Ing=en&nrm=iso>. access on 13 Feb. 2019. <http://dx.doi.org/10.1590/S0103-40141998000200006>.

Kalkreuth, W. Holzm M.; Mexias, A.; Balbinot, M.; Lewandowski, J., Willet, J., Finkelman, R., Burger, H. 2010. Depositional setting, petrology and chemistry of Permian coals from the Paraná Basin: 2. South Santa Catarina Coalfield, Brazil. *International Journal of Coal Geology*, 84: p.213-236.

Kohmuench, J.N., Mankosa, M.J., Honaker, R.Q., Bratton, R.C., 2006. Applications of the CrossFlow teeter-bed separator in the U.S. coal industry. *Mining, Metallurgy & Exploration* 23, 187–195. <https://doi.org/10.1007/BF03403346>

Mankosa, Michael J., Kohmuench, Jaelsen M., Strathdee, Graeme., Lutrell, Gerald H. *Advances in Gravity Concentration*. 1a ed. Littleton: SME; 2003. Section 3, Applications of the Hydrofloat air-assisted gravity separator, pg.165-179.

Mohanty, M., Palit, A., Dube, B., 2002. A comparative evaluation of new fine particle size separation technologies. *Minerals Engineering* 15, 727–736. [https://doi.org/10.1016/S0892-6875\(02\)00169-3](https://doi.org/10.1016/S0892-6875(02)00169-3)

Ni, C., Xie, G., Jin, M., Peng, Y., Xia, W., 2016. The difference in flotation kinetics of various size fractions of bituminous coal between rougher and cleaner flotation processes. *Powder Technology*, 292, 210–216. doi:10.1016/j.powtec.2016.02.004

Paiva, M., Rubio, J., 2016. Factors affecting the floto-elutriation process efficiency of a copper sulfide mineral. *Minerals Engineering* 86, 59–65. <https://doi.org/10.1016/j.mineng.2015.11.012>

Rubio, Jorge. *Carvão Mineral: Caracterização e Beneficiamento*. 1ed. Porto Alegre: Nova Linha, 1988. v.1.

Sampaio, C.H., Feil, N.F., 2011. A influência da frequência de jigagem no desempenho do beneficiamento de carvão da camada bonito – Santa Catarina, Brasil. In: III Congresso de Carvão Mineral; 2011 Aug 21-24; Gramado, RS.

Silva, R. de A., Castro, C.D., Vigânico, E.M., Petter, C.O., Schneider, I.A.H., 2012. Selective precipitation/UV production of magnetite particles obtained from the iron recovered from acid mine drainage. *Minerals Engineering* 29, 22–27. <https://doi.org/10.1016/j.mineng.2011.12.013>

Yaşar, Ö., Uslu, T., Şahinoğlu, E., 2018. Fine coal recovery from washery tailings in Turkey by oil agglomeration. *Powder Technology* 327, 29–42. <https://doi.org/10.1016/j.powtec.2017.12.042>

Weiler, J., Filho, J.R.A., Schneider, I.A.H., 2016. Coal waste processing to reduce costs related to acid mine drainage treatment - Case study in the Carboniferous District of Santa Catarina State. *Engenharia Sanitaria e Ambiental* 21. <https://doi.org/10.1590/S1413-41522016116411>

