



**UNIVERSIDADE FEDERAL DO PARÁ  
INSTITUTO DE GEOCIÊNCIAS  
PROGRAMA DE PÓS-GRADUAÇÃO EM GEOLOGIA E GEOQUÍMICA**

---

**TESE Nº 158**

**RESÍDUO MINERAL A PARTIR DE BIOMASSAS  
AMAZÔNICAS COMO UMA FONTE ALTERNATIVA DE  
NUTRIENTES PARA A AGRICULTURA**

**Tese apresentada por:**

**ALAN RODRIGO LEAL DE ALBUQUERQUE**

**Orientadora: Prof<sup>a</sup>. Dr.<sup>a</sup> Simone Patrícia Aranha da Paz (UFPA)**

**Coorientador: Prof. Dr. Rômulo Simões Angélica (UFPA)**

---

**BELÉM- PARÁ  
2020**

**Dados Internacionais de Catalogação na Publicação (CIP) de acordo com ISBD  
Sistema de Bibliotecas da Universidade Federal do Pará  
Gerada automaticamente pelo módulo Ficat, mediante os dados fornecidos pelo(a) autor(a)**

---

- A345r Albuquerque, Alan Rodrigo Leal de.  
Resíduo mineral a partir de biomassas amazônicas como uma fonte alternativa de nutrientes para a agricultura / Alan Rodrigo Leal de Albuquerque. — 2021.  
xv, 121 f. : il. color.
- Orientador(a): Prof<sup>ª</sup>. Dr.<sup>ª</sup> Simone Patrícia Aranha da Paz  
Coorientador(a): Prof. Dr. Rômulo Simões Angélica  
Tese (Doutorado) - Universidade Federal do Pará, Instituto de Geociências, Programa de Pós-Graduação em Geologia e Geoquímica, Belém, 2021.
1. Geoquímica. 2. Mineralogia. 3. Cinza vegetal. 4. Biomassa Amazônica. 5. Fertilizante alternativo. I. Título.

CDD 551.9

---



**Universidade Federal do Pará**  
**Instituto de Geociências**  
**Programa de Pós-Graduação em Geologia e Geoquímica**

**RESÍDUO MINERAL A PARTIR DE BIOMASSAS  
AMAZÔNICAS COMO UMA FONTE ALTERNATIVA DE  
NUTRIENTES PARA A AGRICULTURA**

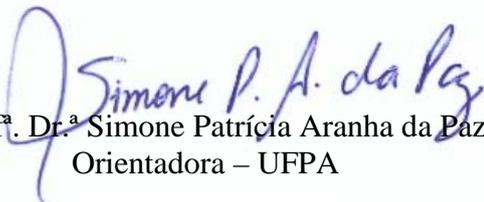
**TESE APRESENTADA POR:**

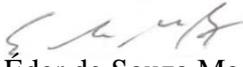
**ALAN RODRIGO LEAL DE ALBUQUERQUE**

**Como requisito parcial à obtenção do Grau de Doutor em Ciências na Área de  
GEOQUÍMICA E PETROLOGIA, Linha de Pesquisa MINERALOGIA E  
GEOQUÍMICA.**

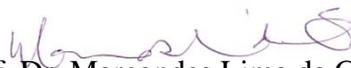
**Data de Aprovação: 25 / 06 / 2021**

**Banca Examinadora:**

  
Prof.<sup>a</sup> Dr.<sup>a</sup> Simone Patrícia Aranha da Paz  
Orientadora – UFPA

  
Dr. Éder de Souza Martins  
Membro – EMBRAPA

  
Prof. Dr. Marcos André Piedade Gama  
Membro – UFRA

  
Prof. Dr. Marcondes Lima da Costa  
Membro – UFPA

  
Prof.<sup>a</sup> Dr.<sup>a</sup> Patrícia Soares Bilhalva dos Santos  
Membro – UFPA

*À minha família  
E à família dos 450 mil brasileiros vítimas  
da COVID-19,  
Dedico a vocês esse trabalho.*

## AGRADECIMENTOS

Um doutorado é resultado de um esforço e trabalho conjunto. De certo, muitas pessoas queridas contribuíram para que esse trabalho fosse realizado. Por isso é com muita gratidão e felicidade que registro aqui os meus sinceros agradecimentos aos que contribuíram para a realização de mais uma etapa.

Agradeço ao Programa de Pós-Graduação em Geologia e Geoquímica (PPGG–UFPA) pela infraestrutura física e científica. À Coordenação de Aperfeiçoamento de Pessoas de Nível Superior – Brasil (CAPES, código de financiamento 001) e ao Conselho Nacional de Desenvolvimento Científico e Tecnológico (CNPq, processos 140101/2019-5 e 202675/2019-0) que financiaram minhas bolsas de estudo no Brasil e no exterior.

Meu muito obrigado e eterna gratidão à Prof<sup>ª</sup>. Dr.<sup>a</sup> Simone Paz e ao Prof. Dr. Rômulo Angélica que foram muito mais que orientadores, foram minhas referências de ética e dignidade. Que me acolheram como um filho, sempre com muito afeto e paciência. Me sinto honrado e privilegiado em tê-los como mestres e amigos, muito obrigado pelo carinho, dedicação, ensinamentos e, principalmente, por confiar e acreditar em meu potencial, vocês não imaginam a diferença que vocês fizeram e fazem em minha vida.

*Muchísimas gracias* ao Prof. Dr. Agustín Merino e à Dr.<sup>a</sup> Verónica Piñeiro por me receberem tão bem na Universidade de Santiago de Compostela e me por acolherem como um filho em Lugo. Agustín, muito obrigado pelos ensinamentos, sugestões, paciência e, sobretudo, companheirismo, sua amizade e seu espírito jovem e aventureiro tornou minha estadia em Lugo muito mais leve e divertida, mesmo com todas as adversidades da pandemia. *Os echo de menos!*

Muito obrigado à Dr.<sup>a</sup> Beatriz Omil (Bea) pela amizade e por toda ajuda com os experimentos e análises durante minha estadia em Lugo. Saudades dos nossos cafés e tortillas com a Cris.

Obrigado aos colaboradores da empresa Phosfaz Fertilizante por toda disposição e boa vontade na coleta de amostras e compartilhamento de informações.

Obrigado aos amigos do Laboratório de Caracterização Mineral (LCM) por todo carinho, ajuda e conhecimento compartilhado. Em especial à Andréia, Lesley, Wesley, Paulo Vitor, Rebeca, Alcineide, Aldemir, Higor, Maurício e Andreo.

Agradeço aos colaboradores do Laboratório de Caracterização de Biomassas do Instituto de Tecnologia da UFPA, em especial ao Fernando e à Prof<sup>ª</sup>. Dr.<sup>a</sup> Daniela, e aos colaboradores do RIAIDT-USC, especialmente à Verónica, Eva, Pili e Carlos.

Agradeço à minha querida e amada família, à minha mãe Eva, à minhas irmãs Louise, Larissa e Juliana, e à nossa pequena Xodó, Clara Luisa, por todo amor, carinho, cuidados, compreensão e pelas orações. Vocês me ensinaram a amar, a ter humanidade e olhar para o outro com mais igualdade e empatia. Vocês são os meus amores e as grandes mulheres da minha vida.

Meu muito obrigado ao meu amigo e companheiro Rafael Pamplona, por sempre estar ao meu lado, por todo cuidado, companheirismo, amizade e, sobretudo, por compreender os momentos de ausência.

Muito obrigado à Cleida, Joanicy e Prof. Dr. Claudio Lamarão por todo auxílio e paciência. Agradeço também à Lucia Imbiriba pela revisão da formatação da tese nas normas do PPGG.

Obrigado ao Prof. Dr. Marcos André e aos meus amigos Laís, Victória, Matheus e Allana.

*“Não existe nada em toda a natureza que seja mais importante ou que mereça mais atenção que o solo. Em verdade, é o solo que faz do mundo um ambiente agradável para a humanidade. É o solo que alimenta e fornece para toda a natureza; toda a criação depende do solo que é a base de nossa existência”.*

***Friedrich Albert Fallon, 1982***

## RESUMO

A deficiência de agrominerais e fertilizantes no Brasil tem atuado como entrave aos planos de consolidação do país como uma potência agrícola e tem representado um ônus à sua balança comercial. Quando tomamos como referência a região amazônica, para a qual está direcionada a expansão da fronteira agrícola nacional, esse cenário tem sido ainda mais desfavorável, uma vez que essa região, além de contar com recursos limitados, também apresenta tecnologias pouco desenvolvidas, o que tem agravado a situação dos desmatamentos de extensas áreas para uma produção agrícola de baixo rendimento. Somado a isso, com o objetivo de reduzir a dependência de combustíveis fósseis, o Brasil vem investindo no desenvolvimento tecnológico de conversão e produção de bioenergia a partir de resíduos lignocelulósicos e plantações de florestas energéticas em larga escala. Embora o emprego dessas fontes de bioenergia contribua para a redução da emissão de CO<sub>2</sub> e amenize a competição por produtos agro alimentícios, o seu uso crescente, sobretudo sob a forma de lenha e carvão vegetal, tem provocado aumento na demanda por fertilizantes e tem produzido grandes quantidades de resíduos minerais, os quais se encontram como cinzas vegetais. Dessa forma, um dos grandes desafios para o manejo sustentável de resíduos de biomassas como fonte de energia renovável é a produção das grandes quantidades de cinzas, que, devido à ausência de um sistema de reaproveitamento, são destinadas frequentemente ao descarte. Do ponto de vista ambiental e socioeconômico, ao invés do descarte, o reaproveitamento das cinzas vegetais na agricultura ou silvicultura pode representar um papel importante frente à dificuldade de conciliar o uso de energia renovável, escassez de fertilizantes e manejo sustentável de resíduos vegetais e minerais. Dentre as principais vantagens da aplicação de cinza em solos agrícolas e florestais destacam-se sua capacidade de neutralização de acidez e habilidade em fornecer nutrientes importantes para as plantas, como Ca, Mg, P e K. Embora seja de conhecimento comum os efeitos agronômicos das cinzas vegetais, a sua aplicação no solo requer atenção, pois variações texturais e composicionais podem interferir diretamente na solubilidade, disponibilidade e absorção de nutrientes. Além disso, a resposta da capacidade fertilizante da cinza depende das propriedades do solo, especialmente do pH, textura e conteúdo de matéria orgânica. Dessa forma, a aplicabilidade de cinzas vegetais tornar-se mais propício após avaliações químicas, mineralógicas e testes agronômicos. Nesse contexto, tendo como uns dos grandes desafios da região amazônica o manejo sustentável de resíduos e a crescente demanda por fertilizante para atender à expansão da fronteira agrícola e à produção de florestas energéticas em larga escala, buscou-se, nessa pesquisa, avaliar o rendimento e a

composição de cinza de biomassas amazônicas, bem como investigar os efeitos desses resíduos na fertilidade de solos ácidos, prestando-se especial atenção à dinâmica do P e à nutrição e produção vegetal. Para atender a esses objetivos o resíduo mineral, gerado pela combustão da mistura de caroços de açaí e cavacos de madeiras e coproduzido por uma indústria de fertilizante de fosfato calcinado, foi submetido às análises químicas e mineralógicas, e à testes de incubação com solos e planta. De acordo com os resultados obtidos na pesquisa, estima-se que a indústria de fertilizante fosfático coproduz ~ 4,7 a 9,9 toneladas/dia de resíduo mineral, o qual ocorre como cinza de fundo (*bottom ash*) e apresenta uma variabilidade composicional relativamente baixa ao longo do ano. A cinza de biomassas amazônicas é constituída majoritariamente por fases amorfas e, de maneira subordinada, por silicatos e óxidos. Quimicamente é composta por SiO<sub>2</sub>, Al<sub>2</sub>O<sub>3</sub>, CaO, Fe<sub>2</sub>O<sub>3</sub>, P<sub>2</sub>O<sub>5</sub>, K<sub>2</sub>O e MgO. Os teores de SiO<sub>2</sub> e Al<sub>2</sub>O<sub>3</sub> resultaram, principalmente, da incorporação de componentes do solo à matéria-prima de biomassa, como grãos de quartzo e partículas de caulinita. O CaO e MgO tiveram como principal fonte os cavacos de madeiras, enquanto o K<sub>2</sub>O e P<sub>2</sub>O<sub>5</sub> resultaram, predominantemente, da queima das sementes de açaí. Conforme os resultados das incubações com solos e do cultivo de *Avena sativa*, as aplicações da cinza de biomassas amazônicas promoveram efeitos moderados na correção da acidez dos solos, produziram aumentos na disponibilidade de macronutrientes (P, Ca, Mg e K) e micronutrientes (B, Cu, Fe e Mo), e favoreceram a produção e nutrição vegetal. Nos solos ricos em matéria orgânica, as aplicações da cinza vegetal também afetaram positivamente a transformação de P inorgânico em P orgânico. Mesmo em elevadas dosagens, o aporte de cinza vegetal não ofereceu riscos de salinidade, imobilização de nutrientes, toxicidade por Al e Mn e contaminação por As, Cd, Cr, Hg e Pb dos solos e plantas. Portanto, a reaproveitamento do resíduo mineral coproduzido pela combustão de biomassas amazônicas em solos agrícolas ou florestais pode representar uma alternativa sustentável e estratégica para o manejo de resíduos industriais e para a manutenção da fertilidade dos solos distróficos da região amazônica. Além disso, a aplicação de cinzas vegetais pode ser uma grande aliada na redução das perdas por precipitação de P nos solos ácidos da região.

**Palavras-chave:** Geoquímica. Mineralogia. Cinza vegetal. Biomassa Amazônica. Fertilizante alternativo.

## ABSTRACT

The agrominerals and fertilizers deficiency in Brazil has acted as an obstacle to the country's consolidation plans as a world agricultural power and has placed damage on its trade balance. When we take the Amazon region as a reference, to which the expansion of the national agricultural border has been directed, this scenario has been even more unfavorable, since this region, in addition to having limited resources, also presents low developed technologies, which has increased the deforestation of large areas for low-yield agricultural production. In addition, in order to reduce dependence on fossil fuels, Brazil has been investing in modern biofuel production, mainly in the technological development of bioenergy conversion and production from lignocellulosic waste and energy forest plantations. Although the use of these bioenergy sources contributes to mitigating competition with food products and CO<sub>2</sub> emissions problems, increase biomass uses, especially in the firewood and charcoal form, has caused an increase in the demand for fertilizers and has produced large quantities of mineral residues, which occur as biomass ashes. Therefore, one of the major challenges for the sustainable management of biomass residues as a source of renewable energy is the production of large quantities of ash, which are destined for disposal due to the lack of a recycling system. From an environmental and socio-economic aspect, ash recycling in agriculture and forestry soils can play an important role in facing the difficulty of integrating the use of renewable energy, fertilizers dearth, and organic and mineral residues management. Among the main advantages of the ash application in agricultural and forest soils are the ability to neutralize acidity and the ability to supply important nutrients to plants, such as Ca, Mg, P, and K. Although the agronomic effects of biomass ash are common knowledge, its application in the soil requires attention because textural and compositional variations can directly interfere in the solubility, availability, and absorption of nutrients. In addition, the response of the ash's fertilizing capacity depends on the properties of the soil, mainly pH, texture, and organic matter content. Thus, the applicability of biomass ash becomes more favorable after chemical, mineralogical, and agronomic tests. In this context, having as one of the biggest challenges of the Amazon region the residues management and the increased demand for fertilizer to attend the expansion of the agricultural border and the production of energy forests, the research aimed to evaluate the yield and composition of ash from Amazonian biomasses, as well as carrying out a first evaluation of the effects of these residues on the fertility of acid soils, with special attention to the P dynamics and the plant nutrition and yield. To this end, the mineral residue, generated by the açai seeds and wood

chips combustion and co-produced by a calcined phosphate fertilizer industry, was subjected to chemical and mineralogical analyzes, and to incubation tests with soils and plant. The results were used to estimate that the fertilizer industry produces ~ 4.7 – 9.9 tons/day of ash, which occurs as bottom ash and has a relatively low compositional variability throughout the year. Ash from Amazonian biomasses is mineralogically composed of amorphous phases, silicates, and oxides and chemically composed of  $\text{SiO}_2$ ,  $\text{Al}_2\text{O}_3$ ,  $\text{CaO}$ ,  $\text{Fe}_2\text{O}_3$ ,  $\text{P}_2\text{O}_5$ ,  $\text{K}_2\text{O}$ , and  $\text{MgO}$ . The highest quantities of  $\text{SiO}_2$  and  $\text{Al}_2\text{O}_3$  mainly result from quartz and kaolinite incorporated in the biomasses. By contrast,  $\text{CaO}$  and  $\text{MgO}$  originate from wood chips, whereas  $\text{K}_2\text{O}$  and  $\text{P}_2\text{O}_5$  originate from açai seeds. According to the results of the soils incubations and the *Avena sativa* cultivation, the applications of ash from Amazonian biomasses promoted moderate effects in the correction of acidity in soils, produced increases in the availability of macronutrients (P, Ca, Mg, and K) and micronutrients (B, Cu, Fe, and Mo), and favored plant production and nutrition. In soils rich in organic matter content, the applications of biomass ash also positively affected the transformation of inorganic P into organic P. Even in high amounts, the biomass ash supply offered no risk salinity, nutrient immobilization, Al and Mn toxicity, and contamination by As, Cd, Cr, Hg, and Pb soil and plants. Therefore, the recycling of mineral residue co-produced by the combustion of Amazonian biomass in agricultural or forest soils may represent a sustainable and strategic alternative for the management of industrial waste and for the maintenance of the fertility of the dystrophic soils of the Amazon region. In addition, the application of biomass ash can be a great ally in reducing losses due to P precipitation in acidic soils in the region.

**Keywords:** Geochemistry. Mineralogy. Biomass ash. Amazonian biomass. Alternative fertilizer.



UNIVERSIDADE FEDERAL DO PARÁ  
INSTITUTO DE GEOCIÊNCIAS  
PROGRAMA DE PÓS-GRADUAÇÃO EM GEOLOGIA E GEOQUÍMICA

## PARECER

### Sobre a Defesa Pública da Tese de Doutorado de ALAN RODRIGO LEAL DE ALBUQUERQUE

A banca examinadora da Tese de Doutorado de **ALAN RODRIGO LEAL DE ALBUQUERQUE** orientando da Prof.<sup>a</sup> Dr.<sup>a</sup> Simone Patrícia Aranha da Paz (UFPA), e coorientando do professor doutor Rômulo Simões Angélica (UFPA), composta pelos professores doutores Marcos André Piedade Gama (UFRA), Éder de Souza Martins (Embrapa), Patrícia Soares Bilhalva dos Santos (UFPA) e Marcondes Lima da Costa (UFPA), após apresentação da sua tese intitulada “**RESÍDUO MINERAL A PARTIR DE BIOMASSAS AMAZÔNICAS COMO UMA FONTE ALTERNATIVA DE NUTRIENTES PARA A AGRICULTURA**”, emite o seguinte parecer:

O candidato realizou sua apresentação de forma clara, bem organizada e muito segura, no tempo estipulado. Na arguição ele demonstrou completo domínio da temática, sempre com grande empolgação e respondeu de forma clara e segura a todas perguntas formuladas pela banca. O trabalho escrito foi apresentado com um texto introdutivo muito rico e bem escrito e os resultados na forma de um artigo publicado em revista de forte impacto, e dois manuscritos ainda não submetidos, porém muito bem elaborados, bem redigidos e ricos em dados e excelente discussão, incluindo sua experiência em atividades sanduiches realizadas na Universidade de Santiago de Compostela, Espanha, em plena pandemia Covid-19. Os últimos manuscritos foram vistos pela banca como passíveis de serem explorados em dois novos artigos.

O candidato concluiu sua pesquisa e defesa em 50 meses, dois meses além do prazo regulamentar, porém em plena pandemia covid-19. A banca avaliou que o candidato tinha alto potencial para receber a **DISTINÇÃO**, porém o fato de não ter submetido os demais manuscritos (2), o que é exigido pelas normas do PPGG, não permitiram conceder este prêmio tão meritório pela qualidade do trabalho defendido.

Finalmente, a banca examinadora decidiu por unanimidade aprovar a tese e ter desejado conceder-lhe a **DISTINÇÃO**.

Belém, 25 de junho de 2021.

  
Prof.<sup>a</sup> Dr.<sup>a</sup> **Simone Patrícia Aranha da Paz**  
(Orientador – UFPA)

  
Prof. Dr. **Marcos André Piedade Gama**  
(Membro externo-UFRA)

  
Prof. Dr. **Éder de Souza Martins**  
(Membro Externo-Embrapa)

  
Prof.<sup>a</sup> Dr.<sup>a</sup> **Patrícia Soares Bilhalva dos Santos**  
(Membro externo-UFPA)

  
Prof. Dr. **Marcondes Lima da Costa**  
(Membro interno-UFPA)