



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

**TESE DE DOUTORADO Nº 138**

**O INTEMPERISMO TROPICAL COMO AGENTE DE  
DEGRADAÇÃO DE CADEIAS DE ISOLADORES DE ALTA  
TENSÃO EM SUBESTAÇÕES NA AMAZÔNIA ORIENTAL:  
ESTUDO DE CASO EM BARCARENA-PA E SÃO LUÍS-MA**

**Tese apresentada por:**

**DARILENA MONTEIRO PORFIRIO**

**Orientador: Prof. Dr. Marcondes Lima da Costa (UFPA)**

---

**BELÉM  
2018**

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

---

- M772i Monteiro Porfírio, Darilena  
O INTEMPERISMO TROPICAL COMO AGENTE DE DEGRADAÇÃO DE CADEIAS DE  
ISOLADORES DE ALTA TENSÃO EM SUBESTAÇÕES NA AMAZÔNIA ORIENTAL: ESTUDO DE  
CASO EM BARCARENA-PA E SÃO LUÍS-MA / Darilena Monteiro Porfírio. — 2018  
xx, 242 f. : il. color
- Tese (Doutorado) - Programa de Pós-graduação em Geologia e Geoquímica (PPGG), Instituto de  
Geociências, Universidade Federal do Pará, Belém, 2018.  
Orientação: Prof. Dr. Marcondes Lima da Costa
1. Água de chuva. 2. Material particulado atmosférico . 3. Taxa de deposição. 4. Coletor direcional de  
depósito de poeiras (CDDP). I. Lima da Costa, Marcondes , *orient.* II. Título

CDD 551.352098115

---



**UNIVERSIDADE FEDERAL DO PARÁ**  
**INSTITUTO DE GEOCIÊNCIAS**  
Programa de Pós-Graduação em Geologia e Geoquímica

**O INTEMPERISMO TROPICAL COMO AGENTE DE  
DEGRADAÇÃO DE CADEIAS DE ISOLADORES DE ALTA  
TENSÃO EM SUBESTAÇÕES NA AMAZÔNIA ORIENTAL:  
ESTUDO DE CASO EM BARCARENA-PA E SÃO LUÍS-MA**

TESE APRESENTADA POR

**DARILENA MONTEIRO PORFÍRIO**

Como requisito parcial à obtenção do Grau de Doutor em Ciências na Área de  
Concentração em GEOQUÍMICA E PETROLOGIA

Data de Aprovação: 13 / 11 / 2018

Banca Examinadora:

Prof. Dr. Marcondes Lima da Costa  
(Orientador-UFPA)

Prof. Dr. José Carlos de Araújo Cardoso Filho  
(Membro-UFPA)

Prof. Dr. Jean Michel Lafon  
(Membro-UFPA)

Prof. Dr. Kleber Franke Portella  
(Membro-LACTEC)

Prof. Dr. Carlos Emmerson Ferreira da Costa  
(Membro-UFPA)

Aos meus pais Claudio e Joana D'arc pelo amor, exemplo e incentivo constantes.

Às minhas irmãs Lucilena, Claudilena e Milena.

À alegria das sobrinhas Júlia, Laura e Suzanna e do sobrinho Fernando.

A todos os amigos e amigas que nessa caminhada tornaram as dificuldades mais leves e os dias mais serenos.

Aos meus amores e motivos de existir Rogilson, Danillo e Diogo.

À toda minha família pelo amor, compreensão e paciência por tantas horas de ausência.

## AGRADECIMENTOS

Ao professor Marcondes Lima da Costa pela oportunidade, orientação e amizade;

Ao Centro de Tecnologia da Eletronorte ELETROBRÁS e ao gerente eng. Ricardo Cunha Bezerra que apoiou a realização deste trabalho;

Aos colaboradores do OCT Maurício Lima, Leide Carmem Lima, Kleber Dib Taxi, Fernando Azevedo, Marlon Vilhena, Leonardo Lopes, Regina Amaral, Rui Monteiro, Edmilson Santos, às bolsistas Laís Maciel e Rita de Kássia Nascimento pelo apoio, dedicação, pela amizade e carinho em nosso convívio;

A todos os colegas do GMGA-UFPA pela receptividade e convivência;

A todos os funcionários, técnicos e professores do PPGG-UFPA que se ajudam, colaboram e se esforçam para que as atividades acadêmicas e as pesquisas não parem. E em especial à Sra. Cleida Freitas sempre solícita, atenta e dedicada;

Aos professores Marcondes, Jean Michel, Claudio Lamarão, José Augusto e Rômulo Angélica com quem tive o prazer de conviver durante as disciplinas do PPGG-UFPA.

Aos professores Dr. Rômulo Simões Angélica e Dra. Simone Paz responsáveis pelo Laboratório de Difração de Raio-X do PPGG-UFPA pelo auxílio na confecção das pastilhas prensadas;

Ao químico André Luiz V. do Carmo assistente de pesquisa do SENAI-PA pelo apoio, sempre que solicitado;

Ao Dr. Marcelo de Oliveira Lima e à química Lorena Mendes pelo auxílio e troca de informação constante nesse período de trabalho tão intenso;

Aos pesquisadores do LACTEC Kelly Brambilla, Diego Buriti, Kleber Portella, César Hubsch e Guilherme da Silva pela parceria institucional, pelo grande auxílio nas campanhas de coleta e reuniões de projeto;

À eng<sup>a</sup>. química e pesquisadora do CQMA-IPEN-USP Lucilena Rebêlo Monteiro pelas mais diversas formas de colaboração possíveis no desenvolvimento deste trabalho. E pela compreensão, carinho e dedicação que apenas uma irmã gêmea pode alcançar;

À ANEEL pelo financiamento do P&D “Desenvolvimento de Tecnologia para Avaliação de Desempenho de Isoladores e Áreas de Alta Agressividade Ambiental” Contrato 4500078262, sem o qual esse trabalho não seria possível;

À PROPESP pelo financeiro que possibilitou a revisão das publicações para submissão.

*“Nada estará perdido enquanto estivermos em busca.  
Mesmo que já tenha feito uma longa caminhada,  
sempre haverá mais um caminho a percorrer.”*

**Santo Agostinho**

## RESUMO

A deposição de particulados atmosféricos de Belém-PA, de Barcarena-PA e de São Luís-MA e a caracterização geoquímica das espécies presentes, pode auxiliar no entendimento do efeito do intemperismo tropical e como este atua na degradação de cadeias de isoladores de alta tensão em subestações elétricas na Amazônia. Na amostragem adotada, foi importante avaliar a sazonalidade (período seco e chuvoso) realizada por 24 coletas com periodicidade mensal entre janeiro-2012 e fevereiro-2016, para a coleta foi utilizado a norma ABNT NBR IEC 60815-1 (2015), o coletor direcional de depósito de poeiras (CDDP's), as velas úmidas de cloreto (ABNT NBR 6211) e de óxido de chumbo (ABNT NBR 6921) na determinação das taxas de cloreto e sulfatação respectivamente. A caracterização das amostras de material solúvel foi feita por cromatografia iônica (CI); a análise elementar da fração insolúvel foi feita por espectrometria de emissão atômica por plasma induzido por Laser (LIBS) e a morfologia foi identificada por microscopia eletrônica de varredura (MEV) acoplada à fonte de raios-X (EDS). Na água de chuva de Barcarena-PA a ordem de ocorrência dos íons foi:  $\text{Na}^+ > \text{Cl}^- > \text{SO}_4^{2-} > \text{Ca}^{2+} > \text{K}^+ > \text{F}^- > \text{NH}_4^+ \text{-N} > \text{Mg}^{2+} > \text{NO}_3^- \text{-N}$ . Havendo uma contribuição marinha de  $\text{Na}^+$  e  $\text{Cl}^-$  e antrópica de  $\text{SO}_4^{2-}$ ,  $\text{F}^-$  e  $\text{NO}_3^- \text{-N}$ . E as taxas de deposição de poeiras (Tipo A) média anual de São Luís-MA (7 a  $11 \text{mg m}^{-2} \text{ dia}^{-1}$ ) são similares as de Barcarena-PA (7 a  $14 \text{mg m}^{-2} \text{ dia}^{-1}$ ). Contudo, a classificação do grau de severidade de poluição local, de acordo com a ABNT NBR IEC 60815-1 (2015), é alta para Barcarena-PA e média para São Luís-MA em razão da deposição condutiva (Tipo B). As razões de deposição  $\text{Cl}^- / \text{SO}_4^{2-}$ , a presença de  $\text{F}^-$ ,  $\text{SO}_4^{2-}$  e  $\text{NO}_3^- \text{-N}$  demonstraram maior impacto antrópico na subestação de Barcarena-PA que na de São Luís-MA. Isto posto, há indícios que as condições de corrosividade atmosférica nas regiões de estudo e os efeitos de degradação nos isoladores elétricos seguirão esta lógica, da intensidade e do risco de falhas, relacionando à contribuição antrópica industrial mais intensa na SEVC. Uma vez que as fontes de sal marinho, antrópica e crustal aumentam o potencial risco aos componentes elétricos nas linhas de transmissão.

**Palavras-chave:** Água de chuva. Material particulado atmosférico. Taxa de deposição.

Coletor direcional de depósito de poeiras (CDDP).

## ABSTRACT

The deposition of atmospheric particulates of the Belém-PA region, Barcarena-PA and São Luís-MA and the species geochemical characterization of the can help in understanding the effect of tropical weathering and how it acts in the degradation of chains of high voltage insulators in electrical substations in the Amazon. In the sampling, it was important to evaluate the seasonality (dry and rainy period) performed by 24 monthly surveys between January-2012 and February-2016, using the directional dust deposit gauge - DDDG ABNT NBR IEC 60815-1 (2015) and the wet candles of chloride (ABNT NBR 6211) and the lead oxide (ABNT NBR 6921) were used to determine chloride and sulfate rates, respectively. To characterize the samples of soluble material was made by ion chromatography (IC); the elemental analysis of the insoluble fraction was done by Laser-induced breakdown spectroscopy (LIBS) and the morphology was identified by scanning electron microscopy (SEM) and the X-ray source (EDS). In the Barcarena-PA rainwater the order of occurrence of the ions was  $\text{Na}^+ > \text{Cl}^- > \text{SO}_4^{2-} > \text{Ca}^{2+} > \text{K}^+ > \text{F}^- > \text{NH}_4^+ \text{-N} > \text{Mg}^{2+} > \text{NO}_3^- \text{-N}$ . There is a marine contribution of  $\text{Na}^+$  and  $\text{Cl}^-$  and anthropic of  $\text{SO}_4^{2-}$ ,  $\text{F}^-$  and  $\text{NO}_3^- \text{-N}$ . The annual mean dust deposition rates of São Luís-MA (7 to 11  $\text{mg m}^{-2} \text{ day}^{-1}$ ) are similar to those of Barcarena-PA (7 to 14  $\text{mg m}^{-2} \text{ day}^{-1}$ ). However, the classification of local pollution severity according to ABNT NBR IEC 60815-1 (2015) is high for Barcarena-PA and medium for São Luís-MA due to conductive deposition (Type B). The deposition rates  $\text{Cl}^- / \text{SO}_4^{2-}$ , the presence of  $\text{F}^-$ ,  $\text{SO}_4^{2-}$  and  $\text{NO}_3^- \text{-N}$  showed greater anthropic impact in the Barcarena-PA substation than in the São Luís-MA substation. Thus, there are indications that the atmospheric corrosively conditions in the study regions and the effects of degradation on the electrical insulators will follow this logic, the intensity and the risk of failure, relating to the more intense industrial anthropic contribution in the SEVC. Since marine, anthropogenic and crustal salt sources increase the potential risk to electrical components in transmission lines.

**Keywords:** Rainwater. Airborne. Deposition rate. Directional dust deposit gauge (DDDG).



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 **DARILENA MONTEIRO PORFÍRIO**

A banca examinadora da Tese de Doutorado de **DARILENA MONTEIRO PORFÍRIO** orientando do Prof. Dr. Marcondes Lima da Costa (UFPA), composta pelos professores doutores Kleber Franke Portella (UFPR), José Carlos de Araújo Cardoso Filho (UFPA), Jean Michel Lafon (UFPA) e Carlos Emmerson Ferreira da Costa (UFPA) após apresentação da sua tese intitulada “**O INTEMPERISMO TROPICAL COMO AGENTE DE DEGRADAÇÃO DE CADEIAS DE ISOLADORES DE ALTA TENSÃO NA AMAZÔNIA ORIENTAL: ESTUDO DE CASO EM BARCARENA-PA E SÃO LUÍS-MA**”, emite o seguinte parecer:

A candidata realizou a sua apresentação de forma clara, muito bem organizada e com domínio completo da temática e administração do tempo de exposição. Durante a arguição a candidata demonstrou profundo conhecimento da pesquisa desenvolvida ao responder às questões levantadas e inclusive esclarecendo dúvidas e procedimentos analíticos levantados. O trabalho escrito foi apresentado na forma de cinco artigos, sendo um já aceito e dois submetidos.

Finalmente, a banca examinadora, considerando a grande relevância do trabalho, desenvolvido concomitantemente com as suas atividades profissionais e concluído em tempo hábil, decidiu por unanimidade aprovar a tese de doutorado de Darilena Monteiro Porfírio com **Distinção**.

Betém, 13 de novembro de 2018.

Prof. Dr. Marcondes Lima da Costa (Orientador – UFPA)

Prof. Dr. Kleber Franke Portella (UFPR)

Prof. Dr. José Carlos de Araújo Cardoso Filho (UFPA)

Prof. Dr. Jean Michel Lafon. (UFPA)

Prof. Dr. Carlos Emmerson Ferreira da Costa (UFPA)