

AVALIAÇÃO DA INFLUÊNCIA DO CLIMA AMAZÔNICO NA ESTRATÉGIA OPERACIONAL DE UMA PILHA DE RESÍDUO FILTRADO DE BAUXITA

**EVALUATION OF THE INFLUENCE OF THE AMAZONIAN CLIMATE ON THE
OPERATIONAL STRATEGY FOR A FILTERED BAUXITE RESIDUE STACK**

Engenharias • 12/10/2026

REGISTRO DOI: [10.70773/revistatopicos/791782236](https://doi.org/10.70773/revistatopicos/791782236)

Rodrigo Monteiro Pinto¹

Cássia Fernanda Freitas Gomes²

Fábio Masato Yamanaka³

Ainoa Abigail Araújo Cardoso⁴

Jéssica Costa da Silva⁵

Marcelo Rassy Teixeira⁶

RESUMO

O empilhamento a seco de resíduo de bauxita filtrado constitui alternativa aos métodos hidráulicos convencionais, reduzindo a demanda por água e área. Entretanto, em regiões de clima amazônico, a influência da sazonalidade pluviométrica sobre a operação ainda requer avaliações específicas. Este estudo avalia a influência do clima amazônico na estratégia operacional de uma pilha de resíduo de bauxita filtrado na Amazônia Oriental. Foi realizada análise observacional retrospectiva, de abordagem quantitativa, utilizando registros diários de precipitação, umidade do resíduo e volumes destinados às Zonas Estrutural e Interna, entre 2022 e 2025. A variabilidade temporal da precipitação foi investigada por ANOVA e Kruskal-Wallis. As relações entre variáveis climáticas e operacionais foram avaliadas por correlações de Pearson e Spearman e regressão linear. Também foram analisados acumulados de precipitação em períodos de 3, 7, 15 e 30 dias. Os resultados indicaram variabilidade temporal significativa da precipitação ($F = 5,912$; $p < 0,001$), associada à estratégia de disposição. A precipitação apresentou correlação positiva com a destinação à Zona Interna ($p = 0,325$) e negativa com a Zona Estrutural ($p = -0,461$). O acumulado de 15 dias apresentou as associações mais expressivas, com R^2 de 17,3% e 25,2%, respectivamente. A precipitação teve baixa relevância prática para explicar a umidade do resíduo. Conclui-se que o histórico pluviométrico recente apresenta maior associação com a estratégia operacional que eventos isolados, podendo complementar os critérios de planejamento da disposição.

Palavras-chave: resíduo de bauxita; empilhamento a seco; clima amazônico; estratégia operacional; disposição de resíduos.

ABSTRACT

Dry stacking of filtered bauxite residue has become an alternative to conventional hydraulic disposal methods, reducing water and land requirements. However, in regions with an Amazonian climate, the influence of rainfall seasonality on operational performance still requires further investigation. This study evaluates the influence of the Amazonian climate on the operational strategy of a filtered bauxite residue stack in the Eastern Amazon. A retrospective observational study with a quantitative approach was conducted using daily records of rainfall, residue moisture, and volumes deposited in the Structural and Internal Zones from 2022 to 2025. Rainfall variability was investigated using ANOVA and the Kruskal-Wallis test. Relationships between climatic and operational variables were assessed using Pearson and Spearman correlations and linear regression. Cumulative rainfall over 3, 7, 15, and 30 days was also analyzed. The results indicated significant temporal rainfall variability ($F = 5.912$; $p < 0.001$), associated with the disposal strategy. Rainfall showed a positive correlation with deposition in the Internal Zone ($\rho = 0.325$) and a negative correlation with the Structural Zone ($\rho = -0.461$). The 15-day cumulative rainfall showed the strongest associations, with R^2 values of 17.3% and 25.2%, respectively. Rainfall had low practical relevance in explaining residue moisture variability. The findings indicate that recent rainfall history is more strongly associated with operational strategy than isolated rainfall events, suggesting that cumulative rainfall indicators may complement existing disposal planning criteria.

Keywords: bauxite residue; dry stacking; Amazonian climate; operational strategy; residue disposal.

1. INTRODUÇÃO

A indústria de alumínio primário exerce papel fundamental no suprimento desse metal, amplamente empregado em diferentes setores. Sua obtenção envolve o beneficiamento da bauxita pelo processo Bayer, responsável pela produção da alumina (Al_2O_3), que posteriormente é submetida à redução eletrolítica pelo processo Hall-Hérault. Nesse processo, a alumina é submetida à eletrólise, resultando na produção do alumínio metálico (Yamanaka, Souza e Teixeira, 2024; Yamanaka, Souza e Teixeira, 2025; Yamanaka, Moreira e Teixeira, 2026). Durante o processo Bayer, as fases minerais insolúveis e demais constituintes não aproveitados são separados, gerando de grandes volumes de resíduo.

A geração de resíduo de bauxita (bauxite residue ou red mud) constitui um dos principais desafios ambientais e operacionais da indústria de alumina. O aumento contínuo da produção mundial resulta na necessidade de soluções de disposição cada vez mais seguras, sustentáveis e compatíveis com exigências regulatórias e ambientais contemporâneas (Power; Gräfe; Klauber, 2011; Gomes et al., 2016; Reddy et al., 2021; Li et al., 2024).

Historicamente, a disposição desse material ocorreu predominantemente por métodos convencionais de armazenamento, frequentemente associados a elevadas demandas de área, manejo de água e controle ambiental. Em resposta a essas limitações, diferentes estratégias têm sido desenvolvidas visando à redução do teor de umidade do resíduo e à melhoria das condições de disposição, incluindo tecnologias de filtração mecânica e empilhamento a seco (dry stacking) (Power; Gräfe; Klauber, 2011; Gomes et al., 2016; Evans, 2016).

A adoção de sistemas de filtro prensa tem ampliado a viabilidade operacional da disposição de resíduos filtrados, uma vez que permite maior recuperação de água de processo e reduz a dependência de métodos convencionais de contenção. Paralelamente, estudos recentes têm investigado o comportamento de rejeitos filtrados, aspectos de projeto de pilhas e fatores relacionados à estabilidade dessas estruturas sob diferentes condições operacionais (Gomes et al., 2016).

Entretanto, a simples redução do teor de umidade não elimina a influência de fatores externos sobre o desempenho geotécnico dos depósitos. Entre esses fatores, as condições climáticas exercem papel relevante na evolução das propriedades hidráulicas e mecânicas dos materiais dispostos, especialmente em regiões caracterizadas por elevada precipitação e forte sazonalidade pluviométrica.

Esse contexto é particularmente relevante na Amazônia Oriental, onde estudos climáticos apontam elevada variabilidade espacial e temporal da precipitação, ocorrência de eventos extremos e possíveis alterações associadas às mudanças climáticas e ao uso da terra (Marengo et al., 2018; Souza et al., 2025; Gutierrez; Souza; Gutierrez, 2022).

Além dos aspectos operacionais, eventos históricos relacionados a falhas em estruturas de disposição de resíduos reforçaram a importância de abordagens preventivas fundamentadas em avaliação de risco, monitoramento e governança. Acidentes envolvendo rejeitos minerais e resíduos alcalinos, incluindo os desastres de Mariana e Brumadinho, cujas consequências ambientais e institucionais foram detalhadamente analisadas por

Pacheco et al., e casos discutidos por Leão e Santiago no contexto da prevenção de novas catástrofes em barragens de rejeito, demonstraram a necessidade de compreender adequadamente a interação entre características do material, sistema de disposição e condições ambientais locais (Ruyters et al., 2011 apud Gomes et al., 2016; Mayes et al., 2011 apud Gomes et al., 2016; Dladla; Ramsamy, 2022; Leão; Santiago; Pacheco et al.).

Embora a literatura apresente avanços importantes sobre propriedades do resíduo de bauxita, métodos de disposição, reaproveitamento, governança de rejeitos e comportamento de pilhas filtradas, observa-se que esses temas são frequentemente tratados de forma independente. A integração entre comportamento geotécnico de resíduos de bauxita filtrados e condições climáticas características da Amazônia ainda carece de avaliações específicas voltadas a cenários operacionais reais.

Dessa forma, o presente estudo propõe a análise do comportamento operacional e geotécnico de pilhas de resíduo de bauxita disposto por filtro prensa sob influência das condições climáticas amazônicas, buscando compreender como variáveis climáticas e condições de disposição podem influenciar o desempenho geotécnico dessas estruturas e contribuir para seu gerenciamento mais seguro e eficiente

2. FUNDAMENTAÇÃO TEÓRICA OU REVISÃO DA LITERATURA

2.1. Resíduo de Bauxita e Sistemas de Disposição Dry Stacking

O resíduo de bauxita, também conhecido internacionalmente como bauxite residue ou red mud, é o principal coproduto gerado durante o processo Bayer de produção de alumina. Caracteriza-se por

apresentar elevada alcalinidade, granulometria predominantemente fina e propriedades geotécnicas que variam em função do processo de desaguamento empregado e das condições de disposição. Estudos indicam que as propriedades físicas e mecânicas desse material exercem influência direta sobre a estabilidade e o desempenho operacional das estruturas de disposição.

Historicamente, a disposição do resíduo de bauxita foi realizada predominantemente por meio de sistemas hidráulicos. Entretanto, restrições ambientais, exigências regulatórias crescentes e avanços tecnológicos impulsionaram o desenvolvimento de métodos de desaguamento mais eficientes, possibilitando a adoção de sistemas de disposição em pilha (dry stacking). Esses sistemas reduzem significativamente o volume de água livre armazenado, aumentam a densidade do material disposto e proporcionam maior controle geotécnico durante a operação. Power, Gräfe e Klauber (2011) destacam que a evolução das tecnologias de disposição representa um dos principais avanços no gerenciamento do resíduo de bauxita nas últimas décadas. Já Filippousi et al. (2025) observaram benefícios ambientais associados à disposição filtrada quando comparada a métodos convencionais, e Hawkey, Cavalli e Fritzke (2018) detalham os aspectos técnicos da filtração por filtro-prensa aplicada especificamente ao resíduo de bauxita.

Do ponto de vista da gestão de resíduos industriais de forma mais ampla, Jones e Boger (2012) discutem os desafios de sustentabilidade e manejo de rejeitos nas indústrias de recursos minerais, contexto no qual se insere a busca por sistemas de disposição menos intensivos em água e área, como o dry stacking (Jones; Boger, 2012).

Segundo o Manual de Operações da referida pilha, que por razões de confidencialidade é impedida a identificação da empresa e do sítio, utilizado como referência deste estudo, o resíduo filtrado empregado no sistema analisado apresenta teor de sólidos próximo de 78%, condição que possibilita sua movimentação por equipamentos de terraplenagem e posterior compactação em camadas sucessivas.

2.2. Comportamento Geotécnico do Resíduo de Bauxita

O comportamento geotécnico do resíduo de bauxita tem sido investigado por diversos autores devido à sua relevância para a segurança e operação de depósitos em pilha.

Newson et al. (2006) observaram que o material apresenta estrutura interna parcialmente cimentada, influenciada pela presença de fases minerais secundárias, o que contribui para ganhos de resistência mesmo sob baixos níveis de confinamento. Os autores reportaram elevados ângulos de atrito interno e comportamento compatível com materiais parcialmente estruturados. Essas características indicam potencial para utilização em sistemas de disposição compactada.

Posteriormente, Nikraz et al. (2007) demonstraram que a resistência mecânica do resíduo apresenta forte dependência de seu teor de umidade e das condições de secagem após a disposição. Os autores verificaram que a redução da umidade promove aumento progressivo da resistência ao cisalhamento e melhoria das condições de estabilidade da pilha.

Reddy et al. (2021), ao consolidarem resultados obtidos em diferentes países produtores de alumina, destacaram que a compactação

representa um dos principais fatores de controle do desempenho geotécnico do resíduo, influenciando propriedades como resistência, compressibilidade e permeabilidade. Segundo os autores, depósitos operados sob elevados níveis de controle tecnológico apresentam comportamento mecânico mais previsível e menor suscetibilidade a deformações excessivas.

Na engenharia geotécnica, a utilização combinada de procedimentos estatísticos e diferentes técnicas de investigação tem ganhado importância na busca por uma caracterização mais representativa do comportamento dos solos e das fundações. As variações observadas nas propriedades geotécnicas do subsolo, associadas às particularidades de cada ambiente investigado, podem modificar significativamente a resposta dos materiais quando submetidos às solicitações impostas pelas estruturas. Nesse sentido, a articulação entre análises estatísticas, resultados de ensaios e diferentes modelos de interpretação permite reduzir as incertezas relacionadas à definição dos parâmetros geotécnicos e ampliar a confiabilidade das avaliações realizadas, contribuindo para análises mais consistentes das condições de segurança e desempenho das soluções de engenharia (Oliveira et al., 2025; Rodrigues et al., 2025; Silva et al., 2025; Yamanaka et al., 2025).

2.3. Influência da Umidade Sobre a Compactação

A compactação constitui uma das etapas fundamentais da disposição de resíduos filtrados em sistemas dry stacking. Seu desempenho depende diretamente da interação entre energia de compactação, teor de umidade e características intrínsecas do material.

Ensaio de compactação realizados em resíduos de bauxita demonstram a existência de um intervalo ótimo de umidade no qual é possível obter maiores valores de massa específica seca e melhores condições de desempenho mecânico. Valores de umidade inferiores ou superiores à umidade ótima tendem a reduzir a eficiência do processo de compactação.

As campanhas geotécnicas apresentadas no Manual de Operações indicaram massa específica seca máxima próxima de 1,565 t/m³ e umidade ótima em torno de 27,3%, resultados consistentes com outras investigações conduzidas em materiais filtrados semelhantes.

Adicionalmente, Nikraz et al. (2007) verificaram que alterações relativamente pequenas no teor de umidade podem resultar em diferenças significativas nos parâmetros de resistência do resíduo disposto, reforçando a importância do controle contínuo dessa variável durante a operação.

2.4. Caracterização Climática da Região Amazônica e Sua Relação com o Comportamento Geotécnico de Pilhas

A Região Norte do Brasil localiza-se na faixa equatorial e apresenta como principais características climáticas as altas temperaturas e os elevados volumes de precipitação ao longo do ano (Oliveira et al., 2021). Devido sua localização, a região recebe grande incidência solar, contribuindo para o processo de convecção e chuvas intensas.

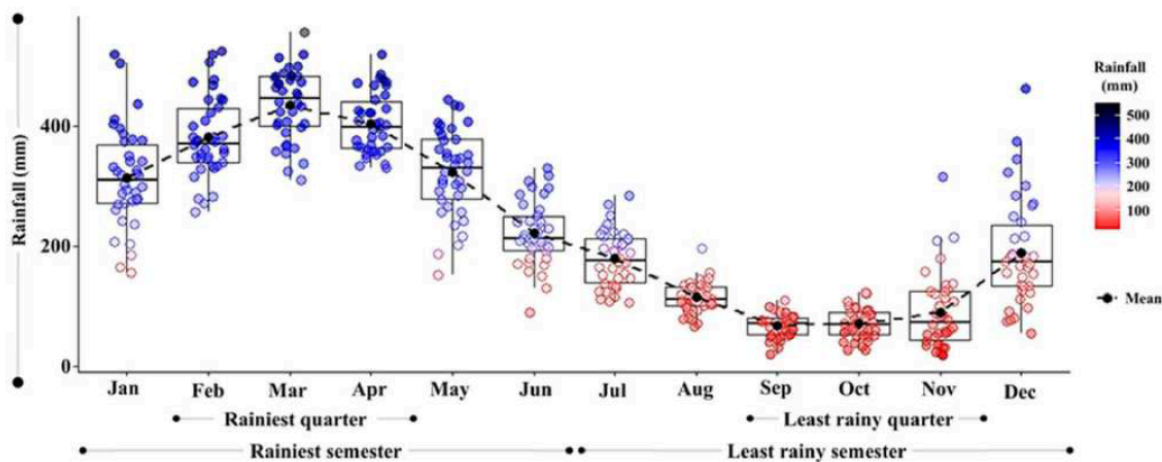
Conforme concluído por Fisch et al. (2007) a chuva na região Amazônica é predominantemente de caráter local e convectivo.

Essas características constituem os principais fatores de influência sobre o comportamento de estruturas constituídas por resíduo de

bauxita. Na região amazônica, a ocorrência de precipitações ao longo do ano, associada à elevada umidade atmosférica e à alternância entre períodos mais e menos chuvosos, deve ser considerada na avaliação das condições de armazenamento e disposição do resíduo. A caracterização pluviométrica não deve se restringir aos volumes acumulados, sendo necessário considerar também a intensidade e a duração dos eventos, uma vez que diferentes padrões de precipitação podem produzir respostas distintas no sistema (Souza et al., 2025; Gutierrez; Souza; Gutierrez, 2022), no entanto este estudo inicialmente tratará uma análise entre as correlações entre umidades máximas, mínimas e sua zona de destinação em uma pilha, considerando que no contexto dos rejeitos de mineração, as flutuações de umidade decorrentes do regime climático influenciam diretamente parâmetros geotécnicos como sucção, resistência ao cisalhamento, compressibilidade e permeabilidade, condicionando a resposta mecânica do material.

É importante destacar que Rocha (2025) apresentou uma série histórica de precipitação na Região do Delta-Estuário do Rio Amazonas, de 1985 a 2022, conforme figura 1.

Figura 1. Dinâmica de variação mensal da precipitação na região do Delta-Estuário do Rio Amazonas.



Fonte: Rocha et al. (2025).

Observa-se um padrão sazonal bem definido, com os volumes maiores de chuva ocorrendo entre os meses de janeiro a maio, com volume médio de 450 mm, e que, a partir do mês de junho a precipitação decresce, com volumes médios variando de 70 mm a 100 mm até meados de novembro, quando se inicia o novo ciclo

Moreira, Yamanaka e Teixeira (2026) destacam que o monitoramento contínuo de variáveis ambientais pode fornecer indicadores indiretos das condições de comportamento das estruturas, contribuindo para a identificação de alterações e para o estabelecimento de níveis de alerta e emergência.

2.5. Influência das Condições Climáticas Sobre a Operação da Pilha

Embora a literatura geotécnica sobre resíduos de bauxita seja relativamente ampla, poucos estudos avaliaram diretamente a influência das condições climáticas sobre indicadores operacionais de disposição.

A precipitação pode influenciar simultaneamente:

- A umidade do material disposto;
- As condições de trafegabilidade dos equipamentos;
- O desempenho da compactação;
- A frequência de retrabalhos;
- A estratégia operacional de disposição.

Segundo o Manual de Operações, a própria lógica operacional do sistema é estruturada em função da sazonalidade climática observada ao longo do ano. Durante os períodos de maior precipitação, há aumento da utilização da Zona Interna como mecanismo de flexibilização operacional, enquanto os períodos de menor precipitação favorecem a intensificação da disposição na Zona Estrutural.

Nikraz et al. (2007) observaram fenômeno semelhante em estudos conduzidos em condições de campo, identificando forte relação entre eventos pluviométricos, teor de umidade e evolução da resistência do material disposto. Entretanto, os autores trabalharam em condições climáticas distintas das encontradas em ambientes tropicais úmidos.

No contexto dos sistemas de disposição filtrada, Burden e Wilson (2023) destacam que o desempenho operacional está diretamente associado à capacidade de manter condições adequadas de umidade para o lançamento e compactação do material. Dessa forma, variáveis climáticas passam a exercer papel relevante no gerenciamento do depósito.

3. METODOLOGIA

Esta pesquisa caracteriza-se como um estudo observacional aplicado, de abordagem quantitativa, desenvolvido a partir da análise integrada de dados operacionais, geotécnicos e climáticos obtidos em uma pilha de disposição de resíduo de bauxita filtrado operada por meio da técnica de empilhamento drenado (dry stacking) na Amazônia Oriental.

Os dados de precipitação diária utilizados nas análises correspondem a registros operacionais medidos na própria instalação (estação/pluviômetro), integrados à base de dados operacional da pilha. Não se trata, portanto, de previsões climatológicas de terceiros, mas de valores efetivamente observados no local de estudo, o que confere maior confiabilidade à análise da relação entre precipitação e desempenho geotécnico.

3.1. Caracterização do Resíduo

O material analisado corresponde a resíduo de bauxita submetido a processo de filtragem mecânica e posteriormente destinado à disposição em pilha compactada.

Segundo as campanhas de caracterização geotécnica apresentadas no Manual de Operações, o resíduo apresenta massa específica seca máxima entre 1,57 e 1,60 g/cm³ e umidade ótima variando entre 25,4% e 27,0%. Valores típicos obtidos em campanhas anteriores indicaram massa específica seca máxima média de aproximadamente 1,565 t/m³ e umidade ótima de 27,3%.

A operação adota como faixa de trabalhabilidade valores de umidade compreendidos entre 24,2% e 29,0%, sendo esta utilizada

como referência para as decisões operacionais de disposição do material.

O controle tecnológico do resíduo foi realizado por meio de:

- Determinação do teor de umidade;
- Controle do grau de compactação pelo método Hilf;
- Monitoramento do grau de compactação obtido na Zona Estrutural;
- Acompanhamento operacional da distribuição do resíduo entre as zonas de disposição.

O Manual de Operações também registra a utilização de ensaios de compactação Proctor Normal como base para definição dos parâmetros geotécnicos de referência utilizados na operação.

3.2. Sistema de Disposição Analisado

O sistema analisado é constituído por uma pilha de disposição de resíduo filtrado operada sob o conceito de dry stacking, no qual o resíduo é transportado, lançado, espalhado e compactado sucessivamente até a conformação da geometria final da estrutura.

Duarte et al. (2022) avaliaram, por meio de ensaios reológicos, o comportamento de resíduo de bauxita filtrado e submetido a diferentes condições de umidade, utilizando amostras coletadas em um depósito de resíduos similar ao deste estudo e evidenciaram, dentre outros resultados, uma maior dispersão dos parâmetros para teores de sólidos superiores a aproximadamente 68%, faixa

interpretada pelos autores como uma possível região de transição, na qual o comportamento puramente viscoso deixa de governar isoladamente a resposta do material. Esses resultados evidenciam a importância do controle no teor de umidade no processo de disposição de resíduos filtrados especialmente em sistemas de disposição a seco, onde as condições do desaguamento, bem como as características do material depositado podem influenciar diretamente seu comportamento durante a disposição e sua posterior evolução estrutural.

O método de disposição é baseado em duas zonas operacionais distintas:

A Zona Estrutural (ZE) corresponde à região responsável pela conformação da estrutura resistente da pilha, sendo submetida a critérios rígidos de controle tecnológico, compactação e umidade.

A Zona Interna (ZI) corresponde à região destinada a conferir flexibilidade operacional ao sistema, especialmente durante períodos de elevada precipitação ou quando as condições do material dificultam sua disposição na Zona Estrutural.

Segundo os critérios geométricos de projeto descritos no Manual de Operações, a pilha apresenta:

- Taludes externos com inclinação de 1V:2H;
- Bermas intermediárias a cada 10 m de altura;
- Largura mínima operacional da Zona Estrutural de 15 m;
- Ângulo global externo aproximado de 22°;

- Alteamentos sucessivos dos diques internos em incrementos de aproximadamente 2 m.

Esses critérios operacionais foram considerados como referência para interpretação dos indicadores monitorados ao longo do período estudado.

3.3. Tratamento Estatístico da Base de Dados

O estudo foi desenvolvido a partir de uma abordagem observacional retrospectiva, utilizando registros diários compreendidos entre 1º de janeiro de 2022 e 31 de dezembro de 2025. O conjunto de dados contemplou uma série temporal contínua de 1.461 dias, abrangendo informações de precipitação pluviométrica, teor de umidade da pilha de rejeitos e volumes de material destinados às diferentes zonas operacionais do sistema de disposição de resíduos, incluindo a zona interna e a zona estrutural.

Após a consolidação da base de dados, foram identificadas 1.459 observações válidas de precipitação. Para as análises envolvendo a umidade da pilha foram obtidos 1.324 pares de observações válidos, enquanto as análises relacionadas aos volumes destinados às diferentes zonas operacionais foram realizadas com 1.459 pares de dados.

3.4. Tratamento e Organização dos Dados

Inicialmente, os registros foram submetidos a procedimentos de verificação e consistência, assegurando a correta ordenação cronológica e a continuidade temporal da série. Os valores ausentes foram mantidos na base de dados e excluídos apenas das análises

específicas que dependiam das respectivas variáveis, sem aplicação de técnicas de imputação.

Com o objetivo de controlar potenciais efeitos sazonais e interanuais, foram incorporadas variáveis categóricas representativas dos meses e dos anos de monitoramento. Para evitar problemas de multicolinearidade, adotou-se o mês de janeiro e o ano de 2022 como categorias de referência. Adicionalmente, foram calculadas variáveis derivadas da precipitação, incluindo o termo quadrático da chuva diária, a precipitação do dia anterior e acumulados móveis correspondentes aos períodos de 3, 7, 15 e 30 dias, considerando sempre o dia corrente.

3.5. Avaliação da Variabilidade Temporal da Precipitação

A variabilidade da precipitação ao longo do período analisado foi investigada mediante a comparação dos valores observados entre os diferentes meses e anos. Para essa finalidade, os dados foram agrupados em 48 combinações resultantes da interação entre os doze meses do ano e os quatro anos de monitoramento.

As diferenças entre os grupos foram avaliadas por meio da Análise de Variância (ANOVA) de um fator, considerando-se como hipótese nula a igualdade das médias de precipitação entre todas as combinações mês-ano. A significância estatística foi verificada a partir da estatística F, calculada pela razão entre a variabilidade explicada pelos grupos e a variabilidade residual.

Como procedimento complementar, foi empregado o teste não paramétrico de Kruskal-Wallis, fundamentado nos postos das observações, possibilitando uma avaliação menos sensível a desvios

de normalidade e à ocorrência de valores repetidos, particularmente frequentes em dias sem precipitação.

3.6. Relação Entre Precipitação, Umidade da Pilha e Destinação de Resíduos

A influência da precipitação sobre o comportamento operacional do sistema foi inicialmente investigada mediante análises de correlação linear e regressões lineares simples. Foram avaliadas as associações entre a chuva diária e cada uma das variáveis-resposta, representadas pelo teor de umidade da pilha, pelo volume destinado à zona interna e pelo volume destinado à zona estrutural.

Posteriormente, foram ajustados modelos de regressão linear múltipla visando controlar simultaneamente os efeitos sazonais e temporais. Em cada modelo, a precipitação foi considerada a variável explicativa principal, enquanto os indicadores mensais e anuais foram incorporados como variáveis de controle. A significância dos coeficientes foi avaliada por meio do teste t bicaudal, adotando-se nível de significância de 5%.

O desempenho dos modelos foi analisado por meio do coeficiente de determinação (R^2), utilizado para quantificar a parcela da variabilidade das variáveis-resposta explicada pelo conjunto de preditores considerados.

3.7. Avaliação de Efeitos Defasados e Acumulados da Precipitação

Considerando que a resposta geotécnica e operacional dos depósitos de rejeitos pode não ocorrer de forma instantânea, foram investigados possíveis efeitos de defasagem temporal da

precipitação. Para tanto, foram analisadas diferentes métricas de exposição hídrica, incluindo a precipitação do próprio dia, a precipitação do dia anterior e os acumulados móveis de 3, 7, 15 e 30 dias.

Os acumulados foram calculados com base na sequência temporal das datas de monitoramento, preservando a coerência cronológica da série. Para cada condição analisada foram estimados coeficientes de correlação, parâmetros de regressão e respectivos níveis de significância, permitindo avaliar a existência de respostas mais associadas à chuva imediata ou ao acúmulo de precipitação ao longo do tempo.

3.8. Análise de Correlação Não Paramétrica

Com o objetivo de verificar a robustez dos resultados obtidos pelas correlações lineares e reduzir a influência de valores extremos, foi aplicada a correlação de Spearman entre a precipitação e as variáveis de interesse. Esse procedimento permite identificar relações monotônicas independentemente da linearidade da associação.

Os postos foram atribuídos considerando a média das posições em casos de empates, enquanto a significância estatística foi determinada por aproximação assintótica, adequada ao tamanho amostral disponível. Os resultados foram comparados com aqueles obtidos pelo coeficiente de Pearson, possibilitando avaliar a consistência das relações identificadas.

3.9. Avaliação de Comportamentos Não Lineares

A possibilidade de relações não lineares entre precipitação e variáveis-resposta foi investigada mediante o ajuste de modelos de regressão quadrática. Nesses modelos foram incluídos tanto o termo linear quanto o termo quadrático da precipitação.

A existência de curvatura significativa foi avaliada a partir da significância estatística do coeficiente associado ao termo de segunda ordem e pelo incremento do coeficiente de determinação em relação ao modelo linear simples. A combinação desses indicadores permitiu verificar se o comportamento das variáveis analisadas era adequadamente representado por relações lineares ou se apresentava padrões de resposta mais complexos.

3.10. Critérios Operacionais de Referência

Os resultados obtidos foram avaliados com base nos critérios operacionais estabelecidos pelo Manual de Operações da instalação estudada.

Foram adotados como valores de referência:

- Umidade mínima operacional: 24,20%;
- Umidade máxima operacional: 29,00%.

Para a disposição dos resíduos, foi estabelecido um balanço de massas, a partir da geração de resíduo seco e úmido, que deve ser disposto ora na Zona Estrutural ora na Zona Interna, a depender da faixa de precipitação, como mostra a Figura 2.

Figura 2. Destino de disposição em função das faixas de precipitação

Faixa de Precipitação	Premissa adotada para a disposição de resíduo
$P < 4 \text{ mm}$	100% do resíduo apresenta condições de ser depositado na zona denominada Zona Estrutural do DRS2.
$4 \text{ mm} < P < 10 \text{ mm}$	50% do resíduo não terá o teor de umidade significativamente afetado, apresentando condições de ser depositado na Zona Estrutural do DRS2; e 50% do resíduo para esta condição de precipitação deverá ser depositado na Zona Interna do DRS2.
$10 \text{ mm} < P < 25 \text{ mm}$	100% do resíduo gerado em dias com essas condições de precipitação deve ser depositado na Zona Interna do DRS2.
$P > 25 \text{ mm}$	100% do resíduo gerado em dias com estas condições de precipitação ser depositado na Zona Interna do DRS2.

Fonte: Manual de Operações (2025).

Esses parâmetros foram utilizados para verificar a aderência operacional dos registros observados durante o período de estudo. De forma preliminar, identificaram-se: (i) 36 dias com umidade real acima do limite operacional de 29,0% (máximo observado de 31,1%); e (ii) 99 dias com umidade real abaixo do limite operacional de 24,2%. Esses desvios pontuais serão caracterizados e discutidos quanto à sua distribuição temporal e possível associação com eventos de precipitação na seção de Análise de Resultados.

3.11. Confidencialidade e Proteção das Informações

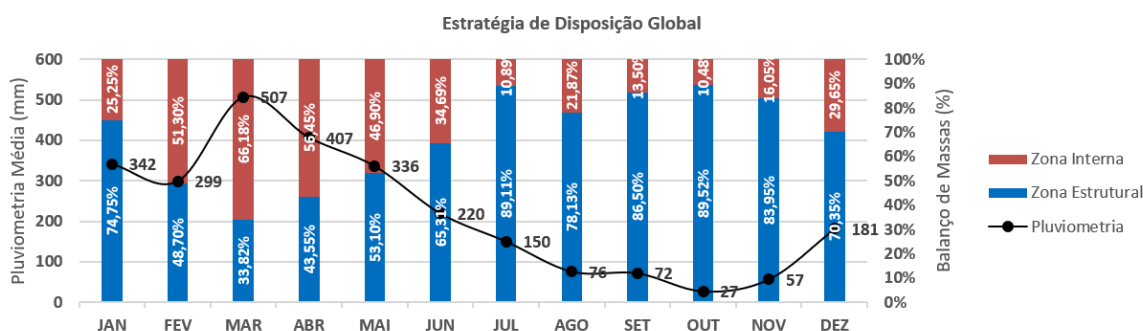
Os dados utilizados neste estudo foram disponibilizados exclusivamente para fins acadêmicos e tratados de forma agregada e anonimizada, observadas as condições de autorização institucional. Foram omitidos o nome da empresa, a identificação da unidade industrial, a localização específica da instalação, códigos internos e demais informações que possam permitir sua identificação direta ou indireta. A publicação deste artigo não implica autorização para acesso, reprodução, redistribuição ou utilização da base de dados operacionais original por terceiros, cuja disponibilização permanece sujeita à autorização de seus legítimos responsáveis.

4. RESULTADOS E DISCUSSÕES OU ANÁLISE DOS DADOS

4.1. Relação Entre Pluviometria e Estratégia de Disposição

Após o tratamento da base de dados foi possível estabelecer algumas tendências de sazonalidade tanto para a pluviometria quanto para a estratégia de disposição dos resíduos, em especial na Zona Estrutural da Pilha, conforme observa-se nos gráficos.

Gráfico 1. Pluviometria x Estratégia de Disposição Global de 2022 a 2025



Fonte: Elaboração própria do autor (2026)

Nota-se que há relação inversamente proporcional entre o volume de chuva mensal e a disposição na Zona Estrutural da pilha. Na série histórica analisada, fica evidente que o período de maior incidência pluviométrica está concentrado entre os meses de fevereiro a maio e, que nesse período, aproximadamente 56% de toda a movimentação de resíduos é destinada para a Zona Interna.

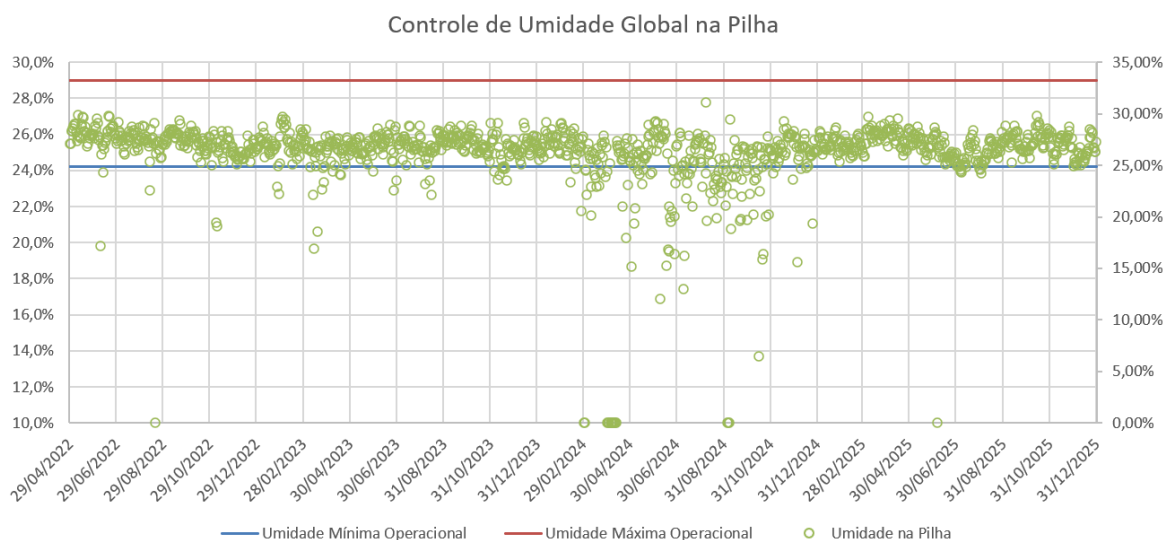
À medida que as chuvas diminuem sua intensidade, a partir do mês de junho, que representa um mês de transição entre os períodos chuvosos e não chuvosos, nota-se uma grande parcela dos resíduos sendo depositados na Zona Estrutural, com 82,91% de representatividade na estratégia operacional. É nesse período que são programados os novos alteamentos da pilha, que, além que

conferirem maior estabilidade à estrutura, representa ganho de contingências operacionais, com o aumento das Zonas não Estruturais que poderão ser utilizadas no próximo período chuvoso.

4.2. Relação Entre Pluviometria e Umidade do Resíduo na Pilha

Também foram analisados os comportamentos do resíduo quanto à sua umidade na pilha, momentos antes da sua disposição, como observa-se no gráfico.

Gráfico 2. Controle de Umidade Global da Pilha



Fonte: Elaboração própria do autor (2026)

O gráfico supracitado mostra a umidade medida em campo em relação às faixas operacionais máximas e mínimas estabelecidas. Ao longo dos quatro anos, a umidade da pilha se manteve, de forma geral, dentro da faixa operacional definida, indicando uma satisfatória efetividade no sistema de controle de umidade do resíduo.

Pontualmente, em 2024, cerca de 24% das amostras estiveram fora do referencial operacional, sendo aproximadamente 87% dessas amostras ficando abaixo dos 24,2% de umidade mínima

preconizada, e 75% presente no período de estiagem, logo, em termos operacionais, o tratamento e correção da umidade em campo tende a ser mais rápido do que se o resíduo estivesse mais saturado do que o limite máximo de 29%.

4.3. Análise Estatística das Variáveis Climáticas e Operacionais

A análise estatística foi conduzida com o objetivo de avaliar a variabilidade temporal da precipitação e investigar sua associação com a umidade da pilha e com a destinação operacional dos resíduos entre a Zona Interna (ZI) e a Zona Estrutural (ZE). Para isso, foram empregados testes de comparação entre grupos, análises de correlação e modelos de regressão descritos na metodologia.

4.3.1. Variabilidade Temporal da Precipitação

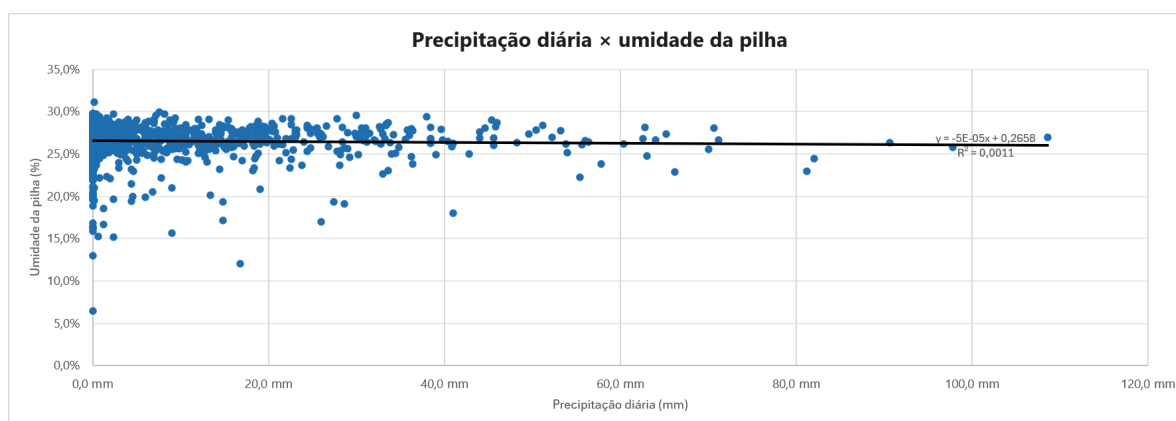
A comparação dos valores de precipitação entre os diferentes períodos avaliados evidenciou diferenças estatisticamente significativas entre os grupos mês-ano analisados. A análise de variância (ANOVA) resultou em $F = 5,912$ ($p < 0,001$), indicando rejeição da hipótese nula de igualdade das médias de precipitação. Resultado semelhante foi obtido pelo teste de Kruskal-Wallis ($H = 515,37$; $p < 0,001$). Esses resultados confirmam a existência de variabilidade temporal significativa da precipitação ao longo da série histórica analisada e reforça a importância de considerar a sazonalidade nas avaliações relacionadas à operação da pilha de resíduo de bauxita.

4.3.2. Relação Entre Precipitação e Umidade da Pilha

As análises realizadas não identificaram relação expressiva entre a precipitação e a umidade da pilha. No modelo ajustado com

controle para mês e ano, o coeficiente associado à precipitação foi $\beta = -0,000112$ ($p = 0,010$). Embora estatisticamente significativo, o efeito observado é considerado de baixa magnitude, indicando limitada relevância prática para explicar a variabilidade da umidade registrada na pilha. Os resultados obtidos indicam que a precipitação, isoladamente, não explica a variação observada nos teores de umidade monitorados ao longo do período analisado.

Gráfico 3. Relação entre a precipitação diária (mm) e a umidade da pilha (%)



Fonte: Fonte: Elaboração própria do autor (2026)

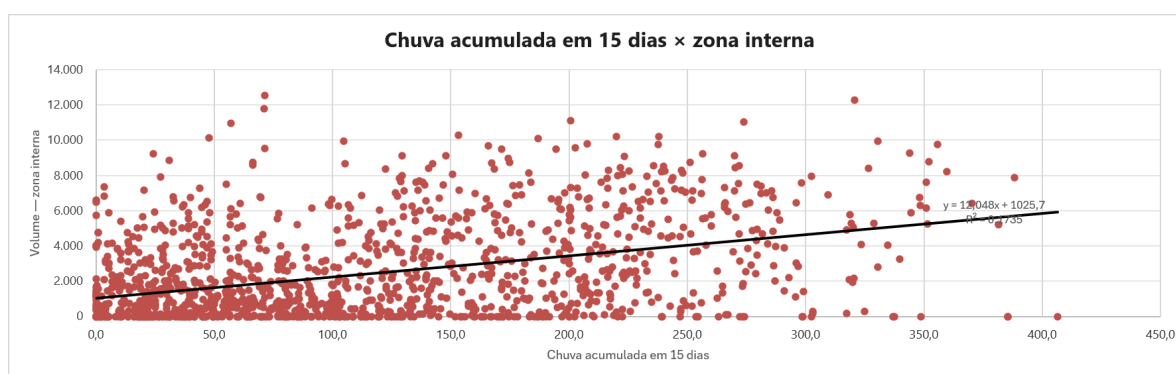
4.3.3. Relação Entre Precipitação e Destinação Operacional dos Resíduos

Em contraste com os resultados observados para a umidade da pilha, foram identificadas associações entre a precipitação e a distribuição da destinação dos resíduos. A correlação de Spearman apresentou valor de $\rho = 0,325$ para a Zona Interna e $\rho = -0,461$ para a Zona Estrutural. Esses resultados indicam associação positiva entre precipitação e destinação para a Zona Interna e associação negativa entre precipitação e destinação para a Zona Estrutural, indicando que períodos de maior precipitação estiveram associados ao aumento da destinação para a zona interna e à redução do direcionamento para a zona estrutural.

4.3.4. Avaliação dos Efeitos Acumulados da Precipitação

A investigação das diferentes métricas de exposição hídrica demonstrou que a precipitação acumulada em 15 dias apresentou as associações mais expressivas com a destinação operacional dos resíduos. Para a Zona Interna foi obtido coeficiente de correlação $r = 0,417$, correspondente a $R^2 = 17,3\%$.

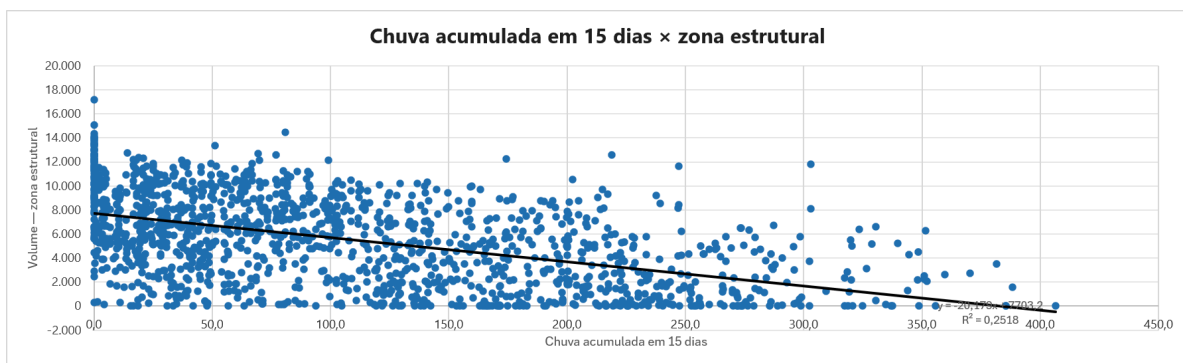
Gráfico 4. Correlação entre precipitação acumulada em 15 dias e destinação para a Zona Interna



Fonte: Elaboração própria do autor (2026)

Para a Zona Estrutural foi observado $r = -0,502$, correspondente a $R^2 = 25,2\%$. Os resultados indicam que a precipitação acumulada em 15 dias apresentou maior associação com a destinação dos resíduos do que as demais métricas avaliadas no estudo.

Gráfico 5. Correlação entre precipitação acumulada em 15 dias e destinação para a Zona Interna



Fonte: Elaboração própria do autor (2026)

Esse achado tem implicação prática direta: como a regra operacional vigente na instalação (Figura 2) baseia a destinação por zona na precipitação do dia corrente, e não em um indicador acumulado, os resultados sugerem que um critério fundamentado na chuva acumulada em 15 dias poderia representar de forma mais robusta a dinâmica de resposta do sistema, constituindo uma direção promissora para o aprimoramento futuro do procedimento operacional.

4.3.5. Síntese dos Resultados

De forma integrada, os resultados indicam que a precipitação apresenta maior associação com a redistribuição da destinação do resíduo do que com a variação direta da umidade da pilha. A precipitação acumulada em 15 dias mostrou-se a variável climática com maior associação às destinações avaliadas, podendo ser utilizada como indicador complementar no planejamento operacional. Entretanto, os valores de R^2 demonstram que a chuva explica apenas parte da variabilidade observada, não sendo suficiente, se observada isoladamente, para representar a dinâmica operacional da estrutura.

Por fim, considerando a não normalidade dos dados e sua natureza temporal, os resultados devem ser interpretados com cautela quanto aos níveis de significância. As relações identificadas

representam associações estatísticas e não evidências de causalidade, devendo sua interpretação ser integrada às demais variáveis operacionais e geotécnicas que condicionam o comportamento da pilha.

5. CONCLUSÃO/CONSIDERAÇÕES FINAIS

O presente estudo analisou, a partir de uma base de dados operacional diária de quatro anos (2022–2025), a relação entre a precipitação característica da Amazônia Oriental e o comportamento operacional de uma pilha de disposição de resíduo de bauxita filtrado, operada sob o sistema de dry stacking.

Os resultados evidenciaram forte sazonalidade do regime pluviométrico local, congruentes com os estudos de Rocha (2025), e apresentou diferenças estatisticamente significativas entre os grupos mês/ano, pelas análises ANOVA e Kruskal-Wallis, confirmando a elevada variabilidade climática típica da região, também apontada por Marengo et al. (2018) e Souza et al. (2025).

Essa sazonalidade se refletiu de forma clara na estratégia operacional da pilha: os meses de maior precipitação (fevereiro a maio) concentraram a maior parte da destinação de resíduo para a Zona Interna, enquanto o período de estiagem, a partir de junho, favoreceu a intensificação da disposição na Zona Estrutural, padrão consistente com a lógica operacional prevista no Manual de Operações da instalação.

Contudo, diferentemente do esperado, a precipitação não se mostrou um preditor de relevância prática para a umidade do resíduo medida em campo, apesar de estatisticamente significativa em alguns modelos ajustados. Esse resultado indica que a umidade

de disposição é governada predominantemente por fatores de processo, como desaguamento por filtro-prensa, controle tecnológico em campo, não considerados neste estudo, e não pela chuva incidente no curto prazo.

Cabe ressaltar que a análise evidenciou elevada efetividade do sistema de controle de umidade observada ao longo da série, visto que a umidade permaneceu, na maior parte do período, dentro da faixa operacional de 24,2% a 29,0%.

Outro fator relevante evidenciado foi a análise de precipitação acumulada, mostrando uma associação consistente com a estratégia de disposição dos resíduos entre as zonas operacionais. A precipitação acumulada de 15 dias apresentou variável de maior poder explicativo identificado, com R^2 de até 25,2% para a Zona Estrutural. Esse resultado sugere que a resposta operacional do sistema está mais associada ao histórico recente de chuva do que a eventos pluviométricos isolados, o que reforça a relevância de indicadores acumulados e não apenas de chuva diária.

Como limitações deste estudo destacam-se: (i) o escopo operacional da análise não incluiu a avaliação de parâmetros geotécnicos mecânicos, como grau de compactação, resistência ao cisalhamento, compressibilidade, permeabilidade, as quais foram mencionadas na revisão bibliográfica, mas não mensuradas nos resultados apresentados; (ii) a ausência, na presente versão, de identificação pública da instalação e de tratamento formal da confidencialidade da fonte de dados.

Para estudos futuros, recomenda-se uma análise conjunta dos parâmetros geotécnicos mecânicos de campo, de modo a integrar

as dimensões operacionais e estruturais do desempenho da pilha.

Em síntese, o presente estudo evidencia que o clima amazônico exerce influência mensurável e estatisticamente robusta sobre a estratégia operacional de disposição do resíduo de bauxita, sobretudo por meio de seu efeito acumulado, e que a integração sistemática de dados climáticos observados à gestão operacional de pilhas de dry stacking constitui uma ferramenta relevante para o aprimoramento da segurança e da eficiência desses sistemas em contextos de elevada pluviosidade, como a Amazônia Oriental.

REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS

BURDEN, R.; WILSON, G. W. **Commingling of Waste Rock and Tailings to Improve "Dry Stack" Performance: Design and Evaluation of Mixtures.** Minerals, v. 13, n. 2, p. 295, 2023.

DLADLA, S. D.; RAMSAMY, S. **Practical steps to Global Industry Standard on Tailings Management (GISTM) compliance for operational tailings storage facilities in South Africa.** Journal of the Southern African Institute of Mining and Metallurgy, 2022.

DUARTE, J. P.; ALFENAS DA SILVA, P. H.; CATALDI, P.; CHÁCARA, D.; VIEIRA DA COSTA, R. **Rheological Characterization of Filtered Bauxite Residue.** In: TRAVAUX 51, Proceedings of the 40th International ICSOBA Conference, Athens, 2022.

EVANS, K. **The History, Challenges, and New Developments in the Management and Use of Bauxite Residue.** Journal of Sustainable Metallurgy, v. 2, p. 316–331, 2016.

FILIPPOUSI, A.; SAMOUHOS, M.; BARTZAS, G. **Comparative Life Cycle Assessment of Management and Valorization Practices for Bauxite Residue.** *Earth: Environmental Sustainability*, v. 1, n. 1, p. 102–113, 2025.

FISCH, G.; VENDRAME, I. F.; HANAOKA, P.C.M. **Variabilidade espacial da chuva durante o experimento LBA/TRMM 1999 na Amazônia.** *Acta Amazônica*, v.37 p.583 590, 2007.

GOMES, H. I. et al. **Alkaline residues and the environment: a review of impacts, management practices and opportunities.** *Journal of Cleaner Production*, v. 112, p. 3571–3582, 2016.

GUTIERREZ, C. B. B.; SOUZA, E. B. de; GUTIERREZ, D. M. G. **Global/Regional Impacts on Present and Near-Future Climate Regimes in the Metropolitan Region of Belém, Eastern Amazon.** *Atmosphere*, 2022.

HAWKEY, A.; CAVALLI, D.; FRITZKE, I. **Dry Stacking – Filtration of Bauxite Residue with Filter Presses.** In: TRAVAUX 47, Proceedings of the 36th International ICSOBA Conference, Belém, 2018.

JONES, H.; BOGER, D. V. **Sustainability and Waste Management in the Resource Industries.** *Industrial & Engineering Chemistry Research*, v. 51, n. 31, p. 10057-10065, 2012. DOI: <https://doi.org/10.1021/ie202611z>.

LEÃO, S. R.; SANTIAGO, A. M. dos S. **Tailings dam scenario: knowing to avoid new catastrophes.** *São Paulo*, v.25, 2022.

LI, G.; LIU, J.; YI, L.; LUO, J.; JIANG, T. **Bauxite residue (red mud) treatment: current situation and promising solution.** *Science of*

the Total Environment, v. 948, art. 174757, 2024.

MANUAL DE OPERAÇÕES. [S.l.: s.n.]. Documento técnico interno não publicado, 2025.

MARENGO, J. A. et al. **Changes in Climate and Land Use Over the Amazon Region: Current and Future Variability and Trends.** Frontiers in Earth Science, v. 6, art. 228, 2018.

MOREIRA, A. L. M.; YAMANAKA, F. M.; TEIXEIRA, M. R. **Definição de limites de tolerância para níveis de emergência utilizando turbidímetros no monitoramento on-line em barragens de mineração.** RECIMA21 - Revista Científica Multidisciplinar - ISSN 2675-6218, 7(5), e757831, 2026. DOI: <https://doi.org/10.47820/recima21.v7i5.7831>

NEWSON, T.; DYER, T.; ADAM, C.; SHARP, S. **Effect of Structure on the Geotechnical Properties of Bauxite Residue.** Journal of Geotechnical and Geoenvironmental Engineering, v. 132, n. 2, p. 143–151, 2006.

NIKRAZ, H. R.; BODLEY, A. J.; COOLING, D. J.; KONG, P. Y. L.; SOOMRO, M. **Comparison of Physical Properties between Treated and Untreated Bauxite Residue Mud.** Journal of Materials in Civil Engineering, v. 19, n. 1, p. 2–9, 2007.

OLIVEIRA, S. S. de J. de; RODRIGUES, A. dos S.; MATOS, L. G. H.; YAMANAKA, F. M.; RODRIGUES, A. dos S.; TEIXEIRA, M. R. **Evaluation of the Susceptibility to Liquefaction of the Foundation Material of a Tailings DAM.** Revista de Gestão Social e Ambiental, São Paulo (SP), v. 19, n. 8, p. e013205, 2025. DOI: <https://doi.org/10.24857/rgsa.v19n8-067>.

OLIVEIRA, T. et al. **Caracterização E Variabilidade Climática Baseada Em Séries De Temperatura E Precipitação Nos Municípios De Manaus (AM) E Belém (PA).** [S.L.]: Entre Lugar, 2021.

PACHECO, Fernando António Leal et al. **Tailings dam failures in Brazil: River contamination, ecosystem recovery, and institutional responses to the Mariana and Brumadinho disasters.** Current Opinion in Environmental Science & Health, v. 47, art. 100654, 2025. DOI: <https://doi.org/10.1016/j.coesh.2025.100654>.

POWER, G.; GRÄFE, M.; KLAUBER, C. **Bauxite residue issues: I. Current management, disposal and storage practices.** Hydrometallurgy, v. 108, p. 33–45, 2011.

REDDY, P. S. et al. Properties and Assessment of Applications of Red Mud (Bauxite Residue): Current Status and Research Needs. Waste and Biomass Valorization, v. 12, p. 1185–1217, 2021.

ROCHA, Y. A. S.; LIMA, A. M. M.; SILVA, C. M. S.; FRANCO, V. S.; RAIOL, L. L.; OLIVEIRA, I. S.; DIAS, M. L. N.; BELTRÃO JÚNIOR, P. R. E. **Hydro-meteorological dynamics of rainfall erosivity risk in the Amazon River Delta-Estuary.** Journal of Water and Climate Change, v. 16, n. 5, p. 1673, 2025. DOI: 10.2166/wcc.2025.544

RODRIGUES, A. DOS S., YAMANAKA, F. M., GARCIA, V. H. B., & TEIXEIRA, M. R. **Análise multidisciplinar aplicada à perícia ambiental na Foz do Rio Amazonas.** Caderno Pedagógico, 22(12), e20899, 2025. DOI: <https://doi.org/10.54033/cadpedv22n12-231>

SILVA, V. B. et al. **The Use of Geotechnologies in Environmental Expert Reports: an Analysis of the Application of Tools That Contribute to the Support of Environmental Expert Reports in**

Cases of Meteorological Disasters in Pará. Revista De Gestão Social E Ambiental, 19(12), e013700. <https://doi.org/10.24857/rgsa.v19n12-012>

SOUZA, E. B. de et al. **Observational Evidence of Intensified Extreme Seasonal Climate Events in a Conurbation Area Within the Eastern Amazon.** Earth, v. 6, art. 112, 2025.

YAMANAKA, F. M., MOREIRA, A. L. M., & TEIXEIRA, M. R. **Avaliação por método dos elementos finitos de estratégias de reforço de estruturas de concreto armado sujeitas a altos gradientes térmicos na indústria do alumínio primário.** RECIMA21 - Revista Científica Multidisciplinar - ISSN 2675-6218, 7(6), e768250, 2026. DOI: <https://doi.org/10.47820/recima21.v7i6.8250>

YAMANAKA, F. M., RODRIGUES, A. DOS S., GARCIA, V. H. B., & TEIXEIRA, M. R. **Application of Electrical Resistivity Tomography with Pole-Dipole Arrangement in Environmental Expertise at the Mouth of the Amazon River.** Revista De Gestão Social E Ambiental, 19(11), e013748, 2025. DOI: <https://doi.org/10.24857/rgsa.v19n11-019>

YAMANAKA, F. M.; SOUZA, R. M. D.; TEIXEIRA, M. R. **Experimental-numerical comparative study of thermal deformations of a reinforced concrete outer wall of the anode block cooking chamber in the primary aluminum industry.** Revista IBRACON de Estruturas e Materiais, [S.l.], v. 18, n. 4, p. e18406, 2025. DOI: <https://doi.org/10.1590/S1983-41952025000400006>.

YAMANAKA, F. M.; SOUZA, R. M. de; TEIXEIRA, M. R. **Análise das propriedades térmicas de uma parede de concreto armado submetido a temperaturas extremas.** Contribuciones a las Ciencias Sociales, [S. l.], v. 17, n. 13, p. e13277, 2024. DOI: <https://doi.org/10.55905/revconv.17n.13-045>

¹ Mestrando em Engenharia de Barragens e Gestão Ambiental na Universidade Federal do Pará (UFPA) *Campus Tucuruí*. ORCID: <https://orcid.org/0009-0004-6374-9710>. E-mail: [acesse o artigo original para visualizar o e-mail](#)

² Mestranda em Engenharia de Barragens e Gestão Ambiental na Universidade Federal do Pará (UFPA) *Campus Tucuruí*. ORCID: <https://orcid.org/0009-0009-8735-7988>. E-mail: [acesse o artigo original para visualizar o e-mail](#)

³ Mestrando em Engenharia de Infraestrutura e Desenvolvimento Energético na Universidade Federal do Pará (UFPA) *Campus Tucuruí*. ORCID: <https://orcid.org/0009-0006-1146-7951>. E-mail: [acesse o artigo original para visualizar o e-mail](#)

⁴ Mestranda em Engenharia de Barragens e Gestão Ambiental na Universidade Federal do Pará (UFPA) *Campus Tucuruí*. ORCID: <https://orcid.org/0009-0003-4148-9607>. E-mail: [acesse o artigo original para visualizar o e-mail](#)

⁵ Mestranda em Engenharia de Barragens e Gestão Ambiental na Universidade Federal do Pará (UFPA) *Campus Tucuruí*. E-mail: [acesse o artigo original para visualizar o e-mail](#)

⁶ Pós-doutor em Geologia e Geotecnia na Universidade Federal do Pará (UFPA). ORCID: <https://orcid.org/0000-0002-3294-7368>. E-mail: [acesse o artigo original para visualizar o e-mail](#)