



Monitoramento do Assoreamento em Reservatórios Utilizando Inteligência Artificial

Marta Pereira da Luz - Renato Marques Cabral - Alexandre de Castro
CREA Nº 10015D-GO CREA Nº 10548D-GO CREA Nº 8306D-GO

Maria José Pereira Dantas - Luciano Ferreira Ribeiro
DATA SCIENTIST CREA Nº 1020341912AP-GO

Reservatório UHE Itumbiara, Rio Paranaíba - GO



**PUC
GOIÁS**



CREA-GO
Conselho Regional de Engenharia
e Agronomia de Goiás



FURNAS

O presente produto de caráter inovador deriva do Projeto de Pesquisa, Desenvolvimento e Inovação (P&D+I) da Agência Nacional de Energia Elétrica (ANEEL) - PD.0394-1705/2017, cuja etapa foi desenvolvida pela Pontifícia Universidade Católica de Goiás (PUC Goiás), com apoio financeiro e institucional da Eletrobras Furnas.

Neste documento são apresentados etapas e resultados obtidos no ambicioso Projeto de Monitoramento do Assoreamento de Reservatórios Utilizando Inteligência Artificial para fins de controle de processos erosivos no âmbito de empreendimentos com grandes reservatórios, a fim de concorrer ao Prêmio CREA de Meio Ambiente, na categoria Inovação, 21ª Edição/2023.

PD.0394-1705/2017: *“Modelagem em Diversas Escalas da Geração de Sedimentos em Erosões e o Aporte em Reservatórios de UHEs.”*

ELETROBRAS.COM | FURNAS.COM.BR

Departamento de Segurança de Barragens e Tecnologia

Rodovia BR 153 km 510

Aparecida de Goiânia - GO

CEP: 74.923-650

FONE: PABX (62) 3239-6314

Agosto de 2023

EQUIPE DE PROJETO



Marta Pereira da Luz

Eng^a Civil, Divisão de Tecnologia em Engenharia Civil e Hidráulica da Eletrobras (CREA N° 10015D-GO)



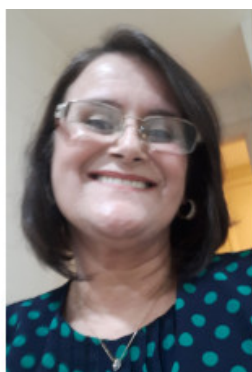
Renato Marques Cabral

Eng^o Civil, Departamento de Segurança de Barragens e Tecnologia da Eletrobras (CREA N° 10548D-GO)



Alexandre de Castro Pereira

Eng^o Civil, Divisão de Tecnologia em Engenharia Civil e Hidráulica de Furnas (CREA N° 8306D-GO)



Maria José Pereira Dantas

Data Scientist, Docente do Mestrado de Engenharia de Produção e Sistemas PUC-GO



Luciano Ferreira Ribeiro

Eng^o Civil, Departamento de Segurança de Barragens e Tecnologia da Eletrobras (CREA N° 1020341912D-GO)





Sumário

1	RELEVÂNCIA	5
2	VIABILIDADE TÉCNICA E ECONÔMICA	6
2.1	Usinas Hidrelétricas	7
2.2	Monitoramento Sedimentométrico	8
2.3	Inteligência Artificial	9
2.4	Painel de Controle	11
3	IMPACTO SOCIAL E AMBIENTAL	13
4	POTENCIAL DE DIFUSÃO	14
5	ORIGINALIDADE	15

1. RELEVÂNCIA

Os reservatórios são fundamentais para a manutenção, distribuição e gestão dos recursos hídricos no Brasil. Eles ajudam a armazenar água para o abastecimento, a irrigação e a geração de energia elétrica. Além disso, os reservatórios também auxiliam no controle das enchentes e secas.

Neste contexto, o Projeto de Monitoramento do Assoreamento de Reservatórios Utilizando Inteligência Artificial surgiu como uma iniciativa inédita e importante para a preservação dos recursos hídricos brasileiros. O projeto utiliza modelos de Machine Learning para processar grandes volumes de dados meteorológicos e hidrográficos. Isso previne erros comuns em cálculos para o monitoramento do assoreamento de reservatórios, o que é fundamental para a garantia da sua segurança e eficiência.

O projeto é ainda mais relevante diante da carência de soluções apropriadas à realidade nacional. A maioria dos modelos de Monitoramento do Assoreamento de Reservatórios disponíveis no mercado é pensada para países desenvolvidos, com características hidrológicas diferentes das brasileiras. Nesta lacuna, o produto busca desenvolver um modelo específico para o Brasil, que seja capaz de atender às necessidades do país.

Desta forma, o presente projeto contribui de forma definitiva para a melhoria da qualidade de vida e do desenvolvimento econômico do Brasil, pois atua na manutenção e qualidade da água, da irrigação e da geração de energia elétrica, garantindo a segurança e eficiência dos reservatórios, o que terá um impacto positivo na vida de milhões de brasileiros.

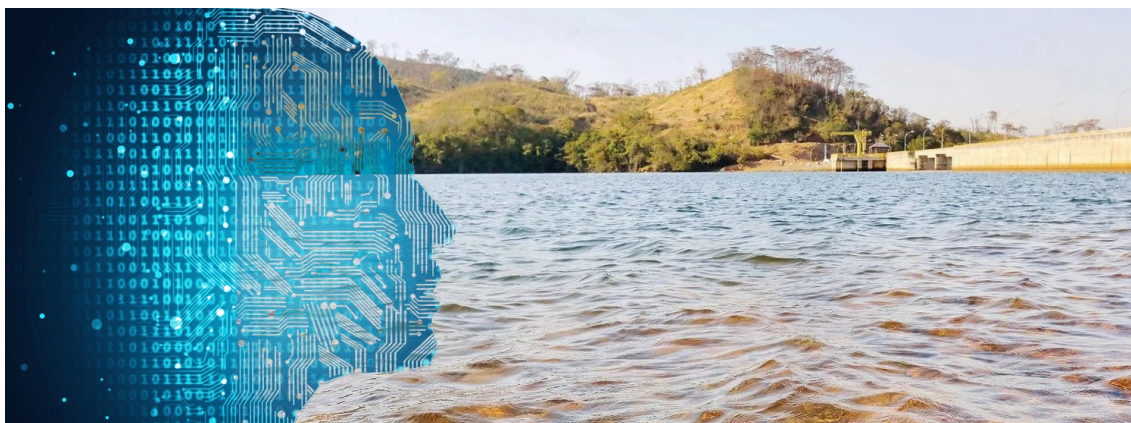
Figure 1.1: Reservatório da UHE Itumbiara e o Processo Erosivo em Área de Borda



2. VIABILIDADE TÉCNICA E ECONÔMICA

A inteligência artificial (IA) estuda a criação de agentes inteligentes, que são sistemas que podem raciocinar, aprender e agir de forma autônoma. A IA tem sido usada em uma variedade de aplicações, incluindo reconhecimento de fala, visão computacional, robótica e jogos. Então porque não expandir seu uso, adaptando seus modelos para a gestão sustentável dos recursos hídricos do país e fazer o Monitoramento do Assoreamento de Reservatórios?

Figure 2.1: Reservatório do Ribeirão João Leite - Goiás



Esse foi o grande desafio desse projeto e para enfrentá-lo foram experimentados vários modelos de Machine Learning, utilizando Scikit-learn. Essa é uma biblioteca gratuita e de código aberto para aprendizado de máquina em linguagem Python, com uma ampla gama de recursos para classificação, regressão e agrupamento de dados. Sem dúvidas, essa é uma das bibliotecas mais populares de Machine Learning disponíveis e é usada por engenheiros e cientistas de dados em todo o mundo.



A utilização de modelos de machine learning traz consigo diversas vantagens que impactam diretamente a viabilidade técnica e econômica do projeto em questão. Essas vantagens podem ser resumidas da seguinte forma:

- **Gratuitos e de código aberto:** Os modelos de machine learning utilizados são de acesso gratuito e têm código aberto, o que facilita sua implementação e customização de acordo com as necessidades específicas do projeto;
- **Amplamente utilizados e populares:** Esses modelos são amplamente reconhecidos e adotados na comunidade científica, garantindo sua confiabilidade e eficácia comprovadas em várias aplicações;
- **Facilidade de uso:** A facilidade de utilização dos modelos é uma característica notável, permitindo que mesmo usuários com menos experiência na área possam empregá-los com sucesso;
- **Documentação abrangente:** A disponibilidade de documentação abrangente facilita a compreensão e implementação dos modelos, reduzindo a curva de aprendizado e acelerando o processo de desenvolvimento;
- **Funções de pré-processamento e avaliação:** Os modelos oferecem uma variedade de funções que simplificam o pré-processamento de dados e a avaliação dos resultados, tornando o processo mais eficiente e preciso.

Todas essas características conferem ao projeto "Monitoramento do Assoreamento de Reservatórios Utilizando Inteligência Artificial" um alto potencial para ser aplicado nos maiores reservatórios do Brasil. Isso inclui tanto empreendimentos destinados ao consumo e irrigação, como também as Usinas Hidrelétricas (UHEs) do sistema Eletrobras, por exemplo.

A Eletrobras, por sua vez, é uma das maiores geradoras de energia elétrica do Brasil e do mundo, com uma capacidade geradora equivalente a 23% do total instalado no país, e poderia se beneficiar significativamente com a implementação deste projeto. Para exemplificar o funcionamento do modelo, será demonstrado como foi feito o monitoramento do assoreamento nos reservatórios em 2 de suas principais usinas: UHEs Itumbiara e Batalha.

2.1 Usinas Hidrelétricas

A UHE Itumbiara (Figura 2.2), localizada no rio Paranaíba entre os municípios de Itumbiara-GO e Araporã-MG, teve início de sua construção em 1974 e em 1980, entrou em operação. Hoje, é uma das maiores usinas do Brasil, cujo reservatório possui cerca de 800 km², banha 47 municípios e tem capacidade instalada de 2.082 MW.



Figure 2.2: UHE Itumbiara



Figure 2.3: UHE Batalha

Já a UHE Batalha (Figura 2.3) está localizada no rio São Marcos, entre os municípios de Cristalina (GO) e Paracatu (MG), e tem capacidade instalada de 52,5 MW - energia suficiente para abastecer uma cidade de 130 mil habitantes. Com entrada em operação em maio de 2014, o empreendimento tem uma barragem de 50 m de altura. Ela fecha o Vale do Rio São Marcos, dando origem a uma represa de 138 km².

2.2 Monitoramento Sedimentométrico

Para subsidiar o projeto utilizou-se como base de dados as medições de descargas líquida e sólida, realizadas em estações hidrossedimentológicas em regiões de interesse dos reservatórios das UHEs Batalha e Itumbiara (Tabela 2.1 e Figura 2.4), onde foram coletadas as amostras analisadas ao longo de mais de 10 anos de controle.

Table 2.1: Estações Hidrossedimentológicas da UHE Batalha

Reservatório	Estação	Rio	Coordenadas	
			Latitude	Longitude
UHE Batalha	Montante 1	Rio São Marcos	16° 45' 28"S	47° 14' 03"W
UHE Batalha	Montante 2	Rio São Marcos	16° 30' 41"S	47° 27' 10"W
UHE Batalha	Campo Alegre	Rio São Marcos	17° 30' 15"S	47° 33' 24"W
UHE Itumbiara	PB007	Rio Paranaíba	18° 25' 24"S	48° 03' 55"W
UHE Itumbiara	PB009	Rio Jordão	18° 35' 38"S	48° 07' 58"W
UHE Itumbiara	PB021	Rio Araguari	18° 34' 54"S	48° 31' 38"W
UHE Itumbiara	EDS001	Ribeirão Pirapetinga	18° 19' 05"S	48° 08' 48"W
UHE Itumbiara	EDS002	Rio Veríssimo	18° 15' 40"S	48° 18' 41"W
UHE Itumbiara	EDS003	Ribeirão Araras	18° 25' 20"S	48° 21' 14"W
UHE Itumbiara	EDS004	Rio Corumbá	17° 59' 55"S	48° 33' 05"W
UHE Itumbiara	EDS005	Rio Piracanjuba	18° 08' 19"S	48° 51' 06"W
UHE Itumbiara	PNB040	Rio Paranaíba	18° 19' 41"S	48° 33' 51"W

Figure 2.4: Mapa de Localização das Estações Hidrossedimentológicas



Basicamente, o processo de coleta de amostras (Figura 2.7) implica no deslocamento de uma equipe técnica para as estações apresentadas na tabela 2.1. Nesta ocasião, amostradores (Figura 2.5 e Figura 2.6) são lançados ao longo de toda a sessão transversal do rio e para cada mergulho desses equipamentos, eles recolhem material de suspensão e leito que depois é enviado para o laboratório, onde são realizados ensaios para o cálculo de concentração e descarga sólida de sedimentos. São esses valores que vão alimentar os modelos de Inteligência Artificial do projeto.

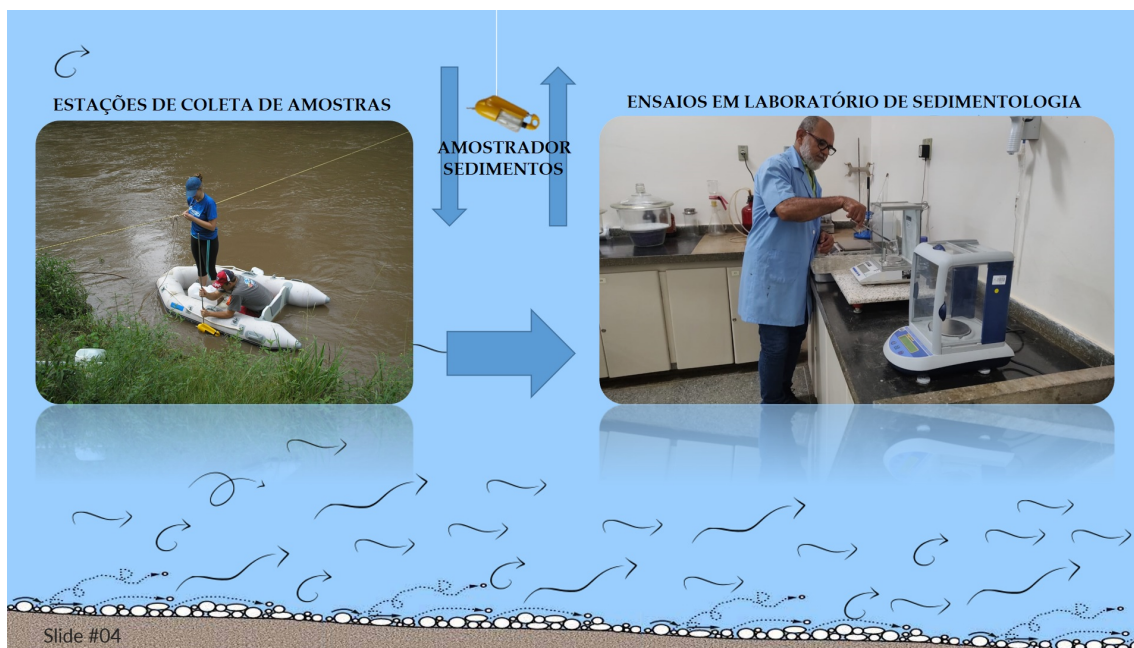


Figure 2.5: Coleta de Sedimentos em Suspensão - Modelo de Amostrador 01



Figure 2.6: Coleta de Sedimentos em Suspensão - Modelo de Amostrador 02

Figure 2.7: Coleta de Amostras de Sedimentos e Ensaios de Laboratórios



2.3 Inteligência Artificial

Os modelos de Machine Learning foram essenciais para o projeto "Monitoramento do Assoreamento de Reservatórios Utilizando Inteligência Artificial". A modelagem poderia ser feita usando uma variedade de técnicas, porém após testes minuciosos, chegou-se à conclusão que as metodologias mais aderentes ao conjunto de dados sedimentométricos foram:

- **Ordinary Least Squares (OLS)**

O Ordinary Least Squares, ou Mínimos Quadrados Ordinários em português, é um dos modelos mais simples e amplamente utilizados de Machine Learning. O objetivo é ajustar uma linha reta aos dados, minimizando a soma dos quadrados das diferenças entre os valores

preditos pelo modelo e os valores reais. O método assume que os erros têm distribuição normal e são independentes e identicamente distribuídos.

- **Ridge Regression**

A Regressão Ridge é uma extensão da regressão linear que adiciona um termo de regularização ao somatório dos quadrados dos resíduos. Essa penalização é controlada por um parâmetro chamado de parâmetro de regularização. Essa técnica é útil quando os dados são multicolineares, ou seja, quando existe uma alta correlação entre as variáveis preditoras, evitando assim a instabilidade numérica na estimativa dos coeficientes.

- **Theil-Sen Regression**

A Theil-Sen Regression é um modelo de regressão robusto que lida melhor com dados contaminados por outliers. Em vez de ajustar uma única linha aos dados, o modelo calcula todas as inclinações possíveis entre todos os pares de pontos e, em seguida, toma a mediana dessas inclinações como a inclinação final da reta. Isso o torna mais resistente a pontos discrepantes e mais adequado para dados que não seguem uma distribuição normal.

- **Isotonic Regression**

A Regressão Isotônica é um método não paramétrico usado para ajustar uma função monotônica aos dados. Monotônica significa que a função cresce ou decresce sem mudanças de direção. O modelo encontra a melhor função monotônica que minimiza as diferenças entre os valores preditos e os valores reais, sujeito à condição de monotonicidade. É frequentemente usado quando a relação entre as variáveis não é linear e a monotonicidade é uma propriedade desejada nos resultados.

Figure 2.8: Machine Learning: Modelos de IA Para Monitoramento do Assoreamento de Reservatórios



O maior valor agregado dos modelos de Inteligência Artificial para o projeto, sem dúvida, é a geração das Curvas de Sedimentos (Figura 2.9 e Figura 2.10). Cada curva é calculada de acordo com a metodologia de machine Learning adotada. Na curvas de sedimentos, pode-se observar os métodos ordinary least-squares regression (OLS) e ridge regression (RR), cada um representado por uma curva com eixos em escala logarítmica, onde cada ponto representa uma amostra ensaiada. Os modelos, logicamente, quase se sobrepõem, porém a mínima diferença de inclinação de uma curva para outra pode significar uma tomada de decisão diferente para os gestores dos reservatórios.

Figure 2.9: UHE Itumbiara: Modelos de Inteligência Artificial para Curva de Sedimentos com 102 amostras de sedimentos

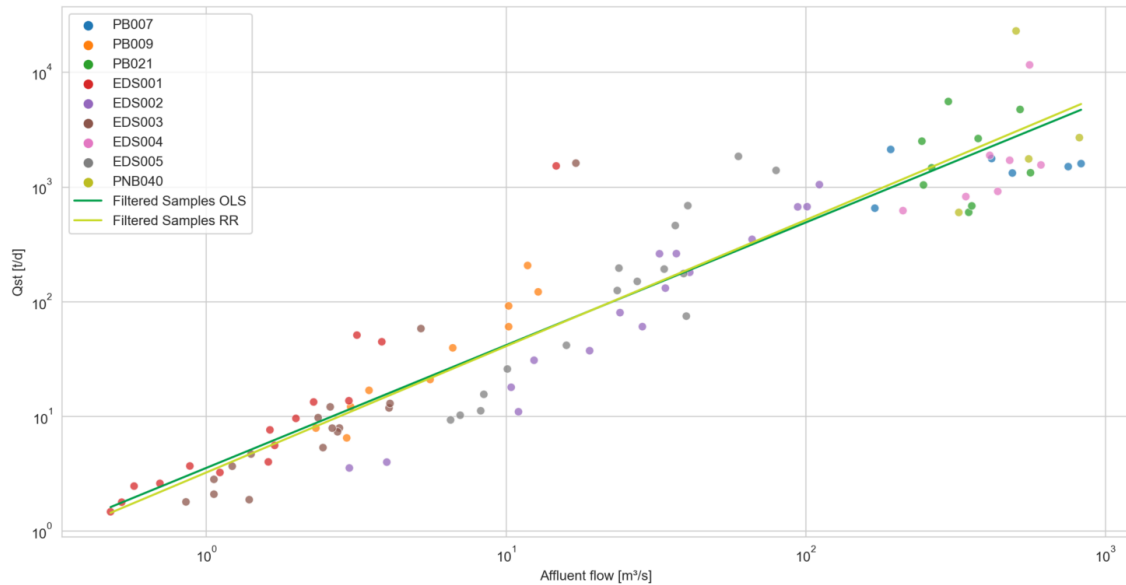
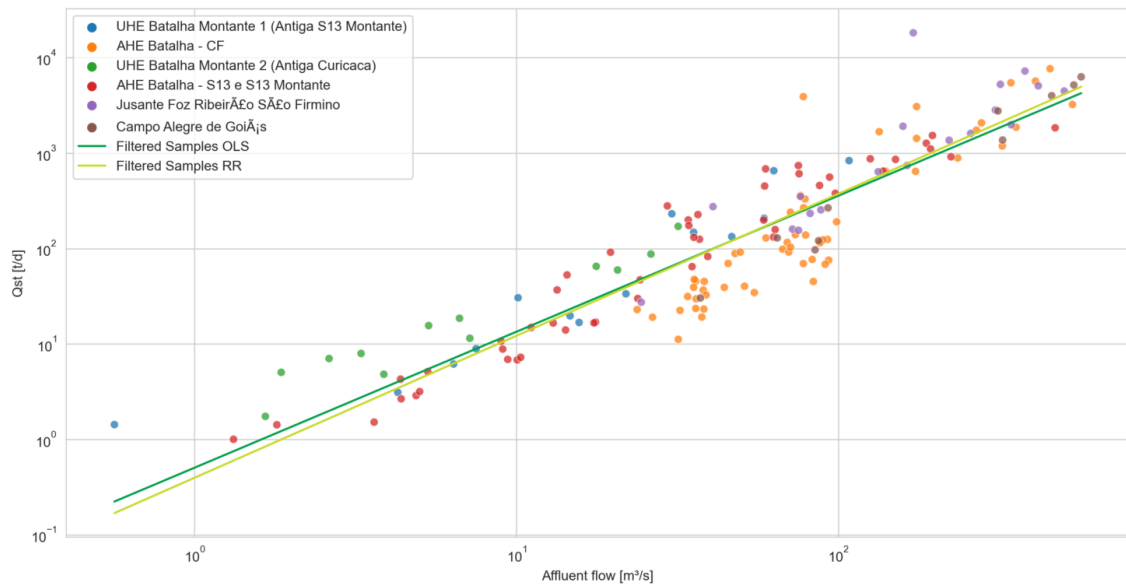


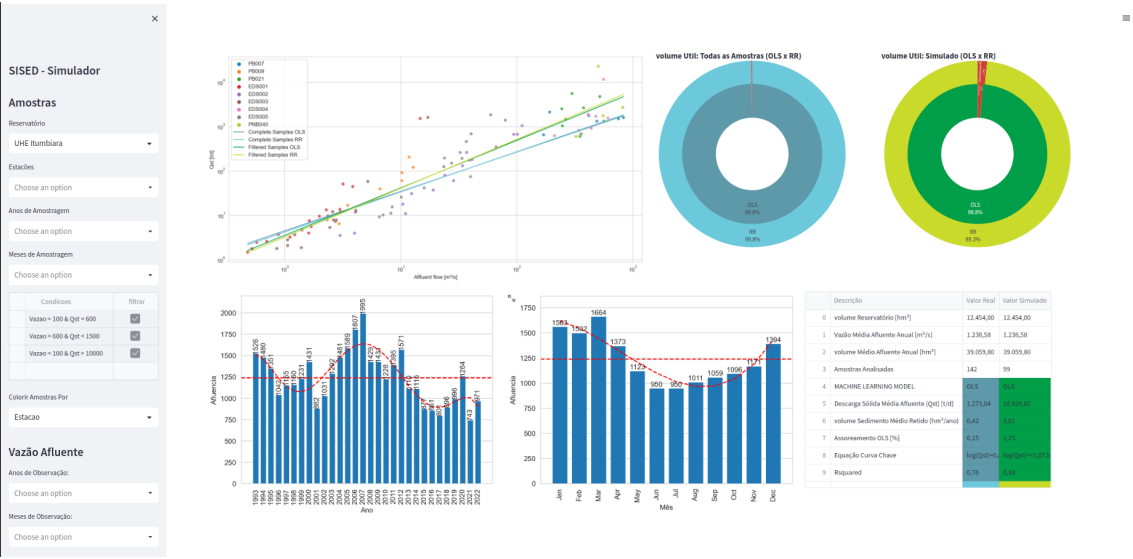
Figure 2.10: UHE Batalha: Modelos de Inteligência Artificial para Curva de Sedimentos com 161 amostras de sedimentos



2.4 Painel de Controle

Um painel foi desenvolvido, como produto do projeto "Monitoramento do Assoreamento de Reservatórios Utilizando Inteligência Artificial", utilizando o framework Streamlit (Figura 5.1). Este painel combina elementos visuais e informações relevantes apresentadas em tabelas, fornecendo uma visão clara e concisa da dinâmica de sedimentos em projetos cadastrados. Sua importância reside na capacidade de transformar dados complexos em insights compreensíveis, além das tradicionais linhas e colunas de uma tabela. Por meio do painel, os gestores podem tomar decisões estratégicas à medida que ganham uma compreensão real do estado atual dos reservatórios. Além disso, vários controles foram implementados para transformar o painel em um simulador, onde diferentes cenários representando mudanças climáticas podem ser testados, antecipando possíveis

transformações futuras na natureza. O objetivo é identificar maneiras de alocar recursos de forma mais eficiente na gestão de reservatórios, antecipando essas mudanças.





3. IMPACTO SOCIAL E AMBIENTAL

O ser humano depende de reservatórios há mais de 4.000 anos. Desde o princípio, as barragens já eram construídas e destinadas para usos múltiplos e como finalidades principais, podemos citar: o consumo, o lazer, o controle de vazões durante as cheias dos rios e, também a geração de energia elétrica que, permitiu que as indústrias pudessem expandir suas produções, além de ajudarem a alavancar a sociedade ao seu atual estágio evolutivo.

Assim, fica claro que a gestão sustentável desses reservatórios é essencial para a existência do homem como sociedade. Isso significa usá-los de forma que não esgotem os recursos naturais e não afetem negativamente o meio ambiente. A gestão sustentável de reservatórios só pode ser alcançada se houver um equilíbrio entre as necessidades da sociedade e as necessidades do meio ambiente.

Assim, o projeto "Monitoramento do Assoreamento de Reservatórios Utilizando Inteligência Artificial" é uma iniciativa que visa minimizar os efeitos nocivos do Assoreamento. Essas ações são necessárias porque a construção de barragens, e consequente formação de um reservatório, são intervenções muito bruscas do homem no meio ambiente, pois alteram desde o ciclo hidrológico da região, até mesmo a velocidade do fluxo do rio e a capacidade natural de transporte de sedimentos, ou seja, a própria dinâmica natural do curso d'água é impactada. Dessa forma, se os níveis dos reservatórios, assim como seus processos erosivos e transporte de sedimentos não forem adequadamente monitorados, pode haver o descontrole do assoreamento e a diminuição de sua capacidade produtiva.

Estes eventos podem culminar, inclusive, com o final da vida útil de um reservatório, que coincide com o momento em que o acúmulo de sedimentos é tamanho que se torna inviável seu aproveitamento para qualquer fim.



É fato que um melhor monitoramento dos reservatórios proporciona uma diminuição na necessidade de construção de novas barragens que causam diversos impactos socioambientais, além de auxiliar na segurança hídrica e energética.



4. POTENCIAL DE DIFUSÃO

O projeto "Monitoramento do Assoreamento de Reservatórios Utilizando Inteligência Artificial" já foi implantado em alguns empreendimentos, alcançando resultados impressionantes. Neste documento, foram apresentados resultados referentes aos testes realizados para os reservatórios das usinas de Batalha e Itumbiara, ambas sob administração da Eletrobras.

Como este projeto foi concebido como uma solução multi-reservatórios, a intenção é continuar com a implantação deste modelo para outros empreendimentos estratégicos para a sociedade, incluindo: Tucuruí, Jirau, Belo Monte, Itaipu, Sobradinho, Furnas, Porto Primavera, Itaparica e Xingó, por exemplo.

Os reservatórios dessas usinas são importantes para o abastecimento, pesca e controle das cheias, onde toda a sociedade é impactada, mas as comunidades vizinhas são especialmente beneficiadas. Além disso, esses reservatórios são responsáveis por cerca de 60% da energia elétrica consumida no Brasil. Elas estão localizadas em diferentes regiões do país, mas a maioria está na região Norte e a expectativa com essa iniciativa é de que haja:

- **Aumento da eficiência na produção de energia elétrica;**
- **Redução dos custos operacionais;**
- **Melhora da qualidade da água;**
- **Preservação do meio ambiente;**
- **Geração de empregos.**



Figure 4.1: Tucuruí



Figure 4.2: Sobradinho



Figure 4.3: Itaipu

A difusão deste projeto é um importante passo para o desenvolvimento sustentável do Brasil.

5. ORIGINALIDADE

O projeto "Monitoramento do Assoreamento de Reservatórios Utilizando Inteligência Artificial" é ainda mais relevante diante da carência de soluções apropriadas à realidade nacional. A maioria dos modelos disponíveis no mercado é obsoleta e ainda pensada para países de primeiro mundo, com características hidrológicas diferentes das brasileiras.

No Brasil, por exemplo, o clima, regime tropical de chuvas, solo, geomorfologia, cobertura vegetal, entre outros aspectos, são completamente diferentes. Isso vem gerando distorções nos resultados e decisões equivocadas podem ser tomadas.

Nesta lacuna, o presente projeto surge como uma solução nacional e foca em um modelo específico, aderente aos nossos parâmetros e estruturados para nossa realidade natural, melhorando o nosso entendimento da erosão do solo e do processo de assoreamento em nossos reservatórios em menos tempo e com menor investimento.

Seus resultados ainda podem até mesmo serem utilizados para a calibração de outros modelos, como o SWAT, que são adotados por cientistas em outros países, alterando o papel do Brasil de importador para exportador de tecnologia.



Figure 5.1: Inspeção Reservatório Itumbiara 2022 - Etapa de Campo - Equipe Eletrobras com Apoio da UFG