



UNIVERSIDADE FEDERAL DE SERGIPE  
PRÓ-REITORIA DE PÓS-GRADUAÇÃO E  
PESQUISA COORDENAÇÃO DE PESQUISA

PROGRAMA INSTITUCIONAL DE BOLSAS DE INICIAÇÃO  
CIENTÍFICA – PIBIC

**CARACTERIZAÇÃO DE ELETROFÁCIES POR MEIO  
DE INTELIGÊNCIA ARTIFICIAL COM ABORDAGEM  
SUPERVISIONADA**

Relatório Final  
Período da bolsa: de 09/23 a 08/24

Este projeto é desenvolvido com bolsa de iniciação científica

PIBIC/COPES

## Sumário

1.	Introdução.....	3
2.	Objetivos.....	3
2.1	Objetivo geral.....	3
2.2	Objetivos específicos .....	3
3.	Metodologia .....	4
3.1	Conjunto de dados .....	4
3.1.1	Curvas de perfis petrofísicos .....	5
3.1.2	Unidades Geológicas .....	6
3.1.3	Tipos Litológicos.....	7
3.2	Tratamento dos dados .....	7
3.2.1	Conversão da unidade de medida de profundidade .....	8
3.2.2	Remoção registros que não possuem todas as curvas escolhidas .....	9
3.2.3	Manutenção de apenas uma curva de resistividade profunda .....	9
3.2.4	Padronização do nome das curvas de resistividade profunda .....	9
3.2.5	Aplicação dos mnemônicos das curvas.....	<b>Erro! Indicador não definido.</b>
3.2.6	Adição da curva DCAL .....	10
3.2.7	Reclassificação da litologia metamórfica .....	10
3.3	Algoritmo.....	12
3.4	Unidades.....	<b>Erro! Indicador não definido.</b>
3.5	Tipos litológicos.....	<b>Erro! Indicador não definido.</b>
3.6	Explicação do que é uma eletrofácies .....	<b>Erro! Indicador não definido.</b>
4.	Resultados e discussões.....	13
4.1	Dados desbalanceados e sem unidades geológicas .....	14
4.2	Dados balanceados com <i>undersampling</i> e sem unidades geológicas .....	15
4.3	Dados balanceados com <i>undersampling</i> e com unidades geológicas .....	<b>Erro! Indicador não definido.</b>
5.	Conclusões .....	18
6.	Perspectivas de futuros trabalhos .....	18
7.	Referências bibliográficas .....	18
8.	Outras atividades .....	18
9.	Justificativa .....	18

## **1. Introdução**

## **2. Objetivos**

### **2.1 Objetivo geral**

O objetivo geral deste plano de trabalho é, por meio dos perfis petrofísicos, identificar as eletrofácies de poços de petróleo da bacia Sergipe/Alagoas com o método de inteligência artificial conhecido como Floresta Aleatória.

### **2.2 Objetivos específicos**

- Realizar o estado da arte sobre a identificação de eletrofácies utilizando ferramentas com métodos de inteligência artificial (Florestas Aleatórias) com abordagem supervisionada;
- Levantar dados rotulados de perfis e definir as curvas que serão utilizadas para treinamento e teste da inteligência artificial com suporte de especialistas;
- Escolher o algoritmo de inteligência artificial para o treinamento com os dados levantado dos poços;
- Realizar o teste e treinamento do algoritmo de identificação das eletrofáceis

a partir dos dados rotulados;

- Obter uma inteligência artificial treinada em uma base de dados referente a algum campo de petróleo da bacia Sergipe/Alagoas;
- Propagar as eletrofácies para poços que tenham as mesmas unidades estratigráficas, pertencentes, ou não, ao campo de petróleo utilizando a inteligência artificial.

### 3. Metodologia

#### 3.1 Conjunto de dados

No desenvolvimento deste trabalho, foram utilizados dois tipos de arquivos, Digital Log Interchange Standard (DLIS) e Arquivo Geral de Poço (AGP). Os arquivos em formato DLIS possuem os registros de perfis petrofísicos dos poços de petróleo. Enquanto os arquivos AGP são extratos digitais, em formato txt, que contêm a extração dos dados litológicos utilizados. Esses dados podem ser acessados de forma gratuita por meio do seguinte hiperlink: [ANP-TERRESTRE \(cprm.gov.br\)](http://ANP-TERRESTRE.cprm.gov.br).

Tabela <num\_tabela> - Nomes dos poços

Nome ANP	Nome BR	Nome abreviado
1-BRSA-459-SE	1-NCL-2-SE	P_459
1-BRSA-551-SE	1-FSG-1-SE	P_551
1-BRSA-574-SE	1-FSJQ-1-SE	P_574
1-BRSA-595-SE	1-FSG-2-SE	P_595
1-BRSA-605-SE	1-FSJQ-2-SE	P_605
1-BRSA-643-SE	1-CBO-1-SE	P_643
1-BRSA-645-SE	1-SIB-1-SE	P_645
1-BRSA-659-SE	1-POI-2-SE	P_659
1-BRSA-689-SE	1-POI-1-SE	P_689
1-BRSA-696-SE	1-FSJQ-3-SE	P_696
1-BRSA-698-SE	1-DP-2-SE	P_698

Fonte: Autor

### 3.1.1 Curvas de perfis petrofísicos

Para o trabalho em questão, foram escolhidas 9 curvas de perfis petrofísicos, assim como no trabalho de SOUSA (2024):

I. Raios Gama (GR): Detecta a radioatividade natural total da formação geológica. É mais utilizada para identificação da litologia e cálculo do teor de argila nas litologias. As unidades são em °API.

II. Porosidade Neutrônica (NPHI): As versões mais avançadas desta ferramenta medem a quantidade de nêutrons epitermal e/ou termal da rocha após o bombardeio de nêutrons de alta energia emitidos de uma fonte radioativa na ferramenta. Sua principal utilização é na estimativa da porosidade da rocha e identificação da presença de gás.

III. Resistividade Profunda (RESO): Oferece uma leitura aproximada da resistividade, através da medição de campos elétricos e magnéticos induzidos nas rochas ou através de correntes elétricas focalizadas para dentro das camadas. É utilizada principalmente na identificação dos fluidos (água ou hidrocarbonetos) presentes nas litologias e, secundariamente, no tipo de litologia. As unidades são em ohm-m.

IV. Sônico (DT): Mede os tempos de trânsito entre dois detectores, localizados a uma distância fixa na ferramenta, de uma onda mecânica compressional. É utilizado essencialmente na obtenção da porosidade das rochas e o tempo de trânsito dessa onda. Permite a conversão do tempo em profundidade nas seções sísmicas. As unidades são em microssegundo por pé.

V. Densidade (RHOB): O Perfil de Densidade registra continuamente as variações das densidades das camadas (g/cm<sup>3</sup>). Essa densidade é mensurada através do bombardeio das camadas por um feixe monoenergético de raios gama emitidos por uma fonte radioativa (Cs137), direcionada e pressionada contra a parede do poço para minimizar os efeitos do poço (lama e reboco). É utilizada para a obtenção da porosidade da rocha. Unidades: gramas por centímetro cúbico.

VI. Compensação do Perfil de Densidade (DRHO): Esta curva é adquirida em conjunto com a curva de densidade. Serve como controle de qualidade da mesma. Mostra a correção que foi adicionada à curva de RHOB ao longo da perfilagem devido a efeitos do poço (reboco e arrombamento). Unidades: gramas por centímetro cúbico.

VII. Fator Fotoelétrico (PE): Esta curva é adquirida em conjunto com a curva de densidade. O efeito fotoelétrico é proveniente da absorção total dos raios gama de baixa energia pelos elétrons e possui relação direta com o número atômico do elemento químico que está compondo a rocha. O raio gama incidente apresenta baixo nível de energia após o choque com os átomos da formação, sendo totalmente absorvido pelo átomo durante a colisão e transmitindo sua energia cinética para o elétron, ejetando-o. É utilizado frequentemente na identificação litológica. Unidades: B/e (Barns/électron - unidade de absorção de fator fotoelétrico).

VIII. Caliper (CAL): Esta curva é adquirida, geralmente, em conjunto com a curva de densidade e mede o diâmetro do poço e a “rugosidade” da parede do mesmo. É utilizada como controle de qualidade dos perfis corridos. Unidades: polegadas.

IX. Diâmetro da Broca (BS): Essa curva nos fornece o diâmetro da broca que foi usada para perfurar o poço. Unidades: polegadas.

### 3.1.2 Unidades Geológicas

Além das curvas de perfis, as unidades geológicas onde se encontravam os tipos litológicos, também desempenharam o papel de variável preditiva. Duas colunas estratigráficas, Unidade Formação e Unidade Membro, foram retiradas dos arquivos AGP de cada poço. A fim de obter uma representação em nível de membro para as unidades geológicas, realizou-se uma padronização de nomenclatura para essa variável, conforme aprestado na tabela <num\_tabela>.

Tabela <num\_tabela> - Padronização das unidades para nível de membro

Nome da	Formação	Nome da	Membro	Unidade em
---------	----------	---------	--------	------------

<b>Unidade Formação</b>	<b>extraída do AGP</b>	<b>Unidade Membro</b>	<b>extraído do AGP</b>	<b>nível de membro</b>
Aracaré	ARACAR	—	—	ARA_ARA
Bananeiras	BANANE	—	—	BAN_BAN
Barreiras	BARRRS	—	—	BAR_BAR
Batinga	BATING	—	—	BAT_BAT
Cotinguiba	COTING	Sapucari	SAPUCA	COT_SAP
Embasamento	EMBASA	—	—	EMB_EMB
Muribeca	MURIBE	Carmópolis	CARMOP	MUR_CPS
Muribeca	MURIBE	Ibura	IBURA	MUR_IBU
Muribeca	MURIBE	Oiteirinhos	OITEIR	MUR_OIT
Penedo	PENEDO	—	—	PDO_PDO
Riachuelo	RIACHU	Angico	ANGICO	RIA_ANG
Riachuelo	RIACHU	Maruim	MARUIM	RIA_MAR
Riachuelo	RIACHU	Taquari	TAQUAR	RIA_TQR
Serraria	SERRAR	—	—	SER_SER

Fonte: Autor

### 3.1.3 Tipos Litológicos

O foco central deste trabalho é a caracterização, por meio dos perfis petrofísicos, das eletrofácies, ou litofácies, que são termos utilizados para se referir aos tipos litológicos. Dentre os 11 poços que foram utilizados para treinar o modelo de inteligência artificial, existiam 11 tipos litológicos em seus respectivos arquivos AGP: Anidrita, Arenito, Calcarenito, Calcilutito, Conglomerado, Dolomito, Filito, Folhelho, Granito, Siltito e Xisto. Dessa maneira, a fim de atingir o objetivo geral estabelecido, o modelo foi treinado de modo a ser capaz de receber como entrada valores de curvas de perfis e categorizar o tipo litológico respectivo, como uma dessas 11 classes.

## 3.2 Tratamento dos dados

Antes de aplicar o algoritmo de Floresta Aleatória, é fundamental que os

dados passem por um processo de tratamento para que eles possam ser analisados pelos especialistas e utilizados pelo algoritmo. Dessa forma, o tratamento foi realizado por meio do seguinte procedimento:

- I. Conversão da unidade de medida de profundidade de polegada para metro; (ver tópico 3.2.1)
- II. Remoção de registros que não possuíam todas as curvas escolhidas; (ver tópico 3.2.2)
- III. Manutenção de apenas uma curva de resistividade profunda por poço; (ver tópico 3.2.3)
- IV. Padronização do nome das curvas; (ver tópico 3.2.4)
- V. Adição da curva DCAL em poços que ainda não a possuem; (ver tópico 3.2.5)
- VI. Reclassificação da litologia metamorfica em xisto. (ver tópico 3.2.6)

### 3.2.1 Conversão da unidade de medida de profundidade

Para manter o padrão usual da indústria de petróleo do Brasil, a unidade de medida de profundidade de 7 dos 11 poços passou por um processo de conversão de polegada (pol) para metro (m). A tabela <num\_tabela> apresenta a unidade de medida de profundidade de cada poço antes da padronização para metro.

Tabela <num\_tabela> - Unidade de medida de profundidade antes da padronização para metro

Poço	Unidade
P_459	pol
P_551	pol
P_574	m
P_595	m
P_605	pol
P_643	pol
P_645	m
P_659	m



P_689	pol
P_696	pol
P_698	pol

Fonte: Autor

### **3.2.2 Remoção registros que não possuem todas as curvas escolhidas**

Em determinados poços, o arquivo dlis organizava os registros de perfilagem em diversos quadros de dados, com diferentes intervalos de profundidade. Dentre esses diversos intervalos, alguns não possuíam registro de todas as curvas de perfis petrofísicos escolhidas para o trabalho. Para garantir que o algoritmo seja treinado com todo o conjunto de variáveis definido, foi realizada uma filtragem, preservando apenas as amostras que possuíam todas as curvas requisitadas para o estudo. A tabela <num\_tabela> mostra quais poços passaram por essa etapa de filtragem.

### **3.2.3 Manutenção de apenas uma curva de resistividade profunda**

Em certos poços, foram identificadas múltiplas curvas de resistividade profunda. Nesses casos, foi imprescindível manter apenas uma curva e eliminar as demais, a fim de evitar que a duplicação dessa característica influenciasse negativamente o processo de aprendizado do modelo. A tabela <num\_tabela> apresenta as curvas de resistividade profunda originalmente presentes em cada poço antes do processamento desta etapa. Nos casos em que a filtragem foi necessária, priorizou-se a manutenção da curva RT, com a subsequente remoção das demais.

### **3.2.4 Padronização do nome das curvas**

De acordo com o especialista Luiz Henrique Vandelli, existem inúmeros mnemônicos de curvas de resistividade profunda que poderiam ser utilizadas no estudo. Conforme acontece em companhias de perfilagem, existem dois princípios de funcionamento, por indução e laterolog. O princípio da indução engloba as curvas ILD, RILD, IEL, AIT90, AHT90, RT90, AT90, AO90, RT, AF90, AHF90, AFH90.

Enquanto o laterolog possui as curvas LLD, RLLD, HDRS, HLLD, LL7 E RLL7.

Assim como acontece com os perfis de resistividade profunda, existem curvas equivalentes para outros perfis utilizados, com uma variação de nomenclatura. Desse modo, a fim de padronizar os nomes dessas variáveis, duas ou mais curvas equivalentes tiveram seus nomes renomeados para um nome padrão escolhido. No caso da resistividade, foi acordado utilizar o termo RESD para se referir a uma curva de resistividade profunda.

Na tabela <num\_tabela> estão apresentados os conjuntos de curvas equivalentes e o nome padrão que foi definido para ser utilizado neste trabalho.

### **3.2.5 Adição da curva DCAL**

Para fins de controlar a qualidade dos dados utilizados, foi adicionado o perfil de controle DCAL, que é o resultado da diferença entre o valor de CAL e BS. Por meio do DCAL é possível identificar se uma determinada região de um poço tem reboco (DCAL negativo) ou arrombamento (DCAL positivo). Para evitar que regiões que possuam elevado grau de reboco ou arrombamento impactem negativamente o modelo, os registros de dados utilizados neste trabalho possuem o DCAL dentro do intervalo [-1, 1.5].

### **3.2.6 Reclassificação da litologia metamórfica**

Segundo o especialista Vitor Hugo Simon, geólogo consultor do projeto, as litologias presentes no Embasamento Fraturado da Sub-bacia de Sergipe, na região do Alto de Aracaju são: principalmente rochas metamórficas, xisto e filito, e secundariamente rochas graníticas.

Durante o pré-processamento dos dados, foi identificado no poço P\_459, um tipo de litologia descrita como “metamórfica não identificada”, referente ao Embasamento da Sub-bacia de Sergipe. Sendo esse um termo muito genérico para classificar rochas e com a intenção de obter uma caracterização mais precisa das litologias, as amostras de “metamórfica não identificada” foram submetidas a um algoritmo de classificação litológica para se obter uma caracterização mais precisa do tipo litológico.

Para realizar a reclassificação, foi utilizado um modelo de classificação de floresta aleatória, treinado com as propriedades de perfis das amostras litológicas de xisto e filito, presentes nos poços P\_689 e P\_659. Após o treinamento, o modelo foi capaz de rotular as amostras de “metamórfica não identificada” como uma dessas duas categorias.

No conjunto de dados em estudo, havia 540 amostras de xisto e 202 de filito, nos poços P\_689 e P\_659 respectivamente. Dessa maneira, o algoritmo de classificação foi treinado e testado com um total de 642 registros.

A divisão das amostras em treinamento e teste foi realizada separando 2/3 do total para treinamento e 1/3 para teste, conforme recomendado na literatura. (FACELI et al. 2011) Os resultados da divisão são apresentados na tabela <num\_tabela>.

Tabela <num\_tabela> - Divisão das amostras de xisto e filito em conjuntos de treino e teste

<b>Litologia</b>	<b>Número de amostras</b>	<b>Amostras para treinamento</b>	<b>Amostras para teste</b>
Filito	202	132	70
Xisto	540	362	178
Total	642	494	248

Fonte: Autor

Uma vez que o algoritmo foi treinado, a sua acurácia pôde ser testada com o conjunto de teste. Isto é, após aprender com as amostras para treinamento, o modelo foi testado ao classificar, em xisto ou filito, a litologia correspondente aos 248 registros de propriedades de perfis petrofísicos separados para teste. A acurácia do modelo foi de 99.59%.

Em seguida, após as etapas de treinamento e teste, o algoritmo foi utilizado para categorizar as amostras de “metamórfica não identificada” em xisto ou filito, com base em suas respectivas propriedades. Dentre os 585 registros de metamórfica que existiam no conjunto de dados, 573 foram reclassificados como xisto e apenas 12 como filito.

De acordo com os especialistas, não foi observado, até então, no intervalo estratigráfico do EMB de um poço, a existência de mais de um tipo litológico no intervalo normalmente perfurado. Desse modo, todos os registros de “metamórfica não identificada” foram convertidos em xisto, e os filitos foram considerados como erros de classificação.

### 3.3 Algoritmo

Neste trabalho foi empregado o método de *random forest*, algoritmo baseado em árvore com abordagem supervisionada, para caracterizar eletrofácies. Um modelo *random forest* de classificação é uma coleção de árvores de decisão, da qual a previsão final é obtida através de uma votação majoritária entre as previsões realizadas por cada uma das árvores individuais que compõem o algoritmo. (Shalev-Shwartz, S.; Ben-David, S. 2014) Desse modo, a classe mais frequentemente prevista pelas árvores será a previsão final do modelo.

#### 3.3.1 Variáveis preditivas

Variáveis preditivas, também chamadas de *features* ou atributos, são os dados de entrada usados em um modelo de aprendizado de máquina. Essas variáveis contêm informações que o algoritmo analisa para identificar padrões e gerar uma saída, isto é, a previsão.

Os perfis petrofísicos escolhidos para desempenharem papel de variável preditiva no treinamento do modelo, são aqueles que, segundo os especialistas, são discriminatórios:

- I. GR;
- II. RESD;
- III. DT;
- IV. RHOB;
- V. DRHO;
- VI. NPHI;
- VII. PE.

Além das curvas de perfis, também foram incluídas as unidades geológicas no conjunto de variáveis preditivas, para alguns dos modelos avaliados. Um modelo de floresta aleatória não possui a capacidade de processar diretamente variáveis categóricas, ou seja, dados que não são numéricos, como o nome de uma unidade. Por conseguinte, utilizou-se a técnica conhecida como *One-Hot Encoding*, a qual transforma uma variável categórica em várias colunas binárias, onde os valores assumem zero ou um, sendo cada nova coluna respectiva a uma Unidade em nível de Membro.

Para cada observação de uma Unidade em nível de Membro no conjunto de dados, sua coluna correspondente é marcada como 1, enquanto as demais colunas são marcadas como 0. Isso permite que o modelo trate cada categoria como uma entidade independente, sem introduzir uma relação de ordem que poderia causar problemas em modelos de *Random Forest*. A tabela <num\_tabela> ilustra esse procedimento por meio de um exemplo prático, no qual a primeira linha possui a Unidade em nível de Membro igual a MUR\_CPS, a segunda linha corresponde a RIA\_ANG e a terceira a BAN\_BAN.

Tabela <num\_tabela> - Exemplo de colunas binárias geradas pelo processo de *One-Hot Encoding*

ARA ARA	BAN BAN	BAR BAR	BAT BAT	COT SAP	MUR CPS	MUR IBU	MUR OIT	PDO PDO	RIA ANG	RIA MAR	RIA TQR	SER SER
0	0	0	0	0	1	0	0	0	0	0	0	0
0	0	0	0	0	0	0	0	0	1	0	0	0
0	1	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0

Fonte: Autor

### 3.4 x

## 4. Resultados e discussões

Esta seção é destinada à análise dos resultados obtidos com o modelo de

aprendizado de máquina para caracterização de eletrofácies. Neste trabalho foram treinados três modelos diferentes de classificação, com as seguintes características de dados de entrada:

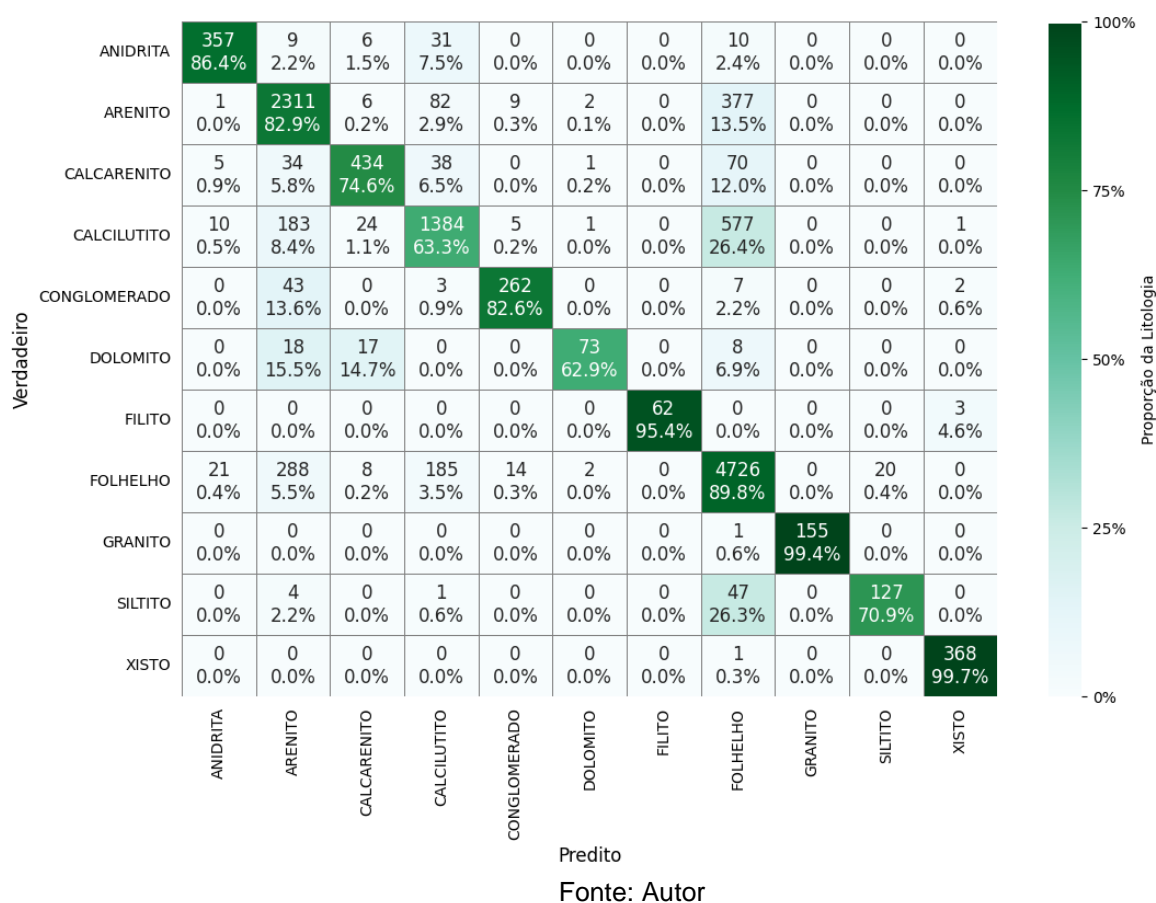
- I. Dados desbalanceados e sem unidades geológicas como variáveis preditivas; (seção <>)
- II. Dados desbalanceados e com unidades geológicas como variáveis preditivas; (seção <>)
- III. Dados balanceados com *undersampling* e com unidades geológicas como variáveis preditivas. (seção <>)

#### 4.1 Dados desbalanceados e sem unidades geológicas

O primeiro modelo foi treinado apenas com as curvas de perfis petrofísicos discriminatórios como variáveis preditivas, ou seja, não se utilizou das unidades geológicas na etapa de treinamento. Ademais, os dados não foram balanceados, de modo que determinados tipos litológicos tiveram um número elevado de amostras de treinamento e teste. A tabela <num\_tabela> mostra o número de registros de cada tipo litológico no conjunto de teste.

A figura <num\_figura> é a matriz de confusão do primeiro modelo treinado, do qual teve seu desempenho testado com o seu conjunto de teste. No eixo y encontram-se as classes litológicas verdadeiras e no eixo x as preditas. Cada célula da matriz possui dois valores: a quantidade absoluta e a porcentagem de amostras da litologia da linha (verdadeira) que foram classificadas como a litologia da coluna (predita).

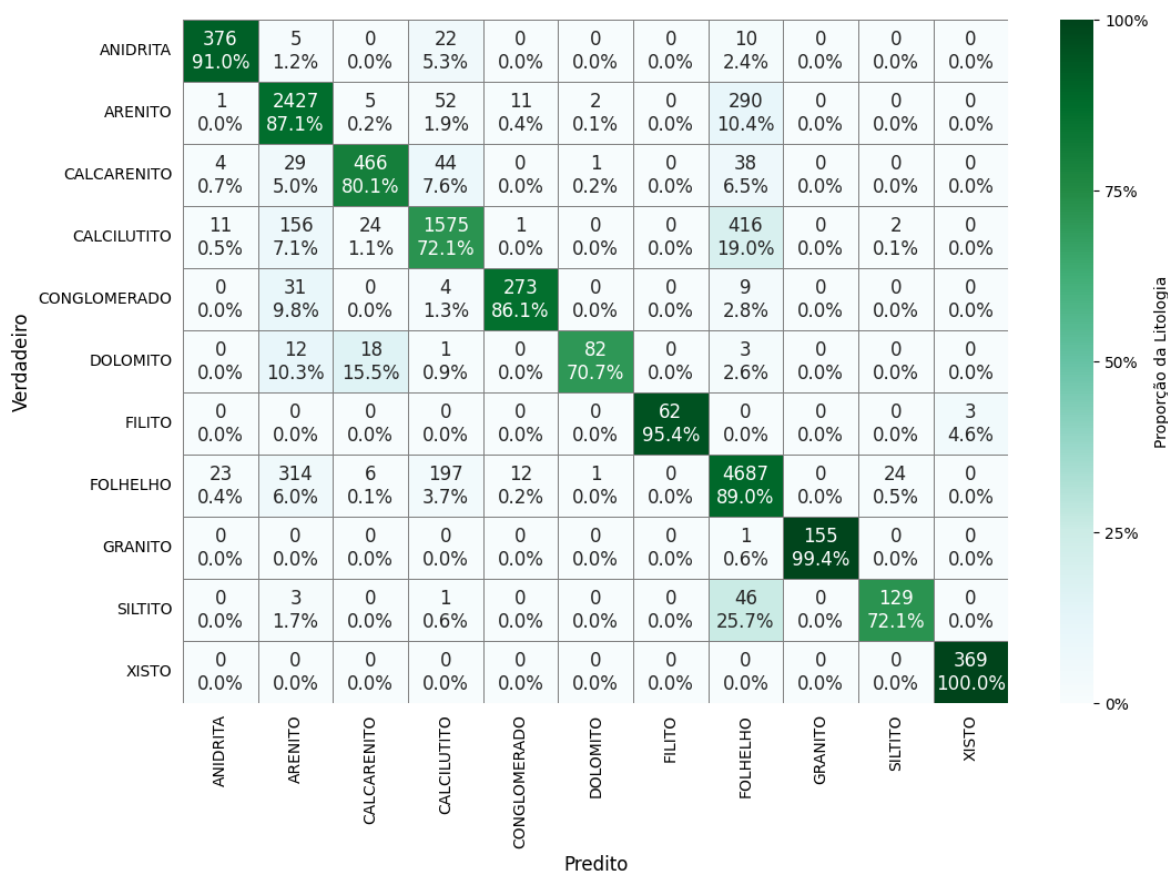
Figura <num\_figura> - Matriz de confusão do teste do primeiro modelo



O modelo obteve uma acurácia geral de 82.50%, como pode ser observado na figura <num\_figura>, onde o número de acertos se concentrou na diagonal principal da matriz. A classe litológica que gerou o maior número de erros nas demais foi o Folhelho, tendo induzido erroneamente 26.4% e 26.3% das amostras de Calcilutito e Siltito, respectivamente. Nove das onze classes tiveram mais 70% de acerto, apenas Calcilutito e Dolomito obtiveram 63.3% e 62.9% de acertos respectivamente.

## 4.2 Dados desbalanceados e com unidades geológicas

Acurácia: 85.25

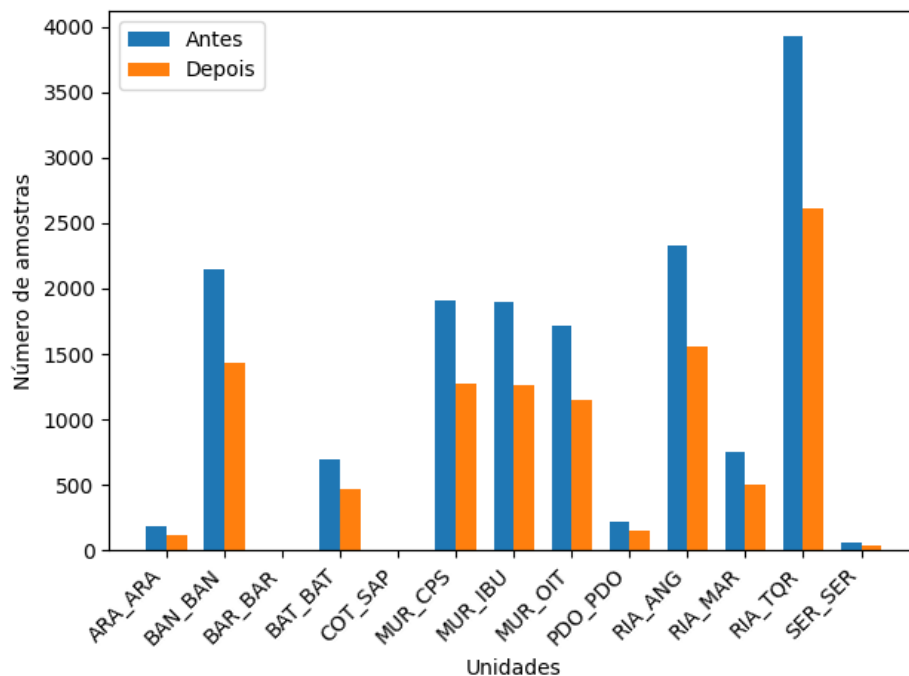


### 4.3 Dados balanceados com *undersampling* e com unidades geológicas

Visto que o tipo litológico mais frequente no conjunto de dados, Folhelho, induzia a 1097 predições erradas, conforme pode ser visto na figura <num\_figura>, foi realizado um balanceamento dessa classe com o método de *undersampling*. De modo a balancear os dados de maneira proporcional em todas as unidades geológicas, foi removido de maneira aleatória em cada unidade 1/3 dos registros de Folhelho. A figura <num\_figura> apresenta o número de amostras de Folhelho por unidade geológica, antes e depois do balanceamento.

Figura <num\_figura> - Número de amostras de Folhelho por unidade geológica, antes e depois do balanceamento

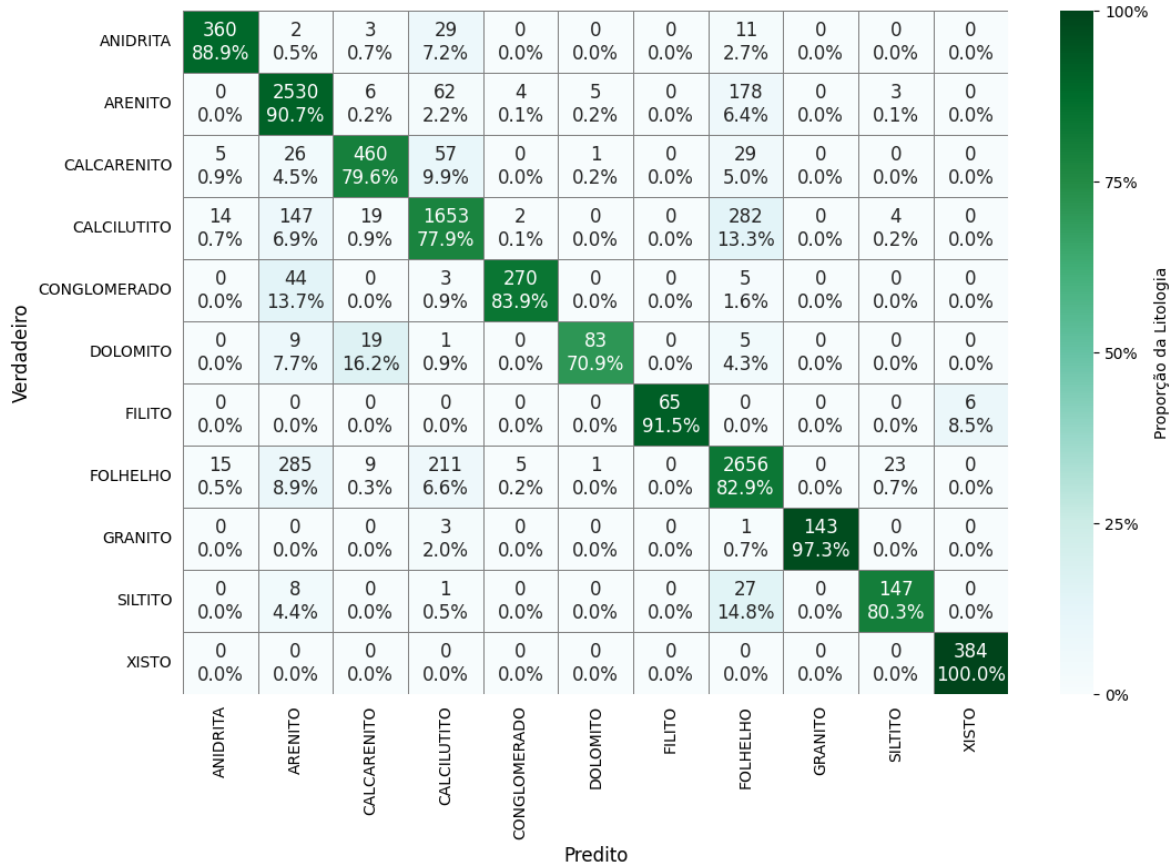




Fonte: Autor

O treinamento deste segundo modelo utilizou as mesmas variáveis preditivas do primeiro, a diferença nos dados de entrada foi o balanceamento do Folhelho. A figura <num\_figura> é a matriz de confusão referente ao teste deste segundo modelo.

Acurácia: 85.56



## 5. Conclusões

## 6. Perspectivas de futuros trabalhos

Falar sobre perfis de imagens para o próximo ciclo

Pode falar sobre as pendências que Simon tinha comentado no grupo

Questão de remoção de registros que ter valor de perfil em branco

Questão de quais curvas de perfis são mais significativas

Questão de perfis de imagens

## 7. Referências bibliográficas

## 8. Outras atividades

Falar sobre o mini-curso que eu fiz

## 9. Justificativa

Comentários:

- Extração litológica ok
- Descrição dos perfis deve ser mais detalhada (olhar material de Átila – citar o trabalho dele) ok
- Escolha das curvas podia ser um tópico só
- Padronização dos nomes podia ser um tópico só (tira o da resistividade) ok
- Separar a metodologia em dlis e agp ok
- Colocar o próprio arquivo word no drive
- Propagar as eletrofácies ainda estão em andamento ok
- Poços são apenas da bacia de Sergipe ok