



UNIVERSIDADE FEDERAL DO CEARÁ
CENTRO DE CIÊNCIAS
DEPARTAMENTO DE GEOLOGIA
PROGRAMA DE PÓS-GRADUAÇÃO EM GEOLOGIA

DANIEL DE PONTI SOUZA

ESTUDO GEOQUÍMICO-MINERALÓGICO DE LITOLOGIAS AFLORANTES
NA ORLA LITORÂNEA DE ICAPUÍ – CEARÁ

FORTALEZA

2017

DANIEL DE PONTI SOUZA

ESTUDO GEOQUÍMICO-MINERALÓGICO DE LITOLOGIAS AFLORANTES NA
ORLA LITORÂNEA DE ICAPUÍ – CEARÁ

Dissertação de Mestrado apresentada ao Programa de Pós-Graduação em Geologia, do Departamento de Geologia do Centro de Ciências da Universidade Federal do Ceará, como requisito parcial para obtenção do título de Mestre em Geologia. Área de Concentração: Geologia Marinha e Ambiental.

Orientador: Prof. Dr. George Satander Sá Freire

Coorientador: Prof. Dr. Eldemar de Albuquerque Menor

FORTALEZA

2017

Dados Internacionais de Catalogação na Publicação
Universidade Federal do Ceará
Biblioteca Universitária

Gerada automaticamente pelo módulo Catalog, mediante os dados fornecidos pelo(a) autor(a)

- S237e Souza, Daniel de Ponti.
Estudo geoquímico-mineralógico de litologias aflorantes na orla litorânea de Icapuí - Ceará / Daniel de Ponti Souza. – 2017.
81 f. : il. color.
- Dissertação (mestrado) – Universidade Federal do Ceará, Centro de Ciências, Programa de Pós-Graduação em Geologia, Fortaleza, 2017.
Orientação: Prof. Dr. George Satander Sá Freire.
Coorientação: Prof. Dr. Eldemar de Albuquerque Menor.

1. Geoquímica ambiental. 2. Intemperismo. 3. Rochas sedimentares. I. Título.

CDD 551

DANIEL DE PONTI SOUZA

ESTUDO GEOQUÍMICO-MINERALÓGICO DE LITOLOGIAS AFLORANTES NA
ORLA LITORÂNEA DE ICAPUÍ – CEARÁ

Dissertação de Mestrado apresentada ao Programa de Pós-Graduação em Geologia, do Departamento de Geologia do Centro de Ciências da Universidade Federal do Ceará, como requisito parcial para obtenção do título de Mestre em Geologia. Área de Concentração: Geologia Marinha e Ambiental.

Aprovada em 26/06/2017

BANCA EXAMINADORA

Prof. Dr. George Satander Sá Freire (Presidente)

Universidade Federal do Ceará (UFC)

Prof^a. Dr^a. Diolande Ferreira Gomes Freire (Examinadora Interna)

Universidade Federal do Ceará (UFC)

Prof. Dr. Eldemar de Albuquerque Menor (Examinador Externo à Instituição)

Universidade Federal de Pernambuco (UFPE)

AGRADECIMENTOS

A Deus, por ter me dado fé e saúde para superar as dificuldades deste mundo.

A Universidade Federal do Ceará (UFC), pela infraestrutura na qual fui capaz de realizar o curso.

Ao CNPq, pelo apoio financeiro a esta pesquisa através da bolsa de mestrado.

Ao meu orientador, Prof. Dr. George Satander Sá Freire, pela orientação, apoio e confiança.

Ao meu coorientador, Prof. Dr. Eldemar de Albuquerque Menor, pelo auxílio na análise geoquímica e revisão do trabalho.

À Prof^a. Dr^a. Diolande Ferreira Gomes Freire, pelas contribuições valiosas ao trabalho.

A todos os professores e funcionários do Departamento de Geologia da UFC.

À equipe do Laboratório de Geologia Marinha e Aplicada (LGMA) e Laboratório de Geoquímica Ambiental (LGA) no Departamento de Geologia da UFC, pelo enorme apoio do qual este trabalho dependeu inteiramente.

À equipe do Laboratório de Microscopia Eletrônica (LME) no Departamento de Geologia da UFC, principalmente ao Joel Pedrosa Sousa e ao Agnaldo Francisco de Freitas Filho.

À equipe do Laboratório de Raios X (LRX) no Departamento de Física da UFC.

Aos colegas de turma da Pós-graduação em Geologia da UFC.

À minha família.

A todos que direta ou indiretamente fizeram parte da minha formação, o meu muito obrigado.

RESUMO

Esta dissertação apresenta as características geoquímicas e mineralógicas das litologias aflorantes na orla litorânea de Icapuí – Ceará a partir de dados de difração de raios-X, análises químicas de óxidos fundamentais e perda ao fogo e descrição de seções delgadas. Estas litologias compreendem as rochas das Formações Jandaíra, Barreiras e Potengi, pertencentes à Bacia Potiguar. Tais rochas foram depositadas em paleoambientes e paleoclimas distintos entre si e, em especial na Formação Barreiras, distinguem-se diferentes paleoclimas de tropical mais árido a mais úmido e, com condição especial de desenvolvimento de fácies no paleoclima tropical mais úmido que propiciou o desenvolvimento de laterito. Neste sentido, foram definidos os graus de alteração aos quais foram submetidas as rochas da Formação Barreiras. O calcário da Formação Jandaíra foi depositado em plataforma carbonática distal com pouca influência terrígena, sob paleoclima semiárido, e apresenta anomalia em Cd, cuja origem é atribuída ao desenvolvimento de magmatismo oceânico desde o *break-up* do Gondwana, que ainda permanecia ativo no Cretáceo Superior. Os arenitos da Formação Barreiras mostraram evidências de terem sido submetidos a forte hidrólise, provocando ausência ou presença subordinada de feldspatos potássicos (média de 0,9% na rocha total). O laterito possui presença acentuada de minerais de ferro (goethita) atingindo teor de 36,47% em Fe_2O_3 , e valores anômalos em Cr e Ni, indicando a existência de rochas básicas-ultrabásicas em domínios das rochas-fontes, ainda não caracterizados. Diferentemente, o arenito da Formação Potengi preservou uma fração significativa de feldspato potássico (7,2% na rocha total), indicando uma tendência para paleoclima semiárido.

Palavras-chave: Litologia litorânea. Geoquímica ambiental. Formações Jandaíra-Barreiras-Potengi.

ABSTRACT

This dissertation presents the geochemical and mineralogical characteristics of the outcropping lithologies on the coast of Icapuí – Ceará from X - rays diffraction data, chemical analysis of fundamental oxides and Loss On Ignition and description of thin sections. These lithologies comprise rocks of the Jandaíra, Barreiras and Potengi Formations, belonging to the Potiguar Basin. These rocks were deposited in paleoenvironments and paleoclimates distinct from each other, in particular, in the Barreiras Formation, different paleoclimates from more arid tropical to more umid, with special condition of development of facies in the more umid tropical paleoclimate that allowed the development of laterite. In this case, degrees of alteration were defined to which the rocks of the Barreiras Formation were submitted. The limestone of the Jandaíra Formation was deposited in distal carbonaceous platform with little terrigenous influence, in semiarid paleoclimate, and presents anomaly in Cd, whose origin is attributed to the development of oceanic magmatism since the break-up of Gondwana, still active in the Upper Cretaceous. The sandstones of the Barreiras Formation showed evidence of having been submitted to a strong hydrolysis, provoking absence or subordinate presence of potassic feldspars (average of 0,9% in total rock). The laterite has a strong presence of iron minerals (goethite) reaching 36,47% of Fe₂O₃ content besides anomalous values in Cr and Ni, indicating the existence of basic-ultrabasic rocks in the domains of source-areas, not yet characterized. Differently, the sandstone of the Potengi Formation preserved some more significant presence of potassic feldspar (7,2% in total rock) indicating a tendency to semiarid paleoclimate.

Keywords: Coastal lithology. Environmental geochemistry. Jandaíra-Barreiras-Potengi Formations.

LISTA DE ILUSTRAÇÕES

Figura 1.1	– Localização da área em estudo.....	3
Figura 2.1	– Relação entre os diferentes tipos de intemperismo com a pluviosidade anual e temperatura média anual.....	6
Figura 2.2	– Tipos diferentes de intemperismos na América.....	6
Figura 2.3	– Distribuição das zonas de alterações químicas.....	7
Figura 2.4	– Diferentes topografias e suas relações com o intemperismo.....	8
Figura 2.5	– Localização dos pontos de amostragem em mapa geológico simplificado com destaque para o Grupo Barreiras.....	11
Figura 2.6	– Conglomerados do Grupo Barreiras de Granja-Ceará plotados no diagrama $\text{SiO}_2 - \text{Al}_2\text{O}_3 - \text{Fe}_2\text{O}_3$ contendo os processos lateríticos segundo Schellmann (1986 <i>apud</i> SIQUEIRA, 2012).....	14
Figura 2.7	– Principais regiões de lateritos maduros conhecidas na Amazônia.....	16
Figura 2.8	– Perfil geológico simplificado de lateritos imaturos autóctones na Amazônia.....	17
Figura 2.9	– Perfil geológico simplificado de laterito bauxítico maduro autóctone na Amazônia.....	19
Figura 2.10	– Perfil geológico simplificado de laterito fosfático maduro autóctone na Amazônia.....	19
Figura 2.11	– Linhas de pedras.....	21
Figura 3.1	– Precipitações anuais totais registradas no posto pluviométrico situado em Icapuí – Ceará, no período 1988-2016.....	22
Figura 3.2	– Médias mensais de precipitação no período 1988-2016, conforme registros do posto pluviométrico de Icapuí – Ceará.....	23
Figura 3.3	– Médias mensais das temperaturas máximas e mínimas em Icapuí – Ceará, conforme registros no período 1986-2016.....	23
Figura 3.4	– Mapa exploratório-reconhecimento de solos de Icapuí – Ceará...	25
Figura 3.5	– Mapa geológico simplificado da Bacia Potiguar.....	26
Figura 3.6	– Carta estratigráfica da Bacia Potiguar.....	30
Figura 3.7	– Mapa geológico da região norte de Icapuí-Ceará.....	32
Figura 3.8	– Contato entre Formações Jandaíra e Barreiras.....	32
Figura 3.9	– Contato entre Formações Barreiras e Potengi.....	32

Figura 3.10 – Mapa de localização dos lateritos aflorantes em Ponta Grossa, Icapuí – Ceará.....	34
Figura 3.11 – Laterito no topo da falésia.....	34
Figura 3.12 – Laterito no contato entre as fácies superior e inferior da Formação Barreiras.....	35
Figura 3.13 – Capa laterítica concrecionária sobre a Formação Barreiras.....	35
Figura 3.14 – Laterito na base da falésia.....	35
Figura 4.1 – Fluxograma metodológico das etapas de pesquisa.....	36
Figura 4.2 – Diagrama $\text{SiO}_2 - \text{Al}_2\text{O}_3 - \text{Fe}_2\text{O}_3$ apresentando as etapas dos processos lateríticos com base nos teores desses óxidos.....	40
Figura 4.3 – Diagrama de classificação de arenitos.....	42
Figura 4.4 – Classificação de rochas carbonáticas segundo Dunham (1962 <i>apud</i> SOUSA, 2002) a partir da textura deposicional.....	43
Figura 5.1 – Localização dos pontos de amostragem.....	45
Figura 5.2 – DRX da amostra D1G.....	46
Figura 5.3 – DRX da amostra D1B.....	47
Figura 5.4 – DRX da amostra D1C.....	48
Figura 5.5 – DRX da amostra D1D.....	48
Figura 5.6 – DRX da amostra D1E.....	49
Figura 5.7 – DRX da amostra D1FV.....	49
Figura 5.8 – DRX da amostra D1FC.....	50
Figura 5.9 – DRX da amostra D1H.....	50
Figura 5.10 – DRX da amostra D2LT.....	51
Figura 5.11 – DRX da amostra D2LM.....	51
Figura 5.12 – DRX da amostra D2LB.....	52
Figura 5.13 – DRX da amostra D1A.....	54
Figura 5.14 – Amostra da Formação Potengi plotada no diagrama $\text{SiO}_2 - \text{Al}_2\text{O}_3 - \text{Fe}_2\text{O}_3$ contendo os processos lateríticos, segundo Schellmann (1986 <i>apud</i> SIQUEIRA, 2012).....	57
Figura 5.15 – Diagrama $\text{Al}_2\text{O}_3 \times \text{SiO}_2$ para as amostras da Formação Barreiras.....	61
Figura 5.16 – Diagrama $\text{Fe}_2\text{O}_3 \times \text{SiO}_2$ das amostras da Formação Barreiras.....	62
Figura 5.17 – Diagrama PF $\times \text{SiO}_2$ das amostras da Formação Barreiras.....	63

Figura 5.18 – Amostras da Formação Barreiras plotadas no diagrama SiO_2 – Al_2O_3 – Fe_2O_3 integrando diferenciados processos lateríticos, segundo Schellmann (1986 <i>apud</i> SIQUEIRA, 2012).....	65
Figura 5.19 – Fotomicrografia da amostra D1B.....	70
Figura 5.20 – Fotomicrografia da amostra D1FC.....	71
Figura 5.21 – Fotomicrografia da amostra D1H.....	72
Figura 5.22 – Fotomicrografia da amostra D2LM.....	73
Figura 5.23 – Fotomicrografia da amostra D2LT.....	74
Figura 5.24 – Fotomicrografia da amostra D2LB.....	75
Figura 5.25 – Fotomicrografia da amostra D1A.....	76

LISTA DE TABELAS

Tabela 2.1	– Série de Goldich.....	6
Tabela 2.2	– Elementos maiores, perda ao fogo e elementos traços nos conglomerados do Grupo Barreiras em Granja-Ceará.....	12
Tabela 2.3	– Classificações para as amostras do Grupo Barreiras em Granja-Ceará.....	13
Tabela 4.1	– Óxidos fundamentais, PF (%), e elementos traços (ppm) com respectivos limites inferiores de detecção analítica (LID).....	38
Tabela 4.2	– Teores médios dos elementos traços (ppm) nos arenitos.....	39
Tabela 4.3	– Teores médios dos elementos traços (ppm) nos carbonatos.....	39
Tabela 4.4	– Cálculos estequiométricos para quantificação dos minerais presentes nas amostras.....	41
Tabela 5.1	– Descrições resumidas e coordenadas UTM das amostras, com suas codificações.....	44
Tabela 5.2	– Composição química dos óxidos fundamentais e PF (%) na amostra da Formação Potengi.....	55
Tabela 5.3	– Composição mineralógica (%) a partir dos dados químicos da amostra da Formação Potengi.....	55
Tabela 5.4	– Composição química dos elementos traços (ppm) na amostra da Formação Potengi em comparação aos valores médios para os arenitos (MA) definidos por Turekian e Wedepohl (1961).....	56
Tabela 5.5	– Classificações para a amostra da Formação Potengi.....	56
Tabela 5.6	– Composição química dos óxidos fundamentais e PF (%) nas amostras da Formação Barreiras.....	59
Tabela 5.7	– Composição química dos elementos traços (ppm) nas amostras da Formação Barreiras em comparação aos valores médios para os arenitos (MA) definidos por Turekian e Wedepohl (1961).....	60
Tabela 5.8	– Classificações para as amostras da Formação Barreiras.....	64
Tabela 5.9	– Composição mineralógica (%) a partir dos dados químicos das amostras da Formação Barreiras.....	66
Tabela 5.10	– Integração dos dados químicos, mineralógicos e de intensidade de alteração das amostras da Formação Barreiras com base nos respectivos paleoclimas e processos lateríticos segundo Schellmann (1986 <i>apud</i> SIQUEIRA, 2012).....	67

Tabela 5.11 – Composição química dos óxidos fundamentais e PF (%) na amostra da Formação Jandaíra.....	68
Tabela 5.12 – Composição mineralógica (%) a partir dos dados químicos da amostra da Formação Jandaíra.....	68
Tabela 5.13 – Composição química dos elementos traços (ppm) na amostra da Formação Jandaíra em comparação aos valores médios para os carbonatos (MC) definidos por Turekian e Wedepohl (1961).....	69

SUMÁRIO

1	INTRODUÇÃO	1
1.1	Justificativa.....	2
1.2	Localização e Acesso.....	2
1.3	Objetivos.....	4
1.3.1	Geral.....	4
1.3.2	Específicos.....	4
2	REFERENCIAL TEÓRICO	5
2.1	Intemperismo Físico.....	5
2.2	Intemperismo Químico.....	5
2.2.1	Fatores Externos ao Intemperismo Químico.....	5
2.2.2	Fatores Internos ao Intemperismo Químico.....	8
2.3	Lateritos no Ceará.....	11
2.4	Lateritos na Amazônia.....	15
2.4.1	Lateritos Imaturos Autóctones na Amazônia.....	16
2.4.2	Lateritos Maturados Autóctones na Amazônia.....	18
2.4.3	Lateritos Alóctones na Amazônia.....	20
3	ASPECTOS GEOAMBIENTAIS	22
3.1	Clima.....	22
3.2	Pluviosidade.....	22
3.3	Temperatura.....	23
3.4	Vegetação.....	24
3.5	Geomorfologia.....	24
3.6	Solos.....	24
3.7	Geologia Regional.....	25
3.7.1	Estratigrafia da Bacia Potiguar.....	27
3.8	Geologia Local.....	31
3.8.1	Formação Jandaíra.....	32
3.8.2	Formação Barreiras.....	33
3.8.3	Formação Potengi.....	33
3.8.4	Lateritos em Ponta Grossa, Icapuí-Ceará.....	34
4	MATERIAL E MÉTODOS	36
4.1	Etapa Preliminar.....	36
4.2	Etapa de Campo.....	37

4.3	Etapa de Laboratório.....	37
4.3.1	Tratamento Inicial das Amostras.....	37
4.3.2	Pulverização.....	37
4.3.3	Difratometria de Raios-X.....	37
4.3.4	Análise Geoquímica.....	38
4.3.5	Análise Petrográfica.....	42
4.4	Etapa Final.....	43
5	RESULTADOS E DISCUSSÕES.....	44
5.1	Difratometria de Raios-X.....	46
5.1.1	Formação Potengi.....	46
5.1.2	Formação Barreiras.....	47
5.1.3	Formação Jandaíra.....	54
5.2	Análise Geoquímica.....	55
5.2.1	Formação Potengi.....	55
5.2.2	Formação Barreiras.....	58
5.2.3	Formação Jandaíra.....	68
5.3	Análise Petrográfica.....	70
5.3.1	Formação Barreiras.....	70
5.3.2	Formação Jandaíra.....	76
6.	CONCLUSÃO.....	77
	REFERÊNCIAS.....	79

1 INTRODUÇÃO

Nas falésias da Praia de Ponta Grossa, situada em Icapuí – Ceará, afloram rochas sedimentares de épocas geológicas e paleoambientes distintos. Em local restrito, em um único ponto de afloramento, foram observados calcários calcínicos cinza-esverdeados da Formação Jandaíra. Em discordância, observam-se rochas avermelhadas da Formação Barreiras e, no interior desta o desenvolvimento de um marcante horizonte laterítico. Acima, sobrepõem-se arenitos esbranquiçados da Formação Potengi. Nesta dissertação, será dada ênfase aos processos de lateritização que, em menor ou maior grau, afetam as rochas da Formação Barreiras.

Schellmann (1971 *apud* SIQUEIRA, 2012) comparou características semelhantes a partir de estudo de lateritos de diferentes partes do planeta, ressaltando que a composição deste tipo de litologia envolve predominantemente Al_2O_3 , Fe_2O_3 , SiO_2 , e H_2O , os minerais encontrados foram caulinita, gibbsita, hematita, goethita, quartzo e anatásio. Em que seus minerais mais comuns são: quartzo, goethita, e também boehmita, maghemita, rutilo e cromita. Nestas rochas os aluminossilicatos primários foram caulinizados, e os elementos alcalinos e alcalino-terrosos, removidos.

Deve-se observar que o termo “laterito” tem sentido amplo, sendo mais reservado para litologias férricas de forte diagênese como, por exemplo, as couraças lateríticas. Fonseca (2005) utiliza outras designações para definir tais produtos quando completamente litificados: concreções limoníticas, crostas limoníticas, couraças ferruginosas, ou crostas ferruginosas. A terminologia “plintita” é empregada no caso de lateritos friáveis, geralmente em estágio preliminar para formação de couraças férricas.

Costa (2008) define que os lateritos são rochas resultantes dos processos de lateritização, ou seja, geradas a partir do intemperismo tropical e paleotropical sobre qualquer tipo de rocha primária exposta na superfície ou próxima desta. Os lateritos são identificados por meio dos perfis lateríticos. Tais perfis são apresentados em horizontes característicos compostos por crosta (no topo), horizonte mosqueado/argiloso, saprólito e rocha-mãe (na base), resultando em diferenciações texturais, estruturais, mineralógicas e químicas na formação do perfil, ao longo do tempo geológico, comportando muitas vezes diferentes eventos paleoclimáticos. Consequentemente, perfis lateríticos são importantes no que se diz respeito à formação de depósitos minerais (como Al, Au, caulim, Fe, Ni, Mn, P, Nb, Ti, etc.) e para materiais de construção.

As crostas lateríticas são encontradas em diversos lugares e podem abranger uma região muito grande, inclusive podendo inviabilizar solos para agricultura.

1.1 Justificativa

Os lateritos são importantes tanto do ponto de vista paleoambiental quanto faciológico. Podem corresponder a registros de antigos ambientes de clima tropical, com interesse econômico, porque podem propiciar concentrações supergênicas de minerais como: caulim, bauxita, e inclusive minérios oxidados de ferro, cromo e cobre.

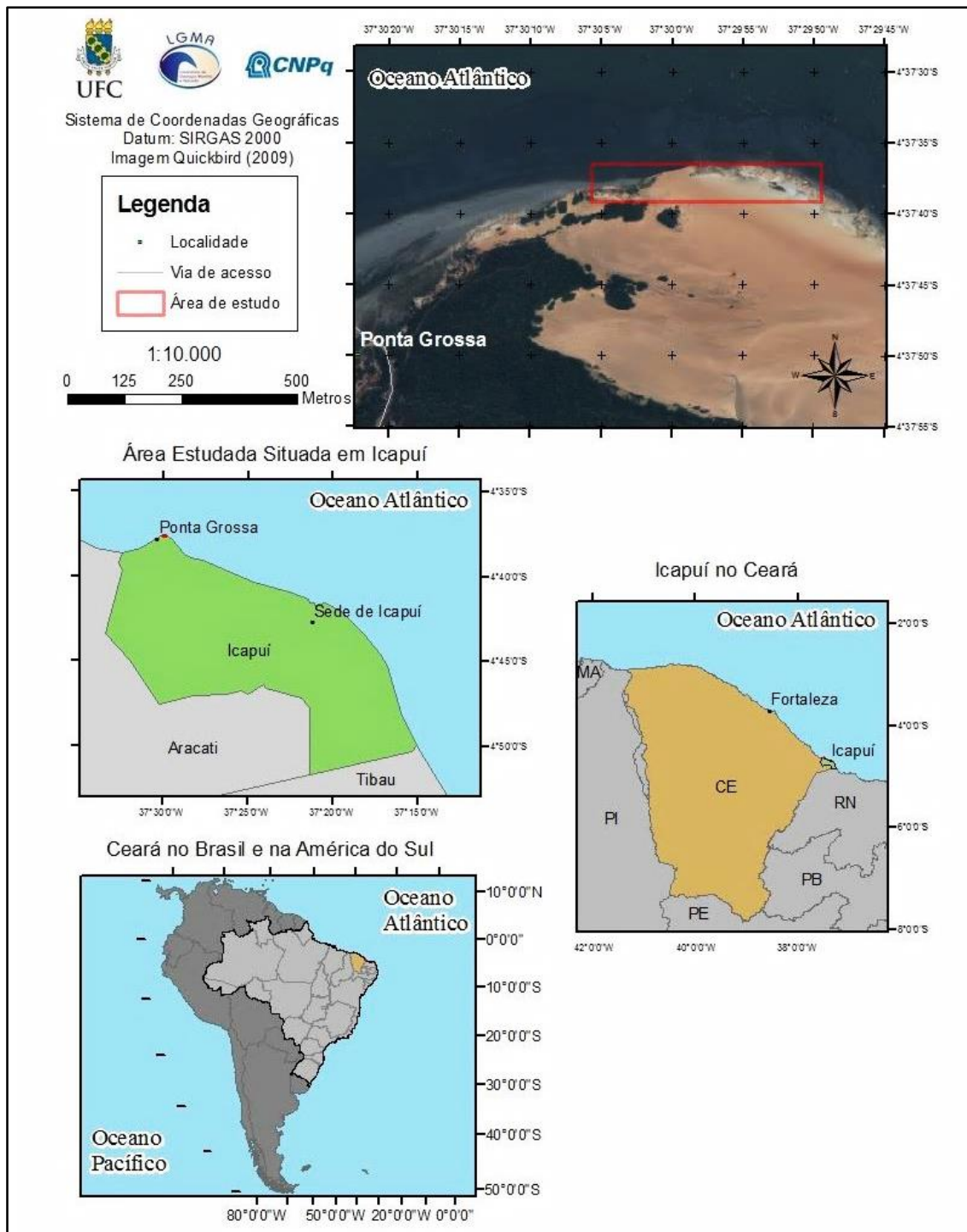
O presente estudo geoquímico e mineralógico busca oferecer mais detalhes sobre horizontes hidrolisados, principalmente quando lateríticos, da Formação Barreiras. A abordagem centrada em sedimentos da Formação Barreiras visa contribuir para um maior conhecimento sobre esta formação sedimentar, cuja literatura ainda é escassa, principalmente em seus afloramentos no Ceará.

1.2 Localização e Acesso

O local de estudo está situado no município de Icapuí, localizado no litoral leste do Estado do Ceará, distando 200 km de Fortaleza. A área estudada está compreendida entre os meridianos $-37^{\circ}29'50''$ e $-37^{\circ}30'6''$ e os paralelos $-4^{\circ}37'37''$ e $-4^{\circ}37'40''$. Ela engloba um trecho das falésias da Praia de Ponta Grossa e está inserida na carta topográfica de Areia Branca (SB.24-X-B-IV) (Figura 1.1).

O acesso à praia de Ponta Grossa se dá partindo de Fortaleza através da CE-040 até Aracati (149 km), acessando-se daí a BR-304 até desvio à esquerda para a CE-261 rumo a Icapuí (33 km). Em seguida, após 8 km na localidade de Nova Belém, vira-se à esquerda rumo à Redonda (6 km), e no início desta localidade, a partir da indicação de placa, toma-se a esquerda e se segue até à Praia de Ponta Grossa (4 km).

Figura 1.1 – Localização da área em estudo.



Fonte: Elaborada pelo autor.

1.3 Objetivos

1.3.1 Geral

Determinar as características geoquímicas e mineralógicas marcantes das litologias aflorantes, em particular o horizonte laterítico no trecho das falésias da Praia de Ponta Grossa, Icapuí, Ceará.

1.3.2 Específicos

- Examinar as fases minerais das seguintes litologias:
 - a) Formação Potengi;
 - b) Formação Barreiras e horizonte laterítico nesta;
 - c) Formação Jandaíra.

- Analisar a composição química das seguintes litologias:
 - a) Formação Potengi;
 - b) Formação Barreiras e horizonte laterítico nesta;
 - c) Formação Jandaíra.

- Descrever seções delgadas das seguintes litologias:
 - a) Formação Barreiras e horizonte laterítico nesta;
 - b) Formação Jandaíra.

2 REFERENCIAL TEÓRICO

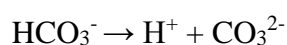
O processo de lateritização, descrito por Teixeira *et al.* (2000), depende de fatores externos e internos, relacionados ao intemperismo. É definido como um conjunto de alterações físicas (operam na desagregação), químicas (atuam na decomposição) e biológicas (provocam decomposição bioquímica), que afetam rochas da superfície terrestre levando à formação de diferentes tipos de solos.

2.1 Intemperismo Físico

Transforma as rochas preliminarmente inalteradas em materiais friáveis, fenômeno que é particularmente evidenciado em desertos, onde a chuva é ausente e ocorre uma forte evaporação, ou em zonas polares, onde a água pode ser encontrada em estado sólido, desse modo, as reações químicas acontecem de forma lenta.

2.2 Intemperismo Químico

A água da chuva é o principal agente no intemperismo químico. Ela interage com o gás carbônico atmosférico e com a matéria orgânica oxidada, tornando-se ácida através das seguintes reações:



2.2.1 Fatores Externos ao Intemperismo Químico

Os fatores externos que controlam o intemperismo químico são:

Material parental: a alteração depende dos minerais, textura e estrutura da rocha primária. Estas diferenças são expressas na Série de Goldich (Tabela 2.1);

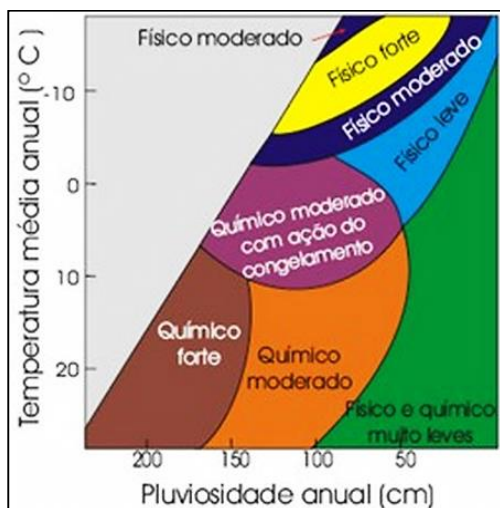
Tabela 2.1 – Série de Goldich.

ESTABILIDADE DOS MINERAIS	VELOCIDADE DE INTEMPERISMO
(Mais estável)	(Menor)
Quartzo	↓
Moscovita	
Ortoclásio	
Biotita e Plagioclásio (Na)	
Anfibólios	
Piroxênios	
Olivina e Plagioclásio (Ca)	
(Menos estável)	(Maior)

Fonte: Teixeira *et al.* (2000).

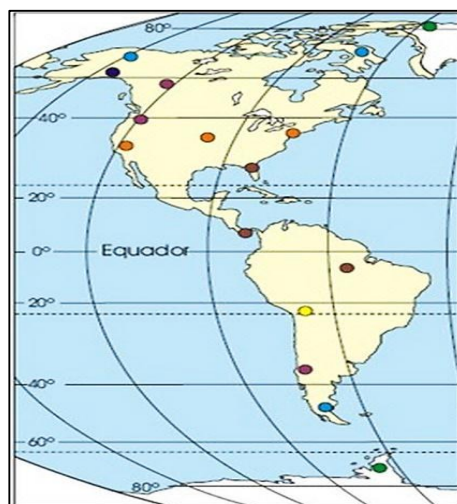
Clima: determina o tipo e velocidade do intemperismo, seus fundamentais parâmetros são a precipitação pluviométrica (quanto maior, mais completas as reações químicas) e a temperatura da região (a cada 10°C de aumento, as reações tornam-se mais rápidas por fatores de dois a três vezes) (Figuras 2.1 e 2.2);

Figura 2.1 – Relação entre os diferentes tipos de intemperismo com a pluviosidade anual e temperatura média anual.



Fonte: Teixeira *et al.* (2000).

Figura 2.2 – Tipos diferentes de intemperismos na América.



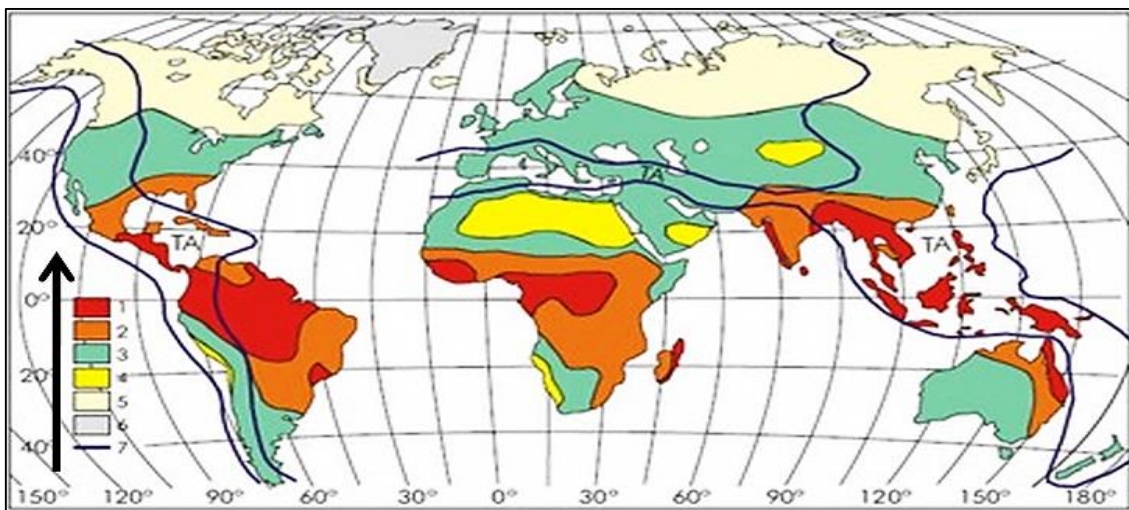
Fonte: Teixeira *et al.* (2000).

Conforme as condições climáticas a alteração química se distribui com diferentes gradações (Figura 2.3). Na superfície terrestre 14% correspondem às regiões sem alteração química (zonas muito áridas ou cobertas por gelo), e 86% (onde os fatores intempéricos atuam) subdivide-se em quatro zonas aproximadamente seguindo as mesmas latitudes:

- Zona da alitização (13% do total) – regiões tropicais com vegetação densa e pluviosidade anual acima de 1.500mm, nas quais a lateritização atua formando óxi-hidróxidos de ferro e alumínio;
- Zona da monossilitização (18% do total) – corresponde ao domínio tropical subúmido onde a precipitação é maior que 500 mm e temperatura acima de 15°C. Neste, formam-se lateritos com caulinita e óxi-hidróxidos de ferro;
- Zona da bissialitização (39% do total) – esta compreende regiões temperadas e áridas com alteração de baixa intensidade, que levam à formação de argilominerais do grupo da esmectita;
- Zona da acidólise total (16% do total) – zona próxima ao polo norte onde o Fe e Al são solúveis, restando apenas o Si para a formação de solos podzólicos ricos em quartzo, e vegetação composta por coníferas.

Figura 2.3 – Distribuição das zonas de alterações químicas:

- | | |
|---|---|
| 1) Zona da alitização; | 5) Zona da acidólise total; |
| 2) Zona da monossilitização; | 6) Zona coberta por gelo; |
| 3) Zona da bissialitização; | 7) Extensão aproximada das áreas tectonicamente ativas, nas |
| 4) Zona muito árida, sem alteração química; | quais os tipos de intemperismo encontram-se modificados. |

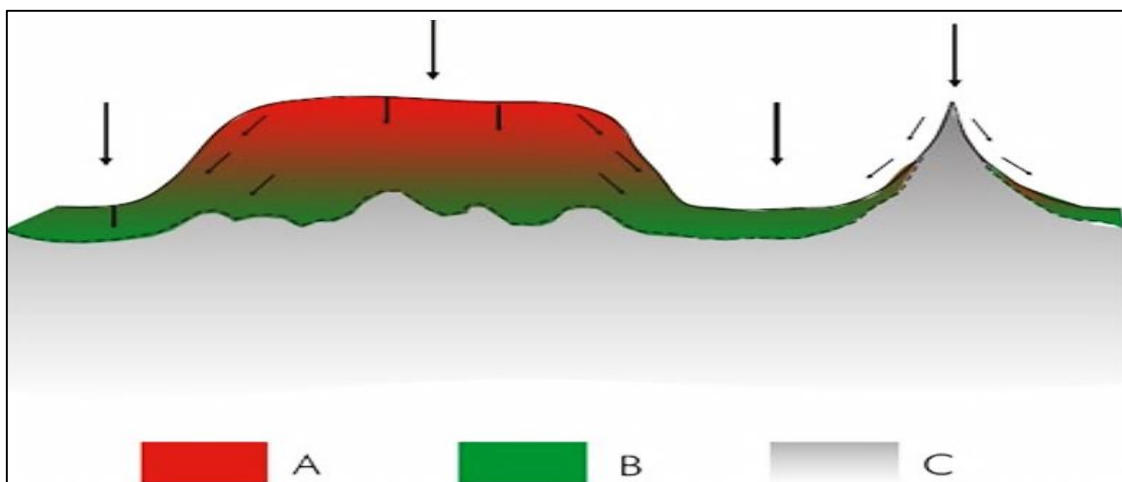


Fonte: Teixeira *et al.* (2000).

Topografia: atua na velocidade pela qual a água da chuva escoar e infiltra, favorecendo desta forma o intemperismo químico a partir da lixiviação dos elementos mais solúveis, onde a melhor morfologia é constituída por um platô com suaves encostas (Figura 2.4);

Figura 2.4 – Diferentes topografias e suas relações com o intemperismo:

- A) Boa drenagem e infiltração que favorecem o intemperismo;
 B) Má drenagem e boa infiltração, mas desfavorece o intemperismo;
 C) Má drenagem e infiltração que desfavorece o intemperismo.



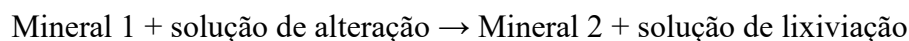
Fonte: Teixeira *et al.* (2000).

Atividade biológica: a decomposição da matéria orgânica libera CO_2 , concentrando-o cem vezes mais, o que acidifica a água infiltrada que, por sua vez favorece a remoção de cátions e solubilização do alumínio;

Tempo: em locais com pouca atuação do intemperismo, o tempo necessário é maior do que em outro com grande intensidade; assim, faz-se necessário cerca de um milhão de anos para a geração de 20 a 50m de perfil de alteração, dependendo muito da intensidade do intemperismo químico atuante na região.

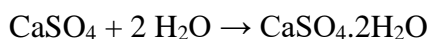
2.2.2 Fatores Internos ao Intemperismo Químico

Os fatores internos que controlam o intemperismo químico correspondem a uma série de reações químicas, representadas genericamente pela reação:

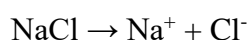


O potencial hidrogênioônico (pH) da água subterrânea está compreendido entre 5 e 9, conforme as seguintes principais reações: hidratação, dissolução, oxidação e hidrólise. Caso o pH da água subterrânea seja inferior a 5, prevalece a reação de acidólise, em lugar da hidrólise.

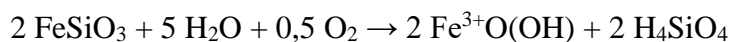
Na hidratação, as moléculas de água acumulam-se na superfície dos grãos devido à atração dos dipolos dessas moléculas com as cargas elétricas não totalmente neutralizadas nos grãos. Assim, a estrutura cristalina se expande e facilita a quebra física e química do mineral, como pode ser exemplificado no caso da hidratação da anidrita (CaSO_4) formando gipsita ($\text{CaSO}_4 \cdot 2\text{H}_2\text{O}$):



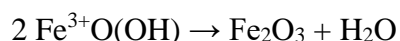
A dissolução afeta poucos minerais como, por exemplo, a calcita (CaCO_3) e a halita (NaCl), que se solubilizam:



A oxidação dá origem a novos minerais, a partir da mudança do estado de oxidação de certos elementos, começando com a solubilização destes e reprecipitação em mineral secundário. Por exemplo, o Fe^{2+} (presente em biotitas, anfibólios, piroxênios – Ferrossilita (FeSiO_3) e olivinas) oxida-se em Fe^{3+} , para formar a goethita ($\text{Fe}^{3+}\text{O}(\text{OH})$):



Caso ocorra a desidratação da goethita, ela dá origem à hematita (Fe_2O_3):



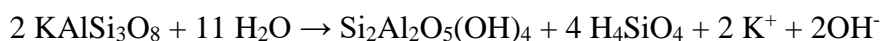
A acidólise ocorre em ambientes muito frios onde a matéria orgânica não é decomposta totalmente, gerando ácidos orgânicos que acidificam as soluções até $\text{pH} < 3$ que decompõem minerais primários. Em condições de pH 3 a 5, são gerados minerais secundários do tipo esmectitas (aluminosas).

A hidrólise ocorre na interação da água (com $\text{pH} = 5$ a 9) com silicatos (são os principais componentes das rochas em geral) dissolvendo-os e liberando primeiramente os cátions alcalinos (K^+ e Na^+) e alcalino-terrosos (Ca^{2+} e Mg^{2+}) em solução. A *posteriori*, com a destruição do mineral primário, são liberados Si e Al, propiciando a formação de silicatos secundários (habitualmente argilominerais). Nos casos de hidrólise total todo o silício e cátions alcalinos/alcalino-terrosos são lixiviados, restando apenas o Al e Fe para formação de óxi-hidróxidos destes, o que caracteriza a alitização e a ferralitização, respectivamente.

A alteração de feldspato potássico (KAlSi_3O_8) para gibbsita ($\text{Al}(\text{OH})_3$) segue a seguinte reação:



No caso da hidrólise parcial, uma parte do silício é retida durante a lixiviação, ligando-se ao alumínio, resultando na formação de argilominerais. Se o potássio é lixiviado ocorre a formação de caulinita ($\text{Si}_2\text{Al}_2\text{O}_5(\text{OH})_4$) com o silício (39% restante) associado ao alumínio na razão de átomos 1:1, processo denominado de monossilitização:



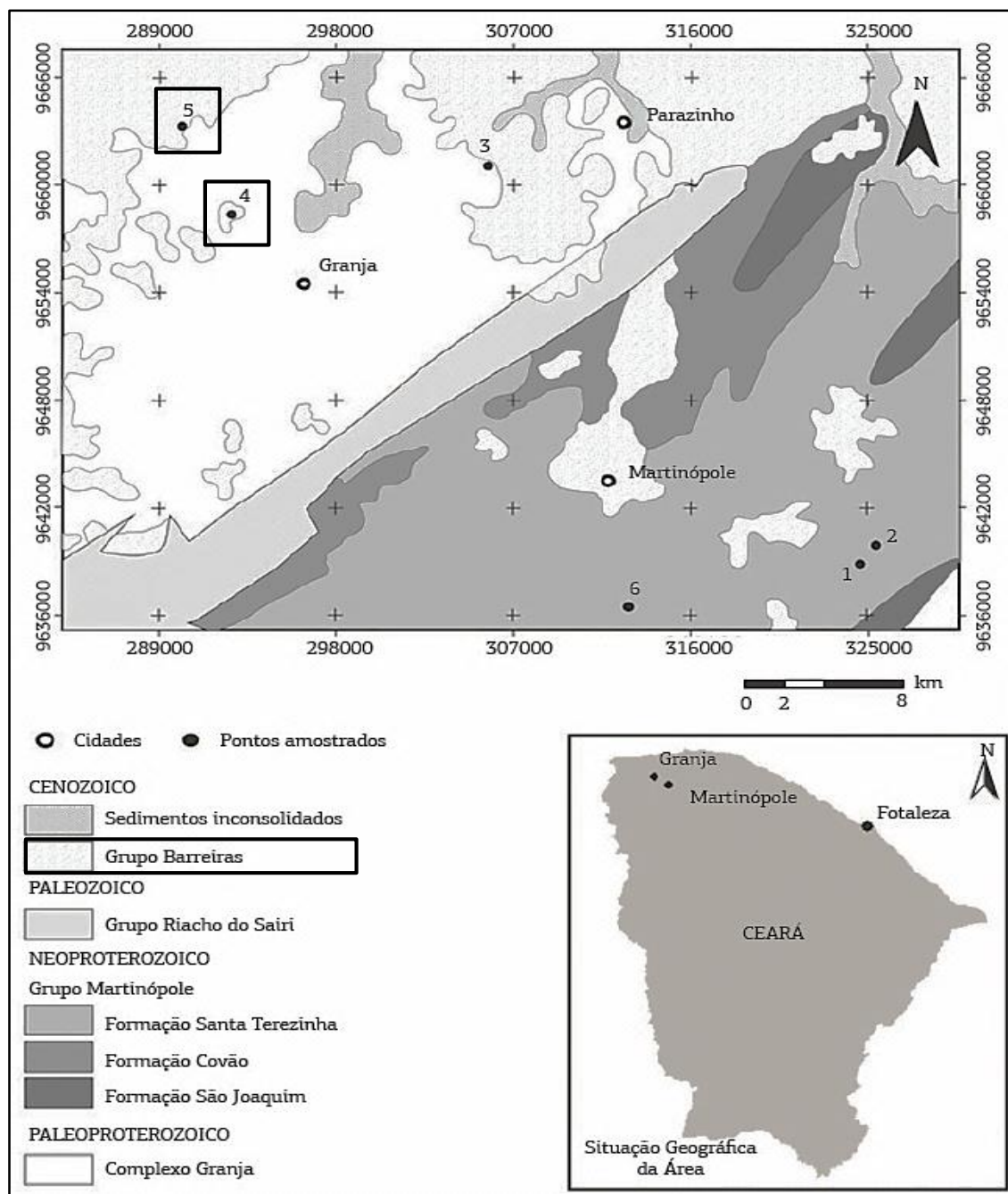
Caso parte do potássio permaneça (13% restante), forma-se argilomineral do grupo da esmectita ($\text{Si}_{3,7}\text{Al}_{0,3}\text{O}_{10}\text{Al}_2(\text{OH})_2\text{K}_{0,3}$) ao combinar-se com o silício (54% restante) e com o alumínio, na relação de 2 átomos de silício para 1 de alumínio, cujo processo é denominado de bissialitização:



2.3 Lateritos no Ceará

Siqueira (2012) estudou o comportamento geoquímico de mantos lateríticos que ocorrem nos municípios de Granja, Martinópolis e Parazinho, noroeste do estado do Ceará. A partir disso, será dada ênfase nos lateritos encontrados no Grupo Barreiras situados em Granja-Ceará (Figura 2.5).

Figura 2.5 – Localização dos pontos de amostragem em mapa geológico simplificado com destaque para o Grupo Barreiras.



Fonte: Siqueira (2012).

O Grupo Barreiras foi descrito localmente por Siqueira (2012) como conglomerados mal selecionados com seixos de quartzo arredondados a sub-angulosos, cimentados por material argiloso. O laterito ocorre como uma extensa capa de concreções acima dos conglomerados.

No ponto 4 (Figura 2.5) a amostragem foi da rocha em alteração intermediária (Amostra 4A) e no ponto 5 (Figura 2.5) a coleta ocorreu em duas situações, na primeira a rocha estava muito alterada (Amostra 5A) e na segunda coletou-se a concreção ferruginosa (Amostra 5B), e realizou-se a análise geoquímica para elementos maiores, Perda ao Fogo (PF) e 7 elementos traços (Ba, Nb, Ni, Sc, Sr, Y e Zr) (Tabela 2.2).

Tabela 2.2 – Elementos maiores, perda ao fogo e elementos traços nos conglomerados do Grupo Barreiras em Granja-Ceará.

%	4A	5A	5B
SiO₂	83,52	86,25	31,95
Al₂O₃	1,00	3,02	12,13
Fe₂O₃ (Total)	13,12	7,10	44,71
CaO	0,01	0,02	0,02
MgO	0,01	0,31	0,02
Na₂O	0,01	0,01	0,01
K₂O	0,01	0,96	0,04
Cr₂O₃	0,066	0,037	0,049
MnO	0,01	0,03	0,02
P₂O₅	0,03	0,06	0,12
TiO₂	0,07	0,12	0,63
PF	2,1	2,1	10,1
TOTAL	99,93	99,98	99,83
ppm			
Ba	8	39	8
Nb	<5	<5	<5
Ni	<20	36	<20
Sc	4	4	32
Sr	<2	<2	5
Y	<3	13	6
Zr	133	31	348

Fonte: Siqueira (2012).

As amostras 4A e 5A apresentaram altos valores de SiO₂ e moderados de Fe₂O₃ enquanto que na 5B, representando a concreção, o teor de SiO₂ reduziu e o de Fe₂O₃ aumentou.

Siqueira (2012) definiu a alteração dessas amostras segundo a classificação de Karunakaran e Sinha Roy (1971) levando em conta as razões Fe₂O₃/Al₂O₃ e SiO₂/Fe₂O₃, no qual classificou-se como ferruginosa se Fe₂O₃/Al₂O₃>1 e SiO₂/Fe₂O₃<1,33 e caso resultasse em Fe₂O₃/Al₂O₃<1 e SiO₂/Fe₂O₃>1,33, esta seria aluminosa.

Siqueira (2012) com base nos teores de SiO₂, Al₂O₃ e Fe₂O₃ determinou o índice Kr segundo Medina (1970 *apud* SIQUEIRA, 2012) a partir da relação:

$$\text{SiO}_2/(\text{Al}_2\text{O}_3+\text{Fe}_2\text{O}_3)$$

Quando Kr<1,33 trata-se de laterito verdadeiro, se 1,33<Kr<2,00 corresponde a um material laterítico e se Kr>2,00 esta equivale a um material não-laterítico (Tabela 2.3).

Tabela 2.3 – Classificações para as amostras do Grupo Barreiras em Granja- Ceará:
Classificação 1: Tipo de alteração segundo Karunakaran e Sinha Roy (1971);
Classificação 2: Índice de intemperismo Kr, segundo Medina (1970 *apud* SIQUEIRA, 2012).

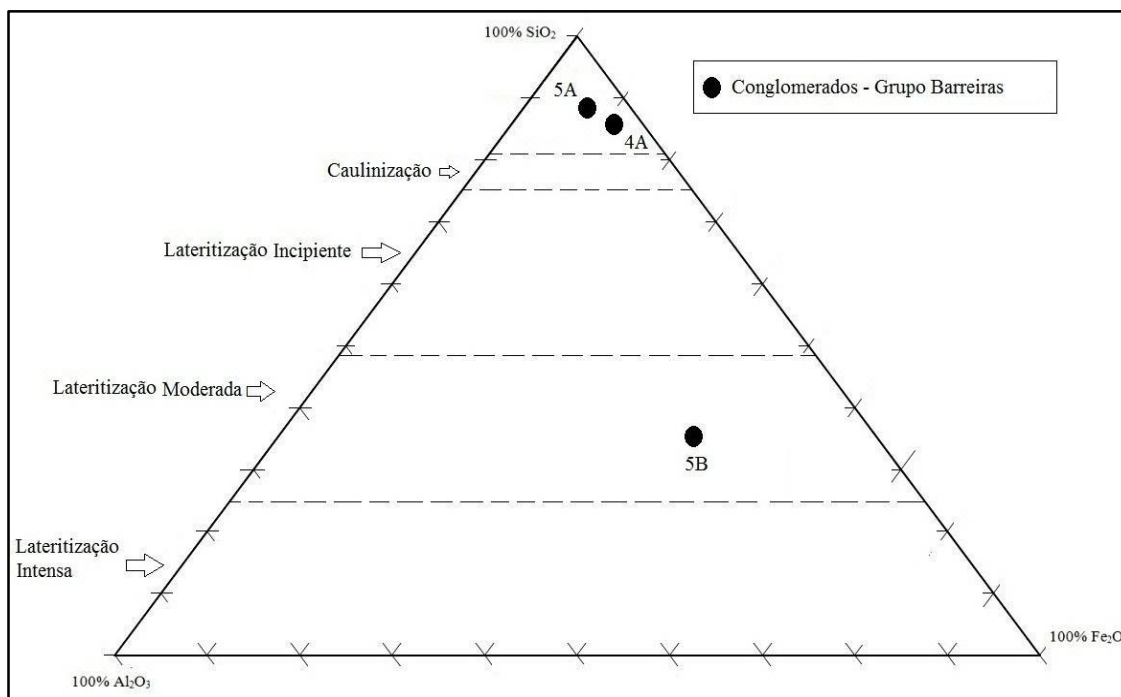
	SiO ₂	Al ₂ O ₃	Fe ₂ O ₃	Fe ₂ O ₃ / Al ₂ O ₃	SiO ₂ / Fe ₂ O ₃	Classificação 1	Índice Kr	Classificação 2
4A	83,52	1,00	13,12	13,12	6,36	-	5,92	Material não laterítico
5A	86,25	3,02	7,10	2,35	12,15	-	8,52	Material não laterítico
5B	31,95	12,13	44,71	3,69	0,71	Ferruginosa	0,56	Laterito verdadeiro

Fonte: Siqueira (2012).

A concreção ferruginosa (Amostra 5B, em destaque; Tabela 2.3) correspondeu a um laterito enquanto que os demais conglomerados não, e este laterito apresenta alteração de natureza ferruginosa.

Siqueira (2012) classificou essas amostras segundo os processos de lateritização de Schellmann (1986 *apud* SIQUEIRA, 2012) inseridos num diagrama $\text{SiO}_2 - \text{Al}_2\text{O}_3 - \text{Fe}_2\text{O}_3$, onde os processos avançam em grau intempérico na seguinte ordem: caulinizacão, lateritização incipiente, moderada e intensa (Figura 2.6).

Figura 2.6 – Conglomerados do Grupo Barreiras de Granja-Ceará plotados no diagrama $\text{SiO}_2 - \text{Al}_2\text{O}_3 - \text{Fe}_2\text{O}_3$ contendo os processos lateríticos segundo Schellmann (1986 *apud* SIQUEIRA, 2012).



Fonte: Siqueira (2012).

Segundo o diagrama triangular acima, o laterito correspondeu ao estágio de lateritização moderada, enquanto que os demais conglomerados correspondem a baixos níveis de alteração, não alcançando o estágio de caulinizacão.

2.4 Lateritos na Amazônia

Os lateritos da Amazônia, cujo processo de lateritização continua em desenvolvimento, Costa (1991) divide-os em dois grandes grupos, a partir de suas características geográficas, mineralógicas e geoquímicas:

Lateritos Imaturos: Estão amplamente distribuídos formando o relevo jovem dominante na Amazônia. Seus perfis apresentam horizonte concrecionário ferruginoso, porém com grau de evolução baixo;

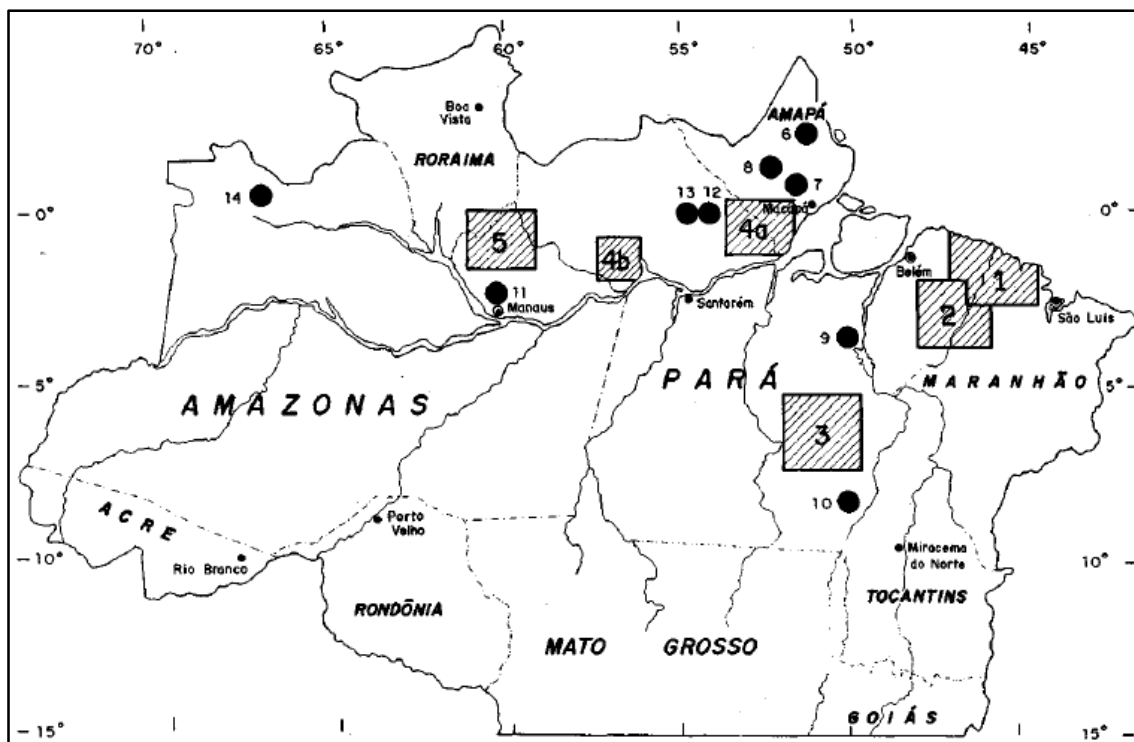
Lateritos Maturos: Não possuem ampla extensão como os imaturos, e estão circunscritos a determinadas regiões (Figura 2.7):

1. Gurupi (Pará-Maranhão): Lateritos predominantemente fosfáticos;
 2. Paragominas-Capim (Pará): Lateritos bauxíticos e caulíníticos;
 3. Carajás (Pará): Lateritos ferruginosos, bauxíticos, manganésíferos, auríferos e níquelíferos;
 4. Baixo Amazonas (Pará)
 - a) Trombetas, Nhamundá e Faro: Lateritos bauxíticos;
 - b) Almeirim, Monte Dourado e Felipe: Lateritos bauxíticos e caulíníticos;
 5. Pitinga (Amazonas): Lateritos variados, principalmente bauxíticos e com Sn, Nb e Y.
- Depósitos menores isolados:
6. Cassiporé (Amapá);
 7. Vila nova (Amapá);
 8. Serra do Navio (Amapá);
 9. Tucuruí (Pará);
 10. Quatipuru (Pará);
 11. Manaus (Amazonas).

Além destes, há também corpos isolados protegidos por chapéus-de-ferro espessos (*gossans*):

12. Maraconaí (Pará);
13. Maicuru (Pará);
14. Seis Lagos (Amazonas).

Figura 2.7 – Principais regiões de lateritos maduros conhecidas na Amazônia.



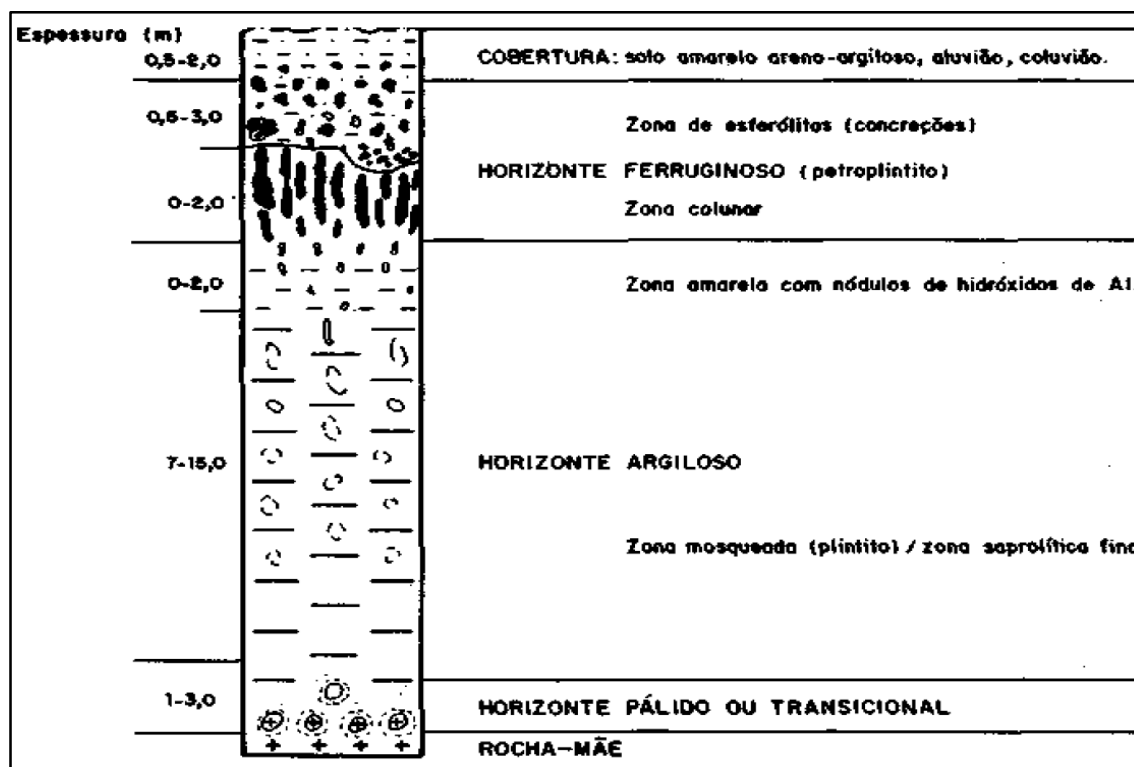
Fonte: Costa (1991).

Os lateritos maduros e imaturos da Amazônia podem ocorrer de forma autóctone e alóctone (ou conhecidos na região como linhas de pedra e paleopavimentos), os autóctones (lateritos maduros e imaturos) apresentam maior distribuição do que os alóctones (em geral, são lateritos imaturos).

2.4.1 Lateritos Imaturos Autóctones na Amazônia

Este tipo de perfil ocorre em relevos recentes quase planos a ondulados, sendo representado por três horizontes, do topo para a base (Figura 2.8):

Figura 2.8 – Perfil geológico simplificado de lateritos imaturos autóctones na Amazônia.



Fonte: Costa (1991).

Horizonte ferruginoso (petroplintito): É constituído por nódulos, concreções, esferólitos e fragmentos de óxi-hidróxidos de ferro. Estruturas menos abundantes podem aparecer também, como: colunas, canais em forma de raízes e vermes, estruturas cavernosas, esponjosas e porosas (resultantes da lixiviação) em matriz argilosa a terrosa, com cimento de gibbsita/caulinita. A cor marrom-avermelhada predomina e a matriz/cimento, se houver, é branco-amarelada ou cinza. O solo acima deste horizonte apresenta frequentemente caulinita, quartzo, goethita aluminosa e exibe, nas concreções: hematita, goethita, goethita aluminosa, maghemita ($\gamma\text{-Fe}_2^{3+}\text{O}_3$), quartzo, caulinita, gibbsita, anatásio (TiO_2), ouro singénico (zona de contato entre os horizontes ferruginoso e argiloso). Na matriz areno-argilosa apresenta: caulinita, quartzo, goethita aluminosa, goethita, gibbsita e anatásio.

Horizonte argiloso: Situado abaixo do horizonte ferruginoso, apresenta com o mesmo um contato quase abrupto. Este horizonte é fundamentalmente constituído por argilominerais. Os minerais encontrados na zona mosqueada/saprolítica são: caulinita, halloysita – $\text{Al}_2(\text{Si}_2\text{O}_5)(\text{OH})_4$, quartzo, hematita, goethita, esmectita (montmorillonita: $(\text{Na,Ca})_{0,3}(\text{Al,Mg})_2\text{Si}_4\text{O}_{10}(\text{OH})_{2.n}(\text{H}_2\text{O})$, illita:

(K,H₃O)(Al,Mg,Fe)₂(Si,Al)₄O₁₀[(OH)₂,(H₂O)], e óxi-hidróxidos de Mn (sob a forma de películas negras nas superfícies de clivagem e de fraturas).

Este horizonte, de acordo com a rocha-mãe, apresenta-se com as seguintes feições:

Zona mosqueada/amarelada (plintito): derivada de rochas sedimentares e ígneas ácidas e intermediárias, com manchas irregulares de coloração vermelha e violeta; na parte superior cores amareladas a marrom, enquanto que a zona amarelada é representada por caulinita, quartzo, gibbsita e goethita;

Zona saprolítica: esta deriva de rochas cristalinas onde fragmentos destas parcialmente alteradas possuem tamanho centimétrico, e são encontrados na base constituindo o saprólito grosso e/ou fragmentos milimétricos no topo, formando o saprólito fino. O saprólito apresenta-se mosqueado desde o meio até o topo, quando este deriva de rochas félsicas e intermediárias e sedimentares. Entretanto este mosqueamento é raro em rochas máficas-ultramáficas, xistos e filitos;

Horizonte pálido ou transicional: situa-se abaixo do horizonte argiloso e em contato direto com a “rocha-mãe”, apresentando uma cor mais pálida do que o protólito, e ausência de óxi-hidróxidos de ferro. É constituído por argilominerais do tipo esmectita e illita, e minerais primários instáveis à alteração intempérica. Fragmentos da “rocha-mãe” aí são abundantes e envolvidos por pálidas auréolas de intemperismo, em matriz restrita terrosa e argilosa. Além disso, estruturas primárias encontram-se preservadas neste horizonte.

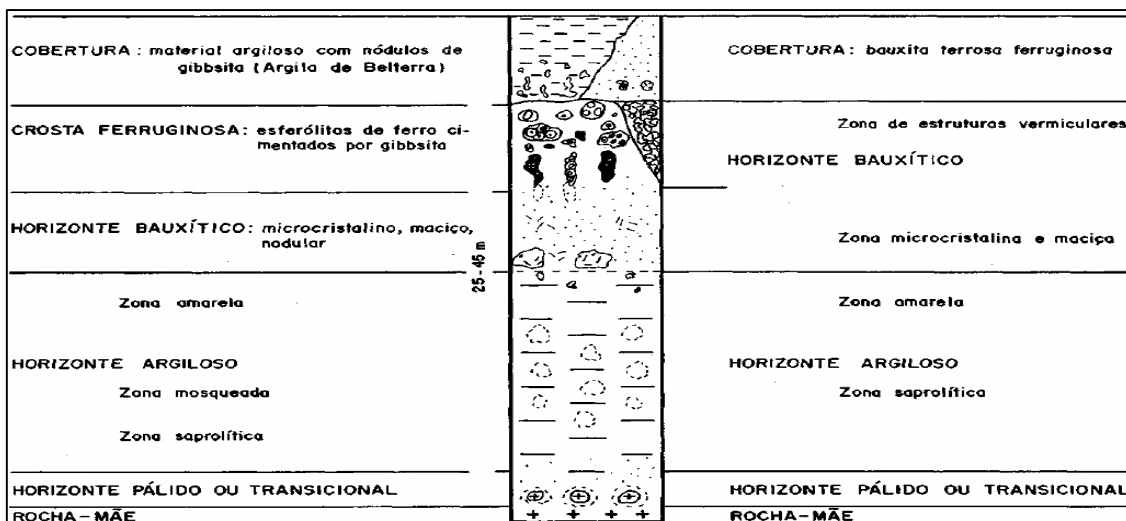
A composição química desses lateritos imaturos na Amazônia mostra que os valores de SiO₂, MgO e K₂O diminuem em direção ao horizonte ferruginoso, ao passo de que os teores de Fe₂O₃, Al₂O₃ e TiO₂ aumentam nesse mesmo sentido.

2.4.2 Lateritos Maturos Autóctones na Amazônia

Estes são mais evoluídos e espessos em relação aos imaturos, ocorrendo em conformidade com o relevo recente adjacente ou em platôs/morros ou platôs isolados, topograficamente acima dos lateritos bauxíticos. Sua distribuição ocupa uma área de aproximadamente 40 km². Estes lateritos apresentam textura e estruturas singenéticas

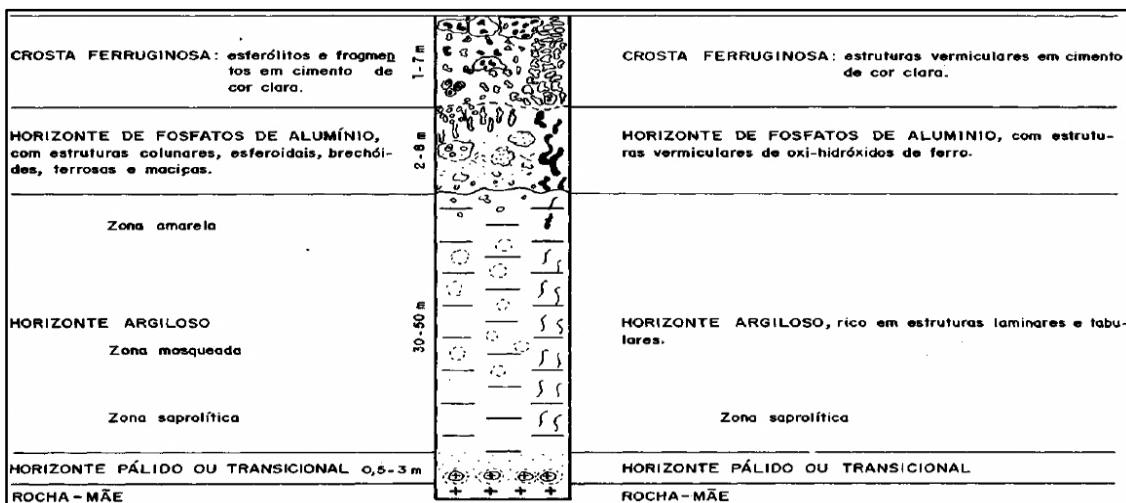
variadas, além de diversidade mineral ao longo de seus horizontes que compõem seus perfis (Figuras 2.9 e 2.10).

Figura 2.9 – Perfil geológico simplificado de laterito bauxítico maturo autóctone na Amazônia.



Fonte: Costa (1991).

Figura 2.10 – Perfil geológico simplificado de laterito fosfático maturo autóctone na Amazônia.



Fonte: Costa (1991).

Os horizontes destes lateritos maduros são compostos, do topo para a base, por:

Crosta ferruginosa: Apresenta-se sob o aspecto de rocha dura e densa, na maioria das vezes magnética, com tons marrom-avermelhados, sendo constituída por agregado de nódulos, concreções e esferólitos vermelhos (óxi-hidróxidos de ferro) em cimento fosfático e/ou de hidróxidos aluminosos brancos e amarelos. Nesta crosta apresentam minerais como: hematita, goethita, quartzo, caulinita, anatásio, gibbsita,

fosfatos de alumínio e pepitas de ouro nativo. Já os sedimentos que recobrem esta crosta são constituídos por siderita (FeCO_3), pirita (FeS_2), turfa e fosfatos de ferro;

Horizonte bauxítico e/ou de fosfato de alumínio: Distingue-se pela existência gibbsita e bauxitos fosfáticos, formando rochas amareladas, cremes a vermelhas, com blocos centimétricos a métrico da rocha-mãe numa matriz argilo-arenosa. Mineralogicamente é constituído principalmente por hidróxidos de alumínio (gibbsita) e/ou fosfatos de alumínio;

Horizonte argiloso: Neste horizonte ocorrem principalmente argilominerais e óxi-hidróxidos de ferro. Apresenta zona mosqueada, o saprólito é marrom, e a zona argilosa e/ou terrosa amarela a marrom com espessuras da ordem de 10 a 30m;

Horizonte pálido ou transicional: Representa a transição entre a “rocha-mãe” com o horizonte argiloso, possuindo as mesmas características descritas acima para este tipo de horizonte nos lateritos imaturos da Amazônia.

A composição química dos lateritos maduros da Amazônia é variável, porém na relação entre os horizontes e a “rocha-mãe”, observam-se os seguintes aspectos:

Os teores de MgO e MnO diminuem bruscamente enquanto que os de SiO_2 e K_2O são reduzidos no contato do horizonte argiloso com o bauxítico e/ou fosfático;

Os conteúdos de TiO_2 , Al_2O_3 e H_2O elevam-se de forma gradual em direção ao topo, exceto o de Fe_2O_3 , que aumenta bruscamente na crosta ferruginosa, e quando ocorrem fosfatos de alumínio os valores de CaO , Na_2O e P_2O_5 elevam-se igualmente; na inexistência desses fosfatos, estes mesmos óxidos decrescem no sentido do topo.

2.4.3 Lateritos Alóctones na Amazônia

Denominados de “linhas de pedras”, com feições lenticulares onduladas de espessura centimétrica a métrica, e com extensão da ordem de dezenas a centenas de metros, estes corpos são constituídos de lateritos fragmentados em matrizes argilo-arenosas de tons amarelos a marrom. Tais feições são amplamente distribuídas pela Amazônia, como produtos da dissecação do relevo regional no Tércio-Quaternário.

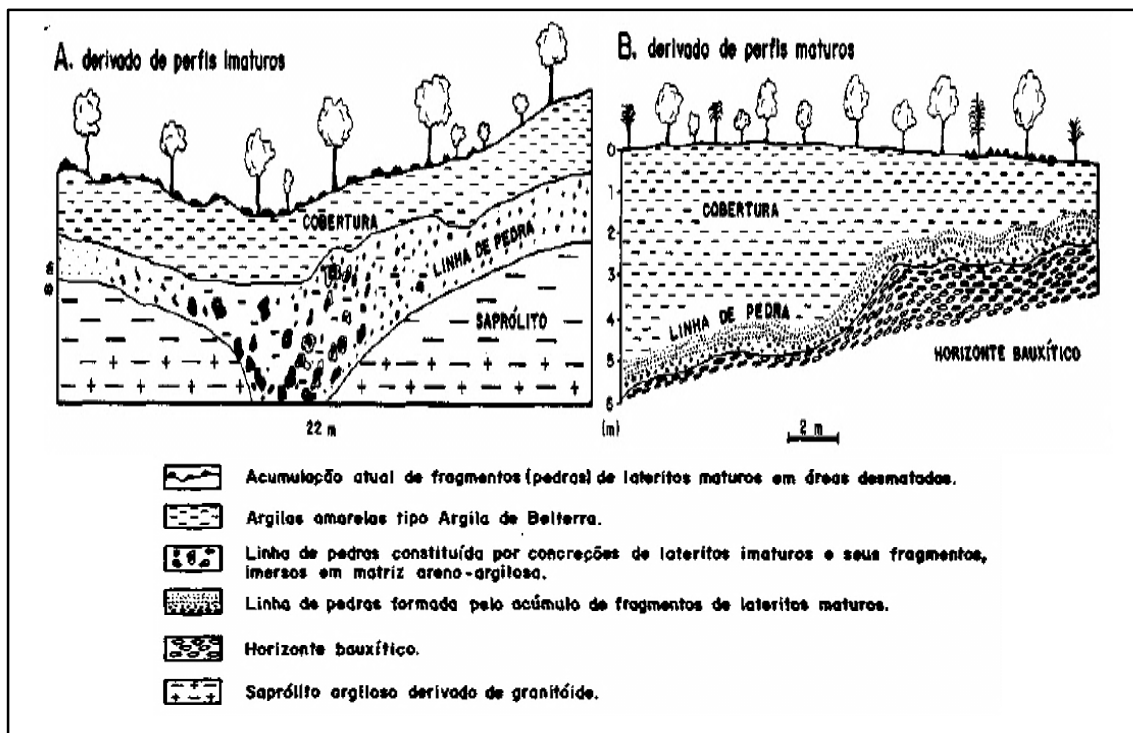
As linhas de pedras exibem granocrescências internamente, e comumente seus fragmentos são oriundos do horizonte ferruginoso de lateritos imaturos, depositando-se acima destes (Figura 2.11A). Quando as linhas de pedras são derivadas de lateritos

maturas, nelas são encontrados seixos de quartzo e fragmentos de bauxita/fosfatos (Figura 2.11B).

Figura 2.11 – Linhas de pedras:

A) Provenientes de lateritos imaturos;

B) Provenientes de lateritos maturas.



Fonte: Costa (1991).

3 ASPECTOS GEOAMBIENTAIS

3.1 Clima

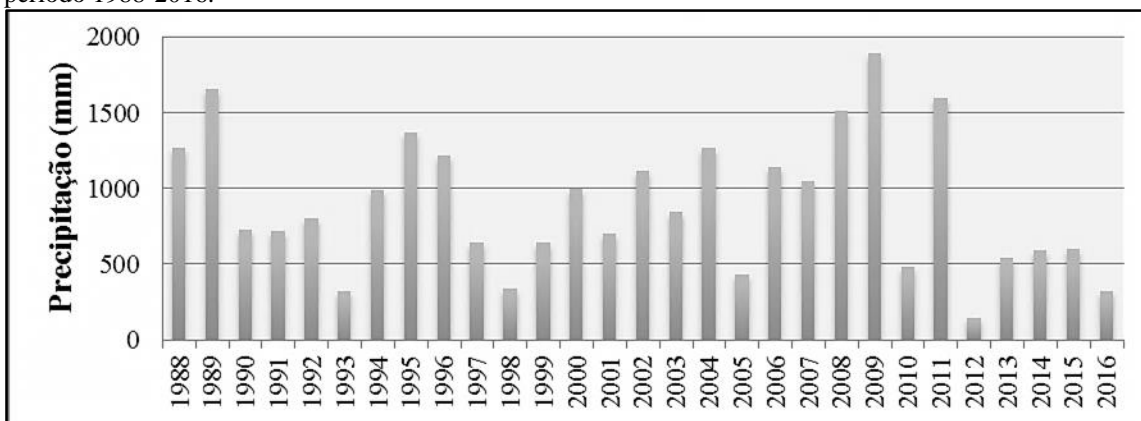
Segundo o IPECE (2017), o clima de Icapuí é classificado como Tropical Quente Semiárido Brando.

A partir de dados da Fundação Cearense de Meteorologia (FUNCEME, 2017), as chuvas de pré-estação ocorrem entre dezembro e janeiro, resultantes da influência da Zona de Convergência Intertropical, entretanto, as mais expressivas precipitações estão compreendidas entre janeiro e maio, influenciadas por: Vórtices Ciclônicos de Ar Superior (Janeiro e Fevereiro), Frentes Frias (Novembro a Janeiro), Linhas de Estabilidade (Dezembro a Março), Sistemas Convectivos de Mesoescala (chuvas curtas, fortes e isoladas) e Oscilação 30-60 dias. Depois deste período, as chuvas entre junho a agosto ocorrem devido às Ondas de Leste, vindas desde a costa da África. Enfim, além de todos estes fatores, fenômenos globais como *El Niño* e *La Niña* podem influenciar na pluviometria.

3.2 Pluviosidade

A partir de registros históricos da FUNCEME (2017) do posto pluviométrico de Icapuí, entre 1988 a 2016, definiu-se a média da precipitação anual: 916 mm, com desvio padrão de 443,75 mm, máximo registrado em 2009 (1891,8 mm) e mínimo em 2012 (143 mm). Observa-se alternância de anos com alta e baixa ocorrência de chuvas e estiagem prolongada nos últimos cinco anos (Figura 3.1).

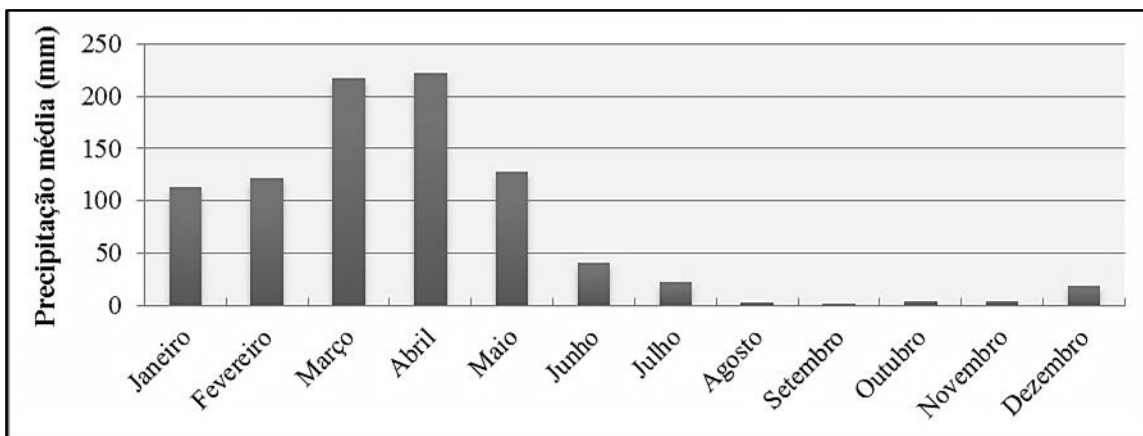
Figura 3.1 – Precipitações anuais totais registradas no posto pluviométrico situado em Icapuí – Ceará, no período 1988-2016.



Fonte: FUNCEME (2017).

A média mensal histórica de chuvas nesse mesmo período de 1988 a 2016 mostra valor mínimo de 2 mm (Setembro) e máximo de 227 mm (Abril). As maiores precipitações médias ocorrem de janeiro a maio (Figura 3.2).

Figura 3.2 – Médias mensais de precipitação no período 1988-2016, conforme registros do posto pluviométrico de Icapuí – Ceará.

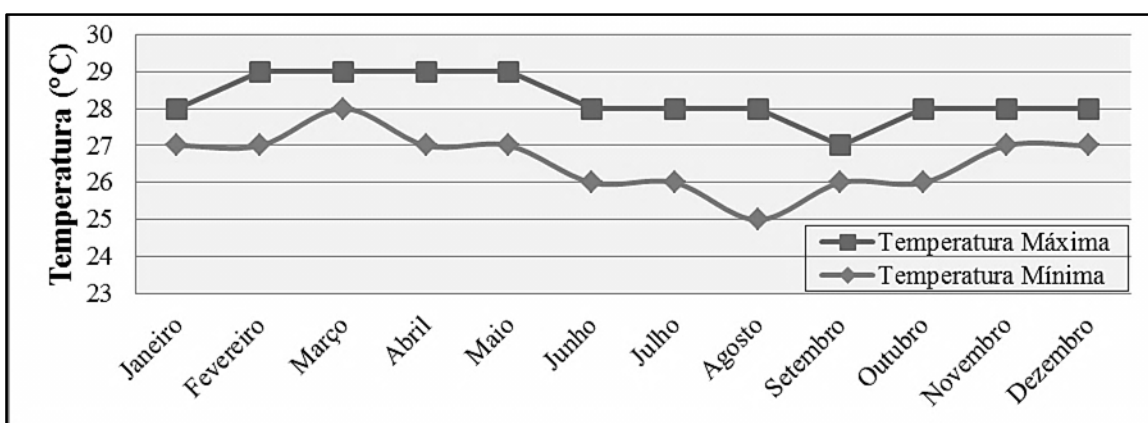


Fonte: FUNCEME (2017).

3.3 Temperatura

Segundo Climatempo (2017), Icapuí apresenta uma variação de temperatura entre o mínimo de 25°C em agosto até máximo de 29°C nos meses de fevereiro a maio (Figura 3.3). Nota-se um aumento nas temperaturas durante o período chuvoso.

Figura 3.3 – Médias mensais das temperaturas máximas e mínimas em Icapuí – CE, conforme registros no período 1986-2016.



Fonte: Climatempo (2017).

3.4 Vegetação

Segundo o IPECE (2017), Icapuí está inserido no Complexo Vegetacional da Zona Litorânea que abrange o manguezal, a vegetação pioneira psamófila (situada nas áreas de dunas móveis e na faixa da pós-praia), e a vegetação subperenifólia, instalada sobre as dunas fixas e antigas.

3.5 Geomorfologia

O IPECE (2017) afirma que a geomorfologia regional de Icapuí engloba o Tabuleiro Pré-litorâneo e a Planície Litorânea. Nesta última estão as praias, lagoas costeiras e interdunares, dunas, terraços marinhos, e sistema estuarino-lagunar.

O Tabuleiro pré-litorâneo engloba grande parte do território de Icapuí, estendendo-se nas regiões adjacentes à costa onde, em algumas áreas, está coberto por antigas dunas. Ele é limitado interiormente por falésias inativas, e por falésias ativas quando alcança o litoral.

3.6 Solos

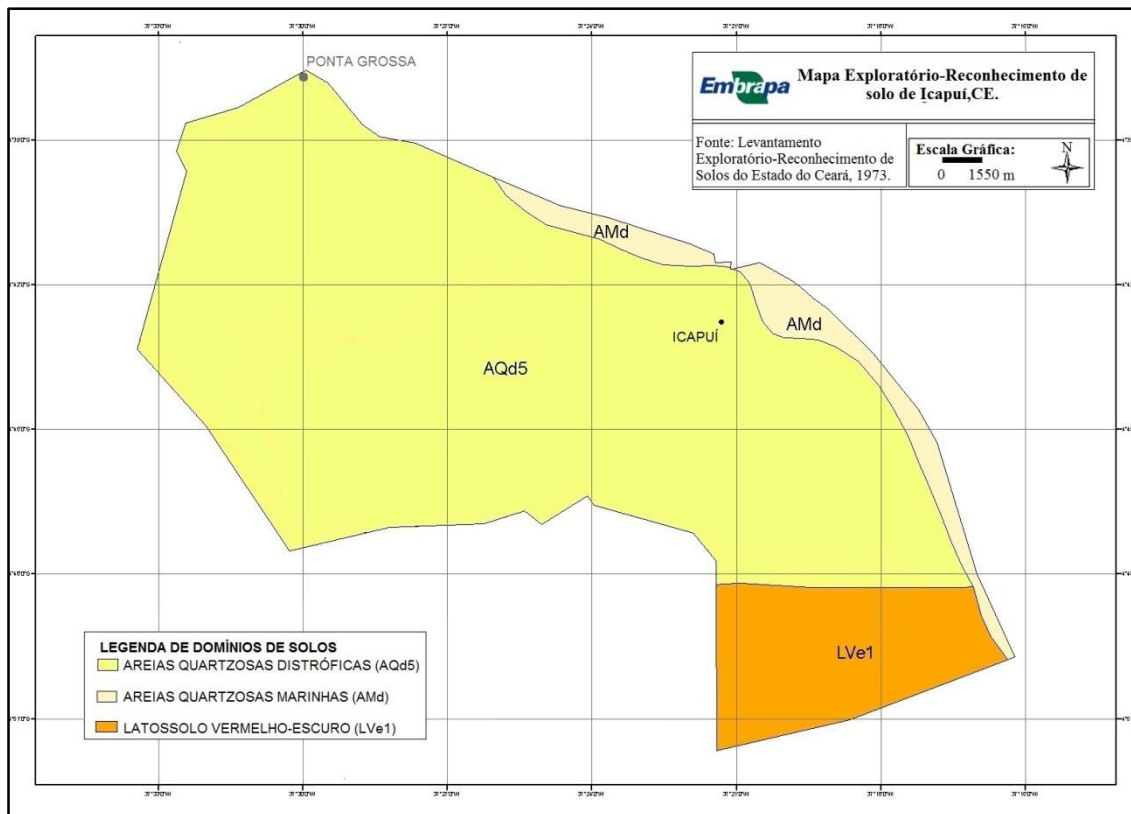
Segundo dados do IPECE (2017), os solos de Icapuí são constituídos por Areias Quartzosas distróficas – AQd5 (362,59 km²) e Marinhas – AMd (18,42 km²) e Latossolos Vermelho-escuro – LVe1 (48,39 km²) (Figura 3.4), sendo estes descritos pela EMBRAPA (2017):

As areias quartzosas distróficas e marinhas ou neossolos quartzarênicos abrangem quase todo o território de Icapuí com exceção da região inferior à Lagoa do Sal (Distrito de Manibu). São solos rasos com textura arenosa (cujo teor máximo de argila é de 15%), atingindo até 2m de profundidade, amarelos a avermelhados, constituídos principalmente por grãos de quartzo. São pouco férteis e facilmente degradados se cultivados continuamente ao longo dos anos. O laterito estudado está situado neste tipo de solo;

Latossolos vermelho-escuros a amarelados são encontrados no distrito de Manibu, sul de Icapuí. São solos rasos relativamente profundos (>2m), com horizonte B espesso (>50 cm), com teores de argila entre 15% e 80% e de silte <20%. A

constituição mineralógica envolve, na fração argilosa: caulinita, goethita, hematita e gibbsita. São pouco férteis, sendo necessário o uso de fertilizantes, mas suportam cultivos prolongados.

Figura 3.4 – Mapa exploratório-reconhecimento de solos de Icapuí-Ceará.

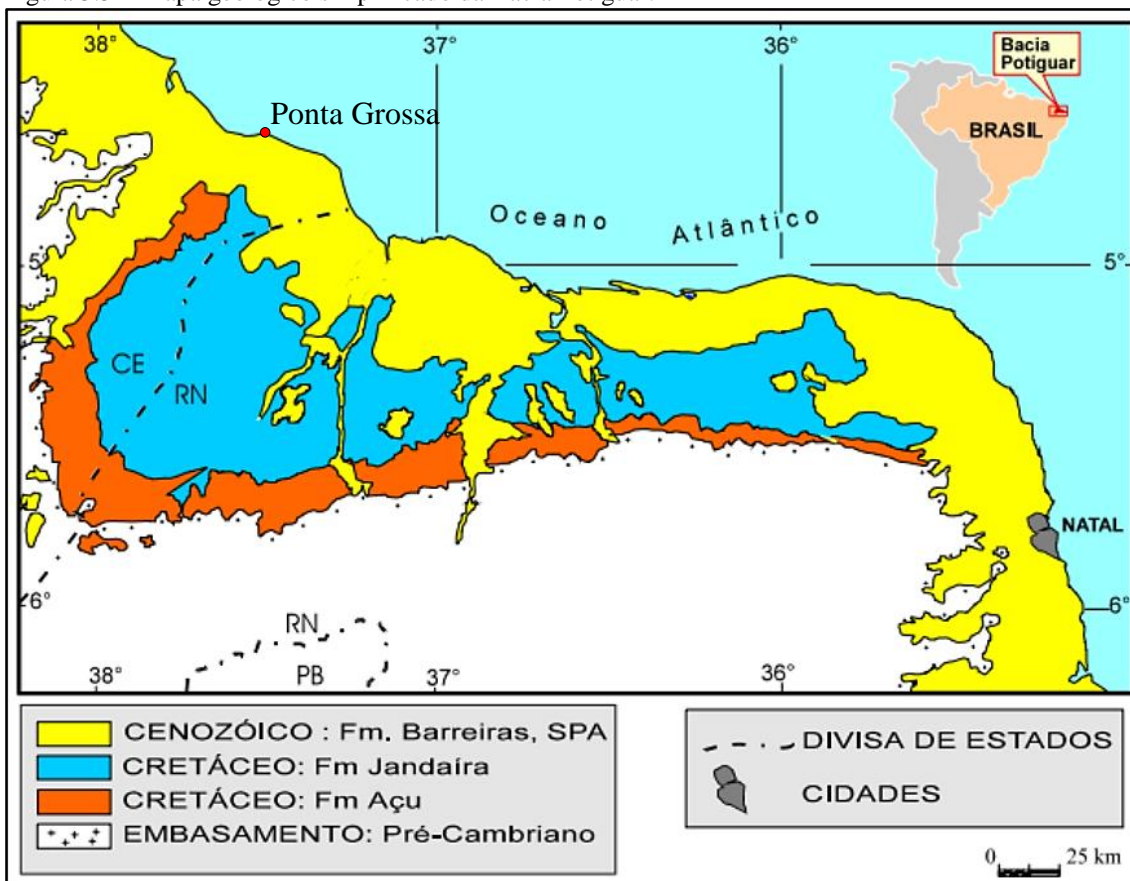


Fonte: EMBRAPA Solos (2006).

3.7 Geologia Regional

A área de estudo está encravada na Bacia Potiguar, abrangendo o norte do Rio Grande do Norte e NE do Ceará, segundo Bertani *et al.* (1990 *apud* SOUSA, 2002) esta bacia apresenta 21.500 km² de área emersa (45%) e 26.500 km² de área submersa (55%), esta representada pela plataforma e talude continentais (). A bacia sedimentar limita-se ao norte com o Oceano Atlântico até a isóbata de 2.000m; a sul e oeste com as rochas ígneas e metamórficas proterozóicas do embasamento cristalino (Província Borborema); a leste com a Bacia de Pernambuco-Paraíba, através do Alto de Touros; e a noroeste com a Bacia do Ceará, através do Alto de Fortaleza (Figura 3.5).

Figura 3.5 – Mapa geológico simplificado da Bacia Potiguar.



Fonte: Dantas (1998).

A Província Borborema é constituída por sequências metassedimentares e metavulcânicas de idade meso e neoproterozóicas, com blocos de embasamento de idade paleoproterozóica e alguns remanescentes do Arqueano, configurando um cinturão orogênico meso-neoproterozóico. Sua evolução Brasileira/Panafricana foi acompanhada de um importante plutonismo granítico (ANGELIM, 2007).

A Província Borborema adjacente à Bacia Potiguar divide-se, de forma simplificada, em três domínios: a oeste o Domínio Jaguaribeano ou Faixa Jaguaribeana; na porção central o Domínio Rio Piranhas-Seridó; e a leste o Domínio São José do Campestre (ANGELIM, 2007).

O domínio adjacente à área de estudo é o Jaguaribeano, de idade paleoproterozóica e representado por ortognaisses do Complexo Jaguaretama, incluindo estreitas faixas da sequência metavulcanosedimentar do Grupo de São José e corpos de ortognaisses da Suíte Serra do Deserto.

Françolin e Szarmari (1987 *apud* SOUSA, 2002) afirmam que a origem da Bacia Potiguar data do Cretáceo Inferior (140 milhões de anos), na fragmentação do Gondwana separando a placa Africana da Sul-americana e gerando o *rift* de direção NE-SW recoberto pelos sedimentos correspondente à bacia.

3.7.1 Estratigrafia da Bacia Potiguar

Soares *et al.* (2003) após modificarem a carta estratigráfica de Araripe e Feijó (1994), apresentaram da base em direção ao topo, as seguintes sequências: *Rift* (Grupo Areia Branca – Formações Pendência e Pescada), Transicional (Grupo Areia Branca – Formação Alagamar), *Drift* transgressiva (Grupo Apodi) e *Drift* regressiva (Grupo Agulha) (Figura 3.6).

Sequência *Rift*

O Grupo Areia Branca (Cretáceo Inferior) é composto nesta sequência *Rift*, pelas Formações Pendência e Pescada. A Formação Pendência se desenvolveu em ambiente fluvio-deltáico-lacustrino, sendo constituída por arenitos muito finos a conglomeráticos, com intercalações de folhelhos e siltitos. A Formação Pescada é formada por leques aluviais, incluindo arenitos médios a finos com folhelhos e siltitos intercalados.

Sequência Transicional

A Formação Alagamar do Grupo Areia Branca é constituída pelos Membros Upanema e Galinhos, depositados em ambientes flúvio-deltáico e lagunar, respectivamente. Neste último, a Camada Ponta do Tubarão é representada por calcarenitos, calcilutitos ostracoidais e folhelhos de ambiente lagunar, no qual são distintos os dois membros supramencionados. O Membro Upanema engloba folhelhos e arenitos finos a grossos, e o Membro Galinhos inclui calcilutitos e folhelhos.

Sequência *Drift* transgressiva

Grupo Apodi (Cretáceo Inferior a Superior) é composto pelas Formações Açú, Ponta do Mel, Quebradas, e Jandaíra. A Formação Açú foi depositada num ambiente flúvio-marinho, exibindo arenitos finos a conglomerados na base e seção intermediária; em seu topo são encontrados arenitos finos gradando para argilitos e folhelhos. A Formação Ponta do Mel foi formada em ambiente de plataforma carbonática e é composta por calcarenitos, calcilitos e doloespatitos. A Formação Quebradas, produto de ambiente flúvio-marinho transgressivo, é constituída por arenitos finos, siltitos e folhelhos, sendo subdividida nos Membros Porto do Mangue e Redonda. A Formação Jandaíra (Cretáceo superior), depositada em ambiente de plataforma carbonática, é representada por calcários dolomíticos, calcarenitos e calcilitosossilíferos, de tonalidades creme a cinza.

Sequência *Drift* regressiva

As Formações Ubarana, Guamaré, Serra dos Martins, Tibau e Barreiras compõem o Grupo Agulha (Cretáceo Superior ao Quaternário). A Formação Ubarana resulta na sedimentação em plataforma e talude sendo constituída por folhelhos com intercalações de lentes de arenitos e conglomerados turbidíticos. A Formação Guamaré depositada em plataforma e talude corresponde a calcarenitos bioclásticos e calcilitos. A Formação Serra dos Martins corresponde aos arenitos e conglomerados imaturos situados no topo da Serra de Mossoró e sobre platôs pré-cambrianos na porção sul da Bacia Potiguar. A Formação Tibau resulta na deposição em ambiente de sistema de leques costeiros originando intercalações de diamictitos, calcarenitos, argilitos e arenitos. A Formação Barreiras é representada por arenitos médios a grossos resultantes de ambiente fluvial de canais entrelaçados em associação com depósitos litorâneos e leques aluviais.

Os sedimentos de praia e aluvião de idade pré-holocênicos e holocênicos e situados na porção emersa da Bacia Potiguar correspondem a depósitos com origem aluvial, fluvial, marinha, eólica, lacustre e flúvio-estuarina.

Magmatismo Meso-Cenozóico

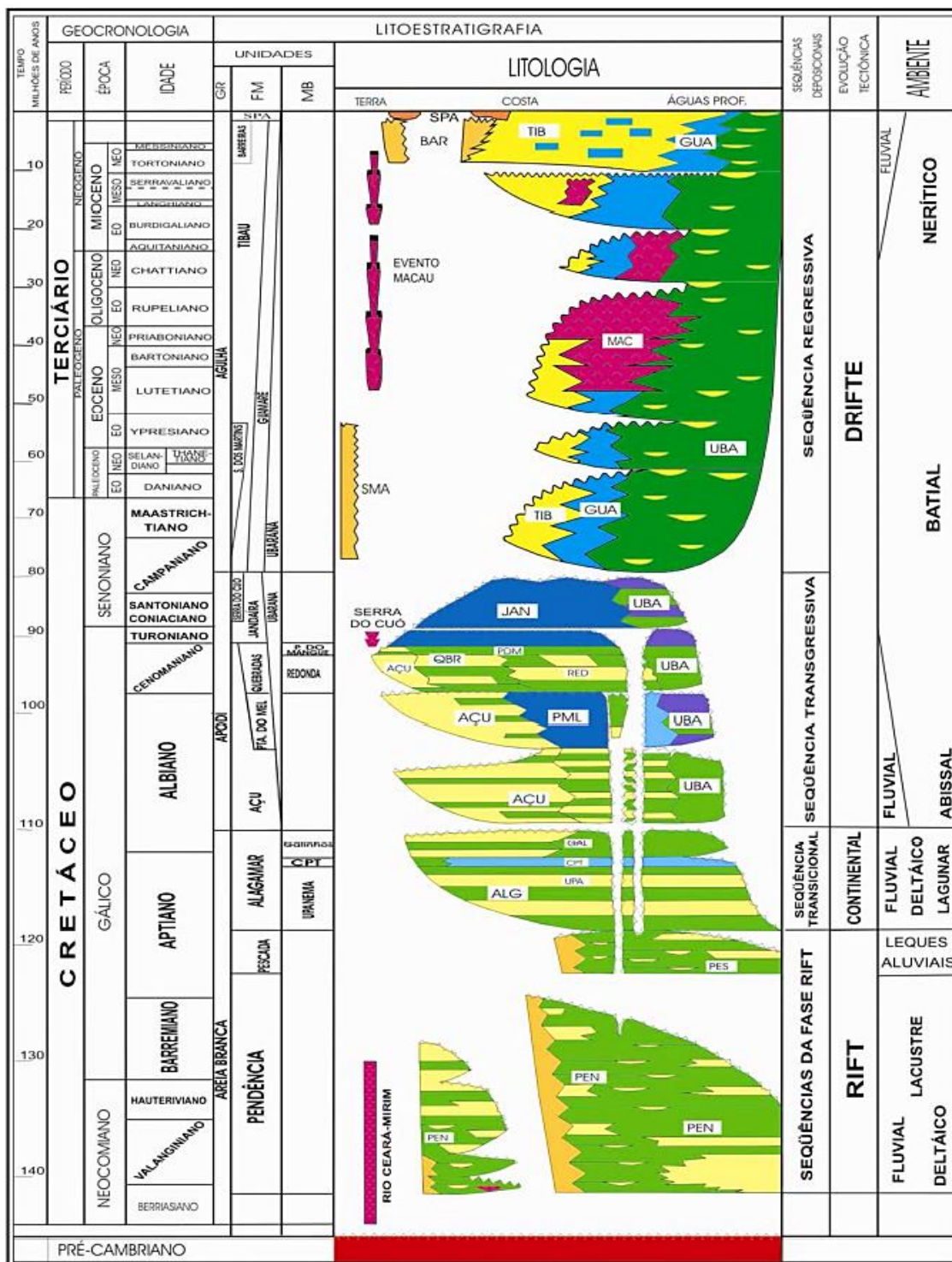
Segundo Araripe e Feijó (1994) três eventos magmáticos básicos afetaram a sedimentação da Bacia Potiguar: Magmatismos Rio Ceará-Mirim, Serra do Cuó e Macau.

O Magmatismo Rio Ceará-Mirim (Cretáceo Inferior) ocorreu durante a fase *rift* e é constituído por enxames de diques de diabásio de afinidade toleítica, com direção leste-oeste. Ocorre na borda sul da bacia e atinge o embasamento desta. Associadas a este magmatismo, encontram-se rochas vulcanoclásticas intercaladas na base da Formação Pendência.

O Magmatismo Serra do Cuó (Cretáceo Superior) corresponde a soleiras de olivina-basaltos de tendência alcalina e intercaladas à Formação Açu.

O Magmatismo Macau (Paleógeno) é constituído por derrames, *necks*, *plugs* e diques de olivina-basalto com afinidade alcalina, sendo encontrados intercalados às Formações Tibau, Guamaré e Ubarana, além de intrusões no embasamento desta bacia.

Figura 3.6 – Carta estratigráfica da Bacia Potiguar.



Fonte: Soares *et al.* (2003).

*PEN: Formação Pendência;
 UPA: Membro Upanema;
 AÇU: Formação Açu;
 QBR: Formação Quebradas;
 JAN: Formação Jandaíra;
 SMA: Formação Serra dos Martins;
 SPA: Sedimentos de Praia e Aluvião.

PES: Formação Pescada;
 CPT: Camada Ponta do Tubarão;
 UBA: Formação Ubarana;
 PDM: Membro Porto do Mangue;
 GUA: Formação Guamaré;
 MAC: Magmatismo Macau;

ALG: Formação Alagamar;
 GAL: Membro Galinhos;
 PML: Formação Ponta do Mel;
 RED: Membro Redonda;
 TIB: Formação Tibau;
 BAR: Formação Barreiras;

Segundo Lima (2008) as rochas da Formação Barreiras encontradas no litoral do Ceará e Rio Grande do Norte são do Mioceno, conforme datações U-Th/He em óxi-hidróxidos de ferro, detríticos, e datações $^{40}\text{Ar}/^{39}\text{Ar}$ sobre óxi-hidróxidos de manganês e ferro, autigênicos.

Mabesoone *et al.* (1972 *apud* SOUSA, 2002) afirmam que na transição Mioceno – Plioceno ocorreu um intemperismo que proporcionou a formação de solos lateríticos sobre as rochas da Formação Serra dos Martins (base). Os autores agruparam esta formação (na base) e as Formações Guararapes (meio) e Macaíba (topo) ao Grupo Barreiras.

Na carta estratigráfica de Soares *et al.* (2003), não há descrição da Formação Potengi, porém, tal formação foi proposta por Campos e Silva (1966 *apud* SOUSA, 2002) e caracterizada como sedimentos situados estratigraficamente acima da Formação Barreiras e abaixo das dunas.

Vilaça *et al.* (1985 *apud* SOUSA, 2002) descreveram a Formação Potengi, constituída por sedimentos areno-quartzosos amarelo avermelhados (mais escuros no sentido do litoral) com pouca argila, incluindo grânulos limoníticos. Segundo estes autores, esta formação possui idade quaternária. Mabesoone *et al.* (1972 *apud* SOUSA, 2002) propõem mais especificamente uma idade do Pleistoceno Superior.

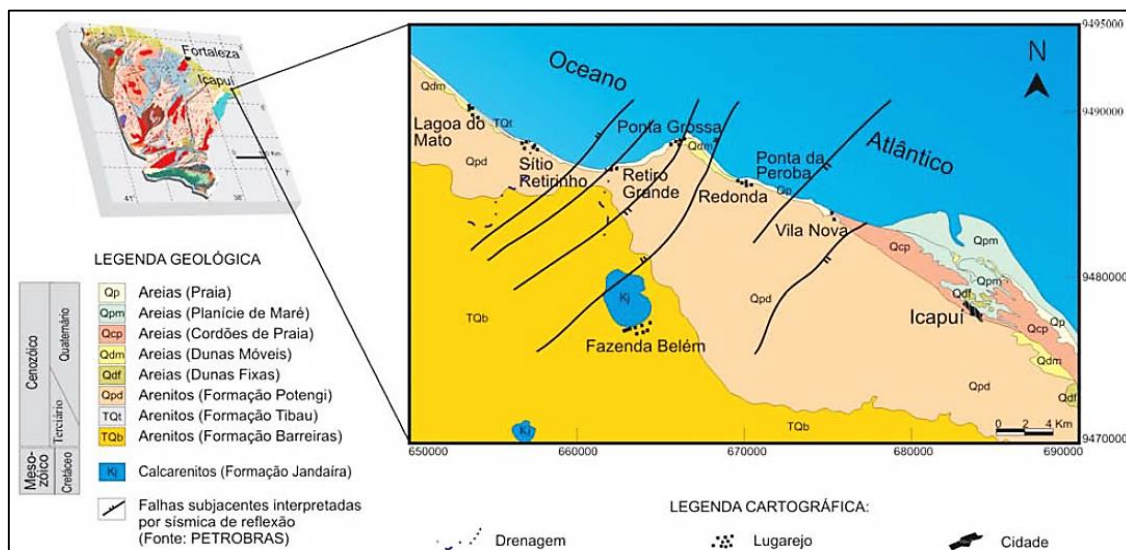
3.8 Geologia Local

As litologias encontradas na área estudada estão localizadas na Plataforma de Aracati na Bacia Potiguar (Figura 3.7) e segundo Sousa (2002) são:

- Rochas carbonáticas da Formação Jandaíra, situada na base das falésias com contato discordante no topo com a Formação Barreiras (Figura 3.8);
- Rochas siliciclásticas da Formação Barreiras, expostas nas falésias;
- Rochas siliciclásticas da Formação Potengi, aflorando na seção superior das falésias com contato erosional na base com a Formação Barreiras (Figura 3.9).

As rochas que compõem o embasamento da Bacia Potiguar não afloram nesse setor estudado.

Figura 3.7 – Mapa geológico da região norte de Icapuí-Ceará.



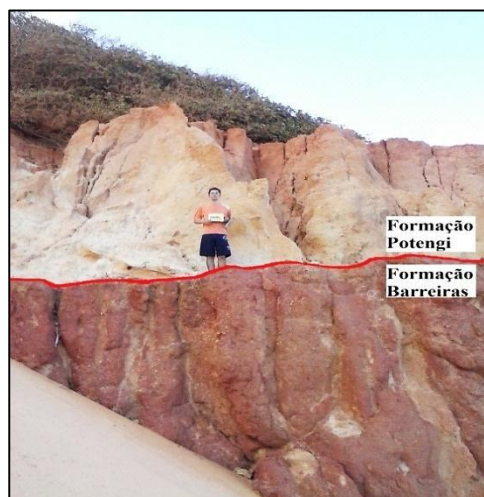
Fonte: Sousa (2002).

Figura 3.8 – Contato entre Formações Jandaíra e Barreiras.



Fonte: Elaborada pelo autor.

Figura 3.9 – Contato entre Formações Barreiras e Potengi.



Fonte: Elaborada pelo autor.

3.8.1 Formação Jandaíra

Sousa (2002) descreve que esta unidade carbonática aflora na base das falésias sob a forma de pequenos lajedos na praia atual e possui aspecto maciço. Esta formação é representada por calcários plataformais, apresentando localmente grãos quartzosos e macrofósseis de gastrópodes, foraminíferos bentônicos (miliolídeos), ostracodes e algas verdes.

3.8.2 Formação Barreiras

Sousa (2002) afirma que neste local a Formação Barreiras apresenta duas fácies. A primeira corresponde à seção superior desta formação, composta por arenitos avermelhados de aspecto maciço, granulometria de areia média a grossa, com níveis conglomeráticos contendo seixos de até 3 cm. Localmente apresentam gradação normal. A composição é predominantemente quartzosa, com grãos eventualmente recobertos por óxido de ferro, em matriz argilosa. A análise petrográfica confirma uma composição dominada por quartzo mono e poli cristalinos, com grãos sub-angulosos a sub-arredondados e bordos corroídos. A presença de feldspatos é subordinada, enquanto micas, epídoto, cianita, turmalina constituem apenas acessórios.

Na seção inferior (segunda fácies) ocorrem arenitos finos síltico-argilosos em cimento argiloso, localmente maciços, com estratificação cruzada de baixo ângulo, e tonalidades amareladas, roxas e avermelhadas, A análise petrográfica colocou em evidência o predomínio de grãos de quartzo, angulosos a sub-arredondados, e presença subordinada de feldspatos. Os acessórios principais são: turmalina, epídoto e opacos.

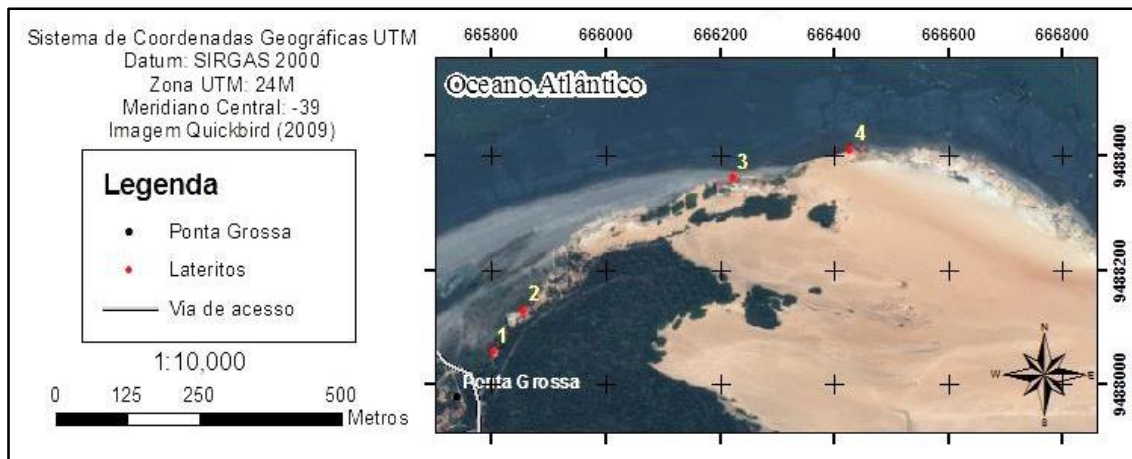
3.8.3 Formação Potengi

Segundo Sousa (2002) esta formação consiste em arenitos médios a grossos com estratificação cruzada tabular, tangencial na base, compondo dois estratos: o superior exhibe coloração amarela e vermelha enquanto o inferior, branca. Tal formação correspondeu a uma sedimentação eólica cujo contato com a Formação Barreiras é erosional. A análise petrográfica apontou o quartzo como constituinte principal, com grãos angulosos a sub-angulosos, moderadamente selecionados, e feldspatos com presença subordinada. Turmalina e opacos são os principais acessórios. Mais recentes à Formação Potengi visualizam-se os sedimentos pertencentes às dunas fixas e móveis, os cordões litorâneos holocênicos de praias, as planícies de maré, e as praias atuais.

3.8.4 Lateritos em Ponta Grossa, Icapuí-Ceará

Os lateritos encontrados em Ponta Grossa afloram em 4 zonas (Figura 3.10):

Figura 3.10 – Mapa de localização dos lateritos aflorantes em Ponta Grossa, Icapuí – Ceará.



Fonte: Elaborada pelo autor.

No primeiro afloramento (Figura 3.11), este se apresenta sub-horizontal no topo da falésia com extensão de dezenas de metros e espessura métrica;

No segundo afloramento (Figura 3.12), o laterito se apresenta no contato entre as duas fácies da Formação Barreiras com extensão de dezenas de metros e espessura métrica;

No terceiro afloramento (Figura 3.13), este ocorre como uma capa concrecionária de pequena extensão sobre a Formação Barreiras;

E no quarto afloramento (Figura 3.14), se apresenta na forma de blocos com concreções e de pequena extensão.

Figura 3.11 – Laterito no topo da falésia.



Fonte: Elaborada pelo autor.

Figura 3.12 – Laterito no contato entre as fácies superior e inferior da Formação Barreiras.



Fonte: Elaborada pelo autor.

Figura 3.13 – Capa laterítica concrecionária sobre a Formação Barreiras.



Fonte: Elaborada pelo autor.

Figura 3.14 – Laterito na base da falésia.

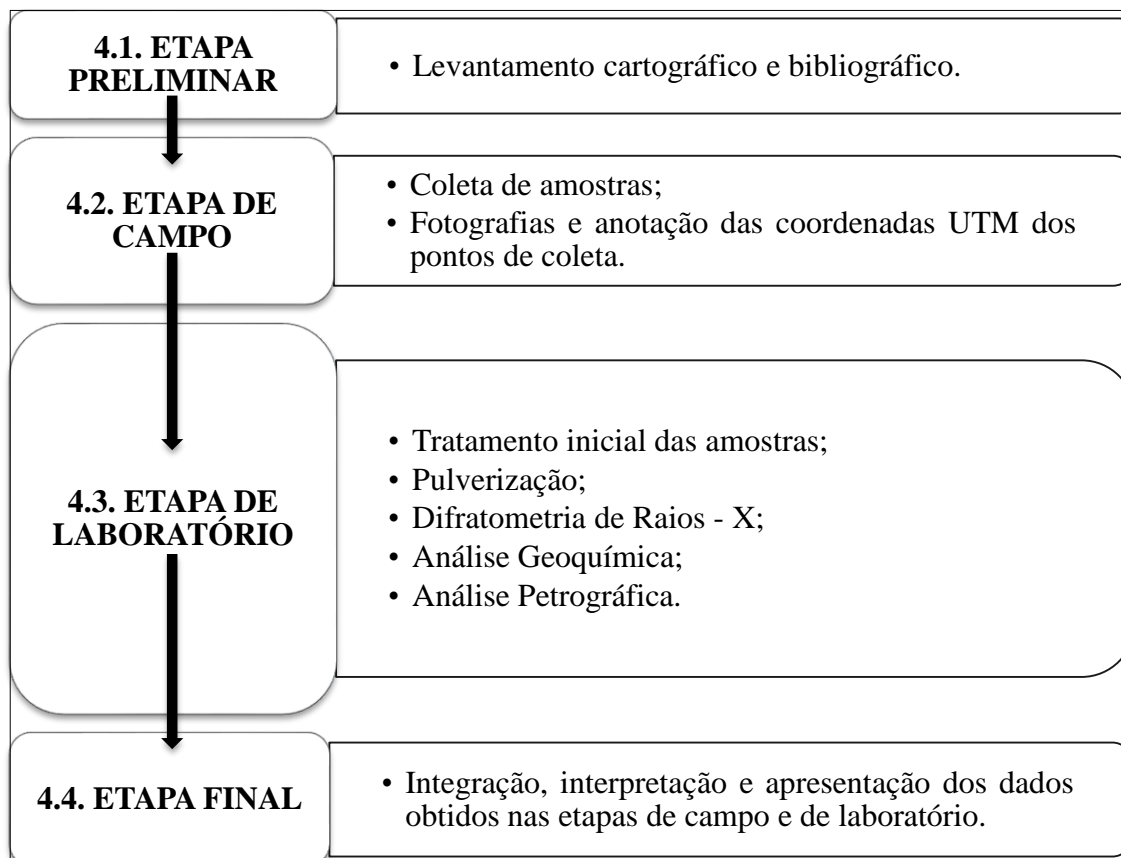


Fonte: Elaborada pelo autor.

4 MATERIAL E MÉTODOS

O estudo das litologias e horizonte laterítico aflorantes num setor da Praia de Ponta Grossa em Icapuí-Ceará consistiu em quatro etapas: preliminar (ou pré-campo), de campo, de laboratório e final (Figura 4.1).

Figura 4.1 – Fluxograma metodológico das etapas da pesquisa.



Fonte: Elaborada pelo autor.

4.1 Etapa Preliminar

Nesta etapa foi feito um levantamento cartográfico por integração de imagens de satélite *Quickbird* e, através do programa *ArcMap GIS 9.3* gerou-se o mapa preliminar para localização e delimitação da área de pesquisa para auxiliar a etapa de campo. Paralelamente, foi feita uma investigação sobre a área, a partir de órgãos regionais e nacionais, bem como de artigos científicos nacionais e internacionais, teses, dissertações, monografias e livros, relacionados com métodos de investigação a serem adotados nesta dissertação e melhor abordagem da área de pesquisa.

4.2 Etapa de Campo

Foram coletadas 12 amostras de rochas na orla litorânea de Icapuí, envolvendo as Formações Jandaíra (1 amostra), Barreiras (10 amostras): uma de seu horizonte laterítico, sete na sua seção inferior devido à variação de alteração presentes nestas, uma na seção intermediária e uma na seção superior, e Potengi (1 amostra).

Estes pontos de amostragem foram fotografados, anotando-se também suas coordenadas no sistema Universal Transversa de Mercator (UTM) com auxílio de receptor *GPS* Garmin modelo *GPSMAP 62s*.

4.3 Etapa de Laboratório

4.3.1 Tratamento Inicial das Amostras

As amostras foram encaminhadas ao Laboratório de Geologia Marinha e Aplicada (LGMA) do Departamento de Geologia – UFC, onde foram imersas em solução de H_2O_2 a 10% em recipientes individuais de vidro, durante duas semanas, para eliminação de impregnação do *spray* marinho e da matéria orgânica. As amostras foram em seguida lavadas com água destilada, e secas em estufa a 60°C.

4.3.2 Pulverização

Das amostras foram separadas subamostras, estas prosseguiram para pulverização em cadinho de porcelana (100% <200 *mesh*). Deste material, homogeneizado, foram separadas 5g para expedição ao *Activation Laboratories Ltd. (Actlabs)* em Ontario – Canadá, para fins de análises químicas de precisão, e 2g para análises DRX no Laboratório de Raios – X do Departamento de Física/UFC.

4.3.3 Difractometria de Raios-X

Os difratogramas de Raios – X (DRX) foram produzidas pelo método do pó desorientado (distribuição randômica) em difratômetro *PANalytical* modelo *X'Pert Pro* (MPD). O equipamento operou com radiação $KCu\alpha$, a 40kV e 45mA, *speed* de 0,5 °2 θ /min, e varredura de 2 a 45 °2 θ . Os dados obtidos foram interpretados através do

software *X'Pert HighScore Plus* (versão 2.0.4 de 2004) para fases cristalinas, associado ao banco de dados de difratogramas de minerais puros ideais (PCPDFwin – *International Centre for Diffraction Data* - ICDD).

4.3.4 Análise Geoquímica

Consistiu na análise quantitativa dos óxidos fundamentais (SiO_2 , Al_2O_3 , Fe_2O_3 , K_2O , CaO , MgO , MnO , Na_2O , P_2O_5 , TiO_2) e PF, analisados por Espectrometria de Emissão Atômica por Plasma Acoplado Indutivamente – ICP/MS. Os limites de detecção, ordinariamente, são $<0,01\%$.

A análise quantitativa de 40 elementos traços (Ag, As, Au, Ba, Be, Bi, Br, Cd, Ce, Co, Cr, Cs, Cu, Eu, Hf, Hg, Ir, La, Lu, Mo, Nd, Ni, Pb, Rb, S, Sb, Sc, Se, Sm, Sr, Ta, Tb, Th, U, V, W, Y, Yb, Zn, Zr) foram produzidas por Análise Instrumental por Ativação de Nêutrons – INAA, com limites analíticos ordinariamente <1 ppm (Tabela 4.1).

Tabela 4.1 – Óxidos fundamentais, PF (%), e elementos traços (ppm) com respectivos limites inferiores de detecção analítica (LID).

	SiO₂	Al₂O₃	Fe₂O₃	K₂O	CaO	MgO	MnO	Na₂O	P₂O₅	TiO₂	PF
LID	0,01	0,01	0,01	0,01	0,01	0,01	0,01	0,01	0,01	0,005	0,01
	Ag	As	Au	Ba	Be	Bi	Br	Cd	Ce	Co	Cr
LID	0,5	2	0,005	3	1	2	1	0,5	3	1	1
	Cs	Cu	Eu	Hf	Hg	Ir	La	Lu	Mo	Nd	Ni
LID	0,5	1	0,1	0,5	1	0,005	0,2	0,05	2	5	1
	Pb	Rb	S	Sb	Sc	Se	Sm	Sr	Ta	Tb	Th
LID	5	20	10	0,2	0,1	3	0,1	2	1	0,5	0,5
	U	V	W	Y	Yb	Zn	Zr				
LID	0,5	5	3	1	0,1	1	2				

Fonte: Actlabs (2017).

Os elementos traços serão comparados com base nas composições médias dos arenitos (MA) e rochas carbonáticas (MC) definidas por Turekian e Wedepohl (1961) (Tabelas 4.2 e 4.3, respectivamente).

Tabela 4.2 – Teores médios dos elementos traços (ppm) nos arenitos.

	Ag	As	Au	Ba	Be	Bi	Br	Cd	Ce	Co	Cr
MA	0,0X	1,0	0,00X	X0,0	0,X	-	1,0	0,0X	92,0	0,3	35,0
	Cs	Cu	Eu	Hf	Hg	Ir	La	Lu	Mo	Nd	Ni
MA	0,X	X,0	1,6	3,9	0,03	-	30,0	1,2	0,2	37,0	2,0
	Pb	Rb	S	Sb	Sc	Se	Sm	Sr	Ta	Tb	Th
MA	7,0	60,0	240,0	0,0X	1,0	0,05	10,0	20,0	0,0X	1,6	1,7
	U	V	W	Y	Yb	Zn	Zr				
MA	0,45	20,0	1,6	40,0	4,0	16,0	220,0				

Fonte: Turekian e Wedepohl (1961).

*X representa valores estimados.

Tabela 4.3 – Teores médios dos elementos traços (ppm) nos carbonatos.

	Ag	As	Au	Ba	Be	Bi	Br	Cd	Ce	Co	Cr
MC	0,0X	1,0	0,00X	10,0	0,X	-	6,2	0,035	11,5	0,1	11,0
	Cs	Cu	Eu	Hf	Hg	Ir	La	Lu	Mo	Nd	Ni
MC	0,X	4,0	0,2	0,3	0,04	-	X,0	2,0	0,4	4,7	20,0
	Pb	Rb	S	Sb	Sc	Se	Sm	Sr	Ta	Tb	Th
MC	9,0	3,0	1200,0	0,2	1,0	0,08	1,3	610,0	0,0X	0,2	1,7
	U	V	W	Y	Yb	Zn	Zr				
MC	2,2	20,0	0,6	30,0	0,5	20,0	19,0				

Fonte: Turekian e Wedepohl (1961).

*X representa valores estimados.

A partir dos resultados de SiO_2 , Al_2O_3 e Fe_2O_3 será feita a classificação das amostras das Formações Potengi e Barreiras para definir se a alteração foi ferruginosa ou aluminosa, segundo Karunakaran e Sinha Roy (1971) levando em conta as razões $\text{Fe}_2\text{O}_3/\text{Al}_2\text{O}_3$ e $\text{SiO}_2/\text{Fe}_2\text{O}_3$, no qual será classificada como ferruginosa quando $\text{Fe}_2\text{O}_3/\text{Al}_2\text{O}_3 > 1$ e $\text{SiO}_2/\text{Fe}_2\text{O}_3 < 1,33$ e caso apresente $\text{Fe}_2\text{O}_3/\text{Al}_2\text{O}_3 < 1$ e $\text{SiO}_2/\text{Fe}_2\text{O}_3 > 1,33$, esta será aluminosa.

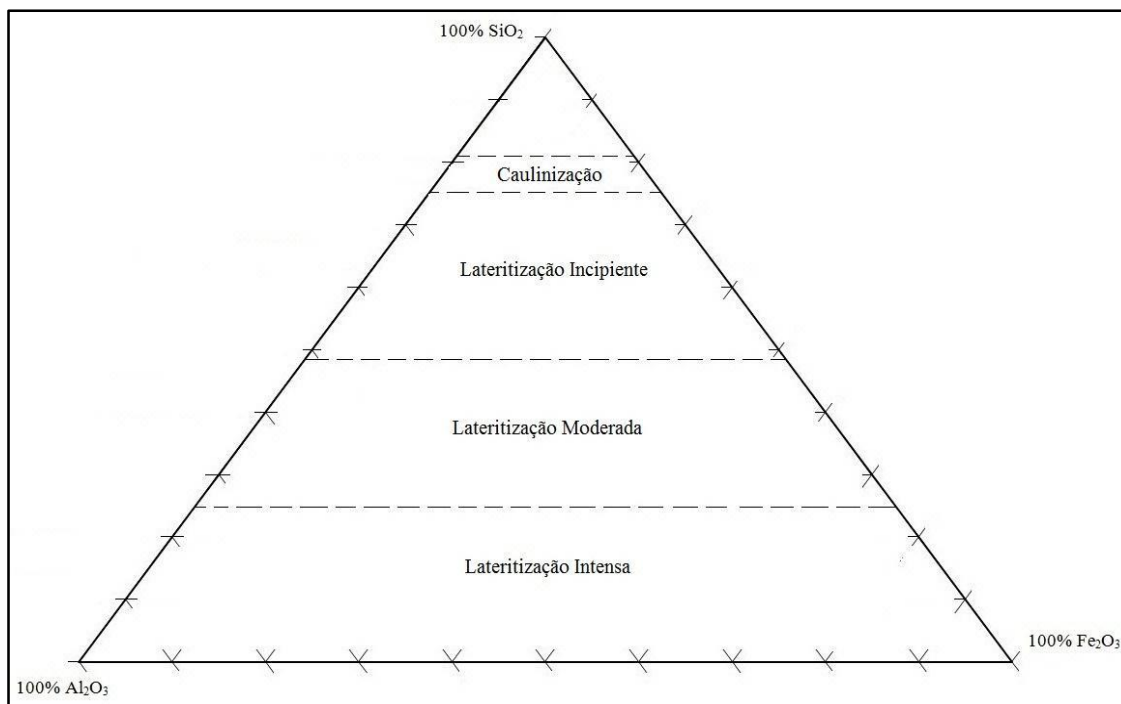
Com base nos teores de SiO_2 , Al_2O_3 e Fe_2O_3 será determinado o índice Kr segundo Medina (1970 *apud* SIQUEIRA, 2012) para cada amostra das Formações Potengi e Barreiras a partir da relação:

$$\text{SiO}_2/(\text{Al}_2\text{O}_3 + \text{Fe}_2\text{O}_3)$$

Quando $\text{Kr} < 1,33$ trata-se de laterito verdadeiro; Se $1,33 < \text{Kr} < 2,00$ se tem um material laterítico; Se $\text{Kr} > 2,00$ a litologia analisada não é laterítica.

Também se utilizou o método de “Processos de Lateritização” de Schellmann (1986 *apud* SIQUEIRA, 2012) nos casos dos arenitos das Formações Potengi e Barreiras e do horizonte laterítico nesta última formação, com base em diagrama $\text{SiO}_2 - \text{Al}_2\text{O}_3 - \text{Fe}_2\text{O}_3$ (Figura 4.2).

Figura 4.2 – Diagrama $\text{SiO}_2 - \text{Al}_2\text{O}_3 - \text{Fe}_2\text{O}_3$ apresentando as etapas dos processos lateríticos com base nos teores desses óxidos.



Fonte: Schellmann (1986 *apud* Siqueira, 2012).

Para estabelecimento da composição mineralógica das amostras, se estabeleceu um fluxograma de cálculos estequiométricos (Tabela 4.4) com base na formulação teórica de cada mineral presente na amostra em estudo, desprezando-se alguns daqueles com participação acessória. Os minerais presentes foram considerados aqueles identificados nos difratogramas de raios - X (DRX). Alguns minerais acessórios, mesmo quando não detectados nos DRX, foram convencionalmente calculados como presentes (ex. apatita, goethita, rutilo), estimando-se, na prática, ser negligenciável o erro de cálculo assim incorporado no somatório da composição total da amostra em estudo.

Um cálculo estequiométrico tem um fluxograma sustentável quando o somatório dos minerais calculados atinge pelo menos 98% ou seja: um erro absoluto de até 2% em relação à composição total do material analisado. Admite-se que este somatório incorre em pequenos erros por minerais acessórios não incorporados no fluxograma, assim como erros de aproximação nos cálculos, ou mesmo imperfeição na concepção do fluxograma, etc. Na margem superior, não se deve ultrapassar 101%. Somatórios entre 97,6 e 97,9 % podem ser aceitos se não incorrerem em modificações substanciais nas interpretações do conjunto da amostragem.

Tabela 4.4 – Cálculos estequiométricos para quantificação dos minerais presentes nas amostras.

Minerais	Cálculo estequiométrico
% Feldspato potássico ($KAlSi_3O_8$)	= K_2O análise x 6,25 (*) * Al_2O_3 feldspato potássico = K_2O análise x 1,08 * SiO_2 feldspato potássico = K_2O análise x 3,8
% Argilominerais (85% caulinita – $Al_2Si_2O_5(OH)_4$: 15% de montmorillonita – (Na,Ca) _{0,3} (Al,Mg) ₂ $Si_4O_{10}(OH)_{2.n}(H_2O)$)	= (Al_2O_3 análise – Al_2O_3 feldspato potássico) x 2,76 * Al_2O_3 argilominerais = Al_2O_3 análise – Al_2O_3 feldspato potássico * SiO_2 argilominerais = Al_2O_3 argilominerais x 1,29
% Quartzo (SiO_2)	= (SiO_2 análise – SiO_2 feldspato potássico – SiO_2 argilominerais)
% Goethita ($Fe^{3+}O(OH)$)	= Fe_2O_3 análise x 1,11
% Apatita ($Ca_5(PO_4)_3(OH,F,Cl)$)	= P_2O_5 análise x 2,39 * CaO apatita = P_2O_5 análise x 1,32
% Calcita ($CaCO_3$)	= (CaO análise – CaO apatita) x 1,78
% Rutilo (TiO_2)	= TiO_2 análise

Fonte: Modificado de Albuquerque e Horbe (2015).

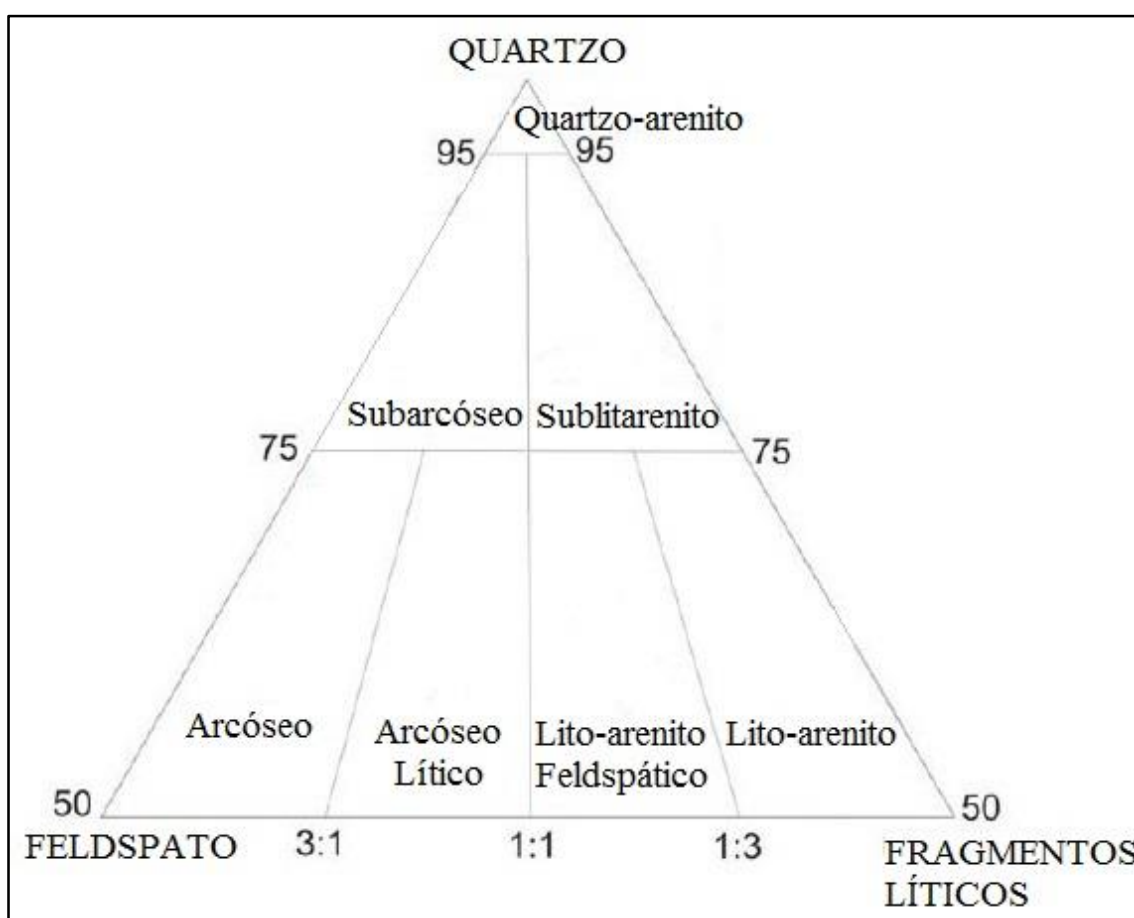
*Admite-se substituição iônica de K^+ por Na^+ , resultando em teor teórico de $K_2O = 16\%$.

4.3.5 Análise Petrográfica

Esta análise foi feita sobre seções delgadas, com auxílio de um microscópio petrográfico Nikon H550S situado no Laboratório de Microscopia Eletrônica do Departamento de Geologia/UFC.

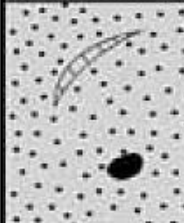
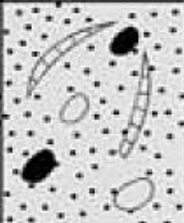
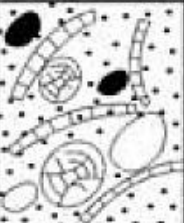



Com base nas proporções de quartzo, feldspato e fragmentos líticos observados nas seções delgadas, as rochas siliciclásticas serão classificadas segundo Folk (1968) (Figura 4.3), enquanto que a rocha carbonática será classificada segundo Dunham (1962 *apud* SOUSA, 2002) (Figura 4.4).

Figura 4.3 – Diagrama de classificação de arenitos.



Fonte: Folk (1968).

Figura 4.4 – Classificação de rochas carbonáticas segundo Dunham (1962 *apud* SOUSA, 2002) a partir da textura deposicional.

Textura deposicional reconhecível					Textura deposicional não reconhecível
Componentes originais não interligados durante a deposição			Componente originais interligados durante a deposição		
Contém lama (partículas tamanho argila e silte fino)		Sem lama e sustentado por grãos			
Sustentado por lama			Sustentado por grãos		
Menos que 10% de grãos	Mais que 10% de grãos				
Mudstone	Wackestone	Packstone	Grainstone	Boundstone	Carbonato Cristalino
					

Fonte: Sousa (2002).

4.4 Etapa Final

Consistiu na integração dos dados obtidos em campo e em laboratório utilizando os softwares *ArcMap GIS 9.3* e editor de planilhas eletrônicas *Microsoft Excel (2010)* com posterior apresentação dos resultados nesta dissertação.

5 RESULTADOS E DISCUSSÕES

A codificação das amostras e respectivas descrições (Tabela 5.1), assim como suas respectivas coordenadas UTM (*Datum SIRGAS 2000* e Zona 24M), estão plotadas (Figura 5.1) permitindo assim a visualização na paisagem e situação estratigráfica nos perfis.

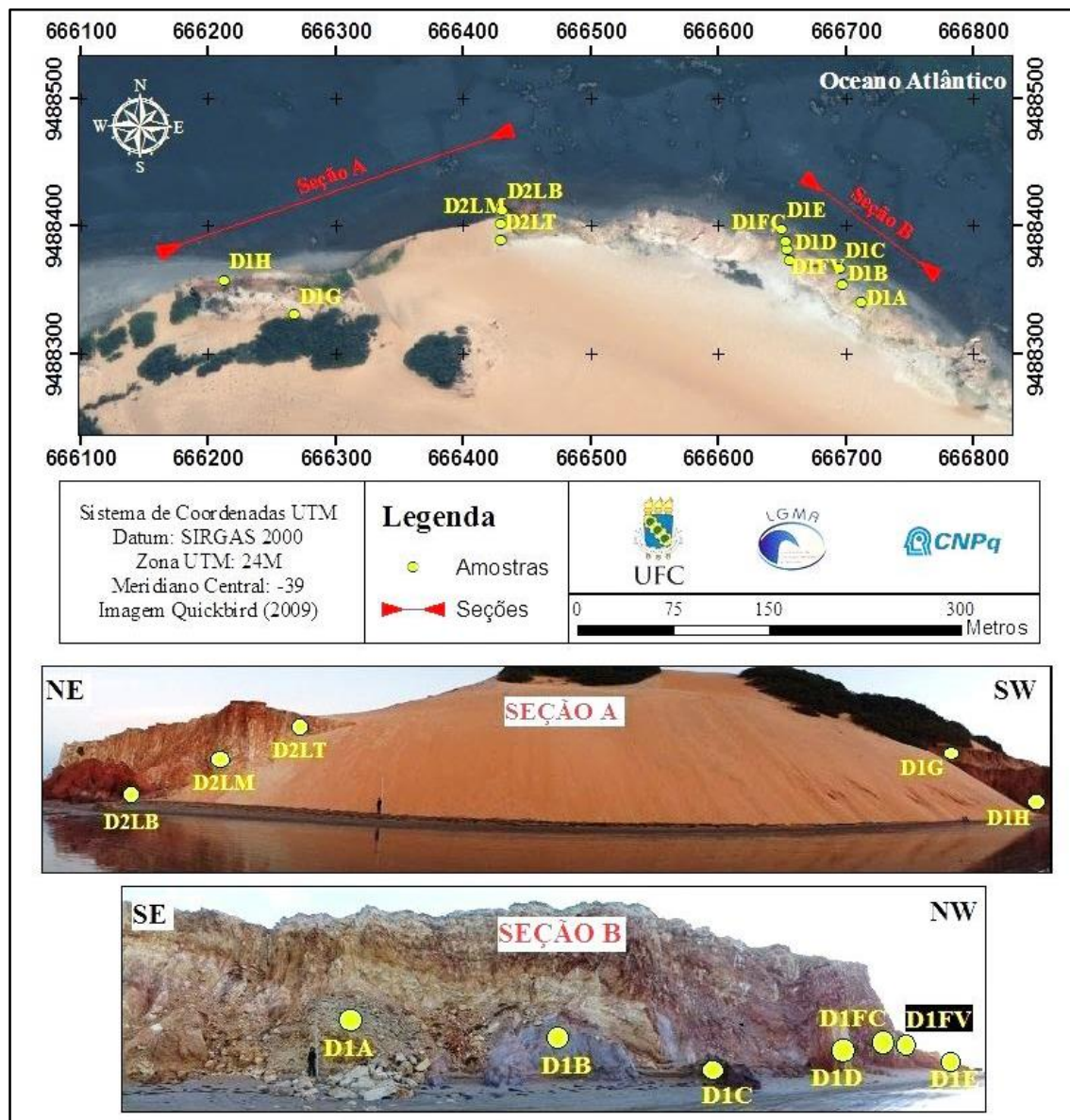
Tabela 5.1 – Descrições resumidas e coordenadas UTM das amostras, com suas codificações.

CÓDIGO	FORMAÇÃO LITOLÓGICA	DESCRIÇÃO	Paralelo	Meridiano
D1G	Potengi	Arenito feldspático fino de cor alaranjada e bastante friável, situado acima da Formação Barreiras e no topo da falésia.	9488330	666267
D1B		Arenito fino de cor roxa, situado na base da falésia.	9488353	666697
D1C		Arenito fino de cor roxa e oxidado, situado na base da falésia.	9488366	666695
D1D		Arenito médio caulínico de cor branca, situado na base da falésia.	9488372	666656
D1E		Arenito médio de cor vermelha, situado na base da falésia.	9488397	666649
D1FV	Barreiras	Arenito médio de cor vermelha, situado na base da falésia.	9488387	666651
D1FC		Arenito médio caulínico de cor branca, situado na base da falésia.	9488381	666654
D1H		Arenito fino de cor vermelha e amarela, situado na base da falésia.	9488357	666212
D2LT		Arenito conglomerático de cor vermelha e amarela, e situado no topo da falésia.	9488388	666429
D2LM		Arenito grosso de cor vermelho-escura e amarela-escura, situado no meio da falésia.	9488401	666429
D2LB	(Horizonte Laterítico)	Conglomerado de cor marrom, com concreções ferruginosas, situado na base da falésia.	9488412	666430
D1A	Jandaíra	Calcário maciço de cor creme, situado na base da falésia abaixo da Formação Barreiras.	9488340	666712

Fonte: Elaborada pelo autor.

Conforme se pode observar, as amostras foram coletadas em três diferentes horizontes estratigráficos: Formações Potengi, Barreiras e Jandaíra, com detalhamento na Formação Barreiras.

Figura 5.1 – Localização dos pontos de amostragem.



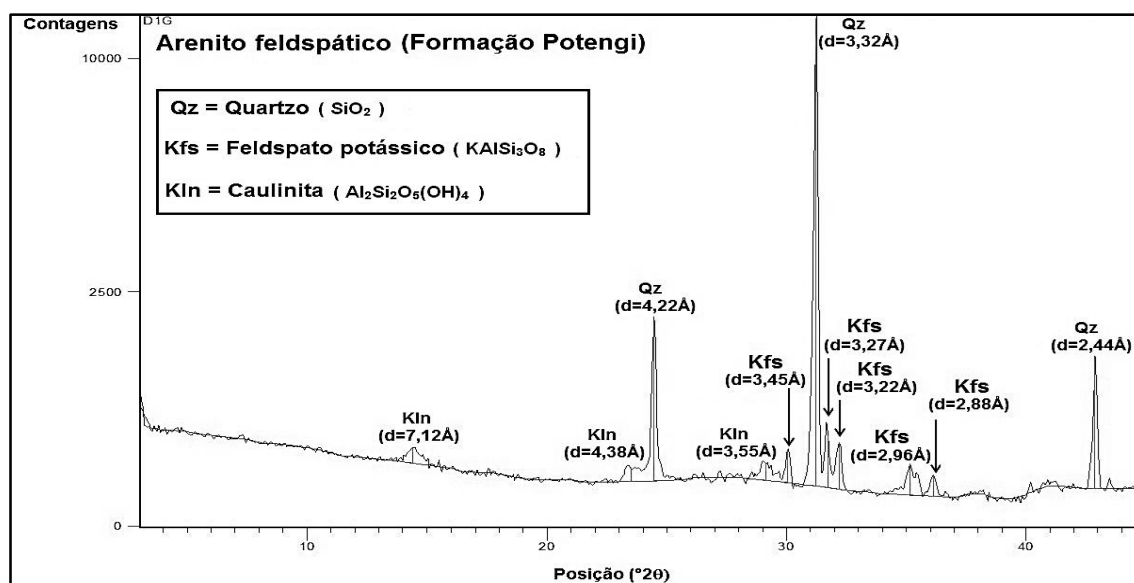
Fonte: Elaborada pelo autor.

5.1 Difractometria de Raios-X

5.1.1 Formação Potengi

A amostra de arenito feldspático da Formação Potengi apresentou em seu DRX predominância de quartzo- α (quartzo alfa), seguida de feldspato potássico e de caulinita que, de acordo com a intensidade de sua resposta deve ter presença acessória na rocha (Figura 5.2).

Figura 5.2 – DRX da amostra D1G.



Fonte: Elaborada pelo autor.

*d=distância interplanar em Å.

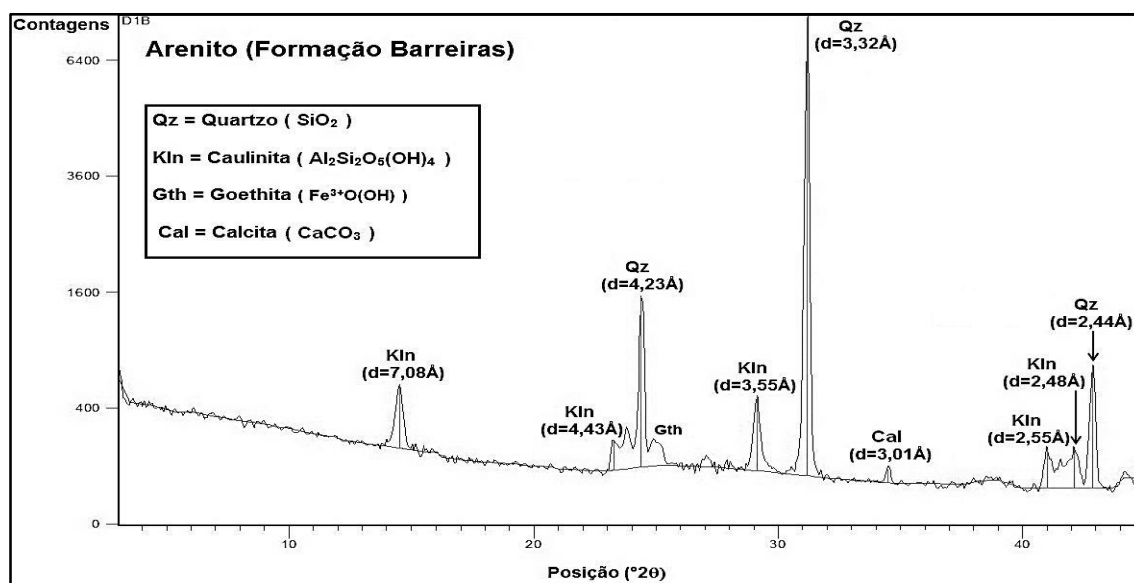
A preservação de feldspato potássico nessa formação reflete um grau moderado de intemperismo relacionado a um ambiente com hidrólise incompleta. A formação de caulinita, a partir do feldspato potássico, aparenta ser incipiente.

5.1.2 Formação Barreiras

As amostras dos arenitos coletados na Formação Barreiras apresentam difratogramas onde os seguintes minerais são identificados:

- No DRX da amostra D1B observa-se: Quartzo- α predominante, caulinita subordinada, goethita e calcita em participação residual (Figura 5.3). A presença de calcita nesta rocha seria inabitual (ambiente de alteração), mas ela é confirmada por fraca efervescência observada sob ataque de HCl 10%;

Figura 5.3 – DRX da amostra D1B.

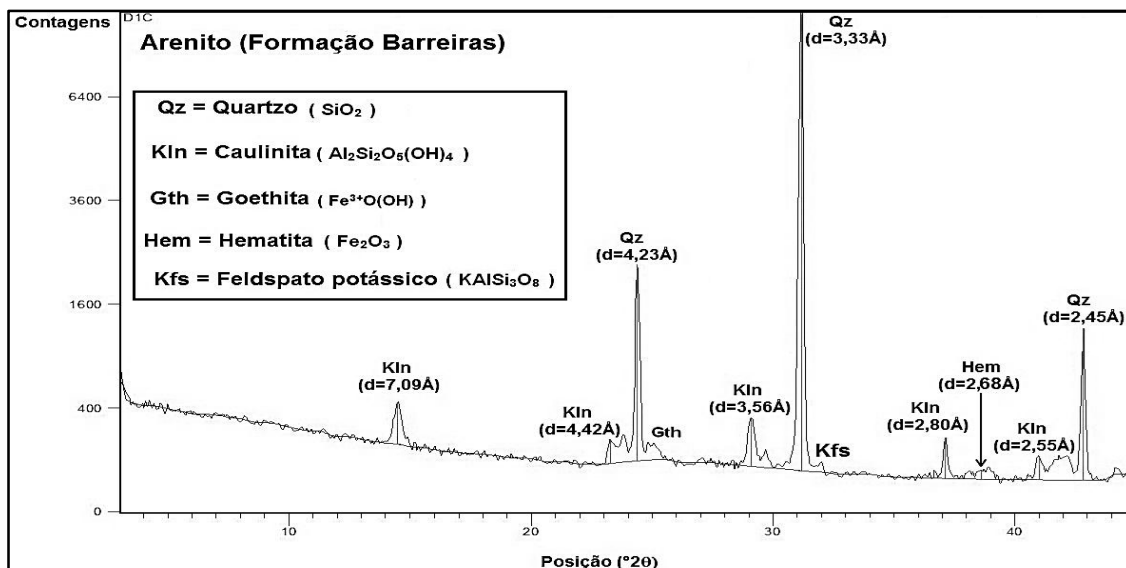


Fonte: Elaborada pelo autor.

*d=distância interplanar em Å.

- No DRX da amostra D1C observa-se: Quartzo- α predominante, caulinita, goethita e hematita em quantidades acessórias, assim como provável presença residual de feldspato (Figura 5.4);

Figura 5.4 – DRX da amostra D1C.

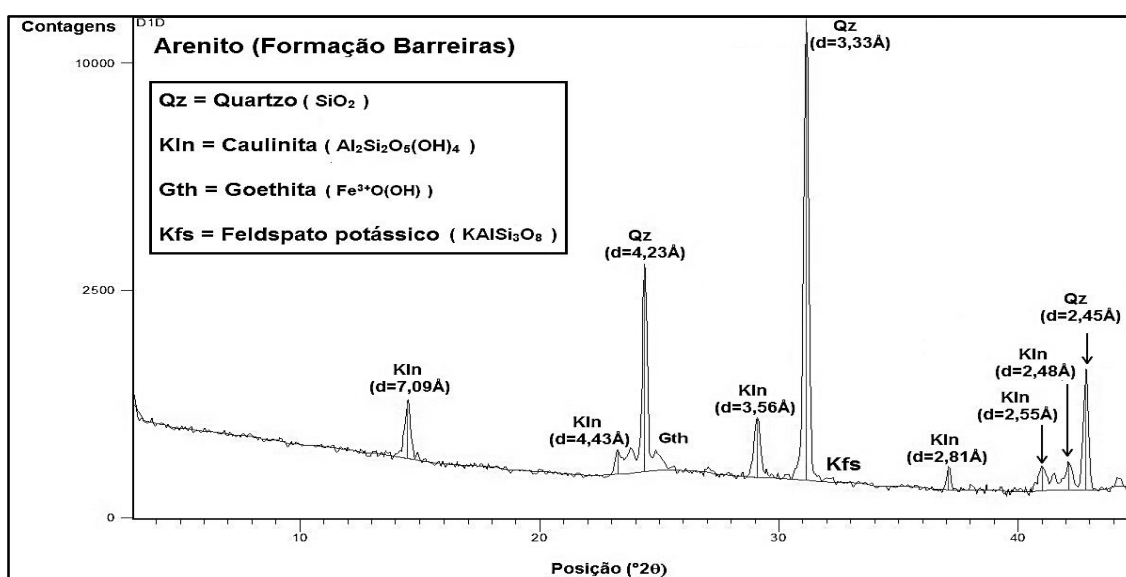


Fonte: Elaborada pelo autor.

*d=distância interplanar em Å.

- No DRX da amostra D1D observa-se: Quartzo- α predominante com participação subordinada de caulinita e goethita, além de possível presença residual de feldspato (Figura 5.5);

Figura 5.5 – DRX da amostra D1D.

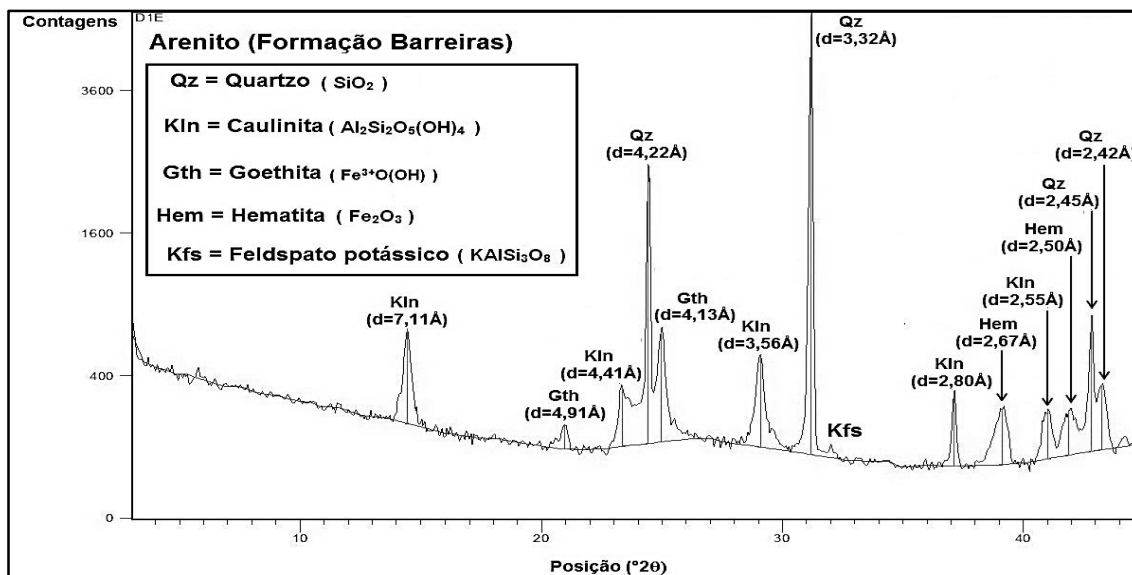


Fonte: Elaborada pelo autor.

*d=distância interplanar em Å.

- No DRX da amostra D1E observa-se: Quartzo- α predominante, com participações subordinadas de caulinita e goethita, e presença acessória de hematita. Possível presença residual de feldspato (Figura 5.6);

Figura 5.6 – DRX da amostra D1E.

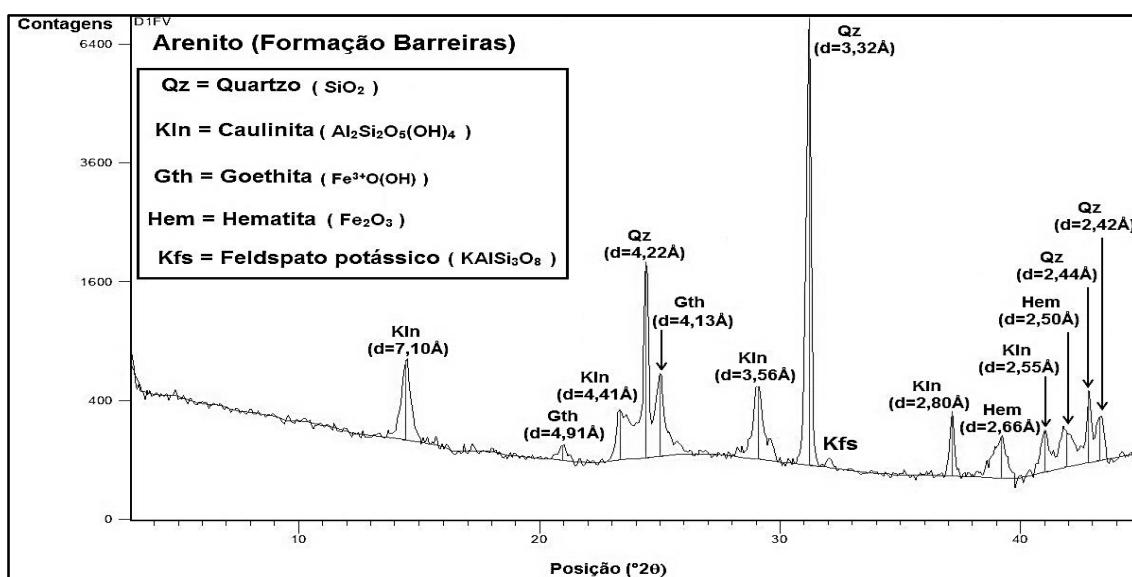


Fonte: Elaborada pelo autor.

*d=distância interplanar em Å.

- No DRX da amostra D1FV observa-se: Quartzo- α predominante, caulinita subordinada, goethita e hematita em participações acessórias. Provável presença residual de feldspato (Figura 5.7);

Figura 5.7 – DRX da amostra D1FV.

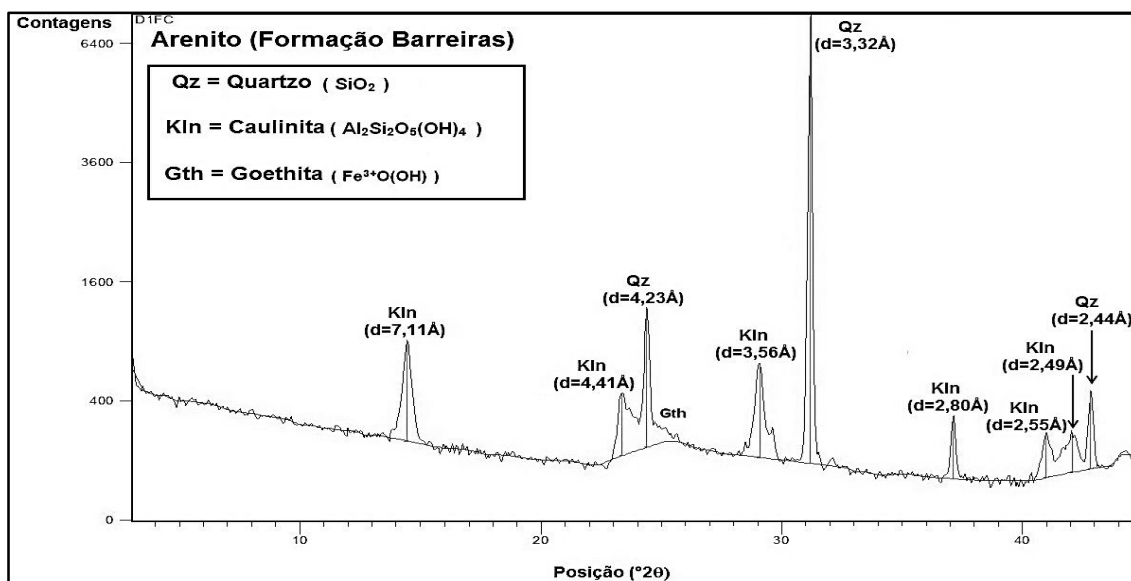


Fonte: Elaborada pelo autor.

*d=distância interplanar em Å.

- No DRX da amostra D1FC observa-se: Quartzo- α predominante, caulinita subordinada e presença acessória de goethita (Figura 5.8);

Figura 5.8 – DRX da amostra D1FC.

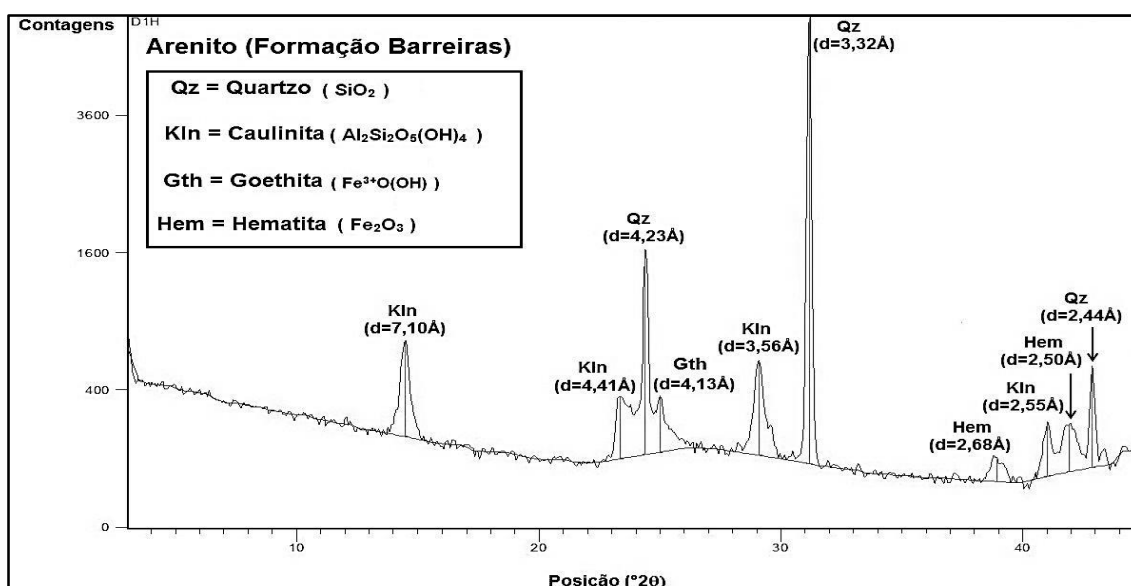


Fonte: Elaborada pelo autor.

*d=distância interplanar em Å.

- No DRX da amostra D1H observa-se: Quartzo- α predominante, caulinita subordinada e participações acessórias de goethita e hematita (Figura 5.9);

Figura 5.9 – DRX da amostra D1H.

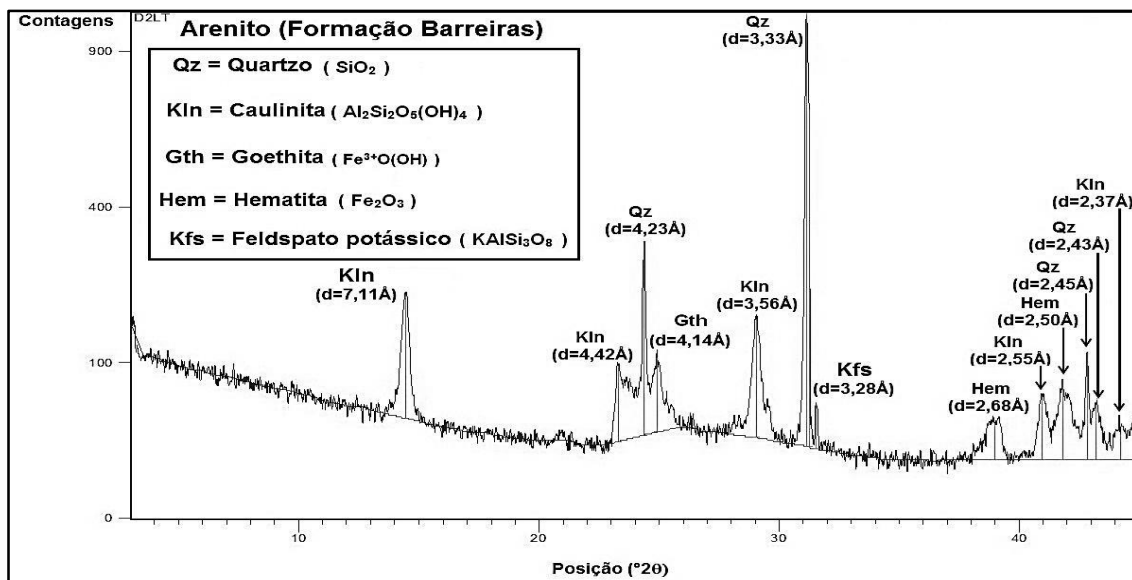


Fonte: Elaborada pelo autor.

*d=distância interplanar em Å.

- No DRX da amostra D2LT observa-se: Quartzo- α predominante, caulinita subordinada, e goethita-hematita-feldspato potássico em quantidades acessórias (Figura 5.10);

Figura 5.10 – DRX da amostra D2LT.

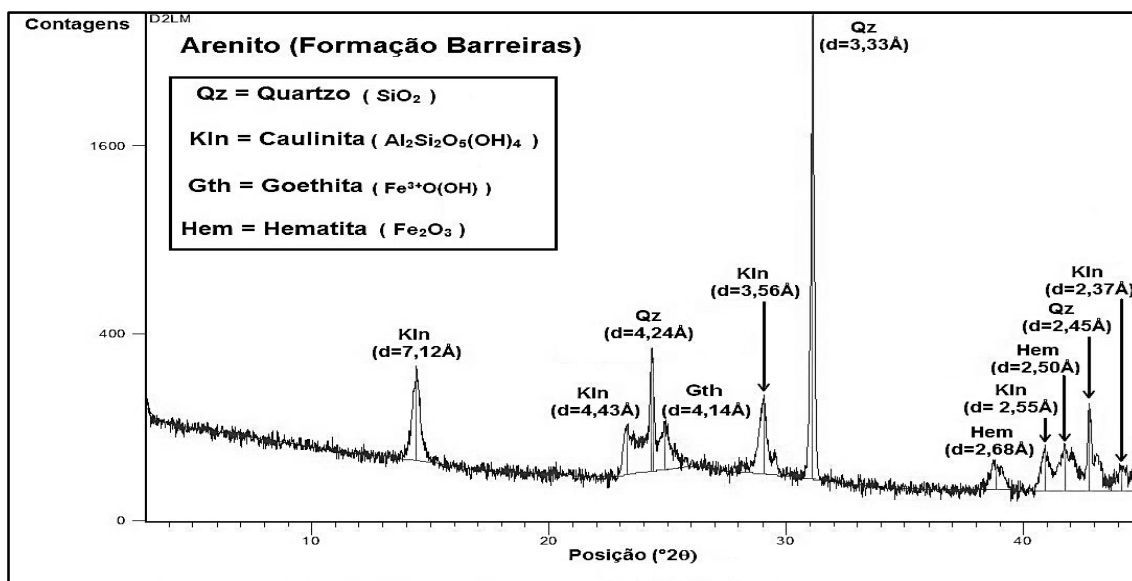


Fonte: Elaborada pelo autor.

*d=distância interplanar em Å.

- No DRX da amostra D2LM observa-se: Quartzo- α predominante, caulinita subordinada e quantidades acessórias de goethita e hematita (Figura 5.11);

Figura 5.11 – DRX da amostra D2LM.

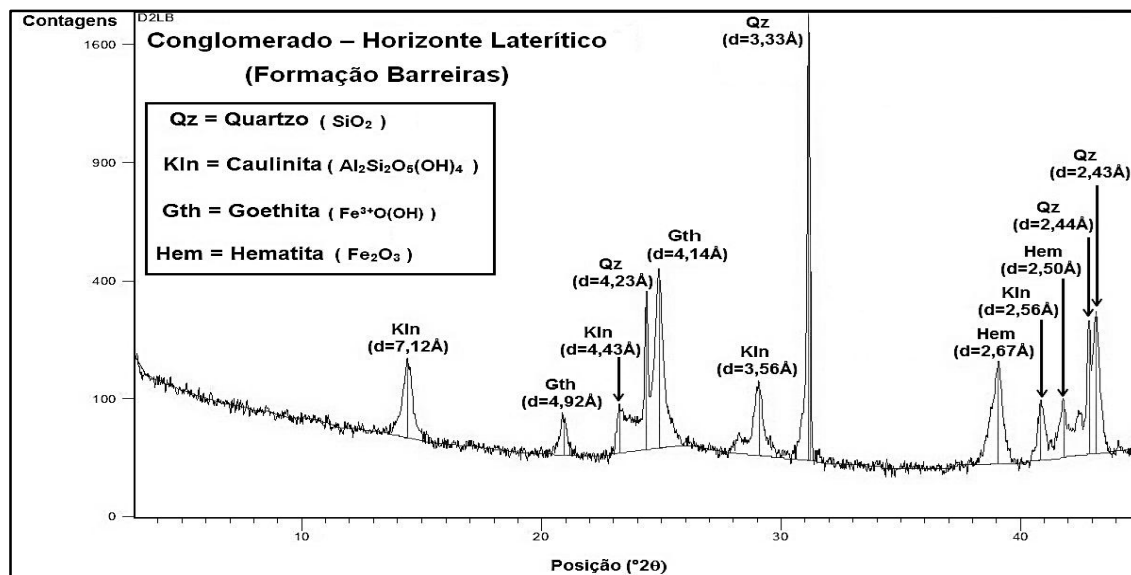


Fonte: Elaborada pelo autor.

*d=distância interplanar em Å.

- No DRX da amostra D2LB (horizonte laterítico) observa-se: Quartzo- α predominante, caulinita subordinada e participações acessórias de goethita e hematita (Figura 5.12);

Figura 5.12 – DRX da amostra D2LB.



Fonte: Elaborada pelo autor.

*d=distância interplanar em Å.

Em todas as amostras da Formação Barreiras o quartzo- α (de baixa temperatura: $< 573^{\circ}\text{C}$) é predominante em razão de sua maior resistência à hidrólise que os demais minerais silicáticos com quem estava associado nas rochas originais. A caulinita aparece também em todos os DRX desde participação subordinada a acessória. Quartzo e caulinita provêm substancialmente da erosão e alteração de rochas de composição granítica do embasamento cristalino, a montante dos sistemas de drenagem tanto antigos quanto atuais. São, portanto, de origem pedogênica destas rochas do embasamento, assim como podem ter sido retomados a partir do próprio sistema deposicional, continental, da Formação Barreiras.

A goethita, habitualmente acessória, é também pedogênica, e possivelmente integrada aos sedimentos originais da Formação Barreiras. Sua origem deriva da oxidação ou da hidrólise de silicatos ferro-magnesianos, onde o ferro se encontrava no estado de oxidação Fe^{2+} , tendo sido liberado como Fe^{3+} , o qual, combinado com moléculas de água gera em CNTP (Condições Normais de Temperatura e Pressão) a goethita. As amostras onde os picos identificadores (em DRX) da goethita mostram baixas respostas (D1B, D1C, D1D e D1FC), correspondem a períodos com menor interferência intempérica. Em contraposição, amostras onde o pico identificador ($I=100$

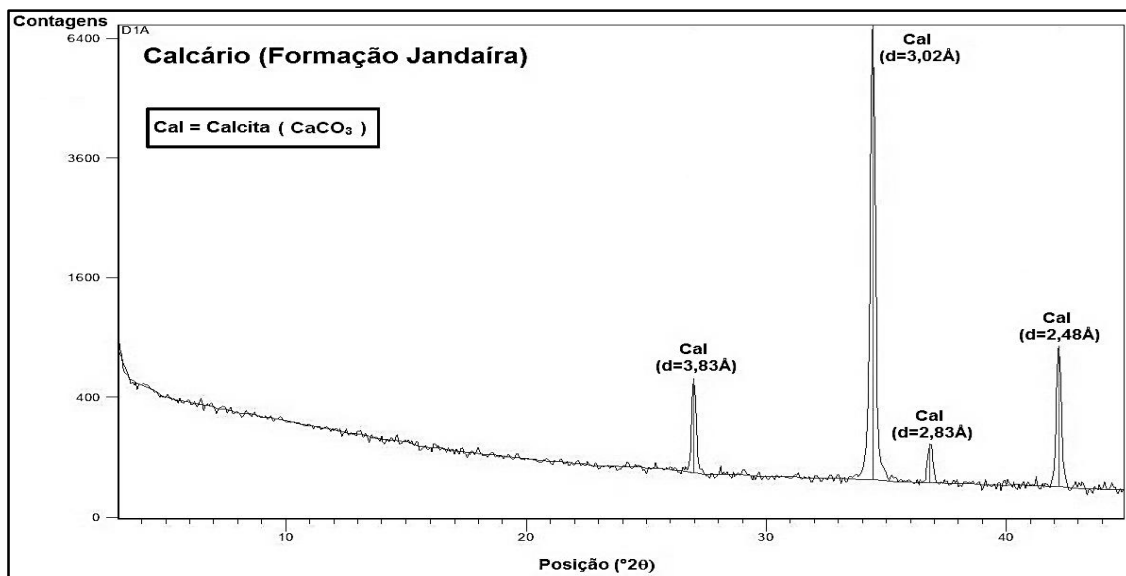
em 4,18Å) indica quantidades mais significativas de goethita (D1E, D1FV, D1H, D2LT e D2LM), se tem uma indicação de paleoclimas relativamente mais úmidos. O aparecimento da hematita (em presenças acessórias) nas amostras D1C, D1E, D1FV, D1H, D2LT, D2LM e D2LB resultaria da hidrólise da própria goethita, também presente nestas rochas.

Na amostra D2LB, o pico principal da goethita (4,18Å) é expressivo, e nela ainda se observa presença mais significativa de hematita. Sendo este o horizonte laterítico, e tendo o mesmo uma continuidade limitada que termina em *pinch out*, pode-se inferir que o aumento de condições intempéricas não seria paleoclimático, mas faciológico, significando condições de relevo capazes de represar águas durante certo tempo, pelo menos sazonalmente, ensejando a formação de um meio aquático altamente hidrolisante.

5.1.3 Formação Jandaíra

O calcário da Formação Jandaíra apresentou apenas calcita no DRX da amostra D1A (Figura 5.13), não exibindo picos referentes a minerais como quartzo, argilominerais, etc.

Figura 5.13 – DRX da amostra D1A.



Fonte: Elaborada pelo autor.

*d=distância interplanar em Å.

Estes dados permitem inferir em primeira instância que a condição de formação desta rocha calcítica teria sido em condições distais da plataforma interna devido à ausência de quartzo e de outros minerais.

5.2 Análise Geoquímica

5.2.1 Formação Potengi

Em relação aos teores dos óxidos fundamentais, a amostra da Formação Potengi (D1G) demonstra ser essencialmente silicosa (Tabela 5.2).

Tabela 5.2 – Composição química dos óxidos fundamentais e PF (%) na amostra da Formação Potengi.

	SiO ₂	Al ₂ O ₃	Fe ₂ O ₃ (Total)	K ₂ O	CaO	MgO	MnO	Na ₂ O	P ₂ O ₅	TiO ₂	PF	Σ
D1G	91,47	4,54	0,90	1,15	0,03	0,03	0,01	0,10	< 0,01	0,292	1,66	100,18

Fonte: Elaborada pelo autor.

Conforme cálculo estequiométrico, a partir dos óxidos fundamentais, a composição mineralógica (Tabela 5.3) confirma o resultado apresentado no DRX relativo a esta amostragem.

Tabela 5.3 – Composição mineralógica (%) a partir dos dados químicos da amostra da Formação Potengi.

	Feldspato potássico	Argilominerais (*)	Quartzo	Goethita	Apatita	Calcita	Rutilo	Σ
D1G	7,2	8,3	83,2	1,0	0,0	0,1	0,3	100,1

Fonte: Elaborada pelo autor.

*Proporção mínima caulinita: montmorillonita = 50%: 50% (paleoclima: semiárido).

Dentre os elementos traços (Tabela 5.4), aqueles que apresentaram anomalias 2x maiores que os valores médios dos arenitos foram: Ba, Co, Hf, Ni, Sr, Th e U. O Ba e Sr estão presentes nos feldspatos potássicos ao substituírem o K⁺ na estrutura mineral. O Co e Ni são provenientes de minerais constituintes nas rochas máficas-ultramáficas. O Hf está presente na composição do zircão (Zr_{0,9}Hf_{0,05}REE_{0,05}SiO₄), mineral comum em formações continentais terrígenas quartzosas. E o Th apresenta-se na composição da monazita ((Ce,La,Nd,Th)PO₄), sendo este mineral oriundo de pegmatitos. Por fim o U pode ter como origem as rochas graníticas.

Tabela 5.4 – Composição química dos elementos traços (ppm) na amostra da Formação Potengi em comparação aos valores médios para os arenitos (MA) definidos por Turekian e Wedepohl (1961).

	Ag	As	Au	Ba	Be	Bi	Br	Cd	Ce	Co
D1G	< 0,5	< 2	< 0,005	364	< 1	< 2	1	< 0,5	11	1
MA	0,0X	1,0	0,00X	X0,0	0,X	-	1,0	0,0X	92,0	0,3
	Cr	Cs	Cu	Eu	Hf	Hg	Ir	La	Lu	Mo
D1G	12	< 0,5	9	0,2	10,0	< 1	< 0,005	6,3	0,14	< 2
MA	35,0	0,X	X,0	1,6	3,9	0,03	-	30,0	1,2	0,2
	Nd	Ni	Pb	Rb	S	Sb	Sc	Se	Sm	Sr
D1G	5	6	10	40	40	0,2	1,8	< 3	0,6	48
MA	37,0	2,0	7,0	60,0	240,0	0,0X	1,0	0,05	10,0	20,0
	Ta	Tb	Th	U	V	W	Y	Yb	Zn	Zr
D1G	< 1	< 0,5	3,7	1,0	8	< 3	4	0,7	8	340
MA	0,0X	1,6	1,7	0,45	20,0	1,6	40,0	4,0	16,0	220,0

Fonte: Elaborada pelo autor.

*X representa valores estimados.

A partir dos teores de SiO_2 , Al_2O_3 e Fe_2O_3 da amostra D1G, a lateritização atuante sobre esta amostra é definida como aluminosa (Tabela 5.5) segundo a classificação de Karunakaran e Sinha Roy (1971) devido a uma razão $\text{Fe}_2\text{O}_3/\text{Al}_2\text{O}_3 < 1$ e $\text{SiO}_2/\text{Fe}_2\text{O}_3 > 1,33$. A partir do índice Kr segundo Medina (1970 *apud* SIQUEIRA, 2012), a amostra corresponde a um material não-laterítico devido à relação $\text{SiO}_2/(\text{Al}_2\text{O}_3 + \text{Fe}_2\text{O}_3) > 2$.

Tabela 5.5 – Classificações para a amostra da Formação Potengi:

Classificação 1: Tipo de alteração segundo Karunakaran e Sinha Roy (1971);

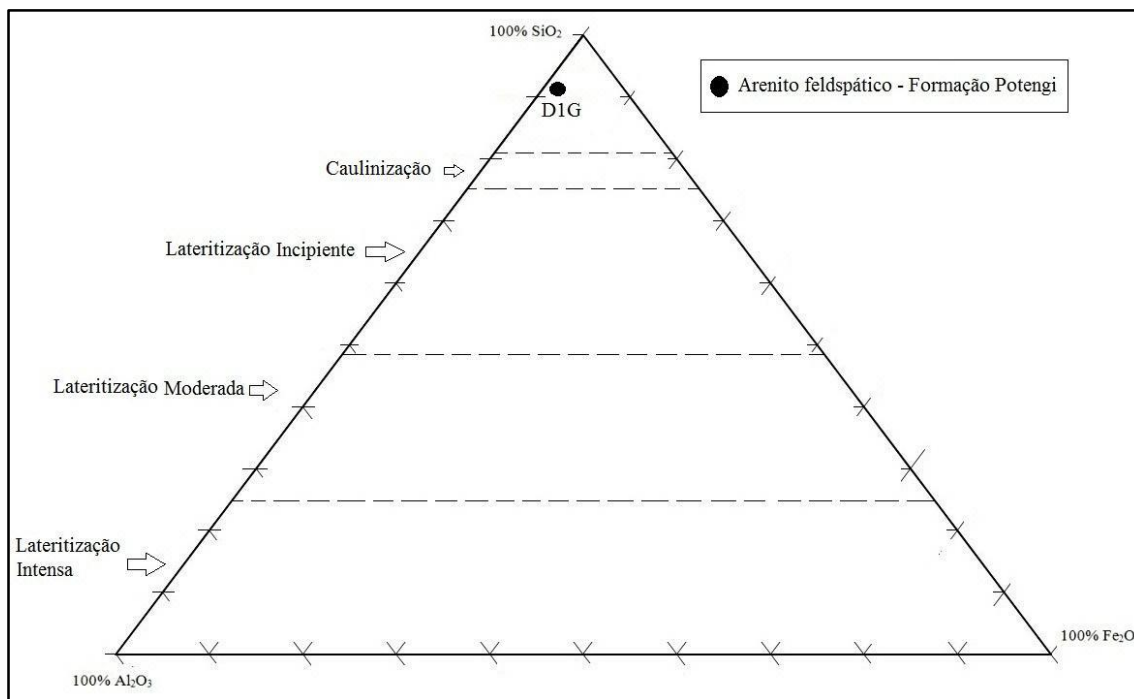
Classificação 2: Índice de intemperismo Kr, segundo Medina (1970 *apud* SIQUEIRA, 2012).

	SiO_2	Al_2O_3	Fe_2O_3	$\text{Fe}_2\text{O}_3/\text{Al}_2\text{O}_3$	$\text{SiO}_2/\text{Fe}_2\text{O}_3$	Classificação 1	Índice Kr	Classificação 2
D1G	91,47	4,54	0,90	0,20	101,63	Aluminosa	16,81	Material não laterítico

Fonte: Elaborada pelo autor.

A plotagem dos resultados analíticos do arenito da Formação Potengi no diagrama ($\text{SiO}_2 - \text{Al}_2\text{O}_3 - \text{Fe}_2\text{O}_3$) de Schellmann (1986 *apud* SIQUEIRA, 2012) (Figura 5.14), demonstrou que o nível mínimo de alteração não foi atingido.

Figura 5.14 – Amostra da Formação Potengi plotada no diagrama $\text{SiO}_2 - \text{Al}_2\text{O}_3 - \text{Fe}_2\text{O}_3$ contendo os processos lateríticos, segundo Schellmann (1986 *apud* SIQUEIRA, 2012).



Fonte: Elaborada pelo autor.

Este diagrama contraria as evidências de que a caulinição, ao preceder a formação de gibbsita, significa que o intemperismo tem que ser intensivo.

Os resultados, portanto, confirmam a classificação de arenito feldspático para a amostragem, com influência relativamente moderada de intemperismo tropical pretérito.

5.2.2 Formação Barreiras

Os teores dos óxidos fundamentais e PF das amostras da Formação Barreiras (Tabela 5.6), com exceção do horizonte laterítico (D2LB), apresentam:

- Teores elevados de SiO_2 variando desde 67,61% até 89,64% devido à presença dominante de quartzo;
- Teores baixos a moderados de Al_2O_3 , entre 4,95% e 14,53%, prenunciam presença subordinada de aluminossilicatos;
- Teores de Fe_2O_3 compreendidos entre 0,69% e 12,33% indicam presença de óxidos/hidróxidos de ferro com distribuição irregular, desde traços a participação subordinada nas rochas;
- Valores de PF, entre 2,95% e 7,08%, podem ser considerados compartilhados entre argilominerais e goethita, dependendo da participação relativa destes dois minerais nas rochas;
- Os teores abaixo de 1% de K_2O , CaO , MgO , MnO , Na_2O , P_2O_5 e TiO_2 , indicam que minerais de titânio (rutilo, ilmenita), fosfatos, carbonatos, feldspatos potássicos, micas, são acessórios se presentes, e em princípio pouco ou não detectáveis em DRX. Faz exceção a presença de feldspato potássico na amostra D2LT (canga laterítica) e da presença inesperada e acessória de carbonatos na amostra D1B.

O horizonte laterítico na Formação Barreiras apresenta valores distintos de SiO_2 e Fe_2O_3 em relação às demais amostras nesta formação (Amostra D2LB em destaque; Tabela 5.6), apresentando baixo teor de SiO_2 (40,76%) e alto teor em Fe_2O_3 (36,47%). Este enriquecimento em Fe_2O_3 propiciou a formação de concreções ferruginosas.

Tabela 5.6 – Composição química dos óxidos fundamentais e PF (%) nas amostras da Formação Barreiras.

	D1B	D1C	D1D	D1E	D1FV	D1FC	D1H	D2LT	D2LM	D2LB
SiO₂	87,49	89,22	89,64	68,32	71,27	78,89	76,74	67,61	77,52	40,76
Al₂O₃	7,35	4,95	6,10	10,85	11,20	11,81	11,69	14,53	11,47	12,06
Fe₂O₃										
(Total)	1,90	2,01	0,69	12,33	9,39	0,79	3,71	9,43	5,48	36,47
K₂O	0,11	0,07	0,08	0,05	0,05	0,07	0,05	0,09	0,05	0,05
CaO	0,05	0,24	0,03	0,04	0,03	0,05	0,02	0,04	0,04	0,04
MgO	0,04	0,10	0,07	0,11	0,11	0,09	0,08	0,09	0,03	0,06
MnO	0,02	0,01	<0,01	0,02	0,02	<0,01	0,01	0,01	<0,01	0,04
Na₂O	0,09	0,41	0,25	0,61	0,68	0,64	0,13	0,14	0,05	0,12
P₂O₅	0,02	<0,01	0,02	0,02	0,02	<0,01	<0,01	<0,01	<0,01	0,01
TiO₂	0,210	0,165	0,169	0,497	0,517	0,570	0,585	0,625	0,471	0,556
PF	3,11	2,95	2,97	6,97	6,69	5,78	5,70	7,08	5,14	9,93
Σ	100,39	100,13	100,02	99,82	99,98	98,69	98,72	99,65	100,25	100,10

Fonte: Elaborada pelo autor.

Em relação aos elementos traços (Tabelas 5.7 e 5.8), aqueles que apresentaram, nas amostras desta formação e no laterito, anomalias 2x maiores que os valores médios para os arenitos foram: As, Be, Co, Cr, Cu, Hf, Mo, Ni, Pb, Sb, Sc, Th, U e V, enquanto que aqueles que apresentaram anomalias apenas no laterito são: Ag, Cd e Zn, e as anomalias situadas somente nas amostras da Formação Barreiras, excluindo o laterito: Br, La e S.

Segundo Reimann e Caritat (1998) o bromo é proveniente do *spray* marinho. Dentre os demais elementos traços anômalos aqueles que possuem maior afinidade com rochas portadoras de sulfetos são: Ag, As, Cd, Cu, Pb, S, Sb, V e Zn, enquanto que Co, Cr e Ni possuem específicas afinidades com rochas ultrabásicas. Entretanto, os elementos Be, Hf, La, Mo, Sc, Th e U podem ter como origem as rochas graníticas, de tal forma que as rochas-fontes do conjunto dos elementos-traço podem ser consideradas como de um embasamento cristalino crustal, com presença de rochas básicas e/ou ultrabásicas.

Nota-se que no horizonte laterítico existe um enriquecimento maior de elementos-traço proveniente de rochas de natureza básica-ultrabásica (Ag, As, Cd, Co, Cr, Ni, Pb, Sb, V e Zn) e ácida (Be, Mo, Sc e Th).

Tabela 5.7 – Composição química dos elementos traços (ppm) nas amostras da Formação Barreiras em comparação aos valores médios para os arenitos (MA) definidos por Turekian e Wedepohl (1961).

	D1B	D1C	D1D	D1E	D1FV	D1FC	D1H	D2LT	D2LM	D2LB	MA
Ag	< 0,5	< 0,5	< 0,5	< 0,5	< 0,5	< 0,5	< 0,5	< 0,5	< 0,5	0,6	0,0X
As	< 2	< 2	< 2	21	17	2	8	24	8	137	1,0
Au	0,006	<	<	<	<	<	0,008	<	<	<	0,00X
Ba	39	46	48	5	7	8	8	20	9	44	X0,0
Be	< 1	< 1	< 1	1	< 1	< 1	< 1	< 1	< 1	3	0,X
Bi	< 2	< 2	< 2	< 2	< 2	< 2	< 2	< 2	< 2	< 2	-
Br	< 1	18	15	20	24	21	< 1	3	< 1	< 1	1,0
Cd	< 0,5	< 0,5	< 0,5	< 0,5	< 0,5	< 0,5	< 0,5	< 0,5	< 0,5	1,1	0,0X
Ce	61	14	54	14	13	6	5	16	11	54	92,0
Co	1	< 1	< 1	5	3	< 1	2	2	2	30	0,3
Cr	6	12	18	92	79	28	66	143	53	760	35,0
Cs	< 0,5	< 0,5	< 0,5	< 0,5	< 0,5	< 0,5	< 0,5	< 0,5	< 0,5	< 0,5	0,X
Cu	46	35	27	16	36	5	10	7	9	38	X,0
Eu	0,2	0,1	0,2	0,3	0,2	0,2	0,2	0,5	0,2	1,5	1,6
Hf	3,0	5,0	3,0	10,0	10,0	11,0	12,0	11,0	9,0	8,0	3,9
Hg	< 1	< 1	< 1	< 1	< 1	< 1	< 1	< 1	< 1	< 1	0,03
Ir	<	<	<	<	<	<	<	<	<	<	-
La	43,3	13,1	70,5	3,7	3,6	3,3	3,4	9,8	8,4	20,6	30,0
Lu	0,06	0,08	0,05	0,19	0,16	0,15	0,19	0,22	0,12	0,51	1,2
Mo	< 2	< 2	< 2	5	4	< 2	< 2	< 2	< 2	43	0,2
Nd	10	< 5	14	< 5	< 5	5	< 5	7	< 5	24	37,0
Ni	5	10	5	20	19	9	15	15	13	55	2,0
Pb	25	7	19	11	8	< 5	< 5	37	8	53	7,0
Rb	< 20	< 20	< 20	< 20	< 20	< 20	< 20	< 20	< 20	< 20	60,0
S	140	1370	150	460	390	160	100	140	50	280	240,0
Sb	0,2	0,2	0,2	1,4	1	0,5	0,8	0,9	0,9	8,8	0,0X
Sc	4,1	2,4	2,3	5,9	5,9	4,5	5,0	8,2	5,1	21,8	1,0
Se	< 3	< 3	< 3	< 3	< 3	< 3	< 3	< 3	< 3	< 3	0,05
Sm	1,5	0,2	1,6	0,7	0,5	0,3	0,3	1,1	0,6	5,1	10,0
Sr	22	12	25	5	5	5	4	7	6	7	20,0
Ta	< 1	< 1	< 1	< 1	< 1	< 1	< 1	< 1	< 1	< 1	0,0X
Tb	< 0,5	< 0,5	< 0,5	< 0,5	< 0,5	< 0,5	< 0,5	0,5	< 0,5	1,6	1,6
Th	5,7	4,2	2,9	14,7	12,7	6,4	11,1	14,0	10,2	71,3	1,7
U	0,7	0,7	< 0,5	1,3	1,1	1,1	0,9	2,1	0,8	1,2	0,45
V	20	21	7	227	141	12	78	210	137	1248	20,0
W	< 3	< 3	< 3	< 3	< 3	< 3	< 3	< 3	< 3	< 3	1,6
Y	3	2	2	6	6	6	7	6	4	26	40,0

continua

Tabela 5.7 – Continuação.

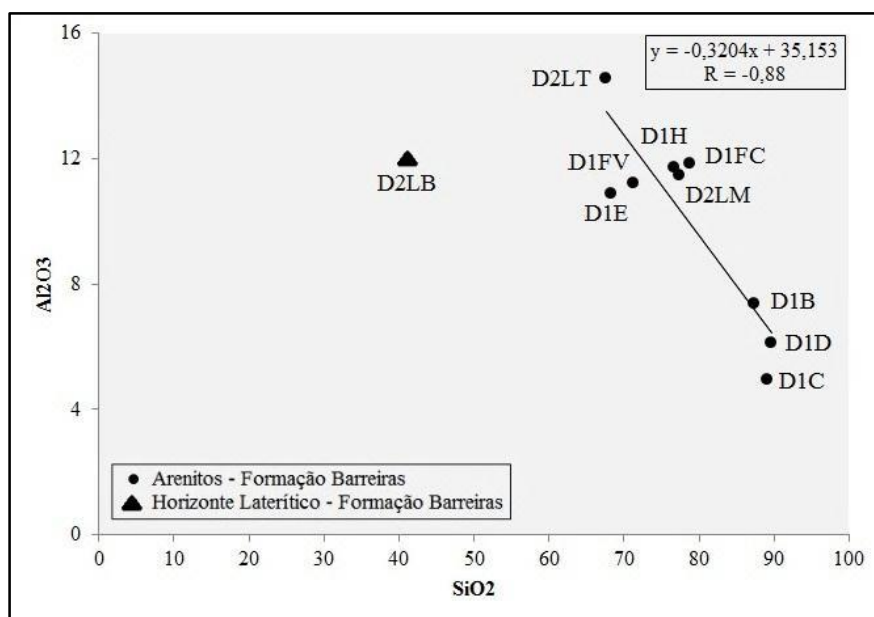
	D1B	D1C	D1D	D1E	D1FV	D1FC	D1H	D2LT	D2LM	D2LB	MA
Yb	0,3	0,6	0,5	1,2	1,2	1,1	1,0	1,3	1,1	3,3	4,0
Zn	3	1	2	21	20	7	9	15	10	79	16,0
Zr	108	152	98	324	337	408	407	399	360	320	220,0

Fonte: Elaborada pelo autor.

*X representa valores estimados.

No diagrama Al_2O_3 x SiO_2 (Figura 5.15) percebe-se que o conjunto das rochas não lateríticas da Formação Barreiras mostram expressiva correlação negativa entre estas duas variáveis, enquanto que a amostra laterítica (D2LB) não integra o conjunto por ter sido objeto de diagênese diferenciada. A correlação não é mais pronunciadamente negativa porque SiO_2 está compartilhado entre quartzo e argilominerais, mas é indicadora que os conteúdos em argilominerais e quartzo parecem originalmente controlados pela hidrodinâmica deposicional.

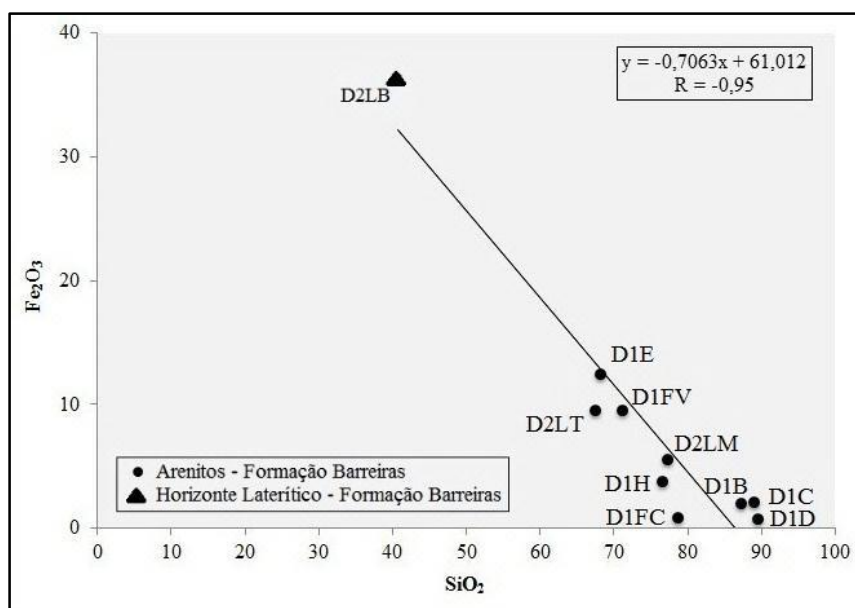
Figura 5.15 – Diagrama Al_2O_3 x SiO_2 para as amostras da Formação Barreiras.



Fonte: Elaborada pelo autor.

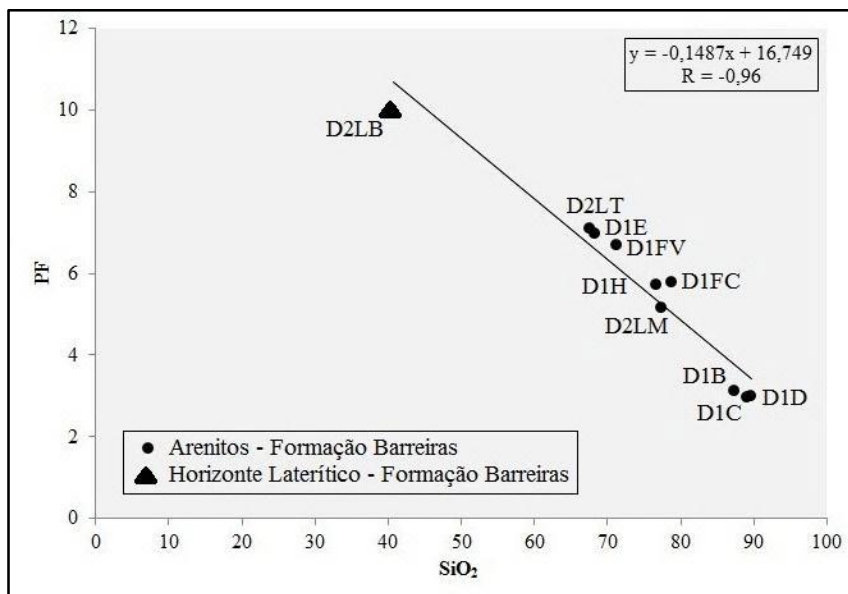
No diagrama Fe_2O_3 x SiO_2 (Figura 5.16) observa-se uma forte correlação negativa, entre estas variáveis, apesar do forte enriquecimento em Fe_2O_3 no horizonte laterítico, alteração intermediária para este grupo que difere das demais. Desconsiderando-se a possibilidade de um valor de Fe_2O_3 integrado na correlação linear Fe_2O_3 x SiO_2 , pode-se admitir que sua presença esteja detriticamente compatível com dimensões muito pequenas para os óxidos/hidróxidos de ferro (transportáveis ao lado de argilominerais), ou que sua presença seja diagenética (precoce), representando uma precipitação de cimento nos sedimentos originais.

Figura 5.16 – Diagrama Fe_2O_3 x SiO_2 das amostras da Formação Barreiras.



Fonte: Elaborada pelo autor.

O diagrama PF x SiO_2 (Figura 5.17) exibe uma forte correlação negativa, confirmando indiretamente uma relação entre óxi-hidróxidos de ferro e argilominerais, como possivelmente associados a um mesmo regime hidrodinâmico de transporte.

Figura 5.17 – Diagrama PF x SiO₂ das amostras da Formação Barreiras.

Fonte: Elaborada pelo autor.

Quanto à intensidade de lateritização, as amostras da Formação Barreiras, exceção do horizonte laterítico, apresentam relativa uniformidade (Tabela 5.8) mesmo com abordagens classificatórias diferentes. As alterações (supergênicas) são:

- Aluminosas: devido as razões $Fe_2O_3/Al_2O_3 < 1$ e $SiO_2/Fe_2O_3 > 1,33$;
- Ferruginosas: devido às razões $Fe_2O_3/Al_2O_3 > 1$ e $SiO_2/Fe_2O_3 < 1,33$.

Segundo o índice Kr, que classifica: lateritos verdadeiros – materiais lateríticos – materiais não-lateríticos, a amostragem mostrou-se não-laterítica, em razão de relações $SiO_2/(Al_2O_3+Fe_2O_3) > 2,00$, exceto o horizonte laterítico (Amostra D2LB, em destaque; Tabela 5.8), confirmada como laterito verdadeiro: $SiO_2/(Al_2O_3+Fe_2O_3) < 1,33$.

Tabela 5.8 – Classificações para as amostras da Formação Barreiras:

Classificação 1: Tipo de alteração segundo Karunakaran e Sinha Roy (1971);

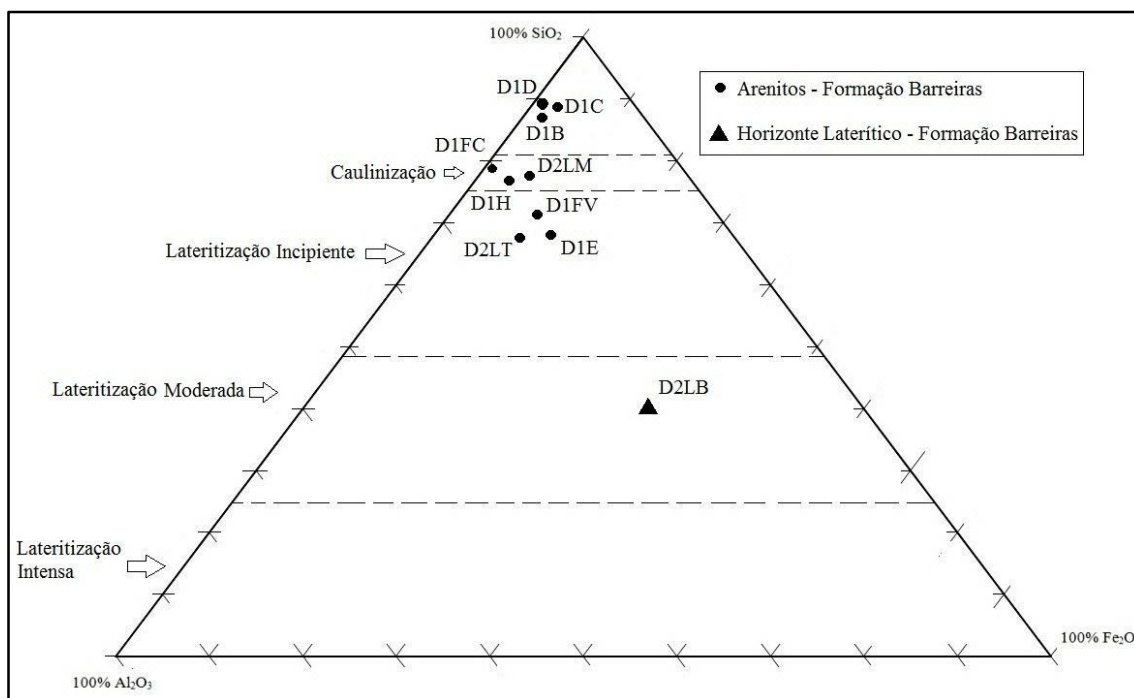
Classificação 2: Índice de intemperismo Kr, segundo Medina (1970 *apud* SIQUEIRA, 2012).

	SiO ₂	Al ₂ O ₃	Fe ₂ O ₃	Fe ₂ O ₃ / Al ₂ O ₃	SiO ₂ / Fe ₂ O ₃	Classificação 1	Índice Kr	Classificação 2
D1B	87,49	7,35	1,90	0,26	46,05	Aluminosa	9,46	Material não laterítico
D1C	89,22	4,95	2,01	0,41	44,39	Aluminosa	12,82	Material não laterítico
D1D	89,64	6,10	0,69	0,11	129,91	Aluminosa	13,20	Material não laterítico
D1E	68,32	10,85	12,33	1,14	5,54	Aluminosa	2,95	Material não laterítico
D1FV	71,27	11,20	9,39	0,84	7,59	Aluminosa	3,46	Material não laterítico
D1FC	78,89	11,81	0,79	0,07	99,86	Aluminosa	6,26	Material não laterítico
D1H	76,74	11,69	3,71	0,32	20,68	Aluminosa	4,98	Material não laterítico
D2LT	67,61	14,53	9,43	0,65	7,17	Aluminosa	2,82	Material não laterítico
D2LM	77,52	11,47	5,48	0,48	14,15	Aluminosa	4,57	Material não laterítico
D2LB	40,76	12,06	36,47	3,02	1,12	Ferruginosa	0,84	Laterito verdadeiro

Fonte: Elaborada pelo autor.

As amostras da Formação Barreiras plotadas no diagrama SiO₂ – Al₂O₃ – Fe₂O₃ de Schellmann (1986 *apud* SIQUEIRA, 2012) se distribuem em diferentes classificações, correspondendo a 4 grupos de acordo com a intensidade da alteração (Figura 5.18). O primeiro grupo de amostras (D1B, D1C e D1D) são aquelas de baixo nível de intemperismo; as do segundo grupo (D1FC, D1H e D2LM) de alteração correspondem àquelas que sofreram caulínização. No terceiro grupo (D1E, D1FV e D2LT) estão as amostras que sofreram processo de lateritização, embora incipiente. A amostra D2LB atingiu o nível moderado de lateritização, formando um horizonte laterítico ferruginoso.

Figura 5.18 – Amostras da Formação Barreiras plotadas no diagrama $\text{SiO}_2 - \text{Al}_2\text{O}_3 - \text{Fe}_2\text{O}_3$ integrando diferenciados processos lateríticos, segundo Schellmann (1986 *apud* SIQUEIRA, 2012).



Fonte: Elaborada pelo autor.

A quantificação mineralógica, por estequiometria, nas amostras foi dividida segundo o grau do intemperismo (Tabela 5.9). Os valores de feldspato potássico e de calcita diminuem com a caulinização e estabilizam-se depois. As quantidades de argilominerais e de rutilo aumentam com a caulinização e estabilizam-se após isso. O teor de quartzo diminui conforme o aumento da alteração. A quantidade de goethita aumenta proporcionalmente à elevação da intensidade de alteração. E o teor de apatita permaneceu nulo em todos os graus de alterações.

O teor de quartzo reduziu drasticamente no laterito em relação às demais amostras da Formação Barreiras, enquanto que a quantidade de goethita mostrou comportamento inverso e aumentou 8x em relação à média dos valores de goethita encontrados nas outras amostras desta formação (Amostra D2LB, em destaque; Tabela 5.9).

Tabela 5.9 – Composição mineralógica (%) a partir dos dados químicos das amostras da Formação Barreiras.

	Feldspato Potássico	Argilominerais (*)	Quartzo	Goethita	Apatita	Calcita	Rutilo	Σ
Baixo Nível de Intemperismo								
D1B	0,7	19,9	77,7	2,1	0,0	0,1	0,2	100,7
D1C	0,4	13,3	82,7	2,2	0,0	0,4	0,2	99,2
D1D	0,5	16,5	81,6	0,8	0,0	0,0	0,2	99,6
Caulinização								
D1FC	0,4	32,4	63,5	0,9	0,0	0,1	0,6	97,9
D1H	0,3	32,1	61,5	4,1	0,0	0,0	0,6	98,6
D2LM	0,3	31,3	62,6	6,1	0,0	0,1	0,5	100,9
Lateritização Incipiente								
D1E	0,3	29,8	54,2	13,7	0,0	0,0	0,5	98,5
D1FV	0,3	30,8	56,7	10,4	0,0	0,0	0,5	98,7
D2LT	0,6	39,8	48,6	10,5	0,0	0,1	0,6	100,2
Lateritização Moderada								
D2LB	0,3	33,2	25,0	40,5	0,0	0,0	0,6	99,6

Fonte: Elaborada pelo autor.

*Proporção caulinita: montmorillonita = 85: 15 (paleoclima: tropical).

A partir dos teores de quartzo e argilominerais das amostras da Formação Barreiras, estas foram agrupadas em dois paleoclimas: Tropical mais árido (Amostras que mostram valores >77,7% de quartzo e <19,8% de argilominerais); e Tropical mais úmido (Amostras que apresentam teores <63,5% de quartzo e >29,8% de argilominerais). Portanto, conforme esses paleoclimas e associados também aos processos lateríticos segundo Schellmann (1986 *apud* SIQUEIRA, 2012) foram integrados: resultados geoquímicos dos três principais óxidos fundamentais (SiO₂, Al₂O₃ e Fe₂O₃); a mineralogia dominante (Quartzo, argilominerais e goethita); os elementos traços anômalos no qual seus teores crescem de acordo com o aumento da alteração (As, Co, Cr, Ni, Sb, Sc, Th, V e Zn); o tipo de alteração; e o índice de intemperismo Kr (Tabela 5.10).

Tabela 5.10 – Integração dos dados químicos, mineralógicos e de intensidade de alteração das amostras da Formação Barreiras com base nos respectivos paleoclimas e processos lateríticos segundo Schellmann (1986 *apud* SIQUEIRA, 2012).

Paleoclimas	Tropical mais	Tropical mais úmido		
	árido			
Processos lateríticos	Baixo Nível de Intemperismo (D1B, D1C e D1D)	Caulinização (D1FC, D1H e D2LM)	Lateritização Incipiente (D1E, D1FV e D2LT)	Lateritização Moderada (D2LB)
%SiO₂	87,5 a 89,6	76,7 a 78,9	67,6 a 71,3	40,7
%Al₂O₃	4,9 a 7,3	11,5 a 11,8	10,8 a 14,5	12,0
%Fe₂O₃	0,7 a 2,0	0,8 a 5,5	9,4 a 12,3	36,5
(Total)				
%Quartzo	77,7 a 82,7	61,5 a 63,5	48,6 a 56,7	25,0
%Argilominerais	13,3 a 19,8	31,3 a 32,4	29,8 a 39,8	33,2
%Goethita	0,8 a 2,2	0,9 a 6,1	10,4 a 13,7	40,5
As (ppm)	<2	2 a 8	17 a 24	137
Co (ppm)	≤1	2	2 a 5	30
Cr (ppm)	6 a 18	28 a 66	79 a 143	760
Ni (ppm)	5 a 10	9 a 15	15 a 20	55
Sb (ppm)	0,2	0,5 a 0,9	0,9 a 1,4	8,8
Sc (ppm)	2,3 a 4,1	4,5 a 5,1	5,9 a 8,2	21,8
Th (ppm)	2,9 a 5,7	6,4 a 11,1	12,7 a 14,7	71,3
V (ppm)	7 a 21	12 a 137	141 a 227	1248
Zn (ppm)	1 a 3	7 a 10	15 a 21	79
Tipo de alteração	Aluminosa	Aluminosa	Aluminosa	Ferruginosa
Índice Kr	Material não laterítico	Material não laterítico	Material não laterítico	Laterito verdadeiro

Fonte: Elaborada pelo autor.

5.2.3 Formação Jandaíra

Analicamente, os teores de óxidos fundamentais do calcário da Formação Jandaíra (Tabela 5.11) demonstram que a rocha é essencialmente composta por calcita (CaCO_3) detectada no DRX, com baixo teor de MgO ($< 1\%$), caracterizando assim uma *low-Mg* calcita. O SiO_2 (1,14%), em princípio, é proveniente de minerais siliciclásticos, em teor insuficiente para detecção perceptível em DRX. O alto valor de PF resulta na liberação de CO_2 durante a calcinação da amostra a cerca de 1300°C , antecedendo os procedimentos modernos para análises químicas.

Tabela 5.11 – Composição química dos óxidos fundamentais e PF (%) na amostra da Formação Jandaíra.

	SiO_2	Al_2O_3	Fe_2O_3 (Total)	K_2O	CaO	MgO	MnO	Na_2O	P_2O_5	TiO_2	PF	Σ
DIA	1,14	0,43	0,31	0,10	53,81	0,33	0,01	0,03	0,03	0,018	42,46	98,67

Fonte: Elaborada pelo autor.

O calcário apresenta uma composição essencialmente calcítica (96,9%) do tipo *low-magnesian*, com todos os demais minerais acessórios somando 1,9% (Tabela 5.12).

Tabela 5.12 – Composição mineralógica (%) a partir dos dados químicos da amostra da Formação Jandaíra.

	Feldspato potássico	Argilominerais (*)	Quartzo	Goethita	Apatita	Calcita	Rutilo	Σ
DIA	0,6	0,2	0,7	0,3	0,1	96,9	0,0	98,8

Fonte: Elaborada pelo autor.

*Proporção mínima caulinita: montmorillonita = 50%: 50% (paleoclima continental: semiárido).

Dentre os elementos traços (Tabela 5.13), aqueles que apresentaram anomalias 2x maiores que os valores médios dos carbonatos foram: Cd, Co e La. A concentração elevada em Cd (11,3 ppm), é muito elevada ($>100x$) em relação ao teor para a média dos carbonatos. Rambeau (2006) encontrou valores desta ordem em calcários do Mesozóico, e são atribuídos a atividades vulcânicas que acompanharam o *break-up* do Gondwana, formador do Oceano Atlântico dos dias atuais.

Enquanto que o Co e La provêm dos grãos terrígenos do embasamento cristalino crustal, com presença de rochas ultrabásicas e ácidas, respectivamente.

Tabela 5.13 – Composição química dos elementos traços (ppm) na amostra da Formação Jandaíra em comparação aos valores médios para os carbonatos (MC) definidos por Turekian e Wedepohl (1961).

	Ag	As	Au	Ba	Be	Bi	Br	Cd	Ce	Co
DIA	< 0,5	< 2	< 0,005	14	1	< 2	< 1	11,3	7	1
MC	0,0X	1,0	0,00X	10,0	0,X	-	6,2	0,035	11,5	0,1
	Cr	Cs	Cu	Eu	Hf	Hg	Ir	La	Lu	Mo
DIA	21	< 0,5	7	0,2	< 0,5	< 1	< 0,005	12,9	0,06	< 2
MC	11,0	0,X	4,0	0,2	0,3	0,04	-	X,0	2,0	0,4
	Nd	Ni	Pb	Rb	S	Sb	Sc	Se	Sm	Sr
DIA	7	5	< 5	< 20	120	0,3	0,7	< 3	0,7	82
MC	4,7	20,0	9,0	3,0	1200,0	0,2	1,0	0,08	1,3	610,0
	Ta	Tb	Th	U	V	W	Y	Yb	Zn	Zr
DIA	< 1	< 0,5	0,8	1,6	10	< 3	12	0,2	7	6
MC	0,0X	0,2	1,7	2,2	20,0	0,6	30,0	0,5	20,0	19,0

Fonte: Elaborada pelo autor.

*X representa valores estimados.

5.3 Análise Petrográfica

5.3.1 Formação Barreiras

Amostra D1B – Baixo Nível de Intemperismo

Seus componentes correspondem a 79% de arcabouço (78% de quartzo e 1% de feldspato potássico), 20% de matriz (Argilominerais) e 1% de cimento (Minerais opacos – óxi-hidróxidos de ferro) (Figura 5.19). Apresenta porosidade secundária com poros ampliados e grãos flutuantes, e uma compactação aberta.

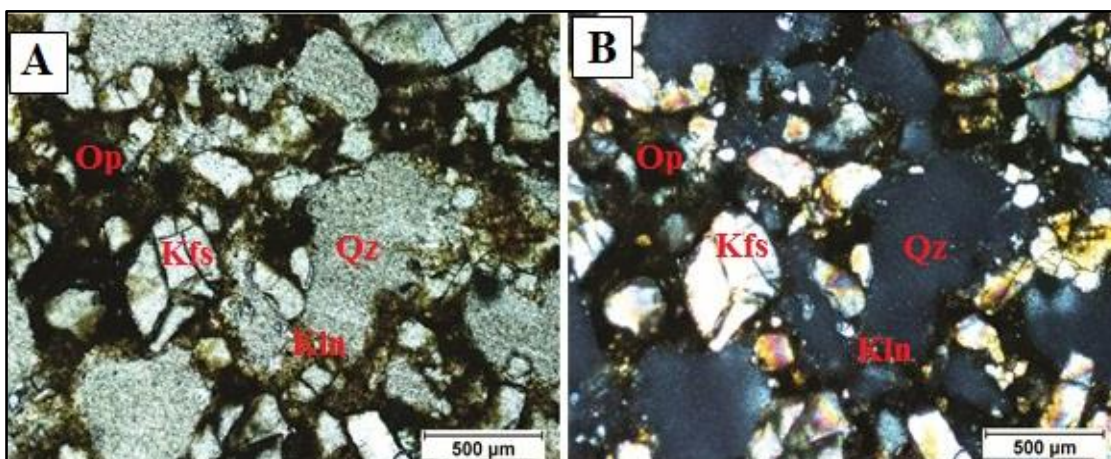
O quartzo apresenta grãos anédricos e os contatos destes grãos são côncavo-convexos, com maior evidência quando junto aos feldspatos. Os feldspatos ocorrem como grãos anédricos, apresentam geminação, e os contatos destes grãos são côncavo-convexos e irregulares. Os minerais opacos ocorrem acessoriamente, e de forma dispersiva. Quartzo e feldspato mostram bordas muito desgastadas.

Trata-se de um Quartzito segundo a classificação de Folk (1968).

Figura 5.19 – Fotomicrografia da amostra D1B:

A) Nicóis paralelos;

B) Nicóis cruzados.



Fonte: Elaborada pelo autor.

*Kfs: Feldspato potássico;

Op: Minerais Opacos;

Kln: Caulinita;

Qz: Quartzito.

Amostra D1FC – Caulinização

Seus componentes correspondem a 69% de arcabouço (68% de quartzo e 1% de feldspato potássico), 30% de matriz (Argilominerais) e 1% de cimento (Minerais opacos – óxi-hidróxidos de ferro) (Figura 5.20). Verifica-se uma porosidade secundária com poros ampliados e grãos flutuantes, e uma compactação aberta.

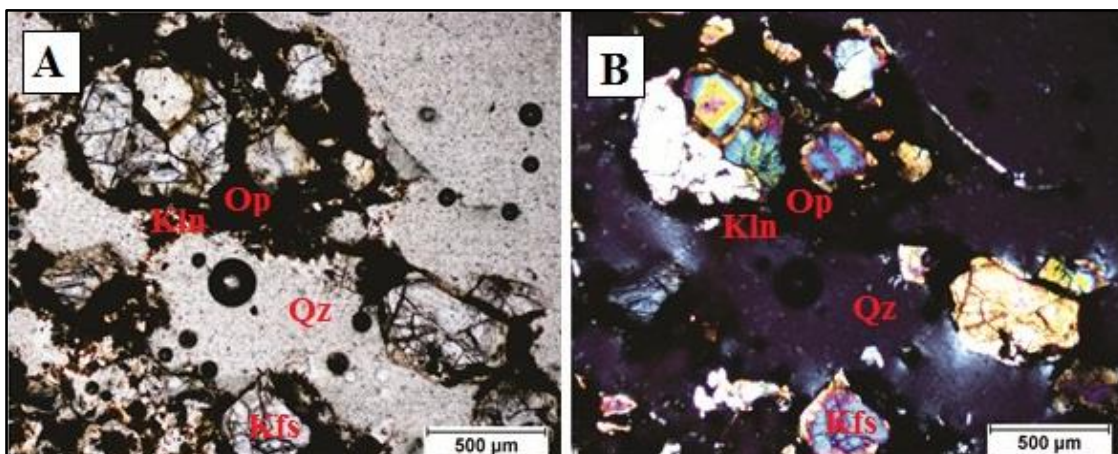
O quartzo apresenta grãos anédricos com bordas côncavo-convexas corroídas, com maior evidência quando junto aos feldspatos. Os feldspatos ocorrem como grãos anédricos, apresentando geminação, e bordas côncavo-convexas igualmente corroídas. Os minerais opacos são acessórios e estão dispersos na seção delgada.

Trata-se de um Quartzo-arenito segundo a classificação de Folk (1968).

Figura 5.20 – Fotomicrografia da amostra D1FC:

A) Nicóis paralelos;

B) Nicóis cruzados.



Fonte: Elaborada pelo autor.

*Kfs: Feldspato potássico;

Op: Minerais Opacos;

Kln: Caulinita;

Qz: Quartzo.

Amostra D1H – Caulinização

Seus componentes correspondem a 65% de arcabouço (64% de quartzo e 1% de feldspato potássico), 30% de matriz (Argilominerais) e 5% de cimento (Minerais opacos – óxi-hidróxidos de ferro) (Figura 5.21). Apresenta porosidade secundária com poros ampliados e grãos flutuantes, e uma compactação aberta.

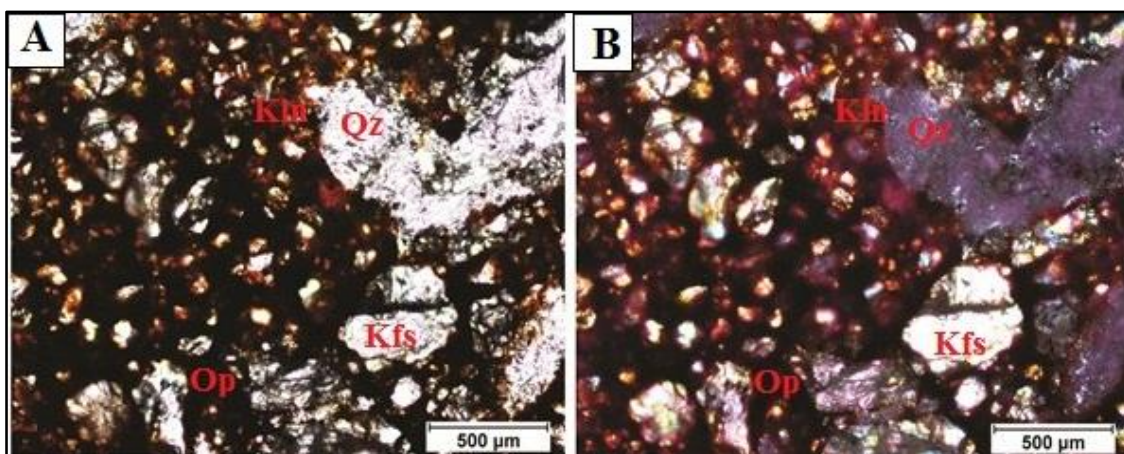
O quartzo apresenta grãos anédricos, com bordas côncavo-convexas corroídas, mais alteradas quando adjacentes a feldspatos. Os feldspatos ocorrem como grãos anédricos, eventualmente geminados, e suas bordas são côncavo-convexas e irregulares. Observa-se aumento de grãos com menores dimensões na constituição da rocha. Os minerais opacos são acessórios e estão dispersos na seção delgada.

Trata-se de um Quartzito-arenito segundo a classificação de Folk (1968).

Figura 5.21 – Fotomicrografia da amostra D1H:

A) Nicóis paralelos;

B) Nicóis cruzados.



Fonte: Elaborada pelo autor.

*Kfs: Feldspato potássico;

Op: Minerais Opacos;

Kln: Caulinita;

Qz: Quartzo.

Amostra D2LM – Caulinização

Seus componentes correspondem a 65% de arcabouço (64% de quartzo e 1% de feldspato potássico), 30% de matriz (Argilominerais) e 5% de cimento (Minerais opacos – óxi-hidróxidos de ferro) (Figura 5.22). Apresenta porosidade secundária com poros ampliados e grãos flutuantes, e uma compactação aberta.

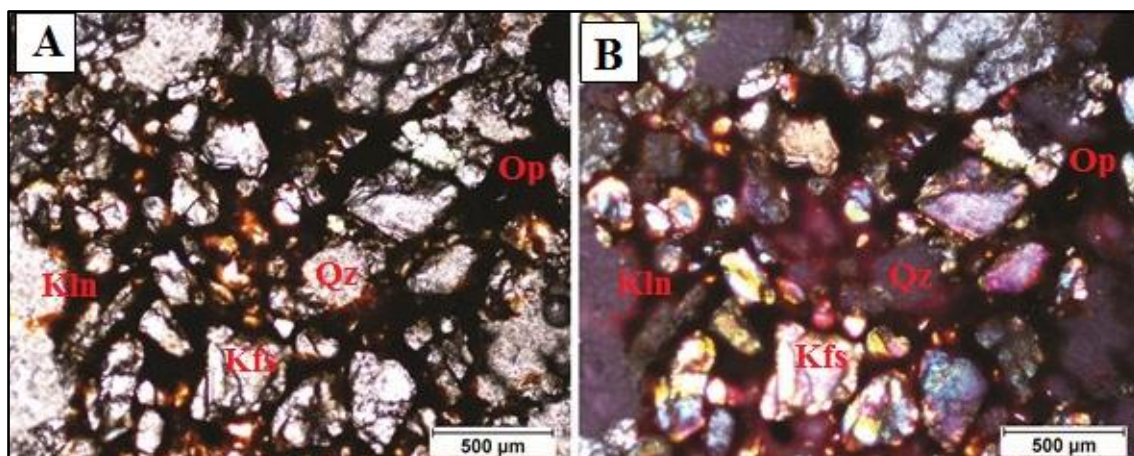
O quartzo apresenta grãos anédricos, corroídos, com contatos côncavo-convexos com outros minerais, sobretudo quando adjacentes a feldspatos. Os feldspatos ocorrem como grãos anédricos, eventualmente geminados, com contatos côncavo-convexos irregulares e bastante corroídos. Os minerais opacos são acessórios e encontram-se dispersos na rocha.

Trata-se de um Quartzito-arenito segundo a classificação de Folk (1968).

Figura 5.22 – Fotomicrografia da amostra D2LM:

A) Nicóis paralelos;

B) Nicóis cruzados.



Fonte: Elaborada pelo autor.

*Kfs: Feldspato potássico;

Op: Minerais Opacos;

Kln: Caulinita;

Qz: Quartzo.

Amostra D2LT – Lateritização Incipiente

Seus componentes correspondem a 50% de arcabouço (49% de quartzo e 1% de feldspato potássico), 40% de matriz (Argilominerais) e 10% de cimento (Minerais opacos – óxi-hidróxidos de ferro) (Figura 5.23). Apresenta porosidade secundária com poros ampliados e grãos flutuantes, e uma compactação aberta.

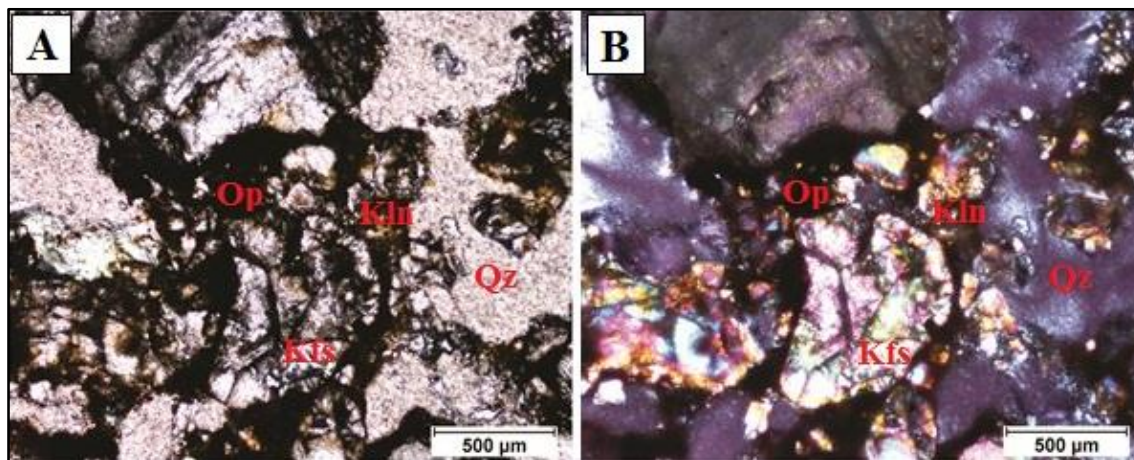
O quartzo apresenta-se como grãos anédricos, com bordas côncavo-convexas bastante corroídas, mais afetadas quando junto a feldspatos. Os feldspatos ocorrem como grãos anédricos, com bordas côncavo-convexas irregulares e corroídas. Os minerais opacos são acessórios e estão dispersos na seção delgada. Nesta amostra observa-se que os grãos apresentam dimensões maiores que nas demais amostras estudadas.

Trata-se de um Quartzito-arenito segundo a classificação de Folk (1968).

Figura 5.23 – Fotomicrografia da amostra D2LT:

A) Nicóis paralelos;

B) Nicóis cruzados.



Fonte: Elaborada pelo autor.

*Kfs: Feldspato potássico;

Op: Minerais Opacos;

Kln: Caulinita;

Qz: Quartzo.

Amostra D2LB – Lateritização Moderada

Seus componentes correspondem a 30% de arcabouço (29% de quartzo e 1% de feldspato potássico), 30% de matriz (Argilominerais) e 40% de cimento (Minerais opacos – óxi-hidróxidos de ferro) (Figura 5.24). Apresenta porosidade secundária com poros ampliados e grãos flutuantes, e uma compactação aberta.

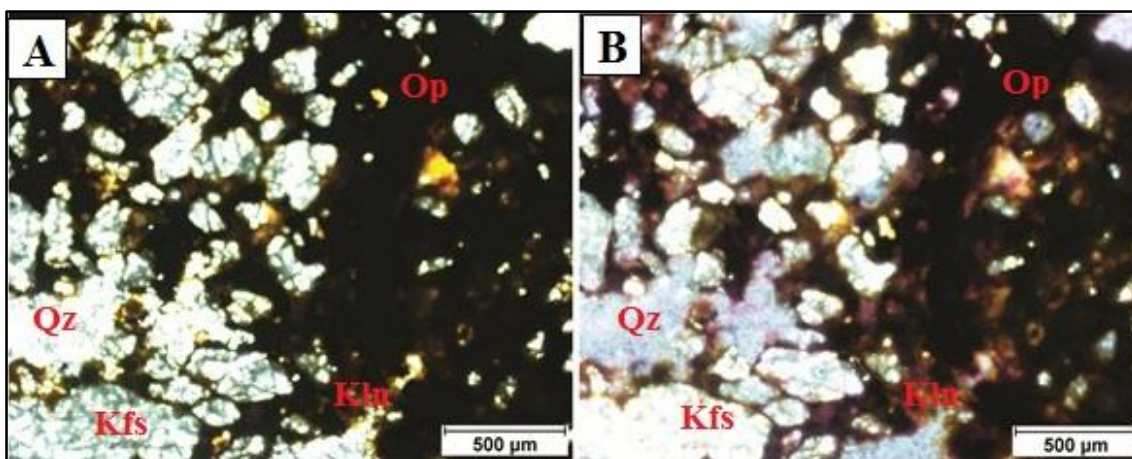
Os grãos de quartzo são anédricos, com bordas côncavo-convexas e fortemente corroídas, com maior evidência quando junto aos feldspatos. Os feldspatos também ocorrem com bordas côncavo-convexas irregulares, e alto grau de alteração. Os minerais opacos apresentam-se em maior expressão na rocha.

Trata-se de um Quartzito-arenito segundo a classificação de Folk (1968).

Figura 5.24 – Fotomicrografia da amostra D2LB:

A) Nicóis paralelos;

B) Nicóis cruzados.



Fonte: Elaborada pelo autor.

*Kfs: Feldspato potássico;

Kln: Caulinita;

Op: Minerais Opacos;

Qz: Quartzo.

Com base nas observações nas seções delgadas das amostras da Formação Barreiras, as rochas são todas quartzito-arenitos, nas quais o arcabouço é constituído predominantemente por quartzo, com presença subordinada de feldspatos bastante alterados e microfissurados, dentro de um cimento com forte participação de óxi-hidróxidos de ferro e uma matriz argilosa. Os grãos, de uma forma geral são anédricos e mostram bordas muito corroídas, indicando uma possível procedência pedogênica, sob condições de forte alteração supergênica.

5.3.2 Formação Jandaíra

Amostra D1A

Seus componentes correspondem a 80% de arcabouço e 20% de matriz constituída por calcita micrítica. O arcabouço é constituído por 75% de bioclastos e 5% de oóides (Figura 5.25).

Terra *et al.* (2010) afirmam que os oóides são partículas envelopadas, esféricas a subesféricas, originadas por acreção físico-química em torno de um núcleo e se formam em águas rasas com menos de 5m de profundidade, onde são movimentados por ação de ondas e marés.

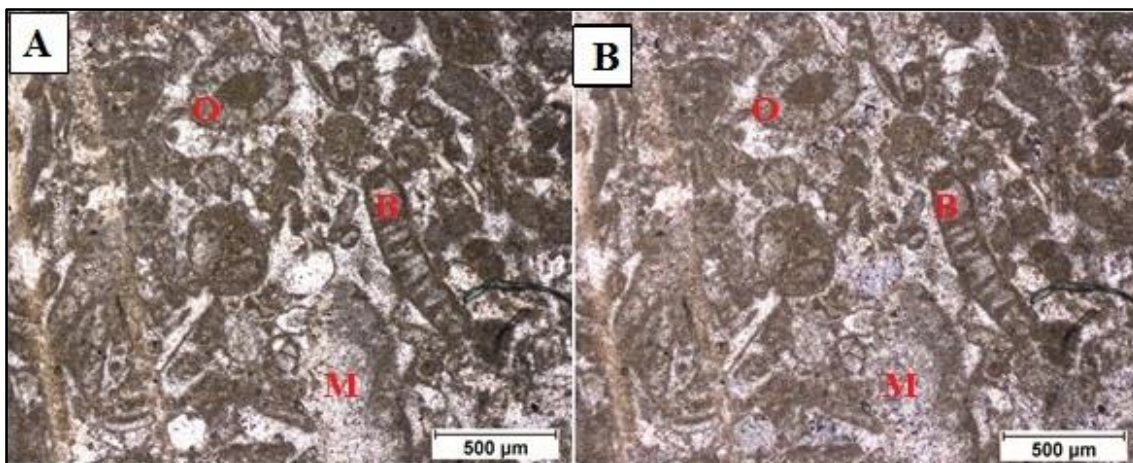
Trata-se de um *Packstone* segundo a classificação de Dunham (1962).

A ausência de quartzo, a presença de oóides e abundância de bioclastos pouco fragmentados, em matriz micrítica, sugere um ambiente plataformal distal relativamente raso, com fraca hidrodinâmica.

Figura 5.25 – Fotomicrografia da amostra D1A:

A) Nicóis paralelos;

B) Nicóis cruzados.



Fonte: Elaborada pelo autor.

* B: Bioclasto (Foraminífero unisseriado); M: Matriz micrítica;

O: Oóide.

6 CONCLUSÃO

As características petrográficas e o conteúdo fóssil do calcário da Formação Jandaíra são tipicamente indicadores de águas rasas marinhas com relativa hidrodinâmica. É quase uma rocha carbonática pura (97% em carbonatos), com notória quase ausência em elementos detríticos de origem terrígena. Seu ambiente de formação, nestas condições, é compatível com zonas distais de plataforma rasa, com aportes muito reduzidos de influxos continentais. Teores elevados em Cd indicam que o magmatismo que acompanhou o *break-up* do Gondwana ainda era ativo no Cretáceo Superior.

As condições sedimentares ao longo da Formação Barreiras dão conta de regimes continentais sob paleoclima úmido, resultando em predomínio de quartzo com quantidades variáveis de argilominerais, associados a uma presença apenas acessória de feldspato potássico. Essas características apontam para condições supergênicas fortemente hidrolíticas, resultando em franco predomínio de caulinitas na fração argilomineral. Estas características são ainda mais marcantes na base da sequência (Amostras D1B, D1C e D1D), que exhibe indicações de “baixo nível de intemperismo” pelo fato da presença muito elevada da fração quartzosa (>77,7% em rocha total) com fração relativamente reduzida em argilominerais (<19,8% em rocha total), e presença acessória de óxi-hidróxidos de ferro. A dimensão dos grãos, na análise petrográfica, demonstra bem que um regime hidrodinâmico relativamente forte explica a elevada participação de quartzo e a baixa participação de aluminossilicatos (inclusive argilominerais) em rocha total.

No sentido do topo da formação observam-se níveis em que a participação de quartzo se situa, via de regra, em $60 \pm 5\%$, enquanto que os argilominerais variam entre 29,6 a 39,6%, indicando uma diminuição no regime hidrodinâmico da sedimentação. Esta diminuição propiciou acumulações superficiais de águas, ainda que transitórias e, neste caso, a possibilidade de precipitação de óxi-hidróxidos de ferro (integrando o cimento das rochas, nos processos diagenéticos), com tendência à formação de níveis lateríticos. Com efeito, os níveis lateríticos mostram clara conformação de ambientes em depressão morfológica, conforme se pode observar em afloramentos (rever figuras 3.11 e 3.12), de modo que são litologias dependentes destas condições faciológicas e não modificações substanciais do regime paleoclimático.

O nível laterítico pesquisado, entretanto, mostra enriquecimento em metais pesados, particularmente Cr e Ni, indicando que nas rochas-fontes (a montante) devem ocorrer rochas de natureza básica-ultrabásica ainda não caracterizadas.

Acima das rochas da Formação Barreiras, a amostragem da Formação Potengi (D1G) revela uma rocha quartzosa (Quartzo = 83,2% em rocha total), com pouca fração argilomineral (8,3% em rocha total), óxi-hidróxidos de ferro apenas como acessórios (1,0% em rocha total), porém com presença expressiva de feldspatos (7,2% em rocha total) ainda que em condições subordinadas. Esta constituição mineralógica da amostragem indica que no início da sedimentação deste arenito as condições paleoclimáticas estariam tendendo a condições semiáridas.

REFERÊNCIAS

- ACTLABS. **Litho geochemistry: 4E – Exploration**. Disponível em: <<http://www.actlabs.com/page.aspx?menu=74&app=244&cat1=595&tp=2&lk=no>>. Acesso em: 5 jun. 2017.
- ALBUQUERQUE, M. F. S.; HORBE, A. M. C. Mineralogia, geoquímica e evolução da laterização em Apuí, sudeste do Amazonas. **Brazilian Journal of Geology**, São Paulo, v. 45, n. 4, p. 569-590, 2015.
- ANGELIM, Luiz Alberto de Aquino (Org.). **Geologia e recursos minerais do estado do Rio Grande do Norte**. Recife: CPRM – Serviço Geológico do Brasil, 2007. 119p.
- ARARIPE, P. T.; FEIJÓ, F. J. Bacia Potiguar. **Boletim de Geociências**, Rio de Janeiro, v. 8, p. 127-141, 1994.
- BERTANI, R. T.; COSTA, I. G.; MATOS, R. M. D. **Evolução tectono-sedimentar, estilo estrutural e habitat do petróleo na Bacia Potiguar**. In: RAJA GABAGLIA G. P.; MILANI E. J. (Eds.). Origem e evolução de bacias sedimentares. Rio de Janeiro: PETROBRÁS, p. 291-310, 1990.
- CAMPOS E SILVA, A. Considerações sobre o Quaternário no Rio Grande do Norte. **Arquivo do Instituto de Antropologia**, Natal, v. 2, p. 275-301, 1966.
- CLIMATEMPO. **Climatologia: Icapuí – CE**. Disponível em: <<https://www.climatepo.com.br/climatologia/5827/icapui-ce>>. Acesso em: 5 jun. 2017.
- COSTA, M. L. Aspectos geológicos dos lateritos da Amazônia. **Revista Brasileira de Geociências**, São Paulo, v. 21, n. 2, p. 146-160, 1991.
- _____. **A importância da lateritização para a formação de depósitos minerais e suas perspectivas para os terrenos brasileiros**. In: SIMPÓSIO BRASILEIRO DE EXPLORAÇÃO MINERAL, 3, 2008, Ouro Preto, 2008. Pôster 10.
- DANTAS, E. P. **Gravimetria e Sensoriamento Remoto: uma aplicação ao estudo da tectônica recente entre Macau e São Bento do Norte (RN)**. 1998. Dissertação (Mestrado em Geofísica) – Centro de Ciências Exatas e da Terra, Universidade Federal do Rio Grande do Norte, Natal, 1998.
- DUNHAM, R. J. **Classification of carbonate rocks according to depositional texture**. In: HAM, W. E. (Ed.). Classification of Carbonate Rocks. Tulsa: AAPG v. 1, p 108-121, 1962.
- EMBRAPA SOLOS. **Solos do Nordeste: Ceará**. Disponível em: <<http://www.uep.cnps.embrapa.br/solos/index.php?link=ce>>. Acesso em: 5 jun. 2017.
- EMBRAPA. **Agência de Informação Embrapa**. Disponível em: <http://www.agencia.cnptia.embrapa.br/Agencia16/AG01/arvore/AG01_2_10112005101955.html>. Acesso em: 5 jun. 2017.

FOLK, Robert. **Petrology of sedimentary rocks**. Austin: Hemphill Publishing Company, 1968. 170p.

FONSECA, A. C. R. **Morfologia de rochas lateríticas de Morro das Balas, município de Formiga – MG**. 2005. Monografia (Especialização em Solos e Meio-ambiente) – Departamento de Solos, Universidade Federal de Lavras, Lavras, 2005.

FRANÇOLIN, J. B.; SZARMARI, O. Mecanismo de resfriamento da porção oriental da margem norte brasileira. **Revista Brasileira de Geociências**, São Paulo, v. 17, p. 196-207, 1987.

FUNCEME. **Sistemas meteorológicos causadores de chuva na Região Nordeste do Brasil**. Disponível em:
<http://www.funceme.br/produtos/script/chuvas/Grafico_chuvas_postos_pluviometricos/entender/entender2.htm>. Acesso em: 5 jun. 2017.

_____. **Série histórica Icapuí: Posto Icapuí**. Disponível em:
<http://www.funceme.br/produtos/script/chuvas/Download_de_series_historicas/downloadHistoricos/postos/57.txt>. Acesso em: 5 jun. 2017.

IPECE. **Perfil básico municipal 2016 Icapuí**. Disponível em:
<http://www.ipece.ce.gov.br/perfil_basico_municipal/2016/Icapui.pdf>. Acesso em: 5 jun. 2017.

KARUNAKARAN, C.; SINHA ROY, S. **Laterite profile development linked with polycyclic geomorphic surfaces in South Kerala**. In: INTERNATIONAL SEMINAR ON LATERITIZATION PROCESSES, 1971. Trivandrum. 1971. p. 221-231.

LIMA, M. G. **A História do Intemperismo na Província Borborema Oriental, Nordeste do Brasil: Implicações Paleoclimáticas e Tectônicas**. 2008. Tese (Doutorado em Geodinâmica) – Centro de Ciências Exatas e da Terra, Universidade Federal do Rio Grande do Norte, Natal, 2008.

MABESOONE, J. M. *et al.* Estratigrafia e origem do Grupo Barreiras em Pernambuco, Paraíba e Rio Grande do Norte. **Revista Brasileira de Geociências**, São Paulo, v. 2, p. 173-188, 1972.

MEDINA, J. **Propriedades mecânicas dos solos residuais**. In: SEMINÁRIO DE MECÂNICA DOS SOLOS. 1970. Rio de Janeiro: UFRJ, 1970.

RAMBEAU, C. **Cadmium anomalies in Jurassic carbonates (Bajocian, Oxfordian) in western and southern Europe**. 2006. Ph.D thesis – Facultés des Sciences, Université de Neuchâtel, Neuchâtel, 2006.

REIMANN, Clemens; CARITAT, Patrice de. **Chemical elements in the environment: factsheets for the geochemist and environmental scientist**. Berlin: Springer-Verlag, 1998. 398p.

SCHELLMANN, W. **Considerations on the definition and classification of laterites**. In: INTERNATIONAL SEMINAR ON LATERITIZATION PROCESSES, 1971. Trivandrum. 1971. p. 1-10.

_____. A new definition of laterite. **Geological Survey of India**, Banerji, Memoir 120, p.1-7, 1986.

SIQUEIRA, A. C. A. **Geoquímica das lateritas do Domínio Médio Coreaú – Noroeste do estado do Ceará**. 2012. Dissertação (Mestrado em Geologia) – Centro de Ciências, Universidade Federal do Ceará, Fortaleza, 2012.

SOARES, U. M.; ROSSETTI, E. L.; CASSAB, R. C. T. Bacias sedimentares brasileiras: Bacia Potiguar. **Fundação Paleontológica Phoenix**, Aracaju, v. 56, p.1-10, 2003.

SOUSA, D. C. **Litoestratigrafia e deformação Cenozóica na região de Icapuí, Ceará, e implicações para a estruturação de campos de petróleo na borda ocidental da Bacia Potiguar (NE do Brasil)**. 2002. Tese (Doutorado em Geodinâmica) – Centro de Ciência Exatas e da Terra, Universidade Federal do Rio Grande do Norte, Natal, 2002.

TEIXEIRA, Wilson *et al.* (Org.). **Decifrando a terra**. São Paulo: Oficina de Texto, 2000. 548p.

TERRA, G. J. S. *et al.* Classificação de rochas carbonáticas aplicável às bacias sedimentares brasileiras. **Boletim de Geociências**, Rio de Janeiro, v. 18, n. 1, p. 9-29, 2010.

TUREKIAN, K. K.; WEDEPOHL, K. H. Distribution of the Elements in Some Major Units of the Earth's Crust. **Geological Society of America**, Boulder, v. 72, p. 175-192, 1961.

VILAÇA, J. C. *et al.* **Geologia Ambiental da Área Costeira da Ponta de Búzios à Barra de Maxaranguape – RN**. In: SIMPÓSIO DE GEOLOGIA DO NORDESTE, 12, 1985. [João Pessoa]. Atas. 1985. p. 220-227.