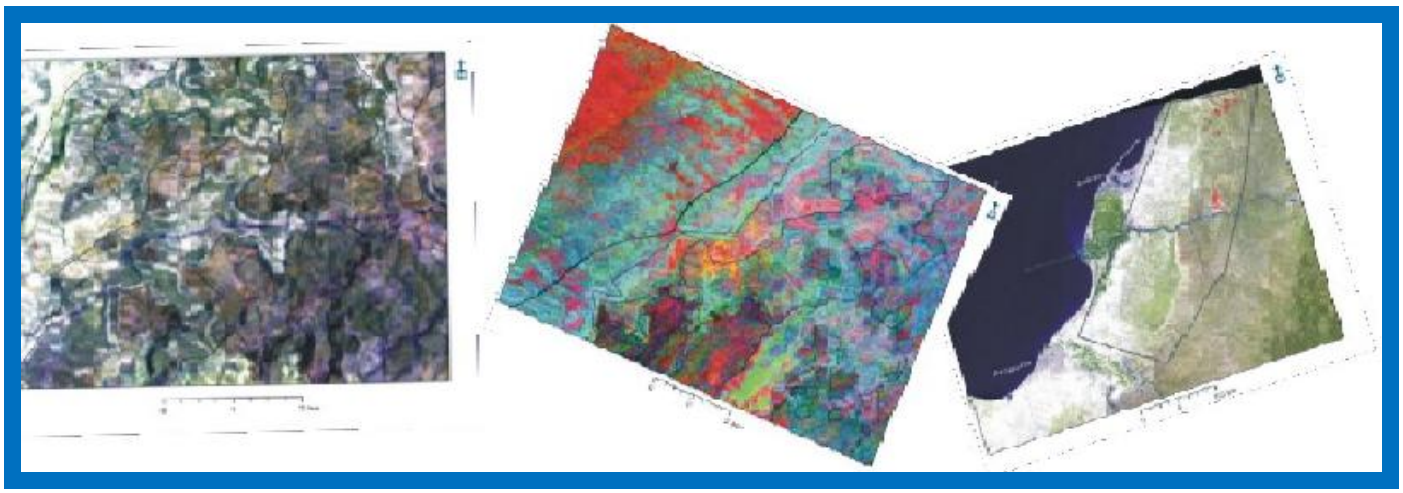
FCTUC DEPARTAMENTO DE CIÊNCIAS DA TERRA
FACULDADE DE CIÊNCIAS E TECNOLOGIA
UNIVERSIDADE DE COIMBRA

APLICAÇÃO DA DETEÇÃO REMOTA À CARTOGRAFIA GEOLÓGICA: O CASO DA REGIÃO DE LOBITO-BENGUELA (ANGOLA)

Elizabeth Carla Constantino Luna de Carvalho

MESTRADO EM GEOCIÊNCIAS – ESPECIALIZAÇÃO EM AMBIENTE E ORDENAMENTO

Julho, 2013



FCTUC DEPARTAMENTO DE CIÊNCIAS DA TERRA
FACULDADE DE CIÊNCIAS E TECNOLOGIA
UNIVERSIDADE DE COIMBRA

APLICAÇÃO DA DETEÇÃO REMOTA À CARTOGRAFIA GEOLÓGICA: O CASO DA REGIÃO DE BENGUELA-LOBITO (ANGOLA)

Elizabeth Carla Constantino Luna de Carvalho

MESTRADO EM GEOCIÊNCIAS – ESPECIALIZAÇÃO EM AMBIENTE E ORDENAMENTO

Orientadores Científicos

Prof. Doutor Alcides José Sousa Castilho Pereira

Prof. Doutor Luís Vítor da Fonseca Pinto Duarte

Julho, 2013

AGRADECIMENTOS

Este trabalho, para além do meu esforço e dedicação, não seria possível sem apoio das pessoas mais amigas, umas delas distantes espacialmente, mas muito próximas em todos momentos, que me encorajaram para que fosse concluído com êxito. Para vocês, os meus agradecimentos.

A nível científico, agradeço aos núcleos do ISP Tundavala em Angola e da Universidade de Coimbra - Departamento das Ciências da Terra que sempre proporcionaram o bem-estar dos mestrandos; aos professores que souberam transmitir os seus conhecimentos e se dispuseram apoia-los sempre que necessário. Em especial, os meus agradecimentos vão para os meus tutores:

- Professor Doutor Alcides Pereira

- Professor Doutor Luís Vítor Duarte

Que me orientaram na elaboração desta tese, mostrando os métodos e ferramentas para que de uma forma autónoma e cientifica poder usar esta informação e dar continuidade a este projeto de cartografia geológica em Angola com base em técnicas de deteção remota.

Também ao Dr. Vasco Mantas, que criou a plataforma de conexão de dados geológicos-informáticos e que sempre respondeu â toda minha solicitação de uma forma clara.

A todos…

BEM HAJAM

DEDICATÓRIA

Dedico este trabalho aos meus pais, pelo que sou como ser social e pela determinação que sempre tiveram no rumo de seus filhos, para que eles alcançassem um grau elevado de conhecimento, superando e ultrapassando muitas barreiras.

E também aos meus filhos, a quem tanto amo, para que me tenham como exemplo, sempre, em suas vidas, lembrando que “a idade não é uma barreira” e que “querer é poder”!

RESUMO

É reconhecida a falta de informação de base geológica no território angolano, em particular no que respeita à cartografia geológica em escala adequada. Estes levantamentos efetuados através dos meios tradicionais os custos financeiros envolvidos impedem que a cartografia do território angolano possa avançar com a rapidez desejável.

As técnicas de Deteção Remota podem constituir-se com uma alternativa às técnicas de levantamento geológico mas para que isso seja feito com um grau de confiança aceitável é necessário conseguir calibrar os sensores radiométricos instalados em diversas plataformas espaciais. Esta calibração deve ser realizada em áreas onde exista já informação geológica de detalhe.

No presente trabalho aplicou-se esta metodologia a partir de imagens Landsat, das áreas de Lobito e Benguela, onde ocorrem unidades geológicas compostas por rochas metamórficas e sedimentares de idade pré-câmbrica ao Cenozóico. Os dados de observação usados para calibração dos dados radiométricos foram adquiridos num sector particular da carta geológica onde ocorrem rochas do Complexo Metamórfico, Precâmbrico (A1), formação Sal Massivo (Apc1), formação Binga (Apc2), formação Tuenza (Alb1), formação Catumbela (Alb2) e formação Quissonde (Alb3), todas de idade cretácica.

Os resultados da aplicação de técnicas de classificação automática, na base de utilização de árvores de regressão, seguida da respetiva validação com suporte em matrizes de confusão, permitiu concluir da elevada eficiência do uso dos sensores radiométricos na identificação e delimitação espacial dos contactos entre as várias unidades. Foi, assim, possível cartografar por meios puramente digitais os afloramentos de algumas das unidades geológicas para áreas onde não existe disponível cartografia geológica de detalhe.

Palavras-chave: Deteção Remota, Cartografia Geológica, Imagens Landsat 7 ETM+, Benguela, Angola.

ABSTRACT

Basic information on the geological Angola lacks and is recognized particularly in geological mapping in appropriate scale. These withdrawals within traditional financial costs limited the cartography of Angola to an average speed.

Remote sensing techniques can be incorporated as an alternative to the geological survey techniques but for this to be done with an acceptable degree of confidence is needed to radiometric calibrate the sensors installed in various space platforms. This calibration should be performed in areas where there is already available geological detail.

In this work we applied this methodology to Landsat images, in the Lobito and Benguela region, with its geological units composed of metamorphic and sedimentary rocks of Pre-Cambrian to Cenozoic. The observation data used for calibration of the radiometric data were acquired in a particular sector of the geological map where there are rocks of Metamorphic Complex, Pre-Cambrian (A1), Massive Salt formation (Apc1), Binga formation (Apc2), Tuenza formation (Alb1), Catumbela formation (Alb2) and Quissonde formation (Alb3), all of Cretaceous age.

The results of applying the techniques of automatic classification, based on the use of regression trees, then the respective validation supported in confusion matrices, has shown the high efficiency of the use of radiometric sensors in the identification and delineation of spatial contacts between the various units. It was thus possible by means purely digital mapping the outcrops of some of the geological units to areas where there is no available geological mapping detail.

Keywords: Remote Sensing, Geological Mapping, Landsat 7 ETM +, Benguela, Angola.

ÍNDICE GERAL

AGRADECIMENTOS i
DEDICATÓRIA ii
RESUMO iii
ÍNDICE GERAL v
ÍNDICE DE FIGURAS vii
ÍNDICE DE TABELAS ix
I. INTRODUÇÃO GERAL 1
1. Objetivos 2
2. Área de Estudo 3
4. Organização da tese 5
II. DETEÇÃO REMOTA 6
1. Princípios físicos da Deteção Remota 6
2. Interação da REM com a matéria 9
2.1. Interação da REM com a atmosfera e o efeito atmosférico 10
2.2. Interação da REM com a superfície terrestre 11
3. Resolução dos sensores dos satélites 13
3.1. Resolução espacial 13
3.2. Resolução espetral 14
3.3. Resolução radiométrica 15
3.4. Resolução temporal 15
4. Cartografia da superfície terrestre 16
4.1. Caraterísticas litológicas 16
4.1.1. Minerais 17
4.2. Fatores estruturais 20
III. ANÁLISE LITOSTRATIGRÁFICA DA BACIA DE BENGUELA 22
1. Enquadramento da Bacia de Benguela 22
2. Caraterização geológica da região Benguela 24

3. As unidades litostratigráficas do Mesozoico e Cenozoico da Bacia 26
3. 1. Descrição das unidades litostratigráficas e o seu aspeto superficial 29
3.1.1. Formação Cuvo 29
3.1.2. Formação Sal Massivo 30
3.1.3. Formação Binga 32
3.1.4. Formação Tuenza 34
3.1.5. Formação Catumbela 36
3.1.6. Formação Quissonde 38
IV. APLICAÇÃO DA DETEÇÃO REMOTA À CARTOGRAFIA GEOLÓGICA DA REGIÃO DE BENGUELA 40
1. Métodos e técnicas 40
2. Resultados obtidos e discussão 42
2.1. Análise estatística dos dados radiométricas nas diferentes bandas 44
2.1.1. Média 45
2.1.2. Desvio padrão 46
2.2. Composições coloridas 47
2.3. NDVI - Índice de vegetação 48
2.4. Índice de Abrams 49
3. Classificação 50
V. CONCLUSÕES 54
VI. REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS 55

ÍNDICE DE FIGURAS

Figura I. 1 - Localização da província de Benguela 3

Figura II. 1- Sistemas envolvidos na DR 7

Figura II. 2 - Espetro eletromagnético retirado em http://www.explicatorium.com 9

Figura II. 3 - Transmitância da REM na atmosfera……...11

Figura II. 4 - Curvas de Refletância Espectral das principais coberturas da superfície terrestre 12

Figura II. 5 - Fatores intervenientes no comportamento espectral do substrato rochoso..16

Figura II. 6 - Alteração do albedo dos minerais com a variação da sua granulometria.....17

Figura II. 7 - Curvas espetrais de algumas rochas sedimentares no domínio do visível e infravermelho próximo 18

Figura II. 8 - Curvas espectrais de algumas rochas metamórficas no domínio do visível e infravermelho próximo 19

Figura II. 9 - Assinaturas espectrais de distintos minerais constituintes do solo 20

Figura II. 10 - Os principais padrões de drenagem..... 21

Figura II. 11 - O significado das formas de drenagem mais comuns 21

Figura III. 1 - Localização das várias bacias da costa ocidental de África onde se insere a Bacia de Benguela (retirada de Brownfield & Charpentier, 2006)……...22

Figura III. 2 - Mapa das estruturas mais importantes do Atlântico Sul (retirado de Torsvik *et al*., 2009). Nele se pode observar as margens conjugadas Atlânticas Sul-americana e Oeste-africana, os limites entre os quatro segmentos (Equatorial, Central, Sul e Malvinas (Falkland) representados pelas linhas a tracejado (RFZ, Zona de Fratura Romanche, FFZ, Zona de Fratura Florianópolis, AFFZ, Zona de Fratura Agulhas-Malvinas); Bacias de sal apcianas a laranja; LIPs (Grandes Províncias Ígneas) - P, Paraná; E, Etendeka, Karroo, erra Leoa e agulhas; SDRs - Refletores Mergulhantes para o Mar e *pontos quentes* ativos (F- Fernando de Noronha, C- Camarões, Tr- Trinidade, Sh- Stª Helena, T- Tristão da Cunha, V- Vema, B- Bouvet). 23

Figura III. 3- Folhas 227 e 228 - Lobito da Carta Geológica de Angola à escala 1/100 000 (Galvão & Portugal, 1971). Evidenciam-se nesta carta três faixas litológicas bem distintas, de Oeste para Este: sedimentar (preenchimento Meso e Cenozóico da Bacia de Benguela), metamórfica (Complexo Metamórfico) e granítica. 24

Figura III. 4 - Esboço geológico do *onshore* de Benguela (adaptado de vários autores, *in* Guiraud *et al*, 2010). 25

Figura III. 5 - Esboço geológico das unidades sedimentares da região de Benguela (porção *onshore* da Bacia de Benguela) e do bordo ocidental metamórfico e ígneo ante-Mesozoico (Tavares *et al*. 2007). 26

Figura III. 6 - Aspetos litológicos e cor predominante das unidades meso-cenozóicas aflorantes na área de estudo (nomenclaturas litostratigráficas baseadas em Galvão & Silva, 1972; Guiraud *et al*., 2010; cronostratigrafia baseada na Carta cronostratigráfica Internacional, 2012). 27

Figura III. 7 - Diferentes denominações das unidades cretácicas para as bacias do Kwanza e Benguela. 28

Figura III. 8 – Unidade greso-conglomerática da formação Cuvo ao Sul do Dombe Grande. 30

Figura III. 9 – Formação Sal Massivo - A: Dombe grande onde foram observados vestígios de gesso fibroso nas proximidades do local da imagem; B: Corte na Pedreira Querecila onde são visíveis veios de gesso fibroso com 10cm de espessura entre argilitos compactos, dispostos em estratos inclinados bem definidos(realçados com a cor verde). 32

Figura III. 10 - Aspeto da formação Binga evidenciando calcários de grão fino em camadas delgadas (Descida do Comengo, EN100). 33

Figura III. 11 – Formação Tuenza - A: contactando com a formação Binga (?) no Dombe Grande; B: em camadas de cor vermelha e esbranquiçadas - Comengo; C: contactando com a formação Catumbela e depósito quaternário - fazenda Hanha-; 35

Figura III. 12 - Formação Catumbela: A – aspeto geral; sua litofácies; B - calcários compactos e C – calcários pisolíticos na margem direita do rio Catumbela. 37

Figura III. 13 – Formação Catumbela representada por duas da sua fácies: (1a) – calcários compactos e (1b) - calcários dolomíticos contactando com o Complexo Metamórfico (2). 37

Figura III. 15.- Afloramento da formação Quissonde: (A) - baía de Cuio; (B) - aspeto superficial_EN100. 39

Figura IV. 1 – Amostras de treino, referentes aos pontos de amostragem, na área selecionada, num troço da EN 100, denominada Comengo (mapa geológico retirado de Galvão & Portugal, 1971)……..42

Figura IV. 2 – Árvore de regressão. 43

Figura IV. 3 - Classes de treino, correspondentes as diferentes unidades litostratigráficas mesozoicas e o Complexo Metamórfico gnaíssico. 43

Figura IV. 4- Valores da média de refletância das várias unidades litostratigráficas.....45

Figura IV. 5 - Valores do desvio padrão da refletância das várias unidades líticas.....46

Figura IV. 6 – Composição colorida RGB_753, evidenciando o contraste de cores entre o Complexo Metamórfico (A1) e as rochas sedimentares mesozóicas da Bacia de Benguela. Também podemos ver alguns limites imprecisos traçados (cor preta) e precisos (cor amarela) na carta geológica de Angola – folhas 227 e 228. 48

Figura IV. 7 - NDVI - Índice de Vegetação da Diferença Normalizada: Os tons mais claros correspondente a vegetação mais densa e eventualmente de características mais refletoras. 49

Figura IV. 8 - Imagem obtida pela aplicação do algoritmo Abrams Ratio. 50

Figura IV. 9 - Distribuição dos níveis estratigráficos compostos por sal (a vermelho) na região entre o norte do Lobito e o Rio Catumbela (Benguela). Em baixo apresenta-se um pormenor de uma dessas ocorrências. 53

ÍNDICE DE TABELAS

Tabela IV. 1 - Valores da média da refletância das várias unidades líticas (* - comprimento de onda, ponto central) 44

Tabela IV. 2 - Valores do desvio padrão da refletância das várias unidades líticas(* - comprimento de onda, ponto central) 44

Tabela IV. 3 - Dados resultantes da validação da área em estudo por aplicação da matriz de confusão 51

I. INTRODUÇÃO GERAL

Sendo o Ambiente e o Ordenamento do Território as vertentes do mesmo ramo deste mestrado em Geociências, houve a necessidade de encontrar um projeto de dissertação que tentasse compatibilizar, de alguma forma, essas duas áreas, pelo que se optou pela cartografia geológica. O mapa geológico é o grande suporte de qualquer projeto de ordenamento, nomeadamente na seleção do uso dos solos - urbanos e rurais - para qualquer país.

Angola carece de cartografia geológica detalhada de, ainda, uma vasta região. Desde 1974 que não são editadas cartas geológicas e com a agravante de as cidades estarem com um crescimento explosivo e desordenado devido ao intenso êxodo rural. É imperioso intensificar o planeamento e o ordenamento territorial para assentamento das populações de uma forma, mais ou menos, definitiva e isenta de riscos.

No domínio do planeamento e ordenamento do território é necessário conhecer os locais onde há matérias-primas para construção e/ou indústria; água para consumo doméstico, industrial e agrícola para futuros pólos de desenvolvimento regional sustentáveis. A localização precisa desses recursos consta na carta geológica detalhada. Consoante a especificidade, podemos a partir destas elaborar cartas temáticas, como: Cartas Geotécnicas, Cartas Mineiras. Cartas Pedológicas, Cartas Hidrogeológicas, Cartas Tectónicas, Cartas de Riscos Vulcânicos / Sísmicos, Cartas Geoquímicas, etc.

A deteção remota, por ser muito expedita e pouco onerosa e, ter a vantagem de não haver necessidade de um levantamento de campo intensivo e transpor áreas inacessíveis, é hoje uma técnica muito aplicada em todas as áreas do saber onde é necessário mapear determinada região, pois que já é conhecido o comportamento espectral de grande parte dos materiais expostos na superfície terrestre. Ela permite obter dados atualizados e detalhados da superfície da Terra a partir de imagens captadas por satélites cujos sensores têm uma resolução espacial e temporal considerável.

O O tempo de dissertação e recolha de dados foi muito ínfimo para o domínio desta técnica e poder aplicá-la à área proposta, pelo que se considera um

começo que deverá ser implementado no futuro… No entanto foi valiosa a aprendizagem porque da conjugação de trabalho de campo com a técnica de deteção remota obtiveram-se resultados satisfatórios e céleres.

1. Objetivos

O objetivo principal deste trabalho foi o de avaliar a aplicação de técnicas de deteção remota no apoio à cartografia geológica numa região do centro-litoral de Angola (Benguela-Lobito).

A motivação reside no facto da região sul da área em estudo não ter ainda hoje a carta geológica editada apesar de ter todas as condições para ser um grande pólo comercial, industrial e turístico, dada a sua localização geográfica, vias de comunicação, infraestruturas, e paisagens naturais existentes

Com base no objetivo principal deste trabalho, definem-se os seguintes objetivos específicos:

Compreender a variabilidade litológica e a evolução do conhecimento geológico na região em estudo;

Obter informação detalhada sobre a variabilidade litológica bem como o do modo de ocorrência das unidades geológicas aflorantes em sectores considerados como representativos;

Identificar para cada unidade os critérios que permitem o seu reconhecimento em imagens espaciais;

Ganhar competências no uso de técnicas de Deteção Remota, em particular em dados digitais no domínio do espectro ótico;

Fazer cartografia geológica automática a partir da aplicação de técnicas de classificação e validação digital;

2. Área de Estudo

A área de estudo compreende a parte litoral da província de Benguela, localizada na chamada Bacia de Benguela. Inicialmente entre os paralelos 12º e 12º 30´ (folhas 227 e 228) para validação de dados geológicos da Carta Geológica do Lobito, e posteriormente entre os paralelos 12º 30' e 13º (folhas 250 e 251), na Carta Geológica detalhada da região de Benguela à escala 1:100 000 (figuras I.A e I.B) para reconhecimento geológico da região de Benguela.

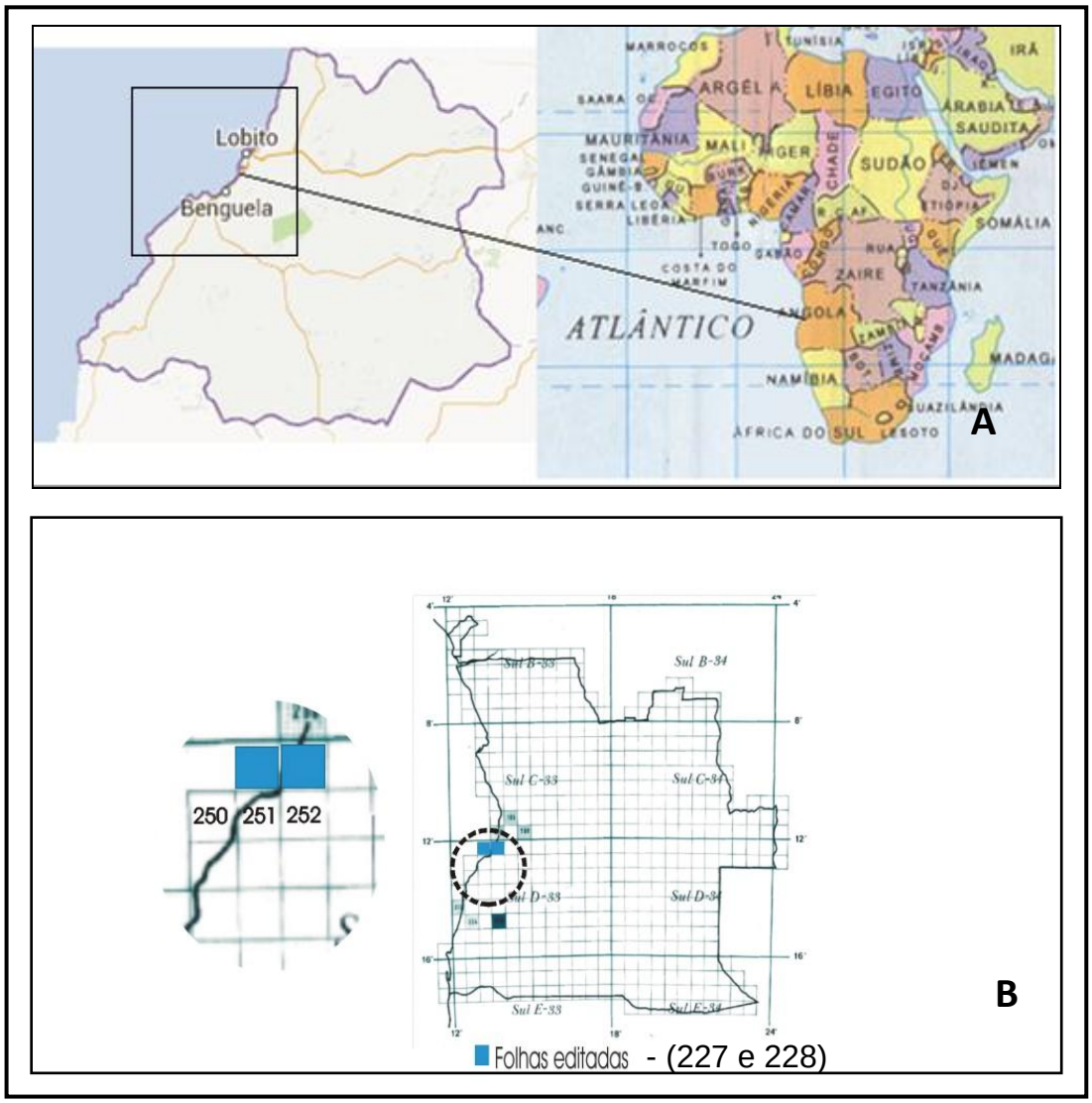


Figura I. 1 - Localização da província de Benguela: (A) contexto do continente africano, (B) em termos das diversas folhas da Carta Geológica de Angola à escala 1/100000.

3. Metodologias

O presente trabalho seguiu um conjunto de etapas e de metodologias a seguir descritas:

(1) Consulta bibliográfica;

(2) Montagem do projeto em ArcGis (ferramenta indispensável para aplicação da das técnicas de DR) e vetorização da imagem de uma área inserida na carta geológica do Lobito, sendo primordial os limites das diferentes formações geológicas e os alinhamentos estruturais, e atualização da legenda com a adição da nova nomenclatura, adotada de Guiraud *et al*. (2010). Os materiais utilizados foram: Carta geológica do Lobito a escala 1:100000; Imagem do satélite Landsat 7 sensor ETM+, de 5 de Novembro de 2000 (8 bandas);

(3) Foi efetuado trabalho de campo para reconhecimento geológico genérico entre o Cuio e a Hanha (Sul de Benguela – Norte do Lobito). A partir deste reconhecimento foi selecionado um sector para trabalho de detalhe situado em redor do troço da EN100, numa área designada localmente por Comengo tendo sido obtido dados sobre: composição litológica e grau de alteração das rochas, estruturas geológicas e cobertura (vegetal e humana) de unidades mesozóicas. Através dos perfis verticais foi possível verificar a sequência litológica das formações para real perceção da sua constituição faciológica e relacioná-las com aspetos da superfície. Como complemento importante foram constituídos dois ficheiros fotográficos, um com os detalhes de cada ponto de observação e outro com os detalhes específicos de cada unidade litológica cretácica;

(4) Aplicação de técnicas de Deteção Remota com suporte no programa informático ArcGis com o propósito de classificar e cartografar as unidades geológicas de forma automática.

4. Organização da tese

Para além do capítulo introdutório, a tese está organizada em mais quatro capítulos adicionais, considerações finais e referências bibliográficas.

O Segundo Capítulo (II), "DETEÇÃO REMOTA" aborda os princípios físicos desta técnica, Interação da REM com a matéria e atmosfera e as diferentes resoluções dos sensores dos satélites (espacial, espetral, radiométrica e temporal).

O Terceiro Capítulo (III), intitula-se "ANÁLISE LITOSTRATIGRÁFICA DA BACIA DE BENGUELA" e é uma síntese resultante do levantamento de campo, sendo produto final a descrição e aspeto superficial de cada unidade litostratigráfica com base nos dados existentes e nas observações feitas pelo autor.

O Quarto Capítulo (IV), "APLICAÇÃO DA DETEÇÃO REMOTA Á CARTOGRAFIA GEOLÓGICA DA BACIA DE BENGUELA", baseou-se na descrição das técnicas aplicadas para processamento da imagem satélite e análise do resultado final

Finalmente, o Capítulo (V) "CONCLUSÕES", onde se fazem considerações e propostas relativas ao trabalho elaborado.

II. DETEÇÃO REMOTA

A Deteção Remota ou teledeteção define-se como a técnica que permite observar objetos e fenómenos sem que se estejam em contacto direto com os mesmos, permitindo colher dados pormenorizados sobre regiões inacessíveis, ou distantes. Ela nasceu do desejo de se ter uma visão mais abrangente da superfície terrestre, só possível com meios aéreos, como o avião e o satélite. Para além da elaboração de cartografia temática (cartas geológicas, meteorológicas, sismológicas, etc.) e sua atualização, as imagens obtidas por DR aplicam-se em estudos de variadíssimos ramos, como agricultura (monitorização de culturas, estimativas de produção); controlo de tráfego e poluição marítima (derrames de petróleo); aplicações militares; cartografia de zonas húmidas, de riscos e sismológica; monitorização de calotes polares e icebergs; etc.

1. Princípios físicos da Deteção Remota

A base da Deteção Remota é a radiação eletromagnética (REM), produto resultante da energia refletida pelos diferentes objetos da superfície terrestre (rochas, solos, água, vegetação, etc.) quando sujeitos a energia emitida pelo sol ou pelo próprio satélite.

No entanto a luz incidente, antes de interagir com eles sofrem o efeito da atmosfera pois que parte dos seus gases absorve certas radiações com determinados comprimentos de ondas. Além da radiação refletida, os objetos emitem radiação própria com intensidade e composição espetral em função da temperatura (Fonseca & Fernandes, 2004).

O sistema de DR envolve sete componentes (figura II. 1):

- A- Fonte de energia ou iluminação
- B – A radiação e a atmosfera
- C – Interação com o objeto
- D – Registo da energia pelo sensor
- E – Transmissão, receção e processamento
- F – Interpretação e análise
- G – Aplicação

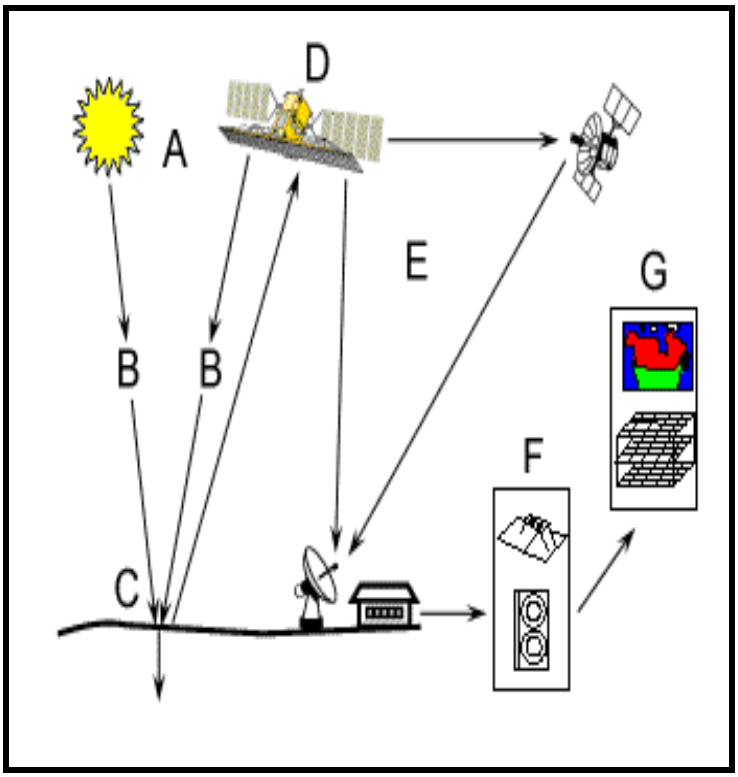


Figura II. 1 - Sistemas envolvidos na Deteção Remota.

A REM propaga-se sob a forma de ondas em dois campos vetoriais perpendiculares entre si - elétrico e magnético, que geram fotões que se deslocam no vácuo a uma velocidade de 3x10 (8) m/s, segundo a equação:

$$c = \lambda \nu$$

sendo: C - velocidade da luz (m/s), Λ - comprimento de onda (μm =10^{-6} m) e V - frequência (ciclos por segundo).

O conjunto de todas radiações eletromagnéticas com diferentes comprimentos de ondas denomina-se espetro eletromagnético (figura II. 2) e é constituído por: raios gama, raios X, radiação ultravioleta (UV), espectro visível, radiação infravermelha (IV), micro-ondas e ondas de rádio.

Raios X - surgem do interior da eletrosfera do átomo, por rearranjos eletrónicos. São muito usados em radiografias e em estudos de estruturas cristalinas de sólidos. Os provenientes do Sol são absorvidos pelos gases na alta atmosfera;

Radiação ultravioleta (RUV) - é produzida durante as reações nucleares no Sol, mas ao atingir o topo da atmosfera terrestre é quase totalmente absorvida pelo gás ozono. É a causa primordial do cancro da pele embora seja uma fonte de vitamina D. No caso estudo das rochas é importante porque alguns minerais produzem fluorescência ou emitem luz visível quando sujeitos às RUV;

Espectro visível – é o intervalo do espectro (0,4 a 0,7 µm) que corresponde a radiação solar de maior intensidade, à qual os nossos olhos são sensiveis. Está dividido em três bandas, do azul, do verde e do vermelho (RGB), que constituem as cores primárias porque nenhuma delas resulta da mistura das outras duas. A combinação destas geram as outras cores e podem ser observadas quando a luz solar uniforme incide no prisma que a refrata de acordo com diferentes comprimentos de onda: Violeta: 0.4-0.446µm; Azul: 0.446-0.500µm; Verde: 0.500-0.578 µm; Amarelo: 0.578-0.592µm; Laranja: 0.592-0.620 µm; Vermelho: 0.620-0.7 µm;

Radiação infravermelha (IV) - é dividida em três faixas espectrais: IV próximo (0,7 a 1,1 µm), IV médio (1,1 a 3,0 µm) e IV distante ou térmica (3,0 a 1.000 µm). Não é sensível a nossa visão, sentimo-la sob a forma de calor. Tem especial Importância para estudo da cobertura vegetal;

Microondas – são radiações de elevado comprimento de onda superior ao do infravermelho térmico; não sofrem qualquer interferência da atmosfera pelo que se utiliza em sensores de rádio ativos com dispositivos de radar, cujas imagens têm uma boa resolução espacial e são obtidas sob quaisquer condições meteorológicas, a qualquer hora e independentemente das condições de iluminação. Estas características fazem com que as imagens de RADAR sejam de grande utilidade para a monitorização da superfície em áreas de grande nebulosidade.

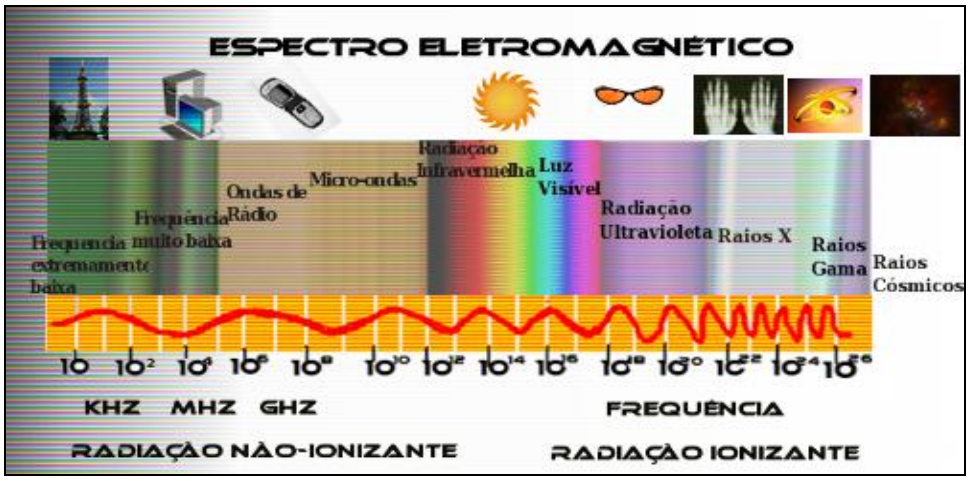


Figura II. 2 - Espetro eletromagnético retirado em http://www.explicatorium.com.

2. Interação da REM com a matéria

A REM que atinge os diferentes corpos da superfície da Terra interage com a sua matéria de três formas diferentes (Fonseca & Fernandes, 2004):

Por absorção, que se deve as trocas de energia entre os fotões e os átomos que constituem o corpo originando transformações físicas deste, como seja aumento de temperatura.

Por reflexão, pelo reenvio para o espaço de parte da radiação, sem alteração da frequência. As superfícies planas espelhadas que refletem REM com um ângulo de reflexão igual ao ângulo de incidência denominam-se refletores especulares enquanto as superfícies rugosas refletem REM em todas as direções designam-se refletores difusos. A maioria dos materiais terrestres tem um comportamento que se situa entre estas duas situações. Em relação aos comprimentos de onda, a reflecção difusa é mais seletiva pelo que só alguns comprimentos de onda são refletidos por dado objeto, pelo que permite fazer a sua identificação baseada nessa informação.

Por transmissão, em que toda energia incidente em determinada face de um corpo, atravessa-o sem interagir com as suas partículas constituintes e é recuperada na face oposta, tal que:

$$I = r + t + a$$

Sendo: I = radiação incidente; r = radiação refletida; t = radiação transmitida e a = radiação absorvida, as quais dependem do comprimento de onda e ângulo de incidência da REM, do tipo de matéria que constitui o corpo e das sua propriedades físicas.

Dessa equação definem-se os conceitos de absortância (Abs), refletância (Rf) e transmitância (Tr), tal que:

$$A_{bs}(\lambda) = \frac{ER_{abs}}{ER_{inc}} \quad , \quad R_f(\lambda) = \frac{ER_{refl}}{ER_{inc}} \quad , \quad T_r(\lambda) = \frac{ER_{trans}}{ER_{inc}}$$

em que:

$$1 = R_f + A_{bs} + T_r$$

Na maior parte dos casos, a REM refletida pela superfície terrestre é a que é registada pelos sistemas passivos de DR e portanto a refletância é o parâmetro principal na análise da interação REM / terreno.

2.1. Interação da REM com a atmosfera e o efeito atmosférico

A radiação solar que incide sobre os diferentes corpos da superfície terrestre sofre a interferência da atmosfera, ao atravessá-la devido ao efeito dos gases e tamanho das partículas que a constituem, influenciando o percurso, a qualidade e a quantidade de REM, sob três formas: dispersão, absorção e emissão (Fonseca & Fernandes, 2004).

A absorção é seletiva porque ocorre em bandas características, absorvendo REM em regiões específicas do espectro. As regiões do espectro que não são muito influenciadas pela absorção atmosférica denominam-se janelas atmosféricas e são de grande utilidade para os sensores remotos (figura II. 3).

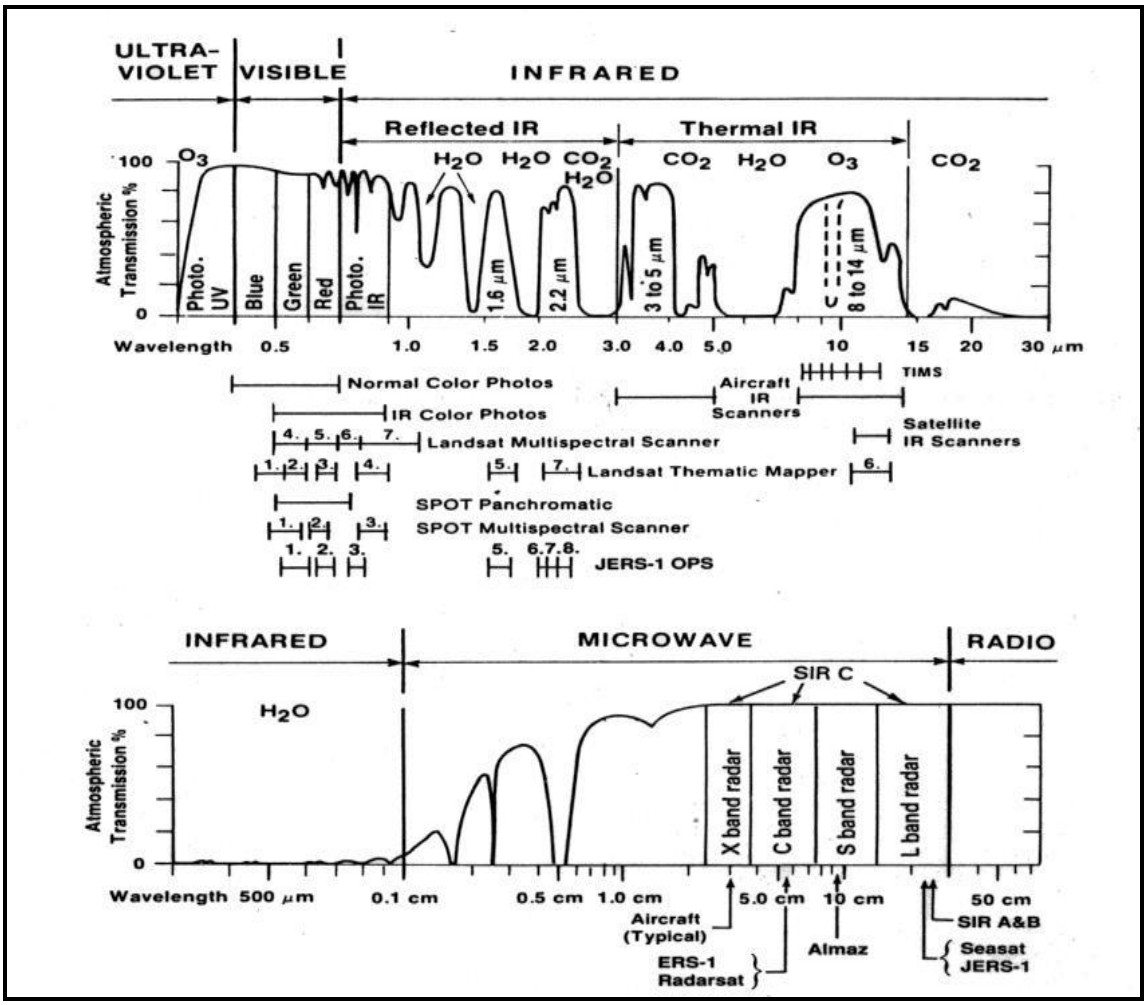


Figura II. 3 - Transmitância da REM na atmosfera, com indicação dos gases responsáveis pela absorção e, ainda, as diferentes bandas espetrais de sensores dos diversos satélites (adaptado de Sabins, 1997 *in* Venâncio, 2007).

2.2. Interação da REM com a superfície terrestre

Curvas de refletância espectral, estabelecidas a partir de dados laboratoriais, descrevem a variação da refletância com o comprimento de onda para diferentes tipos de materiais da superfície terrestre (vegetação, solos, rochas e água), conforme gráfico da figura II. 4.

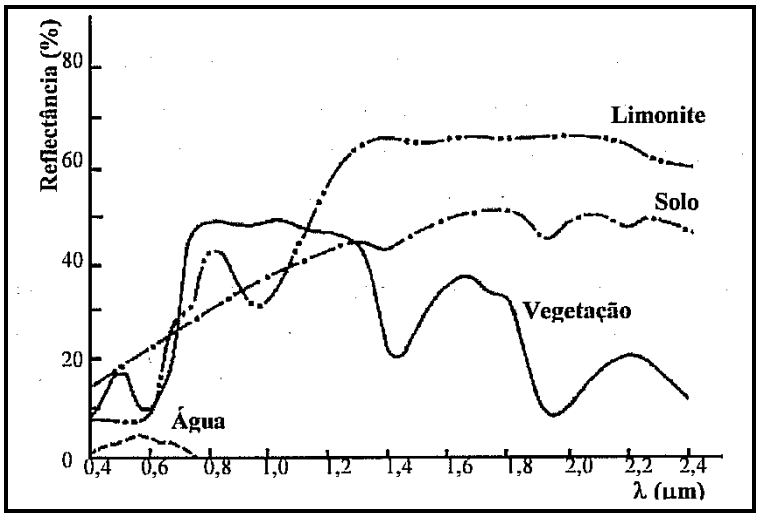


Figura II. 4 - Curvas de Refletância Espectral das principais coberturas da superfície terrestre (adaptado de Gupta, 1991, *in* Rabaça, 2001).

Água - A água tem uma curva de refletância muito característica, mais elevada na banda do visível e do infravermelho próximo, desaparecendo nos comprimentos de onda maiores onde absorve toda a REM. Daí apresentar-se, respetivamente nesses comprimentos de onda, azul ou azul esverdeada, e negra. A sua refletância aumenta com a presença de sedimentos em suspensão e de algas e, com o aumento da temperatura nas camadas superiores da água pois que estes elevam a transmissão, promovendo uma aparência mais luminosa. A clorofila das algas absorve mais azul e reflete o verde, fazendo com que a aparência da água seja neste caso mais verde.

Solo - Ao contrário da água, a curva espectral dos solos aumenta gradualmente com o comprimento de onda das radiações, devido a fatores determinantes como a composição química e mineralógica do solo, textura e o teor de humidade e de matéria orgânica.

Rochas - O comportamento espectral das rochas está diretamente relacionado com os minerais que as constituem. Em regiões áridas ou semiáridas, em que a vegetação é escassa ou praticamente inexistente, os comportamentos espectrais dos minerais são muitas vezes utilizados para inferir a litologia da região em estudo, ao contrário do que sucede em regiões de vegetação abundante. Um especto importante, que dificulta a discriminação de rochas e de minerais, é o

estado de alteração das rochas, uma vez que a meteorização química altera composição da parte superficial.

Vegetação - O comportamento espectral da vegetação é completamente distinto da dos outros elementos, devido, principalmente, á sua estrutura celular. Tem o seu pico no infravermelho próximo correspondente a banda 4 do satélite LANDSAT 7; no domínio do visível a clorofila absorve a radiação nas regiões do azul e vermelho, refletindo a cor verde; no domínio do infravermelho médio a água das folhas é o grande responsável pelo decréscimo de refletividade da vegetação, pelo que esta região do espectro permite avaliar o desenvolvimento e discriminação de diferentes tipos de vegetação em qualquer ecossistema onde é frequente a coexistência de várias espécies.

3. Resolução dos sensores dos satélites

Define-se resolução como a medida da capacidade que o detetor/sensor tem de distinguir entre sinais próximos do ponto de vista espacial, ou similares, do ponto de vista espectral (Fonseca & Fernandes, 2004). Para além destas duas, devemos considerar ainda as resoluções radiométrica e temporal pois em conjunto vão determinar as características das imagens captadas.

3.1. Resolução espacial

As imagens de DR constituídas por uma matriz de pixéis, sendo elas mais nítidas quanto menor for a dimensão dos pixéis utilizados. O píxel tem geralmente uma forma quadrada e o comprimento no terreno equivalente a um lado do *píxel* define a resolução espacial do sensor, Quanto maior é a resolução espacial, ou seja, menor a superfície representada por um único píxel, mais pequenos são os objetos que se podem distinguir na área de estudo. Para que um objeto homogéneo possa ser detetado o seu tamanho tem de ser, geralmente, igual ou maior que a superfície de terreno que representa um píxel. A resolução espacial dos sensores passivos depende de vários fatores (distância sensor-superfície terrestre, ângulo de visão e campo de visão instantâneo - IFOV). O IFOV é o cone angular de visibilidade de um sensor, a partir do qual se determina a área de

superfície terrestre, que é “vista” de uma determinada altitude num dado momento do tempo. Essa área é denominada célula de resolução e determina a resolução espacial máxima de um sensor.

3.2. Resolução espetral

A resolução espectral caracteriza a capacidade do sensor em operar em várias e estreitas bandas espectrais que correspondem aos intervalos de comprimento de ondas que podem ser avaliados, porque nem todos são visíveis por serem absorvidos pela atmosfera devido a presença de vapor de água, ozono e dióxido de carbono Assim, diferentes classes de objetos ou segmentos de uma imagem podem muitas vezes ser distinguidos pela comparação das respostas espectrais em diferentes comprimentos de onda, por exemplo a água e vegetação podem ser separadas usando grandes amplitudes de comprimentos de onda, visível e infravermelho próximo. Classes mais específicas, como os diferentes tipos de rocha, não são tão facilmente distinguíveis nestes comprimentos de onda, exigindo a comparação de comprimentos de onda mais próximos que só é possível com sensores de elevada resolução espectral, ou seja sensores multiespectrais. Os sensores que operam em centenas de bandas são conhecidos como hiperespectrais.

Quanto maior a resolução, mais apertado é o intervalo de comprimento de onda de uma determinada banda ou canal. Um incremento da resolução espectral resulta num maior número de canais ou bandas espectrais. No entanto, esta resolução adicional também supõe um custo acrescido em termos de volume de dados e processamento.

A imagem pancromática (PAN) dispõe de uma única banda espectral que abrange grande parte do visível e início do infravermelho, sendo sua principal vantagem uma maior resolução espacial relativamente as imagens multiespectrais do mesmo satélite, detetando pequenos elementos da superfície terrestre que não são distinguíveis numa imagem multiespectral.

3.3. Resolução radiométrica

A resolução radiométrica é dada pelo número de valores - digitais (ND) relativo aos níveis de cinzento de uma imagem. O ND é expresso em função do número de dígitos binários (bits) que é sempre uma potência de 2., por exemplo 5 bits significam 25 = 32 níveis de cinza. Para satélites com resolução radiométrica de 8 bits, significa terem 256 níveis de cinza, em que zero (0) correspondem ao branco e 255 ao preto. Quanto maior o número de valores, maior é a resolução radiométrica.

A dispersão e absorção da radiação captada pelo sensor provocadas pela atmosfera reduzem o número de ND nas imagens, especialmente nos comprimentos de onda mais curtos. Em termos visuais isto traduzir-se-ia numa perda de contraste. Existem procedimentos que permitem obter medições de refletâncias relativas aos objetos da superfície, eliminando ou reduzindo o efeito da atmosfera.

3.4. Resolução temporal

A resolução temporal define-se como o tempo de revisita do sensor a um mesmo ponto da superfície terrestre e correspondente a um ciclo orbital completo que é normalmente de vários dias. Contudo, devido a alguns graus de sobreposição nas *swaths* ou banda de rastreamento de órbitas adjacentes para a maioria dos satélites, e o aumento desta sobreposição com o aumento de latitude, algumas áreas da Terra tendem a ser mais frequentemente visualizadas.

A resolução temporal de um sensor depende de uma série de fatores, tais como: capacidade de reorientação do sensor para ambos os lados da linha de passagem do satélite; banda de rastreamento; latitude. A possibilidade de captar imagens de uma determinada zona da superfície terrestre em diferentes períodos de tempo ou épocas do ano é uma das definições mais importantes dos satélites para DR pois que as características espectrais de uma superfície terrestre podem mudar ao longo do tempo. Estas alterações podem ser detetadas com a aquisição e comparação de imagens multitemporais, sendo possível monitorizar alterações na superfície terrestre, quer sejam naturais (como alterações no coberto vegetal

ou enchentes) ou induzidas pelo homem (como o desenvolvimento urbano ou a desflorestação).

4. Cartografia da superfície terrestre

Para cartografia do substrato rochoso com a técnica de DR é fundamental saber interpretar e associar os dados obtidos da fotografia (tonalidade, textura, sombra, forma e tamanho) com os fatores primários: caraterísticas litológicas e estruturais e os processos da geodinâmica externa que alteram a superfície terrestre ao longo do tempo (figura II.5).

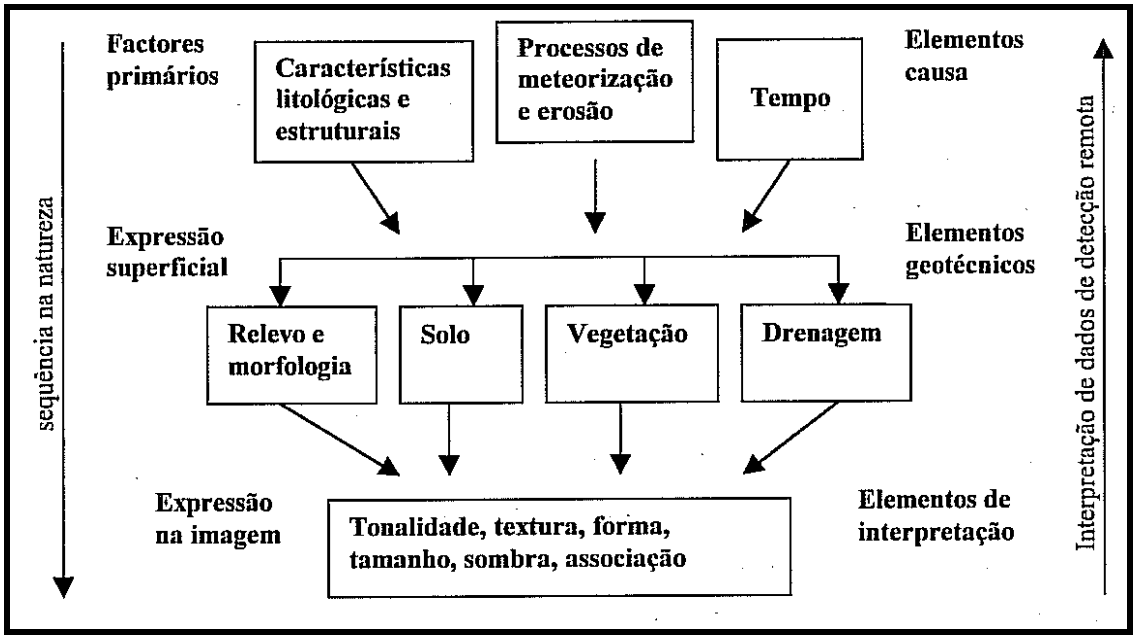


Figura II. 5 - Fatores intervenientes no comportamento espectral do substrato rochoso (adaptado de Gupta, 1991 in Rabaça, 2001).

4.1. Caraterísticas litológicas

As características litológicas referem-se a texturas e estrutura das rochas e sendo estas constituídas por minerais, fez-se um resumo sobre o comportamento de cada um, nos campos do visível e infravermelho próximo que a seguir se apresenta:

4.1.1. Minerais - Nos campos do visível e infravermelho próximo, de acordo com a reação espetral, os minerais classificam-se em transparentes, opacos e transopacos e têm um comportamento característico em função da sua granulometria (figura II.6). Os minerais transparentes, ao contrário dos opacos aumentam o seu albedo (razão entre a energia refletida difusamente e a energia incidente) à medida que o tamanho do grão diminui no domínio do visível. Os transopacos têm um comportamento semelhante aos transparentes no domínio do visível (aumento do albedo com diminuição da granulometria), e o oposto no infravermelho próximo.

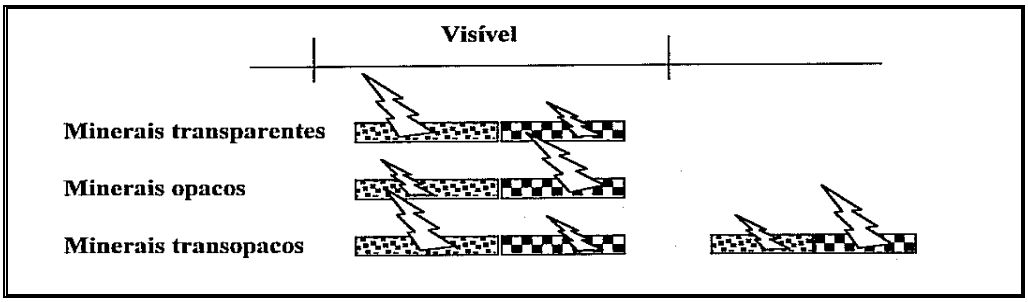


Figura II. 6 - Alteração do albedo dos minerais com a variação da sua granulometria (*in* Rabaça 2001).

4.1.2. Rochas

Nos campos do visível e infravermelho próximo, os três tipos genéticos de rochas (sedimentares, metamórficas e ígneas), diferenciam-se pelas suas caraterísticas intrínsecas.

Rochas ígneas - Tendo em conta a classificação das rochas ígneas em ácidas, básicas e ultrabásicas, baseada na percentagem de sílica antevê-se de imediato que as primeiras são félsicas e logo têm maior refletância que as restantes. No entanto quando o tamanho e opacidade do grão aumentam diminuem a refletância global.

Rochas sedimentares - A estratificação é a principal característica das rochas sedimentares e assume um comportamento espectral relevante, uma vez que as diferentes camadas distribuem-se de forma regular no terreno. A sua composição mineralógica, grau de alteração e o teor de humidade é que irão proporcionar a

densidade de vegetação que, quando muita densa vai mascarar os dados do solo/rocha mas que, também, pela sua espécie poderá ser o índice de identificação do terreno. As mais representativas são as detríticas (arenitos e argilitos), e ainda as carbonatadas cujo comportamento da refletância se pode ver na figura II. 7.

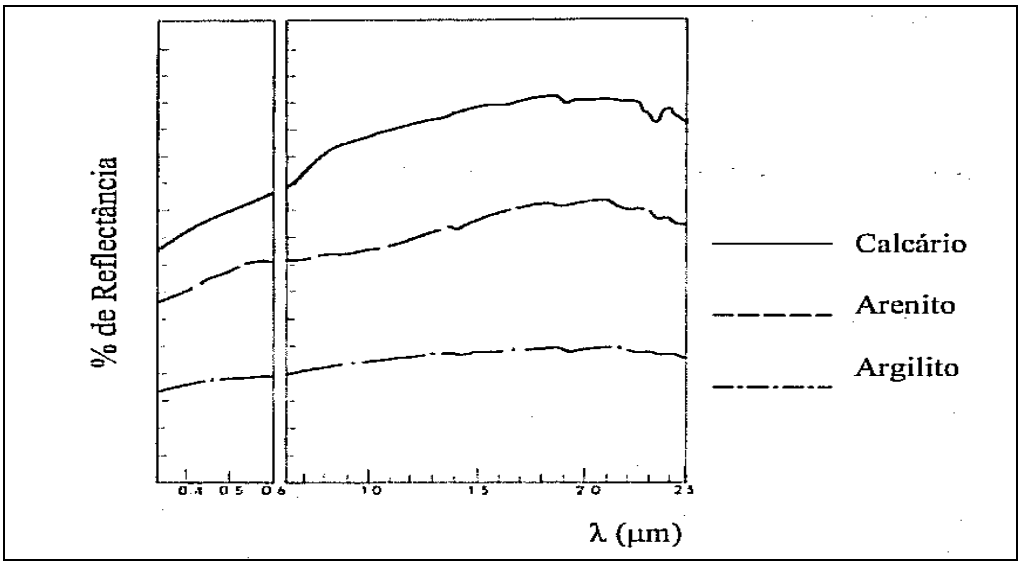


Figura II. 7 - Curvas espetrais de algumas rochas sedimentares no domínio do visível e infravermelho próximo (adaptado de Garcia, 1994, in Rabaça, 2001).

Rochas metamórficas - Nas rochas metamórficas a foliação e xistosidade são as características principais e que por vezes, são observáveis em fotografias satélites influenciado o seu comportamento espectral, conjuntamente com a sua mineralogia. As curvas de refletância caraterísticas das rochas metamórficas mais comuns estão apresentadas na figura II.8.

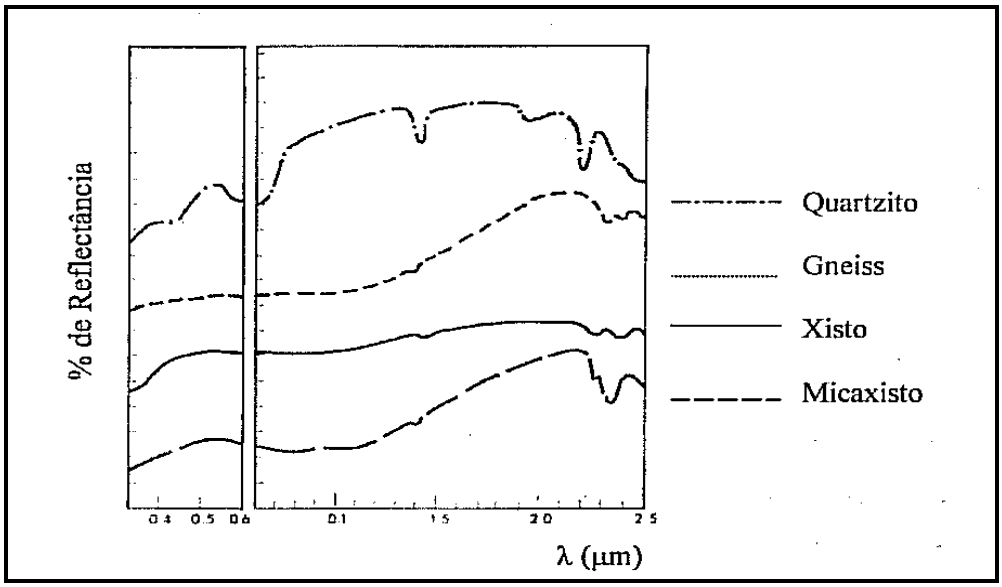


Figura II. 8 - Curvas espectrais de algumas rochas metamórficas no domínio do visível e infravermelho próximo (adaptado de Garcia, 1994, in Rabaça, 2001).

Solos - Com base na técnica de DR, os solos são fáceis de cartografar se não tiverem cobertura vegetal e são os minerais de neoformação, e alguns minerais-relíquia, a base para o processamento e análise da imagem. As suas colorações variam do branco a vermelho/castanho, reflexo de carbonato de cálcio e de argila e óxidos de ferro que estão na sua constituição. No entanto há que considerar, os aspetos texturais e estruturais e o teor em água. A humidade vai aumentar a absorção da REM e consequentemente diminuir a refletividade do solo. Na figura II.9 estão representadas as assinaturas de alguns minerais normalmente constituintes do solo.

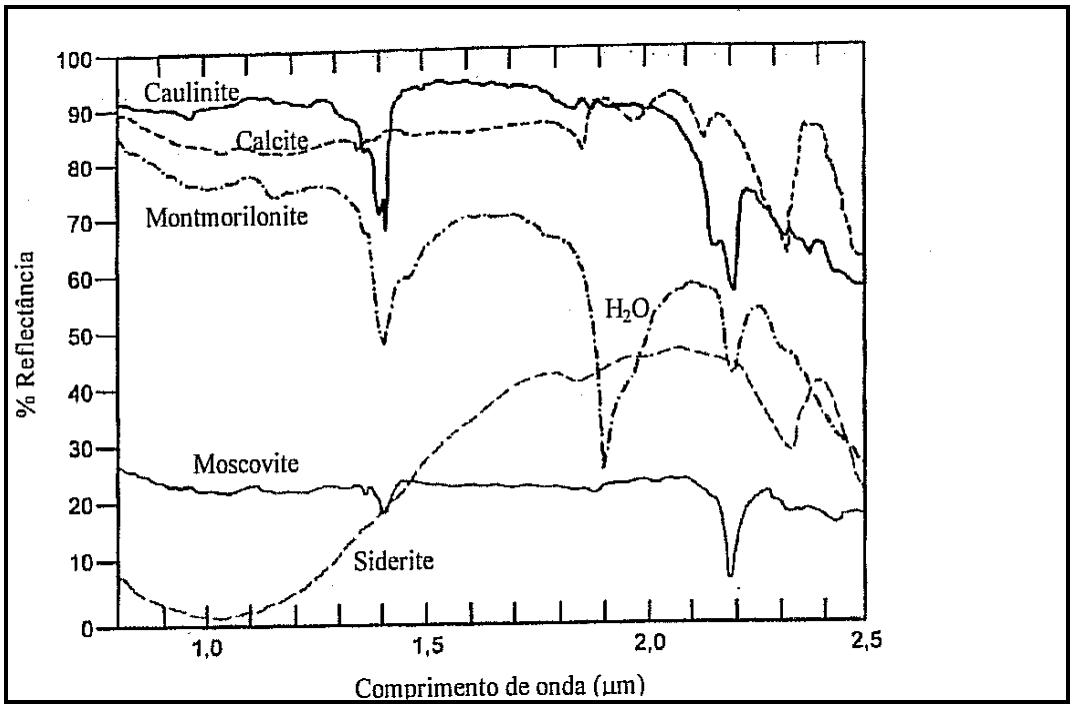


Figura II. 9 - Assinaturas espectrais de distintos minerais constituintes do solo (Elachi, 1987, referido em Chuvieco, 1996, in Rabaça, 2001).

4.2. Fatores estruturais

A deteção remota permite cartografar estruturas morfológicas e alinhamentos estruturais a nível regional com grande facilidade, devido à ampla escala de cobertura da plataforma, traçando-se redes de drenagem, cadeias montanhosas, escarpas, falhas e contactos litológicos.

Cada forma de drenagem tem um significado geológico, como expressos nas figuras II. 10 e II.11.

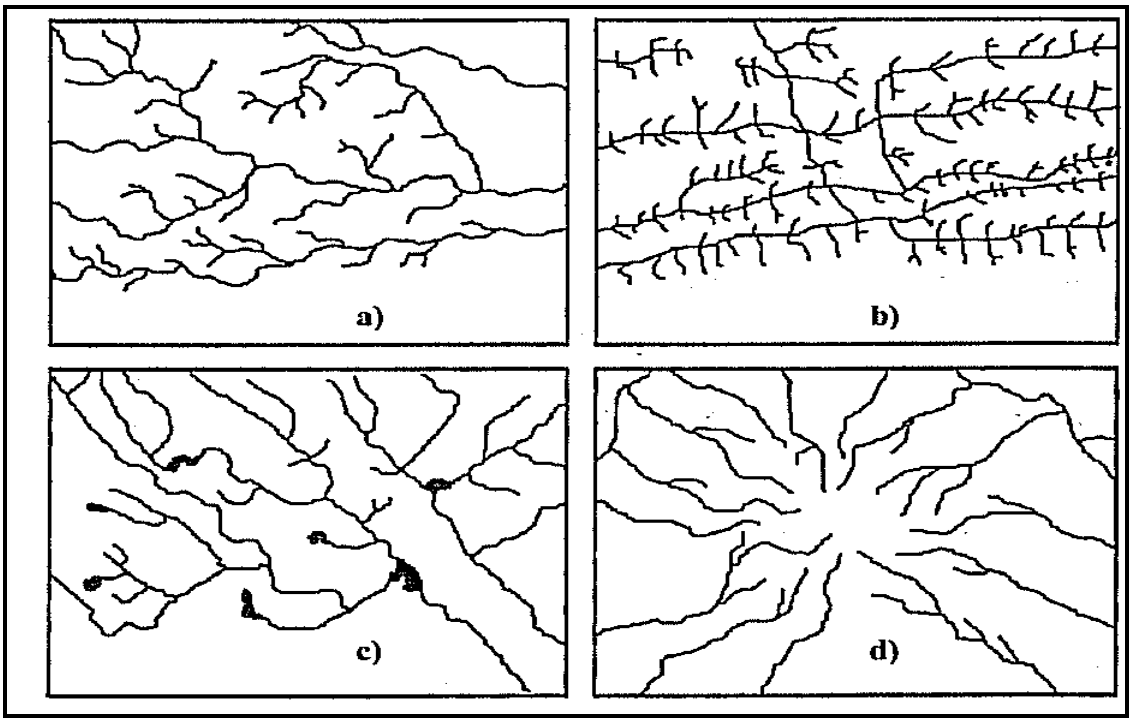


Figura II.10 - Os principais padrões de drenagem: a)- dendritica, b)- treliça, c)- retangular, d)- radial (Wester, 1992 *in* Rabaça 2001).

SIGNIFICADO DAS FORMAS DE DRENAGEM MAIS COMUNS		
TIPO	DESCRIÇÃO	SIGNIFICADO
Dendrítico	Traçado irregular, semelhante a uma árvore	Materiais homogéneos e rochas cristalinas; camadas horizontais; zonas pouco declivosas.
Subdendrítico	Distribuição ligeiramente alongada	Menor controlo estrutural
Retangular	Distribuição segundo ângulos retos	Rochas fraturadas
Angular	Distribuição segundo ângulos agudos	Rochas fraturadas em ângulos agudos
Paralelo	Canais de escoamento paralelos entre si	Declives abruptos; áreas de formas paralelas e alongadas
Treliça	Canais principais paralelos e tributários com junções que originam ângulos mais ou menos retos	Rochas sedimentares inclinadas ou fraturadas ou metasedimentares de baixo grau; áreas de fraturas paralelas
Radia	Canais originários de um ponto ou região centrais	Vulcões, domos, intrusões ígneas
Centrípeto	Canais convergindo para um ponto central	Depressão, cratera ou bacia
Anelar	Distribuição em forma de anéis	Domos estruturais

Figura II. 21 - O significado das formas de drenagem mais comuns (adaptado de Gupta, 1991; in Rabaça, 2001).

III. ANÁLISE LITOSTRATIGRÁFICA DA BACIA DE BENGUELA

Dado o facto do tema desta dissertação se centrar na cartografia geológica de unidades sedimentares do Mesozóico da região de Benguela, importa fazer uma apresentação/discussão relativa à Bacia de Benguela e às diferentes unidades aí aflorantes.

1. Enquadramento da Bacia de Benguela

A Bacia de Benguela está inserida num conjunto de bacias localizadas na costa de Angola (entre as quais, Kwanza e Namibe), formadas simultaneamente com as bacias dos Camarões, Guiné Equatorial, Gabão, Congo e que se estendem pela costa SW africana desde a orla Este do delta do Níger até à crista de Walvis (figura III.1).

Figura III. 1 - Localização das várias bacias da costa ocidental de África onde se insere a Bacia de Benguela (retirada de Brownfield & Charpentier, 2006).

O Gondwana, resultante da fragmentação da Pangeia durante o Triásico, foi submetido a outra fragmentação no início do Cretácico Inferior de que resultou a abertura do Oceano Atlântico Sul e, consequentemente, a separação das margens continentais da África Ocidental e da América do Sul (Le Pichon & Hayes, 1971; Gorini, 1981), definindo-se diversos segmentos orientados - Equatorial, Central, Sul e Falkland (Malvinas), com cerca de 700 quilómetros de extensão, delimitados por zonas de fratura oceânicas, tais como as estruturas Romanche, Charcot, Ascensão, Rio de Janeiro e Rio Grande (segundo Davison, 1999; Turner *et al*., 2003; Mohriak & Rosendahl, 2003; *in* Soma, 2011).

As bacias angolanas e a maioria das bacias brasileiras encontram-se no segmento central, formando margens conjugadas (figura III.2) com aspetos geomorfológicos, geológicos, paleontológicos e paleoclimáticos comuns.

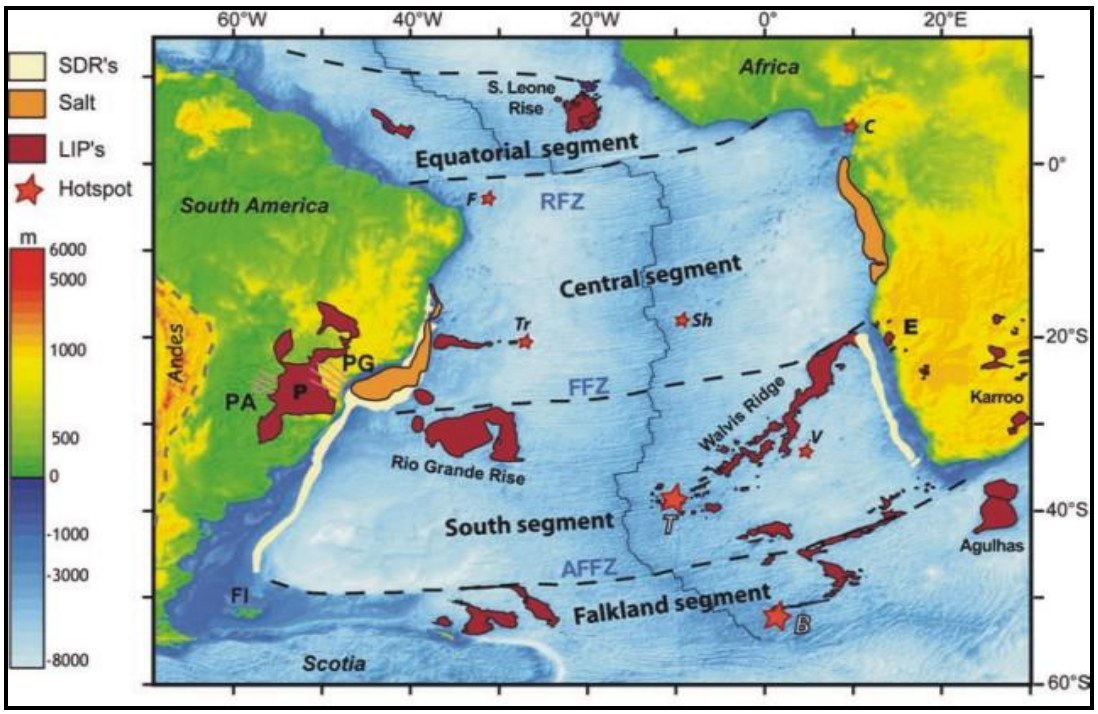


Figura III. 2 - Mapa das estruturas mais importantes do Atlântico Sul (retirado de Torsvik *et al*., 2009). Nele se pode observar as margens conjugadas Atlânticas Sul-americana e Oeste-africana, os limites entre os quatro segmentos (Equatorial, Central, Sul e Malvinas (Falkland) representados pelas linhas a tracejado (RFZ, Zona de Fratura Romanche, FFZ, Zona de Fratura Florianópolis, AFFZ, Zona de Fratura Agulhas-Malvinas); Bacias de sal apcianas a laranja; LIPs (Grandes Províncias Ígneas) - P, Paraná; E, Etendeka, Karroo, erra Leoa e agulhas; SDRs - Refletores Mergulhantes para o Mar e *pontos quentes* ativos (F- Fernando de Noronha, C- Camarões, Tr- Trinidade, Sh- Stª Helena, T- Tristão da Cunha, V- Vema, B- Bouvet).

2. Caraterização geológica da região Benguela

Tendo como base a região do Lobito (Benguela) e a informação contida nas folhas 227 e 228 da Carta Geológica de Angola (figura III.3; Galvão & Portugal, 1971), o enchimento sedimentar da Bacia de Benguela é composto por rochas sedimentares siliciclásticas, evaporíticas e carbonatadas, cujas idades vão do pré Apciano ao Quaternário recente. Para oriente definem-se duas faixas de terrenos anteriores ao Mesozoico, sendo uma composta de gnaisses, granitos gnaíssicos e xistos e denominada Complexo Metamórfico, e a outra de rochas graníticas e afins.

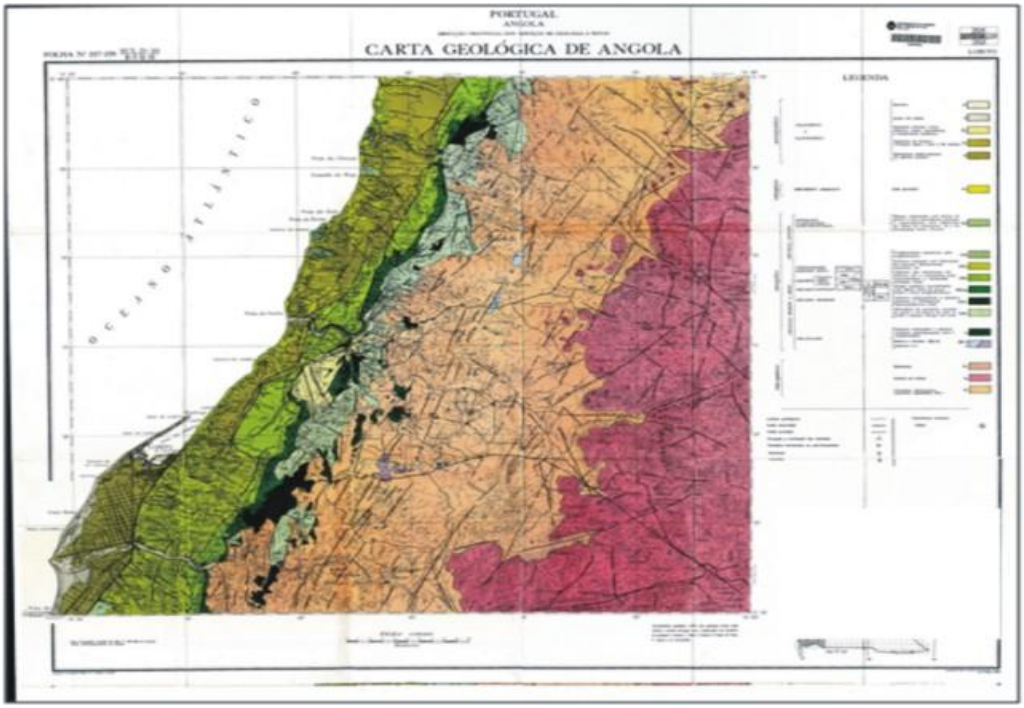


Figura III. 3 - Folhas 227 e 228 - Lobito da Carta Geológica de Angola à escala 1/100000 (Galvão & Portugal, 1971). Evidenciam-se nesta carta três faixas litológicas bem distintas, de Oeste para Este: sedimentar (preenchimento Meso e Cenozóico da Bacia de Benguela), metamórfica (Complexo Metamórfico) e granítica.

A seguir, na figura III.4 está representado o esboço geológico de grande parte da Bacia de Benguela, onde se pode observar que, entre o sul de Benguela e a Baía do Cuio, a costa é mais proeminente e que há, também, um paralelismo na distribuição das unidades litológicas relativamente à costa, mas não de uma forma continua. Elas são em maior número e repartidas de um modo muito complexo pois a área foi sujeita a uma atividade tectónica salífera.

Segundo Guiraud *et al*. (2010), a evolução da Bacia de Benguela sob o ponto de vista tectónico, é principalmente condicionada por dois fenómenos: (1) Fraturação do soco durante o *rifting* do Cretácico Inferior, criando um sistema antitético de blocos fraturados; (2) Movimentos tectónicos salíferos devido ao basculamento da margem e ao rápido afundamento de uma das partes da bacia. As falhas que definem os limites dos diferentes blocos de fratura têm direções predominantes, variando entre NW-SE e NE-SW e são herdadas das estruturas do soco Precâmbrico.

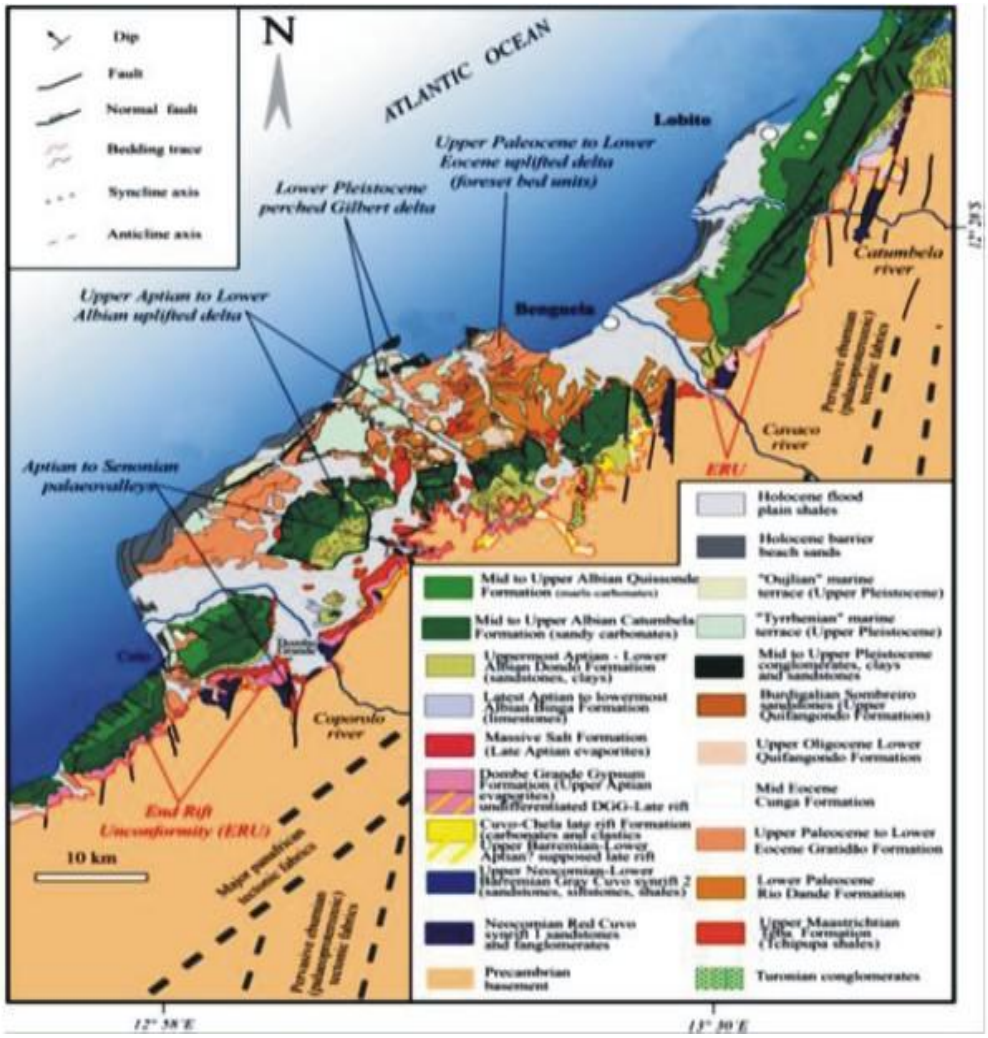


Figura III. 4 - Esboço geológico do *onshore* de Benguela (adaptado de vários autores, *in* Guiraud *et al*, 2010).

Este esboço é uma sequência de atualizações cartográficas, sucessivas, a partir da Carta Geológica de Angola à escala 1:1000 000 em que se destacam as seguintes:

1. Carta geológica da Bacia de Benguela do INAGEO (1982) (*in* Tavares, 2006);
2. Carta geológica simplificada da Bacia de Benguela (Buta Neto *et al*, 2006);
3. Carta geológica simplificada modificada do INAGEO (Tavares, 2007), legendada com as idades das unidades litostratigráficas (figura III.5) de uma forma errática quanto à sua sequência.

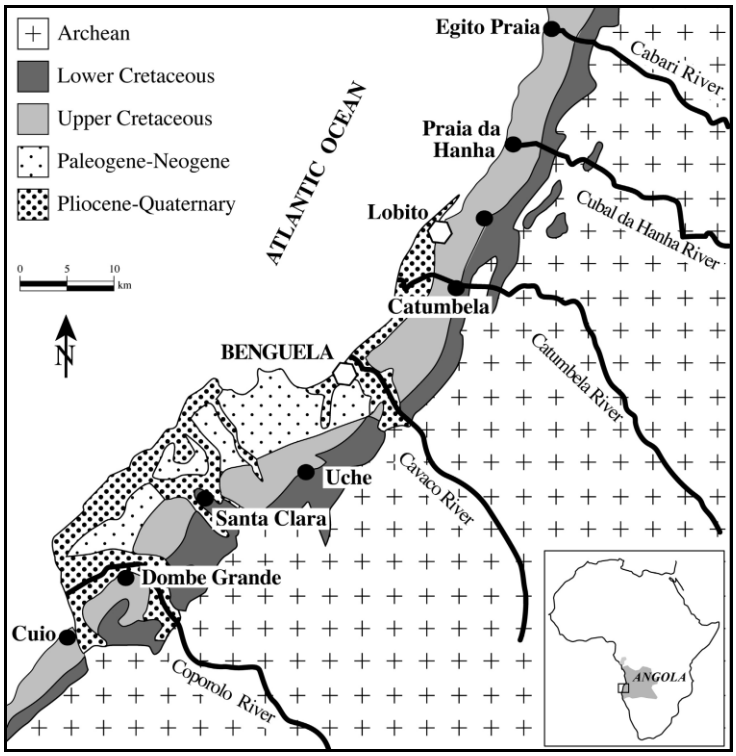


Figura III. 5 - Esboço geológico das unidades sedimentares da região de Benguela (porção *onshore* da Bacia de Benguela) e do bordo ocidental metamórfico e ígneo ante-Mesozoico (Tavares *et al*. 2007).

3. As unidades litostratigráficas do Mesozoico e Cenozoico da Bacia

Para a caracterização estratigráfica e sedimentar das regiões de Benguela e Lobito foi necessária informação retirada de vários trabalhos anteriormente publicados (por exemplo, Neto, 1951, 1957; Galvão & Portugal, 1971; Galvão & Silva, 1972; Duarte-Morais *et al*., 2000; Buta-Neto *et al*., 2006; Tavares *et al*., 2007; Quesne *et al*., 2009; Guiraud *et al*., 2010), de várias dissertações não

publicadas (Tavares, 2000, 2006; Cavita 2011; Segundo, 2011; Soma, 2011), complementadas por trabalho de campo que consistiu na observação e caracterização dessas unidades *in situ*.

Neste trabalho, para o reconhecimento das diversas unidades litostratigráficas foram essenciais os esboços geológicos de Galvão & Portugal (1972) e de Guiraud *et al*. (2010). No entanto, a área de intersecção entre ambas nem sempre coincide. É o caso, por exemplo da área entre o sul do rio Catumbela e o rio Hanha, o que *a priori,* significa que uma das cartas está mal traçada, criando algumas dúvidas na identificação de certas unidades litostratigráficas no terreno.

Das observações no campo construi-se o quadro da figura III.6, onde constam algumas das nomenclaturas usadas para as diversas unidades mesozoicas (ver, por exemplo, Galvão & Portugal, 1971; Galvão & Silva, 1972; Guiraud *et al*., 2010). Apresentam-se ainda as respetivas caraterísticas litológicas e cor que melhor as identifica.

	NOMENCLATURA		CARATERÍSTIC LITOLÓGICAS	COR
	ANTIGA	RECENTE		
Cretácico Inferior	Alb3	Formação Quissonde	Margo-calcária	Amarelo-esbranquiçada
	Alb2	Formação Catumbela	Calcária	Esbranquiçada
	Alb1	Formação Tuenza-Dondo	Greso – carbonatada	Vermelha e/ou esbranquiçada
	Apc2	Formação Binga	Calcária	Variada (?)
	Apc1	Formação Sal Massivo	Evaporítica	Cinzenta-amarelada
	Pre-Apciano	Formação Cuvo	Siliciclástica	Cinzenta
PRECAMBRICO		Complexo Metamórfico		

Figura III. 6 - Aspetos litológicos e cor predominante das unidades meso-cenozóicas aflorantes na área de estudo (nomenclaturas litostratigráficas baseadas em Galvão & Silva, 1972; Guiraud *et al*., 2010).

Para conhecimento da sequência das diferentes denominações utilizadas para a caraterização das unidades cretácicas pelos diferentes autores, ao longo dos tempos, elaborou-se o quadro síntese que se segue (figura III.7). A nomenclatura seguida é a de Guiraud *et al*. (2010) e a estrutura da tabela é baseada na escala geológica do tempo de Gradstein et al. (2012)

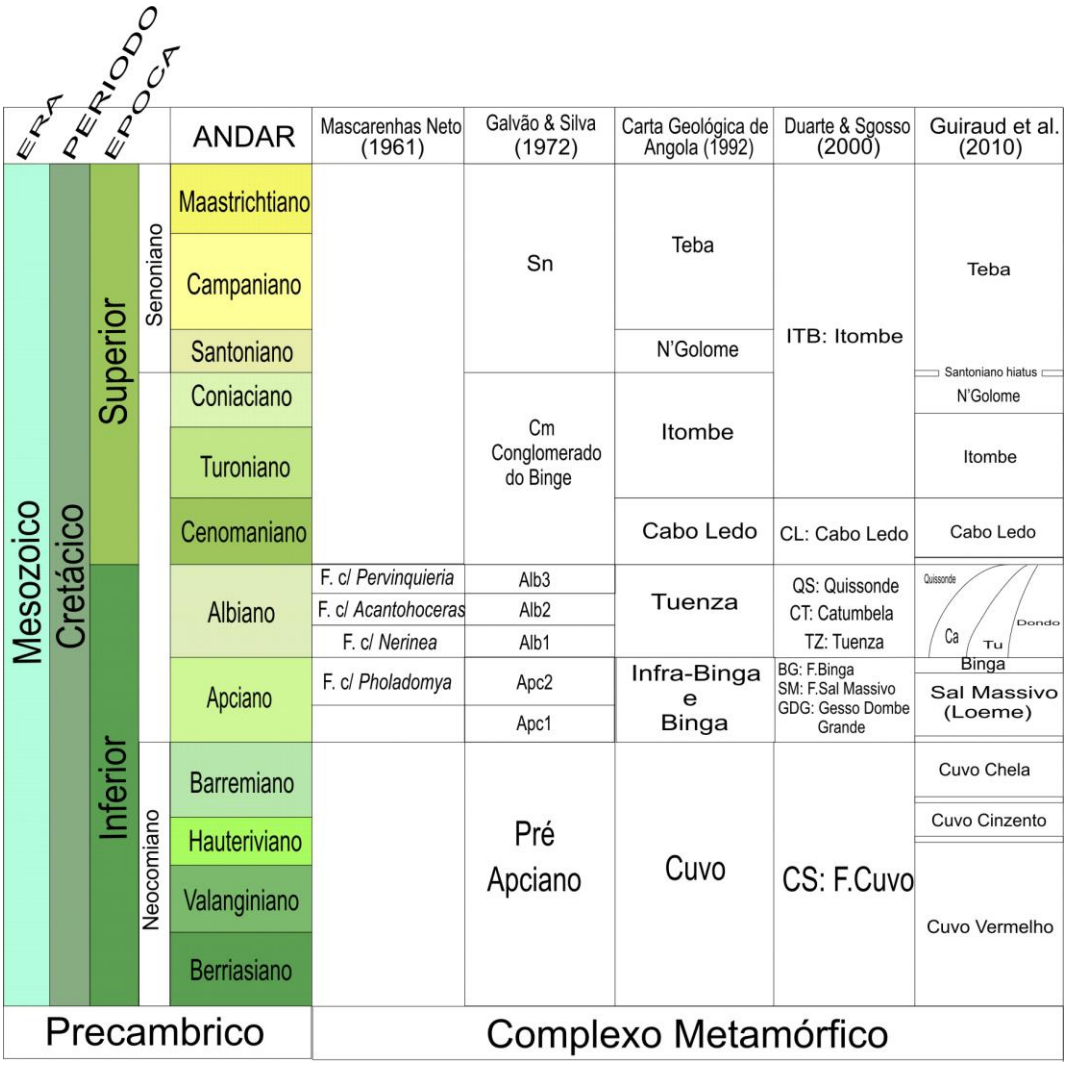


Figura III. 7 - Diferentes denominações das unidades cretácicas para as bacias do Kwanza e Benguela, baseada na escala geológica de Gradstein et al. (2012)

3. 1. Descrição das unidades litostratigráficas e o seu aspeto superficial

De acordo com os quadros litostratigráficos acima citados caracterizam-se de seguida as diferentes formações do Mesozoico da região de Benguela, que foram observadas e analisadas através de trabalho de campo. Esta análise circunscreveu-se apenas às unidades do Cretácico Inferior: formações Cuvo, Sal Massivo, Binga, Tuenza, Catumbela e Quissonde.

3.1.1. Formação Cuvo

Designações informais equivalentes: Ci ou pré-Apciana (Galvão & Silva, 1972);

Locais de observação: Sul do Dombe Grande (figura III.8), Macangos, margens direita e esquerda do rio Cavaco;

Tipos de contactos: contacta, na base com o Complexo Metamórfico (discordância angular) e suprajacentemente com a formação Sal Massivo;

Caraterísticas: na região em estudo a formação Cuvo apresenta-se essencialmente como uma unidade siliciclástica, por vezes muito grosseira, tal como se pode constatar na figura III.8. Segundo a bibliografia consultada (por exemplo, Galvão & Silva, 1972)., aos arenitos e conglomerados da base, sobrepõem-se calcários nodulares esbranquiçados e calcários silicificados. Estes, apresentam-se frequentemente negros ou escuros com óxidos de ferro e manganês e pontualmente mineralizados em cobre sob a forma de malaquite e azurite, assim como nos níveis gresosos e conglomeráticos A espessura desta unidade varia entre 30-40m no norte e 100-120m no sul no sector Cuio-Dombe Grande (Buta-Neto *et al*., 2006; Tavares *et al.*, 2007). No corte observado no Dombe Grande os clastos e blocos de granito, gnaisse e quartzo apresentam-se mal rolados e dispostos caoticamente;

Idade: possivelmente Barremiano (?) (Guiraud *et al.*, 2010);

Aspeto Superficial: apresenta normalmente uma vegetação rasteira e alguns arbustos.

Figura III. 8 – Unidade greso-conglomerática da formação Cuvo ao Sul do Dombe Grande.

3.1.2. Formação Sal Massivo

Designações informais equivalentes: Apc1 (Galvão & Silva, 1972), formação gipsífera do Dombe Grande (Guiraud *et al*., 2010);

Locais de observação: Pedreira de Querecila (Fig.III.9), Dombe Grande (Fig.III.10), e fazenda Hanha do Norte;

Tipos de contactos: contacta concordantemente com as formações Cuvo (na base) e Binga (no topo); e discordantemente com o Complexo Metamórfico ou com formações albianas;

Caraterísticas: A formação Sal Massivo é composta de evaporitos (essencialmente gesso e por vezes sal) e lutitos bem laminados, frequentemente gipsíferos, grés micáceos com cimento calcário e matriz argilosa. No corte observado em Querecila a cor característica é amarelada do grés que é contrastada pelo cinzento dos lutitos. São visíveis ondulações típicas atribuídas à halocinese;

Idade: Apciano inferior (Neto, 1961; Antunes, 1964; Galvão & Silva, 1972; Stark *et al*., 1991);

Aspeto Superficial: No Dombe Grande apresenta uma cobertura vegetal rasteira, ao contrário de Querecila aonde se apresenta arbustiva.

Figura III. 9- Formação Sal Massivo: Corte na Pedreira Querecila onde são visíveis veios de gesso fibroso com 10cm de espessura entre argilitos compactos, dispostos em estratos bem definidos.

Figura III. 10 – Formação Sal Massivo no Dombe Grande

3.1.3. Formação Binga

Designações informais equivalentes: formação com *Pholadomya* (Neto, 1961) e Apc1 (Galvão & Silva, 1972);

Locais de observação: descida do Comengo – EN100 (figura III.10);

Tipos de contactos: contacta de forma concordante com a base da unidade Sal Massivo e no topo com a formação Tuenza, e por vezes discordantemente com o Complexo Metamórfico;

: a formação Binga é essencialmente constituída por calcários margosos com restos de moluscos (por exemplo, bivalves como *Pholadomya pleuromyaeformis*) e equinídeos, e calcários sublitográficos (Galvão & Silva, 1972);

Idade: Apciano superior a Albiano inferior (Galvão & Silva, 1972; Tavares *et al*., 2007);

Aspeto Superficial: vegetação densa (arbustos e catos) e cor amarela, semelhante ao observado na pedreira de Querecila.

Figura III. 11 - Aspeto da formação Binga evidenciando calcários de grão fino em camadas delgadas (Descida do Comengo, EN100).

3.1.4. Formação Tuenza

Designações informais equivalentes: Alb1lg, formação com *Nerinea* (Neto 1961);

Locais de observação: em quase toda extensão N-S - descida do Comengo - EN100, Hanha do Norte, Cuio, Dombe Grande (figura III.11), Tchimalavera, Santa Clara e Catumbela;

Tipos de contactos: no geral, jaz sobre formação Binga passando progressivamente no topo para a formação Catumbela, podendo contactar discordantemente com o soco ou com unidades mais recentes;

Definição: é constituída, essencialmente, por camadas areníticas possantes de grão fino a grosseiro e conglomeráticas, podendo conter níveis de calcário, arenito marga e argila (Galvão & Silva, 1972);

A secção Cuio-Dombe Grande pode ser a referência desta formação por apresentar-se completa onde atinge uma espessura de 40m (Quesne *et al*., 2009), onde apresenta duas litofácies que se intercalam:

Fácies 1: Arenito de grão médio a grosseiro (0.2 a 2mm), bem classificado/massivo constituído por quartzo e micas;

Fácies 2: Níveis de conglomerados mal classificados contendo seixos rolados e calhaus do basamento da bacia (gnaisses, granitos e quartzo).

Em ambas as fácies foram identificados apenas fósseis de gastrópodes marinhos *(Nerinea*).

Idade: entre o Albiano inferior e médio por falta de dados biostratigráficos é impossível datar esta fácies detrítica com precisão e fazer a correlação entre as diferentes secções estudadas, entre o Cuio e Catumbela (Quesne *et al*., 2009);

Aspeto Superficial: Quando o topo se apresenta com estratos areníticos compactos tende a ser plana com inclinação para a costa e desprovida de vegetação.

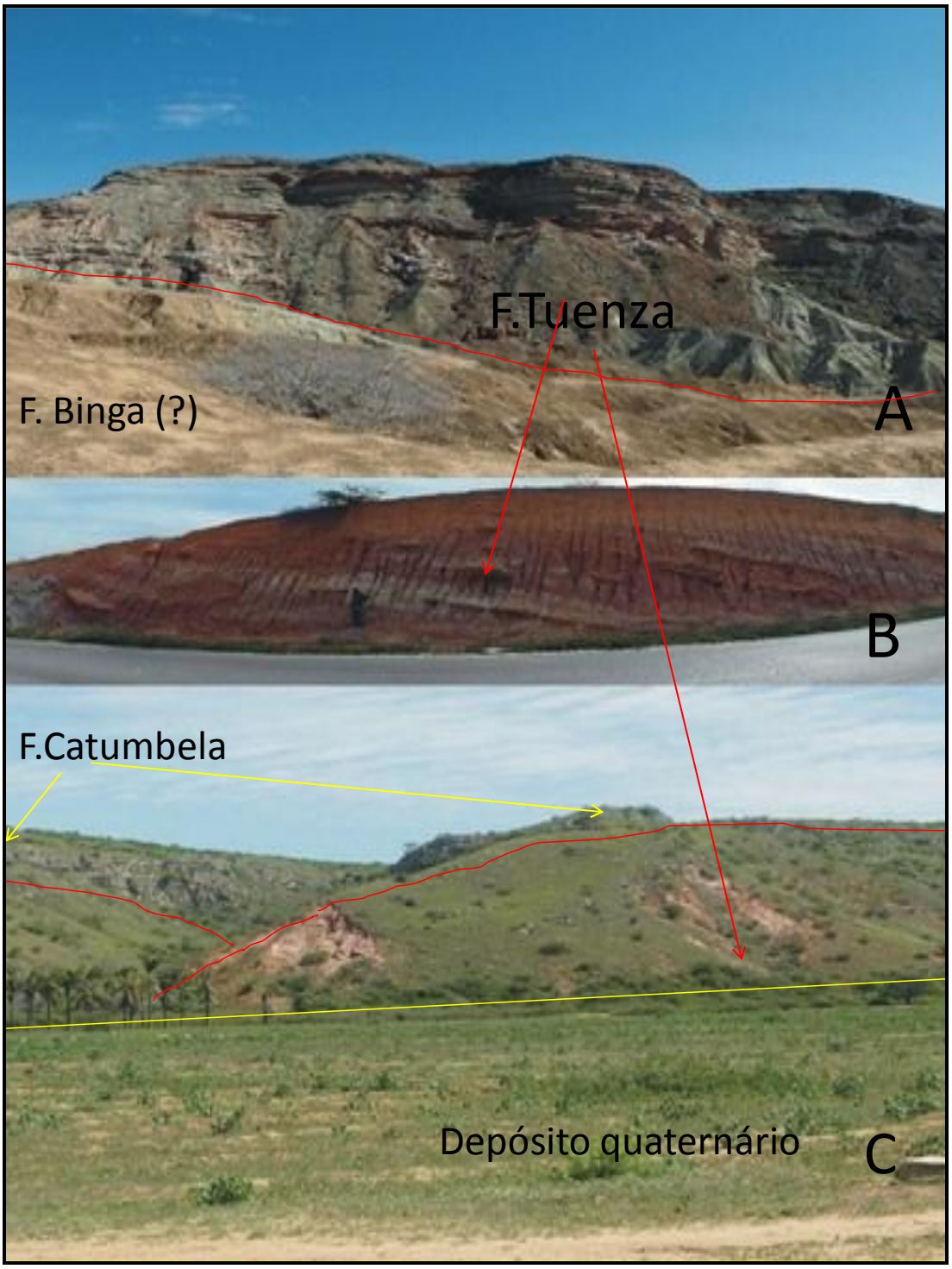


Figura III. 12 – Formação Tuenza - A: **contactando com a formação Binga (?) no Dombe Grande; B: em camadas de cor vermelha e esbranquiçadas - Comengo;** C: **contactando com a formação Catumbela e depósito quaternário - fazenda Hanha.**

3.1.5. Formação Catumbela

Designações informais equivalentes: Alb2 (Galvão & Silva, 1972), formação com *Acanthoceras* (Neto, 1961);

Locais de observação: em quase toda faixa litoral;

Tipos de contactos: contida estratigraficamente entre as formações Tuenza e Quissonde. Esta unidade é em parte equivalente a lateral às referidas unidades (Galvão & Silva, 1972; Tavares *et al.*, 2007; Quesne *et a*l., 2009), podendo contactar discordantemente com o Complexo Metamórfico e com formações quaternárias (figura.III.13);

Definição: é uma unidade homogénea constituída por calcários brancos ou acinzentados, duros, subcristalinos, maciços (Figura III.12) ou estratificados, em camadas espessas, oolíticos, pisolíticos, e intercaladas muitas vezes por calcarenitos. Frequentemente apresenta-se cavernosa à superfície, com cornijas, contendo fósseis contendo de algas calcárias, gastrópodes, equinodermes, foraminíferos e amonites, com uma distribuição bastante irregular (Neto, 1961). Esta unidade pode atingir uma espessura de aproximadamente 300m e desenvolveu-se numa dinâmica de ambiente transgressivo que precede o aparecimento de fácies de plataforma de mar aberto pouco profundo com águas muito movimentadas (Galvão & Silva, 1972; Buta-Neto *et al*., 2006).

Idade: Albiano (Tavares *et al*., 2007);

Aspeto Superficial: devido à dureza do seu calcário forma frequentemente cornijas. De Cuio ao sul do Lobito é desprovida de vegetação mas a partir dessa localidade a cobertura é arbustiva e vai aumentando de densidade (Figura III.13). A cor natural desta unidade é esbranquiçada; quando acastanhada deve-se ao grau de alteração.

Figura III. 13 – Aspeto da sucessão carbonatada típica da formação Catumbela aflorante ao longo do rio Catumbela.

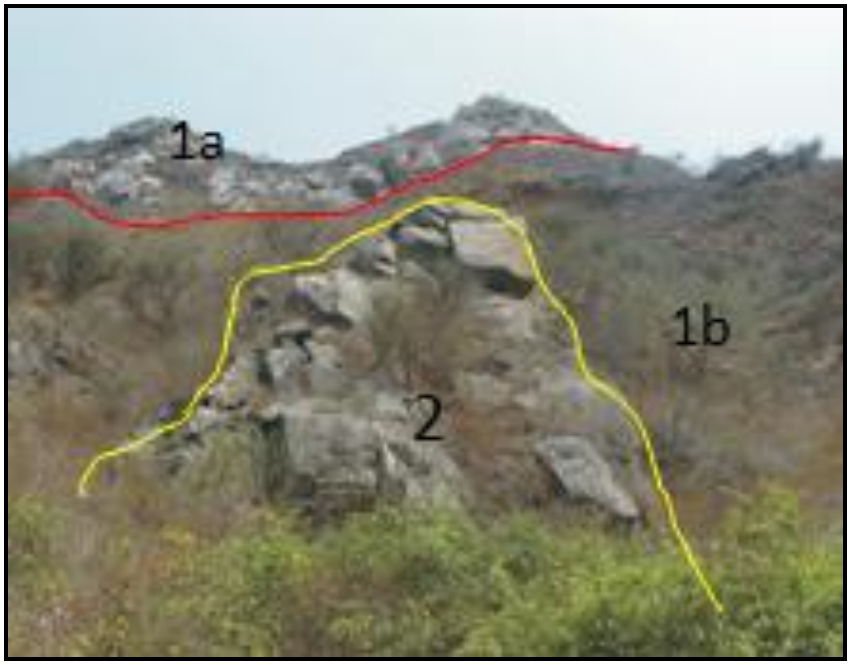


Figura III. 14 – Formação Catumbela representada por duas da sua fácies: (1a) – calcários compactos e (1b) - calcários dolomíticos contactando com o Complexo Metamórfico (2).

3.1.6. Formação Quissonde

Designações informais equivalentes: formação com *Pervinquieria* (Neto, 1921), Alb3 (Galvão & Silva, 1972);

Locais de observação: Cuio (Figura III.14), a norte de Benguela, ao longo de toda faixa litoral, segundo uma faixa continua;

Tipos de contactos: Esta fácies passa lateralmente aos carbonatos da formação Catumbela, a leste (Tavares, 2006);

Características: esta formação é composta por camadas intercaladas de calcários margosos (por vezes dolomíticos) e margas num conjunto muito diaclasado. Constitui uma unidade muito fossilífera, sendo muito diversificada em fósseis como gastrópodes, amonites, equinodermes e foraminíferos (Figura III.14A); apresenta uma espessura aproximada de 110m; ao longo da costa nota-se a presença de vales suspensos, estando alguns quase ao nível do mar. As camadas apresentam repetidas mudanças de inclinação que se deve a grupos de falhas. Junto ao Farol do Lobito as camadas têm inclinações de 25º para W (Galvão & Silva, 1972; Buta-Neto *et al*., 2006).

De acordo com Soma (2011), a sucessão sedimentar vertical da formação Quissonde no rio Catumbela parece mostrar uma organização em três grandes unidades, da base para o topo: alternâncias de calcários nodulares e margas, alternâncias de calcários e margas, alternâncias de margas argilosas e argilitos;

Idade: Albiano Superior (Tavares *et al*., 2007);

Aspeto Superficial: No geral, esta unidade litostratigráfica apresenta-se coberta por uma vegetação gramínea e por vezes, também, com catos muito dispersos. Morfologicamente, quando em contacto com a formação Catumbela, apresenta-se em zonas de grande altitude, originando uma drenagem muito irregular.

Figura III. 15 - Afloramento da formação Quissonde: (A) - baía de Cuio; (B) - aspeto superficial_EN100;

IV. APLICAÇÃO DA DETEÇÃO REMOTA À CARTOGRAFIA GEOLÓGICA DA REGIÃO DE BENGUELA

Procura-se agora testar a aplicação de técnicas de Deteção Remota na identificação e mapeamento de algumas das unidades geológicas descritas no capítulo anterior.

Existem métodos de tratamento de imagens, de modo a melhorar a sua informação no domínio espectral ou no domínio espacial por alteração dos níveis de intensidade radiométrica ou de frequência (Fonseca & Fernandes, 2004), segundo uma sequência de etapas: (1) preprocessamento (ou de correção), (2) processamento unibanda e multibanda, (3) pós-processamento e (4) classificação digital.

1. Métodos e técnicas

A calibração de imagem tem por objetivo corrigir deficiências geométricas (deformações provocadas pela plataforma e rotação terrestre) e radiométricas (originadas pelo sensor, como os erros de bits e imagem bandada, e pela interferência atmosférica). Devido a avaria do equipamento SLC (*scan line corrector*) do sensor ETM+ a bordo do satélite Landsat 7, desde 2003 que as imagens obtidas apresentam linhas de varrimento sem informação (pixéis sem dados sobre o ND). A partir dessa data tornou-se necessário corrigir as imagens bandadas (ver Chander *et al.* 2009). Neste trabalho, e no sentido de obviar a esta situação, selecionou-se um conjunto de bandas adquiridas antes da data da avaria do sistema.

Com a finalidade de verificar a distribuição da refletância em cada banda calculou-se um conjunto de parâmetros estatísticos básicos e correlacionou-se o valor médio obtido com o comprimento de onda respetivo para análise espectral comparada.

Para melhoria da imagem fornecida por cada banda foram utlizadas técnicas de realce (expansão linear) e filtragem.

Para realçar o contraste entre as várias litologias integradas nas diferentes unidades litológicas foram testadas várias composições coloridas do tipo RGB (RGB321, RGB341, RGB431, RGB753). Estas facilitam a visualização, individualização e interpretação de objetos nas imagens pois o olho humano é mais sensível a mudança de cores do que à alteração de tons de cinzento (Salinero, 2007; *in* Chiquete, 2012).

Com o mesmo objetivo foram ainda calculados diversos índices obtidos através da aplicação de algoritmos/coeficientes aos dados de refletância, incluindo o NDVI (aplicado à análise da distribuição da vegetação), o de Abrams (relacionado com diferenças na composição química dos meterias e pela presença de argila), a transformada *Tasseled Cap* (evidenciando o comportamento espectral do solo e coberto vegetal, o que permite uma separação mais nítida dos diferentes tipos de cobertura), e ainda a Análise das Componentes Principais (para redução da redundância por compressão dos dados radiométricos).

Tomando por base os dados expressos na carta geológica do Lobito, na porção que foi objeto de estudos de campo detalhados (ver figura IV.1), aplicaram-se técnicas de classificação a partir de amostras de treino sobre os dados radiométricos disponíveis na tentativa de procurar reproduzir digitalmente a distribuição espacial das diversas unidades como expresso na carta geológica. A validação da classificação automática foi conseguida através da aplicação de uma matriz de confusão que oferece uma medida efetiva do modelo de classificação, ao mostrar o número de classificações corretas ou experimentais versus as classificações previstas para cada classe, sobre um conjunto de exemplos designados por T (Holden, 2010; Chiquete, 2012).

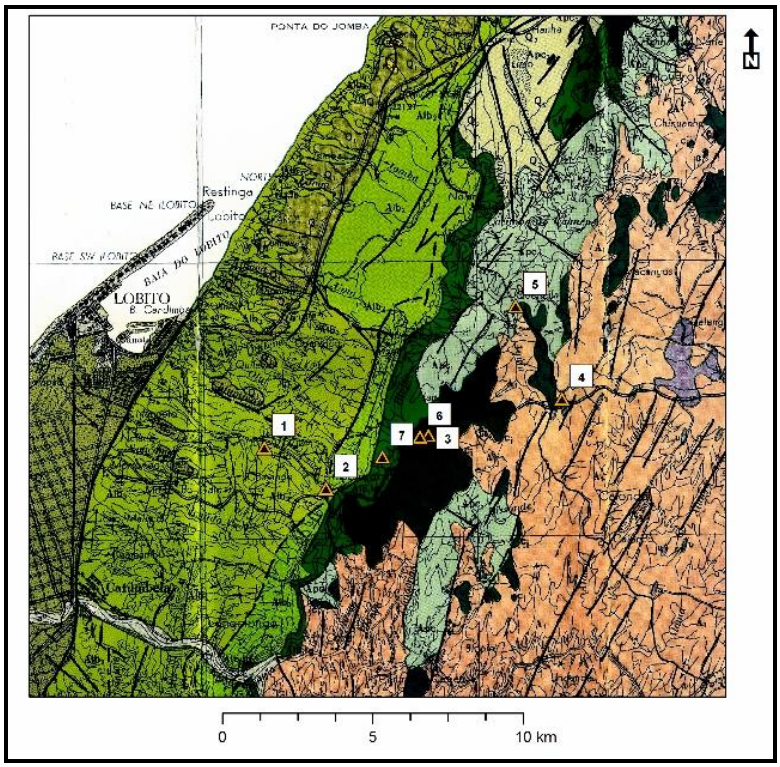


Figura IV. 1 – Amostras de treino, referentes aos pontos de amostragem na área selecionada, num troço da EN 100, denominada Comengo (mapa geológico retirado de Galvão & Portugal, 1971).

2. Resultados obtidos e discussão

Na base dos resultados obtidos na fase de processamento dos dados radiométricos (avaliação espectral, composições coloridas, índices diversos e transformada de Tasseled Cap), bem como da análise de componentes principais, e com suporte na análise por "árvore de regressão" (ver discussão em Juozapavičius & Rapševičius, 2001), procurou-se delimitar, através de meios puramente digitais, o prolongamento de uma das unidades litológicas para sul e para norte da área em estudo. A utilização de árvores de regressão permite a classificação dos dados/imagens, recorrendo a um algoritmo de 'machine learning' que utiliza os dados constantes da imagem e classificados de acordo com a litologia para identificar um conjunto de regras que podem depois ser aplicadas à restante área de estudo. A desvantagem desta abordagem está na necessidade de abundante informação para a calibração do modelo e sua validação. Neste contexto foi seguido o método já utilizado por Mantas *et al*. (2012) para a área imediatamente a sul, recorrendo ao algoritmo J48 no *software Weka.* As árvores

de regressão foram construídas separadamente para cada unidade, definindo-se assim modelos binários, contento regras para a unidade de interesse (1) e regras para toda a restante área (0). Compilando as diferentes regras poder-se-ia obter a expressão cartográfica das unidades.

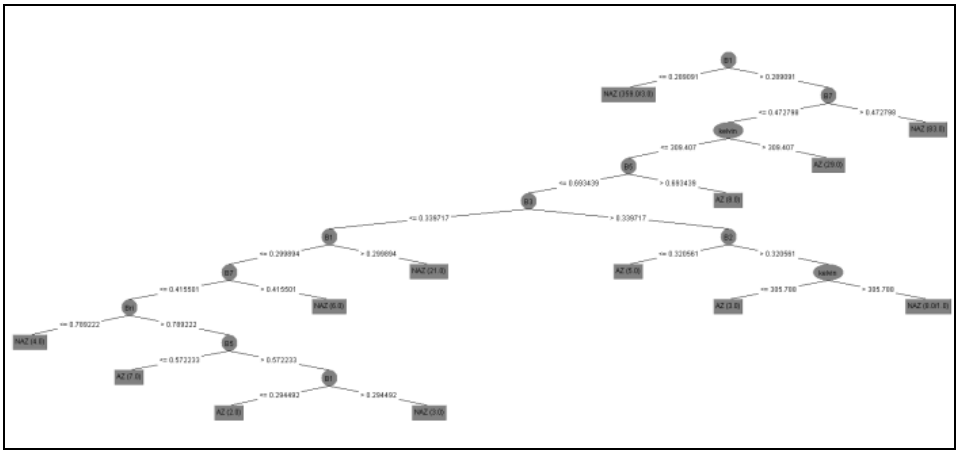


Figura IV. 2 – Árvore de regressão.

Em função dos dados expressos na carta geológica foram identificadas as diversas unidades litostratigráficas sedimentares cretácicas bem como os gneisses e migmatitos do designado Complexo Metamórfico. A unidade designada na carta por Apc1, composta por bancadas de sal intercaladas em bancadas de materiais detríticos, e, dado que as primeiras são muito bem individualizadas nas imagens espaciais), optou-se por subdividi-la de ora em diante em **Apc1a e Apc1b (sal)**, como se sintetiza na figura IV.3.

AMOSTRA TREINO	CLASSE	UNIDADE LITOSTRATIGRAFICA	X_UTM	Y_UTM
1	Alb3	F. Quissonde	347707	8629988
2	Alb2	F. Catumbela	349762	8628628
3	Apc2	F. Binga	353163	8630392
4	A1	Complexo Metamórfico	357607	8631608
5	Apc1a e Apc1b	F. Formação Sal Massivo	356064	8634692
6	Apc2 (?)	F. Binga (?)	352885	8630343
7	Alb1	F. Tuenza	351633	8629687

Figura IV. 3 - Classes de treino, correspondentes as diferentes unidades litostratigráficas mesozoicas e ao Complexo Metamórfico.

2.1. Análise estatística dos dados radiométricas nas diferentes bandas

A análise estatística dos dados radiométricos foi realizada em 6 bandas do sensor ETM+ (visível e infravermelho refletido) para discernir o comportamento das diferentes unidades litostratigráficas em função da refletância, apresentando-se nas tabelas IV.1 e IV.2 os valores dos parâmetros média e desvio padrão para cada uma das unidades atrás discriminadas.

Tabela IV. 1 - Valores da média da refletância das várias unidades líticas (*- comprimento de onda, ponto central).

	BANDAS					
	B1	B2	B3	B4	B5	B7
	479*	561*	661*	835*	1650*	2209*
A1	0,247	0,228	0,245	0,320	0,511	0,371
Apc1a	0,267	0,272	0,306	0,401	0,650	0,463
Apc1b	0,317	0,326	0,359	0,453	0,623	0,391
Apc2	0,267	0,265	0,291	0,385	0,611	0,430
Alb1	0,283	0,286	0,321	0,424	0,688	0,482
Alb2	0,290	0,293	0,330	0,434	0,685	0,483
Alb3	0,355	0,376	0,412	0,528	0,770	0,534

Tabela IV. 2 - Valores do desvio padrão da refletância das várias unidades líticas (* - comprimento de onda, ponto central).

	BANDAS					
	B1	B2	B3	B4	B5	B7
	479*	561*	661*	835*	1650*	2209*
A1	0,014	0,030	0,044	0,057	0,097	0,068
Apc1a	0,024	0,036	0,042	0,049	0,073	0,055
Apc1b	0,022	0,032	0,041	0,050	0,067	0,047
Apc2	0,024	0,032	0,040	0,054	0,090	0,064
Alb1	0,041	0,053	0,056	0,067	0,087	0,070
Alb2	0,040	0,053	0,057	0,066	0,091	0,071
Alb3	0,044	0,059	0,071	0,082	0,078	0,068

Relacionando os dados dos parâmetros estatísticos referentes a cada banda com o ponto centro do intervalo de comprimento de onda das mesmas bandas obteve-se os gráficos expressos nas figuras IV.4 e IV5.

2.1.1. Média

Da sua análise infere-se, e para o caso da média, que, no geral, as curvas de variação da refletância têm um comportamento comum, ou seja, um mínimo na B2 e aumento continuo gradual a partir daqui e acentuado no domínio do infravermelho, atingindo-se o pico na banda B5. As diversas unidades têm um comportamento similar, patente no paralelismo entre as diferentes curvas, com exceção da Apc1b que tem um incremento mais moderado no infravermelho refletido. As unidades sedimentares têm maior refletância relativamente os litotipos incluídos no Complexo Metamórfico; no primeiro grupo as dominantemente carbonatadas têm as refletâncias mais elevadas.

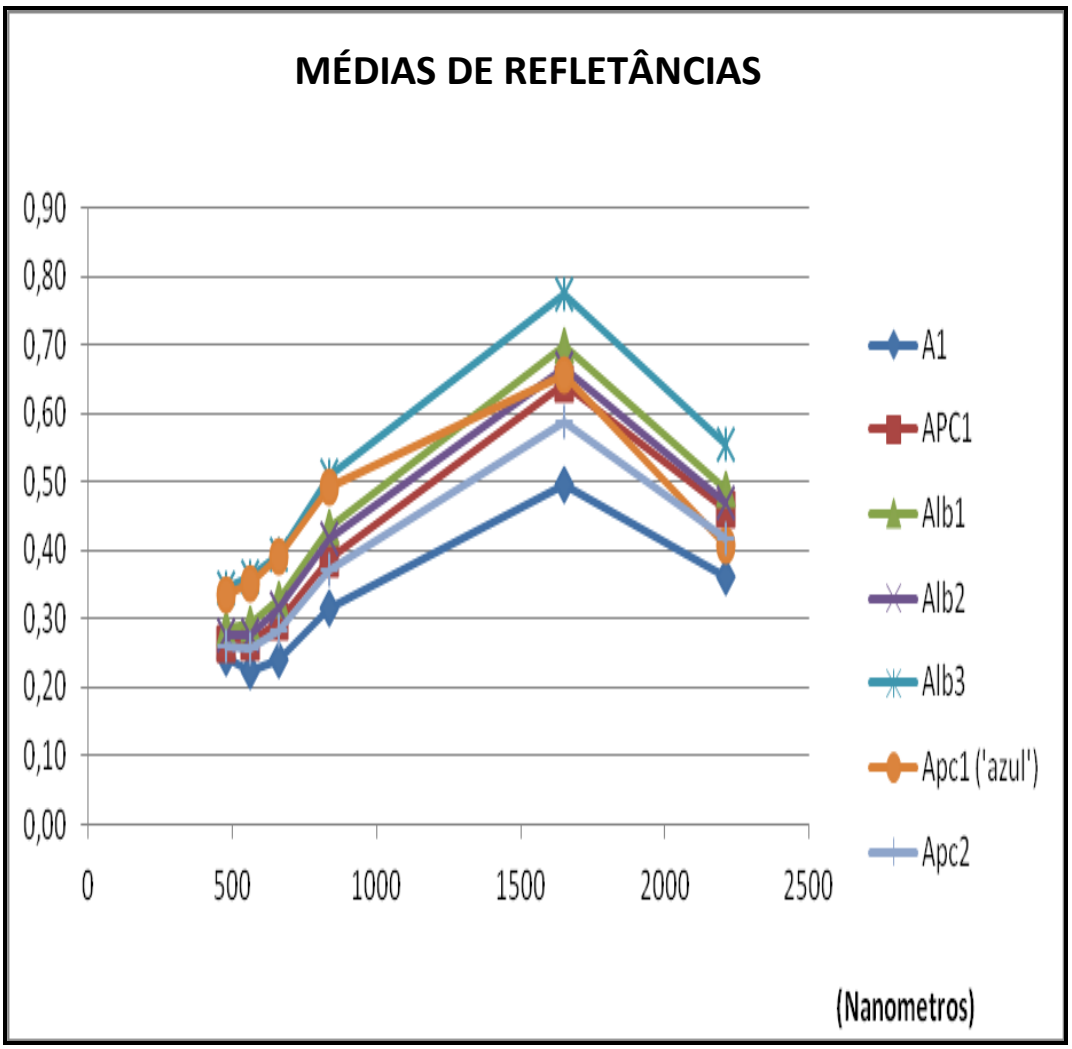


Figura IV. 4- Valores da média de refletâncias das várias unidades litostratigráficas

(APC1=Apca e Apc1("azul')=Apcb)

2.1.2. Desvio_padrão

No caso dos valores do desvio_padrão, as curvas de refletância têm também um comportamento comum e, na generalidade dos casos, paralelizável com os dados relativos à média. Mais uma vez as maiores diferenças observam-se na B5, com exceção da unidade Apc1b que atinge o valor mais elevado na B4. As rochas metamórficas voltam a ter os valores mais baixos do conjunto estudado (menor contraste); pelo contrário, as unidades detríticas apresentam os valores mais elevados, o que poderá refletir também uma maior variabilidade.

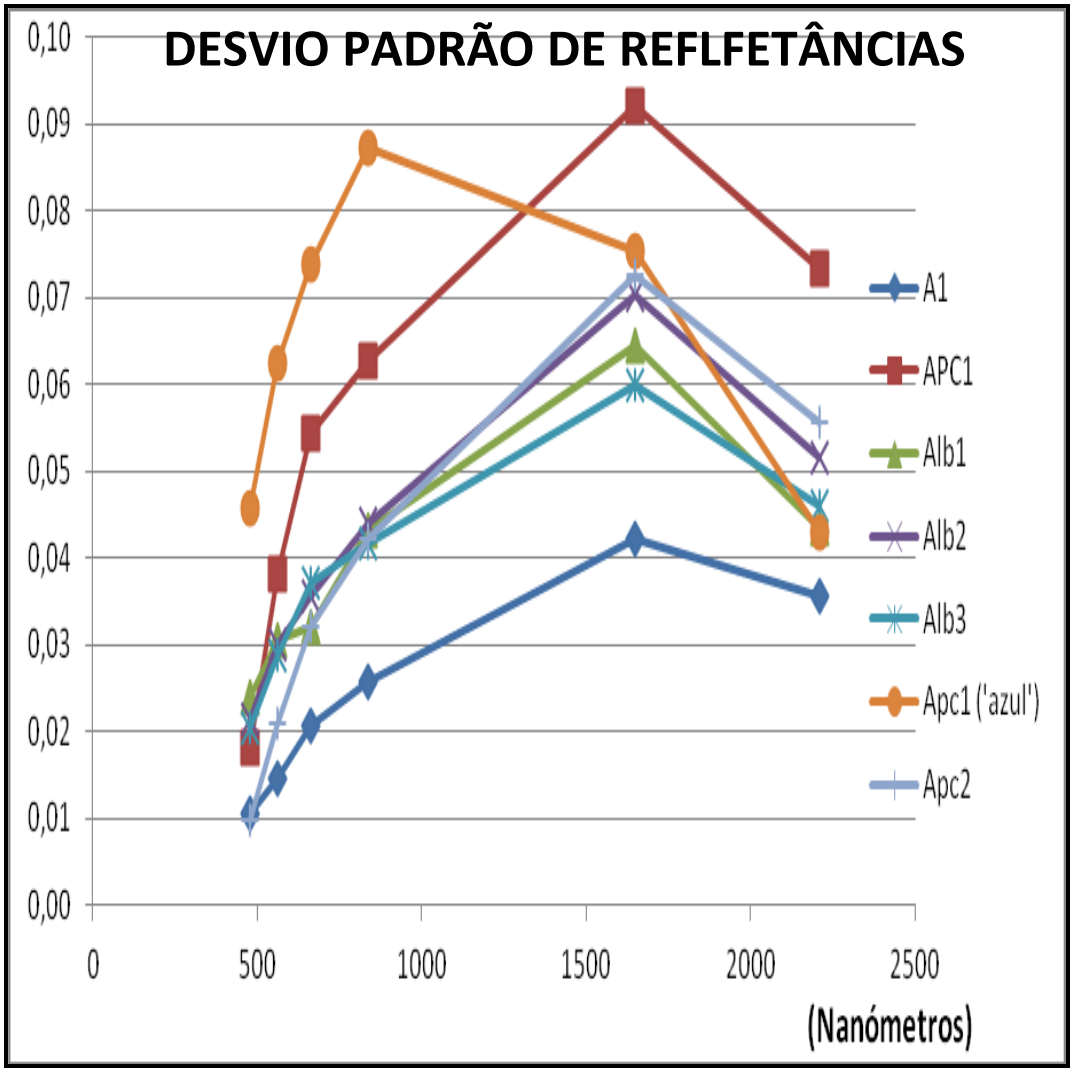


Figura IV. 5 - Valores do desvio padrão da refletância das várias unidades líticas.

(APC1=Apca e Apc1("azul')=Apcb)

Em síntese, verifica-se que as diferentes unidades apresentam um comportamento espectral diferenciado o que permitirá a sua individualização e delimitação cartográfica a partir dos dados radiométricos. A banda B5 é a que apresenta a melhor capacidade espectral por apresentar valores mais elevados de média e de desvio padrão. Há também uma diferença no comportamento espetral da unidade Apc1b em relação ao padrão definido pelas restantes. Avançasse como hipótese de este comportamento estar eventualmente associado a variabilidade lítica já detetada por outros autores. No esboço de Guiraud *et al*. (2010) estão representadas duas unidades evaporíticas – formação Sal Massivo e formação gipsífera do Dombe Grande (a primeira ao norte do rio Cavaco e segunda ao sul).

2.2. Composições coloridas

A capacidade dos dados radiométricos em discernir as diferentes unidades está também patente nas composições coloridas, em especial as que usam as bandas de mais elevado comprimento de onda, como é caso da composição RGB753 (figura IV.6). A análise desta figura permite extrair as seguintes considerações:

- Distingue-se nitidamente o Complexo Metamórfico das formações carbonatadas;

- As formações carbonatadas apresentam-se esverdeadas e são fáceis de serem individualização pelos aspetos estruturais e texturais característicos de cada uma;

- A formação Tuenza, ´tal como no terreno, destaca-se pela cor avermelhada;

- A formação Catumbela apresenta-se uniforme devido a dureza dos seus calcários e a boa estratificação, e com maior brilho;

- A formação Quissonde por apresentar-se muito recortada;

- O gesso, unidade evaporítica, apresenta-se em tons de azul celeste e é muito fácil de ser identificado na imagem quando aflorante, caso contrario, apresenta-se mascarado.

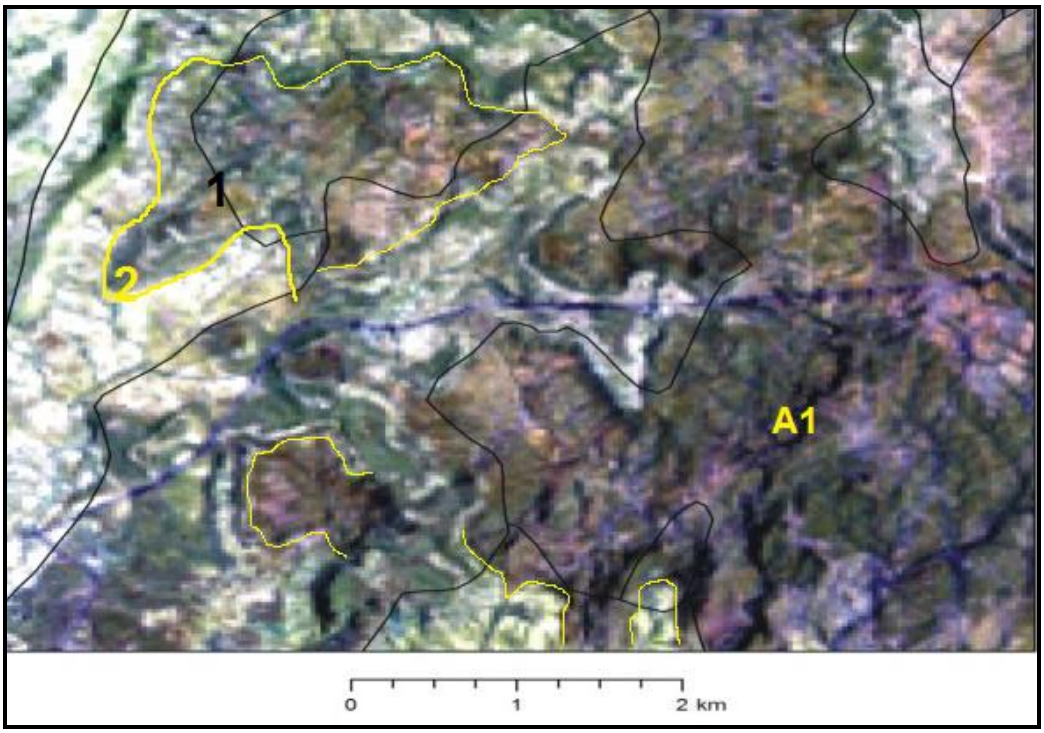


Figura IV. 6 – Composição colorida RGB_753, evidenciando o contraste de cores entre o Complexo Metamórfico (A1) e as rochas sedimentares mesozóicas da Bacia de Benguela. Também podemos ver alguns limites imprecisos traçados (cor preta) e precisos (cor amarela) na carta geológica de Angola – folhas 227 e 228.

2.3. NDVI - Índice de vegetação

Os resultados obtidos coma aplicação dos índices revelaram-se também de interesse para os objetivos do trabalho. O NDVI é, em geral, baixo na área em estudo e torna-se ainda menor em direção à costa. Está de acordo, pois, com o que se descreveu sobre a cobertura vegetal na região, escassa em particular no litoral. O valor de NDVI parece também estar associado a diferentes unidades, marcando de forma bem definida o contacto entre elas (figura IV.7); parece haver, assim, uma estrita ligação entre espécies de plantas nativas e a litologia. Os tons mais claros correspondente a vegetação mais densa e eventualmente de características mais refletoras, visível junto das linhas de água e nos contactos entre unidades litostratigráficas. Os tons mais escuros correspondem a vegetação menos densa e mais dispersa, que ocorre com maior frequência junto à faixa litoral, do tipo *gramínea* e catos.

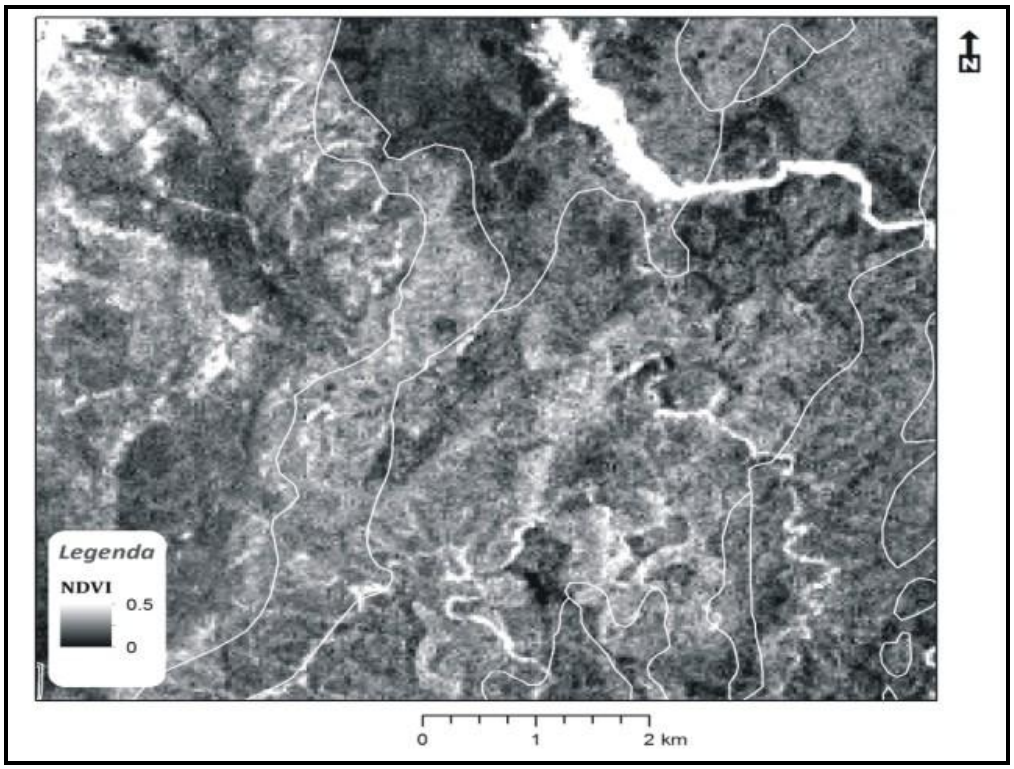


Figura IV. 7 - NDVI - Índice de Vegetação da Diferença Normalizada: Os tons mais claros correspondente a vegetação mais densa e eventualmente de características mais refletoras.

2.4. Índice de Abrams

O índice de Abrams foi particularmente útil para identificar os contactos e, inclusivamente, para diferenciar algumas unidades (e.g. o Complexo Metamórfico - A1 - das formações sedimentares carbonatadas). As formações sedimentares carbonatadas apresentam-se em azul, e o vermelho observado ao longo da costa poderá já corresponder á ocorrência de materiais ricos em óxidos de ferro, possivelmente associados a depósitos de idade quaternária parcialmente desmantelados pela erosão. A cor rosa corresponde a formação Tuenza que, rica também em níveis argilosos e ferruginosos.

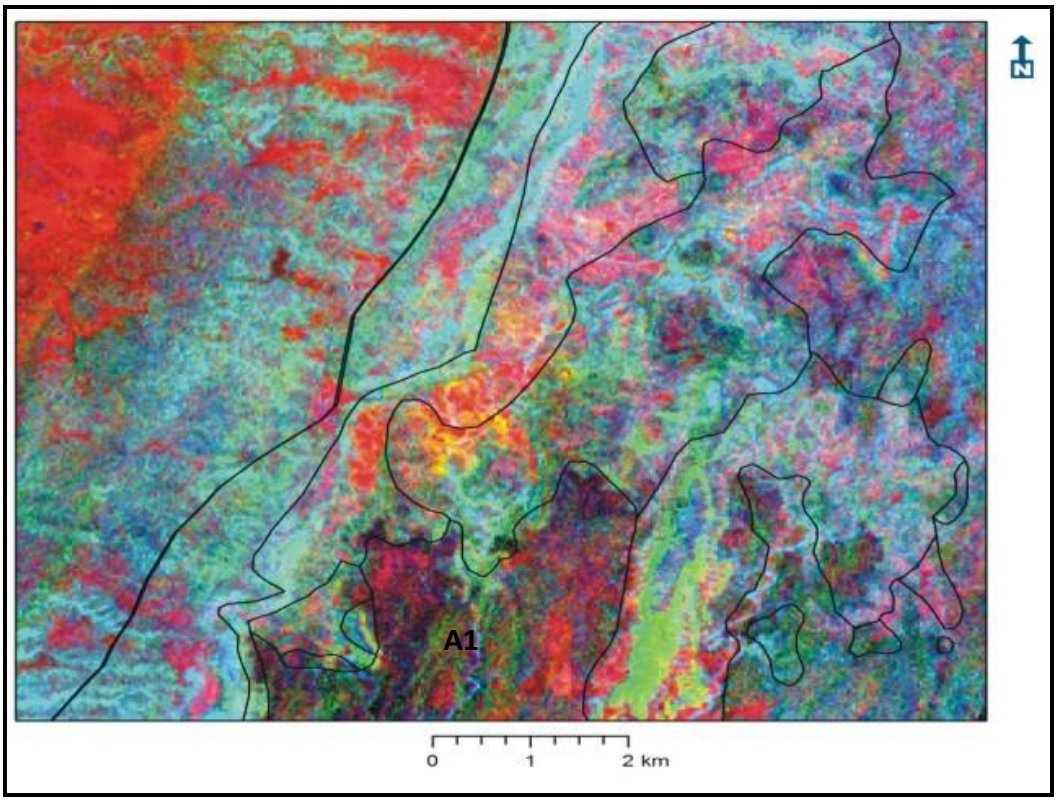


Figura IV. 8 - Imagem obtida pela aplicação do algoritmo Abrams Ratio.

Na base do processamento digital dos dados espaciais conclui-se, pois, ser possível a discriminação das várias unidades geológicas ocorrentes na área, embora o grau de afastamento entre estas é muito diverso. O Complexo Metamórfico e as unidades sedimentares Apc1a e Apc1b, parecem, da análise anterior, com as de mais fácil discriminação radiométrica.

3. Classificação

A aplicação das técnicas de classificação, condicionada pela informação geológica disponível por atribuição de clusters representativos de cada uma das unidades em 538 locais dispersos na área objeto de estudos detalhados, e validada por aplicação da matriz de confusão, permitiu obter os resultados expressos na tabela IV. 3. Num universo de 538 amostras, foram corretamente classificadas em 94,8%, 99,3 e 97%, para Apc1a, Apc1b e A1 respetivamente, o que é revelador do excelente resultado obtido e dá confiança na extensão do

reconhecimento radiométrico para áreas contíguas nas quais não existe presentemente dados cartográficos disponíveis.

Tabela IV.3 - Dados resultantes da validação da área em estudo por aplicação da matriz de confusão

	Apc1a	%	Apc1b	%	A1	%
Amostras corretamente classificadas	510	95	534	99	522	97
Amostras incorretamente classificadas	28	5	4	1	16	3
Kappa	0.92		0.96		0.88	
Erro da média absoluta	0.05		0.01		0.05	
Erro quadrado da média	0.17		0.08		0.17	
Erro relativo absoluto	14%		7%		22%	
Erro absoluto relativo	37.%		27%		47%	
Nº total de amostras	538	100	538	100	538	100

Abaixo, na figura IV.9 Ilustra-se a possível distribuição espacial dos níveis salinos Apc1b integrados na unidade designada por Apc1 (formação do Sal Massivo), aparentemente de maior expressão espacial na região norte. Seria necessário agora efetuar um novo reconhecimento geológico no terreno para avaliar a qualidade do resultado obtido exclusivamente por processamento digital de dados espaciais.

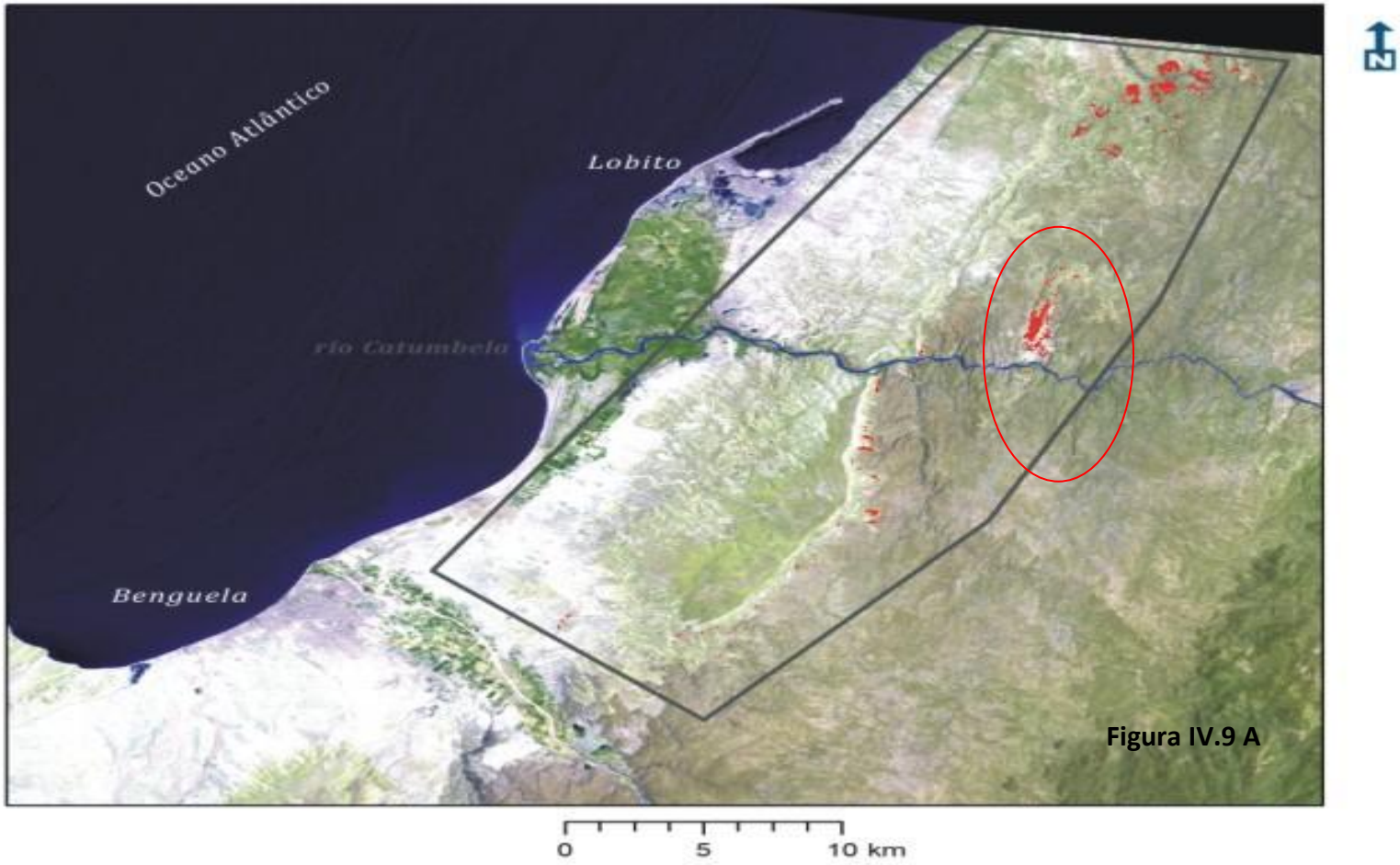


Figura IV.9 A

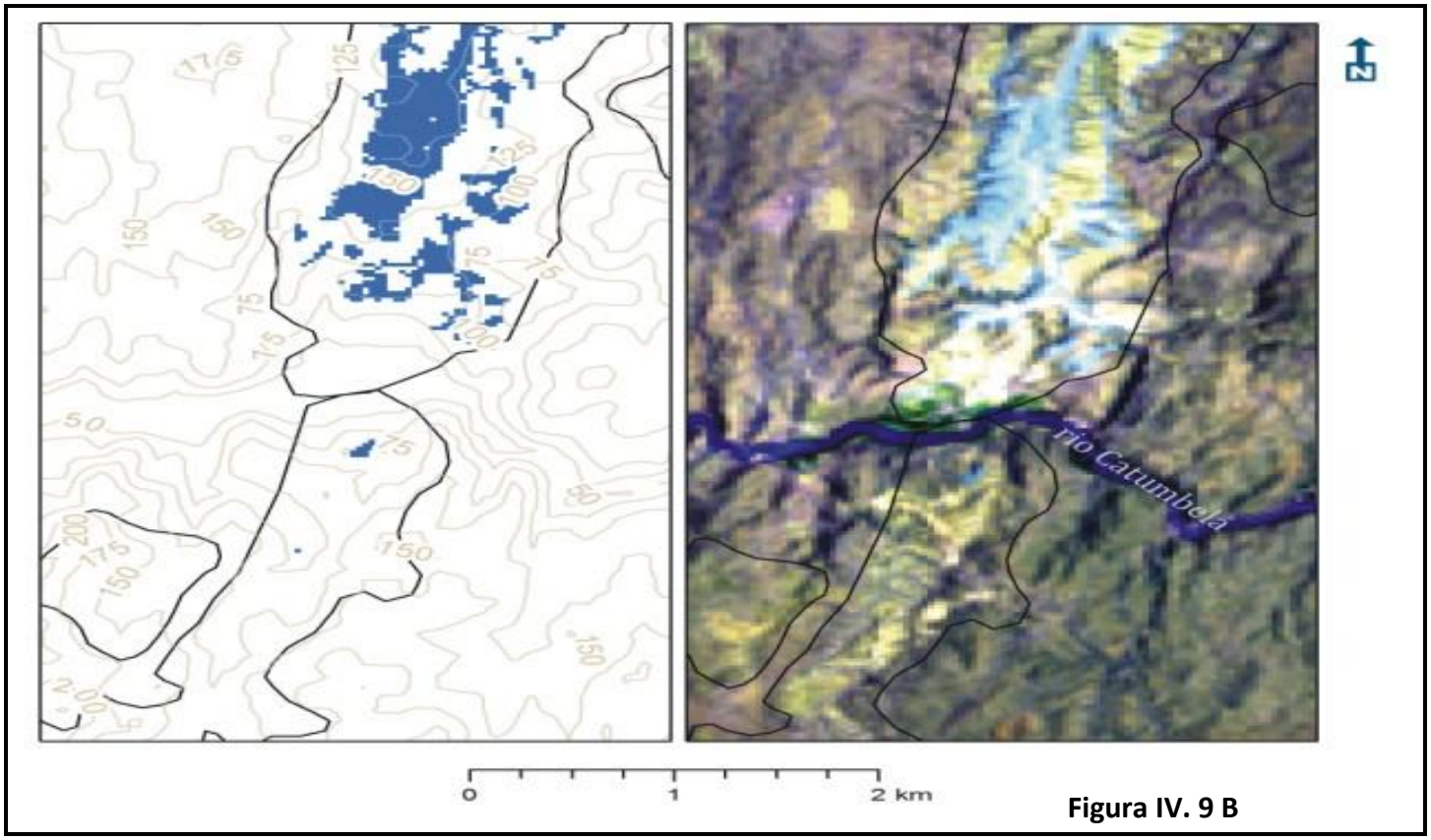


Figura IV. 9 – A: Distribuição dos níveis estratigráficos compostos por sal (formação Sal Massivo), a vermelho, na região entre o norte do Lobito e o Rio Catumbela. B: Pormenor de uma dessas ocorrências, circundada a vermelho, na imagem A.

V. CONCLUSÕES

Como resultado deste estudo sobre a aplicação da Deteção Remota à Cartografia geológica, concluímos:

A Deteção Remota constitui uma ferramenta bastante útil numa fase preliminar pois permite antever o que se irá encontrar e detalhar no terreno;

Análise espectral revela diferenças mensuráveis entre unidades, permitindo a exploração desta tecnologia na cartografia da área de estudo;

A cartografia constante na Carta Geológica do Lobito é discordante em inúmeros locais da interpretação possível com os dados de satélite;

A formação sal massivo (figura IV.9) é facilmente identificável pelos métodos descritos, sendo a estimativa a área aflorante de Sal, na área de estudo em 4.38 km^2;

Subsistem dúvidas resultantes da enorme variabilidade visível nas imagens de satélite e que resulta da geologia e não da ocupação humana ou vegetação (embora esta última a torne mais evidente em diferentes casos). Estudo em aberto mas que revela enorme potencial das técnicas inclusivamente em áreas com cartografia já realizada.

VI. REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS

ANTUNES, M. (1964) – O Neocretácico e o Cenozóico do litoral de Angola. Junta Investigação do Ultramar, vol. 2, pp. 122-254.

BROWNFIELD, E. M. & CHARPENTIER, R. R. 2006. Geology and Total Petroleum Systems of the West-Central Coaster Province (1203), West África: U.S. Geological Survey Bulletin 2207 – B, 52 p..

BUTA NETO, A., DA SILVA TAVARES, T., QUESNE, D., GUIRAUD, M., MEISTER, C., DVID, B. & MORAIS, L. 2006. Synthèse préliminary des travaux menés sur le bassin de Benguela (Sud de Angola): implications sédimentologiques, paléontologuiques et structurales. Africa Geociences Review, vol.13, nº.3, pp 239-250.

CAVITA, J.R.R. 2011. As unidades carbonatadas cretácicas da região do Lobito (Angola). Caracterização e importância no ordenamento do território. Tese de Mestrado em Geociências, Departamento de Ciências da Terra da Universidade de Coimbra, 80p.

CHANDER,G. M., MARKHAM, B. L.,. HELDER, D. L. 2009.Summary of current radiometric calibration coefficients for Landsat MSS, TM, ETM+, And EO-1 ALI sensors National Aeronautics and Space Administration (NASA) Goddard Space Flight Center (GSFC), Greenbelt, MD 20771, USA,South Dakota State University (SDSU), Brookings, SD 57007, 11p

CHIQUETE, P. 2012. Aplicação de técnicas de deteção remota à cartografia temática: o caso da região do Lobito (Angola). Tese de Mestrado em Geociências, Departamento de Ciências da Terra da Universidade de Coimbra, 103 p.

DUARTE-MORAIS, M. L. & SGROSSO. I. (1992) – Alcune Considerazione Sul Cretacico Superiore nei dintornu de Benguela (Angola). In: M Atti Coferenza Scientifica Annuale. Dipartimento Scienza Della Terra. Universitá Napoli, pp. 245-247.

DUARTE-MORAIS, M. L., & SGROSSO. 2000. The Meso-cenozoic succession of the Benguela Basin exposed surroundings of Benguela between Lobito and Dombe Grande. Guide book post-Congress Geoluanda. 2000: Luanda-Benguela-Dombe Grande, 24 p.

FONSECA, A. & FERNANDES, J. 2004. Detecção Remota. 1ª Edição. Lisboa: Lidel.

GALVÃO, C. F. & PORTUGAL, A. (1971). Carta Geológica do Lobito à escala 1:100.000. Direcção Provincial dos Serviços de Geologia e Minas.

GALVÃO, C. F. & SILVA, Z. 1972. Notícia explicativa da Folha 227-228 Lobito da Carta Geológica de Angola, à escala 1:100000. Direcção Provincial dos Serviços de Geologia e Minas, 40p..

GARCÍA, M., BRONDO, J. & PÉREZ, M. 2012 Satélites para deteção remota aplicada à Gestão Territorial (Tradução: Artur Gil). Projeto SATELMAC, Programa de Cooperação Transnacional Madeira – Açores - Canárias -2007-2013 (PCT-MAC). Co-financiado pelo Fundo Europeu para o Desenvolvimento.

GORINI, M.A., 1981. The tectonic fabric of the Equatorial Atlantic and adjoiningcontinental margins: Gulf of Guinea to northeastern Brazil. In: Asmus, H.E. (Ed.),Estructuras e tectonismo da margem continental brasileira, e suas implicações nos processos sedimentares e na avaliação do potencial de recursos minerais. Projecto-Reconhecimento global da margem continental brasileira. Petrobras,Rio de Janeiro, pp. 11 – 116.

GRADSTEIN, F. M., OGG, J.G., SCHMITZ, M., OGG, G., 2012. The Geologic Time Scale. ElsevierScience Limited . 1152 pp.

GUIRAUD, M., BUTA-NETO, A. & QUESNE, D. 2010. Segmentation and differential post-rift uplift at the Angola margin as recorded by the transform – rifted Benguela and oblique-to-orthogonal-rifted Kwanza basins. Marine and Petroleum Geology, vol. 27, pp. 1040-1068.

GUIRAUD, M., QUESNE, D., MORAIS, M. L., AMARAL J., DIAKIESE, M. & LANG, J. 2000. Caractérisation de la tectonique salifère albienne à partir de donnée terrain (Secteur de Catumbela, domaine onshore de la marge sud-angolaise). Africa Geoscience Review, vol. 8, pp. 10-22.

GUIRAUD, R. & MAURIN, J. C. 1991. Le rifting en Áfrique au crétacé inferieur: Synthèse structural, mise en evidence de deux phases dans la genèse des basins, relations avec les ouvertures océaniques péri-africaines. Bull. Soc. Géol. France, vol. 165 (5), pp. 811-823.

HOLDEN, E. 2010. Aplicação da detecção remota à cartografia geológica e do uso do solo na região do Lubango, Angola. Tese de Mestrado em Geociências, Departamento de Ciências da Terra da Universidade de Coimbra, 67 p..

INAGEO (INSTITUTO NACIONAL DE GEOLOGIA). 1982. Carta geológica de Angola, à escala 1:250.000. Direcção Provincial dos Serviços de Geologia e Minas.

JUOZAPAVIČIUS, V. RAPŠEVIČIUS. 2001. Clustering through Decision Tree Construcyion in Geology, Nonlinear Analysis: Modelling and Control, Vol.6, Nr.2, p. 29-41.

LE PICHON, X., AND HAYES, D. E. 1971. New pole for early opening of South Atlantic. *J. geophys. Res.*, 76, 6283–6293

MANTAS, V.M., PEREIRA, A.J.S.C., NEVES, L.J.P.F. 2012. Melhoramento de um produto de refletância de superfície empírico e sua aplicação à classificação de imagens multiespectrais no apoio à cartografia geológica, 46º Congresso Brasileiro de Geologia / 1º Congresso de Geologia dos Países de Língua Portuguesa, Santos, São Paulo, 30 de Setembro – 5 de Outubro, 2012.

NETO, M. G. M. 1961. As bacias sedimentares de Benguela e Moçamedes. Serviços de Geologia e Minas de Angola, 7 p..

NETO, M. G. M. 1958. Geologia da Região de Benguela – Cuio. Relatório inédito dos serviços de Geol. E Minas de Angola, 59 p..

QUESNE, D., BUTA-NETO, A., BERNARD, D. & GUIRAUD, M. 2009 Distribution of Albian clastic deposits in the Benguela basin (Angola): evidence of a Benguela palaeocurrent? Bull. Soc Geol France, vol. 180 (2), pp. 117-129.

RABAÇA, T. J. L. 2001. Caracterização Geoambiental da Região de Penamacor – Idanha por Aplicação de Técnicas de Detecção Remota. Coimbra. Tese de Mestrado em Geociências, Departamento de Ciências da Terra da Universidade de Coimbra, 226 p..

RABAÇA, T., CONDE, L., & PEREIRA, A. 2004. Avaliação das potencialidades de técnicas de detecção remota como suporte á cartografia geológica na região central de Portugal. Revista Eletrónica de Ciências da Terra ISSN 1645-0388.volume 2.(http://e-terra.geopor.pt).

SABINS, F. F. 1997. Remote Sensing. Principles and Interpretation. 3rd Edition. New York: W.H. Freeman and company.

SEGUNDO, J. 2011. Análise Sedimentológica e Estratigráfica da Formação Quissonde (Albiano Superior) na Região do Lobito (Angola). Tese de Mestrado em Geociências, Departamento de Ciências da Terra da Universidade de Coimbra,98p..

SOMA, E. 2011. Caracterização faciológica e litostratigráfica das unidades cretácicas ao longo do rio Catumbela – Lobito (Angola). Tese de Mestrado em Geociências, Departamento de Ciências da Terra da Universidade de Coimbra, 66 p..

STARK, D. M. & SCHLUMBERGER GROUP (1991) - Well Evaluation Conference of Angola: Petroleum Geology. INGEO, Luanda, 95p

TAVARES, T. 2006. Ammonites et Échinides de l'Albien du basin de Benguela (Angola). Systématique, Biostratigraphie, paléogeéographie et paléoenvironnement. Tese de doutoramento não publicada, Université de Bourgogne, Dijon, France, 380 p.

TAVARES, T., MEISTER, C., DUARTE-MORAIS, M.L. & DAVID, B. 2006. Albian ammonites of the Benguela Basin (Angola): a biostratigraphic Framework. South. Afr. J. Geol., vol. 110, pp. 137–156.

TORSVIK, T. H., ROUSSE, S., LABAILS, C. & SMETHURST, M. A. 2009. A new scheme for the opening of the South Atlantic Ocean and the dissection of and Aptian salt basin. *Geophys. J. Int.* 177p, 1315–1333

VENÂNCIO, P. N. G. 2007. Aplicação de Dados de Detecção Remota à Cartografia Geológica da Região de Viseu. Coimbra: Departamento de Ciências da Terra da Faculdade de Ciências e Tecnologia da Universidade de Coimbra. Tese para obtenção de Licenciatura em Geologia (Ramo Científico)

http://earthexplorer.usgs.gov

http://glovis. usgs.gov e http://landsat.gsfc.nasa.gov/ education

http://landsat.usgs.gov/index.php. GS Landsat Project [WebPage]. Acedido pela última vez em 20-07-2013