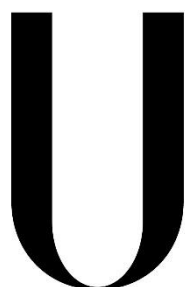


**Universidade de Lisboa**

**Instituto de Geografia e Ordenamento do Território**



**LISBOA**

---

UNIVERSIDADE  
DE LISBOA

**Cartografia da Perigosidade e Suscetibilidade de Ocorrência de Seca em  
Cabo Verde a Partir de Informação Obtida por Deteção Remota**

Carlos Albertino Borges dos Santos

**Dissertação**

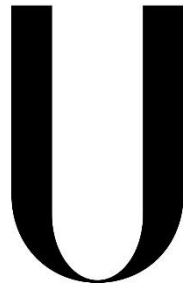
**Orientado pelo Prof. Doutor António Manuel Saraiva Lopes**

**Mestrado em Sistemas de Informação Geográfica e Modelação Territorial Aplicados  
ao Ordenamento**

**2016**

**Universidade de Lisboa**

**Instituto de Geografia e Ordenamento do Território**



**LISBOA**

---

UNIVERSIDADE  
DE LISBOA

**Cartografia da Perigosidade e Suscetibilidade de Ocorrência de Seca em  
Cabo Verde a Partir de Informação Obtida por Deteção Remota**

**Carlos Albertino Borges dos Santos**

**Dissertação**

**Orientado pelo Prof. Doutor António Manuel Saraiva Lopes**

**Mestrado em Sistemas de Informação Geográfica e Modelação Territorial Aplicados  
ao Ordenamento**

Júri:

Presidente: Professor Doutor Eusébio Joaquim Marques dos Reis do Instituto de Geografia e Ordenamento do Território

Vogais:

Professor Doutor José Alexandre Varanda Andrade, do Departamento de Geociências da Universidade de Évora

Professor Doutor Eusébio Joaquim Marques dos Reis do Instituto de Geografia e Ordenamento do Território

Professor Doutor António Manuel Saraiva Lopes do Instituto de Geografia e Ordenamento do Território

**2016**

## **Agradecimentos**

Os meus sentidos e sinceros agradecimentos:

A minha mãe por ter proporcionado a oportunidade de estudar até aqui e por todo o esforço físico, psicológico e financeiro que tem feito por mim durante toda a minha vida.

Ao professor António Lopes, primeiro pelo convite para participar no projeto que deu origem a esta dissertação "Comprehensive Hazard Assessment and Mapping in Cape Verde. Drought Risk Assessment", financiado pela PNUD, segundo por ter aceitado ser o meu orientador, e por último pela paciência que teve para comigo durante toda a sua realização.

Ao professor Ezequiel Correia pelas palavras de incentivo e contributo científico.

Ao Instituto Nacional de Meteorologia e Geofísica de Cabo Verde, em particular à delegação da Praia por ter disponibilizado os dados de precipitação mensal, sem o qual não seria possível a realização deste trabalho.

Aos meus colegas e amigos, Ana Rita Garcia, Laise Fortes, Max Anjos, Nazenine Salgueiro e Sara Lajes pelo apoio, incentivo e pela ajuda na revisão do texto.

A todos os que contribuíram de forma positiva para a minha vida académica.



## **Resumo**

Este trabalho foi desenvolvido no âmbito do projeto titulado de “Comprehensive Hazard Assessment and Mapping in Cape Verde. Drought Risk Assessment”, financiado pelo Programa das Nações Unidas para o Desenvolvimento (PNUD) e visa contribuir para o enriquecimento do conhecimento científico das secas no Arquipélago de Cabo Verde.

O Arquipélago encontra-se localizado numa vasta zona de clima árido e semiárido que atravessa o continente africano deste o Atlântico até ao Mar Vermelho e se prolonga pela Ásia, ou seja, entre o anticiclone dos Açores e a linha de convergência intertropical, e portanto no meio dos alísios, que faz com que o Arquipélago de Cabo Verde possua um clima marcado por temperaturas elevadas durante todo o ano, e a precipitação concentrada de Julho a Novembro, onde a seca é um fenómeno recorrente.

A seca meteorológica pode ser definida como sendo o desvio negativo da precipitação em relação ao seu normal e é geralmente caracterizado pela sua duração, magnitude e frequência de ocorrência. Tem normalmente impactos negativos sobre diversos setores da sociedade como a agricultura, a eletricidade, o turismo e os transportes.

O fenómeno de seca está relacionado com a gestão de risco e segurança alimentar, e portanto, a sua monitorização é indispensável nesta região. Apesar das incertezas das projeções sobre as alterações climáticas, alguns modelos apontam para um aumento de número de eventos de secas durante o corrente século, tornando ainda mais pertinente a sua análise.

As lacunas existentes nas séries de dados de precipitação conjuntamente com a fraca cobertura espacial das estações meteorológicas não permitem uma análise do fenómeno em estudo seja baseada apenas na análise da precipitação. Por isso, propõe-se aqui uma metodologia baseada em métodos tradicionais de identificação de episódios de secas como o índice *Standardized Precipitation Index* (SPI), aliada a outras variáveis como a posição geográfica do arquipélago, o índice de vegetação *Normalized Difference Vegetation Index* (NDVI), a altitude e a exposição das vertentes relativamente aos ventos alísios.

Os testes realizados para aferir o grau de correlação entre a precipitação e o NDVI permitem que este último possa ser utilizado como um fator de predisposição na análise de suscetibilidade de ocorrência de seca em Cabo Verde.

Com a aplicação do índice SPI foi possível identificar um total de 209 episódios de secas entre 1962 e 2013, dos quais 114 foram moderados, 43 severos e 53 extremos. Em termos cronológico verifica-se a crise dos anos 70 e registo de episódios pontuais no início dos anos 80 e 90 e uma sucessão de anos normais ou húmidos no século XXI. A avaliação de suscetibilidade permitiu chegar a conclusão que cerca de 80% do território do arquipélago possui uma suscetibilidade elevada de ocorrência de seca.

**Palavras-chave:** Secas, Cartografia, Standardized Precipitation Index, Normalized Difference Vegetation Index, Cabo Verde.

**Abstract** - Droughts in Cape Verde Archipelago: Cartography of Hazard and Susceptibility based on Remote Sensing.

This dissertation was developed in the scope of the project “Comprehensive Hazard Assessment and Mapping in Cape Verde. Drought Risk Assessment”, financed by the United Nations Development Programme (UNDP) and aims to contribute to the enrichment of scientific knowledge of droughts in the archipelago of Cape Verde.

The archipelago is located in a vast zone of arid and semi-arid climate under the influence of the trade winds, crossing the African continent from the Atlantic Ocean to the Red Sea. Depending on the time of the year, the Cape Verde archipelago is influenced by the Azores high or the Intertropical Convergence Zone, which mean has a climate marked by high temperatures throughout the year and rainfall concentrated between July and November, although droughts are a recurrent phenomenon.

Meteorological drought may be defined as the negative deviation of precipitation in relation to its normal values and is usually characterized by its duration, severity and frequency and has usually negative impact on different sectors such as agriculture, energy, tourism and transport.

The drought phenomenon is related to risk management and food security and thus its monitoring is essential in this region. Despite the uncertainties of climate change projections, some models point out to an increase of the number of drought events during the current century making its analysis even more relevant.

The gaps in rainfall data series and the poor spatial coverage of weather stations do not allow a detailed spatial analysis. The methodology presented in this research is based on traditional methods of drought identification, such as the Standardized Precipitation Index (SPI), combined with a new approach that uses other variables, such as the Normalized Difference Vegetation Index (NDVI), the geographical position of the archipelago, the altitude and the exposure to the trade winds.

To assess the susceptibility of the islands to these events, several tests based on regression techniques were taken to verify the degree of association between precipitation and NDVI. The SPI calculations for the period between 1962 and 2013 allowed the identifications of 209 drought episodes, of which 114 were moderate, 43 severe and 53 extreme. Chronologically, the crisis of the 1970s, occasional episodes

recorded at the beginning of the 1980s and 90s and a succession of normal and wet years in the twenty-first century were identified.

The susceptibility evaluation led to the conclusion that about 80% of the archipelago's territory has a high susceptibility to drought.

**Key-Words:** Droughts, Cartography, Standardized Precipitation Index, Normalized Difference Vegetation Index, Cape Verde.

<b>Índice Geral</b>	
<b>Agradecimentos</b> .....	I
<b>Resumo</b> .....	III
<b>Abstract</b> .....	V
<b>Índice Geral</b> .....	VII
<b>Índice de figuras</b> .....	IX
<b>Índice de tabelas</b> .....	X
<b>Acrónimos e Abreviaturas</b> .....	XI
<b>CAPÍTULO I – INTRODUÇÃO E ENQUADRAMENTO</b> .....	1
<b>1. Introdução</b> .....	1
<b>1.1. Motivação e Objetivos</b> .....	3
<b>1.2. Estrutura da dissertação</b> .....	3
<b>2. Estado da arte</b> .....	5
<b>2.1. As secas</b> .....	5
<b>2.1.1. Definições</b> .....	5
<b>2.1.2. Tipos de Secas</b> .....	6
<b>2.1.3. Os Índices de Secas</b> .....	7
<b>2.1.4. O índice utilizado neste trabalho: Standardized         Precipitation Index (SPI)</b> .....	12
<b>2.2. Índices de vegetação</b> .....	15
<b>2.2.1. Normalized Difference Vegetation Index (NDVI)</b> .....	20
<b>3. Enquadramento geográfico do arquipélago de Cabo Verde</b> .....	22
<b>3.1. Caracterização geográfica</b> .....	22
<b>3.2. Regime médio anual da precipitação de Cabo Verde (1962-2013)</b> ..	26
<b>3.3. Histórico de eventos de seca</b> .....	28
<b>CAPITULO II – DADOS e METODOLOGIA</b> .....	29
<b>1. Dados</b> .....	29
<b>1.1. Precipitação</b> .....	30
<b>1.1.1. Análise exploratória das séries de precipitação</b> .....	31
<b>1.2. NDVI</b> .....	33
<b>1.2.1. NDVI obtido pelo sensor MODIS</b> .....	33
<b>1.2.2. NDVI obtido a partir do SPOT-VEGETATION</b> .....	35

1.3. Modelo Numérico de Elevação.....	39
1.4. Exposição.....	42
1.5. Cartas agrícolas.....	42
1.6. Cartas de vegetação .....	43
2. Metodologia e Processos de Integração da Informação .....	44
2.1. Identificação de eventos de seca associado à precipitação .....	45
2.1.1. Cálculo do SPI.....	45
2.1.2. Severidade e frequências de ocorrência de secas .....	47
2.1.3. Determinação e espacialização de limiares de precipitação .....	47
2.2. Determinação de perigosidade .....	52
2.3. Identificação de episódios de secas através do stresse vegetativo.....	53
2.4. Determinação de suscetibilidade de ocorrência de secas .....	54
<b>CAPITULO III – DISCUSSÃO DOS RESULTADOS .....</b>	<b>57</b>
1. Eventos de seca de 1962/3 a 2012/2013 .....	57
2. Análise de limiares de precipitação.....	59
3. Análise da perigosidade de seca.....	62
4. Relação entre precipitação e vegetação.....	67
5. Análise do stresse vegetativo .....	69
6. Análise da suscetibilidade de ocorrência de secas .....	71
<b>CAPITULO IV – CONCLUSÕES FINAIS E TRABALHOS FUTUROS.....</b>	<b>77</b>
<b>Bibliografia .....</b>	<b>80</b>
<b>Anexos.....</b>	<b>87</b>
<b>Anexo I - Número de secas ocorridos por ano de 1962 a 2012, em     Cabo Verde.....</b>	<b>87</b>
<b>Anexo II - Número de secas por estações meteorológicas ocorridos de 1962 a     2013, em Cabo Verde.....</b>	<b>88</b>
<b>Anexo III - Limiares de precipitação (mm) correspondente a cada grau de     severidade de seca durante a estação das chuvas.....</b>	<b>89</b>

## Índice de figuras

Figura 1 – Radiância espectral de três tipos fundamentais de cobertura .....	16
Figura 2 – Localização do arquipélago de Cabo Verde.....	23
Figura 3 - Precipitação média anual do arquipélago de 1962 a 2013 .....	26
Figura 4 - Precipitação média mensal do arquipélago de 1962 a 2013 .....	27
Figura 5 - Precipitação das estações da Serra Malagueta e do Chão Bom de 1962 a 2013.....	28
Figura 6 - Estações meteorológicas utilizadas na análise de seca em Cabo Verde.....	33
Figura 7 - Evolução temporal de NDVI SPOT VS NDVI MODIS na estação de S. Jorge dos Órgãos (Santiago).....	37
Figura 8 - NDVI médio de 2000 a 2012.....	38
Figura 9 - Modelo numérico de elevação.....	41
Figura 10 - Cartas vegetação de Cabo Verde.....	44
Figura 11 - Esquema metodológico do trabalho .....	45
Figura 12 - Relação entre SPI 4 e precipitação acumulada na estação de Água das caldeiras (Ilha de Santo Antão) .....	48
Figura 13 - Variogramas: a) Santiago; b) Fogo; c) Brava .....	51
Figura 14 - Fases na determinação de perigosidade de ocorrência de seca em Cabo Verde.....	53
Figura 15 - Calendário de eventos de secas de 1962 a 2013 em Cabo Verde .....	58
Figura 16 - Limiares de precipitação para cada grau de severidade.....	61
Figura 17 – Probabilidade de ocorrência de Seca Moderada .....	64
Figura 18 - Probabilidade de ocorrência de Seca Severa .....	65
Figura 19 - Probabilidade de ocorrência de Seca Extrema.....	66
Figura 20 - Correlação entre a precipitação e o NDVI.....	68
Figura 21 - Evolução temporal de SPI 4 e NDVI Desvio na estação de S. Domingos (Ilha de Santiago) .....	69
Figura 22 - Evolução de SPI 4 e NDVI Desvio entre 2000 e 2012, nos meses da estação das chuvas na estação de S. Domingos (Ilha de Santiago) .....	71
Figura 23 - Frequência das classes de suscetibilidade de ocorrência de seca em Cabo Verde.....	72
Figura 24 - Suscetibilidade de ocorrência de seca nas ilhas de barlavento .....	73

Figura 25 - Suscetibilidade de ocorrência de seca nas ilhas rasas .....	74
Figura 26 - Suscetibilidade de ocorrência de seca nas ilhas de sotavento .....	75

## **Índice de tabelas**

Tabela 1 – Sumário de índices de seca meteorológica apresentados na bibliografia consultada.....	9
Tabela 2 – Sumario de índices de seca agrícola apresentados na bibliografia consultada.....	11
Tabela 3 – Categorias de SPI.....	13
Tabela 4 – Sumário de índices de vegetação apresentados na bibliografia consultada.....	18
Tabela 5 – Variáveis e fontes de dados utilizados.....	29
Tabela 6 - Estações meteorológicas disponibilizadas pelo INMG .....	32
Tabela 7 - Características das imagens SPOT-VEGETATION .....	36
Tabela 8 – Octantes de exposição de vertentes.....	42
Tabela 9 - Escalas temporais utilizadas no cálculo do SPI em Cabo Verde .....	46
Tabela 10 - Graus de severidade da seca de acordo com Mckee et al. 1993 .....	47
Tabela 11 - Estimativas dos parâmetros da validação cruzada para os semivariogramas ajustados aos limiares de precipitação para cada grau de severidade .....	62

## **Acrónimos e Abreviaturas**

ASTER – Advanced Spaceborne Thermal Emission and Reflection Radiometer

GDEM – Global Digital Elevation Model

CIT – Convergência Intertropical

DGA – Direção Geral do Ambiente

DN – Digital Number

EC – Estação das Chuvas

ECA – Estação das Chuvas Alargada

EOS – Earth Observing System

EVI – Enhanced Vegetation Index

FAO – Food and Agriculture Organization of the United Nations

IDW – Inverse Distance Weighted

INMG – Instituto Nacional De Meteorologia e Geofísica de Cabo Verde

METI – Japan Ministry of Economy, Trade and Industry

MODIS – Moderate-Resolution Imaging Spectroradiometer

MVC – Maximum Value Composite

NASA – National Aeronautics and Space Administration

NDVI – Normalized Difference Vegetation Index

NIR – Near Infrared (Infravermelho Próximo)

NOAA-AVHRR – National Oceanic and Atmospheric Administration - Advanced Very High Resolution Radiometer

OMM – Organização Meteorológica Mundial

ORSTOM – Office de la Recherche Scientifique et Technique Outre-Mer

PDSI – Palmer Drought Severity Index

PNUD – Programa das Nações Unidas para o Desenvolvimento

RMSE – Root Mean Square Error

RMSSE – Root Mean Square Standardized Error

SE – Seca Extrema

SM – Seca Moderada

SS – Seca Severa

SPEI – Standardized Precipitation - Evapotranspiration Index

SPI – Standardized Precipitation Index

SRTM DTED – Shuttle Radar Topography Mission Digital Terrain Elevation Data

SWIR - Short-wave infrared

TIN – Triangular Irregular Network

USGS – United States Geological Survey

VCI – Vegetation Condition Index

## **CAPÍTULO I – INTRODUÇÃO E ENQUADRAMENTO**

### **1. Introdução**

Este trabalho foi desenvolvido no âmbito do projeto "Análise e Cartografia da Perigosidade em Cabo Verde", do Programa das Nações Unidas para o Desenvolvimento (PNUD), e pretende contribuir para a avaliação da perigosidade e suscetibilidade à ocorrência de secas em Cabo Verde baseada na construção de um SIG climático onde as variáveis foram especializadas através de métodos estatísticos e geoestatísticos. Para colmatar o problema da inexistência de dados que quantifiquem a disponibilidade de água, a falta de homogeneidade e a fraca qualidade de algumas séries de precipitação, propõe-se uma metodologia conjunta baseada no índice SPI, em imagens de satélite e índices de vegetação que traduzam a disponibilidade de água nos ecossistemas das ilhas do arquipélago.

Zêzere (2005) define a perigosidade como sendo a probabilidade de ocorrência de um fenómeno potencialmente destruidor, num determinado período de tempo e numa dada área. A suscetibilidade pode ser entendida como a probabilidade espacial de ocorrência de um determinado fenómeno num dada área com base nos fatores condicionantes do terreno, independentemente do seu período de retorno.

As análises realizadas no quadro dos estudos sobre os efeitos adversos atuais e pontuais das alterações climáticas em Cabo Verde apontam para a variabilidade e a aleatoriedade pluviométrica como uma das características mais marcantes das condições climáticas do país, que de forma transversal comporta impactos em todos os setores de desenvolvimento socioeconómico. A má distribuição espaço-temporal das chuvas, associadas às frequentes ocorrências da bruma seca e aos condicionalismos naturais e ambientais pouco favoráveis requerem ações de intervenção com base em medidas de adaptações prioritárias visando mitigar os impactos direto dos fenómenos biofísicos (INMG, 2007).

Neste trabalho, o estudo de eventos de secas, passou numa primeira fase, pela sua identificação, determinação da sua magnitude e frequência de ocorrência e, numa segunda fase, pela determinação da extensão das áreas suscetíveis de serem afetadas por este fenómeno, sendo este o ponto fulcral da dissertação.

São muitos os estudos que se debruçam sobre as características climáticas do arquipélago, nomeadamente sobre a precipitação. Porém, são poucos os que se concentram na análise de seca e são raros os trabalhos que incidem sobre a extensão da área afetada por este fenómeno. Por isso, esta investigação visa contribuir para o enriquecimento do conhecimento sobre a quantidade de água precipitável que cai no solo e modelar as áreas de perigosidade e suscetibilidade à ocorrência das secas no arquipélago.

Localizado numa vasta zona de climas secos que atravessam a África desde o Atlântico ao mar Vermelho e se prolonga pela Ásia, o arquipélago de Cabo Verde possui um clima semiárido, com temperatura elevadas durante todo o ano, e a precipitação muito irregular, concentrada normalmente entre Julho e Novembro (Amaral, 2007).

Os trabalhos realizados no âmbito das alterações climáticas em Cabo Verde apontam para o aumento da temperatura e diminuição da precipitação nas regiões subtropicais, no qual se insere o arquipélago e concentração de precipitação num menor número de dias (Querido, 2010). A análise das séries de temperatura e precipitação registadas em Cabo Verde estão em consonância com as tendências globais, tendo-se no entanto verificado um ciclo de elevada precipitação nos últimos anos.

Entre os perigos naturais que afetam o arquipélago de Cabo Verde, a seca assume maior relevância socioeconómica (DGA, 2004). A história do país está marcada de modo dramático pela sua ocorrência, sendo um dos mais marcantes, a seca de 1946, que tirou a vida a mais de 30 mil pessoas (EM-DAT/Cabo Verde *country profile*) e forçou muitos cabo-verdianos a emigrar para as plantações de café e cacau das ilhas de São Tomé e Príncipe.

A variabilidade espaço-temporal das precipitações e a presença de climas locais condicionadas pela orografia das ilhas e a exposição aos ventos alísios dominantes de nordeste determinam o contraste das paisagens agrícolas de uma ilha para outra, onde uma vasta região árida cobre uma superfície considerável das ilhas (INMG, 2007).

Apesar da incerteza das projeções sobre as alterações climáticas no arquipélago, alguns modelos apontam para a possibilidade do número de eventos de seca vir a aumentar durante o corrente século (Brooks, 2008; Querido, 2010), tornando ainda mais pertinente a sua análise no contexto dos perigos naturais.

## **1.1. Motivação e Objetivos**

Sendo natural de Cabo Verde, tive como principal motivação compreender a repartição temporal e espacial das secas no arquipélago, contribuindo com a construção de um SIG climático capaz de operacionalizar esta informação de uma forma eficaz.

As características naturais (solo e clima) aliadas ao fraco desenvolvimento económico do país impossibilitam a prática de agricultura de regadio em larga escala, sendo, por isso, a área em regime de cultura de sequeiro muito superior ao de regadio.

Ambos os regimes estão muito dependentes do quantitativo pluviométrico que entra no sistema de armazenamento nos solos e, nos anos de seca, a produtividade agrícola é quase nula, tendo graves repercussões na vida dos habitantes causando a fome e no passado, o aumento da mortalidade.

Como foi mencionado anteriormente são poucos os trabalhos que se dedicam a análise de secas e por isso este estudo tem como objetivos:

- I. A identificação de eventos de secas ocorridos entre os anos hidrológicos 1962/63 e 2012/13;
- II. Determinação da magnitude e frequência de ocorrências desses eventos;
- III. Determinação da perigosidade e suscetibilidade a ocorrência de secas baseada no índice de SPI e índices de vegetação obtido a partir de imagens de satélite;
- IV. Testar e validar um método baseado em imagens de satélite para a espacialização do risco de seca.

## **1.2. Estrutura da dissertação**

O presente trabalho está organizado em capítulos, secções e subsecções: depois de apresentado os objetivos e a motivação que levou à escolha do tema (Capítulo I), o estado da arte dá início à dissertação propriamente dita, sendo neste capítulo, apresentada uma panorâmica geral sobre o que de mais recente há relativamente ao tema. Optou-se por dividir este capítulo em três secções, onde se apresentam a problemática em torno da definição de secas, e uma análise objetiva de índices aplicados na sua análise, assim como índices de vegetação obtidos por satélite e que representam a inovação atual.

Na secção 3 é apresentada a área de estudo, integrando uma breve caracterização do arquipélago de Cabo Verde acompanhado da caracterização do regime de precipitação e o histórico de ocorrências de eventos de secas.

O Capítulo II é dedicado à apresentação dos dados utilizados e a metodologia seguida, expõem-se as características dos dados e a estratégia metodológica adotada, suportada por um esquema com as principais etapas do processo de integração dos dados. A apresentação dos resultados obtidos e a sua discussão é realizada no Capítulo III. Serão representados os resultados por grupos de ilhas: os do barlavento, do sotavento e as ilhas rasas.

No último Capítulo (IV) apresentam-se as conclusões e considerações finais, assim como os principais constrangimentos e limitações da metodologia adotada na realização da dissertação e trabalhos futuros.

## **2. Estado da arte**

### **2.1. As secas**

A seca é o perigo natural que causa mais prejuízo no mundo, entre 6 a 8 mil milhões de US\$ anuais (Keyantash e Dracup (2002); Rosa e Pereira (2011)). Afetam todas as zonas climáticas do planeta, mas as suas características variam consoante as regiões (Hisdal e Tallaksen, 2000). De acordo com a base de dados de EM-DAT, a seca afetou mais de 8 milhões de pessoas entre 1900 e 2013 em todo o mundo, sendo o continente africano aquele que registou o maior número de eventos (290). Porém é também neste onde se verifica o menor prejuízo financeiro.

A par da precipitação e da temperatura, as secas têm ganho relevância com a temática das alterações climáticas, mas a sua análise é muito mais complexa do que a dos dois elementos climáticos *per si*. A seca assenta na interação destes e outros elementos, como fatores antropogénicos, nomeadamente a procura dos recursos hídricos. Por isso, a análise deste fenómeno deve ser realizada de forma cuidadosa, suportada na aplicação de metodologias mais tradicionais, conjuntamente com novas metodologias, sempre condicionada pelo conhecimento das características da área de estudo (Brown et al., 2008).

Neste estudo apresentam-se algumas metodologias recentemente propostas, tais como as que utilizam índices de vegetação obtidos por deteção remota para colmatar a falta de dados de precipitação.

#### **2.1.1. Definições**

Existem atualmente múltiplas definições de seca em todo o mundo (Allaby e Garratt, 2003), que têm normalmente em consideração os impactos, a duração e a severidade das secas.

A não existência de uma definição universal e objetiva cria obstáculos na investigação, monitorização e análise deste fenómeno e, por isso, muitos estudos debruçam-se numa análise comparativa das diversas definições (Dracup et al. (1980); Wilhite e Glantz (1985); Tate e Gustard (2000); Hisdal e Tallaksen (2000)) com o intuito de encontrar pontos em comum e criar uma definição que se possa ser aplicada pelo

menos à escala duma região ou de um continente. Apresenta-se a seguir algumas dessas definições.

Mckee et al. (1993) definem a seca como sendo o desvio da precipitação em relação à média normal.

“O fenómeno de seca pode ser definido de uma forma geral como uma escassez temporária de água com causa natural, caracterizando-se por uma precipitação persistentemente abaixo da média, ocorrendo com frequência, duração e intensidade aleatórias e cuja previsão é difícil ou mesmo impossível” (Rosa e Pereira, 2011);

Para Hisdal e Tallaksen (2000) a seca, ao contrário de aridez é um fenómeno temporário e pode ser caracterizado como um desvio às condições normais.

Um período de seca pode ser definido como um intervalo de tempo, geralmente na ordem de meses ou anos, em que a humidade efetiva registada num determinado local é consistentemente inferior ao normal climático (Palmer, 1965).

A seca é uma anomalia temporária dentro da variabilidade natural e pode ser considerada como um perigo insidioso da natureza (Karavitis et al., 2011).

A seca corresponde a um decréscimo significativo de água disponível durante um longo período de tempo sobre uma vasta área, o que significa que seca deve ser considerada como um evento tridimensional caracterizado pela severidade, duração e área afetada (Tsakiris et al., 2007).

A seca pode ser um fenómeno climático recorrente, que afeta todas as zonas climáticas. No entanto os seus impactos podem diferir consoante a região. Tem como causa a deficiência de precipitação durante um longo período de tempo e deve ser considerado sempre em relação a uma média normal, isto é, como um balanço entre a precipitação e evapotranspiração numa determinada área (Bordi et al., 2001).

Neste trabalho utiliza-se a definição de Mckee et al. (1993).

### **2.1.2. Tipos de Secas**

O estudo das diversas definições levou alguns autores a subdividirem as secas em diferentes categorias. Dracup et al. (1980) agrupa as definições de secas em três categorias: meteorológica, hidrológica e agrícola, em que a primeira está relacionada com o défice de precipitação, a segunda com o escoamento e a terceira com a humidade presente no solo.

Wilhite e Glantz (1985) identificam categorias similares ao proposto por Dracup et al. (1980), sendo estas: a) as secas meteorológicas que expressam o desvio de precipitação em relação à normal num determinado período de tempo, centrando nas suas causas; b) a seca hidrológica que corresponde a deficiência de escoamento tanto superficial como subterrâneo de água, que reflete os efeitos e impactos das secas; c) a seca agrícola que se expressa em termo da humidade do solo necessário para o desenvolvimento normal de uma determinada cultura ou culturas num determinado período de tempo; d) e a seca socioeconómica que consiste no balanço entre a procura e a oferta (abastecimento) de água.

Nesta dissertação, a falta de dados que possam quantificar a humidade do solo e o nível dos reservatórios de Cabo Verde, leva-nos a estudar apenas a seca meteorológica no arquipélago.

### **2.1.3. Os Índices de Secas**

A existência de várias definições e tipos de secas levaram à criação de muitos índices para a sua avaliação e análise, que geralmente pretendem determinar o início do período seco, o grau de severidade e a sua frequência de ocorrência. Contudo, nem todos os índices possuem a capacidade de determinar estes aspetos.

São vários os estudos que apresentam uma análise dos pontos fortes e as limitações dos índices mais conhecidos e aplicados no mundo, nomeadamente os de Keyantash e Dracup (2002); Narasimhan e Srinivasan (2005); Hayes (2002); Tsakiris et al. (2007); Vicente-Serrano et al. (2010); Rosa e Pereira (2011); Mu et al. (2013).

Keyantash e Dracup (2002) avançam ainda mais nesta análise, atribuindo pesos de 2 - 8% e ponderações de 1-5 valores a critérios como robustez, flexibilidade, transparência, sofisticação, extensibilidade e dimensionalidade a cada índice. Consideram que um índice deve ser acima de tudo ser robusto, isto é, pode ser aplicado a qualquer lugar, independentemente das suas características físicas; deve ser flexível, ou seja, de simples computação; transparente no sentido que os passos no cálculo do índice sejam claro e perceptíveis; a sofisticação pode ser vista como o oposto de flexibilidade e transparência, porém é um aspecto importante na conceção e qualidade de qualquer índice, sendo que isto é possível a partir de utilização de dados adequadas e de grande qualidade. Esta análise foi aplicada a índices como o *Percent of*

*Normal, Rainfall Deciles, PCA, PDSI, DAI, RAI, SPI, Total Water Defice, Cumulatative Streamflow Anomaly, PHDSI, SWSI, CMI, Z Index, Computed Soil Moisture, SMAI, sendo que SPI, Rainfall Deciles, Total Water Defice, Computed Soil moisture foram as que obtiveram melhores resultados.*

A Tabela 1 ordenada cronologicamente apresenta uma lista de índices presentes na bibliografia consultada. Nesta tabela é dada a descrição, a informação necessária para cálculo, o tipo de seca, assim como pontos fortes e fracos e os respectivos autores de cada índice.

Tabela 1 – Sumário de índices de seca meteorológica apresentados na bibliografia consultada

<b>Índices</b>	<b>Descrição</b>	<b>Informação climática</b>	<b>Vantagens</b>	<b>Desvantagens</b>	<b>Autor</b>
<b>Cumulative Precipitation Anomaly (CPA)</b>	Calcula o desvio da precipitação em relação à média normal.	Precipitação	Avalia o desvio de cada mês estabelecendo uma comparação à média normal.	Não é possível realizar comparações entre diferentes locais; Não é claro na determinação do início da seca.	Foley, 1957
<b>Palmer Drought Severity Index (PDSI)</b>	Quantifica a seca meteorológica baseando-se em algoritmos correspondentes à humidade do solo e nas variações meteorológica.	Precipitação; Temperatura; Evapotranspiração ; Disponibilidade hídrica do solo.	Primeiro índice de seca utilizado universalmente; Eficaz na determinação de seca agrícola	Trata toda a precipitação sob a forma de chuva, quando a neve pode ser água disponível no modelo; Desenvolvido para as regiões agrícolas dos Estados Unidos.	Palmer, 1965
<b>Rainfall Anomaly Index (RAI)</b>	Consiste na atribuição de magnitude positiva e negativa para as anomalias de precipitação. Para anomalias positivas, o prefixo é positivo é utilizado a média de precipitação dos 10 registos mais elevados, no caso de anomalias negativa utilizados os 10 valores mais baixo.	Precipitação	ND	A variação interanual da precipitação tem que ser baixa, caso contrário não é aconselhável a utilização deste método; Pouco claro, quando existem lacunas de dados nas séries de precipitação.	Rooy, 1965
<b>Rainfall Deciles (Quando utilizado para estudo da seca meteorológica )</b>	Consiste na divisão da distribuição normal precipitação em decis.	Precipitação	Fácil computação; Valor de severidade para cada dia, semana, mês, ano.	Não aconselhável para regiões com forte sazonalidade climática ou clima muito seco em que 90% é excedido por largos registos com valores nulos.	Gibbs e Maher, 1967
<b>Drought Area Index (DAI)</b>	Desenvolvido com o intuito de avaliar a humidade durante a monção da Índia, quando a subcontinente recebe 75%, ou mais, da precipitação anual.	Precipitação	Tem em consideração as condições antecedentes podendo assim avaliar a persistência da seca.	Sazonal	Bhalme e Mooley 1980

<b>Reclamation Drought Index (RDI)</b>	Similar ao SPI, PDSI e ao SWSI, constitui uma ferramenta para a determinação de severidade e duração de seca, assim como a determinação do início e o fim da mesma.	Temperatura; Precipitação; Escoamento; Reservatórios; Neve	Tem em consideração tanto as características do clima como do abastecimento de água.	Calcula ao nível das bacias e não é possível fazer-se comparação de resultado entre bacias diferentes	US Reclamation States Drought Assistance Act of 1988
<b>Standardized Precipitation Index (SPI)</b>	Quantifica o défice de precipitação para diferentes escalas de tempo (normalmente 1, 3, 6, 12 e 48 meses).	Precipitação	Adaptável a múltiplas escalas de tempo; fornecendo um aviso antecipado de seca e consequentemente ajudar na avaliação da sua severidade.	Produz resultados diferentes consoante o tamanho da série, em que as séries longas tendem a aliviar a severidade das secas; O resultado de SPI para escalas de tempo longo (como 24 meses) não é confiável.	Mckee et al. 1993
<b>Effective Drought Index (EDI)</b>	Mede a acumulação de água por dia, com uma função de ponderação da passagem do tempo	Precipitação	Rápido e preciso na medição de seca de curta escala temporal; Indica o nível atual dos recursos hídricos disponíveis; Capaz de identificar secas que se prologam durante vários anos.	A seca é subestimada se a mesma ocorre logo após um período de chuvas intensas;	Byun e Wilhite, 1999
<b>Precipitation Concentration Index</b>	Indicador temporal da distribuição de precipitação (tradicionalmente à escala anual).	Precipitação	É possível identificar eventos extremos diários; Permite aferir o regime de precipitação.	O resultado depende da dimensão da série.	Martin-Vide, 2004
<b>Reconnaissance Drought Index (RDI)</b>	Similar ao SPI e SPEI. Contudo, basear-se na precipitação e evapotranspiração potencial.	Precipitação; Evapotranspiração potencial	Apropriado para a determinação de seca em caso de cenários de alterações climáticas.	Incerteza nas variáveis no <i>input</i> no cálculo de ETP.	Tsakiris, 2004
<b>Standardized Precipitation Evapotranspiration Index (SPEI)</b>	Pode ser visto como uma extensão do SPI. Porém tem em consideração a evapotranspiração, permitindo, ao contrário de SPI, perceber o efeito de temperatura nas secas.	Precipitação; Temperatura	Sensível às alterações climáticas	Sensível ao método do cálculo do ETP	Vicente-Serrano et al., 2008

<b>Percent of Normal</b>	Calcula-se através da divisão do valor da precipitação registada pela precipitação normal (tipicamente um período de 30 anos, de acordo com a recomendação da Organização Meteorológica Mundial) em percentagem.	Precipitação	Eficaz na determinação de seca para uma localidade ou estação	A distribuição de precipitação não é normal; Depende da localização e estação do ano; não é possível a comparação entre vários locais; o resultado não é normalizado.	ND
--------------------------	--	--------------	---	---	----

Tabela 2 – Sumario de índices de seca agrícola apresentados na bibliografia consultada

<b>Índices</b>	<b>Descrição</b>	<b>Informação</b>	<b>Vantagens</b>	<b>Desvantagens</b>	<b>Autor</b>
<b>Palmer Moisture Anomaly Index (Z-Index)</b>	Determina a anomalia de humidade para o mês sem ter em consideração as condições antecedentes (ao contrario do que acontece no calculo de PDSI)	Precipitação; Evapotranspiração	Rápido e eficaz na determinação de seca agrícola	Partilha das mesmas fraquezas do PDSI	Palmer, 1965
<b>Crop Moisture Index (CMI)</b>	Baseia-se na temperatura e precipitação total de cada semana, utilizando os procedimentos do cálculo de PDSI na determinação de condições de humidade da vegetação.	Evapotranspiração; Recarga dos aquíferos	Eficaz na determinação de seca agrícola a curta escala de tempo	Pouco eficaz na monitorização de secas numa longa escala temporal.	Palmer, 1968
<b>Soil Moisture Anomaly Index (SMAI)</b>	Baseia-se no método de contabilização de humidade de Thornthwaite.	Precipitação; Evapotranspiração potencial.	ND	ND	Bergman et al. 1988
<b>Soil Moisture Deficit Index (SMDI)</b>	Calcula a seca agrícola numa escala de tempo semanal, sem depender da sazonalidade ou tipo de clima.	Humidade do solo	Eficaz na determinação de seca agrícola a curta escala de tempo.	Testada apenas no Texas	Narasimhan e Srinivasan, 2005

#### **2.1.4. O índice utilizado neste trabalho: Standardized Precipitation Index (SPI)**

A escolha do índice a aplicar em qualquer estudo depende sempre do tipo de fenómeno e a disponibilidade da informação necessária para o seu cálculo. Para a realização deste trabalho escolheu-se o *Standardized Precipitation Index* (SPI) desenvolvido por McKee et al. (1993) que consideram que para a análise de qualquer episódio de seca é necessário ter em atenção os seguintes aspetos: i) a escala temporal; ii) a probabilidade da sua ocorrência; iii) e o défice de precipitação.

O SPI baseia-se num só parâmetro meteorológico, a precipitação, requer séries de dados de precipitações mensais, aspeto que constitui uma vantagem decisiva tendo em conta o propósito de realizar uma avaliação assente numa adequada rede espacial com aquela informação. Outra vantagem muito importante, resultante desta opção, reside no fato do SPI ser um índice adimensional, e que permite uma representação espacial das secas e a sua comparação regional, possibilitando, desta forma, o ensaio de produção de cartografia de suscetibilidade associada a este fenómeno.

O SPI quantifica o défice ou o excesso de precipitação de um determinado local para diferentes escalas de tempo num período específico e calcula-se de acordo com a seguinte sequência: a) constituição de uma série de dados de precipitação mensal, com pelo menos, trinta anos; b) seleção de períodos para a análise de secas, geralmente de 3, 6, 12, 24 ou 48 meses, este conjunto é arbitrário, mas representa normalmente as escalas de tempo em que o défice de precipitação influencia os diferentes tipos de recursos hídricos; c) ajustamento da função gama a cada conjunto de dados com o intuito de determinar a probabilidade de ocorrência de cada valor observado de precipitação; d) estimativa da função inversa do normal para determinar o desvio da precipitação observado em relação à distribuição normal de densidade de probabilidade, de média de zero e de desvio padrão igual a unidade (Domingos, 2006). Um episódio de seca começa quando o SPI atinge um valor inferior a zero (0) e termina assim que este regista um valor positivo. A intensidade de seca é definida arbitrariamente para os valores de SPI, presentes na Tabela 3.

**Tabela 3** – Categorias de SPI

Classes	Categorias
$\geq 2$	Chuva Extrema
1.5 a 1.99	Chuva Severa
1 a 1.49	Chuva Moderada
-0.99 a 0.99	Normal
-1 a -1.49	Seca Moderada
-1.50 a -1.99	Seca Severa
$\leq -2$	Seca Extrema

As características do índice são várias: a sua fácil computação, a possibilidade de ser determinado para diversas escalas de tempo e basear-se apenas num parâmetro meteorológico (a precipitação) levaram a um aumento de utilização deste nas duas últimas décadas, por este motivo tem sido aplicado nos estudos de avaliação da perigosidade e suscetibilidade associada às secas, levados a cabo pelo Programa das Nações Unidas para o Desenvolvimento (PNUD), tendo sido aprovado no XVI Congresso da Organização Meteorológica Mundial (OMM) em 2011 uma resolução que recomenda a utilização deste índice para efeitos de avaliação e monitorização de situações de seca meteorológica, conhecida como a Declaração de Lincoln.

Muitas entidades governamentais, tais como: o *U.S. Drought Monitor (USDM)*, o *Global Drought Information System*; o *National Drought Mitigation Center (NDMC)*, o *China Meteorological Administration*; o *Western Regional Climate Center (WRCC)*, o *National Agricultural Decision Support System (NADSS)* e o Instituto Português do Mar e da Atmosfera apresentam o SPI entre o leque dos índices utilizados na monitorização de secas.

Mckee et al. (1993) aplicam este índice na caracterização de secas ocorridos entre 1889 e 1991 para *Fort Collins (Colorado)* e concluíram que os eventos de secas naquele território variam consoante o período de análise, em que para largas escalas de tempo as secas são menos frequentes e normalmente de longa duração.

Keyantash e Dracup (2002) realizaram uma comparação entre o SPI, o PDSI e a RAI para as regiões climáticas de *Willamette Valley e North Central Oregon*, chegando à

conclusão que a tendência geral entre o SPI e a RAI são similares e que por outro lado existe alguma diferença de resultados entre o SPI e o PDSI.

Bordi et al. (2001) utilizaram o SPI para a monitorização das condições de seca de Agosto de 2000 e realização de reconstrução histórica de eventos de seca ocorridas em Itália nos últimos 50 anos, aconselhando no final a utilização deste índice como uma ferramenta operacional no sistema nacional de monitorização de secas.

Spencer (2002) aplicou este índice na determinação de secas que ocorreram na ilha de Santiago, em Cabo Verde identificando uma sucessão de anos secos entre 1970 e 1990, intercalados por período normal ou húmidos entre 1974 e 1976 e 1983 e 1987.

Wu et al. (2007) exploraram a aplicabilidade do SPI nas regiões áridas e semiáridas dos EUA tentando encontrar justificações para as diferentes resultados verificados nas diferentes regiões climáticas daquele país, concluindo que a utilização do SPI, para curta escala de tempo deve ser feita de forma cautelosa, visto que os resultados podem ser enganosos e que nas regiões áridas e semiáridas é preciso ter em consideração a duração das secas e não a sua severidade, pois a distribuição de precipitação não é normal. Existindo concentração de precipitação em alguns meses, mesmo dentro desse intervalo temporal a precipitação é normalmente concentrada num determinado número de dias.

Karavitis et al. (2011) estudaram a duração, magnitude e extensão espacial de eventos de secas ocorridos na Grécia entre 1947 e 2004 concluindo que o índice descreve bem as condições de seca.

Gouveia et al. (2014) utilizaram os índices SPI e SPEI na análise e avaliação de eventos secas ocorridos na Península Ibérica entre 1901 e 2012, chegando à conclusão que existe uma tendência positiva de precipitação a noroeste e negativa a sul da Península. Verificando-se as mesmas diferenças espaciais na duração e severidade entre os episódios de secas, contudo, sem ter um padrão espacial definido.

A não incorporação de outros dados climáticos como a temperatura, a evapotranspiração potencial e humidade do ar e do solo no cálculo de SPI, levaram a criação de índices como o SPEI e o RDI, variantes do SPI, podendo assim aferir a influência das alterações climáticas na ocorrência de episódios de seca.

## 2.2. Índices de vegetação

O objetivo de muitos projetos de detecção remota é caracterizar o tipo, a quantidade e a condição da vegetação presente numa determinada área. A quantidade de radiação solar refletida pela superfície é determinada pela quantidade e a composição da radiação solar que sobre ela incide, assim como as propriedades de reflexão da superfície. Como a radiação solar varia com o tempo e as condições atmosféricas, é complicado replicar as características da superfície utilizando apenas medidas simples de medição da radiação solar. A combinação de dados de diferentes bandas espectrais permite formar os índices de vegetação.

Um índice pode ser calculado através do rácio, da diferença, ou do rácio de diferenças e somas, ou ainda a partir de formação de combinações lineares de dados das bandas espectrais (Jackson e Huete, 1991). Estes índices destinam-se sobretudo a melhorar a captação de sinal de vegetação, minimizando os efeitos atmosféricos e do solo.

Quando a radiação solar atinge a superfície terrestre parte é refletida, parte é transmitida e a restante absorvida, podendo variar de acordo com o comprimento de onda. Por exemplo a maioria da radiação incidente sobre o solo nu é refletida ou absorvida, com pouca quantidade a ser transmitida. No caso da vegetação grande parte da radiação em infravermelho próximo é transmitida e refletida, havendo pouca absorção, por outro lado, no caso da radiação visível a absorção é predominante, havendo pouca reflexão e/ou transmissão.

A diferença entre as bandas vermelha e a infravermelho próximo (NIR) possibilita criar índices capazes de estimar a condição da vegetação assim como a sua cobertura espacial através da combinação dessas duas bandas (Figura 1).

Os índices de vegetação podem ser calculados a partir de seguintes parâmetros: i) *outputs* da voltagem do sensor (V); ii) valores de radiação (L); iii) valores de reflexão (p); iv) e o número digital do satélite (DN). Por isso, o resultado difere consoante o parâmetro utilizado.

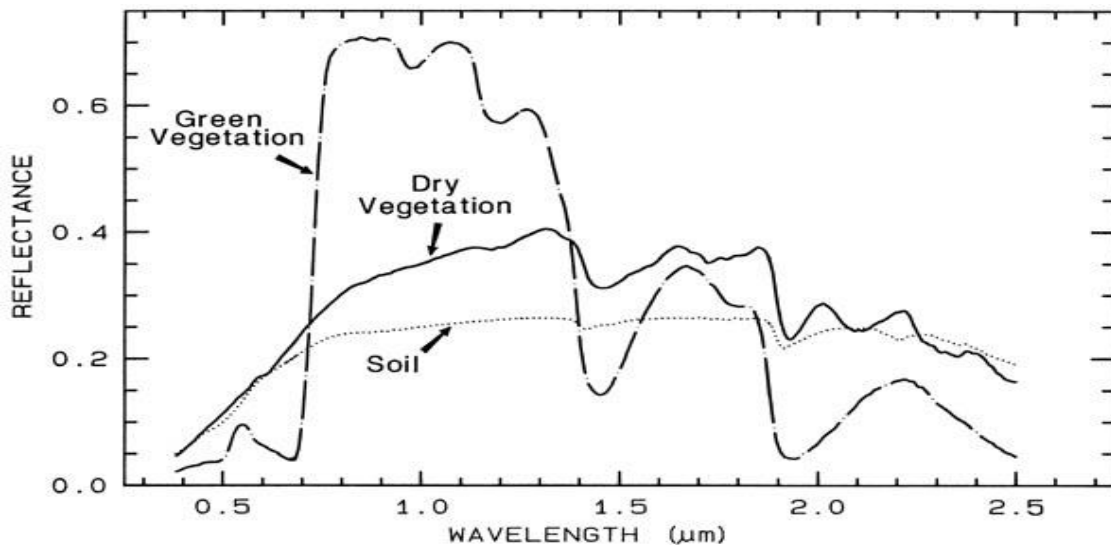


Figura 1 – Radiância espectral de três tipos fundamentais de cobertura (Fonte: <http://bluemarble.ch/wordpress/2003/01/07/ndvi-measurements-with-simple-radiometric-and-photographic-methods/>)

Perry e Lautenschlager (1984), Jackson e Huete (1991) e Baret e Guyot (1991) dividem os índices de vegetação em dois grupos: i) rácio e ii) combinação linear, em que rácio pode ser a simples razão entre duas bandas espectrais, ou o rácio da soma, da diferença ou o produto de qualquer número de bandas. A combinação linear é o conjunto ortogonal de  $n$  equações lineares calculados utilizando dados de  $n$  bandas espectrais.

Mróz e Sobieraj (2004); Silleos et al. (2006) acrescentam mais duas classes de índices de vegetação: a) índices baseados na transformação ortogonal que consistem na transformação de bandas espectrais disponíveis para formarem um novo conjunto de bandas não correlacionados entre si, a partir do qual se pode definir o índice de vegetação; b) *Red Edge Inflection Point* (REIP) baseia-se nas técnicas de análise das formas das ondas aplicadas por (Miller, Hare, e Wu, 1990); (Dawson e Curran, 1998); (Broge e Leblanc, 2001).

Coppin e Bauer (1994) classificam os índices de vegetação em três categorias (*Soil Brightness Index; Greenness Index; e Wetness Index*) com base na análise de estudo levados a cabo por vários autores.

Na tabela 4, organizado por ordem cronológica, apresentam-se os índices que são referidos com maior frequência na bibliografia consultada. Esta tabela corresponde a uma compilação de informação recolhida de diversos trabalhos científicos que

analisam os diferentes índices, as suas características e formulação assim como os seus pontos fortes e fracos.

Tabela 4 – Sumário de índices de vegetação apresentados na bibliografia consultada

Índice	Descrição	Formulação	Autor
<b>Ratio Vegetation Index (RVI)</b>	Mostra o contraste entre a reflexão no vermelho e no infravermelho, o seu valor é mais elevada quando a reflexão do vermelho é baixo e do infravermelho é elevado.	$\text{NIR} / \text{Red}$	Birth e Macvey, 1968
<b>Normalized Difference Vegetation Index (NDVI)</b>	Medida da diferença normalizada, que compara as bandas infravermelho próximo e vermelho, podendo eliminar o efeito topográfico, as variações do ângulo de incidência solar, assim como outros efeitos atmosféricos.	$(\text{NIR} - \text{Red}) / (\text{NIR} + \text{Red})$	Rouse et al. 1974
<b>Perpendicular Vegetation Index (PVI)</b>	Utiliza as bandas infravermelho próximo e vermelho para calcular a distância perpendicular entre a vegetação captada na onda infravermelho próximo e vermelho e a linha do solo.	$a_{\text{NIR}} - b_{\text{red}}$	Richardson e Wiegand, 1977
<b>Difference Vegetation Index (DVI)</b>	Similar a PVI; Fácil de calcular e toma em consideração a inclinação do solo na variação do infravermelho próximo.	$\text{NIR} - \text{Red}$	Richardson e Wiegand, 1977
<b>Weighted Difference Vegetation Index (WDVI)</b>	Similar ao PVI em termos funcionais. Atribui um peso à banda vermelho através do declive do solo (a) com vista a maximizar o sinal de vegetação na banda infravermelho próximo e minimizar o efeito do brilho do solo.	$\text{NIR} - a_{\text{Red}}$	Richardson e Wiegand, 1977; Clever, 1988
<b>Perpendicular Vegetation Index 1 (PVI1)</b>	Fundamenta-se no facto de PVI original não ter a capacidade de discriminar a posição (direita ou esquerda) da vegetação em relação à linha do solo.	$a_{\text{NIR}} - R + b/\sqrt{a^2 + 1}$	Perry e Lautenschlager, 1984
<b>Soil Adjusted Vegetation Index (SAVI)</b>	Desenvolvido com o intuito de minimizar a influencia do solo na quantificação da vegetação, introduzindo um fator (L) de ajuste de solo. Quando o LAI é elevado, L= 0.0; Para LAI baixo, L= -1.	$[(\text{NIR} - \text{Red}) / (\text{NIR} + \text{Red} + L)] * (1 + L)^{1/2}$	Huete, 1988
<b>Transformed Soil Adjusted Vegetation Index (TSAVI)</b>	Concebido com o intuito de melhorar o SAVI, pois tem em consideração tanto o <i>slope</i> (a) como o <i>intercept</i> (b) para reduzir o efeito do solo.	$a * (P_{\text{NIR}} - a_{\text{PRed}} - b) / [a_{\text{PRed}} + P_{\text{NIR}} - a * b + X * (1 + a^2)]$	Baret et al. 1989; Baret e Guyot, 1991

<sup>1</sup> L – constante, em que L = 1 (para baixas densidades de vegetação); L = 0,5 (para médias densidades de vegetação) e L = 0,25 (para altas densidades de vegetação).

<b>Atmospherically Resistant Vegetation Index (ARVI)</b>	Desenvolvido com o intuito de minimizar o efeito da presença de aerossóis na atmosfera no valor de cada célula.	$(P_{NIR} - P_{rb}) / (P_{NIR} + P_{rb})$	Kaufman e Tanré, 1992
<b>Soil and Atmospherically Resistant Vegetation Index (SARVI)</b>	Aplicado quando é necessário a correção atmosférica e do solo.	$(1 + L) * (P_{NIR} - P_{rb}) / (P_{NIR} + P_{rb} + L)$	Kaufman e Tanré, 1992
<b>Modified Soil Adjusted Vegetation Index</b>	Baseia-se na modificação do fator (L) de SAVI, de modo a aumentar a sensibilidade de detetar vegetação, aumentando o intervalo dinâmico e reduzindo a influência do solo.	$P_{NIR} - P_{Red} / P_{NIR} + P_{Red} + L * (1 + L)$	Qi et al. 1994
<b>Modified Normalized Difference Vegetation Index (MNDVI)</b>	Pretende reduzir a contaminação atmosférica e do solo no resultado de NDVI, a partir de incorporação de ajuste de solo e ruído atmosférica.	$NDVI * (1 + C_2 H_2) / (C_1 H_1)^2$	Liu e Huete, 1995
<b>Vegetation Condition Index (VCI)</b>	Compara o NDVI de cada mês em relação ao NDVI máximo e mínimo de um determinado período.	$(NDVI_j - NDVI_{MIN}) * 100 / (NDVI_{MAX} - NDVI_{MIN})$	Kogan, 1995
<b>Vegetation Health Index (VHI)</b>	Também designado por <i>Vegetation-Temperature Index</i> , baseia-se na combinação de VCI e TCI. É eficiente o suficiente para ser utilizado como <i>proxy data</i> na monitorização de seca.	$0.5 (VCI) + 0.5 (TCI)$	Kogan, 2001
<b>Normalized Difference Water Index (NDWI)</b>	Sensível a mudanças de quantidade de água presente nas copas das árvores, pois tem em consideração a radiação entre 0.86 µm e 1.24 µm.	$(green - NIR) / (green + NIR)$	Bo-Cai Gao, 1996
<b>Optimized Soil Adjusted Vegetation Index (OSAVI)</b>	Semelhante ao TSAVI, contudo neste caso o <i>slope</i> (a) = 1 e o <i>intercept</i> (b) = 0.	$[(NIR - Red) / (NIR + Red + L)] * (1 + L)$	Rondeaux et al. 1996
<b>Perpendicular Vegetation Index 2 (PVI2)</b>	Atribui um peso à probabilidade de banda vermelho interceptar a linha do solo.	$NIR - aR + b / \sqrt{1 + a^2}$	Bannari et al. 1996
<b>Enhanced Vegetation Index (EVI)</b>	Corresponde a uma modificação do NDVI, com o fator (L) de ajuste do solo e a correção atmosférica, aplicado através da utilização das bandas azul e vermelha para eliminar a dispersão de radiação causado pela presença de aerossóis na atmosfera.	$G * [(NIR - Red) / (NIR + C1 * Red - C2 * blue + L)]$ , onde $G = 2.5$ , $C1 = 6$ , $C2 = 7.5$ , $L = 1$	Huete et al. 1999

<sup>2</sup> H1 e H2 função de solo e ruído atmosférico  
C1 e C2 – coeficientes empíricos.

Neste trabalho utilizou-se o NDVI por três causas principais: i) é o índice de eleição dos acadêmicos e um dos mais utilizados nas últimas três décadas; ii) a existência de instituições que o divulgam de forma gratuita já com a correção atmosférica e eliminação da nebulosidade; iii) tratando-se de uma série temporal relativamente extensa (2000 – 2013), o tempo de cálculo seria moroso e necessário muito espaço para o armazenamento das bandas e outras informações necessárias para o cálculo de outros índices, porventura mais interessantes.

### 2.2.1. Normalized Difference Vegetation Index (NDVI)

O *Normalized Difference Vegetation Index* (NDVI) foi desenvolvido por Rouse et al. (1974) com o intuito de criar um índice capaz de minimizar os efeitos atmosférico e do solo na detecção de vegetação utilizando imagem de satélite *Landsat MSS*. Expressa-se no rácio da diferença entre as bandas infravermelho próximo e vermelho, normalizado pela soma das duas bandas (ver Tabela 4).

Por se normalizado varia entre -1 e 1, em que valores próximo de zero (0) correspondem a áreas com fraca coberto vegetal e valores negativos, constituem normalmente superfícies sem vegetação (corpos de água, rocha nu e entre outros).

Como foi mencionado anteriormente são muitos os trabalhos que se debruçam sobre as propriedades dos diferentes índices de vegetação, entre eles, o *Normalized Difference Vegetation Index*. Perry e Lautenschlager (1984); Jackson e Huete (1991); Huete (1988); Silleos et al. (2006); Mróz e Sobieraj (2004); e Coppin e Bauer (1994) descobriram que no caso do NDVI, o substrato influencia parcialmente o espectro das copas das árvores e conseqüentemente o resultado do índice; os valores do índice tendem a ser superiores para os substratos mais escuros, tende a saturar na presença de áreas onde o *Leaf Area Index* é superior a três.

A aplicação de índices de vegetação na monitorização de seca não é algo recente, Gutman, 1990 explora a possibilidade de integrar as imagens de satélite, mais concretamente o NDVI, na monitorização de secas juntamente com índices de secas tradicionais, derivados de observações pontuais de dados de precipitação e temperatura.

Um dos principais impulsionadores da aplicação de índices de vegetação na análise de seca e participante ativo na criação de *Vegetation Condition Index* (VCI) e *Vegetation*

*Health Index* (VHI), Felix Kogan tem aplicado estes índices na monitorização e análise de secas para as regiões dos Estados Unidos desde 1985 até o presente (Kogan, 1995, 1997, 2002; Unganai e Kogan, 1998).

Ji e Peters (2003) comprovaram a existência de uma correlação positiva entre os valores mensais de SPI e NDVI para a região de *Northern and Central Great Plains* dos U.S.

S. Vicente-Serrano et al. (2015) explora a influência de secas no processo da degradação do solo a partir de imagens de satélite e NDVI para o período 1981-2011, concluindo que existe uma correlação elevada entre o NDVI<sub>max</sub> e variabilidade das secas.

Apesar do sucesso de utilização dos índices na monitorização de secas a aplicação destes continuam a ter algumas limitações e implicações que se apresentam a seguir:

- I. Existe um desfasamento temporal entre as modificações verificadas pelos índices de vegetação e as condições descritas pelos índices de seca baseados em observações pontuais de dados de precipitação e temperatura (Ji e Peters, 2003; Eklundh, 1998). Isto pode ser explicado pelo fato de a vegetação ter capacidade de captar humidade existente no solo através das raízes, entrando assim em *stress* apenas na ausência total de humidade no solo;
- II. As anomalias de vegetação não são explicadas apenas pelas secas, mas também por outros fenómenos como as cheias, infestação, e ação antrópica (Brown et al., 2008);
- III. A utilização de índices de vegetação nos estudos de seca deve ser feita em conjunto com os índices de secas tradicionais, e informações auxiliares como a elevação, a ocupação do solo, e o regime e a distribuição dos ventos (Brown et al., 2008).

### **3. Enquadramento geográfico do arquipélago de Cabo Verde**

Nesta secção apresenta-se uma breve descrição das características biofísicas do arquipélago, a cobertura vegetal, e solos, e ainda os aspetos demográficos, socioeconómicos, e agrícolas do país. Apresenta-se ainda neste ponto uma breve caracterização da precipitação anual e mensal caída entre os anos hidrológicos 1962/63 e 2012/13 assim como o histórico de secas que afetaram o arquipélago durante o último século.

#### **3.1. Caracterização geográfica**

O arquipélago de Cabo Verde é composto por dez ilhas de origem vulcânica as quais nove são povoadas e uma não povoada (Santa Luzia), formando uma área total de cerca de 4 mil km<sup>2</sup>, distribuídos em dois grupos definidos pela sua exposição relativamente aos ventos dominantes (alísios): as ilhas de Barlavento (Santo Antão, São Vicente, Santa Luzia, São Nicolau, Sal e Boa Vista) e as ilhas de Sotavento (Maio, Santiago, Fogo e Brava). Situa-se entre os paralelos 14° e 18° Norte e 16° e 22° Oeste, ao largo do Senegal e Mauritânia a cerca de 500 km da costa ocidental africana (Figura 2).

Devido à sua origem vulcânica, quase todas as ilhas são montanhosas apresentando grandes escarpas com exceção nas ilhas de Sal, Boa Vista e Maio, ilhas planas (conhecidas como “rasas”), que de acordo com Amaral (2007) são as ilhas mais antigas e por isso, foram sujeitas a processos de erosão mais prolongados.

O arquipélago insere-se numa vasta zona de climas de tipo árido e semiárido (do tipo BWh, de acordo com a classificação de Köppen), que atravessa a África desde o Atlântico ao mar Vermelho e se prolonga pela Ásia (Amaral, 2007). Fica esta faixa extensa compreendida entre os centros de altas pressões subtropicais do Atlântico Norte (anticiclone dos Açores) e a linha de convergência intertropical (CIT), e influenciada pelos ventos alísios de nordeste.

De acordo com Amaral (2007), duas estações principais definem o clima das ilhas: o “tempo das brisas” (estação seca), de Dezembro a Junho, e o “tempo das águas” (estação das chuvas), de Agosto a Outubro, separadas pelos meses de Julho e Novembro que podem ser considerados de transição. Realça-se que chuva é o

elemento dominante da diferenciação estacional do ano e o eixo em torno do qual gira a “vida” do Cabo-Verdiano.

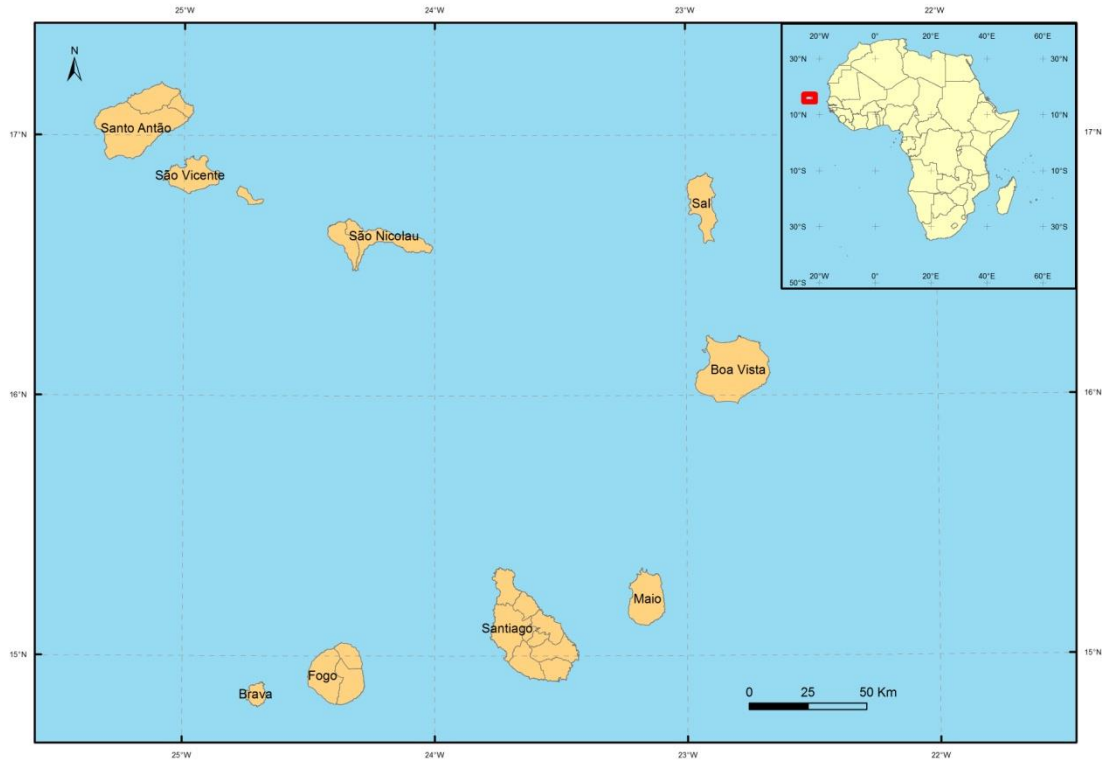


Figura 2 – Localização do arquipélago de Cabo Verde

O clima constitui o principal elemento modelador da paisagem do arquipélago, é ele que determina as diferentes relações entre fenómenos como a evolução do relevo, os solos, a vegetação, o regime hidrológico e a ocupação humana, este último tem sido muito condicionada pelas precipitações fracas e de distribuição muito irregular, que até primeira metade do século XX resultaram em crises, que dizimaram grande percentagem da população e escassez de colheitas em anos de precipitação quase nula ou muito fraca para o desenvolvimento das plantas (Amaral, 2007).

São escassas as observações térmicas no arquipélago, embora sejam abundantes as informações udométricas (Amaral, 2007), realidade que ainda se verifica nos dias de hoje. A temperatura é elevada durante todo o ano, variando em torno de 20°C, para a maior parte do arquipélago, durante o período mais fresco (entre Janeiro e Abril) e atinge valores superiores a 27°C durante o período mais quente, de Agosto a Outubro (Varela-Lopes e Molion, 2014).

A precipitação não partilha da regularidade dos outros elementos climáticos (temperatura, pressão, humidade do ar e ventos) e, apesar da passagem da monção do Atlântico Sul entre Julho e Outubro, a precipitação no arquipélago é muito irregular. Efetivamente verificam-se grandes oscilações anuais e mensais dos seus valores, sendo frequente ocorrer um ano muito seco logo após um ano húmido; o valor da precipitação de um mês pode variar de um valor para o seu triplo. Esta irregularidade não é apenas temporal, mas também espacial, onde duas áreas vizinhas, com as mesmas características geográficas, podem registar valores pluviométricos muito diferentes (Amaral, 2007).

A irregularidade da distribuição da precipitação pode ser explicada por diferentes fatores: as ilhas montanhosas apresentam regime de precipitação que vão da aridez do litoral às zonas húmidas das grandes altitudes; a posição da ilha em relação aos ventos dominantes é outro fator importante, em que as vertentes expostas registam claramente maior pluviosidade: por exemplo no caso de Santiago, a costa leste, aberta à penetração dos alísios, que se carregam de humidade à medida que avançam sobre o oceano, é muito mais húmida que a costa oeste; as massas de ar ao embaterem contra as paredes dos maciços de Malagueta e Pico da Antónia, perdem humidade e é com características diferentes que descem pelas vertentes voltadas para o ocidente (Amaral, 2007).

A natureza do solo e sobretudo as condições climáticas impõem limites mais ou menos estreitos ao desenvolvimento da vida vegetal no arquipélago. Assim como no caso da precipitação é nítido o escalonamento em alturas das associações de vegetais, desde tufos ralos das achadas pedregosas do litoral ao adensamento da vegetação, e maior riqueza de espécies nos pastos à medida que a altitude aumenta e as condições climáticas para a agricultura vão melhorando.

Sobre as areias e dunas dos pequenos retalhos de praias é comum encontrar várias plantas fixadoras principalmente arbustivas e herbáceas. A cobertura vegetal das achadas pedregosas é escassa, excessivamente pobre, e é composta essencialmente por plantas herbáceas efémeras, com algumas gramíneas más forrageiras, formando tufos bastante ralos, deixando grandes manchas de solo pedregoso a descoberto, as espécies arbustivas e arbóreas mostram-se normalmente inclinadas na direção dos ventos dominantes; das últimas as mais importantes e vulgares são as acácias

(espinheiro-branco). Os vales profundos das grandes achadas constituem as zonas mais abundantes, o povoamento torna-se mais rico pela associação de outros elementos, nomeadamente a espessura do solo e a abundância de água.

- **Demografia**

O número de população cabo-verdiana tem vindo a aumentar a um ritmo elevado: a população residente no arquipélago passou de aproximadamente 342 mil habitantes em 1990 (cuja taxa de variação foi superior a 27% entre 1990 e 2000) para cerca de 492 mil em 2010, dos quais 62% residiam em espaço urbano e 38% em áreas rurais (INE, 2010).

Cerca de 55 % da população concentra-se em Santiago, sendo que é na capital (Cidade da Praia) que reside 26 % da população do país.

O número de habitantes residentes em espaços urbanos também tem vindo a aumentar nas últimas décadas: enquanto em 1990 apenas 44% da população se concentrava em espaços urbanos, em 2000 mais de metade da população cabo-verdiana já se encontrava a residir em áreas urbanas e, em 2010, esta taxa já era superior a 60%. De acordo com DGA (2004) a degradação das condições de vida no meio rural e por conseguinte o empobrecimento das populações rurais são as causas da deslocação da população para os centros urbanos. De acordo com a mesma fonte este fenómeno tem contribuído para o aumento da pobreza dos centros acolhedores, sobretudo nas suas periferias.

- **Agricultura**

A dinâmica populacional, isto é, a mudança da população das áreas rurais para os espaços urbanos nos últimos anos, resultou no desenvolvimento do sector terciário e detrimento do sector primário, porém as atividades relacionadas com a agricultura continuam a ter um peso significativo na economia do país.

A atividade económica (CAE) - agricultura, produção animal, caça, floresta e pesca, ocupam cerca de 10% da população ativa, ultrapassado apenas pelo comércio grosso e a retalho; reparação de veículos automóveis (14.2%), e construção (12.4%) (INE 2010). É de realçar que tanto a agricultura de sequeiro como a irrigada dependem absolutamente do regime das chuvas, sendo esta predominantemente marcada pela escassez e irregularidade. Consequentemente, a percentagem de população ativa varia anualmente consoante as quantidades pluviométrica e por isso, os valores acima

apresentados também variam de ano para ano; salienta-se ainda que grande parte do comércio advém da venda de produtos agrícolas, principalmente culturas hortícolas. Apesar do elevado número de população empregada no sector agrícola e a sua importância no produto interno bruto, a atividade agrícola continua a não ser um sector prioritário do desenvolvimento económico do país, pois, esta consiste essencialmente numa atividade de subsistência com uma base rural arcaica, assente em pequenas unidades familiares, tradicionais e pouco organizados (DGA, 2004).

### 3.2. Regime médio anual da precipitação de Cabo Verde (1962-2013)

Devido à descontinuidade espacial deste território (composto por ilhas) e à irregularidade espacial da precipitação, a análise da precipitação, tendo em conta todo o arquipélago, não é fácil, nem usual. Neste ponto, apresenta-se a distribuições médias mensais e anuais de precipitação entre os anos hidrológicos de 1962 e 2013 no arquipélago (Figuras 3 e 4) e de estações meteorológicas com maior período de dados. A Figura 3 mostra que a grande irregularidade interanual da precipitação que regra geral, é bastante fraca no arquipélago (média anual de 285 mm no período em análise). Os anos mais secos foram nomeadamente 1973 e 1977 em que se verificou um valor anual inferior a 100 mm (43 mm em ambos os anos). Por outro lado os anos 1962, 1967 e 2010 constituíram os anos mais húmidos, cujo valor ultrapassou a barreira os 500 mm. A tendência geral verificada em alguns estudos do início do milénio apontaram para um ligeiro aumento de precipitação no futuro próximo (INMG, 2007).

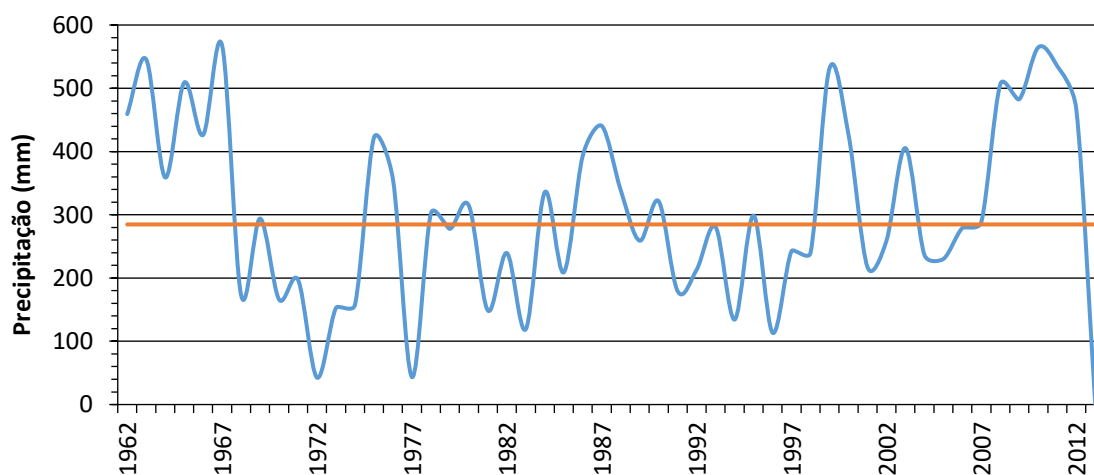


Figura 3 - Precipitação média anual do arquipélago de 1962 a 2013 (Fonte: INMG)

De um modo geral, no período em estudo ocorreu sempre precipitação à escala mensal. Porém, pode-se considerar a precipitação registrada entre Dezembro e Junho como sendo residual, pois a média mensal verificada é inferior aos 5 mm. A estação das chuvas começa efetivamente em Julho, que constitui o primeiro mês em que o valor da precipitação ultrapassa os 10 mm, e prolonga-se até Dezembro, atingindo o máximo (119 mm) no mês de Setembro, a partir do qual se regista um decréscimo acentuado; o mês de Novembro constitui de facto o mês de transição entre a estação das chuvas e a estação seca para grande parte do arquipélago (Figura 4).

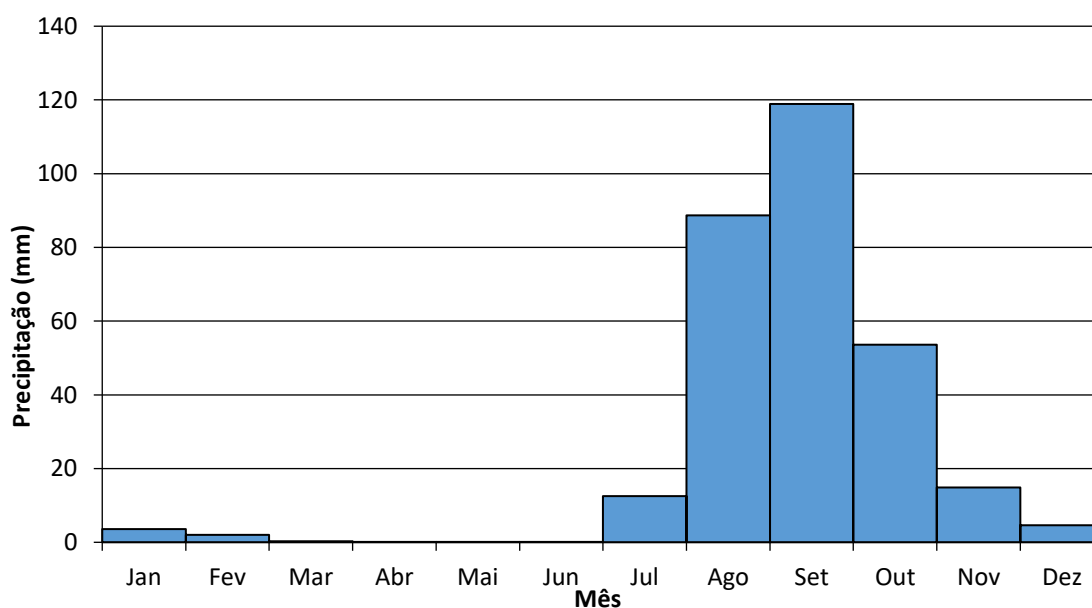


Figura 4 - Precipitação média mensal do arquipélago de 1962 a 2013 (Fonte: INMG)

A disparidade espacial é bem evidente, durante a estação das chuvas, como é mostrado nas duas estações (Figura 5). A estação das chuvas começa-se efetivamente em ambas as estações no mês do Julho (37 mm – Serra Malagueta; 13 mm – Chão Bom) e prolonga-se até Dezembro, atingindo o máximo em Setembro (253 mm – Serra Malagueta; 95 mm – Chão Bom), a diferença dos valores registados em altitude é de quase o triplo em relação à estação junto ao litoral (20 m de altitude).

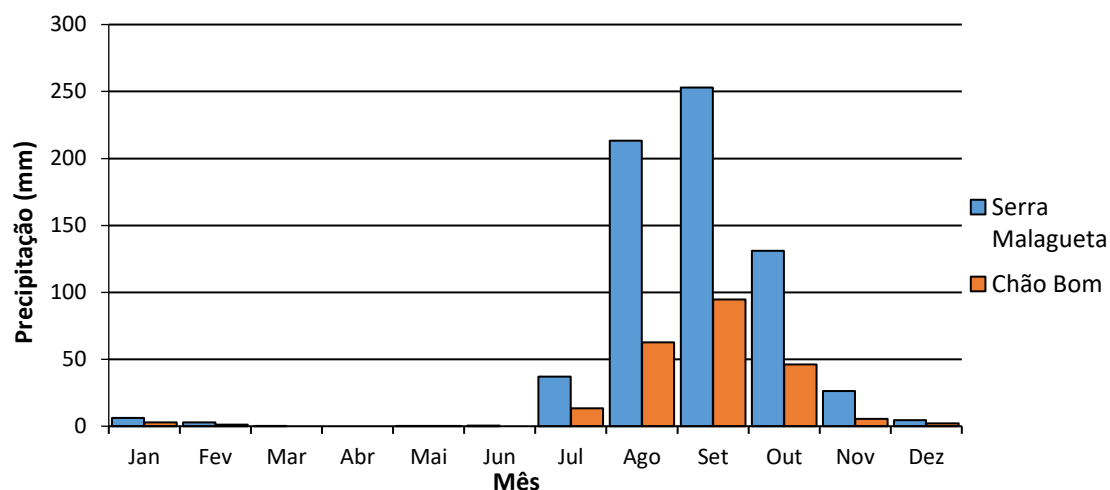


Figura 5 - Precipitação das estações da Serra Malagueta e do Chão Bom de 1962 a 2013 (Fonte: IMNG)

### 3.3. Histórico de eventos de seca

A frequente ocorrência de episódios de seca em Cabo Verde é um dos traços marcantes do seu clima e, de entre os perigos naturais que afetam o arquipélago, é o que assume maior relevância socioeconómica (DGA, 2004). A história do país está marcada de modo dramático pela sua ocorrência: entre o século XVII e meados do século XX, Amaral (1991) identificou 32 eventos com consequências relevantes na produção agrícola do arquipélago, muitos deles na origem de graves crises alimentares que redundaram em surtos de fome generalizada e mortalidade. No âmbito de um projeto de “Redução de Riscos de Desastres Naturais” levado a cabo na Universidade de Cabo Verde e coordenado por Monteiro (2013), foram identificadas as consequências de muitos dos eventos registados durante o século XX a partir de fontes documentais diversas. A partir do final da década de 60 do século passado, tal como em todo o Sahel, têm ocorrido diversos episódios, alguns de longa duração, como os que foram observados de 1968 a 73 e de 1981 a 1983, quando a precipitação ocorrida em Cabo Verde foi 50 a 70 % inferior à precipitação mediana do período 1941-90 (Correia, 1998). Entre os 10 desastres naturais que mais pessoas afetaram no arquipélago entre 1980 e 2010, constam as secas de 1969, 1980, 1982, 1998 e 2002 (EM-DAT/Cabo Verde *country profile*).

## CAPITULO II – DADOS e METODOLOGIA

Neste capítulo serão apresentadas as metodologias de trabalho, os processos aplicados para alcançar os objetivos afixados, e os dados que lhe serviram de base.

Tratando-se de um trabalho de suporte à investigação recorrendo a sistemas de informação geográfica, houve a preocupação de aplicar diferentes metodologias operativas. O presente trabalho recorre a ferramentas adaptáveis a cada situação em análise. É neste âmbito que a aplicabilidade de algumas ferramentas na produção de resultados pretendidos, face aos dados de base disponíveis, é demonstrada.

### 1. Dados

Tabela 5 – Variáveis e fontes de dados utilizados

Modelo	Tipo de informação	Fonte de informação	Produtor/Distribuidor	Escala/Resolução espacial
<b>Modelo Numérico de Elevação</b>	Matriz com os valores de elevação (raster)	ASTER GDEM	NASA e Ministério da Economia, Industria e Transportes do Japão (METI)	30m
<b>Exposição</b>				
<b>SPI</b>	Pontual	Normais Climatológicas	INMG; ORSTOM; FAOclim	
<b>NDVI</b>	Matriz com os valores de NDVI (raster)	MODIS/Terra Vegetation Indice 16-Day L3 Global SIN Grid NDVI	USGS Earth Resources Observation & Science Center (EROS)	250m
<b>NDVI</b>		SPOT - VEGETATION -S10 NDVI -Continental extracts	VITO /Flemish Institute for Technological Research	1000m
<b>Cartas de vegetação</b>	Polígonos com as classes de vegetação	Carta de vegetação de Cabo Verde	GEOMAPS GIS + Remote Sensing C. Munier	1/1000
<b>Cartas agrícola</b>	Polígonos com as classes agrícolas	Carta agrícola de Cabo Verde	A. S. Teixeira e L. G. Barbosa (1958)	1/1000

Tendo em conta o perigo (definido no ponto do Cap. I) de seca, a sua avaliação deve ser preferencialmente efetuada através da análise da precipitação registada no maior

número possível de estações climatológicas e postos pluviométricos que possuam séries de longa duração (30 anos ou mais). Esta informação deve ser complementada com informações auxiliares como a elevação, a exposição, e a vegetação (Tabela 5), em que as duas primeiras têm uma influência direta na distribuição espacial da precipitação e o desenvolvimento da última é condicionado por ela. Para o efeito, escolheu-se o período compreendido entre 1962 e 2013 para a análise de eventos de secas em Cabo Verde.

### 1.1. Precipitação

As séries de precipitações foram disponibilizadas pelo Instituto Nacional de Meteorologia e Geofísica de Cabo Verde (INMG). No entanto, verificou-se que essas séries têm muitas lacunas (falta de dados). Para melhorar essa deficiência e melhorar a cobertura espacial dos dados, recorreu-se a fontes alternativas:

- ORSTOM, 1983. *République du Cap-Vert. Précipitations journalières de l'origine des stations a 1977. Bondy, République du Cap-Vert, Ministère de l'Agriculture/République Française, Ministère des Relations Extérieures, Coopération et Développement*. Esta publicação contém a precipitação registada em todos os postos pluviométricos de Cabo Verde desde a sua entrada em funcionamento até 1977;
- FAO, 2001. *FAO Clim 2.0. Agroclimatic Database CD-ROM + User's Manual. Environment and Natural Resources Working paper Nº 5*. Disponível em [http://www.fao.org/nr/climpag/pub/en1102\\_en.asp](http://www.fao.org/nr/climpag/pub/en1102_en.asp). Contém registos de precipitação mensal até 1987;
- Hernández, R. (2008) Caracterização dos solos da ilha de Santiago (Cabo Verde) numa perspetiva de sustentabilidade ambiental. Universidade de Aveiro, Departamento de Geociências (Dissertação de Mestrado em Geoquímica). Esta publicação contém em anexo, dados de precipitação mensal registada em 5 postos da Ilha de Santiago até 2006.

### 1.1.1. Análise exploratória das séries de precipitação

O Instituto Nacional de Meteorologia e Geofísica de Cabo Verde disponibilizou um total de 41 estações meteorológicas dispersas por todo arquipélago com os registos mensal de precipitação de 1962 a 2013 (Tabela 6).

A utilização dos dados disponíveis tem algumas implicações no estudo que se apresenta: os testes de qualidade realizados no âmbito do projeto - “Análise e cartografia de perigosidade em Cabo Verde” - evidenciaram inconsistência e valores anómalos e falta de homogeneidade de algumas séries, devido a mudanças na instrumentação, realocações, alterações na envolvente, erros instrumentais e outros; a rede de observações disponível só nas ilhas de Santiago, Fogo e Brava se pode considerar suficientemente densa e geograficamente bem distribuída, de modo a poder ser representativa dos principais setores topoclimáticos das ilhas; nas ilhas rasas apenas se possuem dados de um ou dois postos; na ilha de Santo Antão, apenas está representado o setor NE da ilha e em São Nicolau só se dispõe de dados da área central da ilha (Figura 6).

Grande parte das estações apresentam lacunas nos anos antecedentes e/ou logo após a independência. Procurou-se colmatar estas falhas com dados provenientes de outras fontes, adotando como critério de seleção de postos, o limite de 25% de lacunas. Do total das séries selecionaram-se 31 postos, dos quais só 7 constituem séries sem falhas, 14 possuem menos de 10% e 10 com menos de 25 % de lacunas (Tabela 6). As lacunas das séries selecionadas foram preenchidas através do método de regressão linear tendo por base as correlações mais elevadas entre as estações mais próximas.

Com os elementos disponíveis constituíram-se séries longas de 50 anos (entre os anos hidrológicos 1962/1963 e 2012/2013), capazes de abranger áreas de características geográficas diferentes e consequentemente valores pluviométricos distintos; e deste modo obter uma escala temporal capaz de abranger as grandes seca do final dos anos sessenta e o início dos anos setenta do século passado mencionados no capítulo anterior.

Tabela 6 - Estações meteorológicas disponibilizadas pelo INMG

Ilha	Estação	Altitude	Meses completos (%)
<b>Santo Antão</b>	Águas das Caldeiras	1400	99,8
	Boca de Coruja	165	92,5
	Chocho	281	77,4
	Covão	605	88,7
	Fajã Domingas Benta	200	92,5
	Passagem	330	99,8
<b>São Vicente</b>	Mindelo	10	100,0
<b>São Nicolau</b>	Caleijão	240	82,9
	Canto Fajã	580	56,4
	Vila Ladeira Igreja	200	84,7
<b>Sal</b>	Sal (Aeroporto)	54	100,0
<b>Boavista</b>	Fundo das Figueiras	20	86,9
	Povoação Velha	85	58,5
	Rabil		50,9
	Sal Rei	10	73,6
<b>Maio</b>	Calheta Monte Vermelho	26	75,5
	Centro Zootécnico	11	58,3
	Vila do Maio	22	81,0
<b>Santiago</b>	Assomada	462	100,0
	Babosa Picos	454	100,0
	Chão Bom	16	96,2
	Curralinho	818	90,4
	Flamengos	95	41,4
	Praia	64	100,0
	São Domingos	235	92,5
	São Francisco	89	100,0
	São Jorge dos Órgãos	310	100,0
Serra Malagueta	765	90,6	
<b>Fogo</b>	Achada Furna	829	99,5
	Atalaia	422	96,2
	Campanas	285	45,3
	Chocho	869	98,1
	Galinheiro		92,0
	Mosteiros	52	66,7
	Pau Cortado	440	97,8
	Ribeira Ilhéu	362	95,9
<b>Brava</b>	Cachaço	580	89,8
	Campo Baixo	575	66,0
	Mato	725	84,1
	Nova Sinta	490	89,9

 Utilizadas

 Não utilizadas

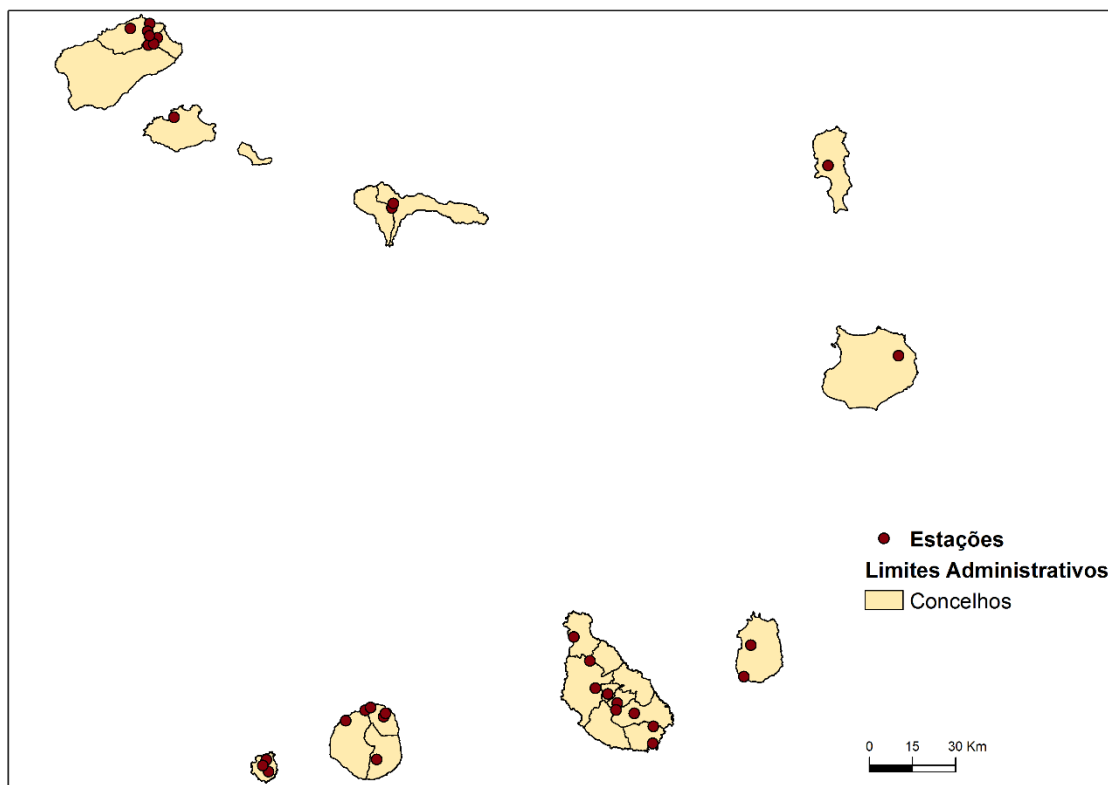


Figura 6 - Estações meteorológicas utilizadas na análise de seca em Cabo Verde

## 1.2. NDVI

Como foi referido anteriormente existem algumas instituições (governamentais e não governamentais) que produzem os índices de vegetação à escala do globo a uma resolução espacial razoável e o disponibilizam de forma gratuita. Apresenta-se a seguir as fontes de dados utilizados.

### 1.2.1. NDVI obtido pelo sensor MODIS

Um dos principais objetivos do programa *Earth Observing System* (EOS) é perceber como o sistema terrestre funciona, e qual o papel da vegetação. Isto requer o conhecimento da distribuição global dos diferentes tipos de vegetação e as propriedades biofísicas e estruturais bem como a sua variação espaço/temporal. Os índices de vegetações são medidas empíricas da atividade da vegetação à superfície terrestre, desenhadas para aumentar o sinal de vegetação captadas pelos sensores. Eles são determinados geralmente através da combinação de duas bandas ou mais, normalmente o vermelho (0.6 - 0.7  $\mu\text{m}$ ) e infravermelho próximo (0.7 - 1.1  $\mu\text{m}$ ).

O propósito dos índices de vegetação MODIS é fornecer comparações espaciais e temporal das condições globais de vegetação a fim de serem utilizados na monitorização de atividade fotossintética, a fenologia e a detecção de alterações e interpretações biofísicas. O MODIS divulga imagens derivadas a intervalos de 16 dias ou mensalmente para a monitorização sazonal e interanual da vegetação.

Os índices são calculados à escala global: o primeiro é o NDVI, que é referido como sendo a continuação do índice NDVI derivado da série de dados com mais de 27 anos (1981 – 2009) do satélite NOAA-AVHRR, que assim pode ser expandida pelos dados fornecidos pela MODIS, criando assim uma série mais longa para o uso operacional na monitorização de vegetação. O segundo corresponde ao EVI, que possui melhor capacidade na detecção de vegetação sobre áreas com grande densidade de biomassa e reduz ainda os efeitos do substrato assim como os efeitos atmosféricos no cálculo do índice. Os dois índices complementam-se, melhorando assim a extração dos parâmetros biofísicos das copas das árvores.

O *United States Geological Survey* (USGS) produz atualmente estas imagens à escala de 250m, 500m, 1km de resolução espacial derivadas de bandas espectrais (MODIS09), bandas que já possuem correções atmosféricas (não havendo difusão de radiação provocado pelas partículas presentes na atmosférica, ou absorção de radiação pelo ozono). Estas imagens são normalmente acompanhadas por um ficheiro de relatório de qualidade, onde estão presentes dados estatísticos da qualidade das imagens assim como informações sobre os outros dados de *input*.

Com vista a ter um maior intervalo temporal possível para a análise, trabalhou-se aqui com a totalidade das imagens produzidas pelo USGS de Fevereiro de 2000 a Dezembro de 2013. Estas imagens possuem uma resolução espacial de 250m e sistema de coordenadas *Sinusoidal Grid Tiling System*.

Os dados são normalmente disponibilizados em formato *Hierarchical Data Format* (HDF), formato de base dos produtos do EOS. Cada ficheiro é composto pelos dois índices de vegetação referidos anteriormente, assim como as bandas vermelho, infravermelho próximo, azul, o dia do ano do cálculo do índice, e o relatório de qualidade da imagem.

As imagens correspondem a uma GRID com resolução radiométrica de 16 Bit, com valores entre 2000 e 10000, e o fator de escala de 0.0001, portanto para obter o valor real de NDVI é necessário aplicar a seguinte expressão:

$$NDVI = DN * 0.0001 \quad (1)$$

Constatou-se que algumas imagens recolhidas não cobriam a totalidade da extensão das ilhas, pelo que a solução aplicada para estes casos passou pela conversão das mesmas para uma grelha regular de pontos e de seguida a interpolação deste para uma superfície matricial através do *Inverse Distance Weighted (IDW)*, método de interpolação determinístico que estima o valor das células através da média ponderada dos valores dos pontos de amostra que se encontram na vizinhança de cada célula a processar. Quanto mais perto o ponto se encontrar do centro da célula a estimar maior será a sua influência (ou peso), na aferição da média ponderada.

### **1.2.2. NDVI obtido a partir do SPOT-VEGETATION**

O sensor VEGETATION (VGT) é produto da cooperação entre *French Centre National d'Etudes Spatiales (CNES)*, *European Commission Joint Research Centre (JRC)*, a *Agenzia Spaziale Italiana*, a *Belgian Federal Science Policy Office* e o *Swedish National Space Board*, e tem como a principal função a monitorização da vegetação. Tem sido aplicado em diversas áreas, como na classificação da cobertura do solo, na agricultura, na silvicultura, na gestão de riscos, na delimitação e gestão das áreas ardidadas, etc.

Até agora foram lançadas duas versões do sensor: o VGT-1 a bordo do satélite SPOT-4 a 24 de Março de 1998 e o VGT-2 a bordo do SPOT-5 desde de 3 de Maio de 2002. Ambos os sensores seguem a trajetória solar de órbita quase polar a uma altitude média de 822 km.

Os dois sensores são praticamente iguais, apresentam pequenas diferenças no comprimento de onda de cada banda. Possuem quatro bandas espectrais destinadas à monitorização de vegetação: vermelho (B2), infravermelho-próximo (B3), e infravermelho; enquanto a banda azul (B0) tem como principal funcionalidade a correção atmosférica.

As imagens VGT são agrupadas em duas categorias: P (primário) e S (síntese). Como o próprio nome indica, os produtos P correspondem às bandas espectrais mencionados no parágrafo anterior, enquanto os produtos S constituem a síntese do produto P de

uma determinada área, isto é, agregação das células com os valores mais elevados de NDVI que fazem parte desta área. Se a imagem é composta apenas por imagens captadas num só dia, o resultado desta é designado por S1; alternativamente se foram usadas todas as imagens P de 10 dias sucessivos, o produto resultante é codificado como S10. As imagens S1 e S10 têm uma resolução espacial de 1 km; no entanto, os produtos S10 também estão disponíveis com resolução degradada de 4 e 8 km e são codificados como S10.4 e S10.8 respetivamente, sendo que se utilizou as imagens S10. As imagens S-10 são produzidas a partir de dados recolhidos das bandas espectrais do sensor ao longo de um intervalo de 10 dias. Para cada intervalo de 10 dias, todos os dados registados em cada célula foram calibrados para os valores de radiação de topo da atmosfera e investigada a contaminação de nuvem utilizando critérios baseados nos valores de radiação de topo de atmosfera presentes nas bandas B0 e SWIR.

O NDVI é calculado a partir de imagens corrigidas e a seleção de cada célula é feita com base na técnica MVC (*Maximum Value Composite*). As imagens foram armazenadas em ficheiros de 8-bit inteiros, em que o valor real de NDVI pode ser obtido através da seguinte expressão:

$$NDVI = \frac{DN}{250} - 0.1 \quad (2)$$

As imagens S1 estão disponíveis em extratos continentais, incluindo Africa. O sistema de projeção utilizado e a extensão dos extratos do continente africano estão presentes na Tabela 7.

**Tabela 7** - Características das imagens SPOT-VEGETATION

Parâmetros	Valores
<b>Sistema de Projeção</b>	Plate Carrée
<b>Datum</b>	WGS1984
<b>Spheroid</b>	WGS1984
<b>Tamanho da célula</b>	≈ 1 km
<b>Latitude do canto superior esquerdo</b>	38° N
<b>Longitude do canto superior esquerdo</b>	26° E
<b>Latitude do canto inferior direito</b>	35° S
<b>Longitude do canto inferior direito</b>	60° W

Apesar das imagens estarem georreferenciadas, devido à descontinuidade do uso deste sistema de projeção, é necessário proceder à sua georreferenciação noutra sistema. Esta pode ser feita de duas formas: i) direta, a partir do ficheiro presente na pasta de dados disponibilizado por VITO recorrendo a função “*Warp From File*” no SIG utilizado (ArcGIS); ii) de forma indireta, através da ferramenta “*Warp*” onde é necessário introduzir as coordenadas dos cantos da imagem, as coordenadas do destino, bem como o sistema de projeção.

Na Figura 7 apresenta-se o gráfico de dispersão de NDVI médio (MODIS e SPOT), entre os meses de Julho e Novembro para a grelha de 750m \* 750m em torno da estação de São Jorge dos Órgãos da ilha de Santiago. Os valores verificados não se diferenciam muito, tanto que o coeficiente de correlação registado entre os dois índices é de 0.8. Como seria de esperar os dois índices possuem comportamento cíclico, em que se verifica o mínimo no mês de Julho e o máximo no mês de Outubro.

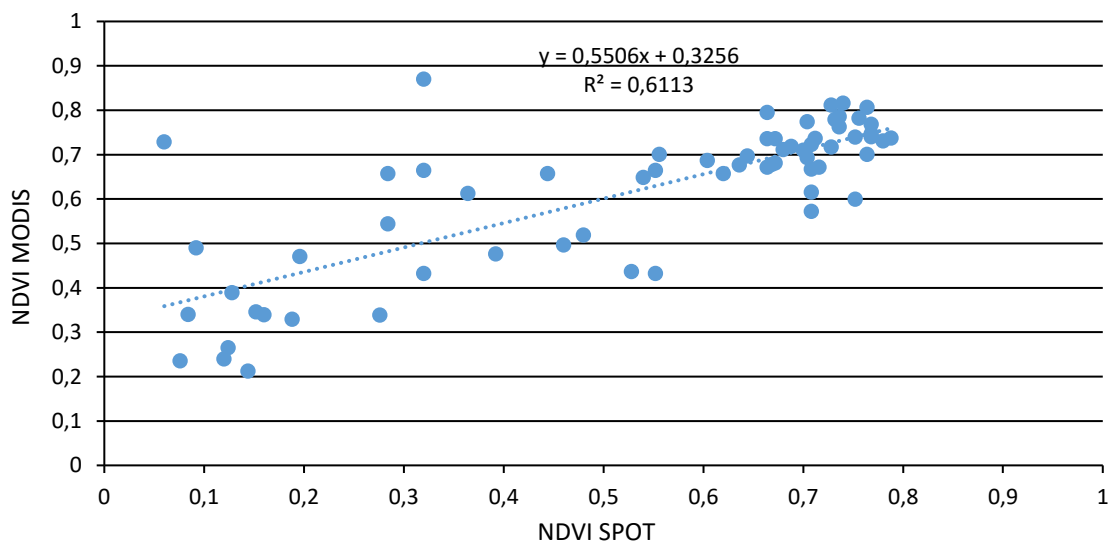


Figura 7 - Evolução temporal de NDVI SPOT VS NDVI MODIS na estação de S. Jorge dos Órgãos (Santiago)

Realizou-se ainda a média do NDVI da estação das chuvas (EC) para a totalidade do período em estudo com o intuito de perceber a distribuição normal de vegetação no arquipélago (Figura 8). Os valores verificados colocam em evidência a influência da altitude e da exposição na distribuição de biomassa: a fachada nordeste da ilha de Santo Antão, o setor central de São Nicolau e quase a totalidade de extensão das ilhas de sotavento apresentam valores de NDVI elevados comparativamente com as ilhas rasas. A ilha de São Vicente, o cone vulcânico do Fogo e o litoral sudeste e oeste de Santo Antão apresentam valores mais baixos.

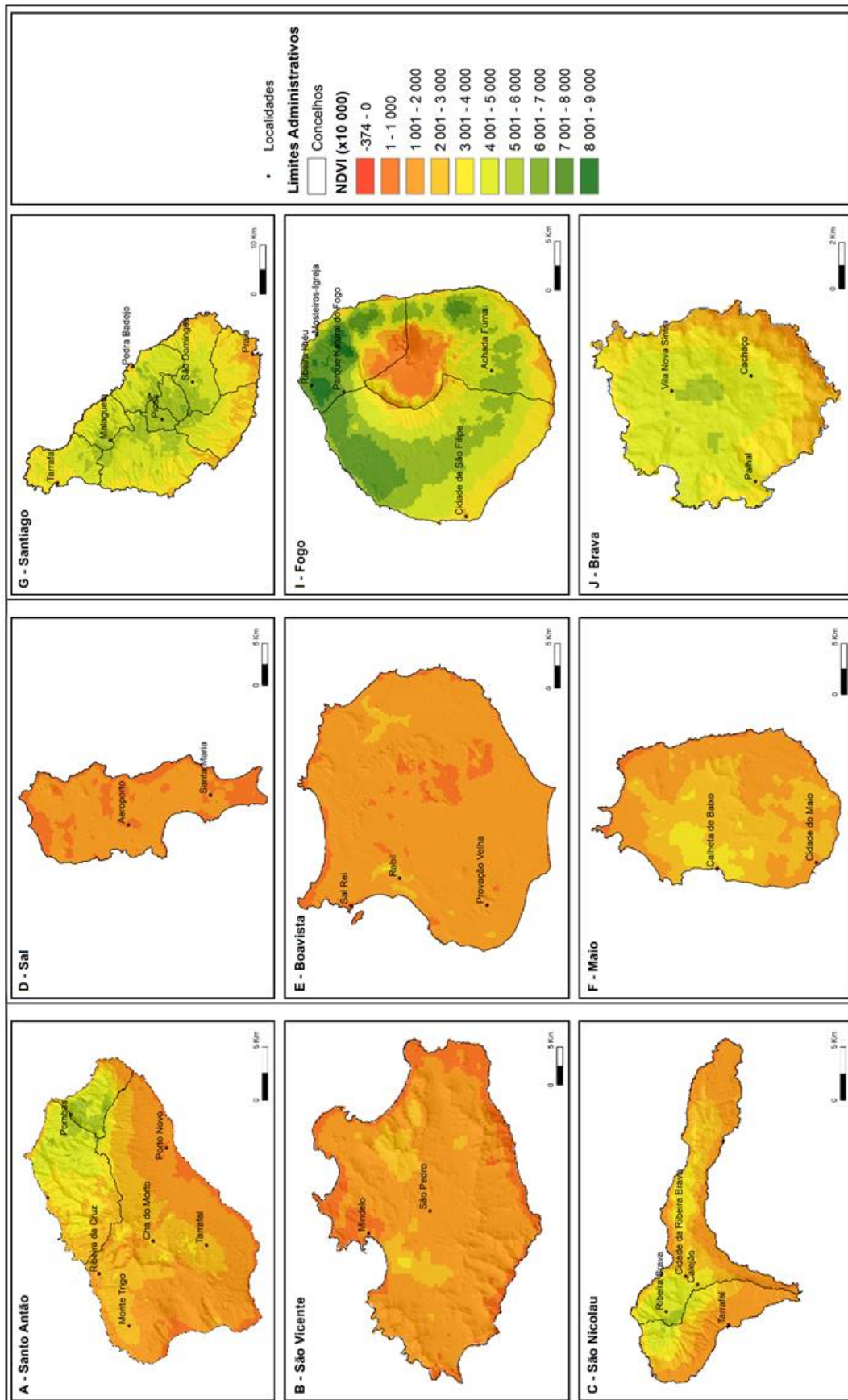


Figura 8 - NDVI médio de 2000 a 2012

### 1.3. Modelo Numérico de Elevação

As áreas montanhosas de Cabo Verde registam claramente valores pluviométricos superiores às áreas baixas do litoral: o ar ao ascender ao longo de uma montanha arrefece e condensa, originando a formação de nuvens e precipitação. Por isso, a altitude é uma das variáveis a ter em consideração aquando da construção do modelo de cartografia de suscetibilidade a ocorrência de seca aqui apresentado.

Os modelos numéricos de elevação podem ser determinados a partir de dados obtidos de forma direta (curvas de níveis e pontos cotados), sob diferentes métodos de interpolação, sendo os mais comuns, o *Spline*, o *Inverse Distance Weighted (IDW)* e o *Triangular Irregular Network (TIN)* ou ainda através de imagens captadas pelos satélites e veículos aéreos não tripulados.

Hoje em dia existem muitas instituições que produzem estes modelos à escala do planeta com uma resolução espacial razoável e disponibilizam-na de forma gratuita.

O *Advanced Spaceborne Thermal Emission and Reflection Radiometer Global Digital Elevation Model (ASTER GDEM)* é uma iniciativa conjunta da *National Aeronautics and Space Administration (NASA)* e do Ministério da Economia, Industria e Transportes do Japão (METI). Estas instituições disponibilizam gratuitamente um modelo digital de elevação global. Construída a partir de pares estereoscópios de imagens oriundas da plataforma EOS AM-1 com o instrumento ASTER, a informação altimétrica é derivada do instrumento estéreo ao longo de órbita do sensor ASTER, que adquire imagens no infravermelho próximo (0,78 a 0,86  $\mu\text{m}$ ) nas bandas 3 N (Nadir) e 3 B (Back), as quais permitem por processos de autocorrelação entre os dois canais, a criação de um modelo digital de elevação. O modelo digital de elevação é o resultado de processamento e correlação entre 1.3 milhões de bandas ASTER, e imagens óticas cobrindo a superfície terrestre entre as latitudes 83 N e 83 S. Ao todo, o mosaico possui 22 895 imagens de 1 por 1, tipicamente com resolução espacial na ordem dos 30m e uma precisão altimétrica na ordem dos 7 a 14m, com sistema de projeção WGS84.

As imagens utilizadas na realização deste trabalho foram obtidas no *sítio da internet* do *Earth Explorer* do USGS: <http://earthexplorer.usgs.gov/>. Como foi referido no parágrafo anterior estas estão em segmentos de 1 lat. x 1 Long, e por isso, o

arquipélago de Cabo Verde encontra-se segmentado em 10 imagens, sendo possível a agregação das mesmas através da ferramenta “*mosaic*” do *ArcGIS*.

Tendo em atenção que a cartografia da suscetibilidade é realizada para cada ilha, recortaram-se as imagens pela área de cada uma (Figura 9).

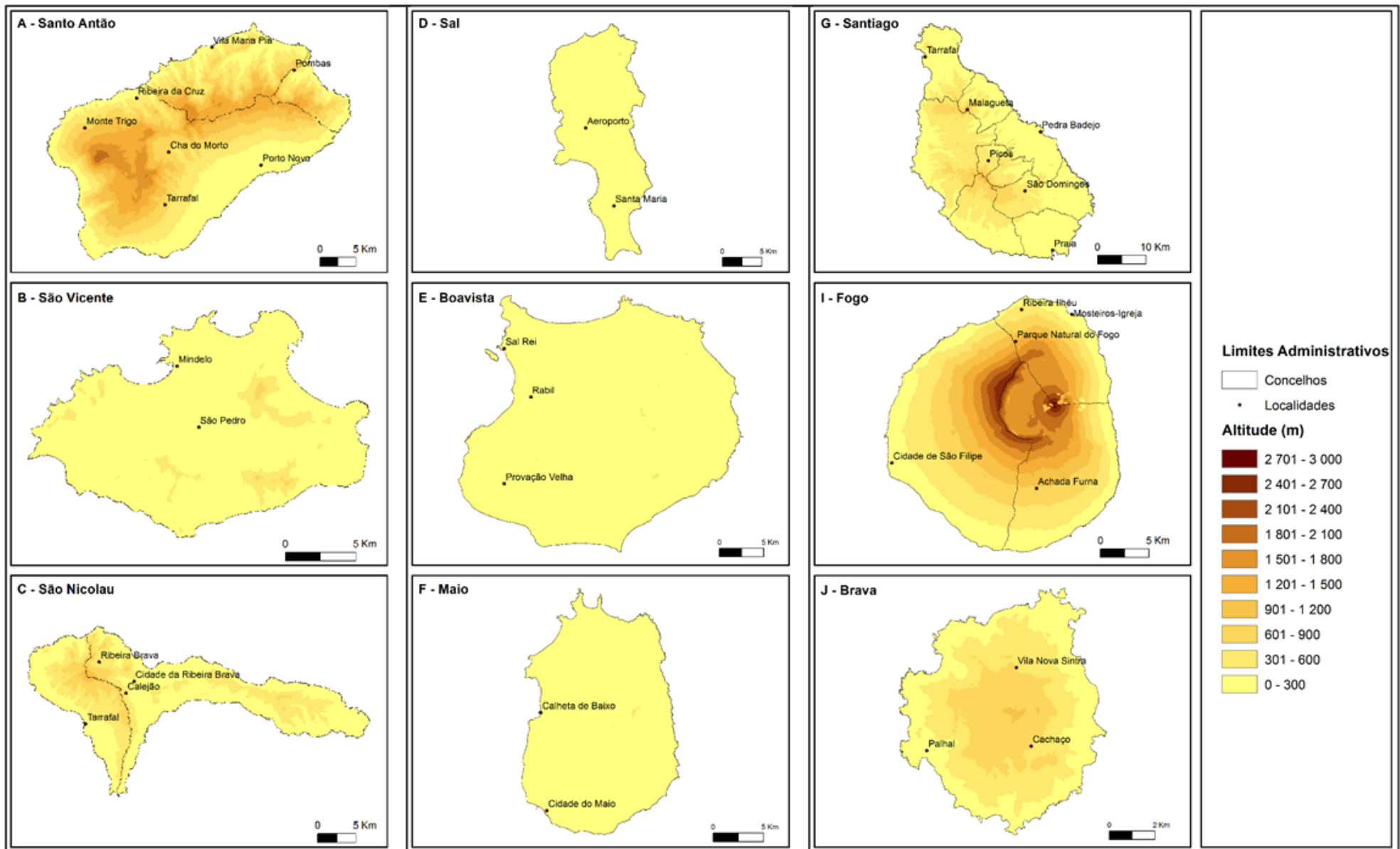


Figura 9 - Modelo numérico de elevação

## 1.4. Exposição

A exposição determina-se a partir de modelos numéricos de elevação, com base num algoritmo que analisa os valores de elevação de oito células adjacentes (3x3), e o resultado final corresponde ao grau de inclinação de cada face de vertente. Divide-se normalmente em octantes de 45°, sendo o primeiro Norte, centrado em 0°.

Tabela 8 – Octantes de exposição de vertentes

Octantes	Graus (°)
Norte	0 – 22,5 e 337,5 – 360
Nordeste	22,5 – 67,5
Este	67,5 – 112,5
Sudeste	112,5 – 157,5
Sul	157,5 – 202,5
Sudoeste	202,5 – 247,5
Oeste	247,5 – 292,5
Noroeste	292,5 – 337,5

A exposição das vertentes poderá ser usada para ajudar a detetar a direção predominante das massas de ar que atingem as ilhas de Cabo Verde. Neste caso, as vertentes expostas a norte e nordeste são as que recebem a influência direta dos alísios, sendo por isso as mais húmidas. As classes de exposição utilizadas correspondem à sua reclassificação em três classes, sendo estas: áreas planas, vertentes expostas a norte e nordeste e outras exposições.

Apesar de haver trabalhos que se concentram na análise de distribuição de ventos e sua influência na distribuição espacial da precipitação, não é conhecido, em termos numéricos as diferenças de precipitação registadas entre as vertentes expostas ao vento predominante e as não expostas. Por isso, o valor atribuído a cada classe de exposição não corresponde a nenhum parâmetro já estudado, mas sim, a uma decisão que permite diferenciar a realidade do território.

## 1.5. Cartas agrícolas

As cartas agrícolas foram fornecidas pelo Programa das Nações Unidas para o Desenvolvimento no âmbito do projeto “Análise e cartografia de perigosidade em Cabo Verde”. Estas cartas foram retiradas do trabalho “A agricultura do arquipélago de

Cabo Verde: Problemas Agrários” de António José da Silva Teixeira e Luís Augusto Grandvaux Barbosa realizado em 1958.

As cartas agrícolas possuem informações referentes aos tipos de agricultura praticada em cada ilha, que varia de ilha para ilha, pois estas apresentam características geográficas distintas e logo áreas agrícolas também. É possível obter informações sobre as áreas de agricultura de sequeiro ou de regadio, áreas áridas ou húmidas, áreas de pastagens, assim como áreas dunares ou de afloramento rochoso. Estas informações por si só permitem chegar a algumas conclusões em termos da distribuição de precipitação, e a classificação dos espaços físicos de cada ilha, que podem ser utilizadas depois como constrangimento aquando de avaliação de suscetibilidade de seca.

Apesar da idade das cartas (1958), estas continuam a representar bem realidade presente no terreno das diversas ilhas que compõem o arquipélago. Porém em algumas delas registou-se o aumento da extensão de áreas de regadios nos últimos anos, fruto da aposta do governo nesta área impulsionado pela criação de reservatórios de água, ou a diminuição provocada pelo abandono das áreas agrícolas como o resultado imediato do movimento migratório da população das áreas rurais para os espaços urbanos.

### **1.6. Cartas de vegetação**

Certas espécies vegetais são típicas de algumas regiões, e sobreviverem sob determinadas características biofísicas do território, adaptando-se a parâmetros extremos como a ausência de precipitação, são o caso de espécies endémicas das regiões subtropicais.

A ocorrência de eventos extremos, como as secas, sobretudo prolongadas, resultam numa diminuição do coberto vegetal, por isso, esta constitui uma das variáveis a ser considerada aquando da determinação de suscetibilidade.

As cartas de vegetação, assim como a restante informação utilizada na realização deste trabalho foram disponibilizadas pelo PNUD CV.

Estas cartas foram produzidas pela *GEOMAPS + Remote Sensing* para o Gabinete Federal de Geoinformação das Forças Armadas da Alemanha (AGeoBw), através da

combinação de informação retiradas de imagens *SRTM DTED level 2*, *Orthophoto Mosaic* (NRF), *Landsat 7 ETM+*, *ASTER* e *Advanced Land Imager (ALI)*.

Estas cartas encontram-se classificadas em duas categorias: vegetação e topografia. Como é possível verificar na Figura 10 uma vasta proporção das ilhas não possui vegetação, e onde esta ocorre tende a ter uma densidade de ocupação inferior a 30%. Realça-se ainda que os matos encontram-se dispersos no terreno, sendo por isso as áreas florestais sempre de pequena dimensão. As áreas cultivadas localizam-se normalmente perto das povoações e nos fundos de vales.

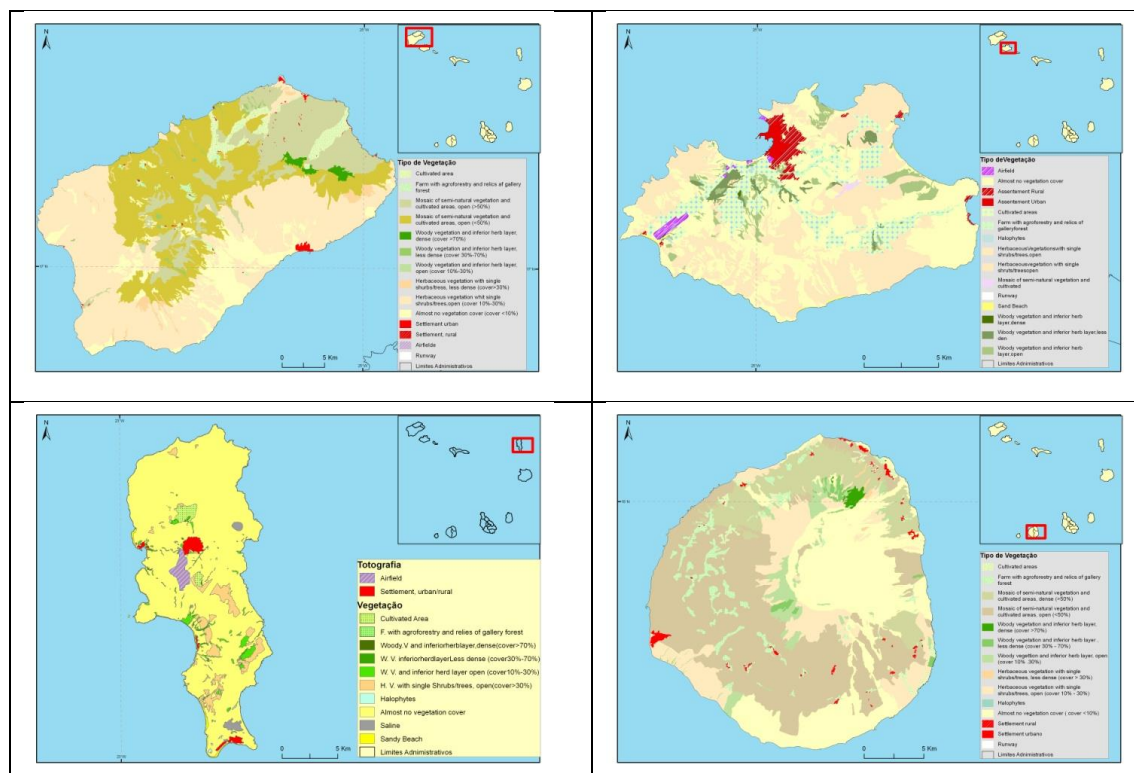


Figura 10 - Cartas vegetação de Cabo Verde (Fonte: Gabinete Federal de Geoinformação das Forças Armadas da Alemanha)

## 2. Metodologia e Processos de Integração da Informação

Como foi mencionado anteriormente a metodologia proposta baseia-se na análise de eventos de secas determinados a partir de séries de precipitação, obtidas através de observações pontuais (estações meteorológicas e postos udométricos) conjuntamente com a análise de índices de vegetação (Figura 11). Por isso, esta secção da dissertação encontra-se subdivida em três pontos, i) o primeiro refere-se aos processos de identificação de eventos de secas ocorridas durante o período em análise e a sua espacialização; ii) o segundo ponto consiste na determinação de *stress* hídrico da

vegetação a partir de índices de vegetação; iii) o último corresponde à integração dos pontos 1 e 2.

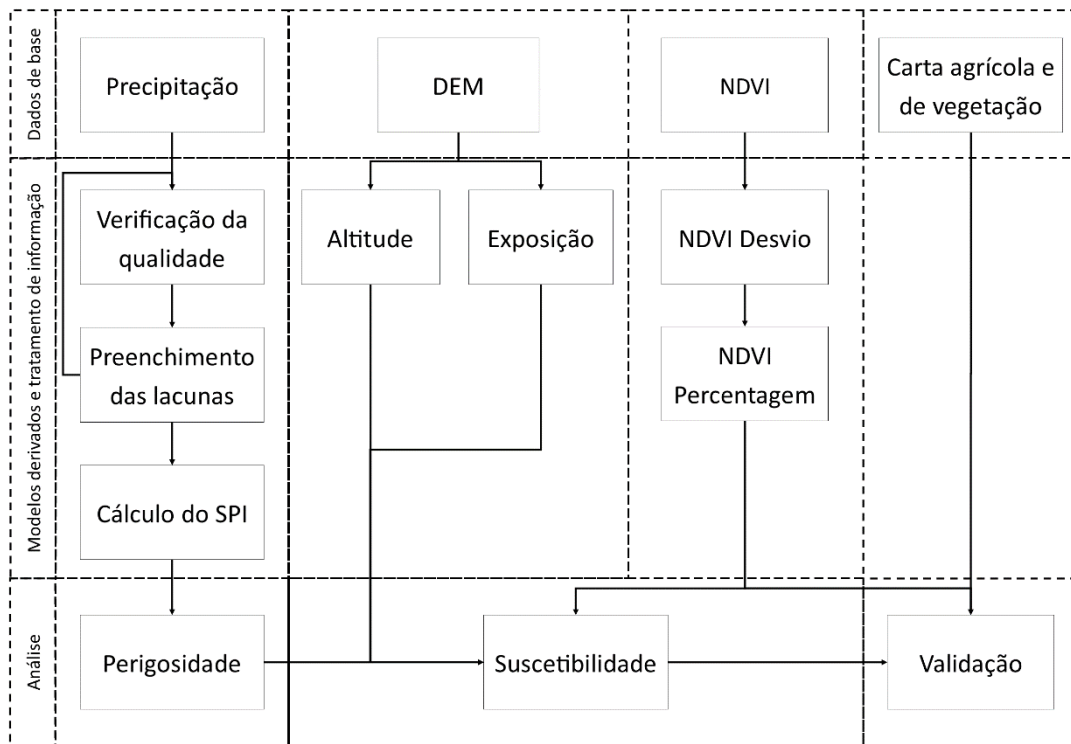


Figura 11 - Esquema metodológico do trabalho

## 2.1. Identificação de eventos de seca associado à precipitação

Como o próprio título de indica, numa primeira fase do trabalho identificaram-se os eventos de secas associado à ocorrência de precipitação fracas.

### 2.1.1. Cálculo do SPI

Adotaram-se três escalas temporais no cálculo do índice SPI: 4, 6 e 12 meses (Tabela 9). A sua adoção baseia-se, naturalmente, no conhecimento do regime pluviométrico do arquipélago já estudado por vários autores, como (Correia, 1998) e Soares (2004) e que é marcado por uma elevada concentração estacional da precipitação. Assim, o significado destas escolhas prende-se com a avaliação das condições de seca em três unidades temporais de análise fundamentais, tal como a seguir se explicita:

Tabela 9 - Escalas temporais utilizadas no cálculo do SPI em Cabo Verde

SPI	Duração (Meses)	Período	Meses
4	4	Estação das Chuvas (EC)	Julho a Outubro
6	6	Estação das chuvas alargada (ECA)	Julho a Dezembro
12	12	Anual	Julho a Junho

- 1) O SPI de 4 meses assenta na precipitação acumulada de Julho a Outubro – período correspondente à estação chuvosa propriamente dita, no decurso do qual se totaliza praticamente toda a precipitação do ano climatológico; com exceção de Santo Antão, mais de 85% da precipitação média anual ocorre durante estes meses;
- 2) O SPI de 6 meses, calculado com base na precipitação acumulada entre Julho e Dezembro – período correspondente à estação chuvosa alargada, abrangendo um período de transição que marca um raro prolongamento das chuvas, nalguns anos climatológicos;
- 3) O SPI de 12 meses, definido de Julho a Junho – correspondente ao ano climatológico, total no Arquipélago.

Em consonância com o que foi descrito anteriormente atribuiu-se, naturalmente, maior importância à análise das séries de SPI de 4 meses, definidas para o período de Julho a Outubro, quadrimestre em relação ao qual se procedeu a uma análise detalhada da intensidade dos eventos de seca, definindo-se:

- Um quadro cronológico com a classificação das secas de acordo com a sua severidade;
- Os limiares de precipitação correspondentes às classes de severidade das secas registadas em todas as estações;
- A probabilidade de ocorrência desses limiares de precipitação;
- A espacialização dos limiares de precipitação através de métodos geoestatísticos das ilhas cuja cobertura espacial das estações climatológicas o permite;

Com esta informação foram construídos os mapas de perigosidade referente a cada grau de severidade.

O cálculo do SPI foi efetuado com recurso ao *software* desenvolvido pelo *National Drought Mitigation Center*, dos EUA (SPI program v6), disponível em: [http://drought.unl.edu/MonitoringTools/DownloadableSPIProgram.aspx, ultimo acesso em 2 de Março de 2016].

### 2.1.2. Severidade e frequências de ocorrência de secas

A análise estatística das séries do índice SPI permitem determinar o grau de severidade, duração e frequência dos eventos de seca, possibilitando a avaliação da perigosidade associada a este fenómeno. Como foi mencionado anteriormente, verifica-se um episódio de seca quando o índice SPI atinge valores inferiores a zero. Assim, relativamente ao seu grau de severidade, os eventos de seca foram classificados em três categorias (Tabela 10).

Tabela 10 - Graus de severidade da seca de acordo com Mckee et al. 1993

Valores de SPI	Grau de severidade da seca
-1 a -1.49	Moderada
-1.5 a -1.99	Severa
$\leq -2$	Extrema

A frequência de ocorrência corresponde à razão entre número total de grau de severidade de seca pelo número total de eventos de secas ocorridos durante todo o período em análise. No capítulo III será apresentado um calendário com os eventos de secas ocorridos durante o período em análise.

### 2.1.3. Determinação e espacialização de limiares de precipitação

Em termos práticos a normalização do índice SPI constitui um ponto forte, pois permite a comparação dos resultados entre diferentes regiões. Porém, neste trabalho quis-se saber o valor de precipitação a partir do qual se pode considerar que uma determinada localidade (estação) regista um evento de seca, sendo isto possível através da determinação de limiares de precipitação para o limite máximo de cada grau de severidade (ou seja, SPI -1, SPI -1.5 e SPI -2).

A determinação dos limiares de precipitação foi feita através da combinação linear entre os quantitativos pluviométricos mensal e o valor de SPI4, em cada estação, foi feita de seguinte forma:

- 1) Emparelharam-se os valores de precipitação e os valores de SPI registados em cada estação;
- 2) Realizaram-se gráficos de dispersão em que o SPI corresponde ao eixo das abcissas (x) e a precipitação ao eixo das ordenadas (y);
- 3) Determinaram-se as equações de retas que melhor se ajustam à distribuição verificada, sendo polinómio de grau 3 aquela que melhor se ajusta, em que  $R^2$  foi sempre igual a unidade (Figura 12);
- 4) Por último aplicou-se a equação de reta para aos diferentes graus de severidade.

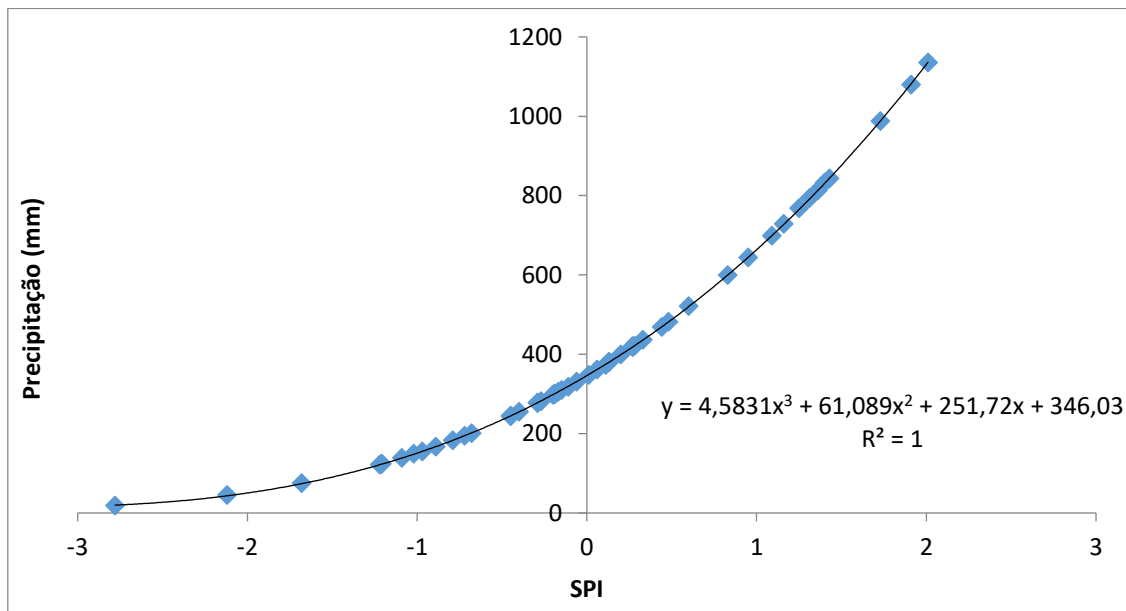


Figura 12 - Relação entre SPI 4 e precipitação acumulada na estação de Água das caldeiras (Ilha de Santo Antão)

Para além da representação pontual da probabilidade de ocorrência de cada grau de severidade de SPI, procurou-se espacializar os limiares de precipitação referente a estes graus de severidade através de métodos de interpolação. A irregularidade espacial da distribuição da precipitação aliada a fraca cobertura espacial das estações levaram a que o método de interpolação escolhida para a realização desta etapa fosse a Co-Krigagem, sendo possível ter em consideração outros fatores que influenciam a

distribuição espacial da precipitação como a altitude e a exposição das vertentes em relação aos ventos predominantes.

Tendo em conta o carácter não-estacionário da precipitação e a fraca cobertura espacial das estações, optou-se por aplicar este método apenas nas ilhas de Santiago, Fogo e Brava onde existem mais estações.

A técnica de krigagem assume que os dados recolhidos de uma determinada população se encontram correlacionados no espaço. É um método linear (cujas estimativas resultam de combinações lineares ponderadas dos dados existentes), não enviesado, pois a média dos erros (isto é, desvios entre o valor observado e o valor estimado) são nulas; e pode ser considerado o melhor em comparação aos outros métodos de interpolação porque os erros de estimação apresentam uma variância de estimação mínima. Permite estimar um valor de  $Z(x)$  num determinado ponto  $x_0$  baseado numa média-móvel-ponderada:

$$Z^*(x_0) = \sum_i a_i Z(x_i) \quad (3)$$

Em que os pesos ( $a_i$ ) atribuídos às amostras são calculados de forma a minimizar a variância estimada:

$$s^2_k = \text{var} [Z(x_0) - Z^*(x_0)] \quad (4)$$

Esta variância é calculada em função de um modelo selecionado com base num variograma experimental e na localização de cada uma das amostras em relação às outras e os pontos que se pretendem estimar.

A cokrigagem constitui, uma extensão da krigagem segundo o qual diversas variáveis regionalizadas correlacionadas entre si podem ser utilizados em conjunto para gerar uma nova superfície. Obtém-se um vetor de valores em vez de apenas um valor amostrado da variável principal (ou primária). Pode-se melhorar a superfície estimada utilizando variáveis secundárias densamente amostrados.

Este processo obriga a ajustar o variograma através de uma curva média e inferir sobre a relação entre o afastamento das amostras e a variação dos valores, para toda a área e para toda a gama de valores, a partir dos valores conhecidos experimentalmente. Esta etapa é extremamente importante dentro da metodologia geoestatística pois é neste ponto que se faz a síntese das características estruturais do fenómeno espacial (grau de dispersão, continuidade, anisotropia, imbricamentos), num modelo único e coerente de variograma. Significa que o ajustamento do variograma experimental por

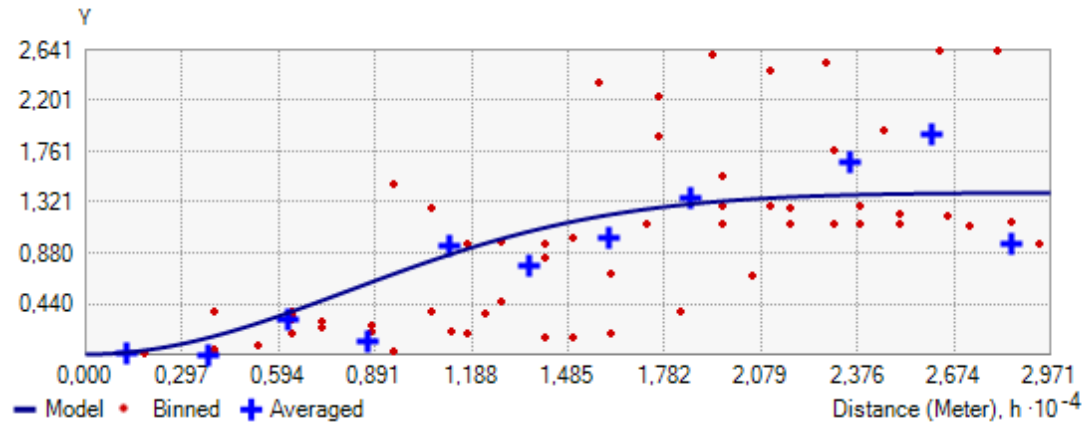
um modelo teórico é, normalmente, condicionado pelo conhecimento pericial que se tem de continuidade espacial representativa do fenómeno em estudo (Rocha, 2010).

Traduz-se formalmente na seguinte expressão:

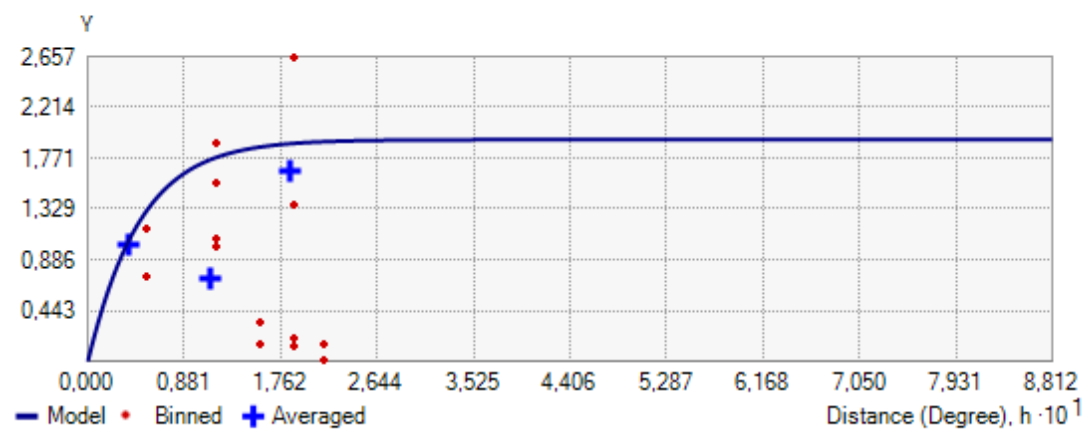
$$\hat{Z}_1(x_0) - \mu_1 = \sum_{i_1=1}^{n_1} \lambda_{i_1} [Z_1(x_{i_1}) - \mu_1(x_{i_1})] + \sum_{j=2}^{n_v} \sum_{i_j=1}^{n_j} \lambda_{i_j} [Z_j(x_{i_j}) - \mu_j(x_{i_j})] \quad (5)$$

Onde  $\mu_1$  é a média estacionária da variável primária;  $Z_1(x_{i_1})$  corresponde à amostra da variável primária no ponto ( $i_1$ );  $\mu_1(x_{i_1})$  consiste na média das amostras dentro da janela de pesquisa,  $n_1$  e o número de pontos amostrados dentro da janela de pesquisa do ponto  $x_0$  Utilizado na estimação; ( $\lambda_{i_1}$ ) é o peso selecionado para minimizar a variação estimada da variável primária;  $n_v$  Corresponde ao número de variáveis secundárias;  $n_j$  É o número de amostra de variável secundária dentro da janela de pesquisa,  $\lambda_{i_j}$  é o peso atribuído aos pontos  $i_j$  das  $j$  da variável secundária;  $Z_j(x_{i_j})$  corresponde ao valor de ponto  $i_j$  de  $j$  da variável secundária, e por último  $\mu_j(x_{i_j})$  é a média de amostra de  $j$  da variável secundária dentro da janela de pesquisa (Li & Heap, 2008).

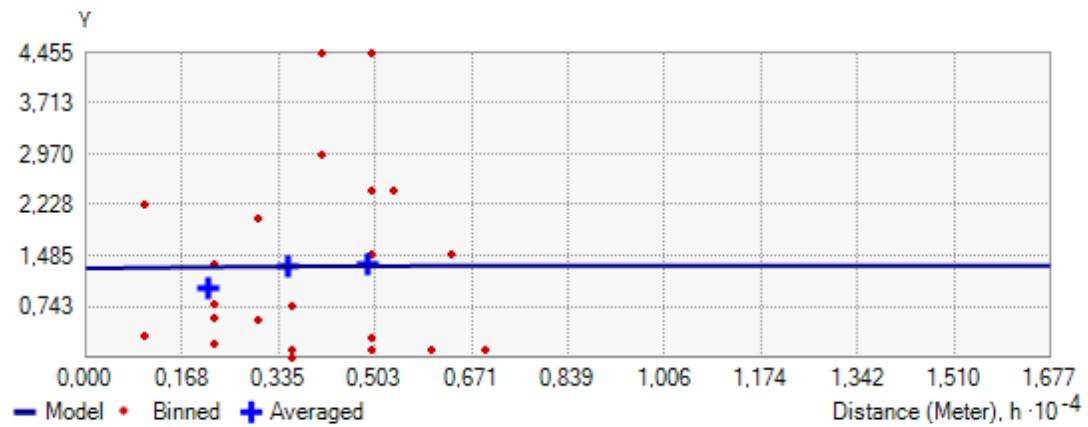
Os parâmetros utilizados para realizar a interpolação correspondem aos valores considerados ótimos pela extensão 'Geostatistical Analyst' do ArcGIS. Sendo que se utilizou sempre o semivariograma, sem ter em consideração o efeito de pepita. O mínimo de 2 e o máximo de 5 vizinhos mais próximos, num raio de pesquisa de 7600, 26000, e 19804 para a ilha de Santiago, Fogo e Brava, foram usados respetivamente, para gerar as superfícies de estimação. Realizaram-se diversos variogramas experimentais para decidir o variograma final de cada ilha para as três classes de seca, sendo que a Figura 13 apresenta o variograma final utilizado para a espacialização de seca moderada nas ilhas do grupo sotavento.



a



b



c

Figura 13 - Variogramas: a) Santiago; b) Fogo; c) Brava

A precisão de métodos de interpolação não exatos (onde valor estimado difere do valor observado no ponto amostrado) é avaliada através de determinação de resíduos, isto é, a diferença entre o valor estimado e o valor observado, num ponto. São várias

as medidas disponíveis para tal, sendo que as mais comuns são: i) O erro médio (ME) é utilizado para determinar o grau de enviesamento da estimação, porém os valores negativos e positivos anulam-se, e por isso tende a haver uma subestimação dos erros; ii) O erro quadrático médio (RMS) corresponde a raiz quadrada do somatório dos resíduos ao quadrado, o facto de ser ao quadrado faz com que este seja sensível aos valores extremos; iii) a raiz quadrada do erro médio quadrático medio (RMSE) mede o desvio das estimativas em relação ao valor observado. Por outras palavras, indica o grau de proximidade entre a estimativa e o valor observado, em que quanto menor for o resultado melhor é o modelo. Traduz-se formalmente na raiz quadrada do erro quadrático médio; iv) a raiz quadrado do erro quadrático médio normalizado (RMSSE) traduz-se na raiz quadrada de RMSE e o resultado de um modelo válido tem que ser próximo da unidade. Se o resultado for superior à unidade, então existe uma subestimação da variável primária, se esta for superior a 1 é porque houve uma sobrestimação da variável primária.

A extensão 'Geostatistical Analyst' realiza estas operações de forma automática a partir de validação cruzada aquando da realização de interpolação. A tabela que se segue apresenta os erros referentes aos testes realizados para os diferentes graus de severidade.

## **2.2. Determinação de perigosidade**

Numa avaliação preliminar da perigosidade associada às secas em Cabo Verde, procedeu-se à análise das séries de dados de precipitação disponíveis (anuais e mensais) com maior duração, as quais compreendem 51 anos de registos, no período contínuo 1962/63-2012/13. Estas séries cinquentenárias permitem enquadrar a variabilidade temporal da precipitação no arquipélago nas últimas décadas e asseguram a identificação de eventos de seca que pelos seus impactos ambientais e socioeconómicos foram as mais marcantes na história recente de Cabo Verde. Note-se que, num território onde a irregularidade interanual da precipitação é tão acentuada (Correia, 1998; Querido, 2010), um histórico de registos semicentenário pode ainda não ser suficiente para uma avaliação robusta da perigosidade associada a este fenómeno; no entanto, define-se assim o período contínuo relativamente ao qual foi possível compilar a informação necessária à prossecução desta avaliação preliminar.

A perigosidade, neste caso, corresponde à simples espacialização da probabilidade de ocorrência de cada grau de severidade (Figura 14). Geralmente, na bibliografia estudada a representação desta é feita através da cartografia dos resultados de SPI total. Neste trabalho representa-se cada grau de severidade de forma individual, isto é, cada grau dá origem a um mapa. Optou-se por uma representação de perigosidade a ocorrência de seca através de círculos proporcionais porque como foi referido anteriormente apenas as ilhas de Santiago e Brava possuem estação em número minimamente aceitável para a espacialização da perigosidade através de métodos geoestatísticos.

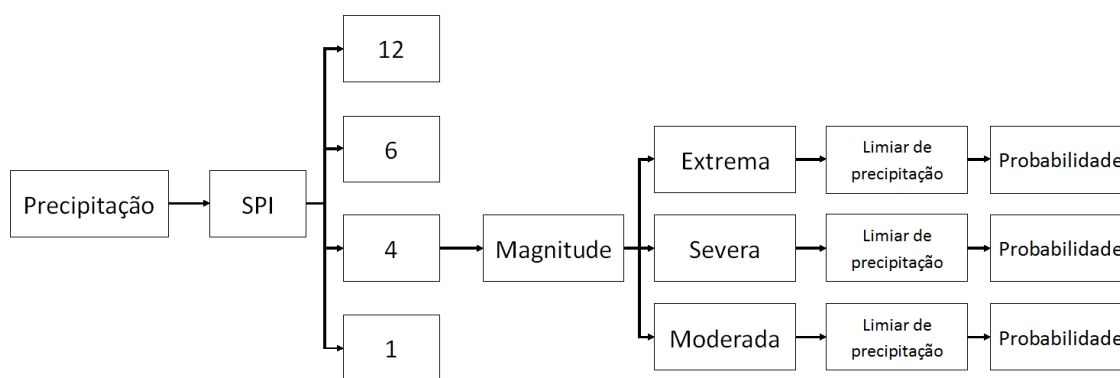


Figura 14 - Fases na determinação de perigosidade de ocorrência de seca em Cabo Verde

(Nota: Só foi utilizado o SPI 4)

### 2.3. Identificação de episódios de secas através do stresse vegetativo

Os índices de vegetação (como o NDVI) possuem um potencial elevado na identificação de eventos de secas, proporcionando uma análise simples e eficaz. Foi aplicado pela vez como um indicador do *stresse* vegetativo nas regiões áridas e semiáridas no contexto de monitorização e análise deste tipo de fenómeno por Tucker e Choudhury, citado por (Remelgado, 2013).

Como foi referido na secção 1 do presente texto diversos autores identificaram grau de correlação elevado entre a precipitação e o NDVI, sendo que esta pode ser avaliada de acordo com o esquema que se apresenta a seguir: correlação, regressão linear simples e análise de componentes principais.

Para compreender a relação entre a precipitação mensal e a vegetação (nomeadamente o índice NDVI), e a possibilidade deste último poder ser utilizado aqui

como um indicador auxiliar na determinação de suscetibilidade a ocorrência de seca, realizaram-se a várias correlações de Pearson entre:

- i) A precipitação mensal registada de Julho a Novembro e os valores de NDVI;
- ii) A precipitação mensal de Julho a Outubro e o NDVI;
- iii) A precipitação acumulada entre Julho e Outubro e o NDVI.

Não se considerou o restante ano hidrológico, pois como foi mencionado anteriormente o quantitativo pluviométrico registado neste período é muito baixo. Utilizou-se a totalidade das imagens NDVI disponíveis entre 1998 e 2013 para o arquipélago. Os valores de NDVI utilizados para aferir o grau de correlação foram obtidos através da média de uma grelha de 750 x 750 metros em torno das estações.

A determinação do stresse hídrico vegetativo passou pela aplicação de uma metodologia adotada por Remelgado (2013), e consiste na determinação da razão do desvio do NDVI de cada mês em relação à média mensal de um determinado período pela média desse período (1998 a 2013, neste caso). Traduz formalmente na seguinte expressão:

$$NDVI_{\%} = \frac{(NDVI_j - \overline{NDVI})}{\overline{NDVI}}, \quad (6)$$

onde  $NDVI_j$  corresponde a média de cada mês, como foi mencionado anteriormente existem duas imagens por mês, com exceção, ora de mês de Outubro ou Novembro, dependendo do número de dias do ano, por isso optou-se por calcular a média de cada mês;  $\overline{NDVI}$  constitui o NDVI médio de cada mês entre 2000 e 2012, calculado através da razão entre o somatório de cada mês e o número total de anos da série.

#### **2.4. Determinação de suscetibilidade de ocorrência de secas**

A cartografia de suscetibilidade reflete a análise de perigosidade, complementada com a espacialização do índice NDVI verificado após o final da estação chuvosa em dois anos de seca meteorológica e com a ponderação da influência dos seguintes fatores de predisposição:

- *A Posição geográfica no contexto do arquipélago* - este aspeto é fundamental, uma vez que determina que, como destaca Soares (2004), “as ilhas de Barlavento e Sotavento apresentem ligeiras diferenças climáticas, causadas por influências distintas por consequência das diferentes orientações e localizações

do anticiclone dos Açores; Durante o inverno boreal as influências da advecção de ar frio proveniente das latitudes mais elevadas sobre o arquipélago são mais marcantes sobre as ilhas de Barlavento. As ilhas de Sotavento sentem em maior escala a influência da deslocação oscilatória dos sistemas equatoriais que acompanham o movimento do sol”;

- A *Probabilidade de ocorrência* - obtido de modo empírico, tendo-se considerado que as áreas onde a probabilidade de ocorrência de secas é inferior a 10% possuem baixa suscetibilidade; que ela é média nas áreas onde a probabilidade se situa entre 10 e 20% e elevada quando esse valor é igual ou superior a 20%;
- O *índice NDVI (quantidade de biomassa)* – considerando que este índice varia inversamente ao stresse hídrico da vegetação, pode constituir uma informação relevante para procurar delimitar as áreas de maior ou menor predisposição à seca. Desta forma, foram consideradas três classes de NDVI para expressar estes contrastes espaciais, evidenciados no final da estação chuvosa de dois anos de seca meteorológica: <0,3 (maior predisposição); 0,3 a 0,5 (predisposição intermédia); e >0,5 (menor predisposição).
- A *exposição* – aos fluxos responsáveis pela ocorrência de precipitação significa, de um modo geral, que as fachadas orientais das ilhas se apresentem mais favorecidas, uma vez que as chuvas registadas na estação chuvosa (Julho-Outubro) se devem, em primeiro lugar, à atividade da zona de convergência intertropical (ZCIT), quando esta “atinge a sua posição mais setentrional no seu movimento para o norte; (...) quando as monções de ar marítimo tropical muito instáveis determinam com a sua influência o estado do tempo sobre as ilhas e as ondas e perturbações móveis provenientes do interior do continente se movimentam sobre a região, aproximadamente entre 5 e 15 graus norte.” (Soares, 2004).
- A *Altitude* – com exceção das chamadas “Ilhas Rasas”, a orografia das ilhas determina que a altitude, em geral, contribua para um reforço das precipitações, atenuando a predisposição para a ocorrência de seca. Nos casos particulares das ilhas do Fogo (em que altitude máxima atinge os 2829 m de altitude) e Santo Antão (1980 m no topo da Coroa), admite-se que nas suas

partes elevadas se verifique já uma redução da precipitação, relacionada com a maior estabilidade que predomina, nestas regiões, a esses níveis da troposfera.

## CAPITULO III – DISCUSSÃO DOS RESULTADOS

Neste capítulo apresenta-se os resultados dos métodos aplicados na secção anterior. Trata-se de uma exposição descritiva dos resultados acompanhados, em alguns casos, de dados estatísticos. Realça-se que muitos destes resultados foram aplicados no projeto “Análise e cartografia de perigosidade em cabo Verde”, financiado pelo PNUD e validada pela equipa que acompanhou este projeto.

### 1. Eventos de seca de 1962/3 a 2012/2013

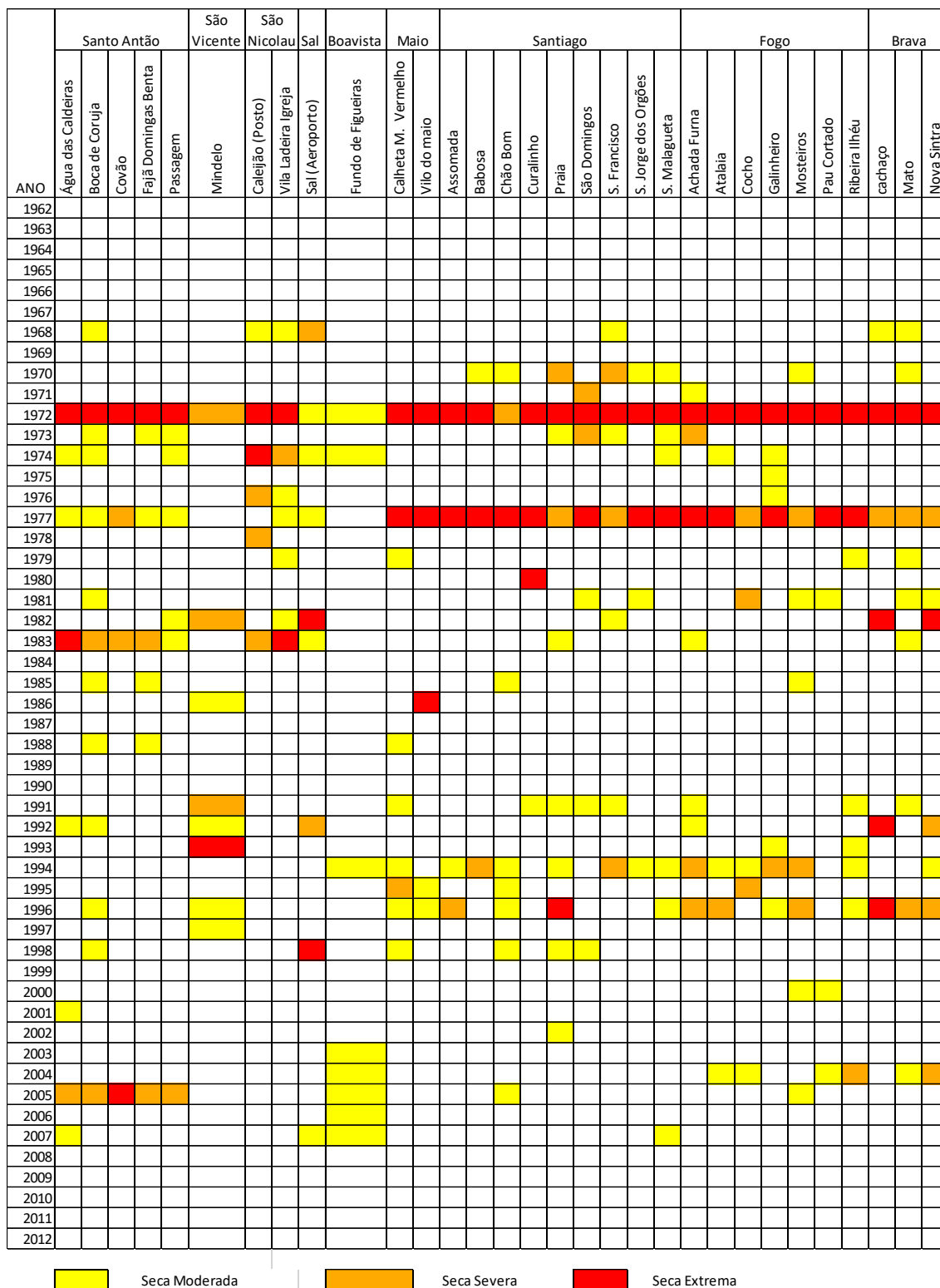
No sentido de avaliar a distribuição temporal de episódios de secas ocorridos no arquipélago, realizou-se um calendário de eventos para o período em estudo (Figura 15). Optou-se por apenas apresentar as secas sucedidas durante o período normal das precipitações (EC), uma vez que, de um modo geral, neste período do ano se concentra 85% ou mais da precipitação anual. Apenas no Nordeste da ilha de Santo Antão, a mais exposta à circulação atmosférica extratropical, se denota uma menor concentração estacional da precipitação, mas que corresponde, ainda assim, a uma fração superior a 2/3 da precipitação anual.

A agricultura tanto de sequeiro como a de regadios são totalmente dependentes da precipitação caída durante esta estação do ano; por outro lado o abastecimento de água tem sido muitas vezes influenciado pela ocorrência de défice de precipitação registada durante este período, o que torna ainda mais pertinente a análise de eventos de seca.

Do ponto de vista da cronologia e sucessão temporal de eventos de seca neste período de 51 anos, sobressaem os seguintes aspetos:

- De um total de 209 eventos de secas inventariados de 1962 a 2013, 114 foram moderados, 43 severos e 52 extremos;
- **Ao contrário do que seria de esperar raramente se verificou secas de longa duração, isto é, vários anos consecutivos secos, e quando tal se verificou, constituíram episódios de secas moderadas;**
- Não se registaram episódios de secas nos anos sessenta do século passado e os últimos anos do presente século;

- Uma profunda crise nos anos 70, com dois eventos de seca extrema em 1972 (generalizada a todo o arquipélago, com exceção apenas em duas estações do Arquipélago: aeroporto do Sal e Sal Rei da ilha de Boavista) e 1977;



Seca Moderada
  Seca Severa
  Seca Extrema

Figura 15 - Calendário de eventos de secas de 1962 a 2013 em Cabo Verde (Fonte: PNUD)

- Verificou-se a ocorrência de outros períodos críticos com nítido predomínio de secas, tais como os primeiros anos da década de 80 e na década de 90 quando a estação das chuvas foi seca em mais de 50% dos postos;
- No século XXI, tem-se registado uma sucessão de anos em que a estação das chuvas tem sido normal ou mesmo húmida; só em 2004 e 2005 se verificaram situações de seca meteorológica, com carácter pontual nas ilhas do Fogo e Brava de severidade moderada; já em Santo Antão, em 2005, a seca foi severa e extrema e atingiu toda a área.
- Apesar de não ser objeto de uma análise de muito detalhada aqui, os resultados do SPI mostram que houve de facto uma tendência para o aumento de precipitação nos últimos anos como já se tinha constatado na aquando de análise do regime de precipitação mensal entre 1962 e 2012.

## **2. Análise de limiares de precipitação**

Classificaram-se os resultados em cinco classes com o intuito de representar os contrastes existentes no terreno (Figura 16). Como seria de esperar os resultados da CoKrigagem evidenciam o efeito da orografia na distribuição espacial dos limiares de precipitação.

O padrão espacial gerado pelo método geoestatístico para os três graus de severidade de seca para a ilha de Santiago, apontaram para uma zona central, ou seja, as cadeias montanhosas do Pico Antónia e da Serra Malagueta com limiares precipitação muito elevados entre 270 - 350mm para a seca moderada que passa para 215 - 275mm quando se verifica seca severa, e 169 - 214mm para a seca extrema, o que continua a ser um valor elevado se tivermos em consideração a precipitação média do arquipélago. Segue-se uma classe que se estende para ocidente até chegar à costa, onde o limiar é ainda elevado, superior aos 100mm. Por outro lado a região setentrional (área circundante da estação de Chão Bom) e meridional (área circundante das estações da Praia e São Francisco) apresentam limiares mais baixos.

No caso da ilha do Fogo, o sector mais abrigado da ilha, a sotavento, o litoral setentrional apresenta limiares elevados, entre 241 a 279mm (o que corresponde a precipitação anual de algumas ilhas), por outro lado a vertente sul do vulcão e áreas mais próximas do litoral apresentam valores mais baixos, aquando de ocorrência de

seca moderada ou severa. Não se verifica grande diversidade espacial na presença de seca extrema, em que se pode dividir a ilha em duas classes: zona abrigada e o resto da ilha.

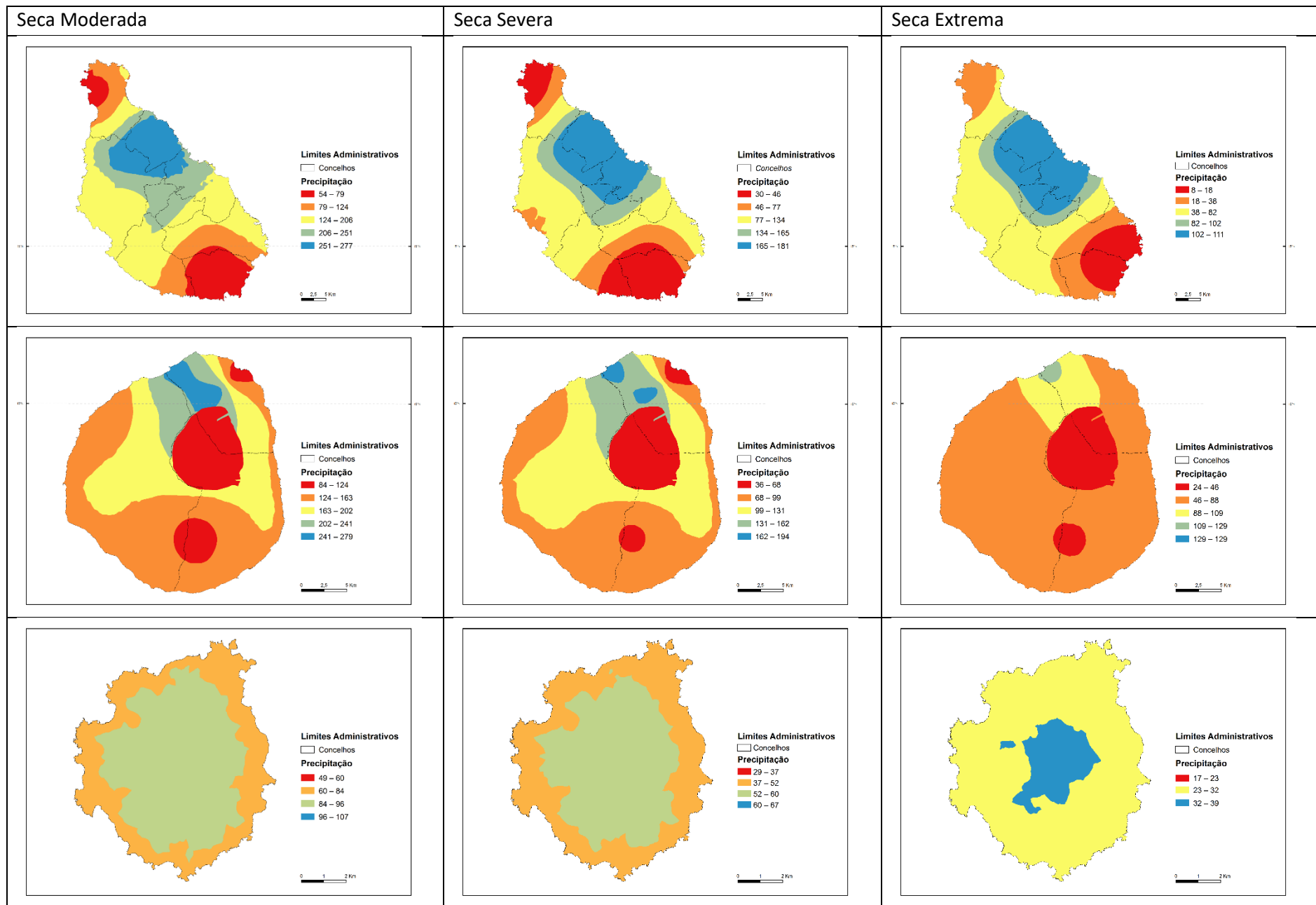


Figura 16 - Limiares de precipitação para cada grau de severidade

Seria de esperar que a ilha da Brava fosse aquela que apresentasse melhores resultados face a pequena dimensão da ilha, dado o número mais elevado de estações e cobertura espacial. Contudo a amplitude dos limiares verificados não é suficiente grande para gerar grandes disparidades espaciais. Independentemente do grau de severidade, a parte central da ilha possui limiares mais elevados em contraste com o litoral, verifica-se uma pequena mudança na distribuição espacial quando a severidade é extrema, onde a classe de maior limiar reduz-se ao pico mais elevada da ilha.

Tabela 11 - Estimativas dos parâmetros da validação cruzada para os semivariogramas ajustados aos limiares de precipitação para cada grau de severidade

Ilha	Grau de Severidade	Nº Estações	ME	RMSE	RMSSE	R <sup>2</sup>
Santiago	Seca Modera	9	14.1	87.4	2.1	1.0
	Seca Severa	9	12.3	57.3	1.7	1
	Seca Extrema	9	7.1	34.1	1.0	1.0
Fogo	Seca Modera	7	29.5	66.1	0.9	0.9
	Seca Severa	7	23.5	55.4	0.9	0.8
	Seca Extrema	7	11.3	37.7	1.0	0.9
Brava	Seca Modera	5	0.5	17.8	0.8	0.4
	Seca Severa	5	0.3	12.1	0.8	0.3
	Seca Extrema	5	0.2	7.6	0.8	0.2

Os erros verificados são valores que estão acima dos limiares considerados aceitáveis, sobretudo na ilha de Santiago, onde houve sempre subestimação da variável primária (RMSSE sempre superior a unidade). A ilha da Brava foi aquela que apresentou erros mais baixos, porém houve sempre sobrestimação da variável primária (RMSSE = 0.8). E o R<sup>2</sup> veio confirmar o referido anteriormente, que do conjunto é a apresentou piores resultados, em que o coeficiente de determinação entre o valor observado e o previsto foi igual ou inferior a 0.4 (Tabela 12). Tendo em conta estes resultados menos bom, derivados sobretudo da fraca cobertura espacial das estações, utilizou-se o NDVI com o intuito de ilustrar as condições de stresse hídrico condicionantes da vegetação como uma variável na determinação da suscetibilidade de ocorrência de seca.

### 3. Análise da perigosidade de seca

Apesar de Santão Antão possuir características biofísicas muito diferente das ilhas de São Vicente e de São Nicolau, as diferenças registadas entre este grupo de ilhas e as

ilhas rasas é conveniente tratá-las separadamente. Assim apresenta-se separadamente os resultados por grupos de ilhas: Barlavento (ABC), Rasas (DEF) e Sotavento (GHI), disponíveis nas Figuras 17, 18 e 19.

O número e a disposição das estações não nos permitem ter uma visão geral das ilhas em termos de probabilidade de ocorrência de secas, contudo os resultados obtidos permitem chegar a algumas conclusões: sendo a probabilidade de um modo geral baixa na ilha de Santo Antão, sem que se regista grandes diferenças entre as diversas estações; a probabilidade já é ligeiramente mais alta na ilha de São Nicolau e, assim como no caso Santo Antão não se verificam diferenças acentuadas entre as duas estações.

Não faz sentido a análise de perigosidade ou suscetibilidade de ocorrência de seca neste grupo porque a aridez constitui o principal traço do clima, em que a precipitação anual é geralmente inferior a 60 mm no conjunto ilhas pertencentes ao grupo. Se compararmos os valores de probabilidades registadas em relação aos outros grupos, percebe-se que é neste que se registem valores mais baixos.

No conjunto dos grupos, o sotavento composto pelas ilhas de Santiago, Fogo e Brava, correspondem ao conjunto mais pluvioso, em que a distribuição de precipitação está, como mencionado anteriormente, muito associado à altitude e exposição das vertentes em relação aos ventos predominante de norte/nordeste. A probabilidade não difere muito nas diversas estações, Chão Bom e de São Francisco apresentam probabilidade mais elevadas, as estações de Babosa (Picos) e Curralinho apresentam probabilidade mais baixas, sendo que ambas se localizam na cordilheira central da ilha de Santiago. No caso da ilha do fogo verifica-se uma situação especial, em que as estações (Chocho e Pau Cortado) situadas no flanco nordeste apresentam probabilidade mais elevada, por outro lado, as estações localizadas no noroeste apresentam valores de probabilidade mais baixo. Devido à localização das estações na parte central da ilha da Brava, ou seja, a zona mais montanhosa da ilha, não se verifica grandes variações de probabilidade entre as disponíveis.

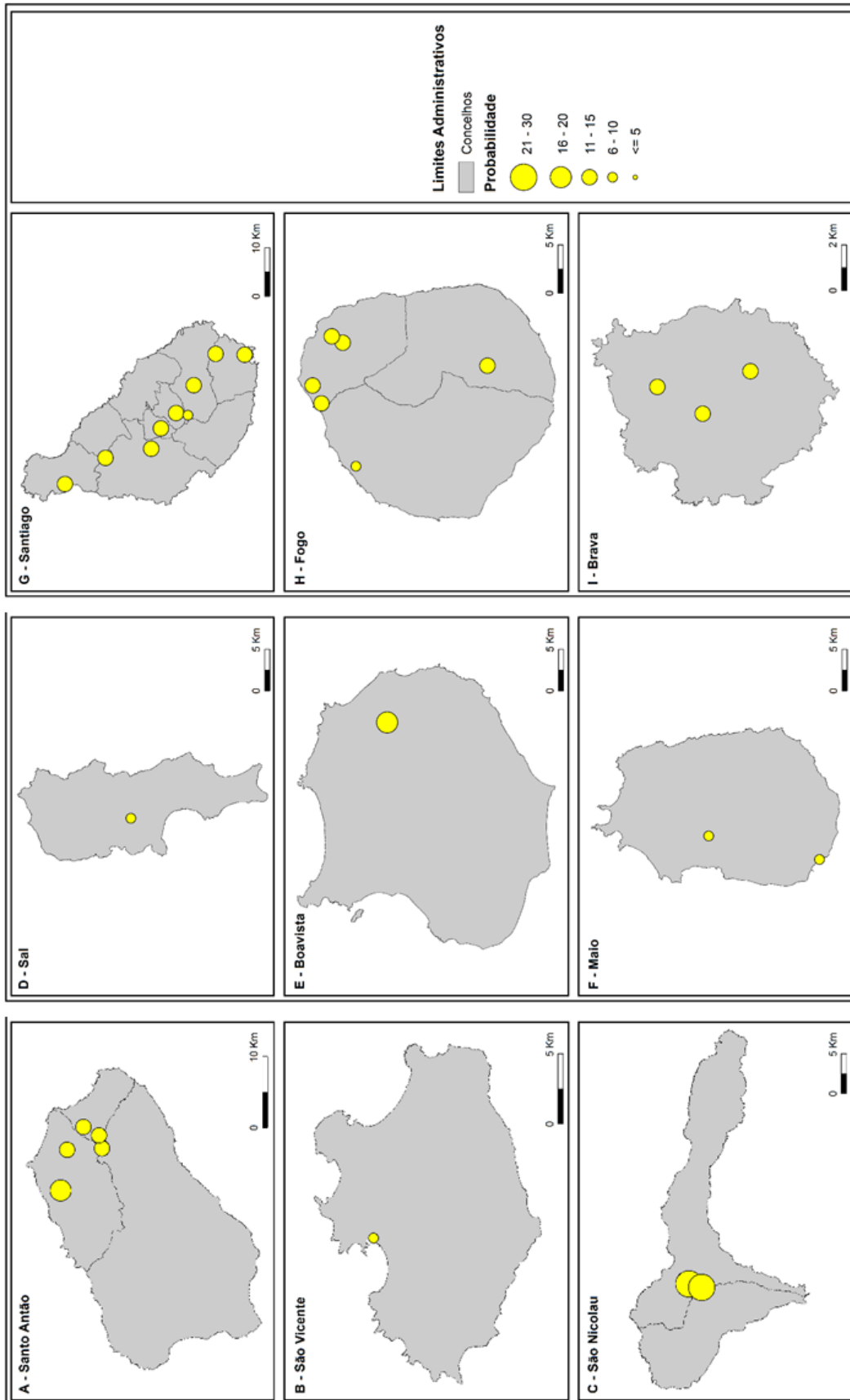


Figura 17 – Probabilidade de ocorrência de Seca Moderada

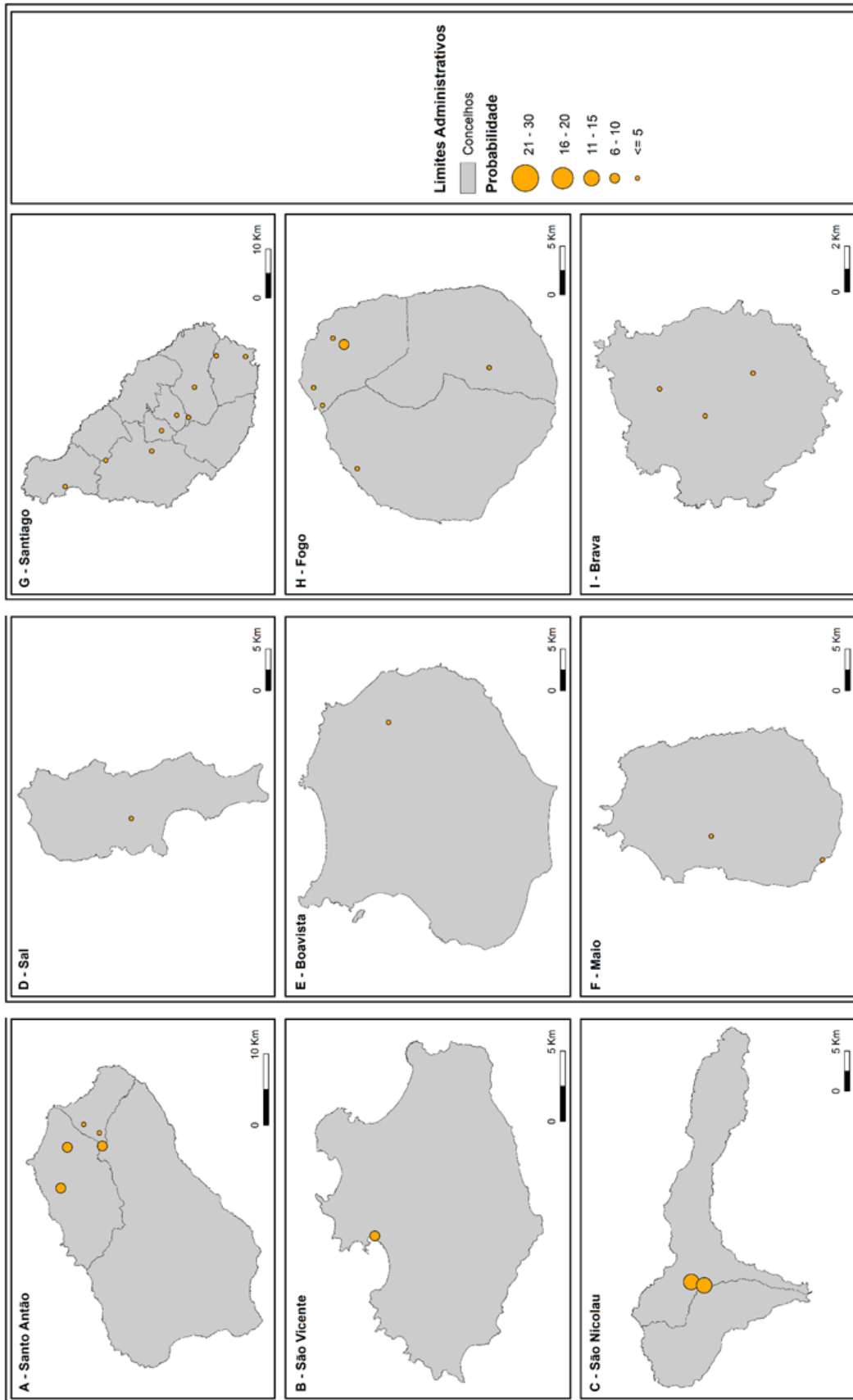


Figura 18 - Probabilidade de ocorrência de Seca Severa

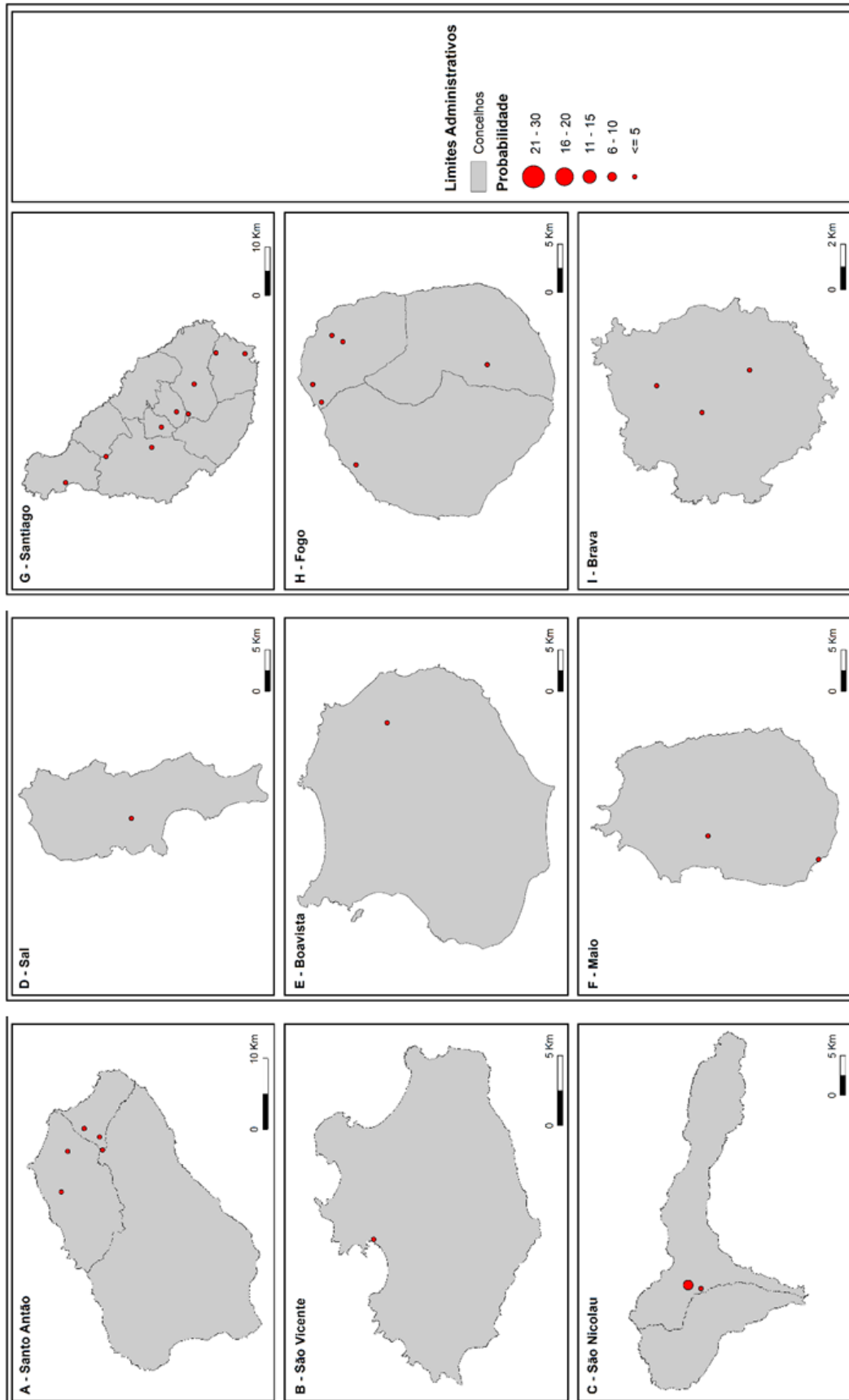


Figura 19 - Probabilidade de ocorrência de Seca Extrema

#### **4. Relação entre precipitação e vegetação**

A vegetação possui uma resposta espontânea à queda de precipitação no solo, em que os valores de NDVI aumentam logo após o primeiro mês com registo de precipitação. Realça-se que esta resposta varia consoante a localização das estações, as que estão localizadas no interior registaram melhores correlações. Isto pode ser explicado pela diferença de humidade entre as localidades planas do litoral e as áreas de elevada altitude do interior.

Denotou-se que o grau de correlação entre a precipitação acumulada e o NDVI foram de um modo geral superior ao verificado entre a precipitação mensal e o NDVI. Isto porque a vegetação tende a desenvolver-se mesmo quando não se verifica um acréscimo da precipitação de um determinado mês, subsistindo apenas com a água disponível no solo (Figura 20).

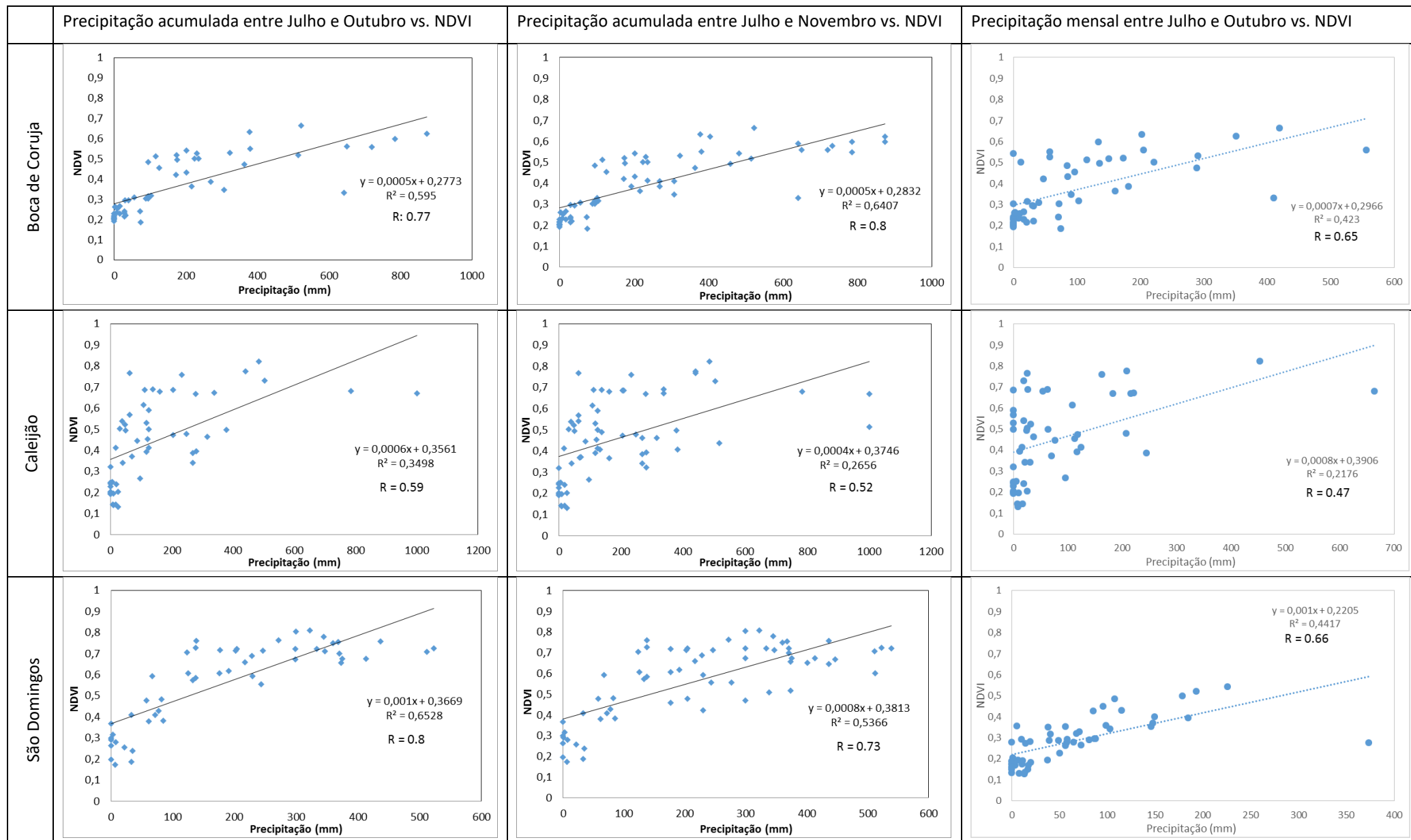


Figura 20 - Correlação entre a precipitação e o NDVI

## 5. Análise do stresse vegetativo

Apresenta-se a seguir os resultados dos desvios registados em torno da estação de São Domingos (Ilha de Santiago) que apesar de se inserir numa zona urbana, possui vegetação mais ou menos densa.

Apesar de não se ter registado nenhum evento de seca entre 2000 e 2012 na estação em causa, verificou-se stresse vegetativo (ou seja, desvio inferior a zero), em quase 50% dos registos da série de NDVI, em que os casos mais graves (desvio inferior a -0.3) ocorreram em nos meses de Agosto de 2002, 2005, 2008 e 2012. Realça-se ainda que apenas em 2002 se verificou stresse vegetativo durante toda a estação das chuvas, sendo que tal não sucedeu em 2005 e 2008 porque houve um mês com desvio positivo, Outubro no primeiro e Julho no segundo ano.

Verifica-se stresse vegetativo não só quando o valor de SPI é negativo mas também quando se regista um decréscimo do SPI em relação ao mês anterior, o que significa que a variação de NDVI é sensível à diferença de precipitação registada em cada mês.

A análise da Figura 21 permite concluir que a vegetação tem um comportamento cíclico, atinge normalmente o pico máximo depois da precipitação, e os pontos mínimos parecem coincidir com valores de SPI negativo, na maioria dos casos.

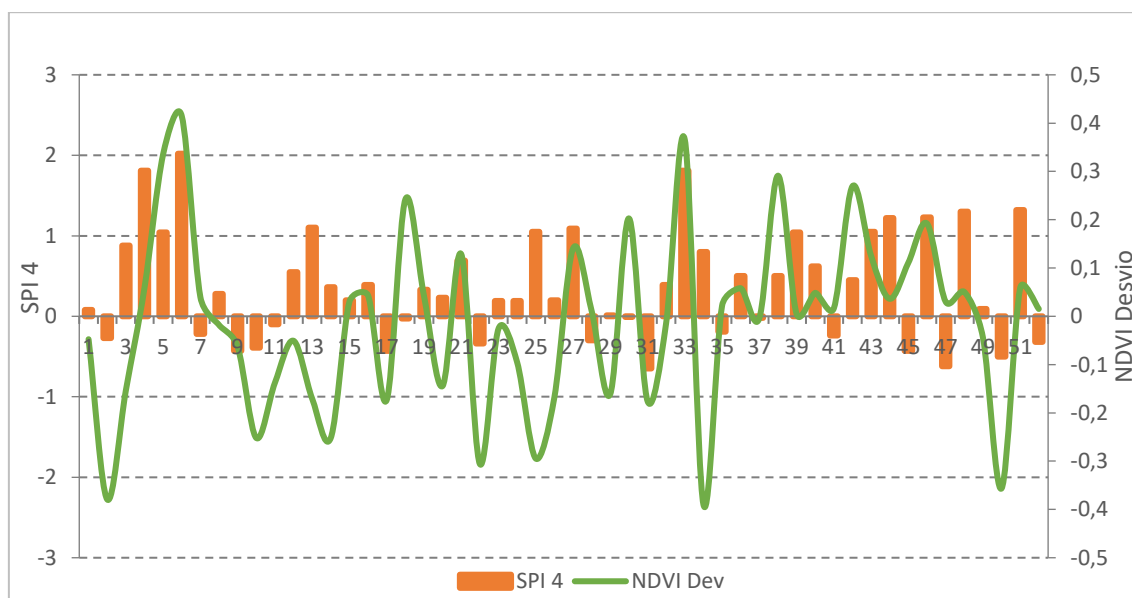


Figura 21 - Evolução temporal de SPI 4 e NDVI Desvio na estação de S. Domingos (Ilha de Santiago)

Ao analisarmos mais detalhadamente os meses da época das chuvas observa-se que o grau de correlação entre a precipitação e o desvio de NDVI é similar à distribuição

temporal da primeira, é forte e aumenta com o passar do tempo, em que o  $r$  é de 0.38 no mês de Julho, 0.39 em Agosto, 0.72 em de Setembro e 0.65 em Outubro (Figura 22). A maior variabilidade nos primeiros meses pode estar relacionada com dois fatores: como foi mencionado anteriormente, a precipitação começa efetivamente no mês de Julho ou Agosto, sendo por isso normal que se verifiquem desvios negativos em anos de baixa precipitação e desvios positivos em anos de precipitação elevada durante estes meses; outro fator que pode estar na causa dos desvios registados é a prática agrícola, sobretudo o regime de sequeiro, pois verifica-se normalmente as sementeiras nos meses de Julho e Agosto que também pode ter efeitos tanto negativo como positivo nos desvios. Neste caso as sementeiras podem resultar num aumento do coberto vegetal e as mondas numa diminuição de densidade de vegetação captada pelo índice NDVI.

Os desvios registados nos meses de Setembro e Outubro não oscilam muito de ano para ano, o que é compreensível pois a vegetação já se encontra estável nessa altura do ano devido a chuvadas caídas nos meses anteriores e sobretudo aquela que ocorre nestes meses. Por isso, em teoria, os desvios verificados nestes meses podem ser um bom indicador de seca.



Figura 22 - Evolução de SPI 4 e NDVI Desvio entre 2000 e 2012, nos meses da estação das chuvas na estação de S. Domingos (Ilha de Santiago)

A abordagem inicial passou pelo somatório dos desvios registados em cada mês durante todo o período em análise. Contudo constatou-se que as irregularidades anulam-se umas às outras, em que o resultado final não reproduz nenhum padrão espacial para diferenciar diferentes áreas de predisposição a ocorrência de seca. Por isso optou-se na classificação do índice em três classes, apresentados na secção seguinte do presente texto.

## 6. Análise da suscetibilidade de ocorrência de secas

Pelas razões já apontadas na análise da perigosidade, as “Ilhas Rasas” de Cabo Verde apresentam uma suscetibilidade elevada, dado o carácter marcadamente árido do

clima nestas ilhas. Neste caso, não se afigura relevante a identificação de secas na perspectiva da análise de riscos naturais, uma vez que a ausência ou escassez de precipitação se manifestam de modo praticamente permanente.

Nas restantes ilhas, com exceção do Fogo, de Santo Antão e de Santiago, a classe largamente dominante é igualmente a de suscetibilidade elevada, o que traduz a grande relevância do fenómeno seca no contexto dos riscos naturais neste arquipélago. A suscetibilidade baixa regista-se em percentagens que variam entre cerca de 5% no Fogo, 7% em Santo Antão e 13% na ilha de Santiago. Enquanto a percentagem de área de suscetibilidade moderada varia entre 12% em São Nicolau, 13% em Santo Antão, 20 % na ilha da Brava, 31% em Santiago e 45% no Fogo, que constitui a única ilha onde a percentagem de área de elevada suscetibilidade não é superior aos 50% (Figura 23).

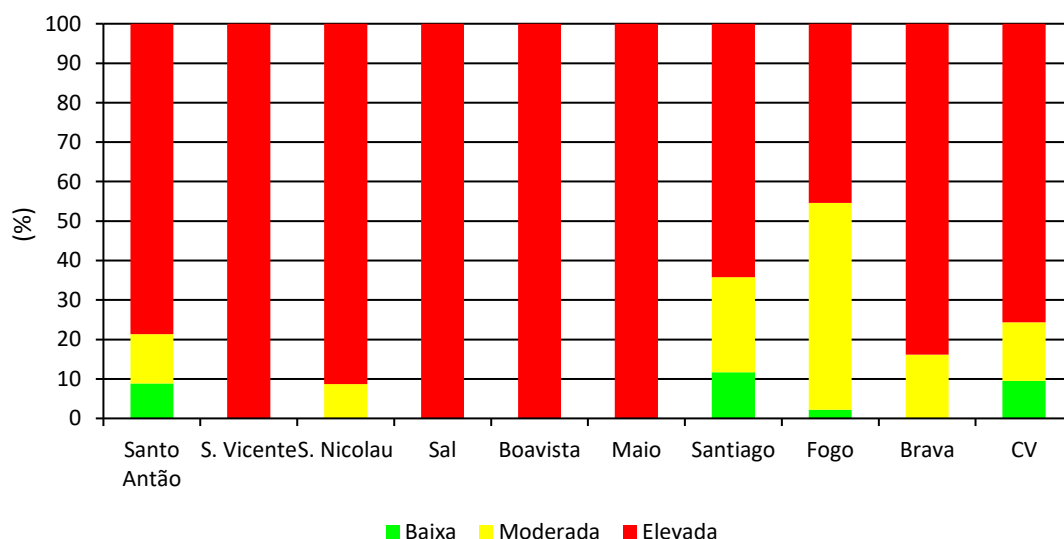


Figura 23 - Frequência das classes de suscetibilidade de ocorrência de seca em Cabo Verde

A distribuição da suscetibilidade de ocorrência de seca vem ao encontro do que foi descrito na análise de perigosidade, em que no caso da ilha de Santo Antão, o setor nordeste da ilha apresenta suscetibilidade baixa e moderada explicado pela elevada orografia deste setor e exposição aos ventos de norte/nordeste. Apesar de não haver presença de estações meteorológicas nos outros setores da ilha, classificou-se as como sendo áreas de elevada suscetibilidade, pois esta apresenta valores de NDVI inferiores a 0,3. Os valores do índice NDVI aliados a perigosidade verificada na estação de Mindelo, levaram-nos a classificar toda a ilha de São Vicente como sendo uma área de

elevada suscetibilidade. Na ilha de São Nicolau apenas o Monte Gordo, local de maior altitude, não apresenta uma suscetibilidade elevada (Figura 24).

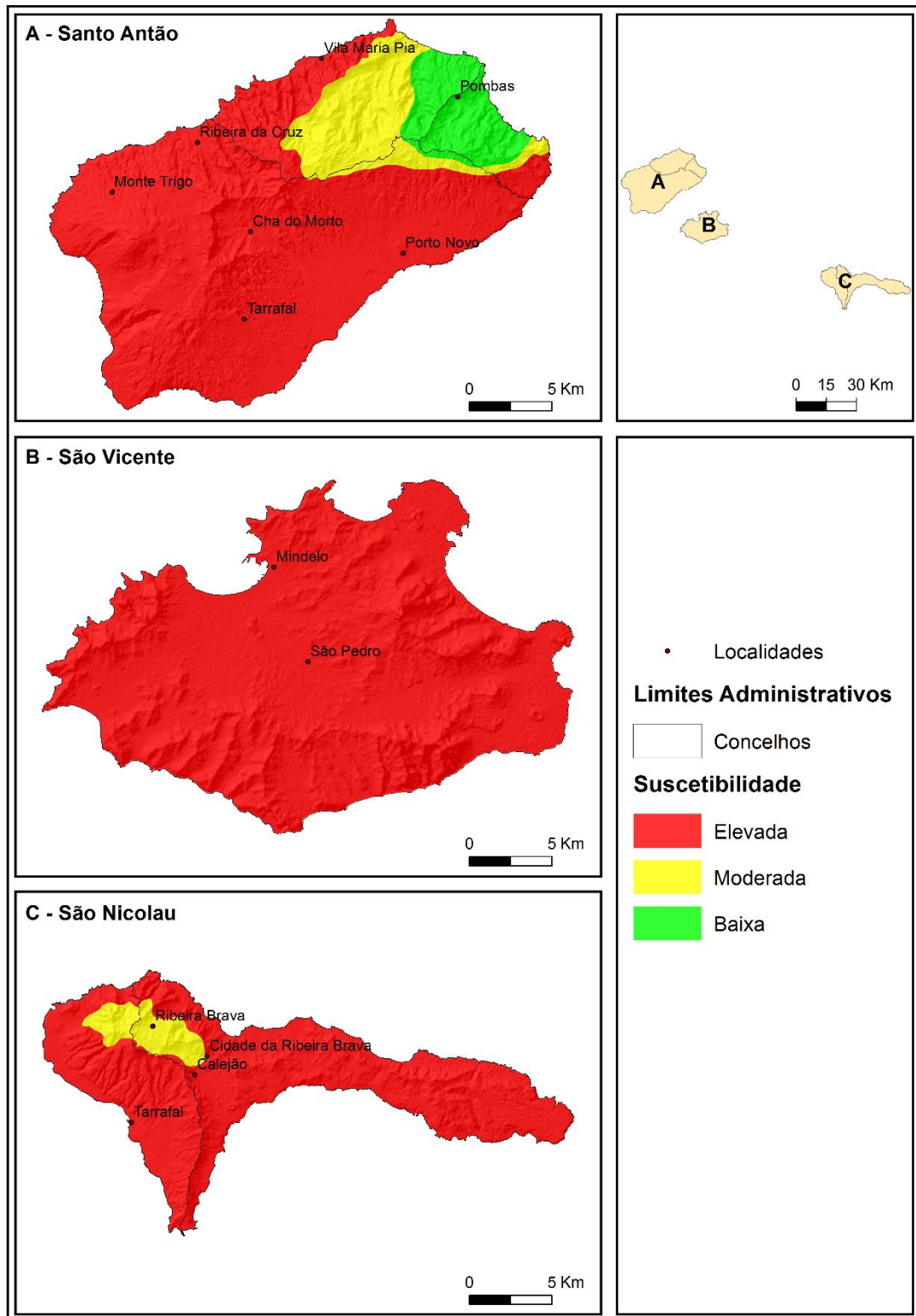


Figura 24 - Suscetibilidade de ocorrência de seca nas ilhas de barlavento

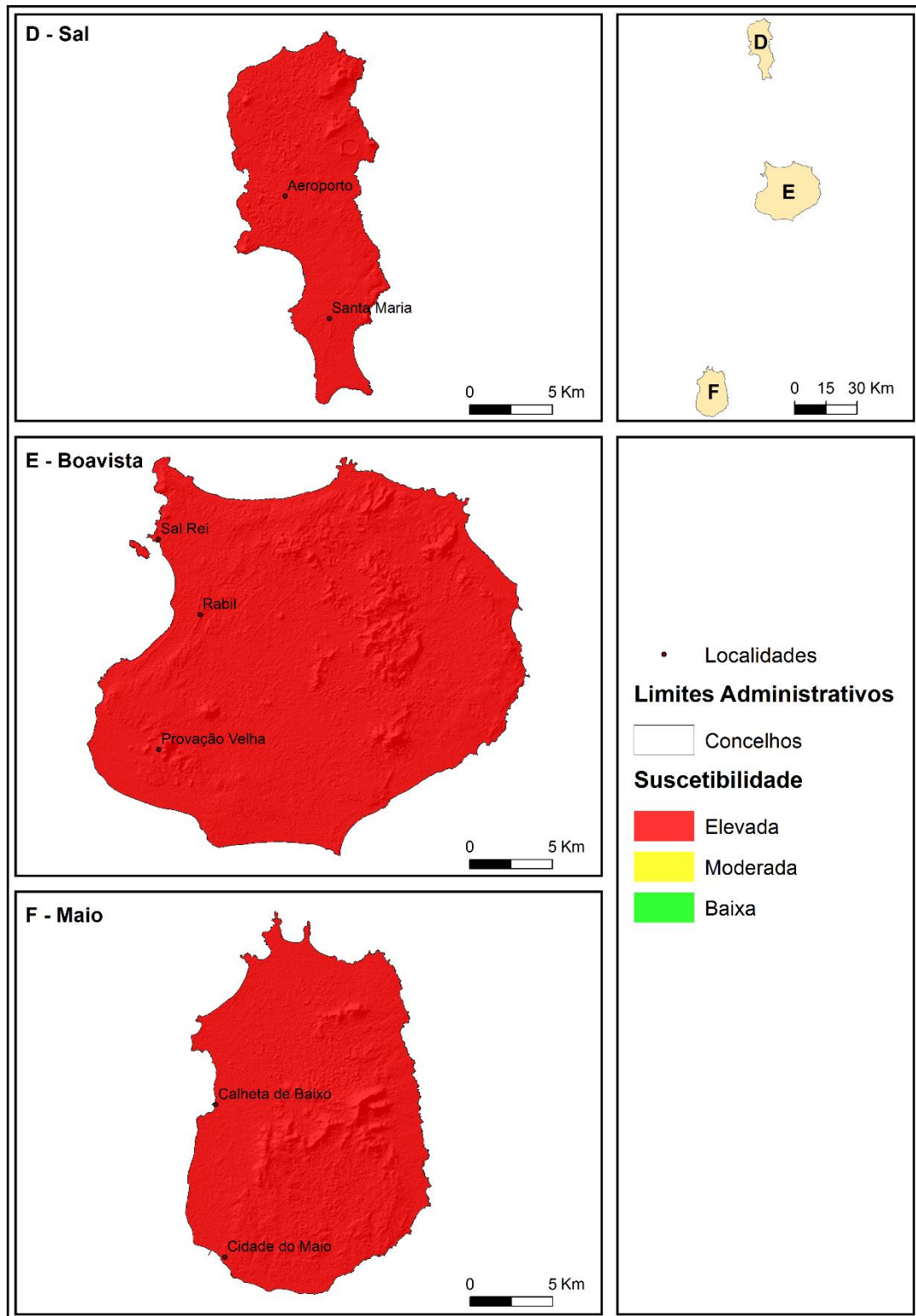


Figura 25 - Suscetibilidade de ocorrência de seca nas ilhas rasas

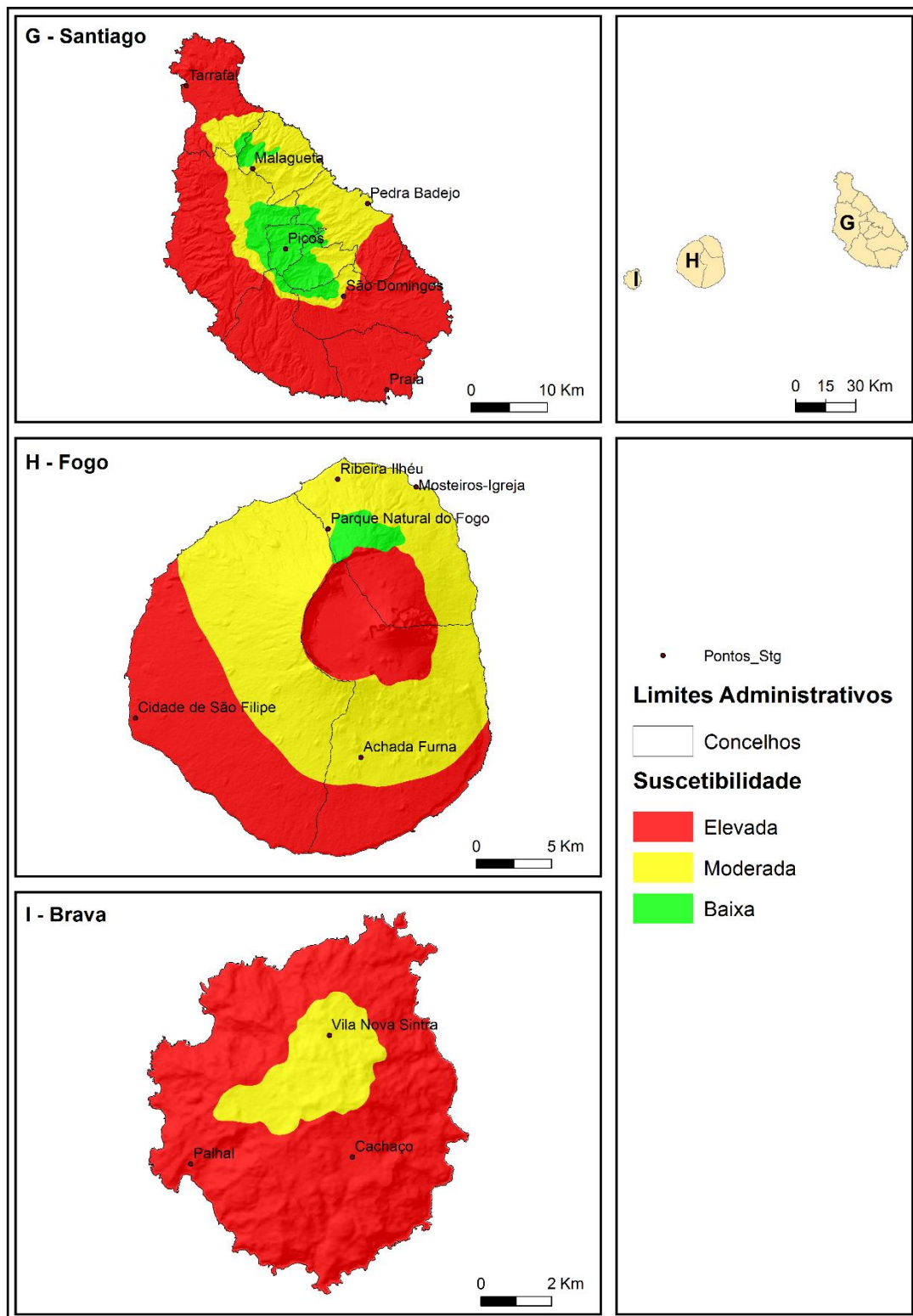


Figura 26 - Suscetibilidade de ocorrência de seca nas ilhas de sotavento

Apesar dos valores de probabilidade verificados serem baixo nas estações que compõem o conjunto das ilhas rasas, devido ao descrito no capítulo anterior aliada aos

valores de índice NDVI baixos, classificou-se a totalidade da área das ilhas rasas como sendo espaço de suscetibilidade elevado (Figura 25).

No conjunto das ilhas, as ilhas de Santiago e Fogo apresentam uma percentagem de área mais ou menos distribuída pelas diferentes classes de suscetibilidade, em que no caso de Santiago a região do Pico de Antónia e de Serra Malagueta, os pontos mais altos da ilha, possuem baixa suscetibilidade; a área envolvente dos dois picos, e que se prolongam até o litoral oriental apresenta suscetibilidade moderada devido à baixa probabilidade e valores de NDVI relativamente alto, em contraste com a restante parte da ilha que apresenta suscetibilidade elevada. A distribuição de suscetibilidade na ilha do Fogo, esta assim como no caso das ilhas de Santiago e de Brava, está relacionado com a orografia, em que o setor mais elevado a barlavento apresenta suscetibilidade elevada, enquanto a sotavento e vertente meridional do cone vulcânico a suscetibilidade é elevada. Apenas o setor central da ilha da Brava, de maior altitude, não apresenta suscetibilidade elevada (Figura 26).

## **CAPITULO IV – CONCLUSÕES FINAIS E TRABALHOS FUTUROS**

Com este trabalho demonstrou-se que a utilização de produtos derivados de imagens de satélite (como os índices de vegetação) são instrumentos essenciais para completar e validar os modelos de avaliação de suscetibilidade à ocorrência de seca, baseado apenas na análise da precipitação. Com a metodologia utilizada foi possível com o SPI identificar os episódios de secas, determinar da sua magnitude e duração das mesmas, com as limitações referidas no ponto 4; determinar e espacializar os limiares de precipitação referentes a cada grau de severidade; e por último a avaliar a perigosidade e suscetibilidade de ocorrência de secas em Cabo Verde.

A análise das séries de precipitação mostrou a influência da orografia na distribuição espacial das chuvas, bem como a concentração de 85% da precipitação entre Julho e Outubro e um ligeiro aumento de quantitativo pluviométrico nos últimos anos em comparação com os anos sessenta e setenta do século passado.

Com a aplicação do índice SPI foi possível identificar as secas descritas na bibliografia consultada, sendo que de ponto de vista cronológico realça-se: dois eventos de seca extrema nos anos 70, (em 1972, generalizada a todo o arquipélago e 1977); a ocorrência de outros períodos críticos com nítido predomínio de secas, tais como os primeiros anos da década de 80 e na década de 90 em que se registaram secas em mais de 50% dos locais; no presente século tem-se registado uma sucessão de anos em que a estação das chuvas tem sido normal ou mesmo húmida; só em 2004 e 2005 se verificaram situações de seca meteorológica, com carácter pontual nas ilhas do Fogo e Brava e com severidade moderada; já em Santo Antão, em 2005, a seca foi severa e extrema e atingiu todas as estações meteorológicas.

A determinação de limiares de precipitação para cada grau de severidade poderá constituir um elemento estruturante na monitorização do fenómeno em estudo, pois permite traçar limiares críticos de precipitação, podendo vir a servir como um indicador no sistema de alerta. A sua espacialização através de Cokrigagem apresenta-se como uma mais-valia quando a existência de postos é escasso e não suficientemente denso para cobrir a totalidade da extensão do arquipélago.

A representação da perigosidade (probabilidade de ocorrência de eventos de secas para as três categorias de severidade) através de círculos proporcionais permitiu aferir

a repartição espacial desse fenómeno que não seria possível através de métodos mais tradicionais de interpolação devido ao de algumas ilhas possuem apenas uma estação meteorológica com dados de qualidade suficiente para o cálculo de SPI.

Os resultados dos testes realizados para aferir o grau de correlação entre a precipitação e a vegetação vão ao encontro de valores verificados por Vicente-Serrano et al. (2015) e Ji e Peters (2003), isto é, as correlações são da ordem de 0.7.

O índice NDVI pode ser utilizado como um indicador de secas, mas a sua aplicação faz sentido apenas na época das chuvas. Por isso, determinou-se o stresse vegetativo através daquele índice apenas para o período compreendido entre Julho e Outubro.

A avaliação de suscetibilidade permitiu chegar a conclusão que cerca de 80% do território do arquipélago possui uma suscetibilidade elevada à ocorrência do fenómeno em estudo, influenciado sobretudo pelas ilhas rasas e São Vicente.

Com este trabalho foi possível identificar algumas limitações metodológicas para os trabalhos futuro. Os resultados obtidos com os desvios de NDVI mensais em relação à média do período entre 2000 e 2012 foram insuficientes. No entanto a relação entre o NDVI e a precipitação foi excelente podendo esta ser seguramente ser utilizada para a monitorização e acompanhamento das necessidades em água das culturas.

A vegetação não está dependente somente da precipitação, mas também da humidade do ar e do solo, da temperatura e da espessura e fertilidade do solo. Em ambiente árido como o de Cabo Verde, algumas espécies encontram-se adaptadas às condições climáticas extremas, sendo por isso capazes de subsistir em situações mais graves.

As áreas de regadio constituem também um outro fator limitativo na medida em que contribuem para o aumento da cobertura vegetal, e logo de valores de NDVI elevado, sem que haja ocorrência de precipitação.

Dado que foram identificadas diversas lacunas nos dados de precipitação disponíveis nas estações meteorológicas de Cabo Verde, mais atenção deverá ser dada à rede meteorológica e à qualidade das séries de observação. Neste sentido recomenda-se uma maior acessibilidade aos dados de precipitação, de modo a melhorar futuras avaliações sobre o fenómeno analisado, sobretudo que reflitam todas as variações topoclimáticas e de uso e cobertura do solo nas ilhas do arquipélago.

Como foi referido anteriormente, a agricultura constitui um setor essencial para o desenvolvimento económico de Cabo Verde. Neste sentido considera-se igualmente importante a análise de seca agrícola (não tratada neste trabalho) baseada em variáveis como a precipitação, a temperatura, a humidade do ar e a disponibilidade hídrica do solo.

Dados os resultados obtidos sobre a suscetibilidade de ocorrência de seca no arquipélago sugere-se uma análise mais pormenorizada de períodos secos e a sua incidência espacial e socioeconómico.

O intervalo temporal e a boa resolução espacial com que são distribuídos os índices de vegetação, apoiado nos resultados aqui obtidos, reforçam a possibilidade de estas serem integradas em conjunto com os índices de seca mais tradicionais.

A realização de estudos periódicos poderá aferir a influência das alterações climáticas na frequência de ocorrência, na duração e na extensão espacial de seca.

## Bibliografia

- Amaral, I. (1991) Cabo Verde: Introdução Geográfica. In, Albuquerque, L., Santos, Mem (coord.) História geral de Cabo Verde. Vol. I. Instituto de Investigação Científica Tropical / Direção geral do Património Cultural de Cabo Verde, Lisboa / Praia.
- Amaral, I. (2007) Santiago de Cabo Verde. A Terra e os Homens. Associação das Universidade de Língua Portuguesa / Centro de Estudos Geográficos da Universidade de Lisboa / Instituto de Investigação Científica e Tropical / Universidade do Algarve / Universidade de Cabo Verde.
- Allaby, M., & Garratt, R. (2003). Droughts. (F. on File, Ed.) (Revised Ed). New York: Facts on File.
- Baret, F., Guyot, G., & Major, J. (1989). TSAVI: A Vegetation Index Which Minimizes Soil Brightness Effects On LAI And APAR Estimation. *Geoscience and Remote Sensing Symposium, 1989. IGARSS'89. 12th Canadian Symposium on Remote Sensing, 1989 International*. Vancouver, Canada: 1355-1358.
- Baret, F., & Guyot, G. (1991). Potentials and limits of vegetation indices for LAI and APAR assessment. *Remote Sensing of Environment*, 35(2-3), 161–173.
- Bergman, K., Sabol, P., & Miskus, D. (1988): Experimental indices for monitoring global drought conditions. *Proceedings 13th Annual Climate Diagnostics Workshop*, Cambridge, MA, U.S. Department of Commerce, 190–197.
- Bhalme, H., & Mooley, D. (1980): Large-scale droughts/floods and monsoon circulation. *Monthly Weather Review*, vol. 108: 1197 – 1211.
- Birth, G., & McVey, G. (1968). Measuring the color of growing turf with a reflectance spectroradiometer. *Agronomy Journal*, vol. 60: 640-643.
- Bordi, I., Frigio, S., Patrizia, P., Antonio, S., & Alfonso, S. (2001). The analysis of the Standardized Precipitation Index in Mediterranean area: Large-scale patterns. *ANNALI DI GEOFISICAL*, 44(5/6), 965–978.
- Broge, N. ., & Leblanc, E. (2001). Comparing prediction power and stability of broadband and hyperspectral vegetation indices for estimation of green leaf area index and canopy chlorophyll density. *Remote Sensing of Environment*, 76(2), 156–172. [http://doi.org/10.1016/S0034-4257\(00\)00197-8](http://doi.org/10.1016/S0034-4257(00)00197-8)

- Brooks, N. (2008) - Climate Change and Development in Cape Verde. Review and screening of national development plans and programmes. UNDP.
- Brown, J. F., Wardlow, B. D., Tadesse, T., Hayes, M. J., & Reed, B. C. (2008). The Vegetation Drought Response Index (VegDRI): A New Integrated Approach for Monitoring Drought Stress in Vegetation. *GIScience & Remote Sensing*, 45(1), 16–46. <http://doi.org/10.2747/1548-1603.45.1.16>
- Byun, H., & Wilhite, D. (1999). Objective Quantification of Drought Severity and Duration. *American Meteorological Society*, 12:2747–2756.
- Coppin, P. R., & Bauer, M. E. (1994). Processing of multitemporal Landsat TM imagery to optimize extraction of forest cover change features. *IEEE Transactions on Geoscience and Remote Sensing*, 32(4), 918–927. <http://doi.org/10.1109/36.298020>
- Correia, E. (1998). Condições pluviométricas para a cultura do milho na ilha de Santiago (Cabo Verde). (Ministério da Ciência e da Tecnologia & Instituto de Investigação Científica Tropical, Eds.). Lisboa: Instituto de Investigação Científica Tropical.
- Dawson, T. P., & Curran, P. J. (1998). A new technique for interpolating the reflectance red edge position. *International Journal of Remote Sensing*, 19(11), 2133–2139. <http://doi.org/10.1080/014311698214910>
- DGA. (2004). Livro Branco sobre o Estado do Ambiente em Cabo Verde.
- Domingos, S. (2006) Análise do índice de seca Standardized Precipitation Index (SPI) em Portugal Continental e sua comparação com o Palmer Drought Severity Index (PDSI). Tese de licenciatura em Meteorologia, Oceanografia e Geofísica Interna – variante Meteorologia FCUL, Lisboa.
- Eklundh, L. (1998). Estimating relations between AVHRR NDVI and rainfall in East Africa at 10-day and monthly time scales. *International Journal of Remote Sensing*, 19(3), 563–570. <http://doi.org/10.1080/014311698216198>
- Foley, J. (1957) Droughts in Australia: review of records from earliest years of settlement. Australian Bureau of Meteorology.
- Gao, Bo-Cai (1996) NDWI A Normalized Difference Water Index for Remote Sensing of Vegetation Liquid Water From Space. *Remote Sensing of Environment*, 58, 257-266.

- Gibbs, W., & Maher, J. (1967): Rainfall Deciles as Drought Indicators. Australian Bureau of Meteorology, Bull. 48, 37 pp.
- Gouveia, C., Páscoa, P., Russo, A., e Trigo, R., 2014. Drought trends in the Iberian Peninsula during 1901- 2012. International Conference on Ecohydrology, Soil and Climate Change, 2014. [www.ecohcc.ipt.pt](http://www.ecohcc.ipt.pt), [EcoHCC14](http://www.ecohcc.ipt.pt). 10 to 12 September 2014, Tomar, Portugal.
- Gutman, G. G. (1990). Towards Monitoring Droughts from Space. American Meteorological Society, 3(2), 282–295.  
[http://doi.org/10.1175/1520-0442\(1990\)003<0282:TMDFS>2.0.CO;2](http://doi.org/10.1175/1520-0442(1990)003<0282:TMDFS>2.0.CO;2)
- Hayes, M. (2002). Drought Indices. International Journal of Climatology, 23(11), 18.  
<http://doi.org/10.1002/joc.931>
- Hisdal, H., & Tallaksen, L. M. (2000). Technical Report No. 6 Drought Event Definition.
- Huete, A. R. (1988). A Soil-Adjusted Vegetation Index (SAVI). Remote Sensing of Environment, 25, 295–309.
- Huete, A., Justice, C., & Leeuwen, W. (1999). MODIS vegetation index (MOD13) Algorithm theoretical basis Document Version 3. NASA Goddard Space Flight Center. Greenbelt, Maryland 20771, USA. 129p.
- INMG. (2007). Programa de Ação Nacional de Adaptação às Mudanças Climáticas.
- Jackson, R. D., & Huete, A. R. (1991). Interpreting vegetation indices. Preventive Veterinary Medicine. [http://doi.org/10.1016/S0167-5877\(05\)80004-2](http://doi.org/10.1016/S0167-5877(05)80004-2)
- Ji, L., & Peters, A. J. (2003). Assessing vegetation response to drought in the northern Great Plains using vegetation and drought indices. Remote Sensing of Environment, 87(1), 85–98. [http://doi.org/10.1016/S0034-4257\(03\)00174-3](http://doi.org/10.1016/S0034-4257(03)00174-3)
- Karavitis, C. a., Alexandris, S., Tsesmelis, D. E., & Athanasopoulos, G. (2011). Application of the Standardized Precipitation Index (SPI) in Greece. Water, 3(3), 787–805. <http://doi.org/10.3390/w3030787>
- Kaufman, Y., & Tanre, D. (1992). Atmospherically Resistant Vegetation Index (ARVI) for EOS-MODIS. IEEE Transactions on Geoscience and Remote Sensing, vol. 30(2): 261-270.
- Keyantash, J., & Dracup, J. A. (2002). The Quantification of drought: An evaluation of droughts indices. American Meteorological Society, 1167–1180.

- Kogan, F. N. (1995). Droughts of the Late 1980s in the United States as Derived from NOAA Polar-Orbiting Satellite Data. *Bulletin of the American Meteorological Society*. [http://doi.org/10.1175/1520-0477\(1995\)076<0655:DOTLIT>2.0.CO;2](http://doi.org/10.1175/1520-0477(1995)076<0655:DOTLIT>2.0.CO;2)
- Kogan, F. N. (1997). Global Drought Watch from Space. *Bulletin of the American Meteorological Society*, 78(4), 621–636.  
[http://doi.org/10.1175/1520-0477\(1997\)078<0621:GDWFS>2.0.CO;2](http://doi.org/10.1175/1520-0477(1997)078<0621:GDWFS>2.0.CO;2)
- Kogan, F. (2001). Operational space technology for global vegetation assessment. *Bulletin of the American Meteorological Society*, vol. 82(9): 1949– 1964.
- Kogan, F. N. (2002). World droughts in the new millennium from AVHRR-based vegetation health indices. *Eos, Transactions American Geophysical Union*, 83(48), 557–572. <http://doi.org/10.1029/2002EO000382>
- Li, J., & Heap, A. D. (2008). A Review of Spatial Interpolation Methods for Environmental Scientists. Australian Geological Survey Organization, *GeoCat* 68(2008/23), 154.  
[http://doi.org/http://www.ga.gov.au/image\\_cache/GA12526.pdf](http://doi.org/http://www.ga.gov.au/image_cache/GA12526.pdf)
- Liu, Q., & Huete, A. (1995). A feedback based modification of the NDVI to minimize canopy background and atmospheric noise. *IEEE Transactions on Geoscience and Remote Sensing*, vol. 33: 457–465.
- Martin-Vide, J. (2004). Spatial distribution of a daily precipitation concentration index in peninsular Spain. *International Journal of Climatology*, vol. 24 (8) pp. 959-971.
- Mckee, T. B., Doesken, N. J., & Kleist, J. (1993). The relationship of drought frequency and duration to time scales. In: *Proceedings of the Ninth Conference on Applied Climatology*. American Meteorological Society (Boston), 179–184.
- Miller, J. R., Hare, E. W., & Wu, J. (1990). Quantitative characterization of the vegetation red edge reflectance 1. An inverted-Gaussian reflectance model. *International Journal of Remote Sensing*, 11(10), 1755–1773.  
<http://doi.org/10.1080/01431169008955128>
- Monteiro, S. (2013) - Relatório de Levantamentos de Dados Históricos registados sobre os Desastres Ocorridos em Cabo Verde desde o ano de 1900 - elaborado no âmbito da Realização do Projeto Redução de Riscos de Desastres, financiado pelas Nações Unidas.

- Mróz, M., & Sobieraj, A. (2004). Comparison of several vegetation indices calculated on the basis of a seasonal SPOT XS time series, and their suitability for land cover and agricultural crop identification. *Technical Sciences / University of Warmia and Mazury in Olsztyn*, 7(7), 39–66.
- Mu, Q., Zhao, M., Kimball, J. S., McDowell, N. G., & Running, S. W. (2013). A remotely sensed global terrestrial drought severity index. *Bulletin of the American Meteorological Society*, 94(1), 83–98. <http://doi.org/10.1175/BAMS-D-11-00213.1>
- Narasimhan, B., & Srinivasan, R. (2005). Development and evaluation of Soil Moisture Deficit Index (SMDI) and Evapotranspiration Deficit Index (ETDI) for agricultural drought monitoring. *Agricultural and Forest Meteorology*, 133(1-4), 69–88. <http://doi.org/10.1016/j.agrformet.2005.07.012>
- Palmer, W. (1965). *Meteorological Drought*. Research Paper. Retrieved from <http://www.ncdc.noaa.gov/temp-and-precip/drought/docs/palmer.pdf>
- Perry, R., & Lautenschlager, F. (1984). Functional equivalence of spectral vegetation indices. *Remote Sensing of Environment*, 14(1-3), 169–182. [http://doi.org/10.1016/0034-4257\(84\)90013-0](http://doi.org/10.1016/0034-4257(84)90013-0)
- Qi, J., Chehbouni, A., Huete, R., Kerr, H., & Sorooshian, S. (1994). A Modified Soil Adjusted Vegetation Index. *Remote Sensing of Environment*, vol. 48 (2): 119-126. [DOI:10.1016/0034-4257\(94\)90134-1](https://doi.org/10.1016/0034-4257(94)90134-1)
- Querido, A. (2010) – O clima e as projeções de mudanças climáticas - Cabo Verde. In *Workshop sobre Avaliação de Riscos Climáticos no PRSP-II 14-15 de Junho de 2010, Praia*.
- Remelgado, R. (2013). *Analysis of in Situ measurements supported by Earth Observation data for the identification of drought events in South Tyrol*. Universidade de Lisboa.
- Richardson, J., & Wiegand, L. (1977). Distinguishing vegetation from soil background information, *Photogramm. Eng.* Vol. 43: 1541-1552.
- Rocha, R. L. (2010). *Aplicação de Sistemas de Informação Geográfica em estudos de caracterização biofísica da ilha de Santo Antão em Cabo Verde*. Universidade de Trás-os-Montes e Alto Douro.
- Rosa, R., & Pereira, L. A. (2011). *Índices de seca. Aplicação ao continente português*. Universidade Técnica de Lisboa.

- Rondeaux, G., Steven, M., & Baret, F. (1996). Optimization of the Soil-Adjusted Vegetation Indices. *Remote Sensing of Environment*, vol. 55, p.95-107.
- Rooy, M. (1965). A Rainfall anomaly index (RAI) independent of time and space. *Notos* vol. 14: 1 – 43.
- Rouse, J., Haas, R., Deering, D., Schell, J., & Harlan, J. (1974). Monitoring the Vernal Advancement and Retrogradation (Green Wave Effect) of Natural Vegetation, NASA/GSFC Type III Final Report, Greenbelt, MD., 371p.
- Silleos, N. G., Alexandridis, T. K., Gitas, I. Z., & Perakis, K. (2006). Vegetation Indices: Advances Made in Biomass Estimation and Vegetation Monitoring in the Last 30 Years. *Geocarto International*, 21(4), 21–28.  
<http://doi.org/10.1080/10106040608542399>
- Spencer, J. (2002) – Les indicateurs climatiques pour le suivi de la désertification au Cap Vert-Santiago. Mémoires de fin d'étude d'ingénieur en Agrométéorologie. AGRHYMET, Niamey.
- Tsakiris, G., Cancelliere, A., Loukas, A., Pangalou, D., Rossi, G., Tigkas, D., & Vangelis, H. (2007). Drought characterization [Part 1. Components of drought planning. 1.3. Methodological component] *BT - Options Méditerranéennes : Série B. Etudes et Recherches. Options Méditerranéennes : Série B. Etudes et Recherches*, 58, 85–102. Retrieved from  
<http://om.ciheam.org/om/pdf/b58/00800535.pdf> \npapers2://publication/uuid/C3D8404F-5D36-4DC0-9569-FC798FD753C2
- Unganai, L. S., & Kogan, F. N. (1998). Drought monitoring and corn yield estimation in southern Africa from AVHRR data. *Remote Sensing of Environment*, 63(3), 219–232.  
[http://doi.org/10.1016/S0034-4257\(97\)00132-6](http://doi.org/10.1016/S0034-4257(97)00132-6)
- Varela-Lopes, G. E., & Molion, L. C. B. (2014). Precipitation Patterns in Cape Verde Islands: Santiago Island Case Study. *Atmospheric and Climate Sciences*, 4, 854–865.  
<http://doi.org/10.4236/acs.2014.45075>
- Vicente-Serrano, S., Cabello, D., Tomás-Burguera, M., Martín-Hernández, N., Beguería, S., Azorin-Molina, C., & Kenawy, A. (2015). Drought Variability and Land

Degradation in Semiarid Regions: Assessment Using Remote Sensing Data and Drought Indices (1982–2011). *Remote Sensing*, 7(4), 4391–4423.

<http://doi.org/10.3390/rs70404391>

Vicente-Serrano, S. M., Beguería, S., & López-Moreno, J. I. (2010). A multiscale drought index sensitive to global warming: The standardized precipitation evapotranspiration index. *Journal of Climate*, 23(7), 1696–1718.

<http://doi.org/10.1175/2009JCLI2909.1>

Wilhite, D. A., & Glantz, M. H. (1985). Understanding: the Drought Phenomenon: The Role of Definitions. *Water International*, 10(3), 111–120.

<http://doi.org/10.1080/02508068508686328>

Wu, H., Svoboda, M. D., Hayes, M. J., Wilhite, D. A., & Wen, F. (2007). Appropriate application of the Standardized Precipitation Index in arid locations and dry seasons. *International Journal of Climatology*, 27, 65–79.

<http://doi.org/10.1002/joc.1371>

## Anexos

### Anexo I - Número de secas ocorridos por ano de 1962 a 2012, em Cabo Verde

Ano	Seca Moderada	Seca Severa	Seca Extrema	Total	% Postos
1962	0	0	0	0	0,0
1963	0	0	0	0	0,0
1964	0	0	0	0	0,0
1965	0	0	0	0	0,0
1966	0	0	0	0	0,0
1967	0	0	0	0	0,0
1968	6	1	0	7	22,6
1969	0	0	0	0	0,0
1970	6	2	0	8	25,8
1971	1	1	0	2	6,5
1972	2	2	27	31	100,0
1973	6	2	0	8	25,8
1974	8	1	1	10	32,3
1975	1	0	0	1	3,2
1976	2	1	0	3	9,7
1977	6	8	14	28	90,3
1978	0	1	0	1	3,2
1979	4	0	0	4	12,9
1980	0	0	1	1	3,2
1981	7	1	0	8	25,8
1982	3	1	3	7	22,6
1983	5	4	2	11	35,5
1984	0	0	0	0	0,0
1985	4	0	0	4	12,9
1986	1	0	1	2	6,5
1987	0	0	0	0	0,0
1988	3	0	0	3	9,7
1989	0	0	0	0	0,0
1990	0	0	0	0	0,0
1991	8	1	0	9	29,0
1992	4	2	1	7	22,6
1993	2	0	1	3	9,7
1994	11	5	0	16	51,6
1995	2	2	0	4	12,9
1996	8	6	2	16	51,6
1997	1	0	0	1	3,2
1998	5	0	1	6	19,4
1999	0	0	0	0	0,0
2000	2	0	0	2	6,5
2001	1	0	0	1	3,2
2002	1	0	0	1	3,2
2003	1	0	0	1	3,2
2004	5	2	0	7	22,6
2005	3	4	1	8	25,8
2006	1	0	0	1	3,2
2007	4	0	0	4	12,9
2008	0	0	0	0	0,0
2009	0	0	0	0	0,0
2010	0	0	0	0	0,0
2011	0	0	0	0	0,0
2012	0	0	0	0	0,0

**Anexo II - Número de secas por estações meteorológicas ocorridos de 1962 a 2013, em Cabo Verde**

Ilha	Estação	Seca Moderada	Seca Severa	Seca Extrema	Total
Santo Antão	Água das Caldeiras	5	1	2	8
	Boca de Coruja	10	2	1	13
	Covão	0	2	2	4
	Fajã Domingas Benta	4	2	1	7
	Passagem	5	1	1	7
São Vicente	Mindelo	4	3	1	8
São Nicolau	Caleijão (Posto)	1	3	2	6
	Vilar de Igreja	5	1	2	8
Sal	Sal (Aeroporto)	5	2	2	9
Boavista	Fundo de Figueiras	8	0	0	8
Maio	Calheta Monte Vermelho	6	1	2	9
	Vila do maio	2	0	3	5
Santiago	Assomada	1	1	2	4
	Babosa	1	1	2	4
	Chão Bom	7	1	1	9
	Curralinho	1	0	3	4
	Praia	6	2	2	10
	São Domingos	3	2	2	7
	S. Francisco	4	3	1	8
	S. Jorge dos Orgãos	3	0	2	5
S. Malagueta	6	0	2	8	
Fogo	Achada Furna	4	3	2	9
	Atalaia	3	1	2	6
	Cocho	2	3	1	6
	Galinheiro	5	1	2	8
	Mosteiros	5	3	1	9
	Pau Cortado	3	0	2	5
	Ribeira Ilhéu	5	1	2	8
Brava	Cachaço	1	1	4	6
	Mato	7	2	1	10
	Nova Sintra	2	4	2	8

**Anexo III - Limiares de precipitação (mm) correspondente a cada grau de severidade de seca durante a estação das chuvas**

Ilha	Estação	Limiares de Precipitação (mm)		
		Seca Moderada	Seca Severa	Seca Extrema
Santo Antão	Água das Caldeiras	151	90	50
	Boca de Coruja	85	41	9
	Covão	214	138	84
	Fajã Domingas Benta	116	65	32
	Passagem	141	78	38
São Vicente	Mindelo	8	6	0
São Nicolau	Caleijão (Posto)	33	15	6
	Vilar de Igreja	39	20	9
Sal	Sal (Aeroporto)	9	3	1
Boavista	Fundo de Figueiras			
Maio	Calheta Monte Vermelho	47	24	11
	Vila do maio	42	23	11
Santiago	Assomada	205	134	82
	Babosa	216	153	105
	Chão Bom	76	44	23
	Curralinho	193	122	72
	Praia	54	30	16
	São Domingos	100	58	31
	S. Francisco	76	44	8
	S. Jorge dos Orgãos	210	149	101
	S. Malagueta	277	181	111
Fogo	Achada Furna	84	48	24
	Atalaia	254	170	109
	Cocho	259	170	105
	Galinheiro	127	72	37
	Mosteiros	101	62	36
	Pau Cortado	211	146	97
	Ribeira Ilhéu	279	194	129
Brava	Cachaço	83	48	27
	Mato	107	67	39
	Nova Sintra	92	58	34