

UNIVERSIDADE FEDERAL DO RIO GRANDE DO SUL

INSTITUTO DE PESQUISAS HIDRÁULICAS

**MONITORAMENTO E CARACTERIZAÇÃO DE SECAS DA AMÉRICA DO SUL
COM SENSORIAMENTO REMOTO**

Germano Gondim Ribeiro Neto

Dissertação submetida ao Programa de Pós-Graduação em Recursos Hídricos e Saneamento Ambiental da Universidade Federal do Rio Grande do Sul como requisito parcial para a obtenção do título de Mestre em Recursos Hídricos e Saneamento Ambiental.

Orientador: Prof. Dr. Rodrigo Cauduro Dias de Paiva

Banca Examinadora:

Dr. Luis Gustavo Gonçalves de Gonçalves

INPE

Prof. Dr. Walter Collischonn

IPH/UFRGS

Prof. Dr. Anderson Ruhoff

IPH/UFRGS

Porto Alegre, RS – Brasil

Junho de 2017

AGRADECIMENTOS

Direta ou indiretamente diversas pessoas contribuíram na realização deste trabalho e aqui seguem meus sinceros agradecimentos.

Primeiramente a minha família por todo apoio e incentivo durante toda minha vida. Em especial aos meus pais Antônio Navarro e Walkyria Almeida por todos os esforços e sacrifícios que fizeram para que obtivesse uma educação de qualidade.

Ao meu orientador Prof. Rodrigo Paiva, pela ajuda, ensinamentos e excelente orientação ao longo desses últimos anos.

A minhas irmãs Anna Walkyria e Alanna Maria pelas conversas, eterno apoio e motivação.

A todos que fizeram parte do HGE que juntos criaram um ambiente de trabalho único repleto de troca de ideias, discussões científicas, companheirismo, cafeína e piadas infames. Em especial: Alice Fassoni, Aline Meyer, Arthur Tschiedel, Ayan Fleischmann, Pedro Jardim, Otávio Passaia e Vinícius Siqueira.

Aos meus amigos do IPH que estiveram comigo ao longo desses últimos anos em diversas fases e momentos de felicidade: Ana Helfer, Caetano Fraga, Carlos Galdino, Daniela Feitosa, Débora Koller, Franciele Zanandrea, Gláucia Nascimento, Thiago Tavares e Vinicius Borges.

Agradecimento especial para Benício Monte, João Paulo Brêda, Hugo Fagundes e Sly Correa pela parceria e companhia em todos momentos, principalmente nas incontáveis mesas do RU.

A Ingrid Lacerda por ter sempre me acompanhado e apoiado ao longo da minha vida acadêmica.

Aos meus amigos Amanda Farias, Alice Moreira e Sérgio Pereira por todas as positivities que sempre me passaram.

Ao Instituto de Pesquisas Hidráulicas, Universidade Federal do Rio Grande do Sul, Restaurante Universitário, Governo Federal e a CAPES que ofereceram as condições necessárias que me permitiram realizar este trabalho.

RESUMO

Atualmente existe grande demanda na elaboração de mais estudos que venham aprimorar os conhecimentos relacionados a secas, visto que os prejuízos causados por este tipo de desastre natural podem alcançar cifras bilionárias, além de gerar um grande impacto social. Metodologias de monitoramento de secas geram informações estratégicas para o planejamento de medidas mitigadoras, redução dos impactos gerados e ajudam a aprimorar a forma como se gere os recursos hídricos. Algumas regiões no mundo são atingidas frequentemente por este tipo de desastre e mesmo assim não dispõem de um sistema de monitoramento completo para as secas a exemplo do continente sul-americano. Apresenta-se neste trabalho avaliação de metodologias para análise de alguns dos principais índices de seca citados na literatura científica. O objetivo é avaliar o desempenho destes visando encontrar relações que possam vir a aprimorar o entendimento sobre esse tipo de evento e para geração de mapas de seca para região citada. Foram utilizados neste estudo apenas produtos de sensoriamento remoto, de reanálises de precipitação e modelos de superfície, abrangendo diversas variáveis do ciclo hidrológico terrestre, tais como: Precipitação (TRMM e MSWEP); Umidade do solo gerada pelo GLDAS; Condições da vegetação (NDVI GMMIS e MOD13C2); Variação do armazenamento de água (TWS GRACE). Calculou-se o Índice de Precipitação Padronizado (SPI), Anomalia da Umidade do Solo (SMA), Índice de Vegetação Padronizado (SVI) e Anomalia do Armazenamento Terrestre de Água (ATWS). Os resultados mostraram que estes índices conseguiram identificar a maioria dos eventos de seca registrados e que apresentam uma forte relação entre si e que esta é governada por variações no déficit de precipitação representado na forma do SPI. Concluiu-se que no geral as secas evoluem primeiramente apresentando uma redução da precipitação e que após 1 ou 2 meses passa a atingir a umidade do solo e a vegetação e por fim atinge o armazenamento de água 2 ou 3 meses após o início da seca. A metodologia aplicada para geração dos mapas de seca se mostrou bastante eficiente para o monitoramento deste tipo de evento, de forma que foi possível representar a maioria dos principais eventos de seca que ocorreram na América do Sul nos últimos anos.

ABSTRACT

There is a need to increase the scientific studies related to drought since this type of natural disaster causes billions of damages, besides generating social impacts. Drought monitoring methodologies generate strategic information for the planning of mitigation measures, reduction of the impacts generated, and can be used to improve water resource management. Some regions in the world like South America are often hit by this type of disaster and yet do not have a complete monitoring system for droughts. This study presents a methodological proposal for the analysis of some of the main drought indexes cited in the scientific literature. The goal is to evaluate the performance of these indexes in order to find relationships between them that may have improved the understanding about this type of disaster and generate drought maps for the cited region. It was used only remote sensing products and products of precipitation reanalysis and land surface model, such as: Precipitation (TRMM and MSWEP); Soil moisture generated by GLDAS; Vegetation conditions index (NDVI GMMIS and MOD13C2); Variations of water storage (TWS GRACE). Standardized Precipitation Index (SPI), Soil Moisture Anomaly (SMA), Standardized Vegetation Index (SVI) and Terrestrial Water Storage Anomaly (ATWS) were calculated for this study. The results showed that these indices were able to identify most of the drought events recorded and there is a strong relationship between them. In general this relationship is ruled by variations in the precipitation deficit represented by the SPI. It was concluded that for the most regions in South America the droughts first evolve presenting a reduction of the precipitation and after 1 or 2 months it is noticed a change in soil moisture and vegetation condition and in the end after 2 or 3 months it is noticed a reduction in the water storage. The methodology used to generate the drought maps proved to be very efficient for the monitoring of this type of disaster that it was possible to represent most of the main drought events that occurred in South America in recent years.

SUMÁRIO

CAPÍTULO 1: APRESENTAÇÃO	1
1.1 INTRODUÇÃO.....	1
1.2 JUSTIFICATIVA.....	2
1.3 OBJETIVOS.....	4
1.4 ORGANIZAÇÃO DO TEXTO.....	5
CAPÍTULO 2: CONCEITOS DE SECA	5
2.1 SECAS.....	5
2.2 HISTÓRICO DE SECAS.....	7
CAPÍTULO 3: SENSORIAMENTO REMOTO APLICADO AO ESTUDO DE SECAS	9
3.1 SENSORIAMENTO REMOTO.....	9
3.2 PRECIPITAÇÃO POR SATÉLITE.....	10
3.3 SATÉLITES NOAA.....	12
3.4 AQUA/TERRA.....	14
3.5 GRACE.....	16
CAPÍTULO 4: PRODUTOS DE MODELOS	18
4.1 MODELOS HIDROLÓGICOS.....	18
4.2 MODELOS DE SUPERFÍCIE.....	19
4.2.1 GLDAS.....	19
4.3 REANÁLISES CLIMÁTICAS.....	20
4.3.1 Produtos de precipitação baseados em reanálises.....	21
CAPÍTULO 5: MONITORAMENTO DE SECAS	22
5.1 ÍNDICES DE SECA.....	22
5.1.1 PRECIPITAÇÃO.....	22
5.1.2 VEGETAÇÃO.....	23
5.1.3 UMIDADE DO SOLO.....	25
5.1.4 ARMAZENAMENTO DE ÁGUA.....	26
5.2 SISTEMAS DE MONITORAMENTO DE SECAS.....	27
CAPÍTULO 6 METODOLOGIA	29
6.1 APRESENTAÇÃO DOS DADOS UTILIZADOS.....	30
6.2 CARACTERIZAÇÃO DA ÁREA DE ESTUDO.....	32
6.2.1 REGIMES DE PRECIPITAÇÃO.....	32

6.2.2 USO DO SOLO E REGIÕES CLIMÁTICAS.....	33
6.2.3 HIDROGRAFIA.....	35
6.3 CÁLCULO DOS ÍNDICES DE SECA.....	35
6.3.1 SPI.....	35
6.3.2 ÍNDICES PADRONIZADOS.....	37
6.4 ANÁLISE EXPLORATÓRIA DOS ÍNDICES DE SECA.....	37
6.5 ANÁLISE DE DESEMPENHO.....	39
6.6 ANÁLISE DE CORRELAÇÃO.....	40
6.7 GERAÇÃO DOS MAPAS DE SECA.....	42
<u>CAPÍTULO 7 RESULTADOS E DISCUSSÃO</u>	42
7.1 ANÁLISE EXPLORATÓRIA DOS ÍNDICES DE SECA.....	42
7.2 ANÁLISE DE DESEMPENHO.....	52
7.3 ANÁLISE DE CORRELAÇÃO.....	58
7.4 GERAÇÃO DOS MAPAS DE SECA.....	60
<u>CAPÍTULO 8 CONCLUSÕES</u>	63
<u>CAPÍTULO 9 REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS</u>	66

LISTA DE FIGURAS

Figura 2.1 Componentes de uma seca. Adaptado de Wilhite, (2000).....	6
Figura 2.2 Tipos de seca. Adaptado de Wilhite,(2000).....	8
Figura 2.3 Principais eventos de seca ocorridos nas divisões geopolíticas da América do Sul.....	9
Figura 3.1 Principais missões espaciais. Fonte: AghaKouchak et al 2015.....	10
Figura 3.2 A) Representação da variação do TWS; B) Geoide da Terra; C) Representação da diferença de resolução espacial entre produtos GRACE, TRMM e MODIS.....	17
Figura 6.1 Fluxograma do resumo da metodologia utilizada.....	29
Figura 6.2 A) Classificação da cobertura da superfície e climática; B) classificação climática de Koppen-Geiger, fonte: Rubel e Kottek, (2010) adaptado.....	34
Figura 6.3 Regiões escolhidas para segunda parte da análise exploratória dos índices de seca.....	38
Figura 6.4 Determinação das características de um evento de seca.....	38
Figura 6.5 Número total de registros de seca por região para o período de 2003 a 2016.....	40
Figura 6.6 Ilustração da metodologia de defasagem na correlação.....	41
Figura 7.1 Índices de seca na escala temporal de 3 meses na América do Sul para o ano de 2012.....	45
Figura 7.2 Índices de seca na escala temporal de 6 meses na América do Sul para o ano de 2012.....	46
Figura 7.3 Índices de seca na escala temporal de 12 meses na América do Sul para o ano de 2012.....	47
Figura 7.4 Série extensa e reduzida dos índices de seca para Nordeste e Sul do Brasil.....	50
Figura 7.5 Série extensa e reduzida dos índices de seca para Paraguai e Peru.....	51
Figura 7.6 Boxplot das métricas de desempenho para os índices de seca utilizados.....	53
Figura 7.7 Distribuição espacial das métricas de desempenho dos índices de seca.....	56
Figura 7.8 Distribuição espacial das métricas de desempenho dos índices de seca combinados.....	57
Figura 7.9 Análise de correlação com escala temporal de 3 meses.....	59
Figura 7.10 Mapas de seca elaborados pela combinação dos índices de seca.....	62

LISTA DE TABELAS

Tabela 1 – Sensores AVHRR.....	13
Tabela 2 – Produtos de sensoriamento remoto e de modelos utilizados.....	31
Tabela 3 – Regimes de precipitação.....	34
Tabela 4 – Categorização do SPI.....	36
Tabela 5 – Combinação dos índices de seca.....	42
Tabela 6 – Características dos eventos de seca da série reduzida.....	52

LISTA DE SIMBOLOS

G - função gama
H – função gama corrigida
t – parâmetro de cálculo do SPI
SPI – índice de precipitação padronizado
SVI – índice de padronizado da vegetação
SMA – anomalia da umidade do solo
ATWS – anomalia do armazenamento terrestre de água
C01 – Combinação dos índices de seca que apenas considera como seca quando todos os índices estão indicando isso
C02 – Combinação dos índices de seca que considera como seca quando pelo menos um dos índices está indicando isso
C03 – Combinação dos índices de seca que considera sistema de pesos
ISP – Índice de Seca Palmer
SI – secas identificadas
SR – secas registradas
IAT – índices de acerto total
IAC – índices de acerto crítico
IS – Índice de Seca
 ΣD – somatório dos acertos em não previsão
AC – acurácia
ISC – índice de sucesso crítico
V – viés
R – resolução
r – coeficiente de correlação de Speraman
cov – covariância
var – variância
USDMD – *United States Drought Monitor*
EDO – European Drought Observatory

Capítulo 1 – APRESENTAÇÃO

1.1– Introdução

As secas já foram detectadas em todas as zonas climáticas. Este tipo de fenômeno é enquadrado como desastre natural e, segundo alguns autores (Trambauer et.al, 2013; Hagman,1984), é considerado como o mais complexo e menos entendido. A ocorrência deste tipo de fenômeno está fortemente relacionada com períodos prolongados de precipitação abaixo do considerado normal, altas temperaturas e baixa umidade relativa do ar (Wilhite, 1992).

Os impactos gerados por um evento de seca nem sempre são facilmente perceptíveis, como acontece na maioria dos outros desastres naturais. Este tipo de fenômeno está, de certa forma, relacionado com a diminuição momentânea da disponibilidade hídrica para uma região. Sendo assim, os seus impactos têm o potencial de atingir setores econômicos de interesse estratégico para sociedades, como a produção agropecuária, energia e transporte.

Estima-se que, devido a este tipo de fenômeno, entre os anos de 1900 e 2015 mais de 11 milhões de pessoas foram a óbito e mais de 2 bilhões foram atingidas, sendo considerado como o segundo desastre natural que mais atingiu pessoas, ficando atrás apenas das enchentes (EM-DAT, 2016). O relatório anual global de clima e catástrofes aponta que só no ano de 2013 o Brasil sofreu, devido a secas, perdas agrícolas que geraram um prejuízo superior a 8 bilhões de dólares, e no ano 2014 o impacto foi de 4,3 bilhões de dólares (Aon Benfield, 2013; Aon Benfield, 2014).

Em outros lugares do mundo, prejuízos semelhantes foram registrados. Em 2015, nos Estados Unidos da América (EUA), o estado da Califórnia perdeu um montante aproximado a 2,74 bilhões de dólares devido a este tipo de fenômeno (Howitt et al., 2015). Em 2003, em algumas partes da Europa, um evento de seca gerou perdas no setor agrícola da ordem de 2 bilhões de euros (Marx et al. 2015). Estes exemplos ilustram como as secas não são apenas problemas de regiões menos desenvolvidas e de baixa produção econômica.

Assim como muitos desastres naturais, as secas não podem ser evitadas, contudo os seus impactos podem ser minimizados aplicando-se medidas que venham diminuir a vulnerabilidade de determinada região a este tipo de fenômeno. Uma dessas medidas é o acompanhamento e caracterização das secas fazendo uso para isso de um sistema de monitoramento (Wilhite, 1992). Atualmente, diversas regiões (EUA, Europa, Alemanha, Nordeste brasileiro, África, etc.) utilizam este tipo de ferramenta para fornecer informações estratégicas à população em geral e entidades governamentais quanto ao surgimento, propagação e término de eventos de seca.

As metodologias empregadas nos sistemas de monitoramento de seca além de viabilizarem o acompanhamento deste tipo de desastre, também podem ser utilizados para aprimorar o entendimento sobre este. Se tratando de América do Sul, muitas regiões são afetadas com frequência por secas e muito ainda precisa ser feito para o desenvolvimento de metodologias que viabilizem análises desse tipo de desastre em escala continental.

O aumento dos lançamentos de satélites especializados em coleta de informações referentes ao ciclo hidrológico terrestre passou a viabilizar, em regiões de grande extensão espacial, a implantação de sistemas de monitoramento de seca ou estudos de caracterização deste tipo de fenômeno. A exemplo disso, pode-se citar as missões espaciais: *Moderate Resolution Imaging Spectroradiometer* (MODIS), *Tropical Rainfall Measuring Mission* (TRMM) e *Global Precipitation Measurement* (GPM), *Soil Moisture Ocean Salinity* (SMOS), *Gravity Recovery and Climate Experiment* (GRACE) (AghaKouchak et al., 2015).

Os modelos hidrológicos ou de superfície (eg. MGB-IPH, Collischonn & Tucci, 2001; VIC, Liang et al., 1994; LIS, Kumar et al., 2006), assim como os produtos de sensoriamento remoto, são úteis para obtenção de informações sobre variáveis necessárias para compor um sistema monitor desse tipo. Dados como os de umidade do solo, vazão dos rios, armazenamento de água e evapotranspiração podem ser simulados dentro destes modelos. Estes utilizam um conjunto de equações físicas e numéricas que tentam representar as etapas do ciclo hidrológico. Uma das principais vantagens da aplicação destes modelos é a possibilidade de simular estas variáveis para o passado e para o futuro, sendo possível realizar previsões para os próximos meses ou avaliação de cenários.

O presente estudo se enquadra nas linhas de pesquisa das áreas de sensoriamento remoto, modelos de superfície e reanálises climáticas aplicados aos recursos hídricos. Este trabalho está relacionado com os esforços científicos para o desenvolvimento de metodologias que combinem produtos de modelos globais e produtos de sensoriamento remoto para alcançar uma melhor caracterização e identificação de eventos de seca.

1.2 – Justificativa

A América do Sul apresenta um papel importante no ciclo hidrológico global, visto que abriga algumas das maiores bacias hidrográficas do mundo (e.g., rio Amazonas, Prata e Orinoco). Só a bacia Amazônica é responsável por aproximadamente 30% da descarga de água doce que chega aos oceanos (Berner e Berner, 2012). Como em muitas regiões do mundo, o desenvolvimento econômico da América do Sul está fortemente associado ao uso e manejo dos recursos hídricos. Assim, a ocorrência de eventos hidrológicos extremos pode trazer impactos

severos à economia local. Diversas regiões da América do Sul são atingidas com frequência por eventos de seca e, de uma forma geral, este tipo de desastre tem sido tratado sob uma ótica de gestão de crises, em que as soluções aplicadas são apenas respostas ao fenômeno já consolidado (Albuquerque,2010).

Apesar dos eventos de seca serem foco de diversos estudos, o seu entendimento ainda permanece incompleto, seja pelo caráter heterogêneo e dinâmico das secas ou pela falta de estudos mais detalhados para algumas regiões. Os estudos que promovem um melhor entendimento das secas podem aprimorar a maneira como os agentes tomadores de decisão planejam a gestão dos recursos hídricos, o que conseqüentemente influencia na qualidade de vida da população de uma forma geral. Diversos setores estratégicos, como os de abastecimento de água, produção agropecuária e geração de energia elétrica são susceptíveis a terem sua operação comprometida frente a esse tipo de desastre. Sendo assim, é de interesse tanto social, econômico quanto governamental que haja disponível um sistema de monitoramento de seca capaz de fornecer informações detalhadas. Também é importante que sejam realizados estudos que possam caracterizar e explicar a ocorrência dos eventos de seca.

É comum na América do Sul a ocorrência de bacias hidrográficas internacionais o que dificulta o gerenciamento racional (presente e futuro). Associado a isso, as demandas pelo uso das águas transfronteiriças são provenientes de inúmeros setores econômicos e níveis de atuação (e.g., governos federais, estaduais, municipais, iniciativa privada, etc.). Neste sentido, informação hidrológica abundante e de livre acesso, como as fornecidas por um sistema de monitoramento de seca, seria de grande valor para o manejo integrado de recursos hídricos na escala regional da América do Sul.

Diferentes estudos (Peterson et al., 2013; Sivakumar, 2012; IPCC, 2014) mostram que, devido às mudanças climáticas, é esperado que a frequência, severidade e duração de eventos hidrológicos extremos (e.g., secas e enchentes) aumentem. Também é esperado que o crescimento populacional amplie as demandas de uso da água. Sendo assim, torna-se necessário o desenvolvimento de estudos e ferramentas que aprimorem o atual conhecimento sobre as secas, visto que os impactos gerados por este tipo de desastre ambiental serão cada vez mais danosos para sociedade. A exemplo disso, em 2013, a Agência Nacional de Águas (ANA) estabeleceu, na Conjuntura dos Recursos Hídricos no Brasil, que uma das quatro frentes de trabalho para o Plano Nacional de Segurança Hídrica será voltada à identificação de lacunas de soluções para as áreas em que eventos extremos de seca ou inundação ocorrem com maior frequência (ANA, 2013).

As metodologias para o monitoramento de seca também podem ser utilizadas para auxiliar estudos de identificação das regiões com maior risco de serem atingidas por secas.

Além disso, pode ser aplicado para pesquisas relacionadas com quantificação de prejuízos econômicos e sociais das áreas afetadas, sendo esta informação também importante para o planejamento das medidas de recuperação das mesmas.

Como já citado, atualmente existem alguns sistemas de monitoramento de seca implementados com sucesso para grandes regiões. Estes no geral, utilizam metodologias baseadas em índices específicos para acompanhar a variação de diversas variáveis hidrológicas e meteorológicas, com o objetivo de identificar e categorizar eventos de seca. Com base no que foi exposto, pode-se afirmar que há necessidade de implementação de um sistema deste tipo para a América do Sul. Contudo, ainda existem, para esta região, lacunas científicas relacionadas com a análise e desenvolvimento de metodologias que viabilizem isso. Este trabalho está inserido no contexto dos esforços científicos que visam a minimização das lacunas relacionadas ao estudo de secas para América do Sul.

1.3 – Objetivos

O objetivo geral deste estudo é analisar dentre as metodologias existentes quais apresentam o melhor desempenho na identificação de secas para América do Sul, tendo como dados de entrada produtos de sensoriamento remoto, produtos de modelos de superfície e reanálises climáticas.

O presente estudo tem dois objetivos principais; o primeiro consiste em identificar dentre os principais índices de seca aqueles que se adequam melhor na identificação e monitoramento de secas ocorridas nas diferentes regiões da América do Sul. O segundo está relacionado à combinação destes índices a fim de aprimorar o monitoramento e caracterização dos eventos de seca para a região de estudo, de tal forma que se possa aproveitar melhor o potencial individual de cada um deles.

A metodologia proposta é avaliada em função dos seguintes questionamentos científicos:

1. Quais os melhores índices para identificação de secas ocorridas na América do Sul?
2. Como combinar os índices de seca a fim de se aprimorar a identificação e monitoramento das secas ocorridas na América do Sul?
3. Existe alguma relação entre os índices de seca analisados que possa vir a aprimorar o entendimento sobre as secas ocorridas na América do Sul?
4. Existe algum ganho na combinação de índices de seca que consideram variáveis hidrológicas distintas?

1.4 – Organização do Texto

No capítulo 2, apresenta-se uma revisão bibliográfica sobre conceitos e definições de secas, abrangendo os tipos, características, parâmetros e componentes das secas, além de registros histórico de eventos deste tipo para os últimos 35 anos na América do Sul. Os capítulos 3, 4 e 5 também são dedicados à revisão bibliográfica voltados, respectivamente, para os temas: Sensoriamento Remoto; Produtos de Modelos, Índices e Sistemas de Monitoramento de Seca. No capítulo 6 é apresentada a metodologia que foi utilizada para se alcançar os objetivos citados anteriormente. A apresentação dos resultados obtidos, discussões e conclusões constam nos capítulos 7 e 8. Por fim, o capítulo 9 é reservado para indicação das referências bibliográficas utilizadas durante a elaboração deste estudo.

Capítulo 2 – CONCEITOS DE SECA

2.1 – Seca

A definição de seca deve ser estabelecida a partir das tendências regionais, sejam econômicas, sociais ou políticas, e em função das condições climáticas de cada região, uma vez que o suprimento de água é fortemente dependente delas (Wilhite e Glantz, 1985). É possível dividir as definições de seca em conceitual ou operacional. A primeira refere-se a descrições genéricas deste fenômeno com base em referências de dicionários ou manuais de termos técnicos. Os conceitos operacionais são mais específicos e podem ser embasados no acompanhamento de índices de seca ou ao monitoramento de alguma variável hidrológica (precipitação, evapotranspiração, umidade do solo, vazão, etc.), sendo base para sistemas monitores ou de gestão desse tipo de evento climático. Além disso, este tipo de definição é utilizada para identificar o início, duração, término e severidade de um evento de seca. A maioria das definições conceituais indicam seca como desastre natural que ocorre devido a um período prolongado de déficit de precipitação (WMO,2012; UN Secretariat General, 1994; IBGE, 2004).

As secas constituem-se como uma das quatro classes relacionadas à escassez de água, sendo as demais: aridez (permanente diminuição da água devido a um determinado clima seco); dessecação ou desertificação (ressecamento do ambiente, em especial do solo, provocado por atividades como desmatamento ou intensificação do uso agrícola) e estresse hídrico (causado pelo aumento da demanda humana em fontes hídricas) (Vlachos, 1982). A seca é uma característica climática normal e recorrente, estando presente tanto em regiões com altos e

baixos índices pluviométricos, diferenciando dessa forma, com a aridez natural que é uma característica climática permanente e se restringe a regiões com baixos índices pluviométricos (Wilhite, 2000).

Geralmente, este tipo de fenômeno se inicia como consequência de uma redução da quantidade de precipitação de determinada região durante um período prolongado (e.g., meses a anos). A severidade de um evento de seca pode ser intensificada quando ocorre combinação com outros fatores climáticos tais como altas temperaturas, ventos fortes e baixa umidade do ar. Este tipo de evento difere dos demais desastres naturais em pelo menos três aspectos: (i) sua recorrência é inevitável e os efeitos geralmente são lentos e acumulativos no decorrer de um longo período de tempo; (ii) seus efeitos podem continuar por muitos anos, fazendo com que seja difícil determinar o início, o fim e o limiar de uma seca, (iii) os impactos gerados pelas secas são não-estruturais e se estendem por uma área geográfica maior quando comparados aos danos gerados por outros tipos de desastres naturais, o que torna mais difícil a tarefa de quantificar os prejuízos gerados (Wilhite, 2000).

Qualquer evento de seca apresenta componentes naturais e sociais. A componente natural relaciona-se com a probabilidade natural de ocorrência das secas. A componente social se refere ao nível de vulnerabilidade da sociedade em enfrentar o evento de seca (Wilhite, 2000) como é exemplificado na Figura 2.1.



Figura 2.1 - Componentes de uma seca. Adaptado de Wilhite, (2000).

Os eventos de seca diferem-se entre si basicamente sob três parâmetros essenciais: intensidade; duração e extensão espacial. A intensidade refere-se ao grau do déficit climatológico, em que é analisado o quão abaixo do considerado normal está determinada variável hidrológica. A duração refere-se ao tempo total, desde o início ao fim de determinado evento, e a extensão espacial da área total afetada pela seca. O fato de que os eventos de seca têm uma propagação lenta, torna necessário dois ou três meses para o déficit climatológico se estabelecer e ser identificado como um evento de seca (Wilhite et al., 2014). As secas vêm

sendo enquadradas em quatro classes: meteorológica; agrícola; hidrológica e socioeconômica (UNISDR,2011; Wilhite, 2000). Estas classes não apresentam caráter exclusivo, ou seja, um mesmo evento de seca pode apresentar características de diferentes classes. Mishra e Singh (2010) apresentam a seca meteorológica como a ocorrência de baixa precipitação em uma região por um período prolongado de tempo. Este tipo de seca é avaliado analisando-se a precipitação mensal ou a acumulada de vários meses e praticamente todas as secas se iniciam como consequência da seca meteorológica. Seca agrícola é originada a partir do déficit prolongado da água no solo de tal maneira que não é o suficiente para atender às demandas da vegetação em diferentes estágios de seu desenvolvimento (germinação, crescimento, maturação, etc.) (Sivakumar et al, 2010). Seca hidrológica é relacionada com os efeitos do déficit prolongado de precipitação sob suprimento de águas superficiais e subterrâneas (vazão em rios, níveis de lagos e aquíferos). No geral, este tipo de seca é uma consequência de secas meteorológicas e agrícolas mais severas (Wilhite, 1992).

A seca socioeconômica é a única das classificações a qual não está relacionada necessariamente com déficit de precipitação. Esta relaciona o suprimento e demanda de algum bem ou serviço de valor econômico com elementos da seca meteorológica, hidrológica e agrícola. Isso se aplica aos casos em que o suprimento de um bem ou serviço que dependente das condições climáticas passa a não ser suficiente para atender às demandas das atividades humanas (Wilhite,2000). O fluxograma apresentado na Figura 2.2 apresenta como uma seca evolui de meteorológica para hidrológica.

2.2 – Histórico De Secas

O acesso aos registros de seca é uma parte importante para estudos de caracterização e monitoramento deste fenômeno em uma determinada região, contudo esta informação nem sempre está disponível ou é feita de maneira inapropriada e descontínua. Os detalhes relacionados à quantificação dos impactos que um evento de seca pode causar são difícil de serem determinados. Sendo assim, muitos registros carecem deste tipo de informação. Isso se deve principalmente à natureza desse desastre, em que sua propagação ocorre de forma lenta e menos brusca.

Em 1988, o Centro de Pesquisas sobre a Epidemiologia dos Desastres (CRED) desenvolveu o Banco de Dados de Emergência e Desastres (EM-DAT). Este é vinculado a Universidade Católica de Louvain na Bélgica e traz informações internacionais de livre acesso sobre desastres naturais e tecnológicos (Tschoegl, et al, 2006).

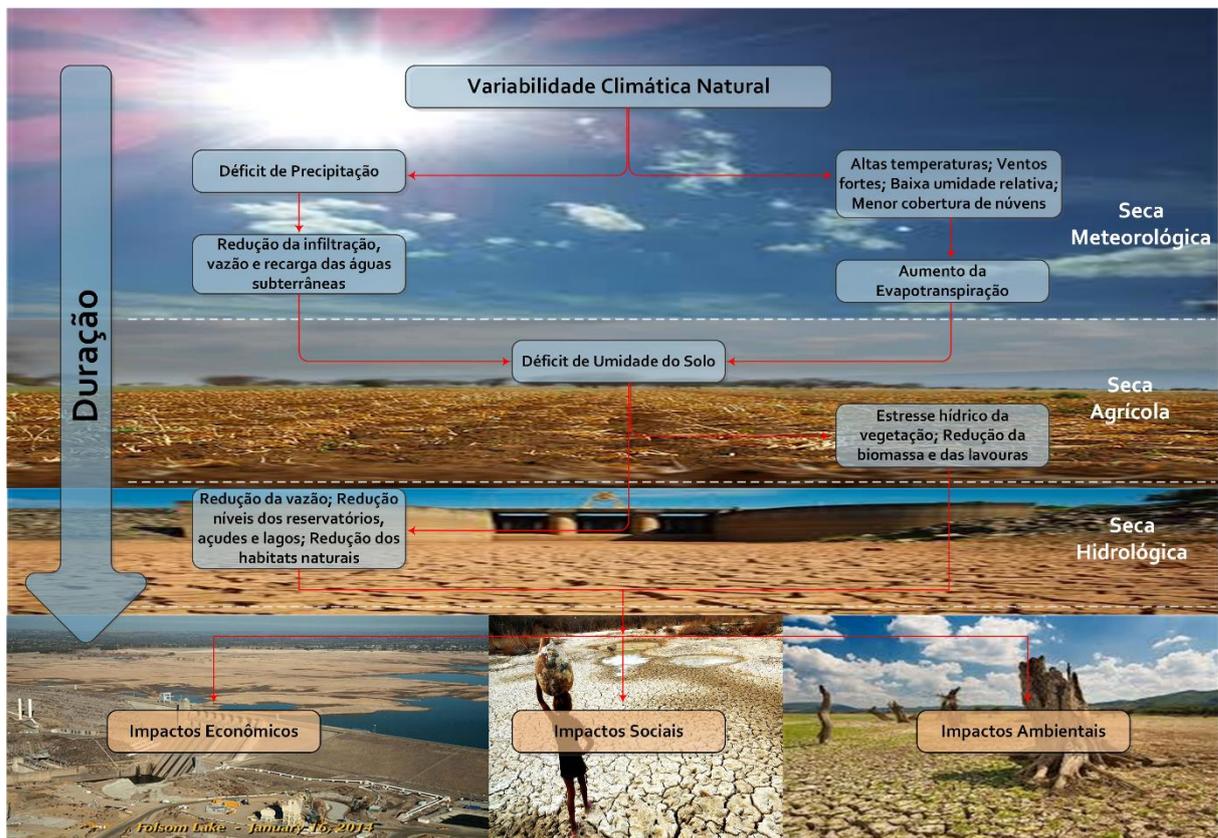


Figura 2.2 - Tipos de seca. Fonte: Wilhite,2000. Adaptado

Este banco de dados contém informações do ano de 1900 até o presente momento, com mais de 16 mil registros e recebe por ano em média outros 700 novos registros, em que só são aceitos os registros de desastres que atingiram ao menos 100 pessoas e/ou levaram a óbito ao menos 10 (Tschogl, et al, 2006). As fontes que alimentam este banco de dados são entidades governamentais de diversos países, agências da Organização das Nações Unidas (ONU), Cruz Vermelha, Agência Americana para o Desenvolvimento Internacional (USAID), Centro Asiático de Redução de Desastres (ADRC), etc. (EM-DAT, 2016). É importante ressaltar que os registros de seca deste banco de dados são feitos quando ocorre identificação dos impactos gerados por esse desastre, ou seja, esses registros não são em função do acompanhamento de variáveis hidrológicas, meteorológicas ou indicadores climáticos.

Os registros de secas que ocorreram na América do Sul utilizados neste estudo foram obtidos deste banco de dados para os últimos 35 anos, mais detalhes são apresentados no capítulo 6.

Para algumas regiões é possível traçar os mecanismos climáticos que governam a ocorrência de secas. Por exemplo, a região do Nordeste brasileiro tem sua variabilidade climática influenciada fortemente por padrões de conexões originadas por anomalias em regiões distantes, tais como os fenômenos Oscilação Sul-El Niño (ENSO), Pacífico-América do Norte (PNA), Pacífico-América do Sul (PSA) ou Oscilação do Atlântico Norte (NAO) (Nobre et al., 2004; Marengo et al., 2011). No geral as maiores secas dessa região são associadas a eventos

intensos de El Niño (e.g., secas que ocorreram nos anos de 1982,1992,1998) e ao aquecimento do Oceano Atlântico Tropical Norte (NAO) (Marengo 2010). A Figura 2.3 ilustra os principais eventos de seca ocorridos entre 1979-2016 e os períodos em que ocorreram oscilações intensas do ENSO.

No Sul do Brasil, as secas geralmente estão associadas com a variabilidade atmosférica interanual e intersazonal. Em escala interanual, o fenômeno do ENSO sobre o Pacífico Equatorial se relaciona com a ocorrência de inundações e secas nesta região (Nobre et al., 2004). Na região da Amazônia alguns fenômenos diferentes podem desencadear eventos de seca, a exemplo da que ocorreu em 2005 que o período de estiagem foi associado a variações na temperatura de superfície do oceano Atlântico tropical (Zeng et al., 2008; Marengo et al., 2008). Já a seca extrema que ocorreu em 2010 se relacionou com sucessivas ocorrências de El Niño no verão austral e aquecimento no Atlântico Norte tropical na primavera e verão boreal (Marengo & Espinoza, 2016). Ainda sobre a região amazônica, secas e cheias podem ser intensificadas devido a variações regionais no transporte de umidade desta região durante o período mais úmido, visto que esse processo é importante para estabilidade do regime de precipitação (Marengo & Espinoza, 2016).

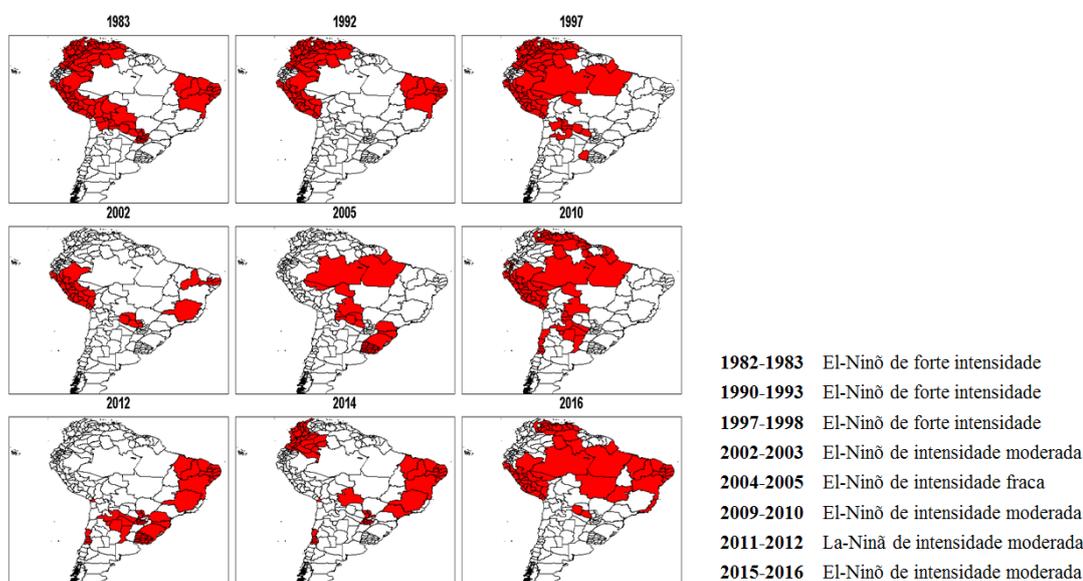


Figura 2.3 –Principais eventos de seca ocorridos nas divisões geopolíticas da América do Sul

Capítulo 3 – SENSORIAMENTO REMOTO APLICADO AO ESTUDO DE SECAS

3.1 – Sensoriamento Remoto

O Sensoriamento Remoto é o conjunto de técnicas e conhecimento relacionados a obtenção de informações sobre determinado objeto, área ou fenômeno através de dados obtidos

por equipamentos que não fazem contato físico com o objeto, área ou fenômeno em questão (Jensen, 2000). No geral refere-se ao estudo do meio ambiente e condições climáticas sendo definido como a medição e registro da energia eletromagnética refletida ou emitida pela superfície e atmosfera terrestre (Jensen, 2000). Em quase 150 anos de história, as tecnologias de sensoriamento remoto avançaram de fotografias aéreas com câmeras acopladas a balões para satélites que disponibilizam dados em tempo quase real.

Atualmente os produtos de sensoriamento remoto mais difundidos no meio acadêmico são os obtidos por sensores embarcados em satélites, em que diversas variáveis relevantes para estudos do ciclo hidrológico terrestre podem ser monitoradas em escala global (e.g., precipitação, evapotranspiração, níveis de corpos d'água, umidade do solo, variação do armazenamento terrestre de água, etc.). Além disso alguns produtos podem apresentar disponibilidade em tempo quase real o que facilita a criação de sistemas de monitoramento e alerta de eventos extremos.

A figura 3.1 apresenta uma linha do tempo referente a algumas das missões espaciais voltadas para o monitoramento de variáveis relacionadas ao ciclo hidrológico.

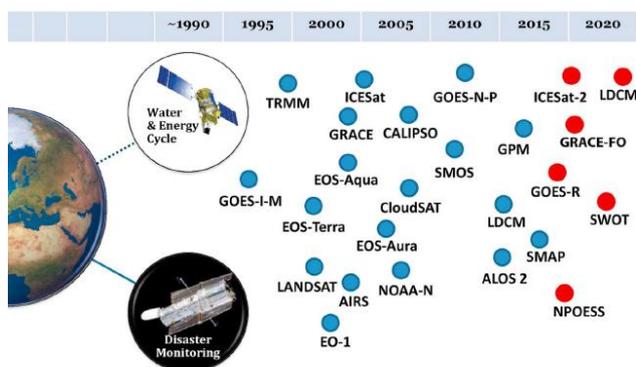


Figura 3.1 - Principais missões espaciais. Fonte: AghaKouchak et al 2015.

A seguir é apresentada uma revisão bibliográfica sobre satélites que produzem os produtos de sensoriamento remoto que foram utilizados neste estudo.

3.2 – Precipitação por Satélite

Ao longo dos últimos anos diversas missões espaciais integraram o conjunto de esforços para o desenvolvimento de tecnologias que permitissem a utilização de instrumentos embarcados em satélites para coletar em tempo quase real informações referentes as condições meteorológicas na superfície terrestre, oceanos e atmosfera. Uma das primeiras missões com esse objetivo foi o conjunto de satélites *Television Infrared Satellite* (TIROS) com início em meados dos anos de 1960. Na década seguinte iniciou-se a operação dos satélites *Geostationary*

Operational Environmental Satellites (GOES) que teve início na década 1970 e tem continuidade até o presente momento com mais de 15 satélites lançados desde então (Menzel et al, 1994; Davis, 2011). Missões mais modernas como o *Tropical Rainfall Measuring Mission* (TRMM) e o *Global Precipitation Measurement* (GPM) possibilitaram o uso da precipitação estimada por satélite em estudos em menor escala espacial, visto que a resolução espacial destes equivale respectivamente a 25 e 10km (Hou et al., 2014).

O TRMM foi projetado para estudar a distribuição espaço-temporal da precipitação dentro região tropical e subtropical, como parte do ciclo hidrológico terrestre no sistema climático atual. Seu desenvolvimento foi realizado pela parceria entre a *National Aeronautics and Space Administration* (NASA) e agência espacial japonesa *Japanese Aerospace Exploration Agency* (JAXA). Este satélite operava em uma órbita mais baixa que permitia um tempo de translação curto, conseqüentemente uma resolução espaço-temporal relativamente alta. O TRMM trabalhava com uma constelação de satélites também especializada em coleta de informações climatológicas (Kummerow, et al.,1997).

O lançamento do TRMM se deu em novembro de 1997, este carregava os sensores *Precipitation Radar* (PR), *TRMM Microwave Imager* (TMI), *Visible Infrared Scanner* (VIRS), *Lighting Imaging Sensor* (LIS) e o *Clouds and Earth's Radiant Energy System* (CERES). Seu tempo de vida útil era para ser 3 anos (Kummerow, et al.,1997), mas só encerrou suas atividades em abril de 2015 resultando em um conjunto de dados ininterruptos de quase 17 anos.

Kummerow et al., (1997) citam as características principais dos sensores utilizados pelo TRMM, o PR foi um o primeiro instrumento aeroespacial desenvolvido para produzir mapas tridimensionais da estrutura de uma tempestade, informando assim a intensidade, distribuição e tipo de chuva, a espessura das nuvens e a altura em que o gelo presente nestas derrete e se transforma em precipitação. O TMI é um sensor passivo de micro-ondas projetado para coletar qualitativamente a informação de precipitação, quantificar o vapor d'água, nuvens com potencial de precipitação e a intensidade de chuva na atmosfera. O VIR é um sensor que capta a luz visível e infravermelho que tem finalidade de limitar as regiões onde está chovendo e também de coletar informações para serem utilizadas em conjunto com outros satélites climatológicos. Além disso, este sensor possibilita a captação de informações com maior resolução espaço-temporal as quais podem ser combinadas com os dados do sensor TMI. LIS é um sensor imageador com função de detectar as tempestades com raios e relâmpagos afim de ajudar no monitoramento em tempo real do clima. O CERES é um instrumento usado para estudar o balanço energético entre atmosfera e superfície terrestre, contudo seu funcionamento no TRMM só se deu entre agosto de 1998 e março de 2000. O sucesso da missão TRMM motivou o desenvolvimento do GPM que tem como objetivo principal da continuidade a coleta

de informações referente a precipitação a nível global e ainda com resolução espaço-temporal e precisão superiores à o seu antecessor (Hou, et al, 2014).

No geral os eventos de seca estão relacionados com a ocorrência de um déficit de precipitação prolongado. A identificação e acompanhamento desta anormalidade nos níveis pluviométricos é de grande utilidade para os estudos voltados para a caracterização e monitoramento de secas. Uma das alternativas para esse tipo de estudo é a utilização dos produtos do TRMM, principalmente quando a área de estudo se trata de uma região de grande extensão espacial ou apresenta uma rede de postos pluviométricos falha ou incompleta. Neste sentido diversos estudos sobre secas já foram feitos utilizando os produtos de sensoriamento desse satélite (e.g., Yan, et al. ,2014; Yaduvanshi, et al., 2015; Zhang e Jia, 2013; Li, et al., 2013; Naumann, et al., 2012; Hongwei, et al., 2012; Rhee et al., 2010; Leivas et al., 2012; Cunha et al., 2015; Anderson et al., 2016).

Apesar da praticidade dos produtos de precipitação do TRMM é importante citar que estes podem apresentar algumas limitações e fontes de erro, alguns trabalhos já foram desenvolvidos visando se identificar isso. Tian & Lidard, (2010) mostraram que os produtos deste satélite tendem a apresentar mais erros em terrenos mais complexos (eg. Planalto do Tibete, Cordilheira dos Andes, Regiões Costeiras). Além disso mostraram que o TRMM também tende a apresentar mais incertezas no monitoramento de eventos menos intensos de precipitação.

A NASA continua a disponibilizar os produtos de precipitação do satélite TRMM, mesmo este tendo reentrado na atmosfera e encerrado suas atividades. Essa continuidade dos dados é feita pelo processamento das observações feitas pelo GPM com algoritmos que eram utilizados para geração dos produtos TRMM (Tang et al., 2016).

3.3 –Satélites NOAA

Durante os últimos 50 anos, os satélites *National Oceanic and Atmospheric Administration's* (NOAA) monitoraram variáveis climáticas para o EUA. Estes foram desenvolvidos em parceria com a NASA e permitiram a obtenção de imagens de alta resolução espaço-temporal, em qualquer condição climática (Davis, 2011). Em 1973 a NOAA colocou no espaço a primeira versão do *Advanced Very High Resolution Radiometer* (AVHRR) que é um sensor que usa 6 detectores para medir inicialmente em 4 bandas a radiação eletromagnética. Este sensor é capaz de determinar remotamente informações sobre a cobertura de nuvens e temperatura da superfície terrestre, da atmosfera e corpos d'água (Tucker et al., 2005). Em seguida foram lançados o AVHRR/2 em junho 1981 com 5 bandas no satélite NOAA-7 e em

maio de 1998 o AVHRR/3 com 6 bandas abordo do satélite NOAA-15. Esta última versão do AVHRR capta ondas eletromagnéticas com comprimento variando entre 0,58 e 12,5 μm (Tucker et al., 2005). O resumo das especificações técnicas da série de sensores AVHRR é apresentado na tabela 01.

Tabela 01 – Sensores AVHRR

Sensor	B01	B02	B03	B04	B05	B06	Satélites	Período de utilização
AVHRR	0.55 - 0.68 μm	0.725 - 1.10 μm	3.55 - 3.93 μm	3.55 - 3.93 μm	-	-	Tiros-N, NOAA-6, NOAA-8, NOAA-10	1979 - 2001
AVHRR/2	0.55 - 0.68 μm	0.725 - 1.10 μm	3.55 - 3.93 μm	10.3 - 11.3 μm	11.5 - 12.5 μm	-	NOAA-9 até NOAA-14	1981 - 2007
AVHRR/3	0.55 - 0.68 μm	0.725 - 1,0 μm	1.58 - 1.64 μm	3.55 - 3.93 μm	10.3 - 11.3 μm	11.5 - 12.5 μm	NOAA-15 até NOAA-19	1998-2021

Fonte: <https://www.wmo-sat.info>

As informações obtidas pelos satélites NOAA podem ser utilizadas para gerar diversos tipos de produtos, a exemplo do *Global Inventory Modeling and Mapping Studies* (GIMMS) *Normalized Difference Vegetation Index* (NDVI) desenvolvido pela NASA no *Goddard Space Flight Center* (GSFC) que permitiu a realização de diversos estudos relacionados as condições da vegetação.

O NDVI é o resultado da operação entre a subtração bandas do infravermelho próximo pela banda do vermelho. O valor desta subtração é então dividido pela soma destas duas bandas resultando em um índice que varia entre -1 e 1. A cobertura de neve, gelo, nuvens e água tendem a ter uma reflectância muito baixa para o infravermelho próximo, isso faz com que o NDVI para estes casos apresente valores negativos. Os valores positivos deste índice são associados as condições da vegetação, levando em consideração que quando as plantas estão mais saudáveis ocorre uma maior reflectância da banda do infravermelho próximo e menor da banda do vermelho.

O produto GIMMS NDVI pelo fato de oferecer uma informação referente as condições da vegetação, já foi utilizado em diversas linhas de pesquisa, tais como: Análise da variabilidade espacial da vegetação (Pattison et al.,2015; Ju e Masek,2016; Barbosa et al.,2006; Tian et al., 2016; Qu et al, 2015;); Análise de variações na produção agrícola (Dronin et al., 2015; Johnson et al., 2016); Estudo da influência da intensidade e distribuição da precipitação sob a vegetação (Yuan et al., 2015; Barbosa e Kumar, 2015), entre outras aplicações.

Além das linhas de pesquisa citadas anteriormente, o produto GIMMS NDVI foi aplicado em estudos como variável de entrada na análise e monitoramento de secas agrícolas. Kogan e Guo (2015) utilizaram este mesmo conjunto de dados e informações de temperatura de superfície para estudar secas nos EUA. Dutta et al. (2015) fizeram um estudo semelhante, sendo que compararam o desempenho do produto NDVI GIMMS com o de um índice de seca baseado na precipitação para a região de Rajasthan na Índia. Ainda nesta mesma linha de pesquisa pode-se citar os trabalhos apresentados por Covele (2011) e Yan et al. (2016) que aplicaram metodologias para monitoramento de secas agrícolas para Moçambique e China respectivamente. Esta temática se repete ainda em outros estudos como os apresentados por Huang et al. (2015), Berhan et al. (2011) e Kogan (1995).

Apesar do produto GIMMS NDVI ser amplamente difundido em trabalhos científicos e oferecer uma cobertura global com pixels de 8x8km e disponibilidade quinzenal dos dados é importante citar que este apresenta algumas desvantagens e limitações. Primeiramente os sensores AVHRR e seus respectivos satélites não foram desenvolvidos visando o monitoramento da vegetação, visto que a degradação pós-lançamento da calibração do sensor e problemas relacionados ao posicionamento orbital fazem com que surja erros na série do NDVI (Tucker et al., 2005).

Fensholt & Proud (2012) apresentam um trabalho sobre a comparação de produtos de NDVI. Os autores citam que a configuração espectral dos sensores AVHRR (e.g., número de bandas, cobertura de comprimento de onda e funções específicas de resposta de banda espectral) não permitem a aplicação de uma metodologia mais precisa na correção dos efeitos atmosféricos. Esses efeitos são relacionados com a influência de vapor de água e presença de aerossóis, sendo dessa forma uma possível fonte de erro no NDVI estimado pelos sensores AVHRR. Os autores também citam que o canal 2 (infravermelho próximo) deste sensor abrange comprimentos de onda nos quais existe uma considerável absorção pelo vapor de água na atmosfera o que também influencia o valor do NDVI observado. Ainda é citado que os métodos utilizados para se alcançar a resolução final de pixels com 8x8 km fazem com que haja perda na qualidade da informação deste índice.

3.4 – Satélites AQUA/TERRA

Os satélites Terra (lançado em dezembro de 1999) e Aqua (lançado em maio de 2002) foram desenvolvidos pela NASA com o intuito de coletar dados para melhorar o entendimento da dinâmica dos processos climáticos que ocorrem na superfície terrestre, dos oceanos e na porção mais baixa da atmosfera. Ambos os satélites foram embarcados com o *Moderate*

Resolution Imaging Spectroradiometer (MODIS) que tem a capacidade de coletar dados em 36 bandas espectrais diferentes com 12 bits de resolução radiométrica (Justice et al., 2002). Os dois satélites aferem o mesmo tipo de informação sendo possível gerar uma série de observações globais da superfície terrestre, oceano e atmosfera nas regiões do visível e infravermelho do espectro eletromagnético, cobrindo a Terra a cada dois dias (Justice et al., 1998; Rudorff et al. 2007). O projeto MODIS foi desenvolvido para ter seis anos de vida útil, mas continua em funcionamento, tendo mais de 16 anos de registros com alta sensibilidade radiométrica captando comprimentos de ondas que variam entre 0.4 μm até 14.4 μm , com duas bandas com pixel de 250m, cinco com pixel 500m e o restante com 1km (Rudorff et al. 2007).

Os produtos do MODIS vêm sendo utilizados extensivamente para os mais diversos tipos de estudo, tais como: Estimacão da evapotranspiraco (Lu e Zhuang,2010); Mapeamento de inundao e áreas alagadas (Chen et al, 2013; Parinussa et al., 2016); Estimacão da umidade do solo na zona de raiz (Schnur et al, 2010); Teor de água na vegetaco (Cheng et al,2008); Monitoramento de vegetaco (Zhang et al.,2003;Zhou et al., 2016); Estimacão da temperatura do ar (Vancutsem et al., 2010), entre outras aplicacoes.

 consolidado dentro do estudo de secas o uso de produtos MODIS como indicativo das condicoes da vegetaco, temperatura de superfície terrestre, evapotranspiraco e uso do solo. Gu et al. (2008) utilizaram o NDVI do MODIS e dados de umidade do solo para a análise de secas agrícolas no estado de Oklahoma nos EUA. Para a mesma região e com o mesmo conjunto de dados, Bajgain et al. (2015) realizaram estudos sobre a sensibilidade de índices de vegetaco baseados em produtos de sensoriamento remoto na identificaco de secas para pradarias com vegetaco de médio porte. Cunha et al. (2015) apresentaram um trabalho focado no semiárido do Nordeste brasileiro em que foi monitorado a dinâmica da seca agrícola. Zhang e Jia (2013) também estudaram regioes semiáridas, no qual aplicaram uma metodologia de monitoramento de secas meteorológicas para o norte da China, utilizando como dados produtos de precipitaco do satélite TRMM e produtos de uso do solo do MODIS.

Ainda sobre secas agrícolas Rhee et al. (2010) estudaram o monitoramento deste tipo de seca para regioes áridas e úmidas nos estados norte-americanos do Arizona, Novo México, Carolina do Sul e Norte. Os autores utilizaram vários produtos de sensoriamento remoto, inclusive alguns derivados dos dados do MODIS que no caso foram os de vegetaco (MOD13A3), temperatura da superfície terrestre (MOD11A2) e reflectância do vermelho e infravermelho (MOD09A1). Wu et al. 2012 utilizaram os produtos MODIS de NDVI (MOD13A3), temperatura (MOD11A2) e uso do solo (MOD12Q1) para o monitoramento deste tipo de seca na porão oeste da China.

Assim como os produtos derivados dos sensores AVHRR os produtos MODIS também apresentam algumas desvantagens e limitações. Com o passar do tempo é comum em missões espaciais de longa duração ocorrer um certa descalibração do sensor e instrumentos associados (e.g., variações nas bandas espectrais, ângulo de visada e lado de espelho). Wang et al. (2012) estudaram a influência deste efeito nos produtos MODIS entre o período de 2002 e 2010. Os autores mostraram que no geral as bandas 1 a 3 do MODIS do satélite Aqua apresentaram uma mudança inferior a 2% na refletância de topo de atmosfera entre o período citado anteriormente. Já o MODIS embarcado no satélite Terra mostrou uma degradação mais acentuada na banda 3 (459 - 479 μm) que se aproximou de uma variação de 7% no ângulo de visada do nadir ao longo da última década. Esta banda não é utilizada diretamente para o cálculo do NDVI, contudo sua degradação passa a afetar as aferições da refletância da superfície feita pelas outras bandas, influenciando assim os produtos de alto nível do MODIS como o NDVI.

Esse tipo de situação assim como os problemas apresentados pelo sensor AVHRR ilustram que apesar da grande utilidade e vasta aplicação desses produtos de sensoriamento remoto, sempre haverá incertezas associadas que no geral se apresentam na forma de ruído inserido na série desses produtos.

3.5 – GRACE

O *Gravity Recovery and Climate Experiment* (GRACE) são satélites gêmeos desenvolvidos em parceria pela NASA e a *Deutsche Forschungsanstalt für Luft und Raumfahrt* (DLR) na Alemanha, lançados em março de 2002 com a capacidade de mapear com precisão variações no campo gravitacional da Terra. Essa missão tinha originalmente a proposta de durar por cinco anos (Tapley et al., 2004) mas está funcionando até o presente momento.

O princípio gravimétrico do GRACE é que o conjunto da massa das águas superficiais e subterrâneas tem um potencial para alterar o campo gravitacional da Terra, permitindo que essas variações sejam utilizadas como um indicador de mudanças no total armazenado (TWS) em uma coluna vertical (AghaKouchak et al 2015). Os dois satélites seguem na mesma órbita com uma defasagem cerca de 220km, mudanças no campo gravitacional da Terra alteram a distância entre os dois satélites e esta informação é medida e associada a variações no armazenamento terrestre de água.

Os dados do GRACE de variação de armazenamento terrestre de água já foram utilizados como componente do *Global Land Data Assimilation System* (GLDAS), análise da variação do armazenamento de água (Schmidt et al., 2006; Swenson et al., 2006; Chen et al., 2016; Rodell e Famiglietti, 2001; Mo et al, 2016; Getirana, 2016), variação da massa de gelo

polar (Velicogna, 2009; Wouters et al., 2008; Chen et al, 2006), análise de inundações (Chen et al, 2010).

As informações de variação do armazenamento terrestre de água obtidas pelo GRACE já foram também utilizadas para o estudo de secas hidrológicas, Li et al. (2012), Houborg et al. (2012), Long et al. (2013), e Chao et al. (2016) utilizaram assimilação de dados do GRACE em modelos de superfície terrestre para monitorar respectivamente secas na Europa, América do Norte, Texas, Austrália, Amazônia e China. Também pode-se encontrar estudos relacionados com avaliação sazonal do armazenamento terrestre de água, Ndehedehe et al. (2015) aplicaram os dados do GRACE para região leste da África e Alsdorf et al. (2010) para as planícies de inundação da região amazônica.

Os dados do GRACE ajudaram a melhorar o entendimento de algumas etapas do ciclo hidrológico terrestre, contudo com atualização dos seus dados sendo feita mensalmente e sua resolução espacial tendo pixels com quase 110x110km, limita seu uso em aplicações que demandam de informações de quase tempo real ou que necessitam de uma resolução mais detalhada (Houborg et al., 2012). A assimilação de dados associada a modelos numéricos de superfície pode ser utilizada para resolver estes problemas, podendo assim separar temporalmente, verticalmente e horizontalmente os dados do GRACE resultando no aprimoramento da resolução espaço-temporal deste produto (Houborg et al., 2012). A seguir são ilustradas algumas características e aplicabilidades dos produtos GRACE, na figura 3.2.

Na figura 3.2A e 3.2B (<http://grace.jpl.nasa.gov/mission/grace/>) é exibido respectivamente o armazenamento de água terrestre para o globo e geoide da Terra utilizando as informações de variação do campo gravitacional coletada pelo GRACE. Na figura 3.2C é apresentada uma ilustração da diferença da extensão espacial dos pixels dos produtos GRACE (Verde), TRMM (Azul) e MODIS (Amarelo).

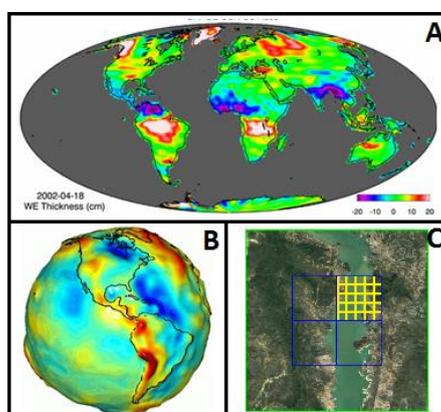


Figura 3.2 – A: Representação da variação do TWS; B: Geoide da Terra; C – Representação da diferença de resolução espacial entre produtos GRACE, TRMM e MODIS

Capítulo 4 – PRODUTOS DE MODELOS

4.1 – MODELOS HIDROLÓGICOS

A necessidade de expansão dos conhecimentos relacionados a hidrologia incentivou o desenvolvimento de modelos simplificados que fossem capazes de representar algumas componentes do ciclo hidrológico, podendo citar certas contribuições como as teorias de infiltração de água no solo de Horton em 1933, evapotranspiração de Penman em 1948, conceitos de hidrograma unitário de Sherman em 1932 e as equações de Saint Venant que são utilizadas para representar o escoamento em rios (Paiva, 2009).

Os modelos hidrológicos podem ser divididos basicamente em empírico e conceitual. Os modelos empíricos utilizam relações matemáticas para estabelecer uma relação estável entre as variáveis de entrada e saída, desconsiderando os parâmetros físicos dos processos que ocorrem dentro do ciclo hidrológico (e.g., Redes Neurais Artificiais, Modelos de Regressão Linear, etc.). O oposto disso ocorre nos modelos conceituais que utilizam de relações matemáticas para representar os principais processos físicos que atuam no ciclo hidrológico (e.g., MGB-IPH, Collischonn & Tucci, 2001).

Os avanços nas áreas de geoprocessamento, sensoriamento remoto, maior facilidade ao acesso de dados obtidos em campo e os crescentes avanços no processamento computacional viabilizaram o surgimento de mais pesquisas voltadas ao uso e desenvolvimento de modelos hidrológicos distribuídos de base física. Estes substituem as relações empíricas e conceituais por relações físicas e por meio de relações matemáticas representam com mais exatidão teórica os processos intermediários entre a precipitação e a vazão no exutório de uma bacia hidrográfica.

Estes modelos são capazes de simular diversas variáveis do ciclo hidrológico e servir de ferramenta para o aprimoramento forma como se faz a gestão e uso dos recursos hídricos. Através destes modelos é possível avaliar impacto sobre os recursos hídricos devido mudanças climáticas ou variações no uso e ocupação do solo (e.g., Wagener e Franks, 2005; Andersson et al., 2006), análise de concessão de outorgas (e.g., Pereira et al., 2012), otimização da operação de reservatórios (e.g., Schwanenberg et al., 2015) e ainda servir de base para modelos de qualidade de água (e.g., Fan et al., 2015; Larentis et al., 2008).

Além da gestão de recursos hídricos os modelos hidrológicos podem ser utilizados para a previsão de vazão em tempo real e servir como uma ferramenta de sistemas de monitoramento e alerta contra cheias e secas. Além das aplicações citadas, alguns trabalhos foram desenvolvidos com foco na utilização de modelos hidrológicos para o estudo sobre secas (e.g., Correa et al., 2017; Van Loon & Lanen, 2012; Van Loon et al., 2010; Zierl, 2001; Xu & Yang, 2010; Sawada et al., 2014)

4.2 – Modelos de Superfície Terrestre

Nos últimos anos diversos estudos foram realizados visando aprimorar o entendimento a respeito das interações entre a atmosfera, a superfície terrestre e o ciclo hidrológico. Surge nesse contexto modelos unidimensionais baseados em balanço de energia em que a radiação total absorvida na superfície terrestre é equilibrada pela emissão de radiação térmica e infravermelha para atmosfera, perda de calor latente associada à evapotranspiração da vegetação, perdas de calor sensíveis e por difusão de energia no solo (Overgaard et al., 2006).

O objetivo básico de qualquer modelo de superfície é simular a distribuição da radiação terrestre em variáveis na forma de campo de fluxo de energia (e.g., precipitação, evapotranspiração, umidade do solo, temperatura, etc.). Para isso utiliza-se um conjunto de equações matemáticas e físicas que simplificam estes processos e permitem uma diminuição do custo computacional. Uma das grandes vantagens dos modelos de superfície e o dos hidrológicos é que ambos permitem a previsão sazonal de variáveis hidrológicas, ou seja, é possível estimar estas informações para o passado ou futuro e ainda distribuídas espacialmente (Clark et al., 2015). Isso possibilita um maior entendimento das características relacionadas aos eventos de seca, visto que passa a ser possível um maior detalhamento quanto aos eventos ocorridos no passado.

A aplicação de modelos de superfície terrestre para o aprimoramento do estudo de secas é bem documentada na literatura científica. Por exemplo, pode-se citar o trabalho apresentado por Li et al., (2012) em que informações de variação do armazenamento terrestre de água provenientes da missão GRACE foi assimilada em um modelo de superfície com o objetivo de se monitorar secas ocorridas na Europa. Crow, et al., (2012) apresentaram um trabalho sobre a aplicação de modelos de superfície terrestre para o monitoramento de secas agrícolas. Para isso os autores utilizaram a umidade do solo na zona da raiz simulada pelos modelos *Common Land Surface Model* (CLM2), *Catchment Land Surface Model* (CLSM) e o modelo Noah. Os autores concluíram que aplicação destes modelos contribuem substancialmente para descrever o impacto subsequente dos eventos de seca nos processos de balanço hídrico como os de evapotranspiração e geração de escoamento superficial.

4.2.1 – GLDAS

O GLDAS é um conjunto de modelos de superfície que utiliza técnicas de assimilação de dados para integrar dados de satélite com observações em campo, sendo capaz de simular as

interações do ciclo hidrológico com a superfície terrestre para gerar campos de estado otimizados (Rodell et al., 2004). Estes campos são apresentados na forma de fluxos de energia que inclui precipitação, evapotranspiração, umidade do solo a diferentes profundidades, temperatura de superfície, fluxo de calor, velocidade do vento, albedo, etc.

Dentro do GLDAS estão inseridos quatro modelos de superfície terrestre: Mosaic, Noah e Community Land Model (CLM), Variable Infiltration Capacity (VIC). As forçantes meteorológicas utilizadas pelo GLDAS são provenientes do Global Data Assimilation System (GDAS), suplementadas por uma versão em escala reduzida de dados de precipitação do NOAA e de produtos de sensoriamento remoto da Agência de Clima da Força Área Americana (Zaitchik et al., 2010).

O GLDAS faz uso de uma série de produtos de sensoriamento remoto tais como: NDVI gerado por dados dos sensores do AVHRR; Dados de precipitação em quase tempo real derivados de satélites do Laboratório de Pesquisa Naval dos EUA (NRL); Produto de dados de micro-ondas do Sensor Especial de Microondas (SSM/I); Dados de precipitação do satélite TRMM; Produtos da Unidade Avançada de Sonorização de Microondas (AMSU); Produto de cobertura de neve do sensor MODIS, entre outros (Rodell et al., 2004).

4.3 – Reanálises climáticas

O termo reanálise climática ou meteorológicas foi apresentada inicialmente por Kalnay et al.,(1996) e são definidas como reprocessamentos constantes de observações climáticas armazenadas usando modernos sistemas de previsão. O objetivo principal é obter uma descrição do clima através do uso da maior quantidade de informação possível. Estas reanálises produzem informação estimada dos estados de diferentes parâmetros da atmosfera, do mar e da superfície da terra (Dee et al., 2014).

Inicialmente foram desenvolvidos na área de meteorologia para o estudo do clima (e.g., Gibson et al., 1997; Kistler et al., 2001). A finalidade geral do desenvolvimento da reanálise climática é produzir uma representação espacial no estado da arte, em escala global, dos estados da atmosfera gerados através de um modelo e um sistema de assimilação de dados invariáveis (Saha et al., 2010). As reanálises podem ser combinadas com informações de produtos de sensoriamento remoto e observações coletadas em campo pelo o uso de técnicas de assimilação de dados. Isso permite a criação de produtos específicos com alta disponibilidade espaço-temporal. Estes produtos podem ser úteis para o monitoramento de secas, uma vez que possibilitam um melhor entendimento de eventos de secas já ocorridos.

4.3.1 – Produtos de precipitação baseados em reanálises

Para boa parte dos estudos hidrológicos se faz necessário o uso de informações a respeito da precipitação da área estudada. Esta demanda de informação por muito tempo foi atendida exclusivamente por observações coletadas em redes de postos pluviométricos. Nos últimos anos, essas informações já vêm sendo substituída por produtos de sensoriamento remoto como os do satélite TRMM citado anteriormente. Se este tipo de satélite apresenta diversas vantagens no que diz a respeito da disponibilidade de dados em quase tempo real e abrangência quase completa do globo terrestre, falha na questão de disponibilidade temporal, pois sua série histórica relativamente reduzida não atende as necessidades de alguns estudos.

As reanálises voltadas para o estudo de precipitação podem ser uma solução para este tipo de problema, podendo ser gerados base de dados com mais de 30 anos de extensão. Um dos principais produtos desse tipo é o ERA-Interim que foi desenvolvido pelo *European Centre for Medium-Range Weather Forecasts* (ECMWF). Este produto apresenta diversos tipos de informações e parâmetros climáticos incluindo dados de precipitação para o período de 1979 até o presente momento (Dee et al., 2011). Recentemente Beck et al., (2016) apresentaram um produto global de precipitação com 0,25° de resolução espacial, disponível para o período de 1979-2014 e desenvolvido pela combinação de dados de postos pluviométricos, informações de satélite e reanálise, chamado de *Multi-Source Weighted-Ensemble Precipitation* (MSWEP).

A média de longo período do MSWEP é baseada na elevação corrigida da base de dados CHPclim, mas substituída por informações regionais mais precisas. A correção do efeito orográfico é introduzida pela inferência da precipitação média através de observações de vazões coletadas por 13762 postos espalhados pelo mundo (Beck et al., 2016). A variabilidade temporal do MSWEP é determinada pela média ponderada das anomalias da precipitação a partir de sete conjuntos de dados; dois baseados exclusivamente na interpolação de observações de postos pluviométricos; três baseados em produtos de sensoriamento remoto (CMORPH, GSMaP-MVK e TRMM 3B42RT) e dois baseados em modelos de reanálises climáticas (ERA-Interim e JRA-55) (Beck et al., 2016). O MSWEP foi validado em escala global utilizando dados independentes de 125 postos pluviométricos da FLUXNET e utilizando modelagem hidrológica para aproximadamente 9mil bacia hidrográfica e ainda foi utilizado como principal forçante de precipitação para o modelo global em estado da arte de evaporação (GLEAM) (Beck et al., 2016).

Capítulo 5 – MONITORAMENTO DE SECAS

5.1 – Índices de seca

Os índices de seca apresentam papel importante nos estudos de caracterização e identificação de eventos de seca, uma vez que permitem uma representação numérica aproximada das condições das variáveis hidrológicas, sendo possível identificar quando estas encontram-se abaixo do valor estatisticamente esperado. Os subítemos a seguir foram divididos em função das variáveis hidrológicas mais relevantes para o estudo de secas. Para cada uma dessas variáveis são exemplificados alguns dos índices de secas encontrados na literatura que são calculados com a variável em questão.

5.1.1 – Precipitação

Nos últimos anos diversos índices foram desenvolvidos voltados para identificação de déficits de precipitação, tais como: Percentil da Precipitação Normal; Índice Chinês Z; Índice de Precipitação e Evapotranspiração Padronizado (SPEI), Índice da Anomalia da Precipitação, etc. Nenhum destes alcançou a notoriedade e ampla utilização como o Índice de Precipitação Padronizado (SPI) que em 2009 foi escolhido pela Organização Mundial de Meteorologia (WMO) para ser a recomendação global quanto ao uso de índice “meteorológico” de seca (WMO, 2009; Hayes et al, 2011), este índice será o foco desta seção.

O SPI teve sua metodologia proposta inicialmente por McKee et al. (1993) como uma alternativa ao uso do Índice de Seca Palmer (ISP) que até então era o método mais utilizado para identificação de secas. O SPI foi desenvolvido para quantificar o déficit de precipitação para diferentes escalas de tempo e para ser um índice que reconheça a importância da escala temporal na análise de disponibilidade de água e quanto ao seu uso (Guttman, 1998).

O SPI é calculado com a precipitação mensal acumulada para diversos intervalos de tempo, em seguida essa série é ajustada em uma função Gama para assim definir a relação da probabilidade de cada valor de precipitação acumulada e por fim sob essa distribuição de probabilidades é aplicada uma distribuição inversa Gaussiana (McKee et al, 1993). Este índice apresenta a vantagem que é a possibilidade de determinação do tempo de retorno da seca estudada bem como a probabilidade de ocorrência da precipitação necessária para finalizar o evento de seca em questão, uma vez que é normalizado em função do tempo e do espaço (McKee et al, 1993).

O SPI já foi aplicado em diversos estudos para análise e caracterização de eventos de seca, Patel et al. (2007) utilizaram este índice no estudo dos padrões espaciais de secas meteorológicas para o estado de Gujarat na Índia. Wu, et al. (2007) analisaram a influência de climas áridos e temporadas mais secas nos EUA no cálculo do SPI de curta escala de tempo. Zarch, et al. (2015) apresentaram um estudo no qual foi analisada a distribuição espaço-temporal de tendências de eventos de seca em diferentes zonas climáticas no mundo para o período de 1960-2009. Os autores concluíram que pelo fato dos parâmetros de demanda atmosférica não serem considerados no cálculo do SPI, este índice pode não ser capaz de identificar secas futuras sob um cenário de aumento de temperatura global, tendo assim a necessidade de associação do SPI com outro índice.

Se tratando de América do Sul os trabalhos relacionados a aplicação do SPI para monitoramento e caracterização de eventos seca foram desenvolvidos considerando uma escala mais regional. Pode-se citar como exemplo os estudos desenvolvidos para regiões da Argentina (Zanvettor & Ravelo, 2000; Vicario et al., 2015), Brasil (Leivas et al., 2013; Macedo et al., 2011; Sansigolo et al., 2004), Bolívia (Vicente-Serrano et al., 2015), Chile (Espinoza & Meseguer-Ruiz, 2015; Sarricolea & Meseguer-Ruiz, 2016), Colômbia (Cerón et al., 2015; López et al., 2016) e Venezuela (Paredes et al., 2008).

Um das desvantagens do SPI é que pela metodologia de cálculo apresentada por McKee et al. (1993) é indicado que sejam utilizados pelo menos 30 anos de dados contínuos de precipitação. Isso pode representar um problema, principalmente para as regiões com baixa disponibilidade de dados pluviométricos. Até os produtos de sensoriamento remoto que poderiam ser uma alternativa para essa questão, não apresentam uma série histórica tão extensa. Vários autores já apresentaram estudos analisando a viabilidade do uso de produtos de precipitação derivados do satélite TRMM para o cálculo do SPI (Yan, et al., 2014; Naumann, et al., 2012; Rhee et al., 2010) e demonstrando existir concordância entre este índice calculado com dados de sensoriamento remoto e com postos pluviométricos.

5.1.2 –Vegetação

A condição de saúde da vegetação pode ser utilizada como um parâmetro para identificação de estresse hídrico na vegetação (i.e. secas agrícolas), visto que ocorre uma alteração na morfologia e coloração das plantas quando estas passam por um período prolongado com acesso a água insuficiente para atender as suas demandas fisiológicas. A variação da condição natural das plantas pode ser monitorada através de índices calculados pela operação de determinadas faixas espectrais de sensores de satélites como o já citado NDVI.

Este índice é o primeiro baseado em informações de sensoriamento remoto para indicar as condições da vegetação e é o mais frequentemente utilizado para isso.

Alguns índices de seca já foram desenvolvidos para a análise e monitoramento de secas agrícolas utilizando como dado de entrada apenas NDVI, a exemplo do Índice de condição da vegetação (VCI) que teve sua metodologia de cálculo proposta por Kogan e Sullivan, (1993) e o Índice de Vegetação Padronizado (SVI) proposto por Peters et al., (2002).

Kogan e Sullivan (1993) descrevem em seu estudo o princípio básico para o desenvolvimento de um sistema de monitoramento global de secas agrícolas, apresentando exemplos de secas ocorridas nos EUA, China e para Europa Ocidental que puderam ser detectadas pela metodologia proposta. No estudo apresentado por Peters et al. (2002) que introduziu o SVI, foram estudaram secas ocorridas nos EUA ocorridas entre 1989 e 2000 utilizando um índice de seca baseado nos dados do NDVI GIMM. A metodologia proposta pelos autores foi validada comparando os resultados com mapas produzidos pelo *US Drought Monitor* (USDM). Estes dois índices já foram utilizados em outros estudos, Kogan e Guo (2015) utilizaram o VCI e um índice baseado em informações de temperatura de brilho para o monitoramento de uma grande seca ocorrido na porção leste dos EUA.

Alguns trabalhos utilizaram anomalias do EVI para analisar se existe relação entre “verdeamento” ou não de uma região durante eventos de seca. Em especial pode-se citar o trabalho de Samanta et al. (2010) em que os autores contestaram as conclusões do estudo apresentado por Saleska et al. (2007) e mostraram que a região amazônica não passou por um processo de “verdeamento” durante a grande seca de 2005. Samanta et al. (2010) mostraram que na verdade quase 30% da vegetação passou a ficar marrom ou não mudou de cor e cerca de 60% dos dados utilizados em ambos os estudos não tem qualidade o suficiente para se fazer conclusões a respeito da variabilidade espacial das condições vegetação dessa região.

Como já apresentado alguns dos principais sensores que produzem produtos globais de NDVI apresentam uma série de possíveis fontes de erro devido a limitações técnicas, além destas já citadas existem também algumas restrições conceituais deste índice. O NDVI é sujeito a saturar em situações em que ocorre altos valores de Índices de Área Foliar (IAF), visto que sua metodologia de cálculo é simplificada e só considera as bandas do vermelho e infravermelho próximo. Isso significa que depois de certo patamar o NDVI deixa de acompanhar o crescimento do IAF. Além disso o NDVI pode sofrer interferências devido a cor do solo e a presença de água tanto no dossel da vegetação bem como no próprio solo.

As vantagens quanto as aplicações deste índice residem principalmente na sua disponibilidade espaço-temporal, facilidade de processamento e obtenção dos dados. Jensen (2009) ainda coloca que o NDVI é útil para o acompanhamento da variabilidade sazonal do

ciclo de vida da vegetação e na redução de fontes de ruídos provocados pelas sombras de nuvens e efeitos topográficos.

5.1.3 – Umidade do Solo

A umidade do solo é uma variável hidrológica importante para o monitoramento e caracterização de eventos de seca. O déficit de precipitação prolongado passa a influenciar a umidade do solo causando um estresse hídrico na vegetação (Figura 2.2). Atualmente existem diversos métodos de determinação da umidade do solo. A primeira metodologia e também a mais simplificada consiste em determinar a quantidade de água presente em uma amostra de solo através do cálculo da diferença entre o peso úmido e o peso seco. Este tipo de abordagem apesar de preciso pode necessitar 24 horas ou mais para se obter o resultado, além da necessidade de equipamentos de laboratório. A umidade do solo também pode ser determinada de forma instantânea através do uso de sensores chamados de tensiômetros. Estes são capazes de mensurar o potencial mátrico do solo, ou seja, medem a tensão com que a água está retida pelas partículas do solo e dessa forma é possível associar isso a quantidade de água presente naquele local da instalação do equipamento.

Estes métodos de medição da umidade do solo em campo de forma geral são dispendiosos, a consequência disso é que muitas regiões não dispõem de estações de coleta de dados para essa variável. Uma alternativa para esses casos são os modelos hidrológicos ou de superfície como os já citados e produtos de sensoriamento remoto tais como dos sensores *Soil Moisture Active Passive* (SMAP), *European Remote Sensing* (ERS), *Advanced Microwave Scanning Radiometer* (AMSR-E) e *Soil Moisture and Ocean Salinity* (SMOS). Os produtos derivados destas missões apresentam a vantagem de serem disponíveis para todo globo, contudo a extensão temporal limitada da série histórica inviabiliza o estudo de eventos hidrológicos mais antigos. Esta limitação temporal pode ser superada através da utilização de modelos hidrológicos e de superfície.

Alguns índices de seca que utilizam a umidade de solo como dado de entrada foram desenvolvidos nos últimos anos. Bergman et al. (1988) apresentaram o Índice de Anomalia da Umidade do Solo (SMA) com objetivo de ser uma alternativa ao uso do ISP. Naumann et al., (2014) utilizaram este índice para monitorar secas no continente africano, neste estudo foi comparado o desempenho deste índice com o SPI e SPEI. A umidade do solo foi simulada utilizando-se o modelo de reanálise atmosférica global ERA-I com resolução espacial de $0,7^\circ \times 0,7^\circ$ e com série histórica se estendendo de 1979 até 2014. Um estudo semelhante foi

apresentado por Spennemann et al. (2014) que utilizaram a anomalia da umidade do solo obtida pelo GLDAS para bacia do rio da Prata na América do Sul.

Marx et al. (2016) apresentam a metodologia utilizada no sistema de monitoramento de seca da Alemanha, este é baseado unicamente no acompanhamento da umidade do solo, visando a produção de informações mais relevantes para o setor de produção agrícola. Este sistema utiliza o modelo hidrológico de grande escala mHm50 que é alimentado diariamente com informações climatológicas e meteorológicas para a produção das informações referentes a umidade do solo. O índice de seca utilizado pelo sistema de monitoramento da Alemanha é o Índice de Umidade do Solo (SMI) que é calculado com base na determinação dos percentis da série dessa variável.

5.1.4 – Armazenamento de água

A variação do armazenamento de água na superfície terrestre é um indicativo importante para estudos de secas principalmente quando se pretende analisar o impacto que esse tipo evento gera em aquíferos ou corpos d'água superficiais. Este tipo de informação no geral é obtida através de estações fluviométricas, níveis de lagos e aquíferos, contudo postos de observação para essas variáveis são escassos, principalmente em regiões como a América do Sul. Uma solução para este problema são os modelos hidrológicos ou uso de produtos de sensoriamento remoto.

Os Índices de Seca que mais se aproximam de abordar este tipo de informação são aqueles que utilizam vazão de rios como dados de entrada, a exemplo disso pode-se citar o Índice de Vazão Padronizado (SSFI) proposto por Modarres (2007) que corresponde a conversão dos dados de entrada para a variável reduzida da distribuição normal e o Índice de Seca de Vazão (SDI) que foi apresentado por Nalbantis e Tsakiris, (2008) e tem uma metodologia semelhante ao SSFI com a diferença que utiliza a vazão acumulada anual como dado de entrada.

Atualmente existe a missão espacial GRACE que tem o objetivo de medir variações no campo gravitacional da Terra e associar isso a variação de armazenamento terrestre de água, dessa forma os produtos destes satélites podem ser utilizados para servir de base para cálculo de índices de seca. Uma forma simples de converter a informação do GRACE em um índice de seca é a retirada da sazonalidade da série de dados, para isso convertendo esta série para a forma de anomalia, como foi feito por Long et al., (2013) e Zhang et al., (2015).

Outra missão espacial que futuramente produzirá produtos relevantes quanto ao monitoramento de corpos d'água é o *Surface Water and Ocean Topography* (SWOT) que fará

estimativas de níveis de água, armazenamentos e vazão em grandes rios via sensoriamento remoto (Biancamaria et al., 2016). No item 3.5 foram apresentados alguns estudos já realizados em que os produtos GRACE foram aplicados para a análise de secas, para o presente estudo estes dados serão abordados na forma de anomalia como será apresentado no item 6.3.4.

5.2 – Sistemas de Monitoramento de Secas

O conhecimento a respeito da intensidade, duração e extensão espacial de eventos de seca é de grande relevância para o desenvolvimento de medidas mitigação dos impactos gerados por estas. Também pode ser utilizado para um melhor planejamento econômico e social, principalmente para as regiões mais vulneráveis em que as secas ocorrem com mais frequência e geram impactos mais severos (Pozzi et al., 2013; Svoboda et al., 2002).

Atualmente existem alguns sistemas de monitoramento de seca que foram implementados com sucesso e estão bem consolidados para as regiões as quais estes foram direcionados, podendo-se citar: *United States Drought Monitor* (USDM) (Svoboda et al., 2002); *North American Drought Monitor* (NADM) (Lawrimore et al., 2002); *European Drought Monitor* (EDO) (Niemeyer et al., 2009); *African Flood and Drought Monitor* (AFDM) e *Latin America Flood and Drought Monitor* (LAFDM) (Sheffield et al., 2014); *German Drought Monitor* (GDM) (Marx et al., 2015); Monitor de Secas da ANA para o nordeste brasileiro (De NYS et al., 2016).

Dentre os sistemas de monitoramento de secas apresentados o mais antigo e com maior conjunto de informação é o USDM. Este foi criado em 1999 a partir de uma parceria firmada entre o NOAA, o Departamento de Agricultura norte americano, o *National Drought Mitigation Center* (NDMC) sediado na Universidade de Nebraska-Licoln (Svoboda et al., 2002). O USDM divulga informações a cada duas semanas na forma de mapas e relatórios em que as regiões que estão sendo atingidas por eventos de seca são identificadas e categorizadas conforme a severidade deste desastre. A identificação e categorização das secas é feita através do uso de seis índices de seca (e.g., SPI; ISP; *Vegetation Health Index* (VHI); Percentil da precipitação, umidade do solo e vazão) (Svoboda et al., 2002).

O EDO utiliza uma variedade de indicadores de seca que são espacialmente distribuídos baseados em sensoriamento remoto e simulações hidrológicas, estes garantem uma compreensão espaço-temporal do surgimento de eventos de seca. Este sistema monitora principalmente secas meteorológicas e agrícolas (Hannaford et al., 2011), para isso são aplicados basicamente três índices de seca que são o Índice de produtividade da vegetação (fAPAR), SPI e SMA (Jager et al., 2015).

O Monitor de Seca da ANA surgiu como necessidade de resposta ao grande evento de seca que atingiu toda a região Nordeste no ano de 2012. Este sistema fornece informações mensais na forma de mapas com categorização de secas, semelhante ao produto final obtido pelo USDM. No Monitor de Seca da ANA as categorizações são feitas considerando o SPI, SPEI, Índice Padronizado de Escoamento e Indicador Padronizado de Veranicos. Os dados utilizados para alimentar este sistema são provenientes de instituições nacionais e internacionais tais como: Produtos de precipitação acumulada do Instituto Nacional de Meteorologia (INMET), satélite TRMM e CPTEC; Produtos de Umidade do Solo do CPC/NOAA; Índice de Saúde da Vegetação (VHI) do NOAA, entre outros (DE NYS et al., 2016). Um diferencial interessante que este sistema apresenta é que na metodologia de elaboração dos mapas de seca são consideradas as observações feitas por colaboradores populares espalhados ao longo da região Nordeste, com o objetivo de introduzir um certo grau de validação dos índices utilizados.

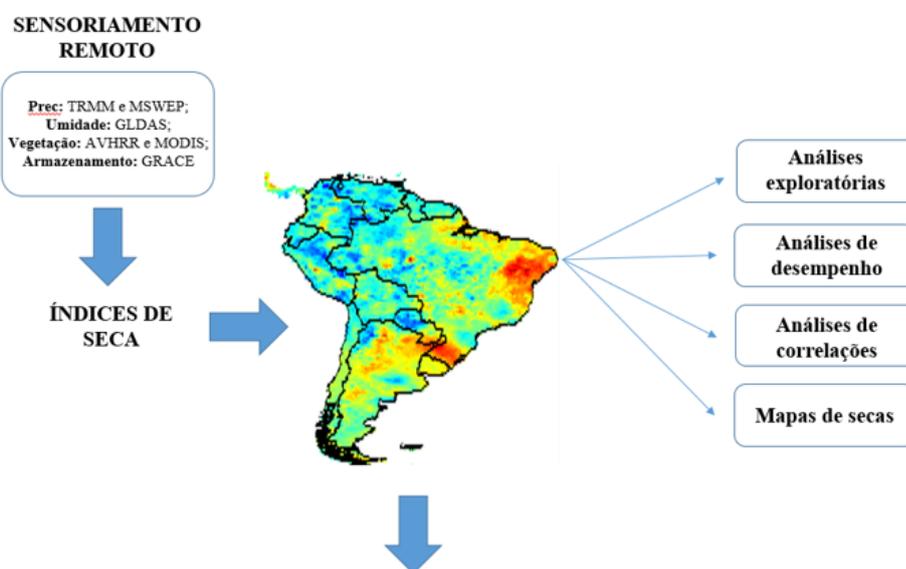
O AFDM e o LAFDM foram desenvolvidos pela Universidade de Princeton nos EUA em parceria com a UNESCO e fazem o monitoramento de algumas variáveis hidrológicas com o uso de índices tais como: SPI para 1,3,6 e 12 meses derivado de dados meteorológicos; Percentil de vazões simuladas pelo modelo hidrológico VIC; Percentil do NDVI para uma média móvel de 30 dias (Sheffield et al., 2014). É importante ressaltar que estes dois sistemas não combinam os dados a fim de se gerar mapas categorizados de seca como os sistemas já apresentados. A ausência deste tipo de informação dificulta a interpretação dos mapas disponibilizados sendo necessário que os usuários tenham um conhecimento prévio sobre índices de seca.

A validação de metodologias de monitoramento de seca nem sempre são fáceis de serem aplicadas, principalmente pela dificuldade que existe na identificação do momento exato do início e término de um evento de seca. Uma maneira prática de se fazer isso é escolher eventos de seca com notoriedade bem definida que tenham causado impactos significativos a determinada região e a partir disso analisar como os índices de seca variaram neste período. Este tipo de metodologia foi utilizado nos trabalhos apresentados por Sheffield et al. (2014) referente ao AFDM, por Sepulcre et al., (2012) referente ao EDO e Marx et al. (2015) referente ao GDM. Este tipo de validação também foi aplicado em outros estudos como os de Hao et al., (2015), Naumann et al. (2014) e Morid et al., (2006) que aplicaram esta metodologia para estudos de secas respectivamente na China, África, Irã. Ainda assim faltam metodologias mais completas que avaliem os índices de seca em larga escala de forma sistêmica e quantitativa.

CAPÍTULO 6 – METODOLOGIA

Este capítulo apresenta a metodologia que foi utilizada para responder os questionamentos científicos citados anteriormente. Foi adotada a hipótese básica de que é possível identificar secas na América do Sul utilizando os principais índices de seca encontrados na literatura e que é possível determinar aqueles que se enquadram melhor para detectar e descrever este tipo de fenômeno para região estudada com base em registros de seca. Também partiu-se do princípio que é possível combinar estes índices de seca a fim de se criar uma metodologia de monitoramento mais eficiente e precisa. A metodologia foi dividida basicamente nas seguintes etapas e tem seu resumo apresentado na figura 6.1 .

- Apresentação dos dados utilizados;
- Caracterização da área de estudo;
- Metodologia de cálculo dos índices de seca;
- Análises exploratórias dos índices;
- Análises de desempenho;
- Análises de correlação temporal;
- Geração de mapas de seca;



1. Quais os melhores índices para identificação de secas ocorridas na América do Sul?
2. Como combinar os índices de seca a fim de se aprimorar a identificação e monitoramento das secas ocorridas na América do Sul?
3. Existe alguma relação entre os índices de seca analisados que permitam aprimorar o entendimento sobre as secas ocorridas na América do Sul?

Figura 6.1 - Fluxograma do resumo da metodologia utilizada.

Foram avaliados diversos produtos de sensoriamento remoto, modelos de superfície (GLDAS) e reanálises climáticas (MSWEP). A caracterização da área de estudada apresenta informações mais gerais relacionadas a América do Sul, detalhando informações a respeito dos regimes de precipitação, climas, cobertura da superfície terrestre e hidrografia.

Os cálculos e categorizações dos índices de seca foram feitos conforme as metodologias encontradas na literatura e estes tiveram como dados de entrada apenas as informações de sensoriamento remoto e/ou provenientes de modelos de superfície (GLDAS) e reanálises climáticas (MSWEP).

Através de análises exploratórias dos índices de seca, avaliou-se qualitativamente se existe alguma relação entre o comportamento dos índices utilizados e se estes estão de acordo com os registros históricos de seca. Para isso foram escolhidas regiões que tiveram um grande número de registros de seca e/ou foram atingidas por eventos significativos deste tipo. Nestas análises exploratórias também foram comparadas as características básicas relacionadas aos eventos de seca que incluem, intensidade, duração e severidade seguindo metodologias consolidadas na literatura. Estas análises foram feitas a fim de comparar eventos de seca que ocorreram tanto em épocas e regiões diferentes, uma vez que a aplicação de índices de secas permite este tipo de análise.

As análises de correlação foram realizadas visando identificar relações e semelhanças entre os índices de seca que foram utilizados, com o objetivo de se aprimorar o entendimento sobre este tipo de fenômeno. Os mapas de seca foram criados combinando as informações dos índices utilizados de forma qualitativa e categórica.

6.1- Apresentação dos dados utilizados

Os produtos que foram utilizados para o cálculo dos índices de seca apresentados anteriormente podem ser divididos em quatro categorias (Tabela 2), das quais: Produtos de precipitação (3B43-TRMM e MSWEP); Produto de vegetação (NDVI GIMMS e MOD13C2); Produto de umidade do solo (GLDAS); Produto variação do armazenamento terrestre de água (GRACE GRCTellus).

Dentre os produtos de precipitação disponíveis atualmente o 3B43 da missão TRMM foi escolhido devido ao fato deste já ter sido utilizado extensivamente em estudos anteriores, como os apresentados no item 3.2. Além disso este produto oferece uma série histórica relativamente extensa, quando comparado a média de disponibilidade temporal dos produtos de sensoriamento remoto citados anteriormente. O MSWEP utiliza em sua elaboração produtos de precipitação por satélite (e.g., TRMM) e reanálises climáticas e foi validado com um grande

número de informações de postos pluviométricos (Beck et al., 2016). Este produto traz a vantagem de ter uma extensa série temporal (1979-2014) fazendo com que seja uma boa fonte de informações relacionadas a precipitação, sendo estes os principais motivos pelo qual este produto foi utilizado.

Apesar de não ter sido citado anteriormente existem vários outros índices que poderiam ser utilizados para representar a variabilidade da vegetação (eg. NDWI, SWIR, EVI, SAVI, etc.). Os principais motivos pelos quais os produtos GIMMS NDVI e MOD13C2 foram escolhidos para tal aplicação foi devido ao fato destes apresentarem uma boa resolução espaço-temporal, serem de fácil acesso e também por exigirem um baixo esforço computacional em seu processamento.

Tabela 02– Produtos de sensoriamento remoto e de modelos utilizados

Produto	Principal Satélite	Fonte	Resol. Espacial	Resol. Temporal	Série Histórica	Índices de Seca	Informação Principal
3B43 ^a	TRMM	NASA	~25km	Mensal	1998-2016	SPI	Precipitação
MSWEP ^b	-	GLOH2O	~25km	Mensal	1979-2014	SPI	Precipitação
MOD13C2 ^c	Terra	NASA	~5km	Mensal	2000-2016	SVI	NDVI
NDVI GIMMS ^d	NOAA-7	NOAA	~8km	Mensal	1982-2013	SVI	NDVI
GRCTellus ^e	GRACE	NASA	~110km	Mensal	2002-2016	ATWS	Armazenamento terrestre de Água
GLDAS ^f	-	NOAA	~25km	Mensal	1979-2016	SMA	Umidade do Solo na zona da raiz

a* <https://pmm.nasa.gov/data-access/downloads/trmm>;

b* <http://www.gloh2o.org/> ;

c* <https://modis.gsfc.nasa.gov/data/dataproduct/mod13.php>;

d* <https://disc.sci.gsfc.nasa.gov/services/grads-gds/gldas>;

e* <https://glam1.gsfc.nasa.gov/> ;

<https://grace.jpl.nasa.gov/>

O produto GRACE foi utilizado neste estudo devido a sua capacidade de apresentar em escala global informações referentes a variações do armazenamento terrestre de água na em coluna vertical. Dessa forma este conjunto de dados pode ser uma alternativa a necessidade dados de vazão ou níveis de reservatórios para se estudar secas hidrológicas, visto que para muitas regiões da América do Sul existe uma dificuldade de se obter informações deste tipo.

Os dados foram divididos em dois grupos, o primeiro deles aparece no texto como “série extensa” e corresponde aos produtos que abrangem um período mais prolongado que é o caso do produto de precipitação do MSWEP, produto de umidade do solo do GLDAS e o produto de vegetação do NDVI GIMMS. Este conjunto de dados apresenta informações para o período de janeiro de 1982 até dezembro de 2013 e foi utilizado na primeira e segunda parte das análises

exploratórias. O segundo grupo aparece no texto como “série reduzida” que corresponde aos produtos que disponibilizam informações mais recentes e é formado pelo produto de precipitação do TRMM 3B43, produto de umidade do solo do GLDAS, produto de NDVI MODIS MOD13C2 e o de variação do armazenamento terrestre de água GRCTellus. Este segundo conjunto de dados apresenta informações para o período de janeiro de 2003 até outubro de 2016 e foi utilizado na segunda parte da análise exploratória dos índices de seca, na análise de desempenho, análise de correlação e geração dos mapas de seca.

É importante ressaltar que existem diversos outros tipos de produto de sensoriamento remoto relacionados as mesmas variáveis que foram consideradas neste estudo. É possível que a utilização de outros conjuntos de dados origine resultados diferentes, mas que possivelmente se alcançaria as mesmas conclusões.

6.2 – Caracterização da área de estudo

A América do Sul ocupa cerca de 12 % da superfície terrestre global e se estende por 12 países, ilhas autônomas e territórios ultramarinos da França e Inglaterra. Por abrigar a floresta amazônica, diversas reservas de floresta atlântica e outros grandes biomas apresenta uma importância fundamental na manutenção do clima global e nas interações do ciclo do carbono. Este subcontinente depende diretamente do uso e manejo dos recursos hídricos para suas atividades econômicas, visto que os principais produtos de exportação desta região serem commodities agropecuárias.

A seguir são apresentadas algumas características da América do Sul que foram pertinentes para um melhor entendimento das secas ocorridas nesta região e conseqüentemente melhor interpretação das informações que foram obtidas com a metodologia proposta para o presente estudo.

6.2.1– Regimes de precipitação

Visto que a grande maioria dos eventos de seca ocorrem inicialmente devido a um déficit de precipitação, é importante que haja uma caracterização das chuvas que ocorrem na área de estudo. Reboita, et al. (2010) apresenta um estudo detalhado sobre os regimes e a distribuição espacial da precipitação na América do Sul em que esta região foi dividida em função na tabela 3.

6.2.2 –Uso do solo e regiões climáticas

Uma caracterização mais detalhada dos tipos de cobertura da superfície terrestre pode ser obtida por reclassificação de imagens de satélites, sendo assim foi utilizado para isso o produto MODIS MCD12Q2 que proporciona em nível global uma classificação em 16 tipos de cobertura da superfície com resolução espacial de 5km por pixel. Esta informação é apresentada na figura 6.2A.

A América do Sul apresenta uma grande heterogeneidade climática em que se pode encontrar climas temperados, tropicais, subtropicais, áridos, semiáridos, etc. Esta diversidade de climas pode ser vista no mapa global atualizado de classificação climática de Koppen-Geiger apresentado por Rubel e Kottek, (2010) que é apresentado na figura 6.3B.

A distribuição dos biomas e tipo de cobertura vegetal da América do Sul sofre influência das zonas climáticas, sendo comum a ocorrência de florestas mais densas nas zonas de clima quente e úmido, principalmente nas latitudes mais baixas em decorrência da maior incidência solar como pode ser observado na Figura 6.2.

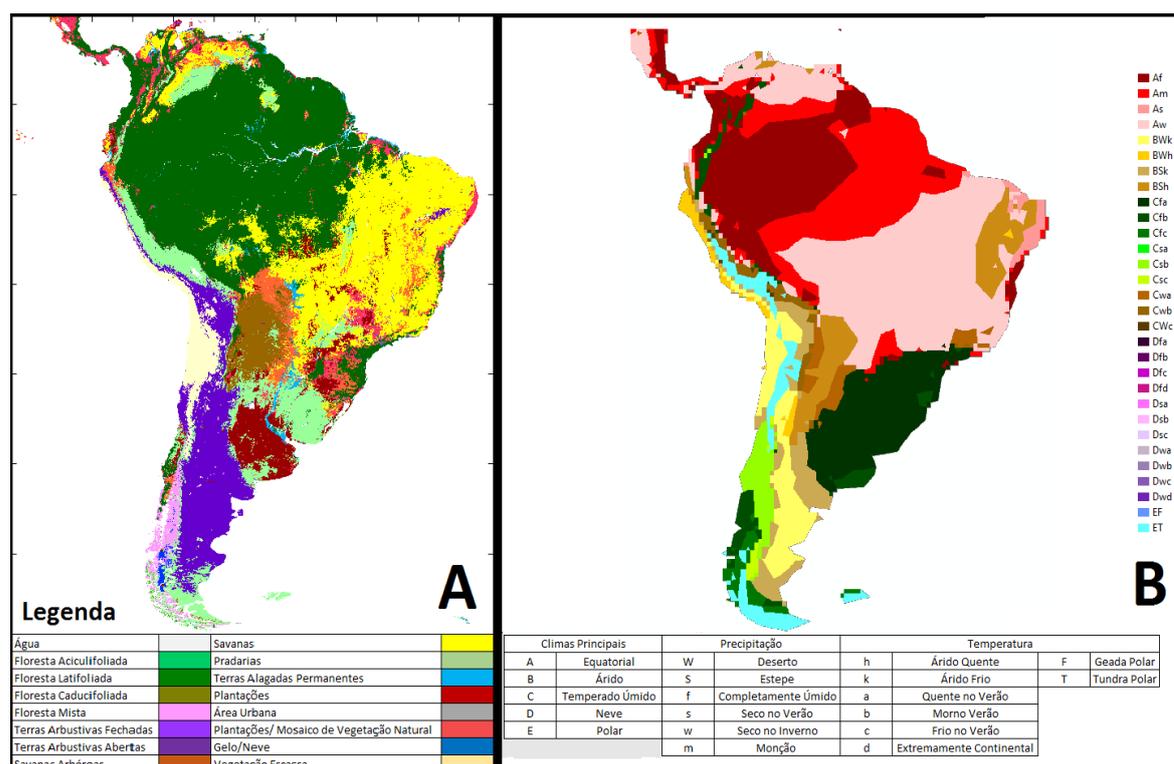


Figura 6.2 –A: Classificação da cobertura da superfície; B: classificação climática de Koppen-Geiger, fonte: Rubel e Kottek, (2010) adaptado.

Analisando a Tabela 3 e a Figura 6.2 pode-se perceber que a América do Sul apresenta grande variabilidade climática em que é possível encontrar grande parte das categorizações de Koppen-Geiger (Rubel e Kottek, 2010). Essa diversidade de climática faz com seja comum encontrar regiões com regimes de precipitação completamente distintos tanto em níveis

máximos de pluviometria como em relação a distribuição das chuvas ao longo do ano. Associado a essas características pode-se perceber também que ocorre na América do Sul uma grande variedade de biomas. Tudo isso dificulta um estudo mais detalhado a respeito dos eventos de seca que ocorrem na América do Sul, eventualmente sendo necessário a elaboração de análises mais gerais, devido a complexidade desta região.

Tabela 03– Regimes de Precipitação

Localização	Característica do Ciclo Anual de Precipitação
Norte do Chile; Noroeste e Centro-Sul da Argentina	A precipitação homogênea ao longo do ano e com baixo total anual (inferior a 350 mm/ano). No deserto do Atacama, norte do Chile, a precipitação é inferior a 100 mm/ano.
Oeste do Peru; Oeste e Sul da Bolívia; Norte; Centro-leste da Argentina e Centro-Norte do Paraguai	Máximos de precipitação no verão e mínimos no inverno. O total anual varia entre 350 e 700 mm, exceto no centro-leste da Argentina e Paraguai que varia entre 700 e 1400 mm.
Sul do Brasil; Sul do Paraguai; Uruguai	A precipitação é praticamente homogênea ao longo do ano. O total anual é elevado (1050-1750 mm/ano) sendo ainda maior no oeste do sul do Brasil na fronteira com o Paraguai (1750-2100 mm/ano).
Noroeste à Sudeste do Brasil; Equador e Norte do Peru	Máximos de precipitação no verão e mínimos no inverno. O total anual de precipitação no setor norte é superior a ~2450 mm, já no centro-oeste e sudeste é de ~1500 mm.
Norte da Região Norte do Brasil e Litoral do Nordeste do Brasil	Máximos de precipitação no 1º semestre do ano. No norte da região norte do Brasil o total anual é de 2000 mm, enquanto no litoral do nordeste do Brasil é de 1500 mm
Sertão do Nordeste do Brasil	Máximos de precipitação no verão e mínimos no inverno, mas os totais são reduzidos (entre 200 e 500 mm/ano).
Norte da América do Sul	A precipitação ao longo do ano todo, mas com maiores totais no inverno. O total anual é superior a 1500 mm.

Fonte: Reboita, et al. (2010)

6.2.3 – Hidrografia

A hidrografia da América do Sul possui um papel fundamental no ciclo hidrológico global, considerando que este subcontinente abriga as maiores bacias hidrográficas e aquíferos do mundo, sendo responsável por cerca de 30% da água doce que chega aos oceanos (Berner e Berner, 2012). As principais bacias hidrográficas desta região são as dos rios Amazonas, Orinoco, Paraguai, Paraná, Uruguai e São Francisco que apresentam grande importância para sociedade seja na geração de energia elétrica, transporte hidroviário ou abastecimento urbano e rural.

6.3 – Cálculo dos Índices de Seca

Nos capítulos anteriores de revisão bibliográfica foram apresentados índices de seca utilizados para monitorar diferentes tipos de variáveis hidrológicas. Para o presente estudo foram utilizados quatro índices de seca diferentes, cada um considera uma variável distinta, sendo eles: SPI; SMA, SVI e ATWS.

Partes destes índices são utilizados pelos sistemas monitores de seca apresentados no item 5.2, a exemplo do SPI que é utilizado no USDM, NADM, EDO, AFDM, LAFDM, Monitor de Secas da ANA e o SMA é utilizado no EDO (Svoboda et al., 2002; Sheffield et al., 2014; Niemeyer et al., 2009; Vogt et al., 2011; Marx et al., 2015; Lawrimore et al., 2002). Os demais índices foram escolhidos para serem utilizados devido sua boa representatividade do comportamento de variáveis hidrológicas pertinentes no estudo de secas e pela praticidade da metodologia de cálculo.

Todos os índices foram calculados nas escalas temporais de 3, 6 e 12 meses com uma acumulação móvel para a variável de precipitação e com média móvel para umidade do solo, TWS e NDVI.

6.3.1 – SPI

A metodologia de cálculo do SPI que foi utilizada neste estudo é a mesma proposta por McKee et al. (1993). Os autores mostraram que os dados de precipitação se enquadram bem na função de distribuição de probabilidade gama, sendo assim inicialmente calcula-se as probabilidades de cada valor dentro da série de dados utilizando-se a equação 01 que corresponde a distribuição citada.

$$G(x) = \frac{1}{\beta^\alpha \tau(\alpha)} \int_0^x x^{\alpha-1} e^{-x/\beta} dx \quad \text{eq.01}$$

Em que $\tau(\alpha)$ corresponde a função gama, α e β representam respectivamente os parâmetros de forma e escala e x é o valor da precipitação. É muito comum para algumas escalas de tempo a ocorrência de precipitação acumulada sendo igual a zero principalmente para regiões mais áridas ou para secas prolongadas. A distribuição gama não é definida para valores iguais a zero, dessa forma é necessário corrigir a função $G(x)$ em relação ao número de valores zeros dentro da série de dados. Esta correção é apresentada na equação 02 e foi feita calculando o termo “q”, que é definido como sendo o número de zeros dividido pela quantidade total de dados, ou seja, é probabilidade de ocorrência de um valor zero calculado a partir da frequência de observações zero.

$$H(X) = q + (1 - q)G(x) \quad \text{eq.02}$$

Em que “q” é a probabilidade de um valor de precipitação igual a zero. Em seguida a função de densidade de probabilidade cumulativa $H(x)$ foi convertida em uma distribuição normal padronizada pelas equações a seguir como apresentado por Mckee et al. (1993).

Para $0 < H(x) \leq 0,5$:

$$SPI = -\left(t - \frac{c_0 + c_1 t + c_2 t^2}{1 + d_1 t + d_2 t^2 + d_3 t^3}\right) \quad \text{eq.03}$$

$$t = \sqrt{\ln\left(\frac{1}{H(x)^2}\right)} \quad \text{eq.04}$$

Para $0,5 < H(x) \leq 1$:

$$SPI = \left(t - \frac{c_0 + c_1 t + c_2 t^2}{1 + d_1 t + d_2 t^2 + d_3 t^3}\right) \quad \text{eq.05}$$

$$t = \sqrt{\ln\left(\frac{1}{(1-H(x))^2}\right)} \quad \text{eq.06}$$

Em que: $c_0 = 2,515517$; $c_1 = 0,802853$; $c_2 = 0,010328$; $d_1 = 1,432788$; $d_2 = 0,189269$; $d_3 = 0,001308$. A categorização dos valores do SPI segue na tabela 4 e é mesma apresentada por Mckee et al. (1993) no trabalho em que os autores propuseram pela primeira vez este índice.

Tabela 4 – Categorização do SPI

SPI	Categorização
$SPI \geq 2$	Extremamente úmido
$1,5 < SPI \leq 2$	Muito úmido
$1 < SPI \leq 1,5$	Moderadamente úmido
$-1 < SPI \leq 1$	Próximo do normal
$-1,5 < SPI \leq -1$	Seca moderada
$-2 < SPI \leq -1,5$	Seca severa
$SPI \leq -2$	Seca extrema

6.3.2 – Índices Padronizados

O SMA, SVI e ATWS são baseados no princípio da remoção do efeito da sazonalidade de suas respectivas séries de dados e conseqüentemente todos eles apresentam a mesma metodologia de cálculo que é introduzida pela equação 7.

$$IS_{jk} = \frac{V_{jk} - \bar{V}_j}{\sigma_j} \quad \text{eq.07}$$

Em que IS_{jk} é o índice de seca (e.g., SMA, SVI, ATWS) para o mês j e o ano k , V_{jk} é o valor da variável respectiva ao índice de seca em questão durante o mês j e o ano k , \bar{V}_j é a média dos valores o mês j em relação a todos os anos da série e σ_j é o desvio padrão dos valores dessa variável durante o mês j em relação a todos os anos da série.

6.4 – Análise exploratória dos índices de seca

A análise exploratória dos índices de seca foi dividida em duas partes com o objetivo de avaliar as características espaciais e temporais de cada índice. A primeira parte tem como objetivo analisar o comportamento espacial destes para um ano específico em que foram registrados eventos de seca intensos. O ano escolhido foi o de 2012 em que ocorreram secas na região Nordeste e Sul do Brasil, no norte da Argentina e no sul do Paraguai conforme as informações disponibilizadas pelo EM-DAT (EM-DAT, 2016).

Para esta abordagem todos os índices de seca utilizados foram plotados exibindo a América do Sul completa para o ano em questão. Apesar da simplicidade desta análise inicial é possível por meio dela avaliar qualitativamente diferentes aspectos do desempenho dos índices de seca e também analisar possíveis relações entre eles. Dessa forma pode-se identificar visualmente quais índices estão em concordância com os registros de seca do ano em questão, quais estão indicando mais falso alarme, se existe alguma relação de defasagem entre eles e a extensão espacial das secas que cada índice esteja indicando.

A segunda parte da análise exploratória consiste em avaliar a série extensa e reduzida dos índices utilizados para algumas regiões com um número consistente de registros de seca como é mostrado na figura 6.3. A informação de cada uma destas regiões foi extraída considerando uma mesma área e para cada produto foi calculado o valor médio da variável em questão, para só assim serem calculados os índices de seca. Esta abordagem permite se alcançar os mesmos resultados obtidos na primeira parte desta seção (com exceção da análise de extensão espacial), podendo ainda ser feita uma caracterização de cada evento de seca registrado.



Figura 6.3 - Regiões escolhidas para segunda parte da análise exploratória dos índices de seca.

A metodologia utilizada para identificação de um evento de seca seguiu os fundamentos propostos por McKee et al. (1993) em que se considera como evento de seca como o período em que o índice é continuamente negativo e alcança um valor igual ou inferior a -1. O evento de seca começa quando o índice fica abaixo de zero e termina quando o índice em questão alcança um valor positivo.

As características principais dos eventos de seca que foram considerados correspondem a duração, severidade e intensidade. Duração corresponde ao tempo total desde do início ao fim de determinado evento. A severidade de cada evento de seca foi calculada somando-se o valor em que o índice analisado alcança para cada intervalo de tempo dentro do evento de seca em questão. A intensidade corresponde ao valor mais extremo registrado para cada evento de seca. Também foi calculada a severidade média que consiste no resultado da divisão do valor da severidade pela duração do evento de seca. A figura 6.4 exemplifica a determinação destas características.

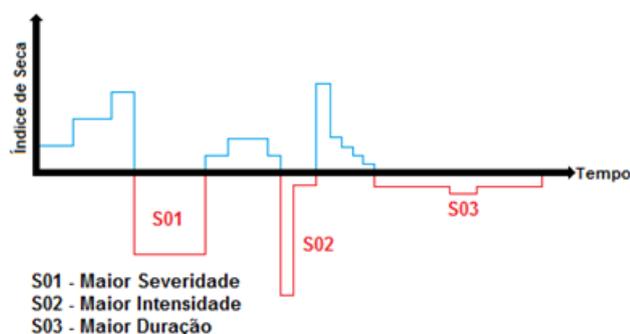


Figura 6.4 – Determinação das características de um evento de seca.

6.5 - Análise de desempenho

Devido à falta de uma metodologia consolidada na literatura científica para avaliação em larga escala do desempenho de índices secas, foram propostas duas métricas para resolução desta etapa. Estas partem de uma abordagem mais simplificada e são baseadas numa comparação entre os eventos de seca identificados pelos índices com os registros presente no banco de dados do EM-DAT. As métricas foram chamadas de Índices de Acerto Total (IAT) e Índice de Acerto Crítico (IAC) apresentados a seguir respectivamente nas equações 8 e 9.

$$IAT = \frac{\Sigma(SI|SR)}{\Sigma SR} \quad \text{eq.08}$$

$$IAC = \frac{\Sigma(SI|SR)}{\Sigma SI} \quad \text{eq.09}$$

Em que SI corresponde as secas identificadas pelo índice e SR as secas registradas, ou seja, o IAT avalia a razão entre o somatório de secas identificadas dado que houve registro de seca dividido pela quantidade total de secas registradas. O IAC é calculado da mesma forma sendo que o valor da parcela do divisor corresponde ao total de secas identificadas pelo índice em questão. Estas duas métricas variam entre 0 e 1 em que o ideal é que os resultados estejam mais próximos de 1. Ambas partem de uma abordagem mais concisa em que se considera apenas a capacidade dos índices em acertar as secas observadas, visto que não se tem certeza se foram registrados todos os eventos de secas para determinada região durante o período analisado.

O desempenho dos índices foi aferido apenas considerando a série reduzida, visto que o período referente a essa série abrange todos os índices utilizados neste estudo. Os registros de secas disponíveis trazem informações mais genéricas do ponto de vista espaço-temporal, ou seja, consideram apenas as divisões geopolíticas de cada país da América do Sul e o ano em que ocorreu o evento de seca. Dessa forma não são informados a região exata onde ocorreu o evento de seca ou a duração deste.

O desempenho foi aferido considerando uma análise pixel a pixel, visto que este tipo de abordagem permite identificar em que região específica dentro das divisões geopolíticas em que ocorre com mais frequência os eventos de seca. Além disso, as análises de desempenho foram feitas considerando apenas a escala anual, em que primeiramente a metodologia de identificação de secas proposta por McKee et al. (1993) apresentada anteriormente foi aplicada mês a mês. Considerou-se como um ano de seca quando determinado índice indica nesse mesmo ano pelo menos 4 dos meses consecutivos de seca. Não existe um consenso na literatura científica quanto ao tempo mínimo necessário para a consolidação de um evento de seca.

Alguns autores como Wilhite et al., (2014) afirmam que esse tempo é de 2 a 3 meses, mas para este estudo preferiu-se uma abordagem considerando-se 4 meses.

Visando identificar se existe algum ganho na combinação dos índices utilizados e assim responder o quarto questionamento científico apresentado anteriormente, foram propostas três abordagens para se considerar a junção das informações desses índices de seca. Na primeira tentativa C01 (acrônimo para “Combinação de Índice”) apenas foi considerado como seca o período em que todos os índices apontavam ao mesmo tempo como seca. Em seguida na tentativa C02 considerou-se como seca quando pelo menos um índice estava indicando como seca. Por fim na tentativa C03 utilizou-se o seguinte sistema de pesos no cálculo do IAT e IAC:

- Apenas SPI indicando seca ($SI|SR$) = 0,25 ;
- SPI e SMA indicando seca ($SI|SR$) = 0,50 ;
- SPI, SMA e SVI indicando seca ($SI|SR$) = 0,75 ;
- SPI e SMA, SVI e ATWS indicando seca ($SI|SR$) = 1 ;

No caso de ocorrer combinações diferentes das apresentadas, estas foram consideradas como ruído e entraram como zero no somatório. Como citado anteriormente os registros de seca utilizados nesta etapa foram obtidos do banco de dados do EM-DAT. O número total de registros disponíveis para cada região para o período de 2003 a 2015 é apresentado na Figura 6.5.

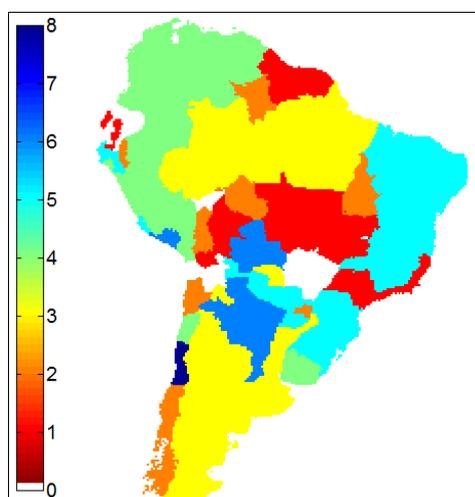


Figura 6.5 - Número total de registros de seca para o período de 2003 a 2016.

6.6 – Análises de correlação

Foi calculada a correlação de Spearman (r) entre todos os índices de seca impondo uma defasagem unitária consecutiva. Esta abordagem objetivou encontrar o atraso (“lag”) em que ocorre a correlação máxima entre os índices analisados. Esta informação é particularmente útil

para se analisar como a um evento de seca se propaga dentro de uma dada região, ou seja, quando uma seca meteorológica passa a ser agrícola ou hidrológica. Esta parte da metodologia foi aplicada para responder o terceiro questionamento científico proposto no item 1.3. A Figura 6.6 ilustra como foi conduzida esta parte da metodologia. Na equação 10 é apresentada fórmula simplificada da correlação de Spearman.

$$r = \frac{cov(X1,X2)}{\sqrt{var(X1) \times var(X2)}} \quad \text{eq.10}$$

Em que X1 e X2 correspondem aos índices de seca analisados, cov e var correspondem respectivamente a covariância e variância. Esta análise estatística foi feita pixel a pixel para todos os índices analisados.

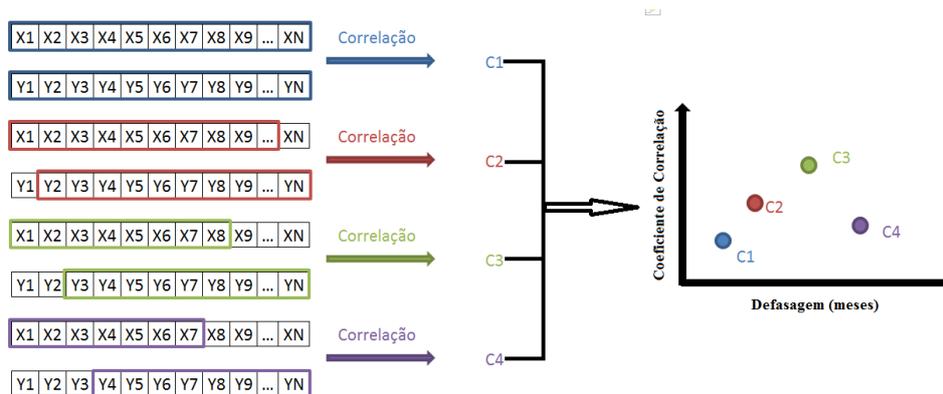


Figura 6.6 -Ilustração da metodologia de defasagem na correlação

“X” e “Y” representam dois índices de seca quaisquer e “C1” a “C4” correspondem ao coeficiente de correlação de Spearman entre estes dois índices para cada defasagem imposta. Para esta situação hipotética apresentada na figura anterior, a defasagem em que ocorre a correlação máxima seria para dois meses representada pelo “C3”. Visando equiparar as características dos índices estes foram ajustados para resolução espacial do produto TWS do satélite GRACE que tem pixel de aproximadamente 110 km x 110 km. A diminuição da resolução dos demais produtos gera de certa forma perda de informação, contudo geram um ganho no processamento computacional e podem facilitar a interpretação dos resultados obtidos. Foi testada a hipótese de não correlação frente a hipótese alternativa de correlação diferente de zero entre os índices aplicando-se um nível de significância de 95%. Foram omitidos os resultados finais entre essas correlações em que foi aceita a hipótese de não correlação entre os índices.

6.7 – Geração dos mapas de seca

A combinação dos índices de seca de forma qualitativa é útil em sistemas de monitoramento de seca como os citados anteriormente, uma vez que esse tipo de informação não apresenta números e sim cores associadas a uma categorização que indica os níveis de alerta quanto a seca. Para o presente estudo foi aplicada uma metodologia inspirada na utilizada pelo EDO e USDM. Os mapas de seca foram gerados seguindo uma abordagem de análise pixel a pixel em que a informação individual de cada índice de seca foi combinada seguindo o princípio básico de evolução de um evento deste tipo. Na tabela 5 é apresentado como foi feita a combinação dos índices de seca e a respectiva categorização utilizada.

Tabela 5 – Combinação dos índices de Seca

SPI	SMA	SVI	ATWS	Categorização
S	N	N	N	Alerta
S	S	N	N	Seca Moderada
S	S	S	N	Seca Severa
S	S	S	S	Seca Extrema
N	N	X	X	Em Recuperação

As marcações “S” representam que o índice em questão está indicando seca em função da metodologia apresentada no item 6.4 e as marcações “N” indicam o oposto disso. O resultado final desta etapa da metodologia foi a criação de mapas indicando a situação da América do Sul seguindo a categorização apresentada na tabela 5. Estes mapas ainda podem ser comparados e validados de forma visual com os registros de seca obtidos através do EM-DAT, como os apresentados na figura 2.2.

Capítulo 7 – RESULTADOS E DISCUSSÃO

7.1. Análise exploratória

Os resultados da análise exploratória espacial dos índices de seca para o ano de 2012 são apresentados nas Figuras 7.1 à 7.3. Como citado anteriormente, foram registrados alguns eventos intensos de seca nesse ano nas regiões do Nordeste e parte do Sul do Brasil, Argentina e Paraguai. Para estes dois países não se obteve informações da localização exata dos eventos de seca.

Pode-se perceber analisando as Figuras 7.1 a 7.3 que praticamente todos os índices foram capazes de identificar os eventos de seca nas regiões citadas acima. Como era esperado

houve uma evolução quase que consecutiva dos índices de seca, em que pôde-se notar evidências de defasagem entre os índices analisados. No geral o SPI foi o primeiro a identificar os eventos de seca, seguido pelo SMA, SVI e ATWS, esse efeito foi ficou mais evidente com a escala temporal de 12 meses e na região Nordeste do Brasil (Figura 7.3, seta azul).

Pela análise destas três figuras pode-se perceber que houve a identificação de um grande evento de seca que abrangeu os estados brasileiros de Santa Catarina e Rio Grande do Sul, a região norte da Argentina (províncias de Misiones, Corrientes, Chaco e Formosa) e toda região sul do Paraguai (Figura 7.3, seta vermelha). A vegetação no geral só apresentou resposta a este evento de seca na escala temporal de 3 meses (Figura 7.1, seta roxa), o que pode indicar que esta seca teve uma curta duração. Também houve a identificação de uma seca por todos os índices (com exceção do SMA) no Sul da Argentina (Figura 7.3, seta laranja), além da grande seca na região Nordeste do Brasil (Figura 7.3, seta azul). Assim as secas identificadas nas Figuras 7.1 a 7.3 estão de certa forma de acordo com os registros citados.

Um aspecto importante que pode ser constatado apenas analisando estas três figuras é que os índices quando calculados considerando uma escala de tempo menor (e.g., 3 ou 6 meses acumulados), tendem a indicar mais eventos de seca e estes com maior extensão espacial. Esse comportamento já era esperado visto que os índices tendem a se aproximar mais da distribuição normal quando a escala temporal se equipara ou excede a 12 meses. Isso faz com que a série do índice apresente uma forma menos ruidosa, como pode ser percebido nas Figuras 7.3 e 7.4. Percebe-se também que houve a identificação de secas que não constam nos registros históricos. Não é possível concluir se isso pode ser considerado como falha na metodologia de identificação de secas, se as autoridades dessas regiões afetadas não fizeram o devido registro do evento de seca em si ou ainda se essas regiões não tem uma baixa vulnerabilidade a esse tipo de desastre.

Nestas três figuras também fica notório a diferença no comportamento dos índices analisados. Apenas analisando esse ano em questão pode-se notar indícios de que o SPI e SMA estão bastante relacionados visto que apresentam uma variação espacial semelhante. Percebe-se também que o ATWS tem uma variação mais lenta e menos brusca que os demais índices. Esse comportamento já era esperado, visto que o armazenamento terrestre de água demora mais a ser afetado pelo déficit na precipitação e também no geral tem uma resposta mais lenta durante a fase de recuperação. Visualmente pode-se perceber que o SVI indicou melhor as secas ocorridas na Argentina, Paraguai e Sul do Brasil nas escalas de 3 e 6 meses, isso está relacionado com a própria duração deste evento em particular. O oposto a isso ocorre para o evento de seca ocorrido na região Nordeste do Brasil em que este foi identificado melhor com a escala de 12

meses, visto que se sabe que este evento foi de maior duração que os demais e se estendeu até o ano de 2016.

Nas Figuras 7.4 e 7.5 são apresentados a série histórica completa de cada índice das regiões apresentadas na Figura 6.5 para escala temporal de 3 e 12 meses. Os retângulos vermelhos presentes nessas figuras representam os períodos em que houveram registro de seca para a região em questão de acordo com as informações do banco de dados do EM-DAT.

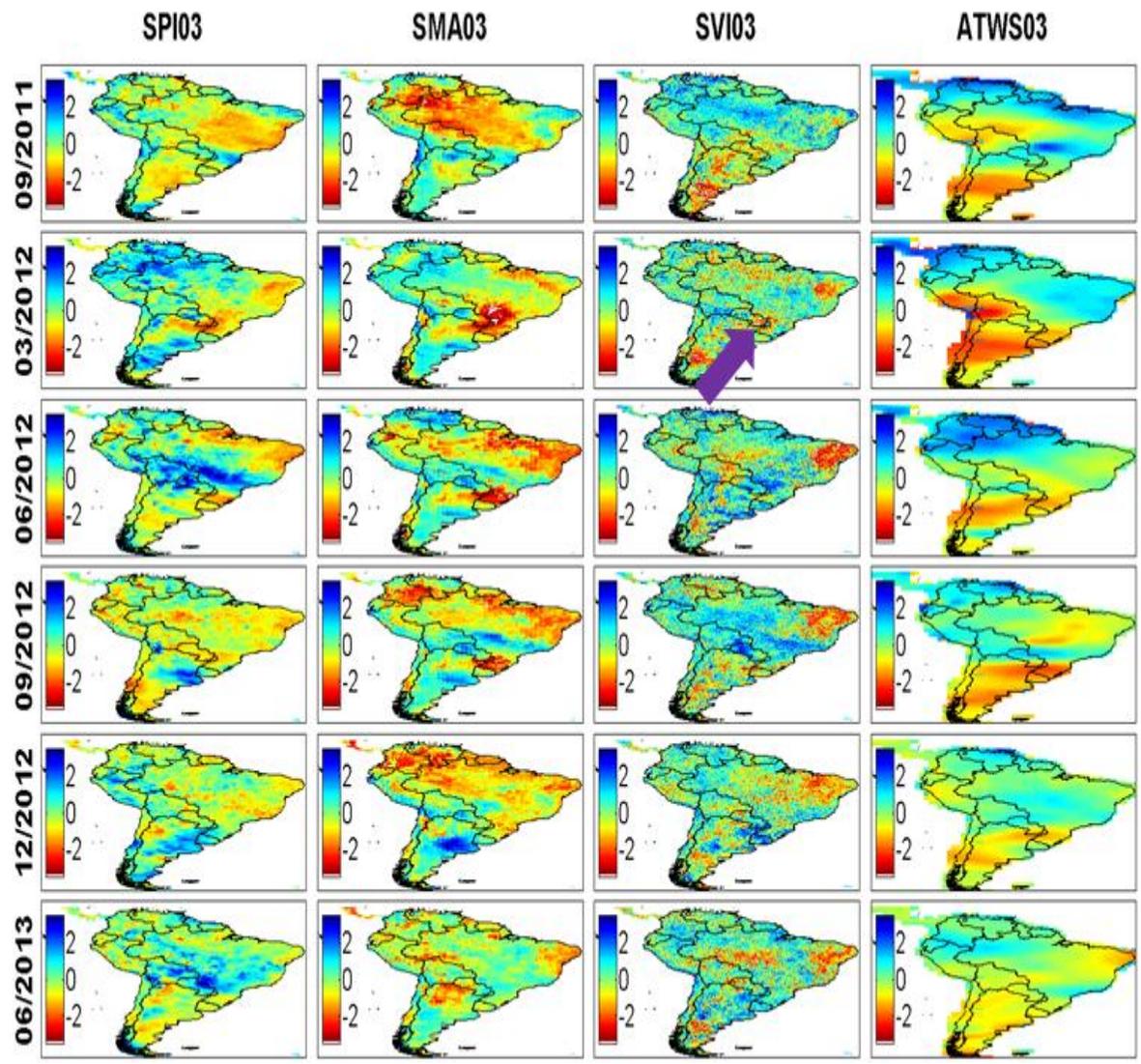


Figura 7.1 - Índices de seca com estala temporal de 3 meses na América do Sul para o ano de 2012

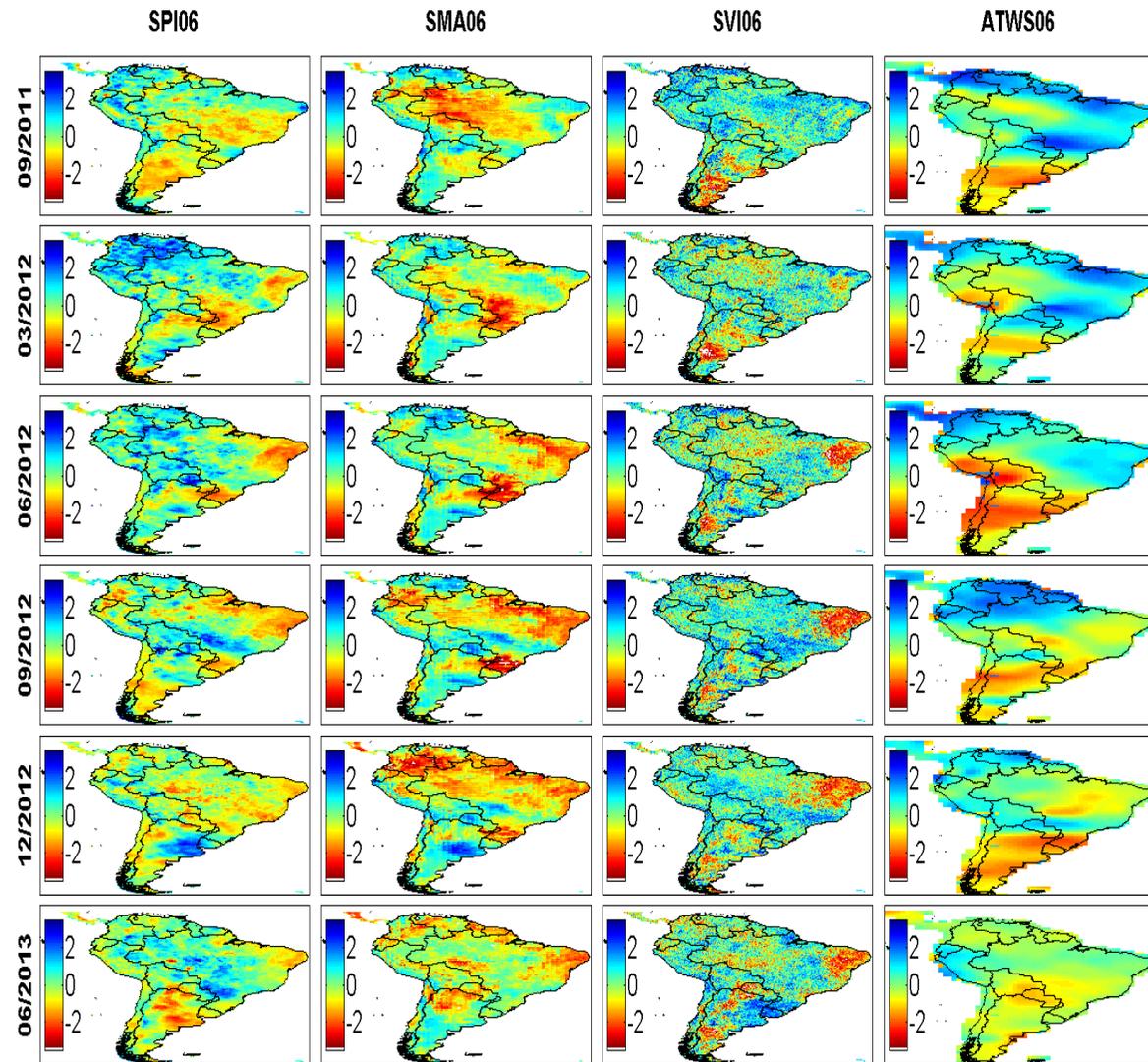


Figura 7.2 - Índices de seca com estala temporal de 6 meses na América do Sul para o ano de 2012

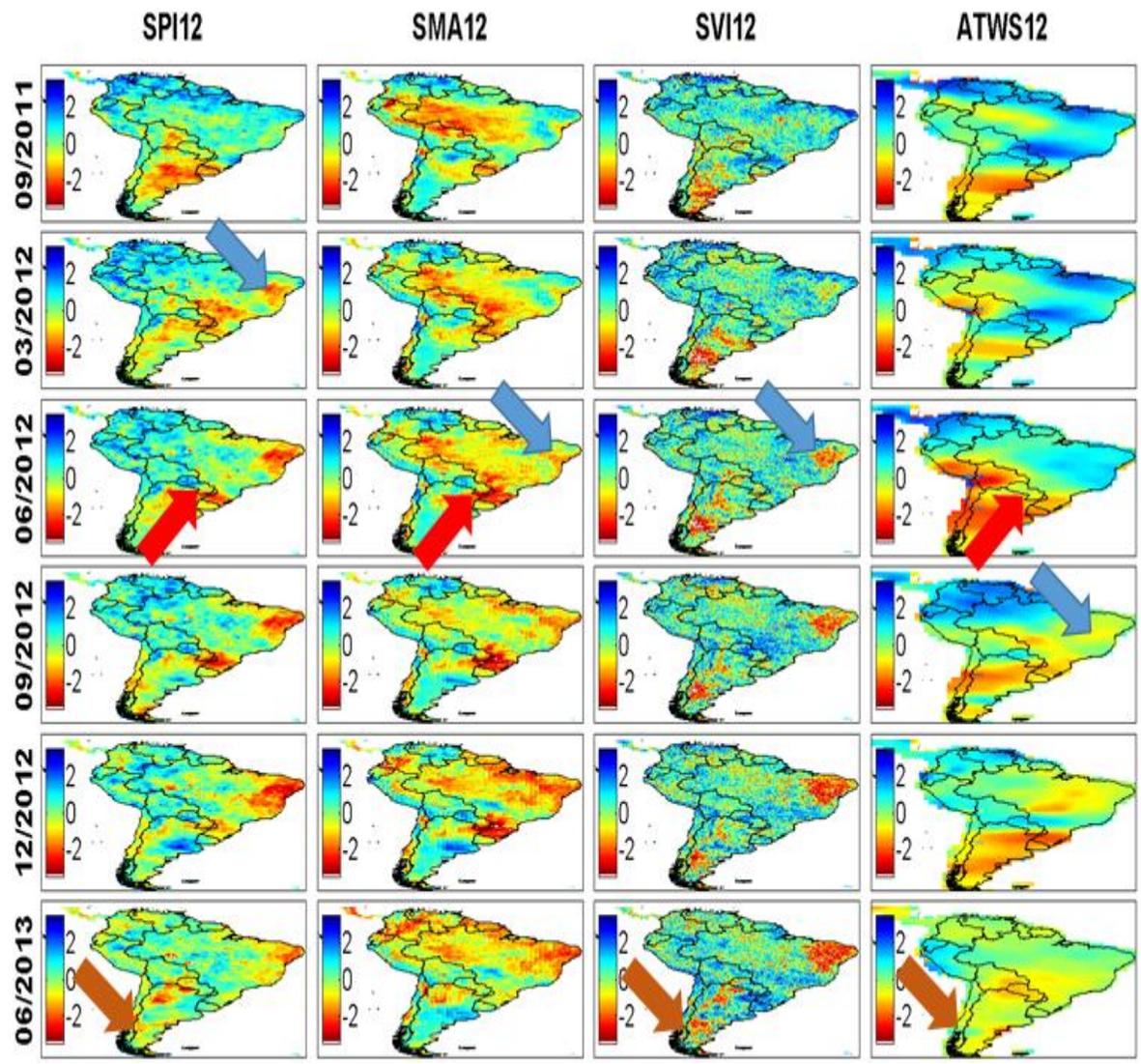


Figura 7.3 - Índices de seca com estala temporal de 12 meses na América do Sul para o ano de 2012

Analisando as Figuras 7.4 e 7.5, pode-se perceber primeiramente que o comportamento ruidoso dos índices com escala temporal de 3 meses dificulta a interpretação dos índices de seca e de suas relações, visto que estes passam a indicar a ocorrência de mais eventos de seca e estes com menor duração. Como citado anteriormente considera-se como seca quando o índice fica continuamente negativo e alcança o valor -1 e esse evento finaliza quando o índice analisado atinge um valor positivo.

Uma das principais considerações que podem ser feitas através das Figuras 7.4 e 7.5 é a respeito do efeito da defasagem entre os índices em que de uma forma geral o crescimento e decréscimo destes acompanharam de maneira quase que sequencial variação do SPI. Este efeito ficou bastante evidente nas séries reduzidas com escala de temporal de 12 meses dos períodos de 2012 a 2015 no Nordeste, 2011 a 2012 na região Sul e 2012 no Paraguai. Na série reduzida da região Nordeste e Sul do Brasil e Paraguai pode-se perceber uma boa relação entre o comportamento dos índices, em especial entre o SPI, SMA, ATWS.

Já era esperado que o SMA tivesse uma boa relação com SPI devido ao fato do GLDAS utilizar em seus modelos informações de diversos satélites, dentre eles o TRMM como apresentado no item 4.2.1. Esse fato não menospreza a relevância das observações feitas a respeito do comportamento da variação dos índices de seca analisados, visto que existe uma total independência entre os produtos do TRMM, GRACE e NDVI MODIS. Sendo assim mesmo com esta independência foi observada para a maioria das regiões apresentadas nas Figuras 7.4 e 7.5 a concordância entre os índices de acordo com a premissa básica de evolução de uma seca. Nesta evolução primeiramente ocorre um déficit de precipitação, seguido da umidade do solo, vegetação e por último armazenamento de água, como consta no fluxograma da Figura 1.2.

Para alguns períodos o atraso esperado entre o SVI em relação ao SMA não foi notado e também ocorreu situações em que todos os outros índices estarem indicado um período chuvoso enquanto o SVI indicava seca e vice-versa. Isso pode ser explicado pelos problemas técnicos e conceituais que o NDVI pode apresentar, citados anteriormente. Ainda assim mesmo que para algumas situações esse índice tenha apresentando um comportamento não condizente com o esperado do ponto de vista da evolução de um evento de seca, para boa parte das séries reduzidas o SVI conseguiu acompanhar a tendência de crescimento e decréscimo do SPI e SMA.

Analisando a série extensa do Nordeste pode-se perceber que entre os anos 2012 e 2016 foi o que os índices apresentaram os valores negativos mais extremos, estando de acordo com os registros que apontam que nesse período ocorreu a seca mais intensa dos últimos 70 anos. Para a região Sul os anos de 2005 e 2012 ficaram marcados pela ocorrência de eventos de seca

que causaram grandes perdas econômicas, principalmente devido queda na produção agrícola (Weiland, 2012). Pôde-se perceber que todos os índices conseguiram identificar estes dois eventos e que a seca ocorrida no ano de 2005 foi mais intensa do que a 2012 contrariando os registros jornalísticos feitos na época.

Uma das vantagens do uso de índices deste tipo é a possibilidade de se comparar eventos de seca que ocorreram em regiões e épocas distintas. Os principais eventos de seca para cada uma das regiões estudadas foram analisados individualmente e suas características são apresentadas na Tabela 6. Estas características foram calculadas seguindo a metodologia apresentada no item 6.4 e foi considerado apenas o intervalo do registro de seca presente no banco de dados do EM-DAT. Isso permitiu avaliar o que cada índice estava indicando durante o registro de seca.

Analisando a tabela 6 pôde-se perceber que dentre os eventos de seca analisados os mais intensos foram os ocorridos no Nordeste do Brasil entre 2012 e 2016 e no Paraguai no ano de 2012, este último também apresentou a severidade média mais extrema. É interessante notar que para maioria dos eventos de seca analisados os índices tenderam a indicar a mesma informação, apresentando valores de severidade e intensidade semelhantes. O valor mais extremo registrado (-2.326) foi para o ATWS do Nordeste durante o período de 2012 e 2016. Isso pode ser explicado com base no fato desta região ter passado quase quatro anos sob um déficit intenso de precipitação. Apenas em 2014 que houve um breve período em que o SPI ficou levemente acima de zero, mas não atingiu o necessário para garantir uma recarga grande o suficiente para alterar o sinal do TWS vindo do GRACE. Com base nesses resultados pode-se afirmar que seria necessário que houvesse para essa região um período prolongado de chuvas acima do normal para haver uma normalidade no armazenamento terrestre de água.

Pode-se perceber que houveram resultados com indicação de severidade positiva e intensidade negativa, isso é facilmente explicável pelo fato destas características terem sido calculadas em função do período em que houve o registro de seca e não pela duração do evento identificado pelo índice.

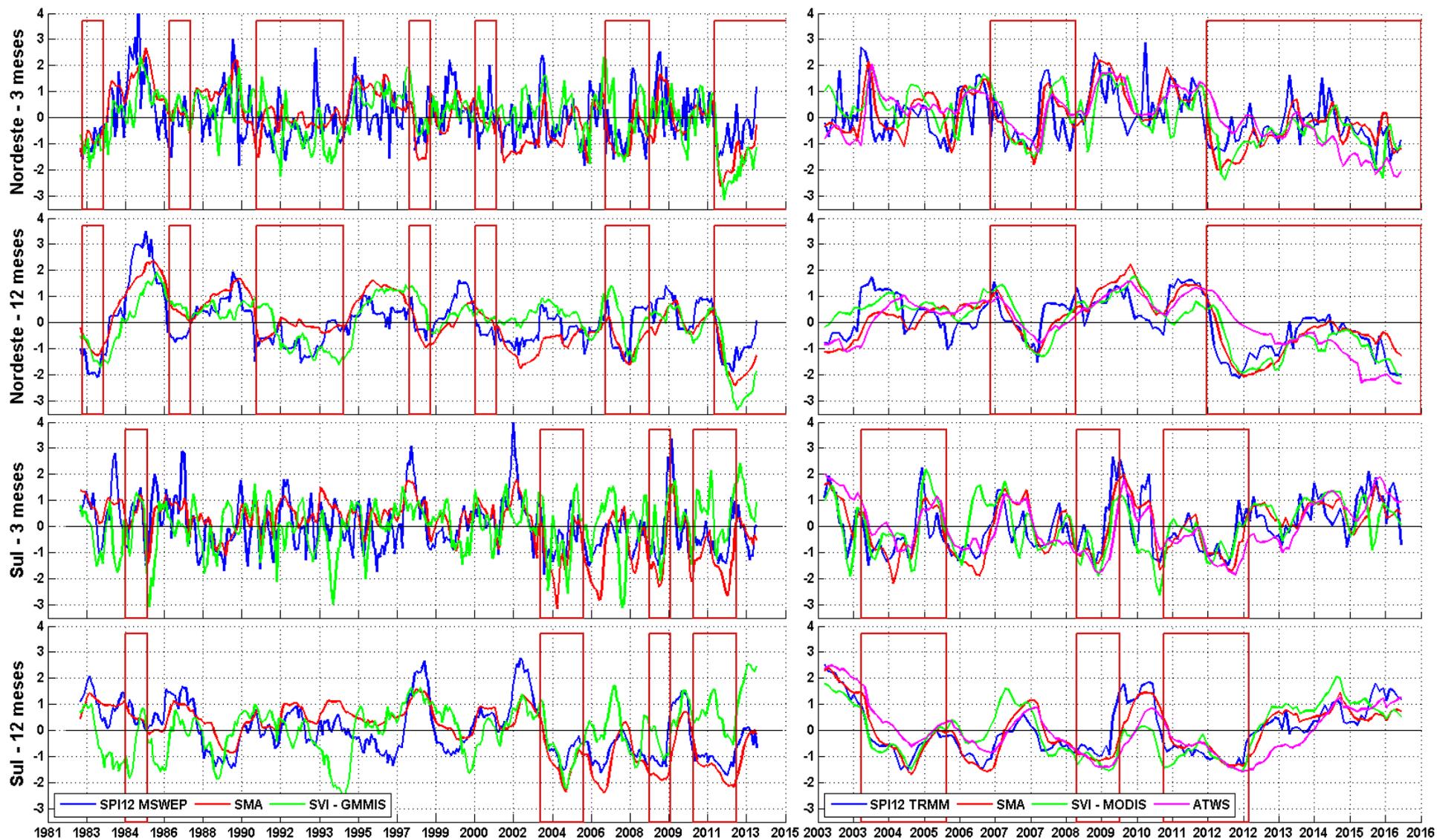


Figura 7.4 - Série extensa e reduzida dos índices de seca para Nordeste e Sul do Brasil

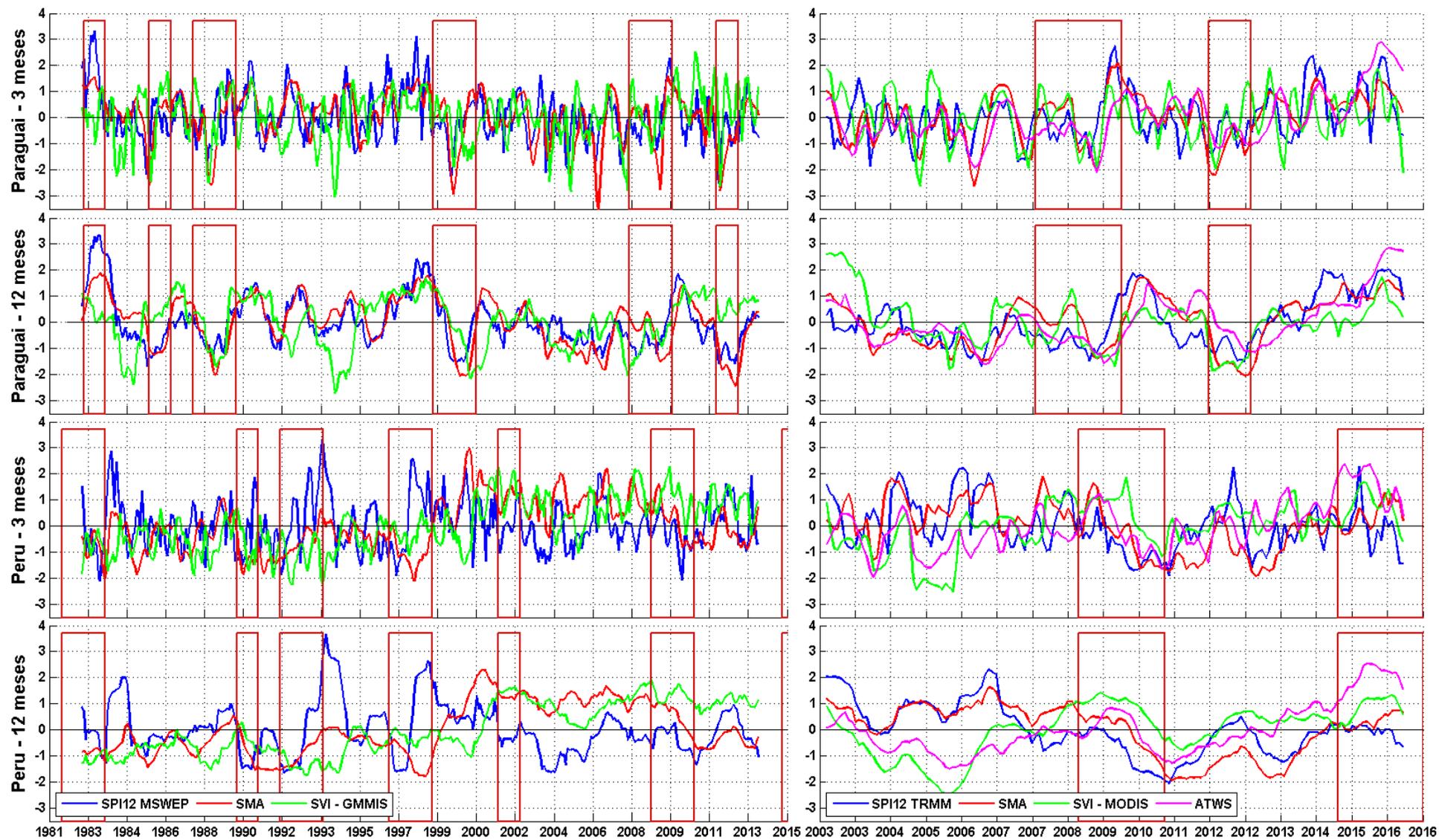


Figura 7.5 - Série extensa e reduzida dos índices de seca para o Paraguai e Peru

Tabela 06– Características dos eventos de seca da série reduzida

	Índice	Período	Severidade	Severidade Média	Intensidade
Nordeste	SPI	2007-2008	0.929	0.077	-1.023
	SMA	2007-2008	2.474	0.206	-0.993
	SVI	2007-2008	7.036	0.586	-1.020
	ATWS	2007-2008	4.335	0.361	-0.432
	SPI	2012-2016	-44.915	-0.936	-2.127
	SMA	2012-2016	-42.997	-0.896	-2.032
	SVI	2012-2016	-53.932	-1.124	-2.095
	ATWS	2012-2016	-42.213	-0.879	-2.326
Sul	SPI	2004-2005	-12.736	-0.531	-1.513
	SMA	2004-2005	-10.068	-0.419	-1.671
	SVI	2004-2005	-12.233	-0.510	-1.484
	ATWS	2004-2005	4.479	0.187	-0.617
	SPI	2011-2012	-22.478	-0.937	-1.343
	SMA	2011-2012	-18.174	-0.757	-1.365
	SVI	2011-2012	-25.534	-1.064	-1.539
	ATWS	2011-2012	-18.570	-0.774	-1.575
Paraguai	SPI	2008-2009	-10.585	-0.441	-1.142
	SMA	2008-2009	5.723	0.238	-1.130
	SVI	2008-2009	3.284	0.137	-0.984
	ATWS	2008-2009	-10.345	-0.431	-1.363
	SPI	2012	-12.414	-1.035	-1.498
	SMA	2012	-18.367	-1.531	-2.047
	SVI	2012	-18.767	-1.564	-1.854
	ATWS	2012	-4.137	-0.345	-1.109
Peru	SPI	2009-2010	-18.928	-0.789	-1.845
	SMA	2009-2010	-1.365	-0.057	-1.386
	SVI	2009-2010	21.796	0.908	-0.304
	ATWS	2009-2010	1.071	0.045	-1.123
	SPI	2015-2016	-0.966	-0.040	-0.645
	SMA	2015-2016	6.276	0.262	-0.021
	SVI	2015-2016	16.309	0.680	0.051
	ATWS	2015-2016	37.897	1.579	1.085

7.2 – Análise de desempenho

Os resultados das métricas utilizadas para aferir o desempenho geral de cada um dos índices e destes na forma combinada segue na Figura 7.6.

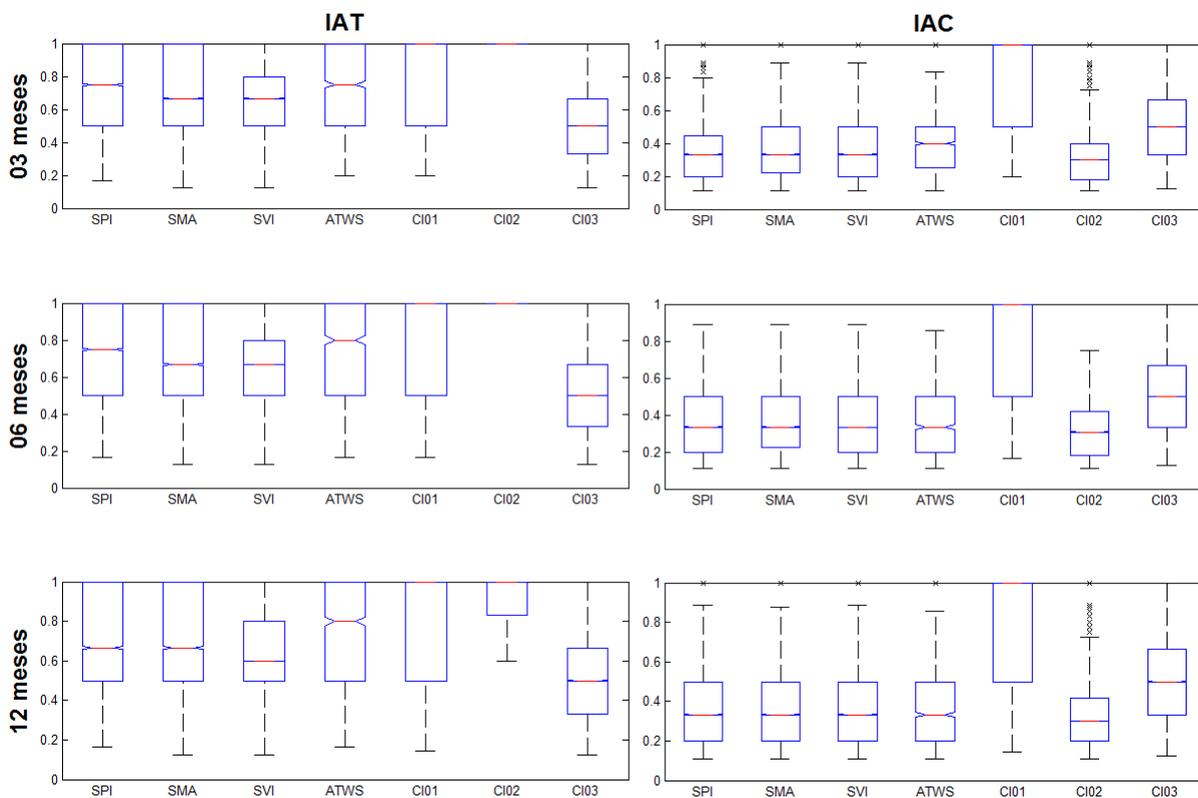


Figura 7.6 - Boxplot das métricas de desempenho para os índices de seca utilizados.

Um das etapas mais complexas no estudo de metodologia de monitoramento e identificação de secas é a validação de forma sistemática dos resultados obtidos. É importante ressaltar que não existe na literatura uma metodologia consolidada para avaliação quantitativa de índices de seca. Isso ocorre devido a própria natureza da seca, uma vez que não se sabe com exatidão o momento inicial e final deste tipo de evento e o limiar preciso a qual se deve considerar como a fase inicial de uma seca. Além disso a validação com base em registros de seca fica comprometida uma vez que estes carregam um certo grau de incertezas, tanto do ponto de vista espacial como temporal e está relacionado diretamente com os aspectos socioeconômicos e com a infraestrutura hídrica de cada região como apresentado na Figura 2.1.

Visto que mesmo tendo sido feita uma vasta procura por registros de seca ainda existe incertezas quanto a ausência dessa informação, ou seja, em regiões com pouca documentação deste tipo de evento não se pode afirmar que para determinado período não houve seca ou se houve e não foi registrada. Esta carência de informação dificulta qualquer tentativa de avaliar com precisão o desempenho de índices de seca, sendo assim a performance dos índices utilizados neste estudo foi avaliada unicamente em função da capacidade destes em identificar os eventos registrados.

Analisando a Figura 7.6 pôde-se perceber que as menores escalas de tempo obtiveram melhores resultados de IAT, isso é explicado pelo fato destas séries serem mais ruidosas e

indicarem mais eventos de seca consequentemente tem maior chance de identificar um evento deste tipo ao qual também houve registro. Essa explicação é comprovada com o IAC em que baixos valores desta métrica significam que o índice em questão está indicando mais eventos de secos não associados a um registro.

O índice de seca que apresentou o melhor desempenho tanto para o IAC como para o IAT foi ATWS. Isso pode ser associado a seu comportamento mais lento e com variações temporais mais suaves como apresentado nas figuras 7.4 e 7.5. Outro fator que pode explicar o desempenho deste índice é que ele captura o sinal da redução do armazenamento terrestre de água, consequentemente variações na disponibilidade dos corpos hídricos e para muitas regiões o esgotamento destes que faz com que a população passe a ter uma percepção da ocorrência de uma seca. A escala de tempo não provocou variações no desempenho deste índices para algumas regiões, enquanto para outras como norte da Colômbia e nordeste do Brasil os melhores resultados ocorreram quando o ATWS foi calculado como acumulado móvel de 12 meses (Figura 7.7 , seta vermelha).

O SPI e SMA apresentaram um desempenho semelhante para maioria das regiões principalmente para o nordeste e sul do Brasil e a porção central da Argentina (Figura 7.7, seta amarela). O pior desempenho dos índices de seca foi alcançado pelo SVI, isso pode ser associado ao fato do NDVI apresentar diversas limitações tanto técnicas como conceituais que já foram abordadas anteriormente. Pode-se perceber que o desempenho inferior deste índice ficou mais evidente para as regiões onde ocorre vegetação mais densa como é o caso da região amazônica (Figura 7.7, seta roxa). O SVI apenas apresentou um resultado satisfatório nas duas métricas utilizadas nas regiões em que apresentam uma forte sazonalidade do NDVI com grande amplitude entre o máximo e mínimo, como é o caso da região nordeste do Brasil e norte da Argentina (Figura 7.7, seta laranja).

A combinação dos índices de fato produziu resultados superiores quando comparados aos dos índices na forma individual. A combinação C02 foi a que apresentou o melhor resultado para o IAT em todas as escalas temporais em que a maioria dos pixels resultaram em valores perto de 1 para esta métrica. O mesmo não foi observado para IAC, em que C02 apresentou o pior desempenho geral. Isto significa que houve a identificação de muitos eventos de seca sem ter o devido registro associado. Apesar do C02 ter apresentado os piores resultados de IAC, estes não são consideravelmente inferiores aos apresentados pelos demais índices individuais.

A combinação C01 apresentou resultados elevados para as duas métricas. Como definido no item 6.5 esta combinação só considera como seca quando todos os índices indicam isso, ou seja, no geral vai identificar apenas o “auge” dos eventos de seca. As secas identificadas nesta situação tendem a coincidir mais com os registros, ou seja, menos “alarmes falsos”. Em

algumas regiões isso nem sempre ocorre e por isso em vários pixels obtiveram valor igual a zero, o que pode ter influenciado também o desempenho satisfatório apresentado pela combinação C01.

O número de registros de seca disponíveis influencia nos resultados obtidos pelas duas métricas aplicadas, dessa forma só é possível comparar regiões que apresentem a mesma quantidade de eventos de seca registrados.

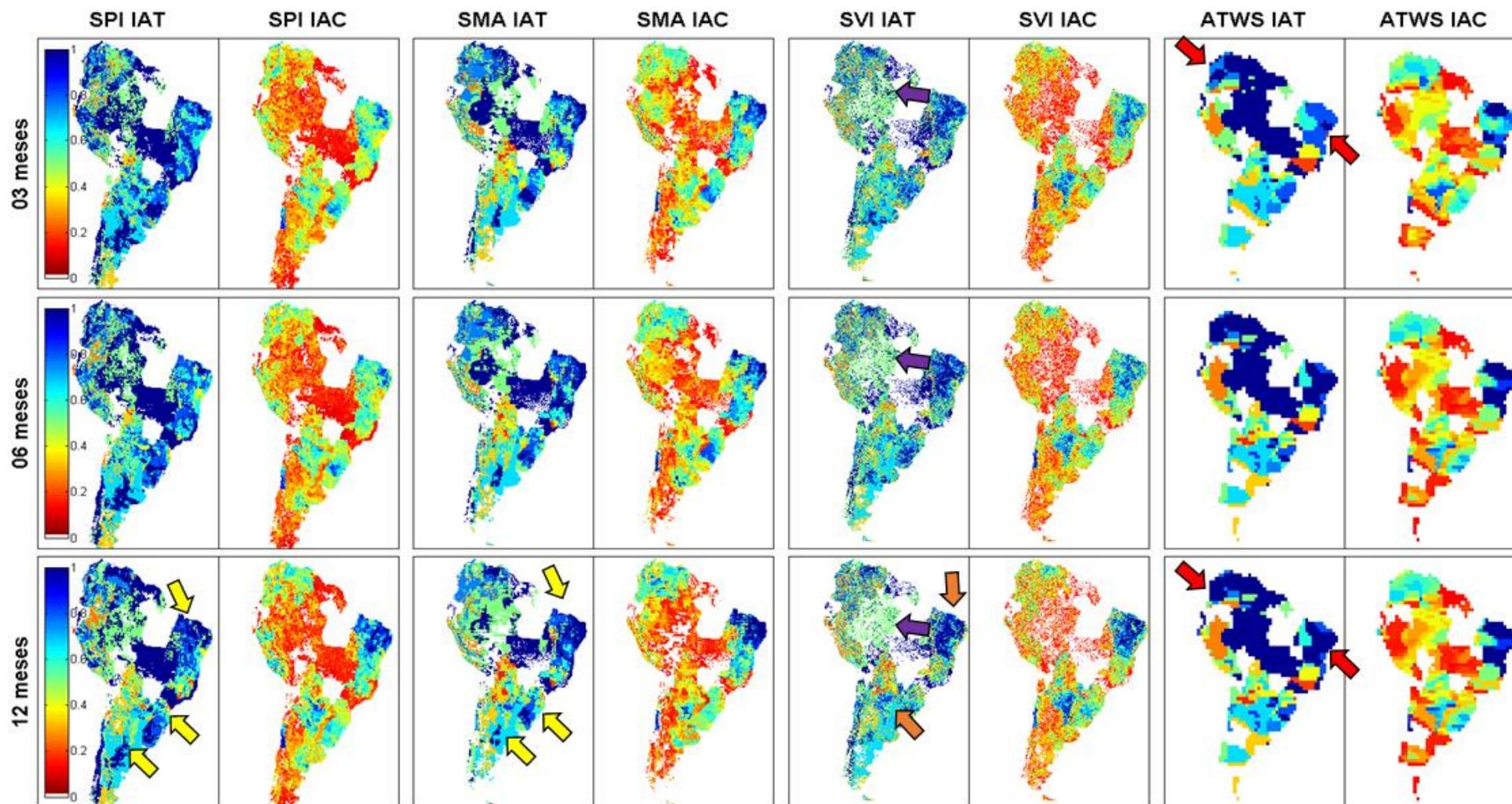


Figura 7.7 - Distribuição espacial das métricas de desempenho dos índices de seca

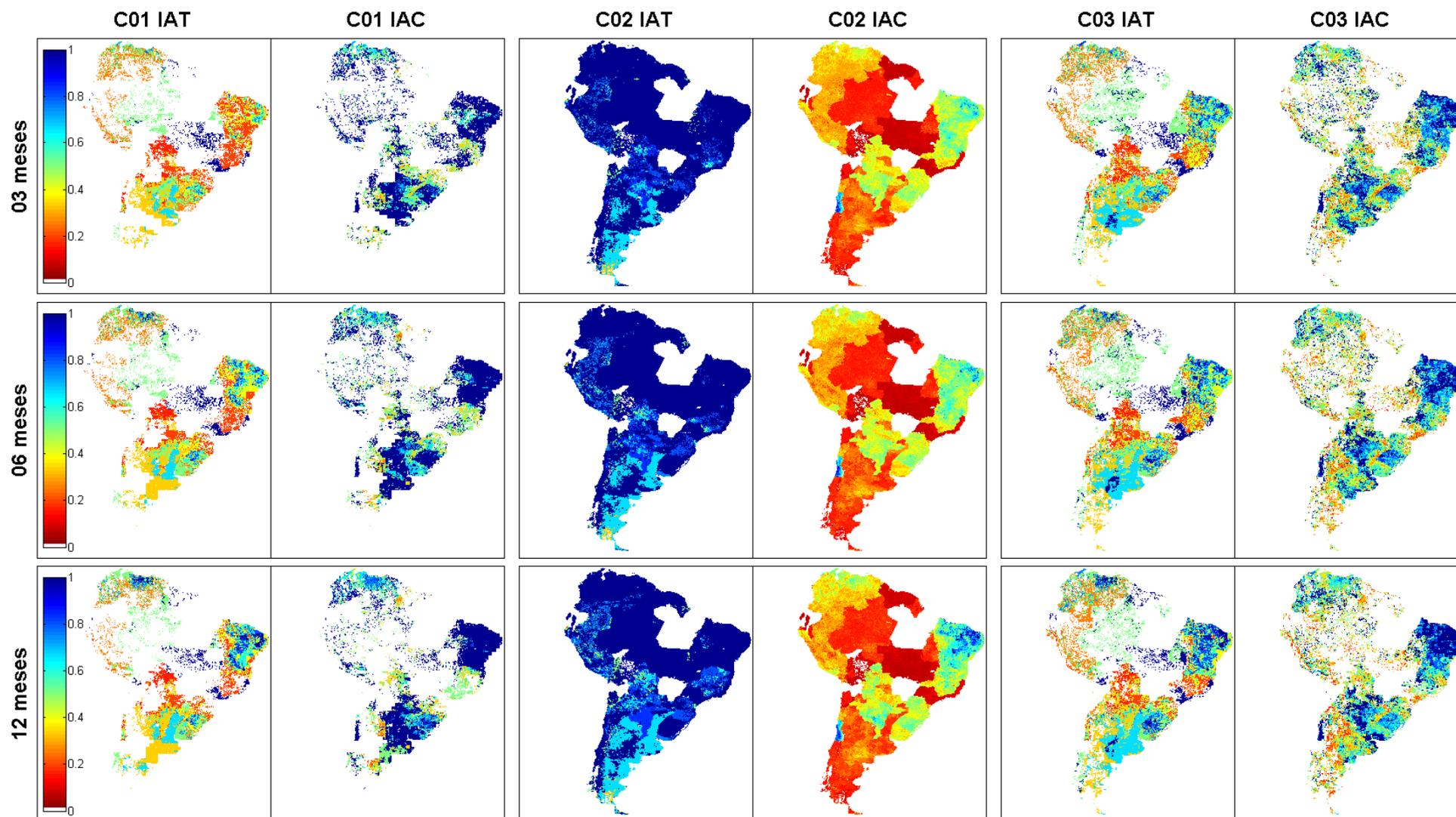


Figura 7.8 - Distribuição espacial das métricas de desempenho dos índices de seca combinados

7.3 – Análise de correlação

Os resultados das correlações entre os índices são apresentados na Figuras 7.9. Pôde-se perceber que no geral os índices de seca apresentaram uma boa correlação entre si e em apenas algumas regiões não alcançaram um valor alto suficiente quando considerado os critérios de significância da hipótese estatística testada. Também pôde-se perceber facilmente que o SVI não apresentou correlação com nenhum dos outros índices para boa parte da região norte da América do Sul como indicado pela seta azul na Figura 7.9. Essa não correlação é explicada pelo fato de que o NDVI tende a saturar em ecossistemas muito úmidos, onde a umidade do solo não limita o crescimento da vegetação. Nessas áreas a variação sazonal do NDVI é muito pequena para poder ser utilizada na identificação de eventos de seca mais significativos. Além disso, muitas dessas áreas têm cobertura persistente de nuvens ao longo do ano, o que pode levar a vieses nas análises de anomalias do NDVI (Wardlow et al., 2012).

Analisando a correlação entre o SPI e SMA pôde-se perceber que para a maior parte da América do Sul houve uma correlação da ordem de 0,7 e o lag em que ocorreu a correlação máxima foi para 1 mês na maior parte do continente. A correlação entre o SPI e o SVI no geral foi inferior a observada na situação anterior, mas no geral obteve-se o mesmo lag. Isto indica que a umidade do solo e a vegetação tendem apresentar ao mesmo tempo resposta em relação ao déficit de precipitação. A correlação entre o SPI e o ATWS no geral variou entre 0,3 e 0,5 com lag de 2 a 3 meses e em algumas regiões não houve correlação significativa. Uma dessas situações foi para a bacia hidrográfica do rio da Prata indicado com a seta vermelha na Figura 7.9, em que essa não correlação pode estar associada a presença de grandes reservatórios nesta região. Uma possível consequência para isso é que estes reservatórios podem alterar o sinal do TWS do GRACE e dessa forma ocultar as relações entre as variáveis analisadas.

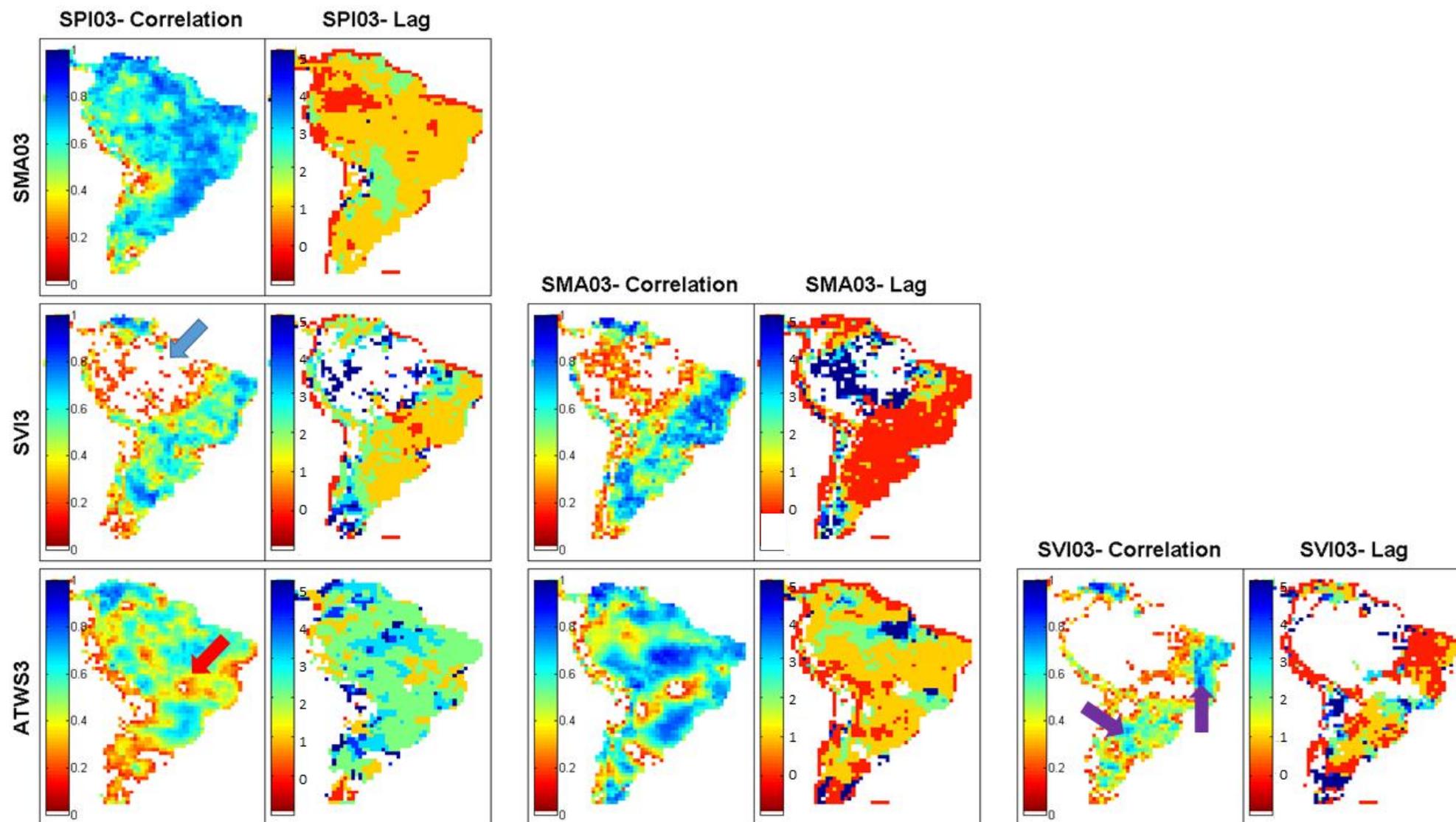


Figura 7.9 - Análise de correlação com escala temporal de 3 meses

Para boa parte da América do Sul houve uma forte correlação entre o SMA e SVI com valores na ordem de 0,7 e o lag do valor máximo ocorreu sem haver defasagem, estando de acordo com as relações que estes dois índices tiveram com o SPI. Os resultados referentes a correlação entre o SMA e ATWS também foram satisfatórios, apresentando valores superiores aos indicados pela correlação entre o SPI e ATWS. O mesmo efeito de ausência de correlação na bacia hidrográfica do rio da Prata foi notado entre esses dois índices. A correlação do SVI com o ATWS apresentou no geral valores inferiores e com mais situações que não houveram correlação significativa. A exceção a isso ficou algumas regiões áridas como o Nordeste do Brasil e a parte mais central da Argentina em que as correlações alcançaram valores superiores a 0,7, como indicado com as setas roxa na Figura 7.9.

No geral estes resultados são úteis para complementar as informações obtidas nas figuras 7.4 e 7.5 e reafirmar que existe uma forte relação entre os índices analisados e indicam que a evolução das secas na América do Sul ocorre conforme o esperado em relação a ordem dos déficits nas variáveis hidrológicas. Estima-se dessa forma que no geral para maioria das regiões a umidade do solo e a vegetação vão ter uma resposta quase que simultânea ao déficit de precipitação com defasagem de 1 ou 2 meses e a resposta do armazenamento terrestre de água ocorrendo 2 ou 3 meses depois do início do déficit de precipitação.

7.4 – Geração de mapas de secas

Na figura 7.10 são apresentados os mapas de seca que foram gerados para alguns dos anos em que houveram registros de eventos de seca intensos. Uma forma de aferir a precisão destes mapas é fazendo-se uma comparação visual com os registros históricos de seca. A primeira linha desta figura corresponde aos registros de seca do EM-DAT para o ano em questão.

No ano de 2005 foram registradas secas no Sul do Brasil, Bolívia e região amazônica. Analisando a Figura 7.10 pôde-se perceber os mapas provenientes da combinação de índices detectaram o evento ocorrido do Sul do Brasil em que o auge ocorreu no primeiro semestre do ano. Sabe-se que a seca que ocorreu na região amazônica neste ano foi bastante intensa (Zeng et al., 2008; Marengo et al., 2008), contudo pela metodologia aplicada foi identificado esse evento apenas em parte do estado do Amazonas e Acre. Já para Bolívia apenas na região andina em que foi identificado seca, o que está de certa forma condizente com a realidade visto que devido a imprecisão do registro feito não se sabe a região onde realmente ocorreu o evento de seca em questão.

No ano de 2010 houveram registros para região Amazônica, Venezuela, parte da Colômbia, Peru, Parte da Bolívia, Norte da Argentina e região Central do Chile. Os mapas gerados conseguiram representar bem as secas ocorridas neste ano, de maneira que foram identificados eventos de seca em todas as regiões citadas anteriormente. Foram também identificados “falsos alarmes”, ou seja, indicação de ocorrência de seca sem a existência de um registro associado. Percebe-se que estes falsos alarmes ocorreram em regiões vizinhas de onde houveram registros de seca, com isso pode-se afirmar que provavelmente ocorreu uma falha no registro dos eventos de seca ocorridos nessas regiões onde ocorreram os falsos alarmes.

Os principais eventos de seca que ocorreram no ano de 2012 foram os para as regiões Nordeste e Sul do Brasil e estes foram devidamente representados pela metodologia aplicada. Para esta primeira região houve uma intensificação gradual da seca passando por praticamente todas as classificações utilizadas. Já para o Sul do país o evento de seca desse ano permaneceu praticamente constante como uma seca extrema. Apesar de não terem sido elaborados mapas de seca para todo o ano de 2016 devido a disponibilidade de dados, percebe-se que mesmo assim houve uma boa correspondência e semelhança entre os mapas gerados com os registros históricos de seca.

Apesar da carência de informações mais detalhadas a respeito do histórico de secas da América do Sul pode-se afirmar que a metodologia utilizada para elaboração dos mapas de seca mostrou-se condizente com a realidade conseguindo identificar e representar satisfatoriamente a maioria dos registros de secas feitos para os anos analisados. É importante ressaltar que estes resultados são os primeiros deste tipo elaborados para América do Sul e que a metodologia utilizada pode ser aplicada em um sistema de monitoramento de seca como os apresentados anteriormente.

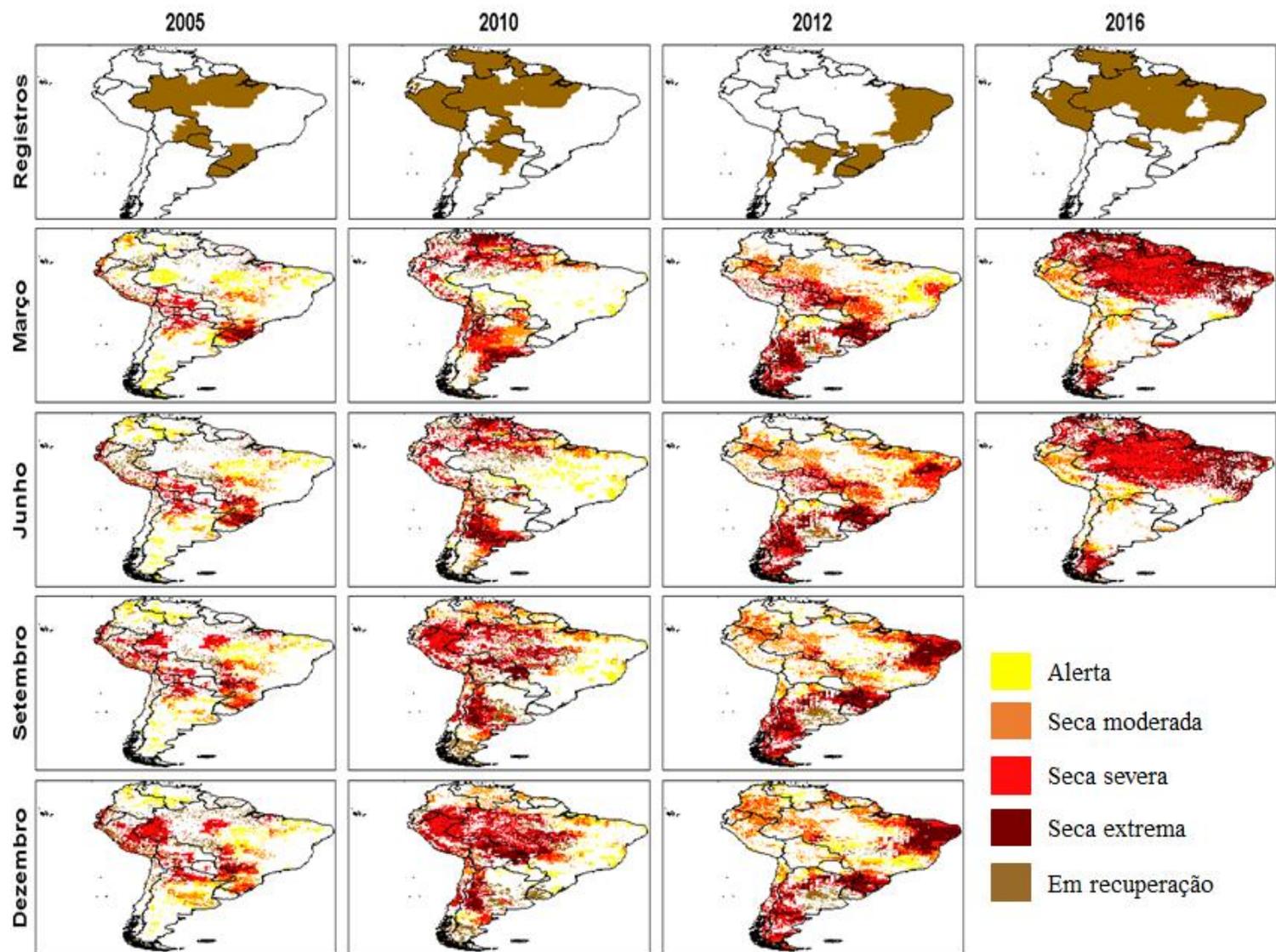


Figura 7.10 - Mapas de Seca elaborados pela combinação dos índices de seca

Capítulo 8 – CONCLUSÕES

Neste trabalho foram avaliadas metodologias para identificação, monitoramento e caracterização das secas ocorridas na América do Sul utilizando principalmente produtos de sensoriamento remoto. O principal objetivo da metodologia é a elaboração de mapas de seca que sejam capazes de representar os eventos de seca ocorridos na América do Sul. A metodologia teve duas premissas básicas, a primeira considerou que seria possível identificar este tipo de evento aplicando-se diferentes tipos de índices de seca. A segunda premissa partiu do princípio que a evolução natural de uma seca se dá primeiramente com um déficit na precipitação que este passa a gerar um déficit na umidade do solo que por sua vez passa a atingir a vegetação e também gera um déficit no armazenamento terrestre de água.

A metodologia de geração dos mapas de seca foi baseada na utilizada por sistemas de monitoramento de seca consolidados como o aplicado para os Estados Unidos e Europa. Também foram propostas duas métricas para análise do desempenho dos índices utilizados em identificar secas previamente registradas.

As análises feitas com os resultados obtidos neste trabalho possibilitaram a conclusão que os índices de seca que melhor se adequaram para a identificação, caracterização e monitoramento de eventos deste tipo foi o ATWS (armazenamento terrestre de água) e o SPI (precipitação). Neste trabalho os índices de seca foram combinados de forma quantitativa e qualitativa e concluiu-se que esta última forma foi a que apresentou um ganho maior para o monitoramento de secas da América do Sul. As metodologias aplicadas neste trabalho também permitiram a identificação de claras relações de defasagem na variação temporal dos índices de seca. No geral as variáveis analisadas acompanharam com certo atraso o crescimento e decréscimo da precipitação, seguindo ainda o princípio básico da evolução natural de um evento de seca.

- Análises exploratórias

Uma das primeiras conclusões que se pôde tirar desta etapa foi em relação à escala temporal utilizada no cálculo dos índices, em que quando se é considerado um acumulado móvel de 3 ou 6 meses a série produzida apresenta uma forma mais ruidosa e de difícil compreensão. Com os resultados desta etapa pôde-se ter uma noção das relações mais gerais entre os índices e percebeu-se que estes apresentam uma evolução quase consecutiva em que de forma geral as variações do SPI guiaram o crescimento e decréscimo dos demais índices.

Em diversas regiões pôde-se observar durante a ocorrência de secas uma relação de defasagem na resposta dos índices de seca seguindo a premissa básica citada anteriormente. Dessa forma foi constatado que primeiro ocorre uma diminuição na precipitação seguida da umidade do solo e alterações na vegetação e por ultimo uma redução no armazenamento terrestre de água. Este comportamento ficou bastante evidente (eg. Sul e Nordeste do Brasil) principalmente nos períodos próximos a eventos de seca, ou seja, no geral o SPI foi o primeiro a identificar secas, seguido pelo SMA (umidade do solo), SVI (vegetação) e por fim o ATWS.

- Análises de desempenho

Não existe na literatura científica uma metodologia consolidada para avaliação da capacidade dos índices em identificar secas. Uma das grandes dificuldades na elaboração desse tipo de procedimento é que em muitas regiões não são feitos registros a respeito desse tipo de evento e a carência desse tipo de informação prejudica muito as considerações a respeito do desempenho do índice analisado.

Foi proposta uma metodologia baseada apenas na capacidade do índice identificar as secas que tiveram registros, sendo dessa forma desconsiderado cálculos de métricas relacionadas ao viés, por exemplo. Concluiu-se que o ATWS foi o índice que apresentou melhor desempenho geral e que isto pode estar relacionado com o fato do TWS ter uma resposta mais lenta e também por exatamente captar a variação do armazenamento terrestre de água terrestre em coluna vertical o que de certa forma capta a depleção dos reservatórios. Esta diminuição dos níveis de reservatórios para muitas regiões está relacionada diretamente com a percepção da população sobre a ocorrência da seca.

Concluiu-se também que o SPI e SMA obtiveram um desempenho equivalente o que faz sentido, visto que como constatado nas análises de correlação estes dois índices apresentam entre si a relação mais forte quando comparada com as dos outros índices. Também pôde-se constatar que o índice que apresentou o pior desempenho foi o SVI, o que pode ser explicado pelo fato do NDVI apresentar uma série de incertezas citadas ao longo do presente estudo que podem inserir ruído na série desse índice. O desempenho do SVI foi mais aceitável nas regiões em que apresentam uma forte sazonalidade do NDVI e com diferenciação acentuada entre os máximos e mínimos da série, como é o caso de regiões semiáridas.

Foram propostas também análises se considerando a combinação dos índices visando avaliar se há algum ganho na capacidade de identificar secas. Concluiu-se que isso realmente provoca um incremento na identificação de secas principalmente para C02 que é a combinação que considera seca quando pelo menos um dos índices indica isso. Esta situação provoca o pior

desempenho em relação a métrica que corresponde a razão entre o número de eventos de seca identificados associados a registros sobre o número total de eventos identificados (IAC). A combinação dos índices em que se considerava seca apenas quando todos estes estavam indicando isso (C01) obteve um desempenho satisfatório nas duas métricas avaliadas. A combinação C01 não pode ser utilizada para todas as regiões, principalmente naquelas em que ocorre saturação do NDVI devido a presença de vegetação muito densa. Concluiu-se também que devido estas peculiaridades entre as características de cada região e pela falta de precisão nos registros de seca que é mais proveitoso combinar os índices de forma qualitativa como foi feito para geração dos mapas de seca.

- Análises de correlação

Os resultados das análises de correlação mostram para grande parte da América do Sul que os índices de seca realmente têm uma forte correlação entre si e que estes também puderam ser utilizados para embasar mais as conclusões feitas anteriormente a respeito da confirmação da premissa inicial sobre a evolução das secas. Concluiu-se que no geral o déficit na precipitação se propaga para umidade do solo e vegetação quase que simultaneamente após 1 ou 2 meses e para o armazenamento terrestre de água após 2 ou 3 meses.

Os resultados dessa etapa também serviram para mostrar que não houve correlação do SVI com os demais índices para as regiões onde existe vegetação bastante densa como é o caso da floresta amazônica. Isso se dá devido ao fato de ocorrer uma saturação do NDVI e este deixa de ser capaz de captar variações significantes nas condições da vegetação. Também ocorreu situação pertinente de não correlação do ATWS com os demais índices na região da bacia hidrográfica do rio Prata, concluiu-se que isto pode estar relacionado com a presença de grandes reservatórios nessa região o que pode ocultar as relações do ATWS com os demais índices.

- Mapas de seca

A metodologia de geração de mapas de seca se mostrou bastante eficiente e as comparações com os registros históricos de seca mostraram que esses mapas conseguiram representar grande parte dos eventos ocorridos ao longo dos anos analisados. O resultado final obtido é uma informação estratégica e relevante para um continente como a América do Sul, visto que muitas regiões são atingidas frequentemente por esse tipo de desastre e os prejuízos tanto econômicos como sociais são bastante elevados. É importante ressaltar que a geração de mapas de seca para América do Sul, como os apresentados nesta pesquisa são inéditos no meio

acadêmico. Estes podem ser utilizados diretamente no planejamento de medidas mitigadoras de seca e no melhor planejamento da gestão dos recursos hídricos que implica diretamente na redução dos impactos gerados por esse tipo de desastre.

- Considerações finais

Por fim os resultados obtidos nesta pesquisa contribuem para melhorar o entendimento a respeito das secas que ocorrem na América do Sul e para geração de informações relevantes a respeito do monitoramento deste tipo de evento na região citada. É esperado que aplicação de outros produtos de sensoriamento relacionados as mesmas variáveis consideradas neste estudo gerem resultado diferentes, contudo provavelmente as conclusões seriam semelhantes. Os resultados e conclusões obtidas neste trabalho podem guiar a implementação de sistemas operacionais de monitoramento de seca para América do Sul e interpretação das informações geradas por estes.

Este tipo de trabalho também abre oportunidades para vários trabalhos futuros relacionados aos estudos de secas. Primeiramente pode-se usar os resultados obtidos neste estudo para a previsão sazonal de secas, ou seja, pode-se identificar quais variáveis deveriam ser previstas para identificar secas futuras. Pode-se também utilizar modelos hidrológicos para complementar os dados de variação do armazenamento terrestre de água do GRACE e explorar com mais precisão aspectos relacionados a secas hidrológicas. Também pode-se acoplar previsões climáticas e informações sobre crescimento do uso de água nestes modelos para simular cenários para tentar se prever o impacto de secas futuras. Além disso pode-se estudar novas metodologias de avaliação dos índices de seca, geração de mapas de risco e vulnerabilidade relacionado a secas.

Capítulo 9 – REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS

Agência Nacional de Águas (Brasil). Conjuntura dos recursos hídricos no Brasil: 2013 / Agência Nacional de Águas. -- Brasília: ANA, 2013.

AghaKouchak, A., A. Farahmand, F. S. Melton, J. Teixeira, M. C. Anderson, B. D. Wardlow, and C. R. Hain (2015), Remote sensing of drought: Progress, challenges and opportunities, *Rev. Geophys.*, 53, 452–480, doi:10.1002/2014RG000456.

Albuquerque, T.M.A.; Estudos dos processos de gestão de seca: Aplicação no estado do Rio Grande do Sul. Universidade Federal do Rio Grande do Sul. Instituto de Pesquisas Hidráulicas. Programa de Pós-Graduação em Recursos Hídricos e Saneamento Ambiental. 2010.

Alsdorf, D.; Han, S.C.; Bates, P.; Melack, J.; Seasonal water storage on the Amazon floodplain measured from satellites. *Remote Sensing of Environment* vol. 114 2448–2456. 2010.

- Anderson, M. C., Zolin, C. A., Sentelhas, P. C., Hain, C. R., Semmens, K., Yilmaz, M. T., ... & Tetrault, R. (2016). The Evaporative Stress Index as an indicator of agricultural drought in Brazil: An assessment based on crop yield impacts. *Remote Sensing of Environment*, 174, 82-99.
- Andersson, Lotta, et al. "Impact of climate change and development scenarios on flow patterns in the Okavango River." *Journal of Hydrology* 331.1 (2006): 43-57.
- Aon Benfield,. 2013 Annual Global Climate and Catastrophe Report. Londres: [s.n.]. Disponível em:<http://thoughtleadership.aonbenfield.com/Documents/20140113_ab_if_annual_climate_catastrophe_report.pdf>. Acesso em: 2 set. 2016.
- Aon Benfield,. 2014 Annual Global Climate and Catastrophe Report. Londres: [s.n.]. Disponível em:<http://thoughtleadership.aonbenfield.com/Documents/20150113_ab_if_annual_climate_catastrophe_report.pdf>. Acesso em: 2 set. 2016.
- Bajgain, R.; Xiao, X.; Wagle, P.; Basara, J.; Zhou, Y.; Sensitivity analysis of vegetation indices to drought over two tallgrass prairie sites. *ISPRS Journal of Photogrammetry and Remote Sensing*, vol.108, p. 151–160. 2015.
- Barbosa, H.A.; Huete, A.R.; Baethgen, W.E.; A 20-year study of NDVI variability over the Northeast Region of Brazil. *Journal of Arid Environments*, vol. 67 288–307. 2006.
- Barbosa, H.A.; Kumar, T.V.L.; Influence of rainfall variability on the vegetation dynamics over Northeastern Brazil. *Journal of Arid Environments*, vol. 14, 377-387. doi: 10.1016/j.jaridenv.2015.08.015. 2015.
- Beck, H.E., A.I.J.M. van Dijk, V. Levizzani, J. Schellekens, D.G. Miralles, B. Martens, A. de Roo: MSWEP: 3-hourly 0.25° global gridded precipitation (1979–2015) by merging gauge, satellite, and reanalysis data, *Hydrology and Earth System Sciences Discussions*, doi:10.5194/hess-2016–236, 2016.
- Berner, E. K., & Berner, R. A. (2012). *Global environment: water, air, and geochemical cycles*. Princeton University Press.
- Bergman, K.H., P. Sabol and D. Miskus, 1988: *Experimental Indices for Monitoring Global Drought Conditions*. Proceedings of 13th Annual Climate Diagnostics Workshop, United States Department of Commerce, Cambridge, MA.
- Berhan, G.; Hill, S.; Tadesse, T.; Atnafu, S.; Using Satellite Images for Drought Monitoring: A Knowledge Discovery Approach. *Journal of Strategic Innovation and Sustainability* vol. 7(1) 135. 2011.
- Berner, E.K.; Berner, R.A. 2012. *Global Environment. Water, Air and Geochemical Cycles*. 2nd Ed. Princeton.
- Biancamaria, S., Lettenmaier, D. P., & Pavelsky, T. M. (2016). The SWOT mission and its capabilities for land hydrology. *Surveys in Geophysics*, 37(2), 307-337.
- Carrão, H.; Russ, S.; Canto-Sepulcre, G.; Barbosa, P.; An empirical standardized soil moisture index for agricultural drought assessment from remotely sensed data. *International Journal of Applied Earth Observation and Geoinformation* vol.48 p.74–84. 2016.
- Cerón, W. L., Escobar, Y. C., & Montoya, O. L. B. (2015). Índice estandarizado de precipitación (SPI) para la caracterización de sequías meteorológicas en la cuenca del río Dagua-Colombia. *Estudios Geográficos*, 76(279), 557-578.
- Chao, N.; Wang, Z.; Jiang, W.; Chao, D.; A quantitative approach for hydrological drought characterization in southwestern China using GRACE. *Hydrogeology Journal*, DOI 10.1007/s10040-015-1362-y. 2016.
- Chen, J.C. Wilson, B.; Blankenship, D.D.; Tapley, B.D.; Antarctic mass rates from GRACE. *Geophysical Research Letters*, Vol. 33, L11502, doi:10.1029/2006GL026369.2006.
- Chen, J.L.; Wilson, C.R; Tapley, B.D.; The 2009 exceptional Amazon flood and interannual terrestrial water storage change observed by GRACE. *Water Resources Research*, Vol. 46, W12526, doi: 10.1029/2010WR009383, 2010.

- Chen, J.L.; Wilson, C.R; Tapley, B.D.; Scanlon, B.; Guntner, A.; Long-term groundwater storage change in Victoria, Australia from satellite gravity and in situ observations. *Global and Planetary Change*, vol.139, p.56–65.2016.
- Chen, Y.; Huang, C.; Ticehurst, C.; Merrin, L.; Thew, P.; An Evaluation of MODIS Daily and 8-day Composite Products for Floodplain and Wetland Inundation Mapping. *Wetlands*, vol.33, p.823–835, DOI 10.1007/s13157-013-0439-4. 2013.
- Cheng, Y.B; Ustin, S.L.; Riaño, D.; Vanderbilt, V.C.; Water content estimation from hyperspectral images and MODIS indexes in Southeastern Arizona. *Remote Sensing of Environment*, vol. 112, p.363–374.2008.
- Clark, Martyn P. et al. Improving the representation of hydrologic processes in Earth System Models. *Water Resources Research*, v. 51, n. 8, p. 5929-5956, 2015.
- Collischonn, W. ; Tucci, C. E. M. . Simulação hidrológica de grandes bacias. *Revista Brasileira de Recursos Hídricos*, v. 6, n.2, 2001
- Correa, S. W., de Paiva, R. C. D., Espinoza, J. C., & Collischonn, W. (2017). Multi-decadal Hydrological Retrospective: Case study of Amazon floods and droughts. *Journal of Hydrology*, 549, 667-684.
- Covele, P.A.; Aplicação de índices das condições de vegetação no monitoramento em tempo quase real da seca em Moçambique usando NOAA_AVHRR- NDVI. *GEOUSP - Espaço e Tempo*, São Paulo, Nº 29 - Especial, pp. 85 - 95, 2011.
- Crow, W. T., Kumar, S. V., & Bolten, J. D. (2012). On the utility of land surface models for agricultural drought monitoring. *Hydrology and Earth System Sciences*, 16(9), 3451-3460.
- Cunha, A.P.M; Alvalá, R.C.; Nobre, C.A.; Monitoring vegetative drought dynamics in the Brazilian semiaridregion. *Agricultural and Forest Meteorology*. V.214-215, p.494-505, 2015.
- Davis, G.; History of NOAA Satellite Program. NOAA Satellite and Information Service. 2011.
- Dee, D. P., Uppala, S. M., Simmons, A. J., Berrisford, P., Poli, P., Kobayashi, S., ... & Bechtold, P. (2011). The ERA-Interim reanalysis: configuration and performance of the data assimilation system, *QJ Roy. Meteor. Soc.*, 137, 553–597.
- Dee, D. P., Balmaseda, M., Balsamo, G., Engelen, R., Simmons, A. J. and Thépaut, J.-N. 2014. Toward Consistent Reanalysis of the Climate System. *Bull. Amer. Meteor. Soc.*, vol. 95, p. 1235–1248.
- DE NYS, E.; ENGLE, N.L.; MAGALHÃES, A.R. Secas no Brasil: política e gestão proativas. Brasília, DF: Centro de Gestão e Estudos Estratégicos- CGEE; Banco Mundial, 2016. 292 p.
- Dronin, N.M.; Tel'Nova, N.O.; Kalutskova, N.N.; Changes in Productivity of Agrolandscapes in the South of Eastern Europe During 1982–2006. *Geography and Natural Resources*, vol. 36, No. 3, pp. 300-304. 2015.
- Dutta, D.; Kundu, A.; Patel, N.R.; Saha, S.k.; Siddiqui, A.R; Assessment of agricultural drought in Rajasthan (India) using remote sensing derived Vegetation Condition Index (VCI) and Standardized Precipitation Index (SPI). *The Egyptian Journal of Remote Sensing and Space Sciences*, vol.18, 53-63.2015.
- EM-DAT. 2016. The OFDA/CRED International Disaster Database. Université Catholique de Louvain.
- Espinoza, P. A. S., & Meseguer-Ruiz, Ó. (2015). Sequías en Chile central a partir de diferentes índices en el período 1981-2010. *Investigaciones Geográficas*, (50), pp-19.
- Fensholt, R., & Proud, S. R. (2012). Evaluation of earth observation based global long term vegetation trends—Comparing GIMMS and MODIS global NDVI time series. *Remote sensing of Environment*, 119, 131-147.
- Getirana, A.; Extreme Water Deficit in Brazil Detected from Space. American Meteorological Society, DOI: 10.1175/JHM-D-15-0096.1.2016.
- Gibson, J. K., P. Kallberg, S. Uppala, A. Hernandez, A. Nomura, and E. Serrano, 1997: ERA description. ECMWF Re-Analysis Project Report Series, vol. 1, 89 pp.

Gu, Y.; Hunt, R.; Wardlow, B.; Basara, J.B.; Brown, J.F.; Verdin, J.P. Evaluation of MODIS NDVI and NDWI for vegetation drought monitoring using Oklahoma Mesonet soil moisture data. *Geophysical Research Letters*, v.35, 2008. DOI: doi: 10.1029/2008GL035772.

Guttman, B.N. Comparing the Palmer Drought Index and the Standardized Precipitation Index. *Journal of the American Water Resources Association*. 1998. p. Vol 34, N 01.

Hagman, G. (1984) *Prevention Better than Cure: Report on Human and Natural Disasters in the Third World*, Stockholm: Swedish Red Cross.

Hannaford, J. et al. Examining the large-scale spatial coherence of European drought using regional indicators of precipitation and streamflow deficit. *Hydrological Processes*, v. 25, n. 7, p. 1146-1162, 2011.

Hao, Cui; ZHANG, Jiahua; YAO, Fengmei. Combination of multi-sensor remote sensing data for drought monitoring over Southwest China. *International Journal of Applied Earth Observation and Geoinformation*, v. 35, p. 270-283, 2015.

Hayes, M.J.; Svoboda, M.D.; Wardlow, B.D.; Anderson, M.C.; Kogan, F. Drought monitoring: Historical and current perspectives. *Remote sensing of drought*, 1-19. 2011

Hayes, M., M. Svoboda, N. Wall and M. Widhalm, 2011: The Lincoln Declaration on Drought Indices: universal meteorological drought index recommended. *Bulletin of the American Meteorological Society*, 92(4): 485–488.

Hongwei, Z.; Lijuan, L.; Jiuyi.; The evaluation of TRMM Multisatellite Precipitation Analysis (TMPA) in drought monitoring in the Lancang River Basin. *J. Geogr. Sci.*, vol. 22, p. 273-282. DOI: 10.1007/s11442-012-0926-1. 2012.

Hou, Arthur Y. et al. The global precipitation measurement mission. *Bulletin of the American Meteorological Society*, v. 95, n. 5, p. 701-722, 2014.

Houborg, R.; Rodell, M.; Li, B.; Reichle, Rolf.; Zaitchik, B. F.; Drought indicators based on model-assimilated Gravity Recovery and Climate Experiment (GRACE) terrestrial water storage observations. *Water resources research*, vol. 48, w07525, doi:10.1029/2011wr011291, 2012.

Howitt, R.; Medellín-Azuara, J.; Lund, J.; Summer, D.; Economic Analysis of the 2015 Drought for Agriculture. California Department of Food and Agriculture. 2015.

Huang, S.; Qiang, H.; Chang, J.; Zhu, Y.; Leng, G.; Xing, L.; Drought structure based on a nonparametric multivariate standardized drought index across the Yellow River basin, China. *Journal of Hydrology*, vol. 530, p. 127–136. 2015.

IBGE, 2004. *Vocabulário Básico de Recursos Naturais e Meio Ambiente*, 2ª edição.

IPCC, 2014: *Climate Change 2014: Synthesis Report. Contribution of Working Groups I, II and III to the Fifth Assessment Report of the Intergovernmental Panel on Climate Change* [Core Writing Team, R.K. Pachauri and L.A. Meyer (eds.)]. IPCC, Geneva, Switzerland, 151 pp.

Jäger, Alfred L.; VOGT, Jürgen V. Analyzing the Combined Drought Indicator (CDI): Demonstration and Analysis of its Evolution during Spring and Summer 2013-2014. *Agriculture and Agricultural Science Procedia*, v. 4, p. 222-231, 2015.

Jensen, J. R. (2000). *Remote Sensing of the Environment: An Earth Resource Perspective*, Prentice Hall, New Jersey.

Johnson, M.D.; Hsieh, W.W.; Cannon, A.J.; Davidson, A.; Crop yield forecasting on the Canadian Prairies by remotely sensed vegetation indices and machine learning methods. *Agricultural and Forest Meteorology* vol. 219, 74–84. 2016.

Ju, J.; Masek, J.G.; The vegetation greenness trend in Canada and US Alaska from 1984–2012 Landsat data. *Remote Sensing of Environment*, vol. 176, 1–16. 2016.

Justice, C. O., Vermote, E., Townshend, J. R., Defries, R., Roy, D. P., Hall, D. K., ... & Lucht, W. (1998). The Moderate Resolution Imaging Spectroradiometer (MODIS): Land remote sensing for global change research. *IEEE Transactions on Geoscience and Remote Sensing*, 36(4), 1228-1249.

- Justice, C. O., Townshend, J. R. G., Vermote, E. F., Masuoka, E., Wolfe, R. E., Saleous, N., ... & Morisette, J. T. (2002). An overview of MODIS Land data processing and product status. *Remote sensing of Environment*, 83(1), 3-15.
- Kalnay, E., Kanamitsu, M., Kistler, R., Collins, W., Deaven, D., Gandin, L., ... & Zhu, Y. (1996). The NCEP/NCAR 40-year reanalysis project. *Bulletin of the American meteorological Society*, 77(3), 437-471.
- Kistler, R., and Coauthors, 2001: The NCEP–NCAR 50–Year Reanalysis: Monthly means CD–ROM and documentation. *Bull. Amer. Meteor. Soc.*, vol. 82, p. 247–267.
- Kogan, F.N, and J. Sullivan (1993), Development of global drought-watch system using NOAA/AVHRR data, *Adv. Space Res.*, 13(5), 219–222,doi:10.1016/0273-1177(93)90548-P.
- Kogan, F.N.; Application of Vegetation Index and Brightness Temperature for Drought Detection. *Adv.Space.Res.*, v.15, No. 11, p.(11)91-(11)100.1995.
- Kogan, F.N; Guo, W.; 2006_2015 mega-drought in the western USA and its monitoring from space data. *Geomatics, Natural Hazards and Risk*, vol. 6, No. 8, p.651-668, DOI:10.1080/19475705.2015.1079265. 2015.
- Kumar, S. V., C. D. Peters-Lidard, Y. Tian, P. R. Houser, J. Geiger, S. Olden, L. Lighty, J. L. Eastman, B. Doty, P. Dirmeyer, J. Adams, K. Mitchell, E. F. Wood and J. Sheffield, 2006. Land Information System - An Interoperable Framework for High Resolution Land Surface Modeling. *Environmental Modelling & Software*, Vol. 21, 1402-1415.
- Kummerow, C.; Barnes, W.; Kozu, T.; Shiue, J.; Simpson, J.; The Tropical Rainfall Measuring Mission (TRMM) Sensor Package. *Notes and Correspondence*, vol.15, p.809-817.1997.
- Larentis, D. G. ; Collischonn, W. ; Tucci, C. E. M. . [Simulação da qualidade de água em grandes bacias: Rio Taquari-Antas, RS](#). *Revista Brasileira de Recursos Hídricos*, v. 13, p. 5-22, 2008.
- Lawrimore, Jay et al. Beginning a new era of drought monitoring across North America. *Bulletin of the American Meteorological Society*, v. 83, n. 8, p. 1191, 2002.
- Leivas, J. F. et al. Monitoramento da seca ocorrida em 2012 no nordeste brasileiro a partir dos dados Spot-Vegetation e TRMM. In:Embrapa Monitoramento por Satélite-Artigo em anais de congresso (ALICE). In: SIMPÓSIO REGIONAL DE GEOPROCESSAMENTO E SENSORIAMENTO REMOTO, 6. 2012, Aracaju. Anais... Aracaju: Embrapa Tabuleiros Costeiros, 2012.
- Li, B., M. Rodell, B. F. Zaitchik, R. H. Reichle, R. D. Koster, and T. M. van Dam (2012), Assimilation of GRACE terrestrial water storage into a land surface model: Evaluation and potential value for drought monitoring in western and central Europe, *J. Hydrol.*, 446, 103–115,doi:10.1016/j.jhydrol.2012.04.035.
- Li,X.; Zhang, Q.; Ye, X.; Dry/Wet Conditions Monitoring Based on TRMM Rainfall Data and Its Reliability Validation over Poyang Lake Basin, China. *Water* ,vol. 5, p.1848-1864; doi:10.3390/w5041848. 2013.
- Liang, X., 1994: A Two-Layer Variable Infiltration Capacity Land Surface Representation for General Circulation Models, *Water Resour. Series*, TR140, 208 pp., Univ. of Washington, Seattle.
- Long, D.; Scanlon, B.R.; Longuevergne, L.; Sun, A.Y.; Fernando, D.N; Save, H.; GRACE satellite monitoring of large depletion in water storage in response to the 2011 drought in Texas. *Geophysical Research Letters*, vol. 40, 3395–3401, 2013. doi:10.1002/grl.50655.
- López, N. G., Escobar, Y. C., & Cerón, W. L. (2016). Análisis de sequías meteorológicas para la cuenca del río Dagua, Valle del Cauca, Colombia. *Tecnura*, 20(48), 101-114.
- Lu,X.; Zhuang, Q.; Evaluating evapotranspiration and water-use efficiency of terrestrial ecosystems in the conterminous United States using MODIS and AmeriFlux data. *Remote Sensing of Environment*, vol.114, p.1924–1939.2010.
- Macedo, M. J. H., GUEDES, R. V. D. S., & SOUSA, F. D. A. S. (2011). Monitoramento e intensidade das secas e chuvas na cidade de Campina Grande/PB. *Revista Brasileira de Climatologia*, 8.

- Marengo, J. A., Nobre, C. A., Tomasella, J., Oyama, M. D., Sampaio de Oliveira, G., De Oliveira, R., ... & Brown, I. F. (2008). The drought of Amazonia in 2005. *Journal of Climate*, 21(3), 495-516.
- Marengo, J. A. (2010). Vulnerabilidade, impactos e adaptação à mudança do clima no semi-árido do Brasil. *Parcerias estratégicas*, 13(27), 149-176.
- Marengo, J. A., Alves, L. M., Beserra, E. A., & Lacerda, F. F. (2011). Variabilidade e mudanças climáticas no semiárido brasileiro. *Medeiros SS, Gheyi HR, Galvão CO, Paz VPS, organizadores. Recursos hídricos em regiões áridas e semiáridas* 28.. *Campina Grande: Instituto Nacional do Semiárido*, 384-422.
- Marengo, J. A., & Espinoza, J. C. (2016). Extreme seasonal droughts and floods in Amazonia: causes, trends and impacts. *International Journal of Climatology*, 36(3), 1033-1050.
- Marx, Andreas et al. The German Drought Monitor. In: EGU General Assembly Conference Abstracts. 2015. p. 5625.
- McKee, T.B., N.J. Doesken and J. Kleist, 1993: The relationship of drought frequency and duration to time scale. In: *Proceedings of the Eighth Conference on Applied Climatology*, Anaheim, California, 17–22 January 1993. Boston, American Meteorological Society, 179–184.
- Menzel, W. Paul; PURDOM, James FW. Introducing GOES-I: The first of a new generation of geostationary operational environmental satellites. *Bulletin of the American Meteorological Society*, v. 75, n. 5, p. 757-781, 1994.
- Mishra, A. K.; Singh, V. P.; A review of drought concepts. *Journal of Hydrology*. 2010. 202-2016.
- Mo, X.; Wu, J.J.; Wang, Q.; Zhou, H.; Variations in water storage in China over recent decades from GRACE observations and GLDAS. *Nat. Hazards Earth Syst. Sci.*, vol.16, p.469–482.2016.
- Modarres, R., 2007: Streamflow drought time series forecasting. *Stochastic Environmental Research and Risk Assessment*, 21: 223–233.
- Morid, Saeid; SMAKHTIN, Vladimir; MOGHADDASI, Mahnosh. Comparison of seven meteorological indices for drought monitoring in Iran. *International journal of climatology*, v. 26, n. 7, p. 971-985, 2006.
- Nalbantis, I. and G. Tsakiris, 2008: Assessment of hydrological drought revisited. *Water Resources Management*, 23(5): 881–897.
- Naumann, G.; Barbosa, P.; Carrao, H.; Singleton, A.; Vogt, J.; Monitoring Drought Conditions and Their Uncertainties in Africa Using TRMM Data. *American Meteorological Society*. DOI: 10.1175/JAMC-D-12-0113.1. 2012.
- Naumann, Gustavo et al. Comparison of drought indicators derived from multiple data sets over Africa. *Hydrology and Earth System Sciences*, v. 18, n. 5, p. 1625-1640, 2014.
- Ndehedehe, C.; Awange, J.; Agutu, N.; Kuhn, M.; Heck, B.; Understanding changes in terrestrial water storage over West Africa between 2002 and 2014. *Advances in Water Resources* vol 88 211–230. (2016).
- Niemeyer S, De Jager A, Kurnik B, Laguardia G, Magni D, Nitcheva O, Rossi S, Weisstiener C. 2009.. Current state of development of the European Drought Observatory. *Geophysical Research Abstracts* 11:EGU2009–12802.
- Nobre, Carlos; Oyama, Marcos Daisuke ; MARENGO, J. A. ; SALATI, E. . Impact of Climate Change Scenarios for 2100 on The Biomes of South America. In: *International CLIVAR Conference*, 2004, Baltimore. Annals. Baltimore: CLIVAR, 2004.
- Overgaard, J., Rosbjerg, D., & Butts, M. B. (2006). Land-surface modelling in hydrological perspective - a review. *Biogeosciences*, 3(2), 229-241.
- Paiva, R.C.D. Modelagem hidrológica e hidrodinâmica de grandes bacias estudo de caso: bacia do rio Solimões. Universidade Federal do Rio Grande do Sul. Instituto de Pesquisas Hidráulicas. Programa de Pós-Graduação em Recursos Hídricos e Saneamento Ambiental. 2009.

- Paredes, F., Millano, J. L., & Guevara, E. (2008). Análisis espacial de las sequías meteorológicas en la región de Los Llanos de Venezuela durante el período 1961-1996. *Revista de Climatología*, 8.
- Parinussa, R.M., V. Lakshmi, F. M. Johnson, and A. Sharma (2016), A new framework for monitoring flood inundation using readily available satellite data, *Geophys. Res. Lett.*, 43, doi:10.1002/2016GL068192.
- Patel, N.R.; Chopra, P.; Dadhwal, V.K.; Analyzing spatial patterns of meteorological drought using standardized precipitation index. *Meteorol. Appl.* 14: 329–336. 2007.
- Pattison, R.R.; Jorgenson, J.C.; Raynolds, M.K; Welker, J.M. Trends in NDVI and Tundra Community Composition in the Arctic of NE Alaska Between 1984 and 2009. *Ecosystems*. vol. 18, 707-719, DOI: 10.1007/s10021-015-9858-9. 2015.
- Pereira, M.; Kayser, R. B.; Collischonn, W. Integração do Modelo Hidrológico para Grandes Bacias MGB-IPH e Sistemas de Informação Geográfica para suporte à decisão de outorga de direito de uso da água. In: Rega: revista de gestión del agua de America Latina. Porto Alegre, RS. Vol. 9, n. 2 (jul./dez. 2012), p. 21-33.
- Peters, A. J., E. A. Walter-Shea, L. Ji, A. Vina, M. Hayes, and M. D. Svoboda (2002), Drought monitoring with NDVI-based standardized vegetation index, *Photogramm. Eng. Remote Sens.*, 68(1), 71–75.
- Peterson, T.C., Hoerling, M.P., Stott, P.A., Herring, S., 2013. Explaining extreme events of 2012 from a climate perspective. *Bull. Am. Meteorol. Soc.* 94, S1–S74.
- Pozzi, Will et al. Toward global drought early warning capability: Expanding international cooperation for the development of a framework for monitoring and forecasting. *Bulletin of the American Meteorological Society*, v. 94, n. 6, p. 776-785, 2013.
- Qu, B.; Zhu, W.; Jia, S.; Lv, A.; Spatio-Temporal Changes in Vegetation Activity and Its Driving Factors during the Growing Season in China from 1982 to 2011. *Remote Sensing*, vol.7, 13729-13752; doi:10.3390/rs71013729.2015.
- Reboita, M.S.; Gan, M.A.; Rocha, R.P.; Ambrizzi, T.; Regimes de Precipitação na América do Sul: Uma Revisão Bibliográfica. *Revista Brasileira de Meteorologia*, v.25, n.2, 185-204, 2010.
- Rhee, J.; Im, J.; Carbone, G.J.; Monitoring agricultural drought for arid and humid regions using multi-sensor remote sensing data. *Remote Sensing of Environment*, vol. 114, p. 2875–2887. 2010.
- Rodell, M.; Famiglietti, J.S.; An analysis of terrestrial water storage variations in Illinois with implications for the Gravity Recovery and Climate Experiment (GRACE). *Water Resources Research*, Vol. 37, No. 5, Pages 1327-1339. 2001.
- Rodell, M., P. R. Houser, U. Jambor, J. Gottschalck, K. Mitchell, C.-J. Meng, K. Arsenault, B. Cosgrove, J. Radakovich, M. Bosilovich, J. K. Entin, J. P. Walker, D. Lohmann, and D. Toll, 2004. The Global Land Data Assimilation System, *Bull. Amer. Meteor. Soc.*, 85(3): 381-394.
- Rubel, F., and M. Kottek, 2010: Observed and projected climate shifts 1901-2100 depicted by world maps of the Köppen-Geiger climate classification. *Meteorol. Z.*, 19, 135-141. DOI: 10.1127/0941-2948/2010/0430.
- Rudorff, B.F.T; Shimabukuro, Y.E.; Ceballos, J.C.; O Sensor Modis sua aplicações ambientais no Brasil. Primeira edição. São José dos Campos: Editora Parênteses, 2007.
- Saha, S., Moorthi, S., Pan, H.-L., Wu, X., Wang, J., Nadiga, S., et al. 2010. The NCEP Climate Forecast System reanalysis. *Bull. Amer. Meteor. Soc.*, vol. 91, p. 1015–1057.
- Saleska, S. R., K. Didan, A. R. Huete, and H. R. da Rocha (2007), Amazon forests green-up during 2005 drought, *Science*, 318(5850), 612, doi:10.1126/science.1146663. forests green-up during 2005 drought, *Science*, 318(5850), 612,
- Samanta, A., Ganguly, S., Hashimoto, H., Devadiga, S., Vermote, E., Knyazikhin, Y., ... & Myneni, R. B. (2010). Amazon forests did not green-up during the 2005 drought. *Geophysical research letters*, 37(5).

- Sansigolo, C. A. (2004). Análise comparativa do desempenho dos Índices de Seca de Palmer (PDSI) e da Precipitação Normalizada (SPI) em Piracicaba, SP (1917–2001). *Revista Brasileira de Meteorologia*, 19(1), 51-56.
- Sarricolea, P., & Meseguer-Ruiz, Ó. (2016). Sequías en Chile central a partir de diferentes índices desde 1824.
- Sawada, Y., Koike, T., & Jaranilla-Sanchez, P. A. (2014). Modeling hydrologic and ecologic responses using a new eco-hydrological model for identification of droughts. *Water Resources Research*, 50(7), 6214-6235.
- Schmidt,R.;Schwintzer,P.;Flechtner,; Reigber,CH,Guntner,A.; Doll,P.; Ramillien,G.; Cazenave, A.; Petrovic, S.; Jochmann,H.; Wunsch,J.; GRACE observations of changes in continental water storage. *Global and Planetary Change*, vol.50, p.112– 126.2006.
- Schnur, M.T.; Xie, H.; Wang, X.; Estimating root zone soil moisture at distant sites using MODIS NDVI and EVI in a semi-arid region of southwestern USA. *Ecological Informatics*, vol. 5 p.400–409. 2010.
- Schwanenberg, Dirk., Fan, Fernando Mainardi., Naumann, Steffi., Kuwajima, Julio Issao., Montero, Rodolfo Alvarado., Assis dos Reis, Alberto. 2015. Short-Term Reservoir Optimization for Flood Mitigation under Meteorological and Hydrological Forecast Uncertainty. *Water Resources Management*, 0920-4741, 1-17, <http://dx.doi.org/10.1007/s11269-014-0899-1>.
- Sepulcre, Guadalupe et al. Development of a Combined Drought Indicator to detect agricultural drought in Europe. *Natural Hazards and Earth System Sciences*, v. 12, n. 11, p. 3519-3531, 2012.
- Sheffield, Justin et al. A drought monitoring and forecasting system for sub-Saharan African water resources and food security. *Bulletin of the American Meteorological Society*, v. 95, n. 6, p. 861-882, 2014.
- Sivakumar, M.V.K., 2012. High-level Meeting on National Drought Policy. CSA News, December. American Society of Agronomy, Madison, Wisconsin, USA.
- Spennemann, Pablo C. et al. A comparison of GLDAS soil moisture anomalies against standardized precipitation index and multisatellite estimations over South America. *Journal of Hydrometeorology*, v. 16, n. 1, p. 158-171, 2015.
- Svoboda, M. MJ Hayes, DA Wilhite, T Tadesse. Recent advances in drought monitoring Drought Mitigation Center Faculty Publications, 6.
- Swenson,S.; Yeh,P.J.F.; Whar, J.; Famiglietti, J.; A comparison of terrestrial water storage variations from GRACE with in situ measurements from Illinois. *Geophysical Research Letters*, Vol. 33, L16401, doi: 10.1029/2006GL026962. 2006.
- Tang, G., Ma, Y., Long, D., Zhong, L., & Hong, Y. (2016). Evaluation of GPM Day-1 IMERG and TMPA Version-7 legacy products over Mainland China at multiple spatiotemporal scales. *Journal of Hydrology*, 533, 152-167.
- Tapley, B.D.; Bettadpur,S.; Watkins, M.; Reigber, C.; The gravity recovery and climate experiment: Mission overview and early results. *Geophysical Research Letters*, vol. 31. DOI: 10.1029/2004GL019920. 2004.
- Tian, Y., & Peters-Lidard, C. D. (2010). A global map of uncertainties in satellite-based precipitation measurements. *Geophysical Research Letters*, 37(24).
- Tian, F.; Brandt, M.; Liu, Y.Y; Verger, A.; Tagesson, T.; Diouf, A.A.; Rasmussen, K.; Mbow, C.; Wang, Y.; Fensholt, R.; Remote sensing of vegetation dynamics in drylands: Evaluating vegetation optical depth (VOD) using AVHRR NDVI and in situ green biomass data over West African Sahel. *Remote Sensing of Environmen*, vol 177, 256-276. 2016.
- Trambauer,P.; Maskey, P.; Winsemius, H.; Werner, M.; Uhlenbrook, S.; A review of continental scale hydrological models and their suitability for drought forecasting in (sub-Saharan) Africa. *Physics and Chemistry of the Earth*, vol. 66, p.16-26.2013.
- Tschoegl, L., Below, R., and Guha-Sapir, D.: An Analytical Review of Selected Data Sets on Natural Disasters and Impacts, Paper prepared for the UNDP/CRED Workshop on improving Compilation of Reliable Data on Disaster Occurrence and Impact, UNDP/CRED, Bangkok, 21 pp., 2006

Tucker, C.J.; Pinzon, J.E.; Brown, M.E.; Slatback, D.A.; Pak, E.W.; Mahoney, R.; Vermote, E.F.; Saleous, N.E.; Na Extended AVHRR 8km NDVI dataset compatible with MODIS and SPOT vegetation NDVI data. *International Journal of Remote Sensing*, vol.26, p.4485-4498. 2005.

UN Secretariat General, 1994. *United Nations Convention to Combat Drought and Desertification in Countries Experiencing Serious Droughts and/or Desertification, Particularly in Africa*. Paris.

UNISDR. 2011. *Global Assessment Report on Disaster Risk Reduction*. Geneva, Switzerland.

Vancutsem, C.; Ceccato, P.; Dinku, T.; Connor, S.J.; Evaluation of MODIS land surface temperature data to estimate air temperature in different ecosystems over Africa. *Remote Sensing of Environment*, vol.114, p.449–465. 2010.

Van Loon, A. F., & Van Lanen, H. A. J. (2012). A process-based typology of hydrological drought. *Hydrology and Earth System Sciences*, 16(7), 1915.

Van Loon, A. F., Van Lanen, H. A., Hisdal, H. E. G. E., Tallaksen, L. M., Fendeková, M., Oosterwijk, J., ... & Machlica, A. (2010). Understanding hydrological winter drought in Europe. *Global Change: Facing Risks and Threats to Water Resources, IAHS Publ*, 340, 189-197.

Velicogna, I.; Increasing rates of ice mass loss from the Greenland and Antarctic ice sheets revealed by GRACE. *Geophysical Research Letters*, Vol. 36, L19503, doi:10.1029/2009GL040222.2009.

Vlachos, e. C. 1982. *Drought management interfaces*. Annual ASCE Conference, Las Vegas, USA.

Vicario, L., García, C. M., Teich, I., Bertoni, J. C., Ravelo, A., & Rodríguez, A. (2015). Caracterización de las sequías meteorológicas en la región central de la Argentina. *Tecnología y ciencias del agua*, 6(1), 153-165.

Vicente-Serrano, S. M., Chura, O., López-Moreno, J. I., Azorin-Molina, C., Sanchez-Lorenzo, A., Aguilar, E., ... & Nieto, J. J. (2015). Spatio-temporal variability of droughts in Bolivia: 1955–2012. *International Journal of Climatology*, 35(10), 3024-3040.

Xu, J. J., & Yang, D. W. (2010). New model for drought estimation and prediction based on distributed hydrological simulation. *Shuili Xuebao(Journal of Hydraulic Engineering)*, 41(6), 739-747.

Wagener, T.; Franks, S. 2005. *Regional Hydrological impacts of climate change – impact assessment and decision making*. In: *Regional Hydrological Impacts of Climate Change Impact Assessment and Decision Making*. IAHS Publi.295, 1 – 8pp.

Wang, D., Morton, D., Masek, J., Wu, A., Nagol, J., Xiong, X., ... & Wolfe, R. (2012). Impact of sensor degradation on the MODIS NDVI time series. *Remote Sensing of Environment*, 119, 55-61.

Wardlow, B. D., Anderson, M. C., & Verdin, J. P. (2012). *Remote sensing of drought: Innovative monitoring approaches*. CRC Press.

Weiland, Maristani. "Agricultores sofrem com a seca no RS". Janeiro, 2012. Disponível em: <http://g1.globo.com/rs/rio-grande-do-sul/noticia/2012/01/agricultores-sofrem-com-seca-no-rs-nao-temos-agua-para-tomar.html>

Wilhite, D. A., and Glantz, M. H. (1985) "Understanding the drought phenomenon: The role of definitions," *Water International* 10: 111–20.

Wilhite, D. A., Drought as a natural hazard: Conceptions and definitions. In: WILHITE, D. A. *Drought: A global assessment*. Nebraska: Routledge, 2000. p. 111 – 120.

Wilhite, D.A., 1992. *Preparing for Drought: A Guidebook for Developing Countries*, Climate Unit, United Nations Environment Program, Nairobi, Kenya.

Wilhite, D.A., "Chapter 1 Drought as a Natural Hazard: Concepts and Definitions" (2000). *Drought Mitigation Center Faculty Publications*. Paper 69.

- Wilhite, D.A.; Sivakumar, M.V.K; Pulwarty, R.; Managing drought risk in changing climate: the role of national drought policy. *Weather And Climate Extremes*, vol.3, p 4-13. 2014.
- WMO. 2009. Lincoln declaration on drought indices. World Meteorological Organization (WMO)<http://www.wmo.int/pages/prog/wcp/agm/meetings/wies09/documents/Lincoln_Declaration_Drought_Indices.pdf> (accessed 22 April 2011).
- World Meteorological Organization, 2012: Standardized Precipitation Index User Guide (M. Svoboda, M. Hayes and D. Wood). (WMO-No. 1090), Geneva.
- Wouters, B.; Chambers, D.; Scharama, E.J.O; GRACE observes small-scale mass loss in Greenland. *Geophysical Research Letters*, Vol. 35, L20501, doi:10.1029/2008GL034816.2008.
- Wu, H.; Svoboda, M.D.; Hayes, M.J.; Wilhite, D.A.; We, F.; Appropriate application of the Standardized Precipitation Index in arid locations and dry seasons. *INTERNATIONAL JOURNAL OF CLIMATOLOGY*, vol.27, p-65-79. 2007.
- Wu,J.; Zhou, L.; Liu, M.; Zhang, J.; Leng, S.; Diao, C.; Establishing and assessing the Integrated Surface Drought Index (ISDI) for agricultural drought monitoring in mid-eastern China. *International Journal of Applied Earth Observation and Geoinformation*, vol.23, p.397–410.2012.
- Yan,N.; Wu, B.; Chang, S.; Bao, X.; Evaluation of TRMM Precipitation Product for Meteorological Drought Monitoring in Hai Basin. 35th International Symposium on Remote Sensing of Environment (ISRSE35), doi:10.1088/1755-1315/17/1/012093. 2014.
- Yan, N.; Wu, B.; Boken, V.K.; Chang,S.; Yang, L.; A drought monitoring operational system for China using satellite data: design and evaluation. *Geomatics, Natural Hazards and Risk*, vol. 7, no. 1, p. 264–277, <http://dx.doi.org/10.1080/19475705.2014.895964>. 2016
- Yaduvanshi, aradhana; srivastava, prashant k.; pandey, a. C. Integrating trmm and modis satellite with socio-economic vulnerability for monitoring drought risk over a tropical region of india. *Physics and chemistry of the earth, parts a/b/c*, v. 83, p. 14-27, 2015.
- Yuan, x.; li,l.; chen, x.; shi,h.; Effects of precipitation intensity and temperature on ndvi-based grass change over northern china during the period from 1982 to 2011. *Remote sensing*, vol.7, 10164-10183; doi: 10.3390/rs70810164. 2015.
- Zaitchik, B. F., Rodell, M., & Olivera, F. (2010). Evaluation of the Global Land Data Assimilation System using global river discharge data and a source-to-sink routing scheme. *Water Resources Research*, 46(6).
- Zarch, m.a.a.; sivakumar, b.; sharma, a.; droughts in a warming climate: a global assessment of standardized precipitation index (spi) and reconnaissance drought index (rdi). *Journal of hydrology*, vol. 526, p.183–195. 2015.
- Zanvetto, R., & Ravelo, A. (2000). Using the SPI to monitor the 1999-2000 drought in Northeastern Argentina.
- Zeng N, Yoon JH, Marengo JA, Subramaniam A, Nobre CA, Mariotti A, Neelin D. 2008. Causes and impacts of the 2005 Amazon drought. *Environ. Res. Lett.* 3: 014002, doi: 10.1088/1748-9326/3/1/014002.
- Zhang, A.; Jia, G.; Monitoring meteorological drought in semiarid regions using multi-sensor microwave remote sensing data. *Remote sensing of environment*, vol. 134, p. 12–23.2013.
- Zhang, j.; mu, q.; huang, j.; Assessing the remotely sensed drought severity index for agricultural drought monitoring and impact analysis in north china. *Ecological indicators*, vol.63, p.296–309.2016.
- Zhang, x.; friedl, m.a.; schaaf, c.b; strahler, a.h.; hodge, j.c.f; gao, f.; reed, b.c; huete, a.; Monitoring vegetation phenology using modis. *Remote sensing of environment*, vol.84, p. 471–475. 2003.
- Zhang, z. Et al. Terrestrial water storage anomalies of yangtze river basin droughts observed by grace and connections with enso. *Global and planetary change*, v. 126, p. 35-45, 2015.
- Zhou,d.; zhao, s.; zhang, l.; liu, s.; remotely sensed assessment of urbanization effects on vegetation phenology in china's 32 major cities. *Remote sensing of environment*, vol.176, p. 272–281.2016.

Zierl, B. (2001). A water balance model to simulate drought in forested ecosystems and its application to the entire forested area in Switzerland. *Journal of Hydrology*, 242(1), 115-136.