UNIVERSIDADE FEDERAL DE PERNAMBUCO
CENTRO DE TECNOLOGIA E GEOCIÊNCIAS
DEPARTAMENTO DE ENGENHARIA CIVIL E AMBIENTAL
PROGRAMA DE PÓS-GRADUAÇÃO EM ENGENHARIA CIVIL

CLÁUDIA RICARDO DE OLIVEIRA

MODELAGEM ESPAÇO-TEMPORAL E ANÁLISE DE CENÁRIOS DO USO DA ÁGUA PARA IRRIGAÇÃO NO TRECHO SUBMÉDIO DA BACIA HIDROGRÁFICA DO RIO SÃO FRANCISCO

Recife
2019

CLÁUDIA RICARDO DE OLIVEIRA

MODELAGEM ESPAÇO-TEMPORAL E ANÁLISE DE CENÁRIOS DO USO DA ÁGUA PARA IRRIGAÇÃO NO TRECHO SUBMÉDIO DA BACIA HIDROGRÁFICA DO RIO SÃO FRANCISCO

Tese apresentada ao Programa de Pós-Graduação em Engenharia Civil da Universidade Federal de Pernambuco, como requisito parcial para a obtenção do título de doutora em Engenharia Civil.

Área de Concentração: Tecnologia Ambiental e Recursos Hídricos.

Orientadora: Profa. Dra. Maria do Carmo Martins Sobral.

Coorientador: Prof. Dr. Hagen Koch.

Recife

2019

Catalogação na fonte
Bibliotecária Margareth Malta, CRB-4 / 1198

O48m Oliveira, Cláudia Ricardo de.
Modelagem espaço-temporal e análise de cenários do uso da água para irrigação no trecho submédio da bacia hidrográfica do Rio São Francisco / Cláudia Ricardo de Oliveira. - 2019.
197 folhas, il., gráfs., tabs.

Orientadora: Profa. Dra. Maria do Carmo Martins Sobral.
Coorientador: Prof. Dr. Hagen Koch.
Tese (Doutorado) – Universidade Federal de Pernambuco. CTG. Programa de Pós-Graduação em Engenharia Civil, 2019.
Inclui Referências e Apêndice.

1. Engenharia Civil. 2. Semiárido. 3. Reservatório. 4. Gestão das águas. 5. Agricultura irrigada. I. Sobral, Maria do Carmo Martins. (Orientadora). II. Koch, Hagen. (Coorientador). III. Título.

UFPE

624 CDD (22. ed.) BCTG/2019-379

CLÁUDIA RICARDO DE OLIVEIRA

MODELAGEM ESPAÇO-TEMPORAL E ANÁLISE DE CENÁRIOS DO USO DA ÁGUA PARA IRRIGAÇÃO NO TRECHO SUBMÉDIO DA BACIA HIDROGRÁFICA DO RIO SÃO FRANCISCO

Tese apresentada ao Programa de Pós-Graduação em Engenharia Civil da Universidade Federal de Pernambuco, como requisito parcial para a obtenção do título de Doutor em Engenharia Civil.

Aprovada em: 05 / 09 / 2019.

BANCA EXAMINADORA

Profa. Dra. Maria do Carmo Martins Sobral (Orientadora)
Universidade Federal de Pernambuco

Prof. Dr. Hagen Koch (Coorientador)
Potsdam Institute for Climate Impact Research -PIK

Profa. Dra. Sylvana Melo dos Santos (Examinadora Interna)
Universidade Federal de Pernambuco

Prof. Dr. Wanderli Rogério Moreira Leite (Examinador Interno)
Universidade Federal de Pernambuco

Profa. Dra. Ana Lúcia Bezerra Candeias (Examinadora Externa)
Universidade Federal de Pernambuco

Prof. Dr. João Rodrigues Tavares Júnior (Examinador Externo)
Universidade Federal de Pernambuco

Dedico

À minha família, em especial à minha mãe Miriam de Oliveira pela confiança, dedicação e orações em mim depositadas.

A todos os professores que passaram pela minha vida e contribuíram para o ser que hoje sou.

AGRADECIMENTOS

Agradeço, primeiramente à DEUS, pela minha existência, pelo amor incondicional e cuidado e oportunidades para alcançar os meus objetivos, sempre traçados ao lado de pessoas especiais.

À minha família, em especial à minha mãe Miriam de Oliveira, pelo apoio incondicional e exemplo de superação durante toda minha vida.

Aos meus irmãos, Cristiana, Fabiana e Samuel, pelo carinho e companheirismo em todos os momentos da minha vida.

A Marcílio André da Paz, pelo apoio, admiração e confiança, que DEUS retribua toda sua dedicação.

À minha orientadora profa. Dra. Maria do Carmo Sobral, pelos ensinamentos e confiança na condução dessa pesquisa.

Ao Dr. Hagen Koch pela orientação e apoio para realização desse trabalho.

À Dra. Érika Marques pela amizade e apoio incondicional durante a pesquisa.

Aos amigos e colegas do Grupo de Pesquisa em Gestão Ambiental da UFPE: Ariane Cardoso, Ana Helena Coelho, Janaína Oliveira, Gérsica Nogueira, Hidaiane Caldas, Danielle Martins e Oziel Pedroza pela convivência diária.

Aos amigos do doutorado em engenharia civil, área de concentração recursos hídricos: Jussara Freire, Gabrielle Saraiva, Andreza Felix, Tereza Dutra, Ana Cláudia Luna, Larissa Batista, Bruno Silva e Edinilson Castro por todas as boas lembranças e amizade.

Aos professores do Programa de Pós-Graduação em Engenharia Civil (PPGEC) da UFPE da Área de Tecnologia Ambiental e Recursos Hídricos, pelos ensinamentos e experiências compartilhadas.

Aos membros da banca examinadora: Dra. Ana Lúcia Candeias, Dra. Sylvana Santos, Dr. João Luiz e Dr. Wanderli Leite por disporem seu tempo para auxiliar no aprimoramento desta pesquisa.

Às secretárias do Programa de Pós-Graduação em Engenharia Civil: Andrea Negromonte, Claudiana Araújo e Cleide Lucwu pela assistência constante.

À Coordenação de Aperfeiçoamento de Pessoal de Nível Superior – CAPES pelo financiamento da bolsa de estudos para realização deste doutorado.

À Agência Nacional de Águas – ANA pela disponibilização dos dados de precipitação e outorgas.

À *National Aeronautics and Space Administration* - NASA, ao *United States Geological Survey* - USGS e ao Instituto Nacional de Pesquisas Espaciais - INPE, pela disponibilização das imagens de satélites.

Ao_Potsdam Institute for Climate Impact Research – PIK pela disponibilização do modelo Eco-hidrológico SWIM.

A todas instituições públicas e privadas que colaboraram para o desenvolvimento dessa pesquisa.

A todos aqueles que direta ou indiretamente tem cooperado para o fecho desta tese de doutorado, minha profunda gratidão.

Confie no Senhor de todo o seu coração
e não se apoie em seu próprio entendimento;

(*Provérbios 3:5)*

RESUMO

A crise hídrica que vem ocorrendo no Brasil está causando impactos na economia e na qualidade de vida da população, principalmente na região sermiárida onde os conflitos entre os usuários pelos usos múltiplos da água são cada vez mais existentes. A região semiárida do Brasil vive um drama de escassez de suas fontes hídricas e risco de desabastecimento de água por seus reservatórios. Diante desse cenário, o objetivo geral do estudo é modelar espaço-temporalmente e analisar cenários de uso da água para irrigação no trecho Submédio da Bacia Hidrográfica do São Francisco. A partir da identificação dos períodos críticos ocorridos no Submédio do São Francisco, foi observado que apesar da existência de anos mais úmidos, houve tendência negativa da precipitação ao longo do período estudado (1970 – 2014). Apesar da ocorrência desses eventos, os episódios de seca foram mais frequentes, principalmente a partir da década de 90, destacando-se os anos de 1993 e 2012, classificados como extremamente secos. A avaliação da demanda de água para os diferentes usuários na área de estudo se deu a partir da análise das outorgas concedidas pela Agência Nacional de Águas – ANA. Neste sentido, foram identificadas que as técnicas de irrigação que apresentaram os maiores consumos de água foram os métodos de irrigação por superfície (sulcos de infiltração), enquanto os menores foram obtidos nos sistemas auto-propelido e por inundação para o estado da Bahia no trecho Submédio São Francisco. Já em relação à avalição da qualidade de água no trecho principal da bacia, dos cinco parâmetros analisados, todos apresentaram inconformidade em relação a Resolução CONAMA Nº 357/2005. Ao delimitar as áreas irrigadas em função do uso e ocupação do solo, a classe Caatinga densa foi a mais impactada, além disso, houve um decréscimo dos corpos hídricos, passando de 7% para 5%. Foram construídos três cenários de demandas hídricas e operação dos reservatórios, sendo descritos como: Cenário 1 Vazão referência, avaliado como o mais vantajoso em atender as demandas requeridas; o Cenário 2: Vazão ambiental/ecológica, considerado o mais restritivo em relação ao atendimento das demandas e o Cenário 3: Vazão crítica, identificado como o mais coerente em relação a atual situação da bacia. Os resultados das simulações indicaram que apesar dos três cenários assumirem configurações distintas, a oferta da vazão estaria abaixo da demanda atual.

Palavras-chave: Semiárido. Reservatório. Gestão das águas. Agricultura irrigada.

ABSTRACT

The water crisis that has been occurring in Brazil is impacting the economy and the quality of life of the population, especially in the sermiarid region where conflicts between users over multiple water uses are increasingly existing. The semiarid region of Brazil is experiencing a drama of scarcity of its water sources and risk of water shortage by its reservoirs. Given this scenario the general objective of the study is to model spatiotemporally the use of water for irrigation in the Sub_Middle stretch of the São Francisco Watershed. From the identification of the critical periods occurred in the Sub-Middle São Francisco, it was observed that despite the existence of wetter years, there was a negative trend of precipitation over the period studied (1970 - 2014). Despite the occurrence of these events, drought episodes were more frequent, especially since the 1990s, especially 1993 and 2012, classified as extremely dry. The evaluation of water demand for the different users in the study area was based on the analysis of the grants granted by the National Water Agency – ANA. The irrigation techniques that presented the highest water consumption were the surface irrigation methods (infiltration furrows), while the smallest ones were obtained in the self-propelled and flooding systems for the state of Bahia in the Sub-Middle São Francisco stretch. Regarding the evaluation of water quality in the main stretch of the basin, of the five analyzed parameters, all presented non-compliance with CONAMA Resolution Nº. 357/2005. By delimiting the irrigated areas according to land use and occupation, the dense Caatinga class was the most impacted. In addition, there was a decrease in water bodies from 7% to 5%, especially in the area where it is located. inserted the reservoir of Sobrainho. Three scenarios of water demands and reservoir operation were built, being described as: Scenario 1 Reference flow, evaluated as the most advantageous in meeting the required demands; o Scenario 2: Environmental / ecological flow, considered the most restrictive in relation to meeting the demands and Scenario 3: Critical flow, identified as the most coherent in relation to the current situation of the basin. Simulation results indicated that although the three scenarios assume different configurations, the flow supply would be below the current demand.

Keywords: Semiarid. Reservoir. Water management. Irrigated agriculture

LISTA DE FIGURAS

Figura 1 - Localização da Bacia Hidrográfica do rio São Francisco..... 25

Figura 2 - Barragem de Sobradinho..... 27

Figura 3 - Vazão defluente do reservatório de Sobradinho autorizada pelo MMA..... 28

Figura 4 - Reservatório de Luiz Gonzaga - Itaparica -PE..... 29

Figura 5 - Localização dos reservatórios de Sobradinho e Itaparica no Submédio São Francisco..... 30

Figura 6 - Distribuição espacial da precipitação pluviométrica anual no Submédio São Francisco..... 31

Figura 7 - Vegetação Caatinga às margens do lago de Sobradinho – BA..... 32

Figura 8 - Principais classes de solo da Bacia Hidrográfica do Submédio São Francisco..... 33

ARTIGO 1

Figura 1 - Histórico da vazão afluente dos reservatórios de Sobradinho e Itaparica entre o período de 1999 e 2019..... 46

Figura 2 - Histórico da geração de energia elétrica dos reservatórios de Sobradinho e Itaparica entre o período de 1999 e 2019..... 47

Figura 3 - Distribuição espacial das estações pluviométricas da ANA no SMSF..... 54

Figura 4 - Distribuição espacial das estações pluviométricas (centro das células) EU-*Watch* no SMSF..... 55

Figura 5 - Série temporal de dados pluviométricos regional para SMSF..... 59

Figura 6 - Série temporal de dados pluviométricos global para o SMSF..... 59

Figura 7 - Números de eventos climáticos ocorridos a partir da precipitação regional no SMSF de 1970-2014..... 60

Figura 8 - Números de eventos climáticos ocorridos no SMSF a partir da precipitação global de 1981 – 2013..... 61

Figura 9 - Distribuição da precipitação por célula..... 63

Figura 10 - Distribuição Espacial da Precipitação Média do SPI no trecho do SMSF..... 64

ARTIGO 2

Figura 1 - Proposta de enquadramento da Bacia do São Francisco, por região fisiográfica, realizado pela ANA/GEF/Pnuma/OEA (2004)..... 78

Figura 2 -	Distribuição da vazão.....	81
Figura 3 -	Plantação de culturas irrigadas no trecho Submédio da Bacia do São Francisco.....	83
Figura 4 -	Plantação de uva na fazenda Agrobrás localizada na cidade de Casa Nova – BA.....	84
Figura 5 -	Plantação de manga na fazenda Agrobrás localizada na cidade de Casa Nova – BA.....	84
Figura 6 -	Percentual da categoria dos empreendimentos no SMSF.....	85
Figura 7 -	Procedimento metodológico.....	89
Figura 8 -	Concentração dos usuários outorgantes e os pontos de monitoramento da qualidade da água ao longo no SMSF.....	91
Figura 9 -	Número de outorgas liberadas e as suas respectivas culturas em municípios na Bahia e Pernambuco no SMSF.....	93
Figura 10 -	Número de outorgas liberadas por usuários para Bahia no trecho no SMSF.....	94
Figura 11 -	Número de outorgas liberadas por usuários no estado de Pernambuco no trecho SMSF.....	94
Figura 12 -	Vazão outorgada por usuários nos estados de Pernambuco e Bahia no trecho SMSF.....	95
Figura 13 -	Vazão outorgada por usuários nos estados de Pernambuco e Bahia no trecho SBHSF.....	96
Figuras 14	Demanda de água por culturas para o usuário individual.....	97
Figuras 15	Demanda de água por método de irrigação para o usuário institucional	98
Figura 16 -	Demanda de água por culturas para o usuário institucional.....	99
Figura 17 -	Demanda de água por método de irrigação para o usuário empresarial.....	100
Figura 18 -	Demanda de água por culturas para o usuário empresarial	101
Figura 19 -	Sistemas de irrigação por gotejamentor utilizado na cultura de uva na empresa Agrobras.....	102
Figura 20 -	Sistemas de irrigação por difusor utilizado na cultura de manga na empresa Agrobras	102
Figura 21 -	Demanda de água por culturas para as associações ou cooperativas ..	103
Figura 22 -	Demanda de água por culturas para as associações ou cooperativas	103
Figura 23 -	Ano de vencimento de outorgas por usuário no estado da Bahia no SMSF.....	105

Figura 24 - Ano de vencimento de outorgas por usuário no estado da Pernambuco no SMSF..... 105
Figura 25 - Ano de vencimento de outorgas por categoria no estado da Bahia no SMSF..... 105
Figura 26 - Ano de vencimento de outorgas autorizadas por categoria no estado da Pernambuco SMSF..... 105
Figura 27 - Diagrama unifilar da área de estudo..... 106
Figura 28 – Variação sazonal da qualidade da água no trecho SMSF..... 108

ARTIGO 3

Figura 1 - Composição das cenas para o SMSF..... 129
Figura 2 - Fluxograma metodológico para classificação e quantificação dos usos do solo..... 130
Figura 3 - Mosaicos utilizados para classificação do uso e ocupação do solo 133
Figura 4 - Fluxograma metodológico para obtenção do NDVI..... 134
Figura 5 - Planilha elaborada para correção radiométrica das imagens do satélite Landsat 5..... 138
Figura 6 - Análise da consistência das imagens satélite Landsat 5..... 138
Figura 7 - Planilha elaborada para calcular a reflectância das imagens do satélite Landsat 8..... 140
Figura 8 - Análise da consistência das imagens Landsat 8..... 141
Figura 9 - Padrões de derterminação do NDVI..... 142
Figura 10 - Análise espaço-temporal do comportamento do NDVI no trecho do SMSF..... 143
Figura 11 - Mapa de elevação da área de estudo (m)..... 146
Figura 12 - Análise temporal do uso e ocupação do solo no SMSF..... 148
Figura 13 - Variação temporal do uso do solo..... 150
Figura 14 - Localização das áreas em processo de desertificação, dos perímetros irrigados e retiradas de água no trecho SMSF..... 154

ARTIGO 4

Figura 1 - Modelo semidistribuído, baseado no SIG, com esquema de desagregação em três níveis..... 159
Figura 2 - Estrutura do modelo SWIM..... 160
Figura 3 - Procedimento metodológico para obtenção dos cenários no modelo SWIM na bacia do rio São Francisco..... 161

Figura 4 - Planilha para correção dos volumes outorgados pela ANA para os usuários de irrigação no estado da Bahia..... 162
Figura 5 - Evolução entre a oferta e as demandas de água e as medidas de gestão para alcançar o uso sustentável da água..... 163
Figura 6 - Captações de água com autorização..... 164
Figura 7 - Captações de água sem autorização..... 164
Figura 8 - Vazão defluente do reservatório de Sobradinho autorizada pelo MMA..... 165
Figura 9 - Relação entre as descargas e as vazões mínimas ambientais..... 167
Figura 10 - Resultado da simulação do Cenário 1 – Vazão de referência para o trecho do SMSF..... 169
Figura 11 - Histórico das vazões médias defluentes para os reservatórios de Sobradinho e Itaparica..... 170
Figura 12 - Resultado da simulação do Cenário 2 – Vazão ambiental/ecológica para o trecho do SMSF..... 171
Figura 13 - Resultado da simulação do Cenário 3 – Vazão crítica para o trecho do SMSF..... 172
Figura 14 - Resultado das simulações para o trecho do SBSF..... 173

LISTA DE QUADROS

ARTIGO 1

Quadro 1-	Índices de seca meteorológica e suas principais características.....	43
Quadro 2 -	Principais ações desenvolvidas por órgãos no Brasil para diminuir o impacto da seca na região semiárida brasileira.....	49
Quadro 3 -	Postos pluviométricos da ANA analisados com indicação de sua localização e histórico disponível.....	50
Quadro 4 -	Postos pluviométricos globais (centro das células) disponibilizados pelo *Watch* para área de estudo.....	53
Quadro 5 -	Classificação dos períodos secos e chuvosos do SPI.....	68

ARTIGO 2

Quadro 1 -	Prazos de vigência das outorgas.....	75
Quadro 2 -	Classes de uso de águas doces.....	77
Quadro 3 -	Eficiência dos métodos de irrigação estabelecidos pela ANA.....	88
Quadro 4 -	Localização dos pontos de monitoramento da qualidade da água....	90

ARTIGO 3

Quadro 1 -	Parâmetros orbitais do satélite Landsat 5.....	117
Quadro 2 -	Principais características e aplicações do sensor TM.....	118
Quadro 3 -	Principais características e aplicações do satélite Landsat 8.....	119
Quadro 4 -	Descrição das classes de uso do solo utilizadas no mapeamento.....	126
Quadro 5 -	Agrupamento qualitativo do coeficiente Kappa.....	127
Quadro 6 -	Coeficientes de calibração para as bandas espectrais do satélite Landsat 5.....	131

ARTIGO 4

Quadro 1 -	Tipos de modelos, características e usos na modelagem hidrológica.....	158

LISTA DE TABELAS

ARTIGO 1

Tabela 1- Classificação do SPI - PR com a duração do evento..... 62

Tabela 2 - Classificação do SPI - PG com a duração do evento..... 62

ARTIGO 2

Tabela 1 - Eficiência dos métodos de irrigação estabelecidos pela ANA..... 79

Tabela 2 - Número de outorgas nos estados e municípios pertencentes ao Submédio São Francisco..... 92

ARTIGO 3

Tabela 1 - Descrição das imagens Landsat a serem utilizadas..... 123

Tabela 2 - Cenas do Satélite Landsat 5 utilizadas para obtenção do NDVI... 130

Tabela 3 - Cenas do Satélite Landsat 8 utilizadas para obtenção do NDVI... 130

Tabela 4 - Valores de reflectância para as bandas 4 e 5..... 135

Tabela 5 - Levamento quantitativo do uso do solo nos anos de eventos críticos..... 142

Tabela 6 - Matriz de erro gerada para o recorte 1988_216_66..... 150

Tabela 7 - Resumo do desempenho das matrizes de confusão gerada para classificação supervisionada..... 151

ARTIGO 4

Tabela 1 - Vazões ambientais utilizadas no modelo SWIM..... 167

LISTA DE ABREVIATURAS E SIGLAS

ANA	Agência Nacional de Águas
ANEEL	Agência Nacional de Energia Elétrica
APP	Área de Preservação Permanente
BA	Bahia
BHSF	Bacia Hidrográfica do Rio São Francisco
BMDI	*Bhalme & Mooley Drought Index*
CBHSF	Comitê de Bacia Hidrográfica do Rio São Francisco
CNARH	Nacional de Usuários de Recursos Hídricos
CNRH	Conselho Nacional de Recursos Hídricos
COBH	Comitê de Bacia Hidrográfica
CODEVASF	Companhia de Desenvolvimento dos Vales do São Francisco e Parnaíba
CONAMA	Conselho Nacional de Meio Ambiente
CPRH	Agência Estadual de Meio Ambiente
CPRM	Companhia de Pesquisa de Recursos Minerais
DBO	Demanda Bioquímica de Oxigênio
DEM's	*Digital Elevation Models*
DNOCS	Departamento Nacional de Obras Contra as Secas
DRDH	Declaração de Reserva de Disponibilidade Hídrica
EDI	*Effective Drought Index"*
EMBRAPA	Empresa Brasileira de Pesquisa Agropecuária
ENOS	El Niño Oscilação Sul
ETCCDMI	Expert Team on Climate Change Detection Monitoring and Indices
GEF	*Global Environment Facility*
HIDROWEB	Sistema de Informações Hidrológicas da Agência Pernambucana de Água e Clima
HSI	*Herbst Severity Index"*
IAC	Índice de Anomalia de Chuva
IBAMA	Instituto Brasileiro do Meio Ambiente e dos Recursos Naturais Renováveis
IBGE	Instituto Brasileiro de Geografia e Estatística

INCT-MC	Instituto Nacional de Pesquisa em Mudanças Climáticas Globais
INPE	Instituto Nacional de Pesquisas Espaciais
ION	Índice Oceânico Niño
IOS	Índice de Oscilação Sul
IPA	Empresa Pernambucana de Pesquisa Agropecuária
IPCC	*Intergovernmental Panel on Climate Change*
IPN	Índice Porcentagem Normal
IPP	Índice de Precipitação Padronizado
IQA	Índice de Qualidade das Águas
ITEP	Instituto de Tecnologia do Estado de Pernambuco
IVDN	Índice de Vegetação por Diferença Normalizada
LEPA	*Low Energy Precision Application*
LRDI	*Lamb Rainfall Departure Index*
MAPA	Ministério da Agricultura, Pecuária e Abastecimento
MAXVER	Máxima Verossimilhança
MCTI	Ministérios da Ciência, Tecnologia e Inovação
MDE	Ministério de Desenvolvimento Social e Combate à Fome
MI	Ministério da Integração
MMA	Ministério do Meio Ambiente
MME	Ministério de Minas e Energia
MSS	Multispectral Scanner System
MVA	Megavoltampère
NASA	*National Aeronautics and Space Administration*
NDVI	*Normalized Difference Vegetation Índice*
NDWI	*Normalized Difference Water Index*
NIMA	*National Imagery and Mapping Agency*
NT	Nitrogênio Total
OD	Oxigênio Dissolvido
OEA	Organização dos Estados Americanos
ONS	Operador Nacional do Sistema Elétrico
PACUERA	Plano Ambiental de Conservação e Uso do Entorno do Reservatório Artificial

PAD	Programa Água Doce
PBA	Programas Básicos Ambientais
PBMC	Painel Brasileiro de Mudanças Climáticas
PDSI	*Palmer Drought Severity Index*
PE	Pernambuco
PG	Posto Global
pH	Potencial Hidrogeniônico
PISF	Projeto de Integração do Rio São Francisco
PLANVASF	Plano Diretor para o Desenvolvimento do Vale do São Francisco
PNMC	Plano Nacional de Mudanças Climáticas
PNRH	Política Nacional de Recursos Hídricos
PNUMA	Programa das Nações Unidades para o Meio Ambiente
PR	Posto Regional
RAI	*Rainfall Anomaly Index*
RFA	Radiação Fotossinteticamente Ativa
SAVI	*Vegetation Index Soil-Adjusted*
SECTMA	Secretaria de Ciência, Tecnologia e Meio Ambiente
SINGRH	Sistema Nacional de Gerenciamento de Recursos Hídricos
SISNAMA	Sistema Nacional de Meio Ambiente
SMSF	Submédio São Francisco
SPI	*Starterized Precipitation Index*
SRTM	*Shuttle Radar Topography Mission*
SWAT	*Soil and Water Assessment Tool*
SWIM	*Soil and Water Integrated Model*
TDS	Sólidos Dissolvidos Total
TM	*Thematic Mapper*
TMS	Temperatura da Superfície do Mar
UHE	Usina Hidroelétrica
URAC	Unidades de Recuperação de Áreas Degradadas
USGS	*United States Geological Survey*
VSMSF	Vale do Submédio São Francisco

SUMÁRIO

1 INTRODUÇÃO..... 19

1.1 JUSTIFICATIVA..... 21

1.2 HIPÓTESE..... 22

1.3 OBJETIVO..... 22

1.3.1 Objetivo Geral..... 22

1.3.2 Objetivos específicos..... 22

1.4 ESTRUTURA DA TESE..... 23

1.5 CARACTERIZAÇÃO DA ÁREA DE ESTUDO..... 24

1.5.1 Hidrografia..... 24

1.5.2 Reservatório de água inseridos no Submédio São Francisco..... 26

1.5.3 Características climáticas da bacia..... 31

1.5.4 Vegetação..... 32

1.5.5 Solos..... 33

1.5.6 Geologia..... 34

1.5.7 Relevo..... 35

2 IDENTIFICAÇÃO DOS PERÍODOS CRÍTICOS CLIMÁTICOS NO TRECHO SUBMÉDIO DA BACIA HIDROGRÁFICA DO RIO SÃO FRANCISCO..... 36

3 CARACTERIZAÇÃO DA DEMANDA DE HÍDRICA PARA AGRICULTURA IRRIGADA NO TRECHO SUBMÉDIO SÃO FRANCISCO..... 69

4 DELIMITAÇÃO DAS ÁREAS IRRIGADAS EM FUNÇÃO DO USO E OCUPAÇÃO DO SOLO NA CALHA PRINCIPAL DO SUBMÉDIO SÃO FRANCISCO EM ANOS DE ANOMALIA CLIMÁTICA..... 112

5 CENÁRIOS DE DEMANDAS HÍDRICAS NO TRECHO SUBMÉDIO BACIA HIDROGRÁFICA DO RIO SÃO FRANCISCO..... 154

6 CONCLUSÕES E RECOMENDAÇÕES..... 177

REFERÊNCIAS..... 179

APÊNDICE A – MATRIZ DE ERRO..... 190

1 INTRODUÇÃO

O semiárido brasileiro configura um cenário crítico no que se refere à questão hídrica. A escassez da água nessa região, tem sido tema de debates, políticas e pesquisas com o objetivo principal de subsidiar as ações que possibilitem o seu aproveitamento racional e permitam a convivência da população com os períodos críticos de prolongadas estiagens.

Devido à localização geográfica da região, a problemática das estiagens e da alta evaporação pode ser justificada pelos fatores climáticos, visto que a distribuição irregular da precipitação é marcada por sua variabilidade espaço-temporal, que, associada aos baixos totais anuais sobre a região, resulta na frequente ocorrência de dias sem chuva, e consequentemente em grandes eventos extremos de secas.

Além do fator climático ter um papel preponderante na renovação das reservas hídricas, a estrutura geológica da região influencia no armazenamento da água no subsolo, pois 70% dessas áreas estão inseridas no escudo cristalino, e nesse tipo de formação os escoamentos superficiais são maiores do que a parte que se infiltra no solo, não permitindo acumulações satisfatórias de água no subsolo, interferindo inclusive, no caráter de temporariedade dos rios (CPRM, 2017).

Apesar dos problemas inerentes à escassez hídrica, a principal fonte de água doce da região é a Bacia do Rio São Francisco, que corresponde por 73% da oferta hídrica superficial nordestina. A bacia não apenas contribui no atendimento às necessidades de uso humano, mas estimula o crescimento e o desenvolvimento social e econômico, com melhorias consistentes na agricultura, pecuária, indústria e infraestrutura local.

Para viabilizar as estratégias de “combate às secas”, criaram-se ao longo dos anos vários mecanismos e órgãos que atuassem neste sentido, dentre eles destacam-se a Superintendência do Desenvolvimento do Nordeste (SUDENE), o Departamento Nacional de Obras Contra a Seca (DNOCS), a Companhia Hidroelétrica do São Francisco (CHESF), entre outros. A forma de intervenção nesta região por estas instituições foi na maior parte das vezes por meio da construção de grandes obras hídricas, que num primeiro momento se traduzia na construção de açudes (política de açudagem) e, mais recentemente em obras de transposição entre bacias hidrográficas (OLIVEIRA, 2013).

Atualmente existem grandes reservatórios de água inseridos ao longo da bacia do Rio São Francisco, destinados sobretudo à produção de energia elétrica, como é o caso das usinas

hidroelétricas de Três Marias, Sobradinho, Itaparica, Complexo Paulo Afonso, e Xingó, permitido a bacia um potencial hidrelétrico aproveitado de 10.473MW (ANA, 2015).

Um dos grandes desafios para a gestão das águas da Bacia Hidrográfica do Rio São Francisco, está no gerenciamento dos reservatórios de água de Sobradinho e Itaparica inseridos na região do Submédio da bacia. Essa região é considerada extremamente seca e nos últimos anos vêm sofrendo com a diminuição no volume de água disponível para produção de energia elétrica. Além disso, com o aumento da população e crescimento da agricultura, os problemas inerentes ao manejo inadequado uso do solo se intensificaram no entorno desses reservatórios, comprometendo a quantidade e qualidade das águas.

Segundo o Operador Nacional do Sistema Elétrico (ONS, 2017), a situação do reservatório de Sobradinho ainda é mais preocupante, pois para manter uma boa capacidade hídrica, ele depende principalmente da chuva na região do Alto São Francisco, localizada no Norte de Minas Gerais. Quando não chove nessa região, o volume de água do reservatório é reduzido, comprometendo o atendimento aos múltiplos usos. O período crítico de estiagem se prolonga desde 2012, caracterizando um dos períodos mais críticos registrados.

A situação é tão crítica que o Ministério do Meio Ambiente (MMA, 2013), determinou em Abril de 2013, a redução de vazão defluente do reservatório de Sobradinho. Tudo em nome da "segurança hídrica" da região. Neste ano, a vazão de restrição mínima defluente que era de 1.300 m^3/s, passou para 1.100 m^3/s (ANA, 2013). Como não houve melhora na situação hidrológica na bacia, consecutivas flexibilizações foram autorizadas. A última delas ocorreu em Novembro de 2018, essa vazão foi flexibilizada para 550 m^3/s .(ANA, 2018). Vale ressaltar que a redução da vazão foi necessária para que o volume da água na barragem não chegasse a zero.

A escassez de água, não apenas afeta o setor elétrico, mas diversos outros usos de água ofertados pelo reservatório, como por exemplo, o setor agrícola, que utiliza cerca de 70% do total da água na região do Submédio. Em relação a esse setor, a maioria dos perímetros irrigados na Bacia do Rio São Francisco, estão localizados a jusante do reservatório de Sobradinho, e são formados desde pequenos produtores remanejados em projetos irrigados para a agricultura familiar, a grandes exportadores de frutas, como é o caso do Vale do São Francisco.

Além de problemas ecológicos, há também problemas sociais. Não existe equidade no acesso à água nesta região e populações ditas "isoladas" ainda não possuem água potável com qualidade para consumo humano, mesmo estando à beira do rio ou dos ribeirões ou nas veredas. O acesso ainda é limitado para abastecimento das populações isoladas, principalmente aquelas que dependem da água do reservatório.

De acordo com o do Plano Ambiental de Conservação e Uso do Entorno do Reservatório Artificial (PACUERA) o crescimento das atividades agrícolas no entorno do reservatório de Sobradinho se intensificou, porque boa parte das áreas a jusante do reservatório são de planícies, e consequentemente, aptas ao cultivo agrícola. Com a ocorrência de culturas diversificadas, os solos têm se desagregado, intensificando o transporte de sedimentos, e na época dos períodos chuvosos, com o aumento do volume e velocidade das águas, os materiais existentes são arrastados para os reservatórios, comprometendo a qualidade e quantidade de água.

Outra questão relevante é que os projetos de irrigação na bacia, não apresentam adequado planejamento e, após sua implementação, não têm recebido um manejo correto. A irrigação ineficiente e inadequada resulta em desperdício de água e energia evidenciando a necessidade de otimização das estratégias de manejo da irrigação na bacia.

Além disso, a reduzida cobertura vegetal da Caatinga e a utilização de práticas inadequadas de manejo do solo podem conduzir a região à uma situação bastante grave no que se refere à degradação ambiental, com perda dos recursos solo, água e biodiversidade. Essas alterações na paisagem, em função de diferentes usos do solo, não foram acompanhadas de estudos que relatassem as mudanças provocadas ao longo do tempo na composição e estrutura dos elementos da paisagem.

1.1 JUSTIFICATIVA

As informações pontuais das águas superficiais e reservatórios na região do Submédio São Francisco ainda são limitadas, principalmente onde está localizado o reservatório de Sobradinho, a maioria das estações climatológicas ou hidrológicas disponíveis pelas instituições públicas contém falha. Isso provoca um desconhecimento da real situação hídrica da região, podendo subestimar ou superestimar as informações, além de interferir no planejamento das ações direcionadas a gestão dos recursos hídricos.

Neste sentido, a integração entre os dados de sensoriamento e modelagem hidrológica tem gerados resultados eficientes tanto em bacias hidrográficas como em reservatórios de água, uma vez que essas técnicas podem gerar informações para que decisões racionais sejam tomadas, dentre elas: descrever os recursos hídricos e identificar os problemas atuais e futuros de quantidade e qualidade da água; formular planos e estabelecer prioridades para gestão da qualidade da água; desenvolver e implementar programas; avaliar a eficácia das ações de gestão, bem como auxiliar na definição das políticas ambientais entre outras soluções.

Além disso, em situações de crise hídrica é fundamental criar estratégias mais restritivas, capazes de minimizar os efeitos da escassez, de maneira que maximize os estoques hídricos dos reservatórios e que não prejudique os usuários da bacia. Apesar de estudos nessas áreas relacionados ao tema ainda serem precários nas últimas décadas, profissionais de diferentes instituições governamentais e pesquisadores no país vêm desenvolvendo pesquisas interdisciplinares com o objetivo de ampliar o conhecimento e trazer soluções que possam beneficiar principalmente a comunidade local.

Neste sentido, devido à sua fundamental importância na produção de energia elétrica para região Nordeste, regularização das vazões do Rio São Francisco, e por ser essencialmente importante para o atendimento das demandas de água e desenvolvimento econômico dessa região, o reservatório de Sobradinho é o principal objeto de estudo deste trabalho, que tem como principal objetivo modelar espacialmente o uso do água para irrigação no trecho Submédio da Bacia Hidrográfica do Rio São Francisco.

1.2 HIPÓTESE

A avaliação das alterações do uso da água e do solo utilizando sensoriamento remoto e modelagem hidrológica, podem contribuir para formulação de políticas públicas de mitigação e adaptação aos eventos críticos climáticos.

1.3 OBJETIVO

Os objetivos principais objetivos do estudo serão apresentados a seguir.

1.3.1 Objetivo Geral

Modelar espaço-temporalmente o uso da água e do solo para irrigação no trecho Submédio da Bacia Hidrográfica do Rio São Francisco

1.3.2 Objetivos específicos

- Identificar os períodos críticos climáticos no trecho Submédio da Bacia Hidrográfica do Rio São Francisco.
- Caracterizar a demanda hídrica para agricultura irrigada no trecho do Submédio São Francisco;

- Delimitar as áreas irrigadas em função do uso e ocupação do solo na calha principal do Submédio São Francisco em anos de anomalia climática;
- Construir cenários de demandas hídricas e operação dos reservatórios no trecho Submédio da Bacia Hidrográfica do Rio São Francisco

1.4 ESTRUTURA DA TESE

Esta tese é composta por 6 capítulos. O primeiro apresenta a introdução, demonstrando a justificativa do tema, hipótese, objetivo geral e específicos, a estrutura da pesquisa e a descrição detalhada da área de estudo, destacando-se as características físicas, pedológicas, climáticas e de uso e ocupação do solo no trecho Submédio da Bacia do Rio São Francisco, principalmente nas áreas entorno do reservatório de Sobradinho.

No segundo capítulo são identificados os períodos críticos climatológicos no trecho Submédio da bacia hidrográfica do rio São Francisco no período de 1970 a 2014, por meio de um índice de seca, contextualizando a problemática das mudanças climáticas e seus impactos nos recursos hídricos.

No terceiro capítulo destina-se à avaliação da demanda hídrica em termos de quantidade e qualidade da água no trecho Submédio da Bacia do Rio São Francisco. Neste sentido, foram quantificadas todas as retiradas de água ao longo da calha principal da bacia a partir da concessão de outorgas pela ANA, identificando as principais culturas e técnicas de irrigação empregadas por diferentes perfis de usuários. Também foi avaliada a qualidade da água a partir de dados de monitoramento da CHESF.

No quarto capítulo, foi realizada uma análise espaço-temporal do uso e ocupação do solo a partir de imagens de satélite, e a fim de subsidiar a classificação, foi calculado o Índice de Vegetação por Diferença Normalizada (NDVI).

No quinto capítulo, foram simulados três cenários de demandas hídricas e operação dos reservatórios com objetivo de avaliar os efeitos no atendimento das demandas de água, a partir de técnicas de modelagem hidrológica.

No sexto capítulo são apresentadas as considerações finais, apresentando os resultados obtidos da pesquisa e um calendário com a descrição das metas alcançadas e as previstas. Por fim, são listadas as referências, que serviram de aporte para a elaboração desta tese, e apresentados os apêndices.

1.5 CARACTERIZAÇÃO DA ÁREA DE ESTUDO

A área de estudo se constitui em uma das regiões hidrográficas da bacia do Rio São Francisco conhecida como o Submédio do Rio São Francisco. A bacia hidrográfica do Rio São Francisco localiza-se no Nordeste Brasileiro, entre os paralelos 7º 20’ e 17º 40’de Latitude Sul e 44º33’ e 34º 31’ de Longitude Oeste. A Figura 1 mostra a localização da bacia no território nacional e suas subdivisões.

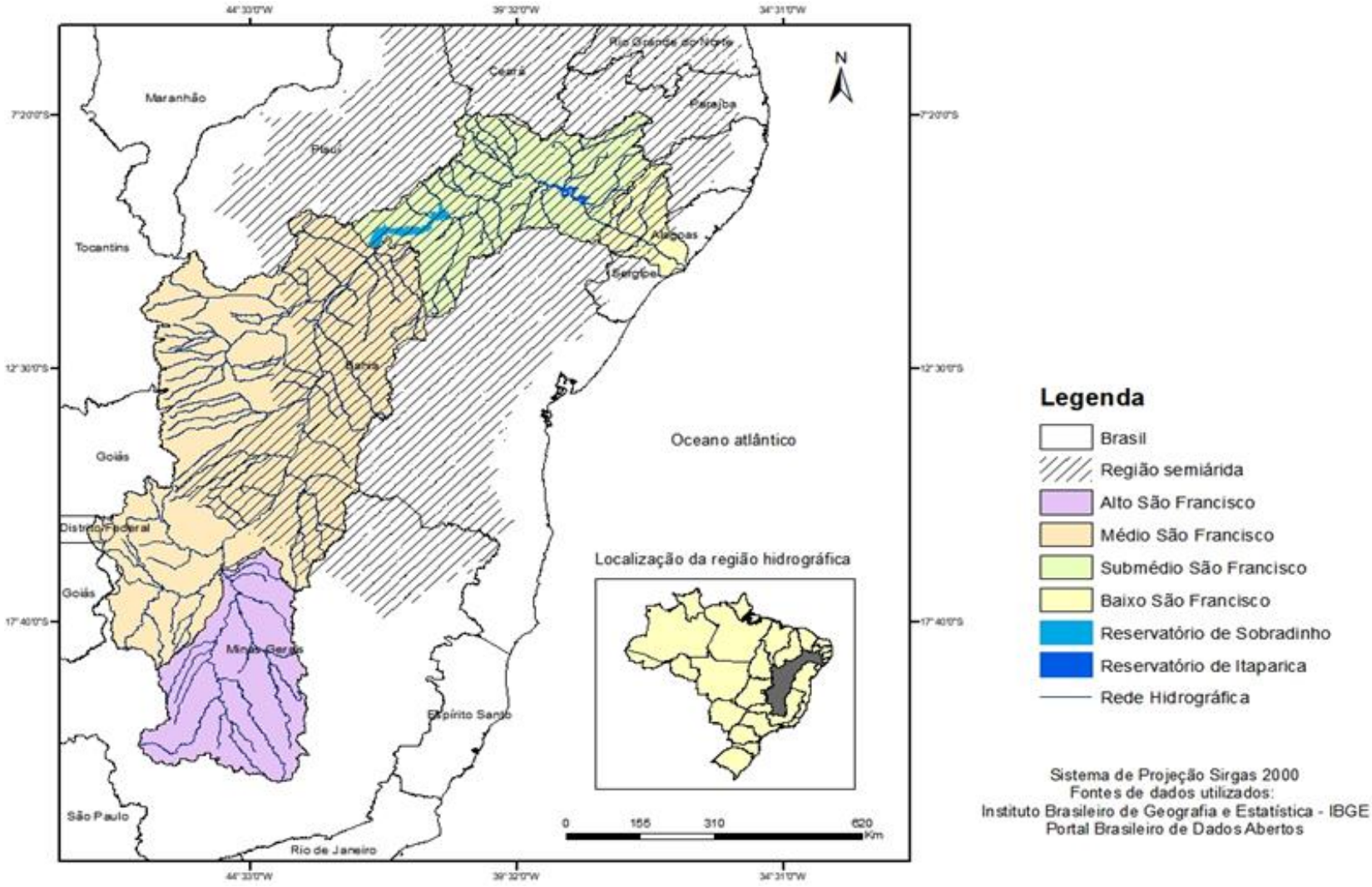
A região do Submédio do rio São Francisco, abrange áreas dos Estados da Bahia e Pernambuco, estendendo-se da cidade de Remanso até a cidade de Paulo Afonso ambas no Estado da Bahia, com 110.446 km^2, ou 17% da área da Bacia do Rio São Francisco. Essa região tem 440 km de extensão e a sua população é de 1,944 milhões de habitantes. No estado de Pernambuco, ela é composta pelas sub-bacias dos rios Pontal, Garças, Brígida, Pajeú, Moxotó e Xingó, pela margem esquerda; enquanto no estado da Bahia, na margem direita, ficam as sub-bacias de Tourão, Salgado, Vargem, Curaçá, Macururé e Poço Comprido. As principais cidades do Submédio são Petrolina e Serra Talhada, em Pernambuco e Juazeiro e Paulo Afonso, na Bahia. Nesse trecho do São Francisco destacam-se as represas de Paulo Afonso I, II, III e IV, Xingó, Itaparica e Moxotó (CBHSF, 2015b).

1.5.1 Hidrografia

Em relação à hidrografia do Submédio do Rio São Francisco, sua região hidrográfica abrange 639.219 km^2 de área de drenagem (7,5% do país) e vazão média de 2.850 m^3/s (2% do total do país). O rio São Francisco tem 2.700 km de extensão e nasce na Serra da Canastra em Minas Gerais, escoando no sentido Sul-Norte pela Bahia e Pernambuco, quando altera seu curso para leste, chegando ao Oceano Atlântico através da divisa entre Alagoas e Sergipe (MMA, 2006b).

Assim, a sua parte inicial, tomando como referência a área montanhosa onde o rio nasce, na Serra da Canastra, a 1.280 m de altitude, ganhou a denominação de Alto São Francisco. Estendendo-se até a cidade de Pirapora, no Centro-Norte de Minas Gerais, a região perfaz uma área de 111.804 km². Escoando no sentido Sul-Norte, no trecho seguinte o rio atravessa todo o oeste da Bahia, até o ponto onde se formou o lago represado de Sobradinho, no município de Remanso. Nessa região, a bacia é denominada Médio São Francisco. É a maior das quatro divisões, alcançando 339.763 km^2.

Figura 1 - Localização da Bacia Hidrográfica do Rio São Francisco.



Fonte: A Autora, 2019.

Depois de Remanso, o rio inflexiona o seu curso para o Leste, constituindo-se na divisa natural entre os estados da Bahia e de Pernambuco, até alcançar o limite com Alagoas. É o Submédio São Francisco, a segunda maior região, com 155.637 km^2. A partir daí o rio segue na direção Leste, formando a segunda divisa natural, dessa vez entre os estados de Alagoas e Sergipe. É o Baixo São Francisco, uma área de 32.013 km^2, onde o rio São Francisco deságua no Oceano Atlântico (CBHSF, 2015).

A partir da década de 80, o desenvolvimento industrial do Nordeste determinou a urgência de aumentar a oferta de energia elétrica, acelerando a construção de usinas para aproveitar o potencial do rio São Francisco – recurso básico e essencial para o desenvolvimento, energético, hidroagrícola e industrial da região.

1.5.2 Reservatórios de água inseridos no Submédio São Francisco

Reservatório de Sobradinho

Inaugurado em 1979 pela Companhia Hidroelétrica do São Francisco (CHESF), Sobradinho é considerado um dos projetos hidroelétricos mais importantes e executados na bacia. O objetivo inicial da construção de Sobradinho era a regularização plurianual do curso do rio São Francisco, elevando a vazão mínima de 700 m^3/s para cerca de 2060 m^3/s, garantindo assim, o funcionamento contínuo das usinas a jusante, particularmente a de Paulo Afonso. Entretanto, com a ocorrência de uma grande cheia no rio São Francisco nos primeiros meses de 1979, foi constatada a necessidade de locar 30% do volume útil do reservatório para controle de enchentes.

A ideia era fazer com que o volume acumulado nessa represa fosse sendo liberado aos poucos, de forma equilibrada, regularizando a vazão do Rio São Francisco e garantindo a geração de energia no complexo de Paulo Afonso e em Xingó, hidrelétricas localizadas na parte do Submédio da bacia. A regularização plurianual permite que Sobradinho garanta uma vazão média de 2.060 m^3/s e possibilita, assim, a utilização plena dos demais aproveitamentos hidrelétricos, situados a jusante.

Os 34,1 bilhões de m^3 de água da represa de Sobradinho inundam uma área de 4.214 Km^2, formando o maior lago artificial da América Latina e um dos maiores do mundo. Para fins de ordem de grandeza, o lago ocupa uma área 10 vezes maior do que a Baía de Guanabara - RJ. Para a formação de tão grandioso lago, quatro cidades - Casa Nova, Santo Sé, Remanso e Pilão Arcado, tiveram que ser submersas pelas águas. A hidrelétrica, além de importante função

de regularização plurianual do São Francisco, tem instalada 6 unidades de geração elétrica que tem um total de 1.050 MW, potência esta que acrescenta cerca de 4 bilhões de KW anuais de energia firme para o Nordeste (ONS, 2019).

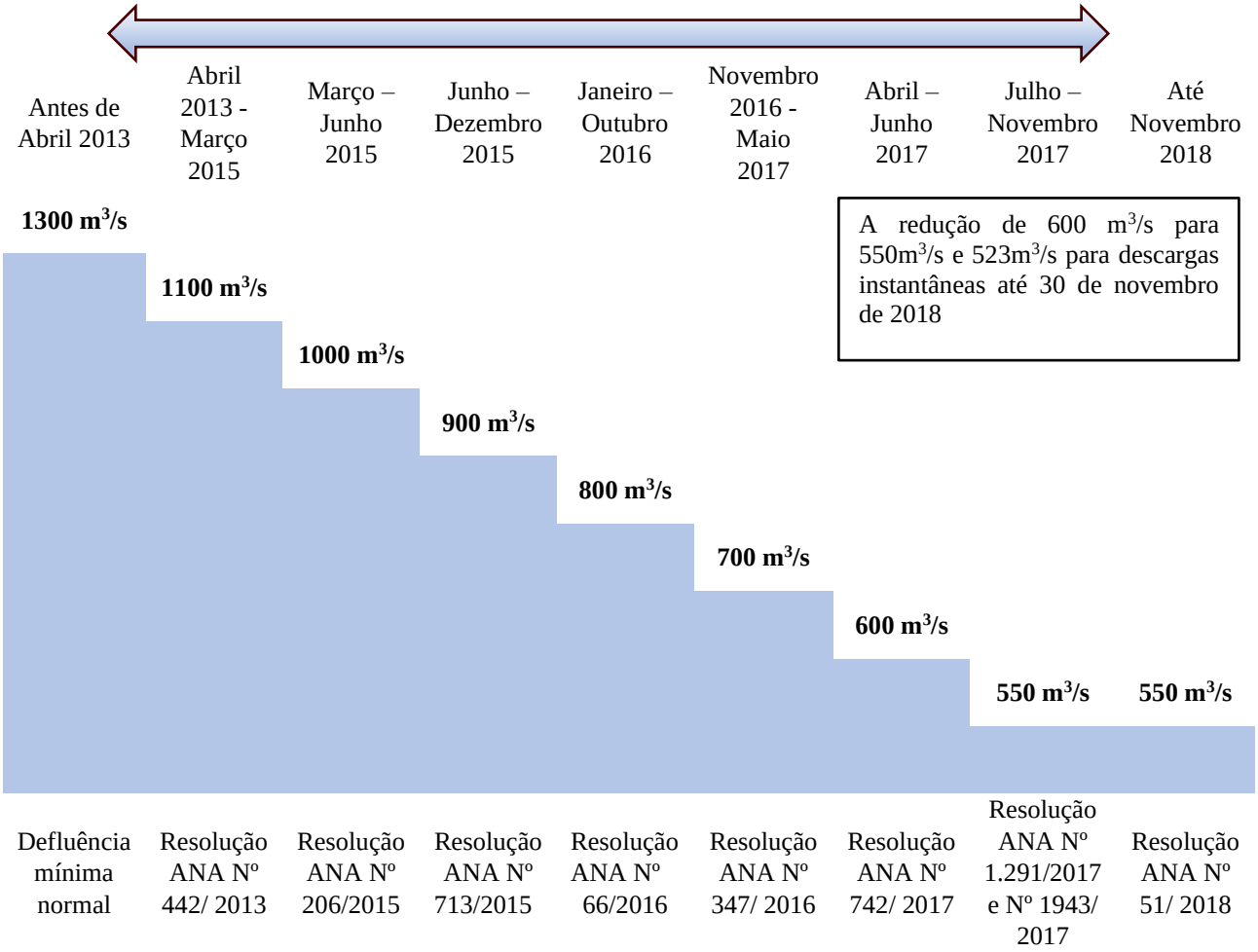
Segundo o Plano Ambiental de do reservatório de Sobradinho está situado na região do Submédio do Rio São Francisco, a cerca de 40 km da cidade de Petrolina, PE. A represa em sua cota máxima (máxima operativa normal), 392,50 m, forma um lago de aproximadamente 4.214 km^2, com 280 km de comprimento e largura que varia entre 5 e 50 km. A cota mínima de operação é de 380,50 m (Figura 2).

Figura 2 - Barragem de Sobradinho - BA

Fonte: A Autora, 2018.

Desde 2013, a bacia do rio São Francisco vem enfrentando condições hidrológicas adversas, com precipitações e vazões abaixo da média, com consequências nos níveis de armazenamento dos reservatórios localizados na bacia, o que tem levado a ações de flexibilização das vazões mínimas defluentes dos reservatórios de Sobradinho e Xingó. De abril de 2013 a maio de 2017, foi autorizada a redução das defluências mínimas de Sobradinho de 1.300 m^3/s para 550 m^3/s através de uma série de Resoluções publicadas pela ANA, conforme registradas na Figura 3.

Figura 3. Vazão defluente do reservatório de Sobradinho autorizada pelo MMA



Fonte: Adaptado de ANA (2018).

Reservatório de Itaparica

Nos anos 80, a Usina Hidroelétrica (UHE) de Itaparica, denominada também de UHE Luiz Gonzaga, em homenagem ao "rei do baião nordestino" de mesmo nome, foi construída pela Companhia Hidroelétrica do São Francisco (Chesf) e entrou em operação com sua capacidade total com seis turbinas em 1990, gerando 1.500 MW de potência instalada (Figura 4).

A usina está posicionada no rio São Francisco, localizada a 50 km a montante do Complexo Hidrelétrico de Paulo Afonso, possuindo, além da função de geração de energia elétrica, a de regularização das vazões afluentes diárias e semanais daquelas usinas (CHESF, 2019).

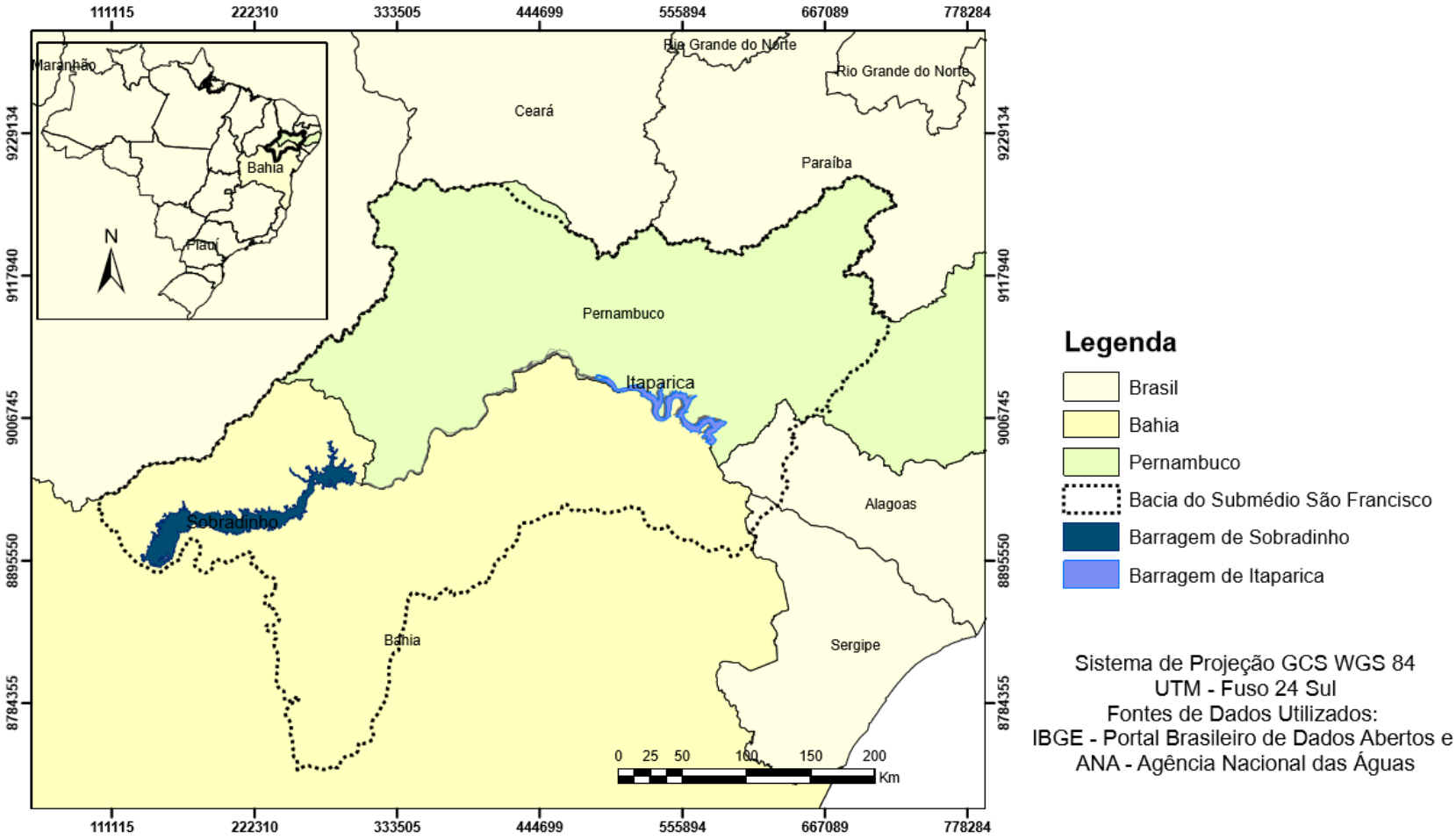
Figura 4 - Reservatório Luiz Gonzaga (Itaparica) - PE

Fonte: Carlos Brito, 2017

Segundo a Codevasf (2019), a área inundada pelo lago de Itaparica, que se estende por 150 km e cobre uma superfície de 83.400 hectares dos estados da Bahia e de Pernambuco, resultou no reassentamento de Itaparica, a fim de compensar o impacto causado sobre, aproximadamente, 10500 famílias que moravam na área inundada pela usina, das quais 4,6 mil (cerca de 21 mil pessoas) na zona urbana e 5,9 mil (cerca de 19 mil pessoas) na área rural, entre essas 200 famílias indígenas da tribo Tuxá.

Para a realocação das populações urbanas afetadas foram construídas as seguintes cidades: Petrolândia e Itacuruba em Pernambuco e Rodelas, Barra do Tarrachil e Glória na Bahia. Na década de 90, para atendimento da população rural, foram construídos e implantados nove perímetros de irrigação, que hoje se encontram em condições operacionais. A Figura 5 mostra a localização dos reservatórios de água de Sobradinho e Itaparica no trecho do Submédio São Francisco.

Figura 5 - Localização dos reservatórios de Sobradinho e Itaparica no Submédio São Francisco.

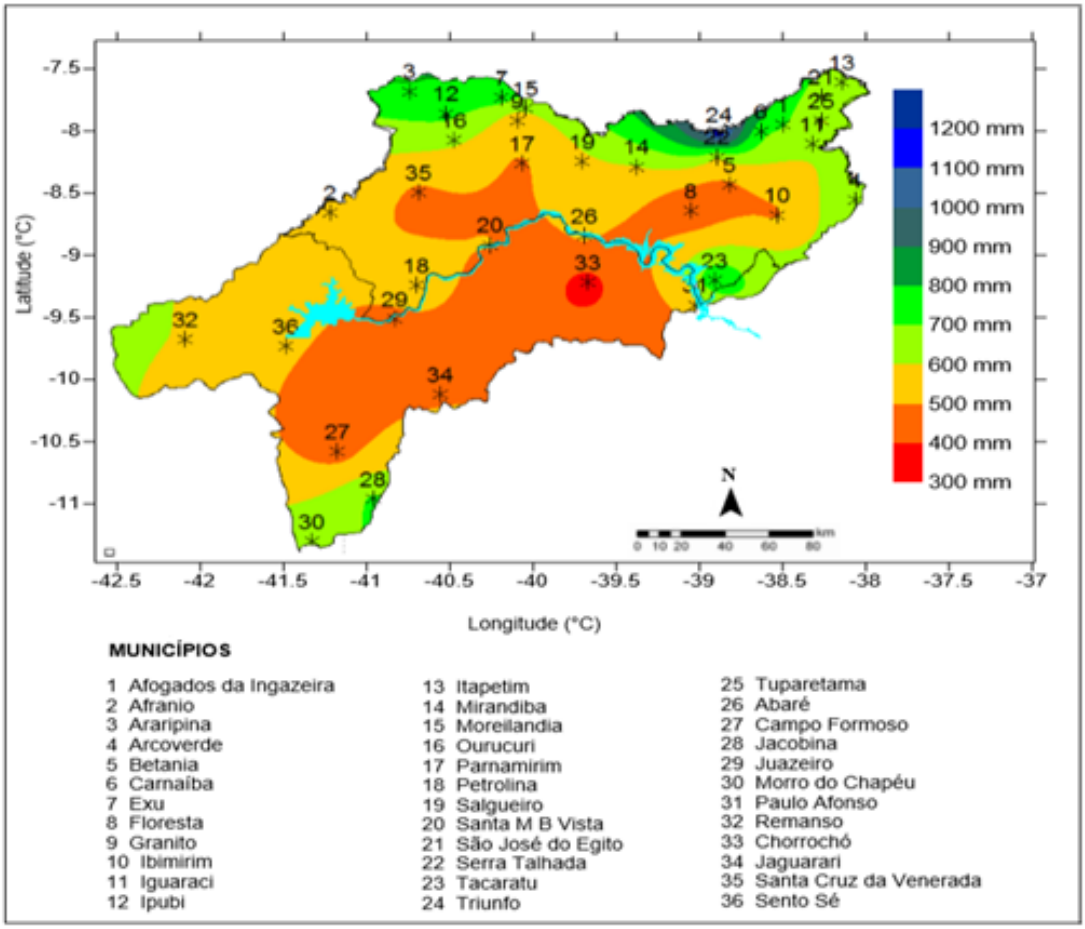


Fonte: A Autora, 2019.

1.5.3 Características climáticas da bacia

Do ponto de vista climático, a área do Submédio São Francisco é caracterizada pela grande irregularidade das precipitações pluviométricas e apresenta como principal período chuvoso os meses de janeiro a abril. As chuvas que ocorrem no Sertão têm sua origem nas Frentes Frias, nos Vórtices Ciclônicos de Ar Superior (VCAS) e na Zona de Convergência Intertropical (ZCIT). O início da pré-estação chuvosa ocorre em dezembro (extremo Oeste) e está associado às instabilidades das Frentes Frias e aos VCAS, que atua principalmente nos meses de janeiro e fevereiro. A partir de fevereiro ou março, dependendo do ano, a ZCIT começa a atuar em todo o Sertão, que já se encontra em seu principal período chuvoso (CBHSF, 2015, SECTMA, 2006) (Figura 6).

Figura 6 - Distribuição espacial da climatologia da precipitação pluviométrica anual no Submédio São Francisco



Fonte: OLIVEIRA, 2016.

De acordo com Teixeira (2010), o período chuvoso concentra-se entre os meses de novembro e abril, com 90% do total anual. A quadra chuvosa, de janeiro a abril, contribui com 70% do total anual. Os meses mais quentes são outubro e novembro e os mais frios junho e julho. As médias mensais de temperatura média do ar variam de 24,1 ºC a 28,0 ºC, ocorrendo uma pequena amplitude térmica anual, atribuída à proximidade da região em relação ao Equador. Os totais pluviométricos anuais oscilam, em média, entre 300 e 1.200 mm, com os maiores valores observados no Alto Sertão pernambucano com valores acima de 600 mm, e os menores no Sertão de São Francisco de Pernambuco e Bahia com totais entre 300 e 600 mm, em média. Na área da bacia estudada, destacam-se os municípios de Serra Talhada e Triunfo, localizados no Sertão do Pajeú de Pernambuco, diferentemente dos demais, são os únicos que apresentam totais anuais superiores a 900 mm, chegando aos 1.200 mm, que é explicado pela altitude, considerado o ponto mais alto de Pernambuco.

1.5.4 Vegetação

De acordo com a EMBRAPA (2009), a Caatinga Hiperxerófila ocupa a maior parte da região com formações vegetais mais densas nos relevos ondulados do Norte e na zona de entalhe do Rio São Francisco. O bioma é bem representado nos pediplanos e nos relevos residuais altos do Sudoeste (Figura 7).

Figura 7 - Vegetação Caatinga às margens do Lago de Sobradinho - BA

Fonte: A Autora, 2018.

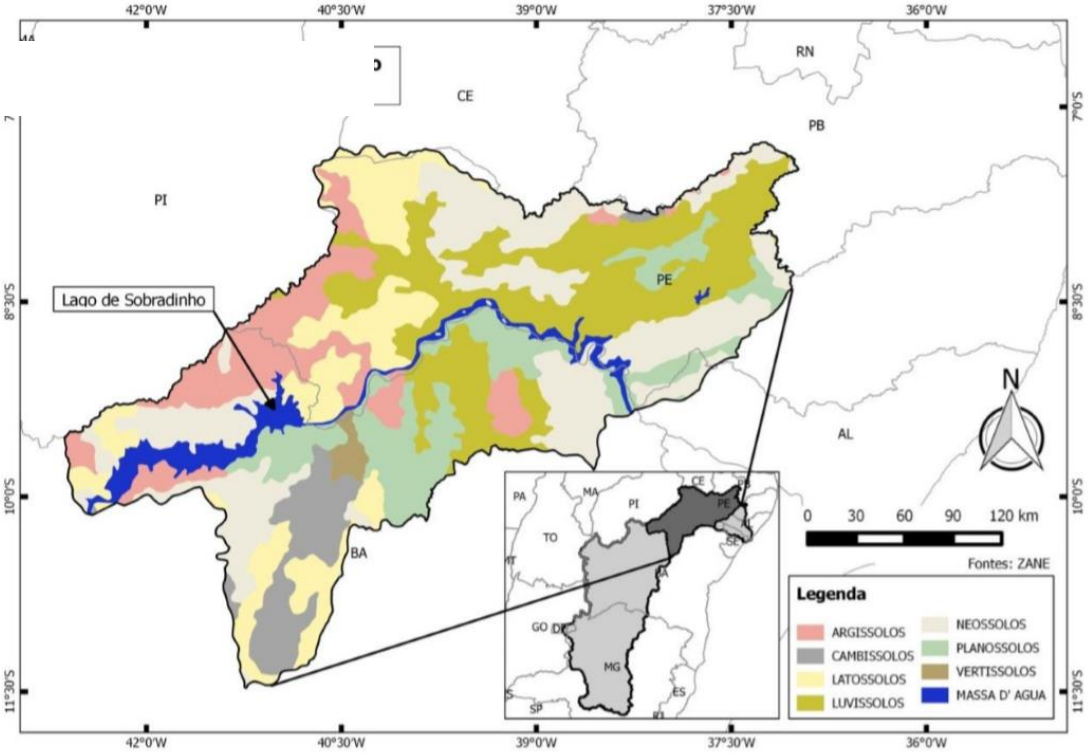
Em relação à cobertura vegetal do Submédio São Francisco, esta vem sendo gradativamente degradada e destruída em grande parte pela ação antrópica, sobretudo pela necessidade de subsistência, que promoveu a implantação de campos de cultivos de milho, feijão, mandioca, entre outros. No entanto, a ação mais predatória implantada foi a pecuária extensiva que, através das queimadas para formação de pastagens e as taxas de lotação praticadas, desequilibraram o ecossistema.

1.5.5 Solos

Em relação aos solos, há predominância de solos das classes dos Latossolos e Argissolos, além da ocorrência de Neossolos Quartzarênicos, Planossolos, Cambissolos, Vertissolos, Luvissolos e, nas áreas mais movimentadas, principalmente, Neossolos Litólicos. Os Luvissolos e os Neossolos Litólicos são pouco profundos e muito suscetíveis à erosão; os Neossolos Quartzarênicos e os Neossolos Regolíticos apresentam textura muito grosseira, refletindo-se em altas taxas de infiltração, baixa retenção de umidade e baixa fertilidade; os Planossolos contêm altos teores de sódio (EMBRAPA, 2008), (Figura 8).

.

Figura 8 - Principais classes de solo da bacia hidrográfica do Submédio São Francisco



Fonte: EMBRAPA, 2010.

Os solos irrigáveis são pouco extensos, sendo os Vertissolos, Argissolos, Latossolos e alguns Cambissolos, os principais. Com os modernos sistemas de irrigação localizada (microaspersão e gotejamento), os Neossolos Quartzarênicos foram incorporados aos sistemas produtivos. Margeando todo o rio e seus afluentes, encontra-se a faixa de Neossolos Flúvicos e Cambissolos Flúvicos. Os riscos de salinização dos solos na região são altos. Por outro lado, quanto à erosão, devido à maioria das áreas nesta região apresentar declividades inferiores a 6%, os riscos são reduzidos, exceto os Planossolos, tornando estes solos bastante favoráveis à irrigação (CODEVASF, 1999).

Segundo estudos realizados por Mariano (2011), a exploração indiscriminada dos solos e da água na região do Submédio tem ocasionado erosão, assoreamento e perda de biodiversidade, principalmente nas margens da calha principal do rio São Francisco. O resto de fragmento das matas ciliares encontra-se sob forte pressão antrópica, sendo transformadas em áreas de pasto ou agricultura.

1.5.6 Geologia

Na região do Submédio São Francisco, a geologia e o material originário exercem papel de grande importância na formação dos solos, em função da grande variação litológica da região. Segundo a CODEVASF (1999), ocorrem áreas do cristalino com predomínio de gnaisses, granitos, migmatitos e xistos, áreas do cristalino recoberto por materiais mais ou menos arenosos e áreas sedimentares recentes de depósitos fluviais. Os xistos e gnaisses micáceos contêm intercalações de quartzitos e calcários cristalinos. Os xistos são compostos por muscovita-biotita-estaurolita-xistos granatíferos, quartzo-micaxisto, clorita-biotita-xistos granatíferos e sericita-clorita-xisto. Os gnaisses são placosos ou em banco cinza-claro a cinza-avermelhado, constituídos de quartzo, plagioclásio, muscovita e mais raramente biotita e granada (MMA, 2006b).

Na área, ocorrem materiais relacionados ao Pré-Cambriano com cobertura pedimentar, constituída por materiais arenosos, areno-argilosos, argilo-arenosos e material macroclástico, principalmente concreções ferruginosas e seixos de quartzo. É encontrada, também, com certa frequência, pedregosidade superficial constituindo um pavimento desértico de calhaus e cascalhos de quartzo e quartzito, muitos já bastante ferruginizados; e concreções de ferro, onde ocorrem os Luvissolos. São comuns os afloramentos de quartzo branco-leitosos e, também,

afloramentos de micaxistos cinzento-oliváceos, porém sem grande representatividade (CODEVASF, 1999).

1.5.7 Relevo

De acordo com a CODEVASF (1999). a altitude do Submédio São Francisco varia de 200 a 800 m na Chapada Cretácea do Araripe, que se prolonga para Leste através da Serra dos Cariris, esculpida em rochas graníticas e gnáissicas de idade pré-cambriana. Do lado Sul, ressaltam-se as formas tabulares do Raso da Catarina, esculpidas em sedimentos da bacia de Tucano, com altitude variando de 200 a 300 m. Topograficamente, a região de estudo se caracteriza por apresentar relevo plano a ondulado com vales muito abertos. Essa característica é devida à menor resistência à erosão dos xistos, onde sobressaem formas abauladas esculpidas em rochas graníticas e gnáissicas. A maior parte da região está inserida na Depressão Sertaneja, que constitui uma superfície de pediplanação (depressão periférica do São Francisco), na qual ocorrem cristas e outeiros residuais (CODEVASF, 1999). Não são observados grandes inselbergues, sendo as fases mais movimentadas do relevo observadas em encostas onde a formação geológica parece ser mais rica em quartzo e quartzito, mais resistentes à erosão (Silva *et al.*, 2000).

2 IDENTIFICAÇÃO DOS PERÍODOS CRÍTICOS CLIMÁTICOS NO TRECHO SUBMÉDIO DA BACIA HIDROGRÁFICA DO RIO SÃO FRANCISCO

RESUMO

A frequência de eventos extremos de precipitação vem crescendo nos últimos anos, com maior intensidade e duração e, assim, favorecendo desastres naturais como inundações e secas severas. A expansão de conhecimentos acerca da variabilidade temporal e espacial de eventos extremos é de suma importância para as condições climáticas de uma determinada região. Neste sentido, a pesquisa tem como objetivo identificar os períodos críticos climáticos no trecho Submédio da bacia hidrográfica do rio São Francisco. O estudo foi realizado com dados diários de precipitação, distribuídos em 22 postos pluviométricos regionais, fornecidos pela ANA (1970-2014) e dados pluviométricos globais de 38 células (resolução de 0,5º) fornecidos pelo EU-Watch (1981-2013). Para identificação dos períodos críticos climáticos, foi utilizado o Índice de Precipitação Padronizada (SPI). Os resultados obtidos a partir do SPI mostraram que apesar da existência de anos mais úmidos, houve tendência negativa da precipitação ao longo do período estudado. Neste sentido, a partir de 1970, apenas dois anos foram considerados severamente úmidos: 1974 e 1985, e que os eventos secos foram considerados mais críticos e recorrentes a partir da década de 90, destacando-se os anos de 1993 e 2012, classificados como extremamente secos. Esses eventos podem estar relacionados à influência do fenômeno *El Niño* que possivelmente explica essa tendência negativa na intensidade da precipitação. Foi observado que nos dados de precipitação obtidos pelos postos regionais as tendências são mais evidentes do que os postos globais na identificação de períodos críticos. Verificou-se ainda que a principal característica das séries do SPI é a sua grande variabilidade espaço-temporal, a qual indica que em uma mesma região, meses extremamente secos podem ser precedidos e/ou seguidos de meses úmidos ou normais, e que distintos casos de seca podem ocorrer de forma aleatória, entre as localidades e em um mesmo período.

Palavras chaves: Semiárido, índices de seca, precipitação pluviométrica**.**

2.1 INTRODUÇÃO

A preocupação com o gerenciamento dos recursos hídricos é crescente em diversas regiões do planeta, principalmente aquelas que dependem essencialmente desse recurso para atender aos usos múltiplos requeridos.

Dentre as regiões submetidas à cenários de escassez de água, se destaca a região semiárida do Nordeste do Brasil, onde as taxas de evapotranspiração são elevadas e a distribuição irregular da precipitação é marcada por sua variabilidade espaço-temporal, permitindo a ocorrência de períodos prolongados de estiagens, e acentuando os déficits hídricos.

No semiárido o déficit hídrico constatado juntamente com as altas taxas de evapotranspiração vem repercutindo negativamente em setores como agricultura, abastecimento de água, geração de energia elétrica, entre outros. Tendo em vista que a disponibilidade hídrica nessa região é bastante dependente da pluviometria, o abastecimento de água depende predominantemente das chuvas, uma vez que os aquíferos têm pouca capacidade de armazenamento.

Na região semiárida, há apenas dois rios perenes, o São Francisco e o Parnaíba, os demais, como o Jaguaribe, por exemplo, são rios intermitentes, que secam fora da estação de chuvas. Boa parte do subsolo é formada por rochas cristalinas, o que denuncia a ausência de lençóis freáticos subterrâneos na maior parte do território (MMA, 2006).

Ao longo dos anos, reservatórios de acumulação superficial foram construídos com o objetivo de diminuir o efeito da variação da precipitação. No entanto, a grande parte dos açudes construídos não foram capazes de suportar grandes períodos de estiagem, devido à perda de água em função da alta taxa de evaporação anual. Para o reservatório de Sobradinho, Vieira *et al.*, (2016) encontraram valores entre 1.329 mm e 2.690 mm por ano.

A grande seca de 1877-1879 ensejou a realização dos primeiros estudos de previsão, destacando-se o seu caráter cíclico em períodos aproximados de 10-11 anos (COSTA, 2017). Dentre esses estudos pioneiros destacam-se os de Ferraz (1924, 1940, 1950), prognosticando os eventos que se sucederam até 1970. Na seca de 1951-1952 foi delimitado o *Polígono das Secas* com 936.993 km^2, como área de atuação do Departamento Nacional de Obras Contra as Secas **(**DNOCS).

Um fator essencial para o planejamento e gestão sustentável dessas áreas são os dados de monitoramento das estações hidrometeorológicas, uma vez que o conhecimento da

distribuição temporal e espacial da chuva diária no país tem um impacto relevante para uma efetiva avaliação da disponibilidade hídrica, dentre outros recursos naturais disponíveis.

Atualmente, as previsões quanto ao aumento da temperatura para a região não são otimistas. Segundo o Relatório do Painel Brasileiro de Mudanças Climáticas (PBMC, 2013), é provável que o semiárido nordestino tenha sua precipitação reduzida em até 20% até 2040. Este relatório também indica que todo o Brasil deverá ficar ao menos 3ºC mais quente até o fim do século e as precipitações podem aumentar, em média, em 30% nas regiões Sul e Sudeste e diminuir em até 40% nas regiões Norte e Nordeste. Esses percentuais do PBMC são prognósticos climáticos estimados em valores médios tomando por base os cenários do IPCC, onde estes indicam aumento de 1 a 3ºC e 2 a 4ºC nos cenários otimistas e pessimistas, respectivamente.

As preocupações com a realidade dos recursos hídricos têm induzido a uma série de medidas governamentais e sociais, objetivando viabilizar a continuidade das diversas atividades públicas e privadas que têm como foco as águas doces, em particular, aquelas que incidem diretamente sobre a qualidade de vida da população (MOREIRA, 2013).

Diversos estudos têm sido realizados na região semiárida, com objetivo de identificar as ocorrências e os problemas inerentes à seca. Na literatura se destacam várias metodologias no sentido de desenvolver índices de chuva capazes de detectar longos períodos de estiagens, bem como classificá-los em termos de intensidade e duração, definindo diferentes tipos de seca.

Neste contexto, considerando a relevância de estudos que avaliam os impactos das mudanças climáticas nos padrões de precipitação e a influência dessas mudanças na disponibilidade hídrica da bacia hidrográfica, o presente trabalho tem como objetivo identificar os períodos críticos climáticos no trecho Submédio São Francisco (SMSF).

O SMSF está inserido na região semiárida onde há elevadas temperaturas e, consequentemente, altos valores de evaporação, chegando a atingir 1.660 mm anual (D'OLIVEIRA *et al.*, 1999). Nessa região estão localizados os reservatórios de água de Sobradinho e Itaparica, essencialmente importantes, principalmente na produção de energia elétrica e abastecimento humano, além dos maiores projetos de perímetros irrigados do país, com importante potencial na agricultura irrigada. Essas atividades são fundamentais para o desenvolvimento socioeconômico *regional*.

2.1.1 Mudanças Climáticas e seus Impactos nos Recursos Hídricos

Segundo Cysne *et al.*, (2012), a análise do comportamento das chuvas na Região Nordeste do Brasil é de grande relevância, devido às irregularidades apresentadas em escala de tempo e espaço, não somente sob o ponto de vista climático, mas também pelas consequências de ordem econômica, social e cultural advindas. Os autores ressaltam, que a variabilidade do clima no Nordeste é modulada por padrões atmosféricos e oceânicos de grande escala que se processam (conjuntamente ou não) sobre os Oceanos Pacífico e Atlântico Tropicais.

Um exemplo de interação atmosfera-oceano são os fenômenos *El Niño /La Niña*, caracterizados pelo aquecimento e esfriamento anormal das águas superficiais no Pacífico Tropical, respectivamente, apresentando forte influência sobre a variabilidade interanual das precipitações do Nordeste (MARENGO *et al.*, 2011).

Pesquisas internacionais também apresentam resultados similares de diminuição da precipitação. Em um estudo desenvolvido por Botai *et al.*, (2015), os autores avaliaram o efeito das futuras mudanças climáticas na quantidade, na forma de precipitação (chuva ou neve) e seus efeitos na vazão e afluentes do rio Jordão (principais recursos hídricos da região do Oriente Médio), constatando que as mudanças esperadas na forma de precipitação foram quase insignificantes. Porém, os resultados indicaram um futuro aumento da evaporação e diminuição da precipitação média anual.

Segundo Moradi *et al.*, (2011), após calcularem a temperatura média do globo, se verificou que quase todos os índices de temperatura mostram mudanças significativas ao longo do período 1951-2003. As variações que ocorrem na temperatura global podem ser detectadas e quantificadas. Entretanto, os impactos delas nos padrões da circulação atmosférica, da umidade, da precipitação, da evaporação e, principalmente, nas disponibilidades hídricas de uma determinada região ainda são muito difíceis de prever.

Para Marengo *et al.*, (2009), é necessário conhecer primeiramente a variabilidade associada às incertezas das futuras mudanças climáticas, seja devido à variação natural do clima ou à ação antropogênica. O mesmo autor ressalta que as mudanças climáticas provavelmente tornarão mais difíceis o acesso à água no semiárido. Um cenário de pouca chuva (ou de ausência dela), acompanhado das altas temperaturas (e consequente elevação das taxas de evaporação), acarretará uma crise de abastecimento em níveis catastróficos, atingindo diretamente os agricultores mais pobres da região, em especial os de subsistência.

Os impactos das mudanças climáticas nas disponibilidades hídricas no Nordeste foram avaliados por Campos (2003) na bacia hidrográfica do açude Várzea do Boi, no Ceará. Duas metodologias foram utilizadas para estimar as disponibilidades hídricas do reservatório. Na primeira, a vazão regularizada foi estimada por intermédio da realização do balanço hídrico do reservatório, utilizando o método de Monte Carlo. Na segunda, a vazão regularizada foi estimada para um reservatório infinito, segundo a formulação de Campos e Ibiapina (1997). Os impactos avaliados pelos autores seguiram dois padrões: O Padrão I considerou que a precipitação e a evaporação cresceram a uma mesma taxa, enquanto o Padrão II considerou que, além do crescimento a uma mesma taxa da precipitação e evaporação, o coeficiente de escoamento superficial cresceria de acordo com uma regra polinomial.

O estudo concluiu que, considerando o Padrão I, existe tendência de redução tanto nas vazões regularizadas quanto na eficiência do açude, porém, ao considerar o reservatório infinito, existe uma tendência de aumento na vazão regularizada e diminuição na sua eficiência. Para o Padrão II, há tendência de crescimento nas vazões regularizadas tanto para a topologia existente da bacia hidrográfica do açude quanto para a consideração do reservatório infinito, porém, observaram que houve uma diminuição na eficiência do reservatório.

Um estudo desenvolvido por Assis, Sobral e Souza (2012), em análise de duas bacias hidrográficas no Sertão de Pernambuco, no período de 1964 a 2004, encontraram uma tendência de redução pluviométrica. Moncunill (2006) encontrou, do mesmo modo, tendências negativas da precipitação anual, em trabalho realizado no Ceará, utilizando 23 estações pluviométricas no período compreendido entre 1974 e 2003.

Vale ressaltar que existem poucos estudos para o Nordeste Brasileiro utilizando esta metodologia, sendo mais concentrada e difundida na região Sul, Sudeste e Centro-Oeste do Brasil e em outros países da América do Sul. Esses resultados podem ser identificados em estudos realizados por Kingston (2011), onde os cenários climáticos de mudança prescritos para a descoberta do rio Mitano mostraram que a temperatura aumentou a uma taxa quase linear entre os cenários, com um aumento de 6°C na temperatura média global, resultando em aumentos de entre 7,2 e 9,5 ° C em temperatura mensal em relação à bacia hidrográfica. Os maiores aumentos ocorreram de maio a julho, enquanto o menor ocorreu de setembro a dezembro. A precipitação também mudou a uma taxa quase linear, com um aumento anual de 6,7% da linha de base para o cenário de 6°C.

As projeções mostraram tendência de clima mais seco, diminuição na umidade do solo, redução na vazão dos rios, aumento no risco de incêndio e diminuição no escoamento

superficial e subsuperficial para a Amazônia Ocidental até 2100. Um estudo desenvolvido pelos pesquisadores do Oeste da América do Norte, publicado por Fobes *et al.*, (2011), diagnosticou que os recursos hídricos ao sul de Alberta, no Canadá, são vulneráveis às mudanças climáticas.

2.1.2 Índices para Quantificação de Seca

Segundo Redmond (2002), não há um conceito universal para definir a seca, o que permite que suas definições sejam dependentes da temática de abordagem. Entretanto, Fernandes *et al.,* (2009) classificaram a seca em quatro diferentes categorias, de acordo com seus efeitos meteorológicos, agrícolas, hidrológicos e socioeconômicos, conforme detalhado a seguir:

- **Seca meteorológica:** é definida como um déficit de precipitação pluvial sobre uma região, durante um determinado período. Caracteriza-se pela falta de água induzida pelo desequilíbrio entre a precipitação e a evaporação, a qual depende de outros elementos como a velocidade do vento, temperatura, umidade do ar e insolação;
- **Seca agrícola:** refere-se à baixa disponibilidade de umidade no solo, a qual torna o suprimento de água às culturas insuficiente para repor as perdas por evapotranspiração;
- **Seca hidrológica:** está relacionada com uma deficiência no volume de água disponível, incluindo lençol freático, reservatórios e rios. Geralmente ocorre durante de um período muito longo de seca meteorológica. A seca hidrológica traz consequências como a redução de abastecimento de água nos centros urbanos, industriais, nos sistemas de irrigação e na produção de energia elétrica;
- **Seca socioeconômica:** está associada à insuficiência de sistemas de recursos hídricos para atender às demandas de água, associando, assim, secas com a oferta e a procura de um bem econômico. Ocorre quando a demanda por um bem é superior à oferta.

O conhecimento sobre os tipos de seca se torna relevante principalmente para a escolha do método de avaliação. Em relação às secas meteorológicas, objetivo de estudo desse trabalho, vários métodos têm sido propostos para a identificação, quantificação e controle dos fenômenos de estiagem ou secas. Entre eles, os mais conhecidos são os índices de seca, que se configuram em combinações especiais de indicadores que abrangem dados meteorológicos, hidrológicos dentre outros.

Os índices de seca são elementos importantes e úteis para o monitoramento e avaliação das secas, uma vez que simplificam as inter-relações complexas entre muitos parâmetros relacionados com o clima (TSAKIRIS *et al.,* 2007).

Os índices facilitam a comunicação de informações sobre anomalias climáticas para diversos públicos de usuários e permitem aos cientistas avaliar quantitativamente anomalias climáticas em termos de sua intensidade, período de duração, extensão espacial e frequência, possibilitando analisar eventos históricos de secas e sua probabilidade de recorrência.

Atualmente, existem diversos índices climáticos que podem ser utilizados para explicar a ocorrência de tendências e variabilidades de séries históricas climáticas. No entanto, o estudo irá se deter apenas àqueles relacionados à seca meteorológica, que como mencionado está diretamente ligada ao déficit de precipitação, quando ocorre precipitação abaixo do que é normal. O Quadro 1, apresenta um resumo dos principais índices de seca meteorológica e suas principais características.

Dentre os índices que mais vêm se destacando na identificação de eventos críticos climáticos, destaca-se o Índice de Precipitação Padronizado (IPP) mundialmente conhecido como *Standardized Precipitation Index* (SPI), o qual foi desenvolvido por Mc Kee *et al.*, (1993), com o objetivo de monitorar e analisar a seca em diferentes escalas de tempo. Esse índice é vantajoso em relação aos demais porque utiliza apenas dados mensais de precipitação, variável monitorada em todas as estações meteorológicas.

Desde que foi proposto, o SPI vem sendo usado em vários estudos, devido à sua capacidade de quantificar o déficit ou excesso de precipitação em diversas escalas temporais e permitir comparações entre regiões com diferentes características climáticas. Assim, diversos trabalhos científicos têm demonstrado o seu potencial no monitoramento do fenômeno das secas, determinando sua intensidade e espacialização, identificando as vantagens na utilização do método, dentre eles destacam-se: HUGHES e SAUNDERS 2002; TSAKIRIS e VANGELIS, 2004; TONKAZ, 2006; BLAIN e BRUNINI, 2007 e MORADI *et al.,* (2011).

O SPI é uma metodologia que vem sendo aplicada e difundida no Nordeste do Brasil para caracterizar os períodos extremos (secos e chuvosos) e pode ser utilizado para quantificar o déficit e/ou excesso de precipitação nas múltiplas escalas de tempo. Esse índice tem se mostrado bastante útil no monitoramento da precipitação, principalmente pela sua flexibilidade, simplicidade de cálculo e interpretação.

Quadro1 - Índices de seca meteorológica e suas principais características (continua).

Índice	Dados de entrada	Escala	Prós	Contras
Índice Porcentagem Normal (PN) "*Percent of Normal*"	P	S, M, A	Um simples cálculo efetivo para comparação entre uma única região ou estação. Contras:	Desde que a "normal" é uma construção matemática baseada em um número limitado de anos, não pode sempre refletir tendências climáticas
Decis (D) "Deciles"	P	M	Remove algumas fraquezas de aproximação do PN, fornecendo uma medida estatística exata da precipitação.	Exige no mínimo 30 anos de registro de dados.
Índice de Precipitação Padronizada (SPI) "*Starterized Precipitation Index*	P	M	O SPI pode ser calculado para diferentes escalas de tempo. Possibilita o aviso prévio da seca e ajuda a avaliar a severidade da seca, além de ser menos complexo que o PDSI.	Os valores de SPI são baseados em dados preliminares e podem mudar. Exige no mínimo 30 anos de registro de dados.
Índice de Anomalia de Chuva (RAI) "*Rainfall Anomaly Index*	P	M, A	Difere do índice SWSI por adicionar o valor de temperatura. Diferenças entre o RAI e os mais complexos índices de Palmer são insignificantes.	O indicativo de ano seco, nem sempre garante a ausência de cheias em uma região estudada.
Índice de Seca de Bhalme & Mooley (BMDI) "*Bhalme & Mooley Drought Index*"	P	M, A	O índice (Z) de umidade do algoritmo de Palmer foi substituído por um índice mais simples de precipitação mensal calculado somente com dados de precipitação. O índice é eficaz para analisar as regiões tropicais.	Como considera somente os dados de precipitação, não é um bom indicador regional de seca.

Abreviaturas: P – Precipitação; S – Semanal, M – Mensal, A – Anual

Fonte: Adaptado de Fernandes *et al.*, (2009).

Quadro 1 - Índices de seca meteorológica e suas principais características (conclusão).

Índice	Dados de entrada	Escala	Prós	Contras
Índice de Severidade de Herbst (HSI) "*Herbst Severity Index*"	P	M	O HSI é uma ferramenta que melhor se aplica em locais que tenham secas de longos períodos, como o nordeste brasileiro.	Como o total de precipitação varia de ano a ano, espera-se que as culturas típicas estejam ajustadas à variabilidade média de precipitação.
Índice de Desvio de Chuva de Lamb (LRDI) "*Lamb Rainfall Departure Index*"	P	M	Uma das principais vantagens desse índice é que todas as séries de precipitação, mesmo apresentando falhas, podem ser usadas na determinação do índice regional.	
Índice de Seca Efetiva (EDI) "*Effective Drought Index*"	P	D	O índice é calculado em escala diária e é uma função da precipitação necessária, ou seja, que está faltando para retornar para as condições normais (climatológicas). Os valores de EDI são normalizados, podendo comparar secas de diversas localidades.	Utiliza dados diários de precipitação, muitas vezes esses dados não estão disponíveis para as regiões que se pretende estudar
Índice de Severidade de Seca de Palmer (PDSI) "*Palmer Drought Severity Index*"	P, T, US	M	Prós: Utiliza um algoritmo para calcular o balanço hídrico e a umidade do solo, baseado na temperatura e precipitação como dados de entrada, além de ser particularmente útil para aplicações agrícolas	Os valores de Palmer podem não identificar as secas tão facilmente como outros índices

Abreviaturas: P – Precipitação, T – Temperatura, QN – Quantidade de Neve, FS – Fluxo em Superfície, R – Runoff, US – Umidade do Solo, D – Decendial, S – Semanal, M – Mensal, A – Anual.

Fonte: Adaptado de Fernandes *et al.*, (2009).

A principal característica do SPI é a possibilidade de utilização de monitoramento tanto de condições úmidas como secas em diversas escalas de tempo. Esta flexibilidade temporal possibilita a sua utilização em várias aplicações.

Em um estudo semelhante desenvolvido por Assis (2016), a autora utilizou o Índice de Anomalia de Chuva (IAC), que indicou também modificação importante no padrão da precipitação, com aumento da ocorrência de anos secos em detrimento de anos chuvosos. Além dos métodos citados, existem os índices de extremos climáticos que são utilizados normalmente para monitorar e detectar as mudanças do clima e alteração do padrão pluviométrico de uma região, em diferentes escalas.

2.1.3 Ações mitigatórias de combate à seca no Submédio da bacia do São Francisco

O Ministério de Desenvolvimento Social e Combate à Fome (MDE) financia desde 2003 a construção de cisternas nas regiões mais pobres e afetadas pela seca em pequenas comunidades do Norte e Nordeste. A captação é feita pela água da chuva, que escorre por calhas instaladas nas casas para as cisternas com capacidade de 16 mil litros. O investimento de R$ 2,8 milhões permitiu a diminuição drástica do uso de água dos escassos açudes e dos poços artesianos, que era vendida de casa em casa. Além disso, uma cisterna dessas que é considerada pequena, pode garantir o consumo de uma família de cinco pessoas durante oito meses.

Em 2004, o Governo Federal, junto ao MMA e em parceria com instituições federais, estaduais, municipais e a sociedade civil, lançou o Programa Água Doce (PAD) que é um projeto de implantação de módulos de manejo sustentável da agrobiodiversidade para o combate à desertificação.

Para o MMA (2012), o "PAD" é uma ação do Governo Federal que visa estabelecer uma política pública permanente de acesso à água de qualidade para o consumo humano, incorporando cuidados técnicos, ambientais e sociais na implantação, recuperação e gestão de sistemas de dessalinização de águas salobras e salinas, estratégia para a implementação das Unidades de Recuperação de Áreas Degradadas (URAD) e redução da vulnerabilidade climática na região semiárida brasileira.

Outro avanço para mitigar os efeitos da seca na região semiárida foi a elaboração do Projeto de Integração do Rio São Francisco (PISF), considerado atualmente como a maior obra de infraestrutura hídrica do país, dentro da Política Nacional de Recursos Hídricos, financiada pelo Ministério da Integração Nacional.

Segundo Morais (2017), a obra possui 477 quilômetros de extensão em dois eixos (Leste e Norte), o empreendimento vai garantir a segurança hídrica de 12 milhões de pessoas em 390 municípios nos estados de Pernambuco, Ceará, Rio Grande do Norte e Paraíba, onde a estiagem é frequente. Desta forma, diminuiria o impacto da seca sobre a sofrida população residente, pois facilitaria o desenvolvimento da agricultura na região.

Costa e Araújo (2016) ressaltam que o programa possui cinco linhas de ações: qualidade ambiental, agenda socioambiental, proteção ambiental, manejo de recursos naturais e economia sustentável distribuídos em 38 Programas Básicos Ambientais (PBA). As ações desenvolvidas dos 38 programas possibilitam o conhecimento profundo da fauna e flora do bioma Caatinga, além de aspectos econômico-sociais e arqueológicos da região. As atividades são acompanhadas e executadas por diversas equipes, como técnicos do ministério, empresas contratadas e parceiros intervenientes.

Apesar das ações mitigatórias implantadas pelo governo federal, a partir de 2012, com o prolongamento da seca, os principais reservatórios de águas inseridos no Submédio São Francisco passaram a sofrer quedas contínuas nos estoques de água e consequentemente redução na produção de energia elétrica. (Figuras 1 e 2).

Figura 1 - Histórico da vazão afluente dos reservatórios de Sobradinho e Itaparica entre o período de 1999 e 2019.

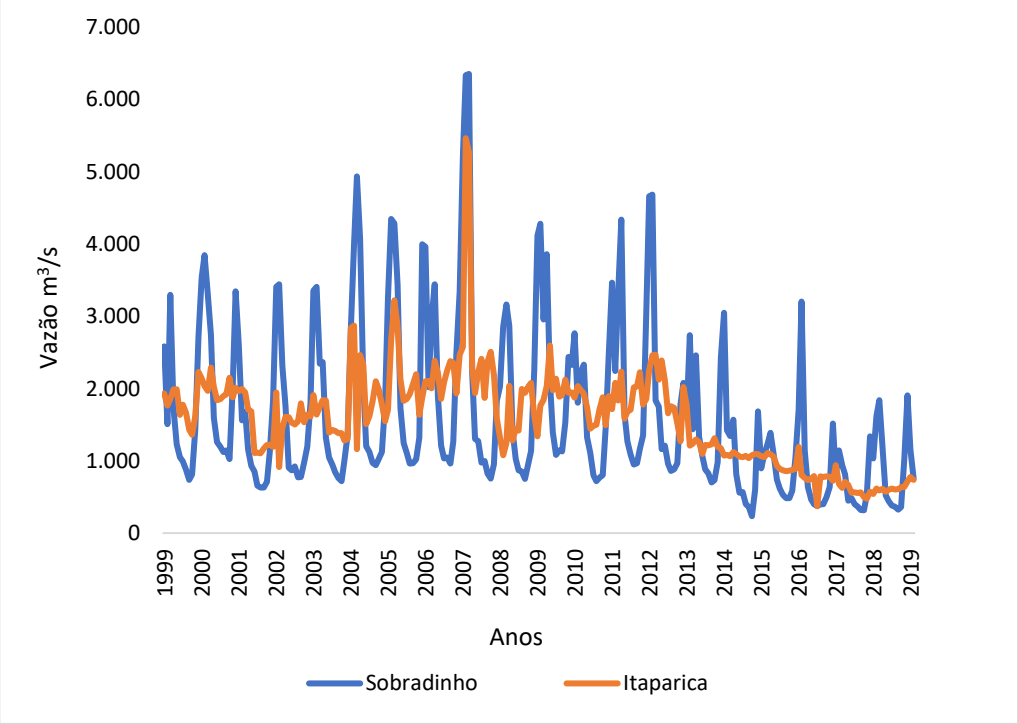
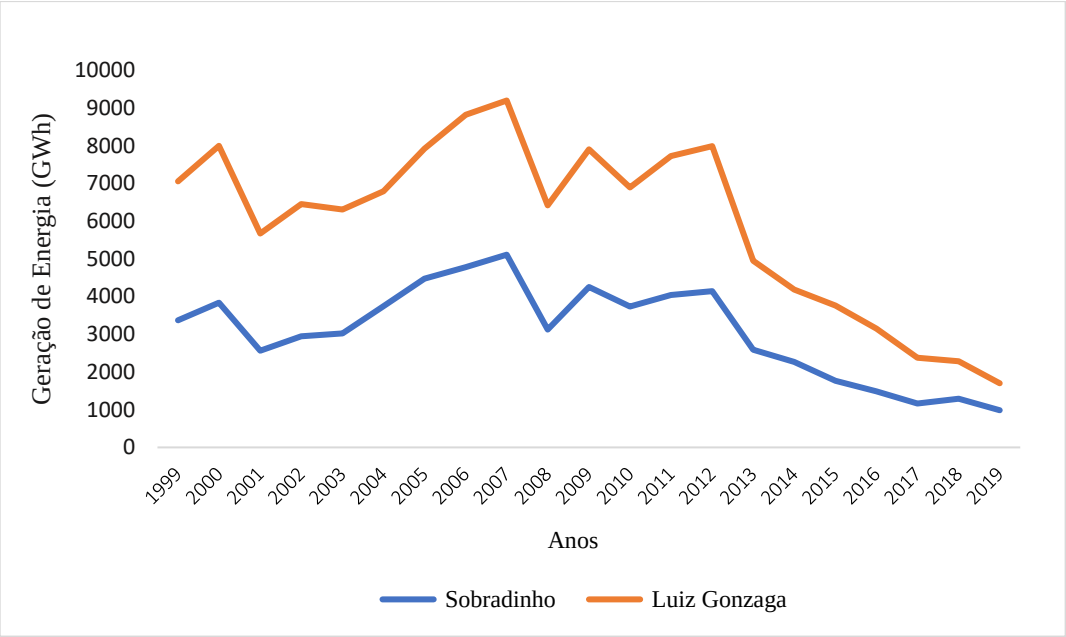


Figura 2 - Histórico da geração de energia elétrica dos reservatórios de Sobradinho e Itaparica entre o período de 1999 e 2019.



Além de estabelecer a redução da vazão, em 2018 a ANA também criou o “Dia do Rio”, como uma medida de restrição de uso para captações em corpos d’água superficiais perenes de domínio da União na bacia hidrográfica do rio São Francisco que ainda não estivessem submetidos a outras regras de restrição.

Para Godim *et al.*, (2017) as captações na calha ou nos reservatórios do rio São Francisco, para grandes perímetros públicos de irrigação, precisaram ser adaptadas aos novos níveis decorrentes da redução dos volumes acumulados e das vazões de escoamento, como a captação do Perímetro Irrigado Nilo Coelho, em Petrolina (PE).

De acordo com a ONS (2016), uma das consequências mais preocupantes da seca foi impacto na produção energética brasileira. Mais de 80% da eletricidade gerada no país é proveniente de hidrelétricas e os reservatórios que abastecem tais usinas estão com níveis irrisórios.

A redução da produção de energia elétrica implicou no aumento de mais de 50% nas contas de luz. Os aumentos estão em parte ligados à renovação de algumas concessões e contratos com as distribuidoras, pois o sistema de bandeiras tarifárias também tem papel chave no que o consumidor final paga na conta. Para minimizar os custos, uma das possibilidades levantadas pelo Ministério de Minas e Energia (MME), foi a extensão do período do horário de

verão. Mas a ideia não teve sucesso porque a análise concluiu que o impacto de economia seria praticamente nulo.

Recentemente em 2018, o Governo Federal reforçou os investimentos em ações emergenciais para reduzir os impactos da maior estiagem dos últimos anos. Desde abril de 2018, um conjunto abrangente de medidas vêm sendo implementadas para reforçar a rede de proteção social no semiárido. O total de investimentos em ações emergenciais é de R$ 2,7 bilhões.

Em relação às ações voltadas ao combate da desertificação, em 2016 a Organização das Nações Unidas (ONU), certificou a Companhia de Desenvolvimento dos Vales do São Francisco e do Parnaíba (CODEVASF) através do Programa de Controle de Processos Erosivos, reconhecendo como sendo parte essencial do combate à degradação do solo, à desertificação e à seca.

Segundo a CODEVASF (2016), a certificação ambiental *Dryland Champions* (UNCCD/MMA) que tem o lema "Eu sou parte da solução", foi concedida em 2016 e confere um caráter internacional ao trabalho realizado pela instituição no combate à desertificação, possibilitando uma maior visibilidade e abrindo portas para que ele seja compartilhado com outras regiões do planeta, que buscam soluções para os desafios da mudança climática e da escassez da água. Outras medidas também foram desenvolvidas pelos órgãos competentes brasileiros, apresentadas na Quadro 2.

2.2 MATERIAIS E MÉTODOS

2.2.1 Dados de Precipitação

Neste trabalho foram usados os totais mensais precipitados de 22 postos pluviométricos regionais localizados na Bacia Hidrográfica do Submédio São Francisco, fornecidos pela Agência Nacional de Águas (ANA), através do site HidroWeb (ANA; http://hidroweb.ana.gov.br/) observando as séries históricas de dados com o menor número de falhas, cujas séries apresentam um longo período de registros, totalizando 44 anos (1970-2014), conforme Quadro 3.

Quadro 2 - Principais ações desenvolvidas por órgãos no Brasil para diminuir o impacto da seca na região semiárida brasileira.

AÇÕES	ÓRGÃOS										
	ANA	**CPRM**	**EMBRAPA[1]**	**MAPA[2]**	**MMA**	**ONS**	**MI**	**DNOCS[3]**	**CODEVASF**	**MDS**	**Referências**
Criação Comitês Estaduais para combater a estiagem				■							Magalhães, 1993
Perenização de corpos hídricos.	■										INEA, 2002
Auxílio financeiro emergencial (Bolsa Estiagem)							■				Lei nº 10.954/2004
Desenvolvimento sustentável do bioma caatinga					■						FNMA, 2006
Construções de cisternas nas regiões mais pobres e afetadas pela seca	■		■	■						■	França, 2010
Conservação do solo, redução do escoamento superficial de águas pluviais e assoreamento dos rios			■						■		Embrapa, 2012
Desenvolvimento da agropecuária sustentável e de novas tecnologias de recuperação e conservação do meio ambiente.			■						■		Sambuichi *et al* 2012
Diminuição de inundações.				■					■		MAPA, 2012
Distribuição de água através de carros-pipa em épocas de estiagem.							■				Portaria nº01/2012
Incentivo público à agricultura adaptada ao clima e solo da região.	■				■						IPEA, 2012
Captação e acúmulo de água da chuva.			■								Embrapa, 2013
Racionamento de energia						■					Bardelin, 2004 & ONS, 2016
Construções de açudes e barragens	■										ANA, 2017
Criação do Programa "Água para Todos"							■			■	Decreto nº 355/2011; Informativo nº115/2017
Fogões ecológicos, Meliponicultura e agrofloresta					■						MMA, 2017
Recuperação de poços.		■		■							CPRM, 2017
Monitoramento da qualidade da água.	■						■				ANA, 2019 & PDAs
Redução da vazão defluente do reservatório de Sobradinho	■										Resolução ANA nº51/2018
Restrição de captações de água	■										Resolução ANA nº33/2018

Quadro 3 - Postos pluviométricos da ANA analisados com indicação de sua localização e histórico disponível (continua).

Ordem	Coordenadas (Graus)		Posto pluviométrico	1970										1980										1990									
	Latitude	Longitude		**0**	**1**	**2**	**3**	**4**	**5**	**6**	**7**	**8**	**9**	**0**	**1**	**2**	**3**	**4**	**5**	**6**	**7**	**8**	**9**	**0**	**1**	**2**	**3**	**4**	**5**	**6**	**7**	**8**	**9**
1	-7,74	-37,65	Afogados																														
2	-8,48	-41,00	Afrânio																														
3	-7,55	-40,57	Araripina																														
4	-8,35	-37,16	Arcoverde																														
5	-8,28	-38,03	Betânia																														
6	-9,07	-38,30	Chorrochó																														
7	-7,65	-40,13	Exu																														
8	-8,60	-38,58	Floresta																														
9	-8,38	-37,63	Ibimirim																														
10	-11,01	-40,77	Jacobina																														
11	-9,42	-40,50	Juazeiro																														
12	-7,57	-39,69	Moreilândia																														
13	-7,88	-40,07	Ouricuri																														
14	-9,38	-40,50	Petrolina																														
15	-9,68	-42,07	Remanso																														
16	-8,07	-39,12	Salgueiro																														
17	-8,27	-40,25	Santa Cruz Venerada																														
18	-8,80	-39,83	Santa Maria da Boa Vista																														
19	-9,67	-41,30	Santo Sé																														
20	-8,00	-38,25	Serra Talhada																														
21	-9,10	-38,15	Tacaratu																														
22	-7,75	-37,30	Tuparetama																														

Dado com falha (± 60 dias)
Dados com falha (± 90 dias)

Quadro 3 - Postos pluviométricos regionais analisados com indicação de sua localização e histórico disponível (conclusão).

Ordem	Coordenadas (Graus)		Posto pluviométrico	2000										2010									
	Latitude	Longitude		0	1	2	3	4	5	6	7	8	9	0	1	2	3	4	5	6	7	8	9
1	-7,74	-37,65	Afogados																				
2	-8,48	-41,00	Afrânio																				
3	-7,55	-40,57	Araripina																				
4	-8,35	-37,16	Arcoverde																				
5	-8,28	-38,03	Betânia																				
6	-9,07	-38,30	Chorrochó																				
7	-7,65	-40,13	Exu																				
8	-8,60	-38,58	Floresta																				
9	-8,38	-37,63	Ibimirim																				
10	-11,01	-40,77	Jacobina																				
11	-9,42	-40,50	Juazeiro																				
12	-7,57	-39,69	Moreilândia																				
13	-7,88	-40,07	Ouricuri																				
14	-9,38	-40,50	Petrolina																				
15	-9,68	-42,07	Remanso																				
16	-8,07	-39,12	Salgueiro																				
17	-8,27	-40,25	Santa Cruz Venerada																				
18	-8,80	-39,83	Santa Maria da Boa Vista																				
19	-9,67	-41,30	Santo sé																				
20	-8,00	-38,25	Serra Talhada																				
21	-9,10	-38,15	Tacaratu																				
22	-7,75	-37,30	Tuparetama																				

Dado com falha (± 60 dias)
Dados com falha (± 90 dias)

Para comparar com os dados de precipitação regional, foram utilizados dados globais de precipitação, adquiridos junto ao *Watch EU Programme* através do site (http://www.eu-watch.org) oriundos de 38 células, compreendendo um período de 32 anos (1981-2013), conforme o Quadro 4. O *Watch* é um projeto de pesquisa financiado no âmbito do *Sixth Framework Programme* (6º FP), que é o quadro para as atividades no campo da ciência, pesquisa e inovação da União Europeia (EU), que reuniu as comunidades hidrológicas, de recursos hídricos e climáticas para analisar e quantificar os componentes dos ciclos de água globais atuais e futuros, avaliando as incertezas e vulnerabilidade dos recursos hídricos. Os dados pluviométricos a nível global do *Watch* estão disponíveis em escala de célula com resolução espacial de 0,5º, aproximadamente 50 x 50 km.

Quadro 4 - Postos pluviométricos globais (centro das células) operados e disponibilizados pelo *Watch* para área de estudo (continua).

Ondem	**Estação**	**Coordenadas (UTM)**	
		Latitude	**Longitude**
1	100881	1.299.161,078	8.991.283,078
2	100882	1.300.368,282	9.048.021,684
3	100883	1.300.368,282	9.102.949,484
4	100940	1.243.629,676	8.936.458,881
5	100941	1.244.233,278	8.992.490,282
6	100942	1.244.233,278	9.048.021,684
7	100943	1.246.647,687	9.103.553,086
8	101000	1.189.305,478	8.938.166,085
9	101001	1.188.701,876	8.994.904,691
10	101002	1.189.909,081	9.051.039,695
11	101003	1.190.512,683	9.105.967,495
12	101060	1.133.170,474	8.941.787,698
13	101061	1.133.774,076	8.994.301,089
14	101062	1.134.377,679	9.051.643,298
15	101063	1.134.377,679	9.105.967,495
16	101120	1.077.639,020	8.939.976,892
17	101121	1.078.342,674	8.995.508,293
18	101122	1.078.846,277	9.051.643,298
19	101123	1.080.053,481	9.107.778,302
20	101124	1.079.449,879	9.162.102,499
21	101179	1.022.711,272	8.886.256,296

Quadro 4 - Postos pluviométricos globais (centro das células) operados e disponibilizados pelo *Watch* para área de estudo (conclusão).

22	101180	1.022.711,272	2.941.184,096
23	101181	1.022.711,272	8.996.715,498
24	101182	1.023.918,477	9.052.246,900
25	101183	1.023.918,477	9.107.174,700
26	101184	1.025.125,681	9.162.706,101
27	101237	964.765,462	8.775.797,094
28	101238	965.369,064	8.830.724,894
29	101239	965.369,064	8.887.463,501
30	101240	966.576,268	8.942.591,300
31	101241	967.783,473	8.997.139,100
32	101242	968.387,075	9.053.454,104
33	101297	912.855,673	8.998.526,304
34	101298	911.044,866	8.832.535,701
35	101299	911.044,866	8.886.256,296
36	101300	911.044,866	8.942.994,902
37	101301	909.234,060	8.777.004,299
38	101360	857.324,271	8.944.202,107

2.2.2 Preenchimento de Falhas

Após a análise preliminar, na qual foram identificadas falhas e inconsistências nas séries dos postos pluviométricos da ANA, realizou-se a etapa de preenchimento de falha, que permitiu o preenchimento de lacunas nos registros ou a substituição de dados inconsistentes, visto que todos os dados pluviométricos observados (monitorados) necessitam de tratamentos e processamentos básicos para que os mesmos possam ser utilizados com confiabilidade.

O método utilizado para o preenchimento de falhas, foi o vetor regional, proposto por Hiez (1977, 1978). Esse método consiste na determinação de dois vetores {L} (vetor coluna com **n** linhas, ou seja, **n** observações) e {C} (vetor linha com **m** colunas, ou seja, **m** postos), cuja multiplicação resulta numa aproximação da matriz de precipitações [Pe]. O vetor {L} contém índices que são únicos para toda a região e estão relacionados às alturas precipitadas em cada posto por meio dos coeficientes contidos no vetor {C}.

A partir da análise de consistências dos postos pluviométricos, a fim de obter a precipitação média da bacia do Submédio São Francisco, foi utilizado o método dos poligonos de Thiessen, conforme descrição a seguir.

2.2.3 Precipitação Média

O método de espacialização dos polígonos de Thiessen estabelece que o volume precipitado em qualquer ponto da área é igual ao registrado no pluviômetro mais próximo. Nesse método, a influência de um determinado posto pluviométrico é aplicada até a metade da distância do seguinte pluviômetro em qualquer direção. Os pesos relativos de cada pluviômetro são determinados de acordo com as áreas de influência da rede, com a precipitação média calculada a partir da Equação (1). Neste sentido, foi aplicado o poligono de Thiessen para as estações regionais monitoradas pela ANA, bem como para os dados globais, obtidas pelo *Watch* (Figuras 3 e 4).

$$\mathrm{Pm} = \frac{1}{A}.\sum A_i P_i \qquad \text{(Eq. 1)}$$

Onde: Pm = é a precipitação média na bacia (mm);
A = é a área total da bacia;
$A_{i\,=}$ é a precipitação na estação (mm);
$P_{i\,=}$ é a área de influência da estação.

Figura 3 - Distribuição espacial das estações pluviométricas da ANA no SMSF.

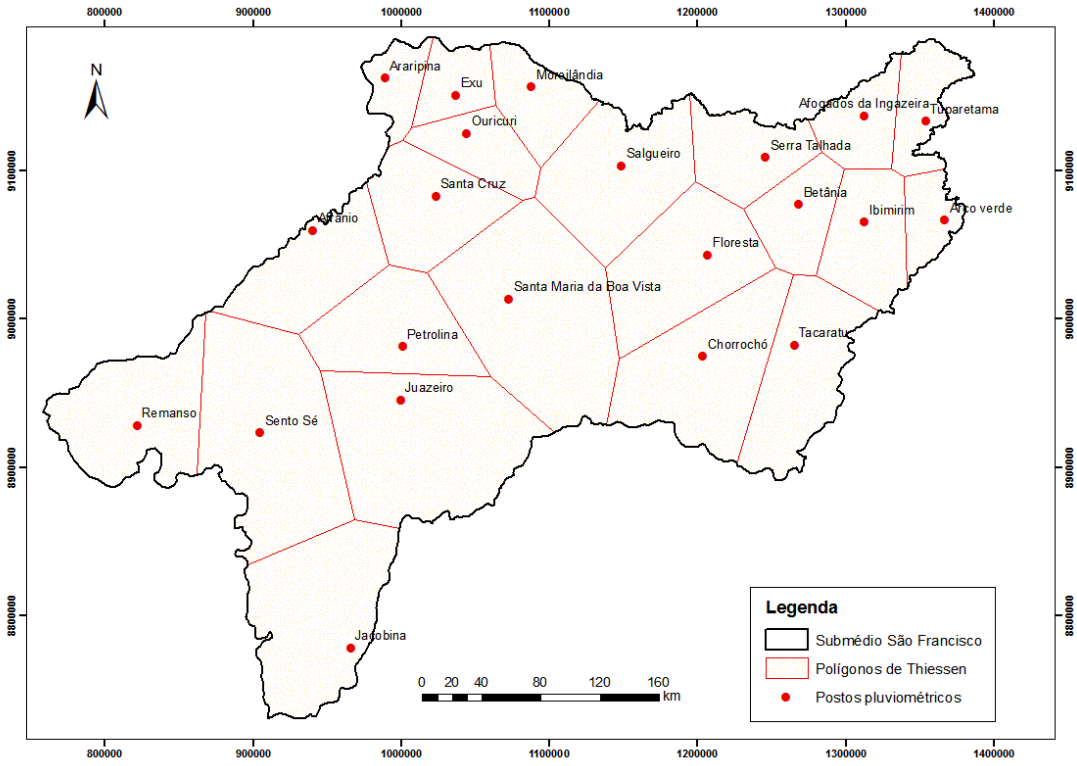
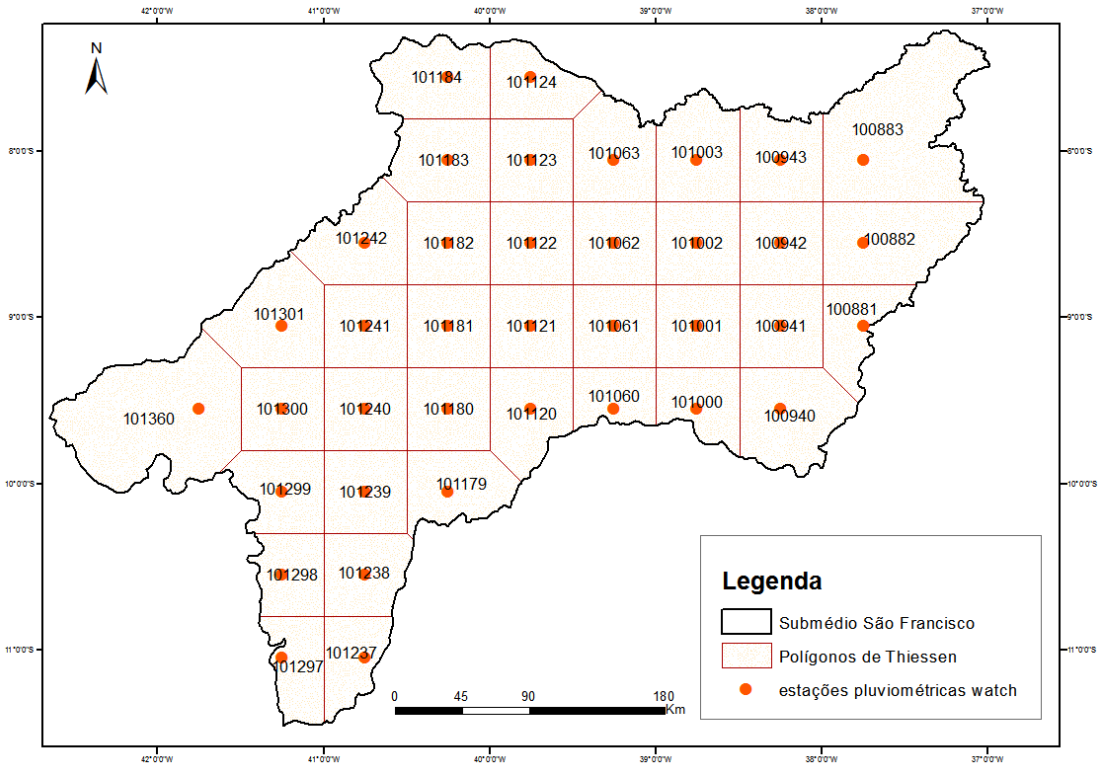


Figura 4 – Distribuição espacial das estações pluviométricas (centro das células) de acordo com o EU-*Watch* no SMSF.



Fonte: A Autora, 2019.

Para elaboração do mapa de espacialização pelo método de Thiessen, foi utilizado o software ArcGis 10.4.1, por meio da ferramenta *ArcToolBox (Analysis Tools – Proximity – Create Thiessen Polygons)*, no qual foi considerado apenas a área de influência dos postos pluviométricos inseridos dentro da bacia hidrográfica. O *software* foi obtido junto ao Instituto de Tecnologia de Pernambuco – ITEP. A partir da precipitação média obtida pelo cálculo de Thiessen, foi aplicado o Índice Padronizado de Precipitação (SPI).

2.2.4 Cálculo do Índice Padronizado de Precipitação (SPI)

No cálculo do SPI, as precipitações foram somadas ao longo dos 6 meses antecedentes, que são as precipitações acumuladas de janeiro a junho a partir do ano de 1970. Esse conjunto de dados, resultantes do somatório das precipitações ao longo dos meses foi em seguida ajustado a uma função densidade de probabilidades, que é o ajuste da distribuição Gama, utilizada por Mc Kee *et al.*, (1993).

A variablidade dos totais mensais e anuais foi determinado por meio do desvio padrão e o coeficiente de variação obtido pela Equação (2).

$$g\ (x) = \frac{1}{\beta^{a}\Gamma(a)} x^{a-1} e^{-1/b} \qquad \text{(Eq. 2)}$$

Onde *a*> 0 é o parâmetro de forma; *b*> 0 é o parâmetro de escala e *x*> 0 é quantidade de chuva precipitada. A função Gama é obtida através da Equação (3).

$$\Gamma(a) = \int_{0}^{\infty} y^{a-1}\, e^{-y} dy \qquad \text{(Eq. 3)}$$

Os parâmetros *a* e *b* da função densidade de probabilidade Gama são estimados para cada posto pluviométrico e escala de tempo de interesse. Para estimar os parâmetros *a* e *b* se utilizam as soluções de Máxima Verossimilhança, conforme as Equações (4), (5) e (6).

$$\hat{a} = \frac{1}{aA}\left(1 + \sqrt{1 + \frac{4A}{3}}\right) \qquad \text{(Eq. 4)}$$

Onde

$$A = (\bar{x}) - \frac{\sum_{\ddot{n}}^{n} x_i}{n} \qquad \text{(Eq. 5)}$$

e,

$$\hat{b} = \frac{\bar{x}}{\hat{a}} \qquad \text{(Eq. 6)}$$

Onde *n* é o número de observações da amostra e $\bar{x}$ é o valor médio dos dados de chuva. A função acumulada de probabilidade Gama é dada pela Equação (7).

$$G(X) = \frac{1}{\Gamma(\hat{a})} \int_{0}^{x} t^{\hat{a}-1} e^{-t} \mathrm{dt} \qquad \text{(Eq. 7)}$$

A função Gama Γ(a), não é definida para x = 0, mas como a amostra dos dados de precipitação poder conter zero, a probabilidade acumulada é dada pela Equação (8).

$$H(x) = q + (1 - q)G(x) \quad \text{(Eq. 8)}$$

Onde *q* é a probabilidade de ocorrer um zero. Se *m* for o número de zeros em uma série de *n* dados de precipitação, então *q = m/n.* Segundo Abramowitz e Stegun (1965) a relação entre as distribuições de probabilidade Gama e Normal pode ser obtida pelas Equações 9 e 10, sendo seus parâmetros obtidos pelas Equações 11 e 12, respectivamente:

$$z = SPI = -\left(t - \frac{C_0 + C_1 t + C_2 t^2}{1 + d_1 + d_2 t^2 + d_3 t^3} \right) \text{ para } 0 < H(x) \leq 0{,}5 \quad \text{(Eq. 9)}$$

$$z = SPI = -\left(t - \frac{C_0 + C_1 t + C_2 t^2}{1 + d_1 + d_2 t^2 + d_3 t^3} \right) \text{ para } 0 < H(x) \leq 1{,}0 \quad \text{(Eq. 10)}$$

Sendo, c0 = 2,515; c1 = 0,803; c2 = 0,010; d1 = 1,433; d2 = 0,189; d3 = 0,001;

Onde

$$t = \sqrt{ln\left(\frac{1}{(H(x))^2}\right)} \text{ para } 0 < H(x) \leq 0{,}5 \quad \text{(Eq. 11)}$$

$$t = \sqrt{ln\left(\frac{1}{(1 - H(x))^2}\right)} \text{ para } 0 < H(x) \leq 1{,}0 \quad \text{(Eq. 12)}$$

Para a obtenção do cálculo, deverá se iniciar com o ajuste das séries de totais mensais precipitados à função densidade de probabilidade Gama. Em seguida, a probabilidade acumulada de ocorrência de cada total mensal é estimada. O evento seca ocorre no período em que o valor do índice é continuamente negativo. O evento seca cessa quando os valores se tornam positivos.

É importante ressaltar que o método exige uma série de dados mensais com no mínimo trinta anos e como observado, o índice é determinado a partir das funções de densidade de probabilidade que descrevem as séries históricas de precipitação em diferentes escalas de tempo.

Todas as equações foram manipuladas diretamente por planilhas do programa *Microsoft Excel*. O (Quadro 5), ilustra a classificação utilizada para determinação do SPI segundo Mc Kee *et al.*, (1993), desenvolvedores do modelo.

Quadro 5 - Classificação dos períodos secos e chuvosos do SPI.

Classificação	SPI
Extremamente úmido	≥ 2,00
Severamente úmido	1,50 a 1,99
Moderadamente úmido	1,00 a 1,49
Umidade incipiente	0,10 a 0,99
Normal	0,01 a 0,09
Seca incipiente	0,00 a -0,99
Moderadamente seco	-1,00 a -1,49
Severamente seco	-1,50 a -1,99
Extremamente seco	≤ - 2,00

Fonte: Mc Kee *et al.*, (1993).

De acordo com a classificação, o evento de seca ocorre no período em que o valor do índice é continuamente negativo, cessando quando os valores se tornam positivos. Neste sentido, foram selecionados apenas os anos classificados entre moderadamente úmido a extremamente úmido e entre moderadamente seco a extremamente seco.

Para avaliação do SPI obtido a partir dos dados de precipitação dos postos da ANA (Posto Regional - PR) e dados de precipitação do *Watch* (Posto Global - PG), serão utilizados os termos SPI-PR e SPI-PG.

2.3 RESULTADOS E DISCUSSÃO

O ajuste das séries mensais de precipitação pluvial à distribuição Gama possibilitou o uso do SPI para quantificar e analisar os períodos críticos climáticos na área de estudo. Neste sentido, foram destacadas aqui apenas as secas de categorias mais intensas, com valores de SPI abaixo de -1,0, (moderadamente seco a extremamente seco) e as anomalias acima de 1,0, classificadas entre moderadamente úmido a extremamente úmido.

Os SPI obtidos para os postos regionais (PR) e globais (PG), mostraram uma sequência de anos secos em detrimento dos anos chuvosos, apresentando uma tendência negativa (diminuição) da precipitação ao longo das séries estudadas (Figuras 5 e 6).

Figura 5 - Série temporal de dados pluviométricos regional para o SMSF.

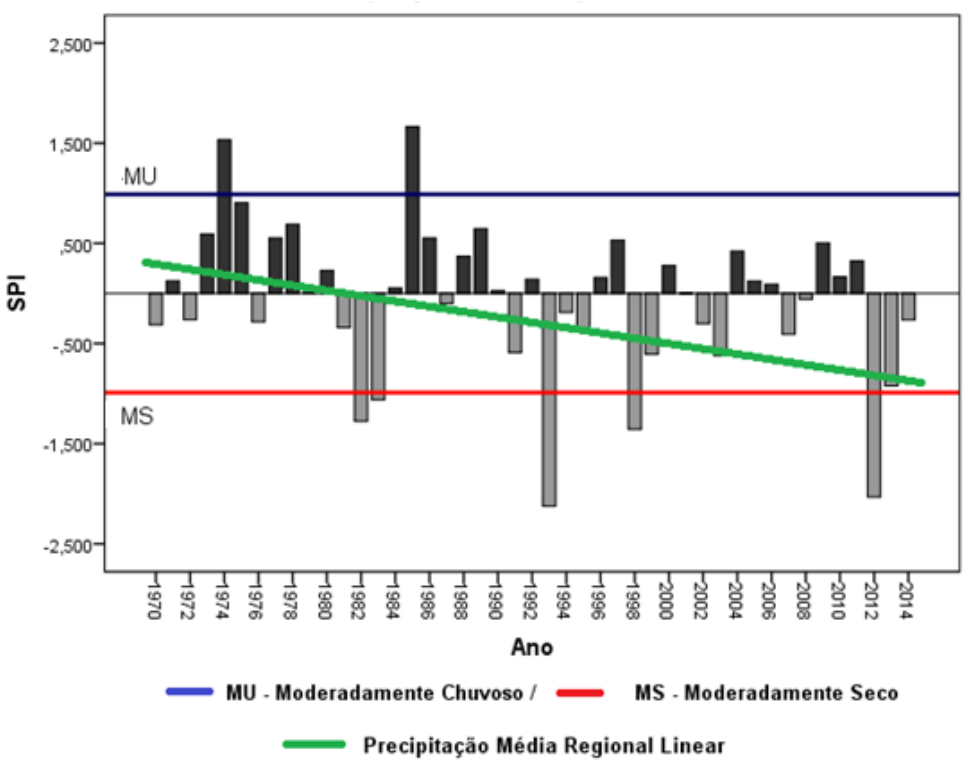
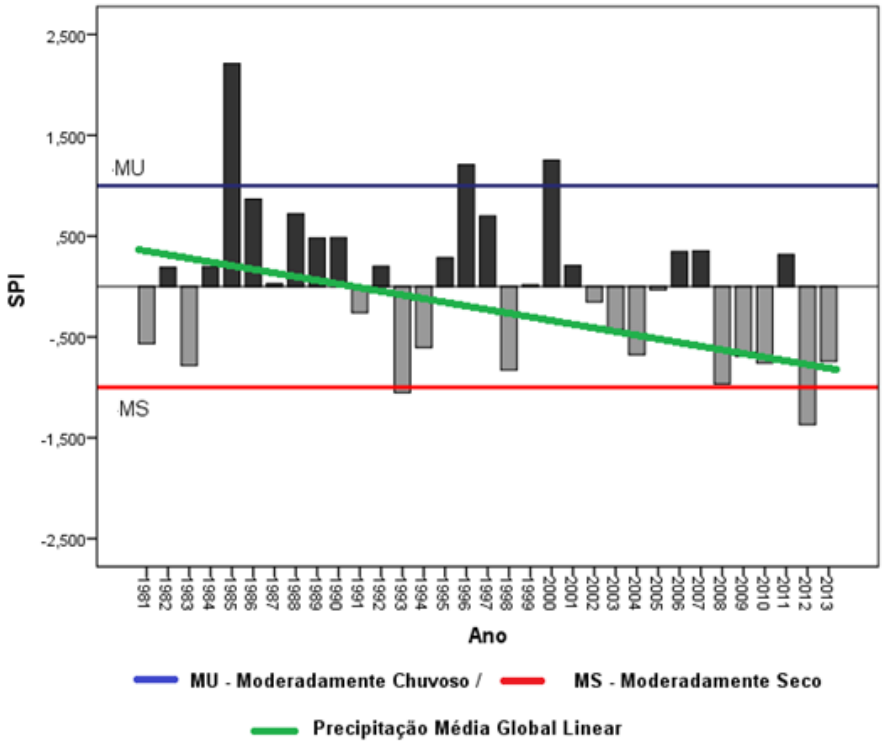


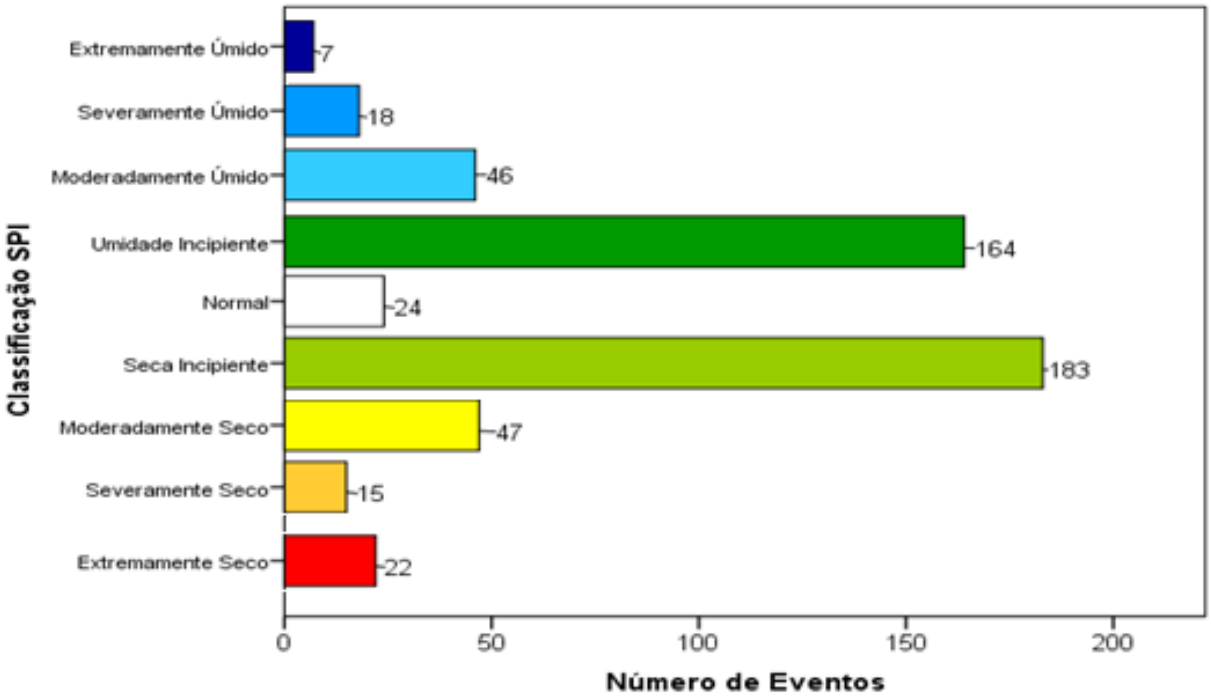
Figura 6 - Série temporal de dados pluviométricos global para o SMSF.



Em relação ao SPI– PR, foram observadas anomalias mais intensas aos registrados pelo SPI - PG, com exceção paras os anos de 1985, onde o SPI – PG classificou como sendo severamente úmido ($\bar{x}$ =1,66) e o SPI - PR como extremamente úmido ($\bar{x}$ =2,21). Em 1996 comumidade incipiente ($\bar{x}$ =0,16) e moderamente úmido ($\bar{x}$ =1,26), e no ano de 2000, onde foi classificado como umidade incipiente ($\bar{x}$=0,28) e moderamente úmido ($\bar{x}$=1,25), respectivamente.

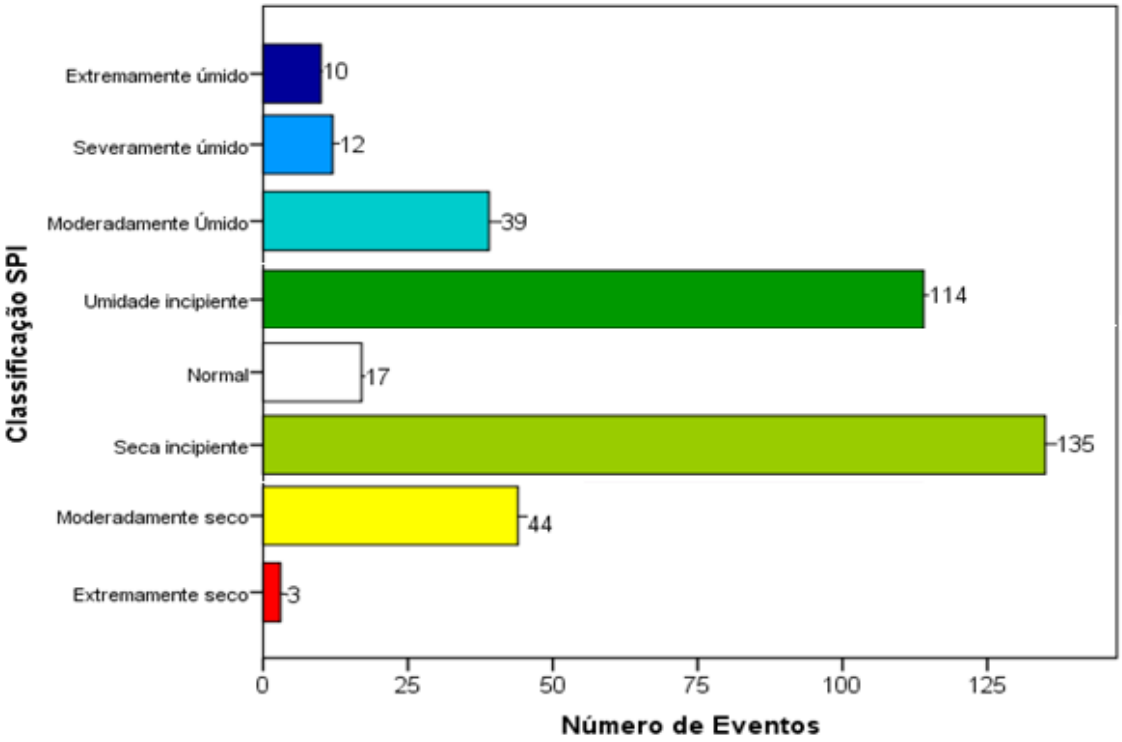
Nas Figuras 7 e 8 podem ser visualizados o número de eventos ocorridos para toda série segundo a classificação do SPI e as Tabelas 1 e 2 destacam os anos em que as classificações para o SPI – PR e SPI - PG tiverem classificações diferentes.

Figura 7 - Números de eventos climáticos ocorridos a partir da precipitação regional no SMSF de 1970-2014.



.

Figura 8 - Números de eventos climáticos ocorridos no SMSF a partir da precipitação global de 1981 – 2013



Os resultados expressos nas Tabelas 1 e 2, evidenciaram que os valores do SPI - PG foram inferiores em quase toda série analisada, quando comparado aos dados do SPI- PR. Esse resultado pode ser justificado pela forma de obtenção da precipitação, uma vez que os dados pluviométricos da ANA são dados pontuais observados, diferentes dos dados pluviométricos do EU-*Watch* que estão disponíveis em escala de célula com resolução espacial de 50 x 50 km. Na Figura 9 é possível entender melhor como ocorre a espacialização da precipitação dentro de uma célula.

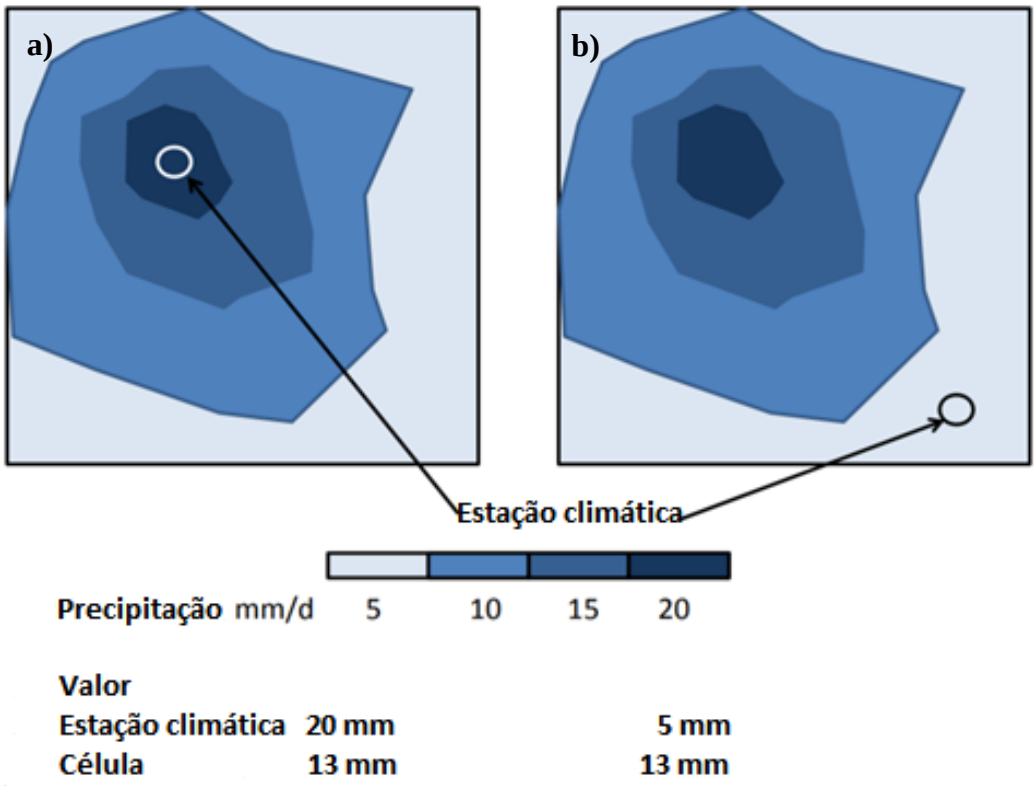
Tabela 1 - Classificação do SPI - PR com a duração do evento.

Quant.	Ano	Período	Duração (meses)	SPI médio	Categoria
1	1982	janeiro/abril -julho e outubro	6	-1,28	moderamente seco
2	1990	julho/dezembro	6	-0,01	seca incipiente
3	1995	fevereiro/junho e novembro/dezembro	7	-0,34	seca incipiente
4	2000	março/maio e novembro/dezembro	5	0,28	umidade incipiente
5	2001	fevereiro/agosto	7	0,00	seca incipiente
6	2004	abril/maio	2	0,42	umidade incipiente
7	2005	Junho/novembro	6	0,12	umidade incipiente
8	2007	abril/maio e agosto/outubro	5	-0,41	seca incipiente
9	2009	abril/junho	3	0,50	umidade incipiente
10	2010	janeiro, agosto/dezembro	6	0,17	umidade incipiente

Tabela 2 - Classificação do SPI - PG com a duração do evento.

Quant.	Ano	Período	Duração (meses)	SPI médio	Categoria
1	1982	abril/setembro	6	0,19	umidade incipiente
2	1990	abril/maio e novembro/dezembro	4	0,49	umidade incipiente
3	1995	abril/junho e outubro/dezembro	6	0,29	umidade incipiente
4	2000	janeiro/maio e setembro/outubro	7	1,25	moderadamente úmido
5	2001	fevereiro/abril e setembro/dezembro	7	0,21	umidade incipiente
6	2004	abril/maio	2	-0,68	seca incipiente
7	2005	janeiro/abril e novembro/dezembro	6	-0,03	seca incipiente
8	2009	maio/agosto e novembro/dezembro	6	-0,69	seca incipiente
9	2010	Janeiro e agosto	2	-0,76	seca incipiente

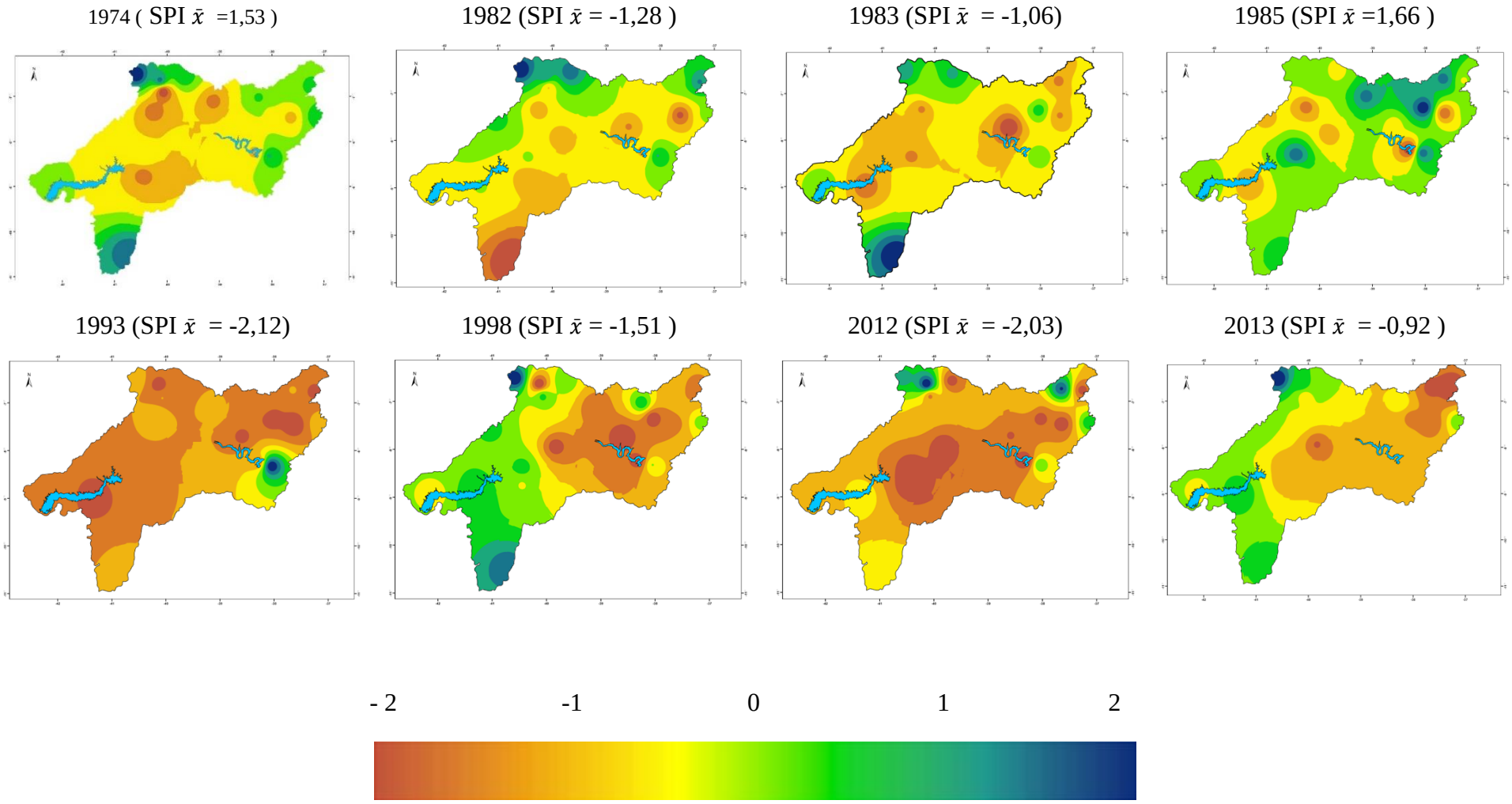
Figura 9 - Distribuição da precipitação por célula.



Conforme a Figura 9 – a) o posto localizado dentro da célula encontra-se inserido no centróide onde a célula tem maior precipitação, nesse caso de 20 mm/d, ou seja, acima do valor médio que é de 13 mm/d. Já a Figura 9 – b), o posto encontra-se numa região dentro da célula com menor precipitação conforme no exemplo de 5 mm/d. Neste sentido, dependendo da localização do posto na célula, o resultado pode ser superestimado ou subestimado.

Considerando que os resultados obtidos pelo SPI-PR foram mais representativos em relação aos obtidos pelo SPI - PG, o estudo irá se deter apenas a discussão dos anos com anomalias entre as categorias SPI $\leq 1{,}0$ e $\geq 1{,}0$ segundo a classificação do SPI- PR. Desta forma, serão considerados apenas os anos de 1974, 1982, 1983, 1985, 1993, 1998, 2012 e 2013, ilustrados espacialmente na Figura 10.

Figura 10 - Distribuição Espacial da Precipitação Média do SPI no trecho do SMSF.



Conforme a Figura 10, o ano de 1974, foi considerado como severamente úmido ($\bar{x}$ =1,53). Resultados similiares foram encontrados por Marengo *et al.,* (2011), em um estudo sobre variabilidade e mudanças climáticas no semiárido brasileiro (1971-2000), onde os autores destacaram que os anos de 1974 e 1985 foram considerados entre os mais chuvosos da região semiárida com vários episódios de chuvas intensas, na categoria forte (maior que 60 mm h-1), principalmente em 1985, com média histórica variando entre 550 mm a 600 mm anuais.

Sobre 1985, estudos revelam que foi um ano marcado por chuvas acima da média na região semiárida do Brasil. O total de precipitação registrado nos meses de janeiro e abril de 1985 representou 82% da média climatológica anual da região. No entanto, as enchentes registradas no Submédio da bacia resultaram de chuvas intensas concentradas entre os dias 09 e 17 do mês de abril a jusante da represa de Sobradinho. Esses eventos tiveram grandes consequências: comunidades ficaram isoladas, casas, barragens e açudes foram destruídos, pessoas e animais morreram e a produção agrícola sofreu perda significativa.

Atualmente estudos comprovam que eventos extremos podem ser justificados pela atuação do fenômeno El Niño. Rizzi *et al.,* (2001) explica que o fenômeno El Niño é uma ruptura do sistema oceano-atmosfera no Pacífico Tropical e tem importantes consequências para o tempo em todo o globo terrestre. Entre essas consequências, os autores afirmam que o aumento da precipitação no sul da América do Sul, estão atingido proporções catastróficas como a de 1983, e secas no mesmo período nas Regiões Norte e Nordeste do Brasil. O aumento dos fluxos de calor sensível e de vapor d'água da superfície do Oceano Pacífico Equatorial para a atmosfera, sobre as águas quentes, provoca mudanças na circulação atmosférica e na precipitação em escala regional e global, que, por sua vez, provocam mudanças nas condições meteorológicas e climáticas em várias partes do mundo.

No entanto Araújo (2010), ressalta que a redução e/ou aumento da precipitação de uma área não está diretamente associada à atuação de episódio El Niño/ La Niña, mais sim à influência do Dipolo do Atlântico juntamente com sistemas meteorológicos, que podem contribuir para que um ano seja chuvoso ou seco.

Em um estudo desenvolvido por Assis (2016), sobre a variabilidade do clima e cenários futuros climáticos na área de estudo, a partir da análise de índices de extremos climáticos, a autora constatou que as precipitações com tendências negativas foram mais influenciadas pelas variações da Temperatura da Superfície do Mar (TSM) no oceano Pacífico em relação às variações no oceano Atlântico, evidenciando que o fenômeno El Niño influencia na redução das chuvas na bacia do Submédio São Francisco. Segundo a autora, os resultados obtidos pelo

índice de Anomalia de Chuva, indicaram também modificação importante no padrão da precipitação, com aumento da ocorrência de anos secos em detrimento aos anos chuvosos.

Resultados semelhantes foram encontrados em trabalhos realizados por Nóbrega, Farias e Santos (2015), em análise para todo o estado de Pernambuco, no período de 1978 a 2010, utilizando a mesma metodologia, os autores concluíram que as chuvas estão ficando cada vez mais concentradas em poucos dias ao longo do ano no Sertão e Agreste de Pernambuco.

Ainda, sobre as atuações do El Niño no Brasil durante os períodos de (1997/1998), esse fenômeno provocou grande seca no semiárido do Nordeste, em 1998, talvez o mais intenso nos últimos 150 anos, apresentando uma característica diferente do padrão normal e extremamente importante: a taxa de crescimento da anomalia de TSM foi muito superior à normal e ao prognosticado nas previsões realizadas pelos principais centros meteorológicos mundiais, em relação a outros fenômenos El Niño. A seca de 1998 resultou em uma queda de 72% na produção de feijão, milho, arroz, algodão e mandioca, segundo o estudo da Fundação Joaquim Nabuco (FUNDAJ) numa pesquisa envolvendo 15 municípios de cinco estados afetados. Após o desastre da seca gerada pelo fenômeno climático, o governo federal disponibilizou 465 milhões de reais, de um total de 1,6 bilhão para atender aos flagelados da seca (NAE, 2005).

Outros anos que registraram os menores valores durante a série foram 1993 e 2012, onde foram classificados como extremamente secos ($\bar{x}$ = -2,12) e ($\bar{x}$ = -2,03) respectivamente, sendo o ano de 1993, com menor registro econtrado. Estudos relatam que os principais impactos dessas secas foram a redução da produtividade das culturas, perda de recursos financeiros, redução das opções da dieta alimentar e aumento da carga de trabalho.

Neste sentido, a distribuição espacial da precipitação no Submédio São Francisco, conforme ilustrado na Figura 14, evidencia que as áreas onde foram registradas as menores precipitações estão localizadas na porção inferior e central da sub-bacia. Nesses locais estão situados os reservatórios de água Sobradinho e Itaparica, além dos grandes perímetros irrigados da região semiárida do Nordeste.

A ausência de chuva na região vem se estendendo desde 2012, trazendo grandes consequências principalmente para a população local que depende das chuvas para desenvolver as suas atividades.

O reservatório de Sobradinho, principal reservatório de água da região, está funcionando com volume bem abaixo do normal. Para garantir a segurança hídrica a Agência Nacional de Águas (ANA) autorizou a redução do volume de água do reservatório liberado pelas comportas

para 700m, caracterizando uma situação crítica, desde a sua criação, em 1979, quando fecharam a barragem no rio para formar o maior lago artificial do Brasil e um dos maiores do mundo.

Os longos períodos de escassez são um dos problemas que mais afetam a região semiárida. O percentual de dias sem chuvas aumenta no centro da região Nordeste, podendo chegar até 100 dias sem precipitação como é o caso deste ano, onde o semiárido enfrenta o maior período de seca desde o ano de 1992. A média de precipitação anual na região é de 660 mm e caiu para 250 mm no ano de 2012. O Submédio São Francisco contempla parte desta região que ameniza os problemas com a seca.

Estudos realizados por Lacerda *et al.,* (2009) na microrregião do Pajeú, no Sertão de Pernambuco, mostram haver aumento dos dias secos, do comprimento médio dos veranicos e dos máximos veranicos. Além disso, as análises de tendência das séries de precipitação evidenciam que precipitações extremas estão aumentando. Os autores definem veranicos, ou seja, número de dias consecutivos sem chuva considerando-se todos os valores da série menores ou iguais a 5 mm/d. Calcularam-se, também, o maior número de dias consecutivos sem chuva, o total de dias secos e a frequência de ocorrência de chuvas intensas; para esta última análise foram consideradas as precipitações máximas.

2.4 CONCLUSÃO

A configuração espacial apresentada pelo SPI constatou que a principal característica da dinâmica temporal das séries na área de estudo foi o caráter aleatório em que uma condição de déficit (ou excesso) de precipitação pluvial pode ter início ou fim de forma bastante abrupta.

Foram selecionadas no estudo apenas as secas de categorias mais críticas, com valores de SPI abaixo de -1,0 ou acima de 1,0, ou seja, as categorias classificadas como moderadamente seco a extremamente seco e moderadamente chuvoso a extremamente chuvoso, visto que elas são mais capazes de identificar os problemas mais críticos nos recursos hídricos e ambientais disponíveis na bacia.

Foi observado que alguns eventos apontados pelo SPI - PR também foram identificados pelo SPI –PG, entretanto algumas secas ocorridas no SPI-PR não foram detectadas pelo SPI – PG, esse problema foi justificado devido a forma de espacialização da precipitação na célula podendo os dados serem superestimados ou subestimados conforme localização do posto.

A aplicação do índice permitiu a visualização espacial da tendência de déficit hídrico em grande escala, se concentrando principalmente em áreas onde estão localizados os

reservatórios de água de Sobradinho e Itaparica, incluindo os grandes perímetros irrigados da região.

Os anos com anomalias mais intensas foram em 1974, 1985, 1993 e 2012 segundo o SPI-PR. Os dois primeiros anos classificados como severamente úmidos ($\bar{x}$ = 1,53 e $\bar{x}$ = 1,66) e os dois últimos anos como extremamente secos ($\bar{x}$ = -2,12 e $\bar{x}$ = -2,03), respectivamente.

A confirmação de que os recursos hídricos no Submédio São Francisco são bastante vulneráveis a alterações no clima se torna evidente pela quantidade de secas identificadas na categoria moderadamente seco ($\bar{x}$ = -0,07). Embora não seja tão intensa, ela indica tendência de escassez hídrica, tendo em vista que fenômenos de escala global, como por exemplo, *El Niño*, podem reduzir a atuação dos sistemas meteorológicos de escala regional.

Muitos pesquisadores mostraram a relação de dependência do total anual de precipitação na região, com as anomalias de TSM dos Oceanos Tropicais. Entretanto, para a agricultura e armazenamento de águas, não apenas o total anual de chuvas é importante, mas também os seus períodos e extremos.

Neste sentido, um fator essencial para o planejamento e gestão sustentável dessas áreas são os dados de monitoramento das estações hidrometeorológicas, uma vez que o conhecimento da distribuição temporal e espacial da chuva diária no país tem um impacto relevante para uma efetiva avaliação da disponibilidade hídrica, dentre outros recursos naturais disponíveis, principalmente em regiões onde a escassez de água sempre se fez presente, seja devido ao aumento da demanda, da degradação dos recursos hídricos ou em consequência da instabilidade climática, os conflitos pelo uso da água tendem a aumentar. Portanto, buscar soluções para um monitoramento e gerenciamento adequados desses recursos, deverá ser a prioridade dos órgãos gestores.

3 CARACTERIZAÇÃO DA DEMANDA HÍDRICA PARA AGRICULTURA IRRIGADA NO TRECHO SUBMÉDIO SÃO FRANCISCO

RESUMO

O aumento da demanda de água para agricultura irrigada no Submédio da Bacia Hidrográfica do Rio São Francisco tem sido objeto de constante preocupação dos órgãos gestores dos recursos hídricos. A demanda de água das áreas irrigadas cresce à medida que o uso predatório da terra aumenta. Uma das formas de assegurar o controle quantitativo e qualitativo dos usos da água e o efetivo exercício dos direitos de acesso aos recursos hídricos se dá pelo instrumento de outorga, que garante não apenas ao usuário o direito de uso, mas condiciona à disponibilidade hídrica e à preservação dos usos múltiplos da água. Neste sentido, com base no acesso aos dados das outorgas concedidas pela Agência Nacional de Águas, o estudo teve como objetivo analisar o uso da água para agricultura no Submédio da Bacia Hidrográfica do Rio São Francisco. A partir dos dados analisados, foram identificados 1992 usuários outorgados na bacia, sendo 1305 localizados no trecho da Bahia e 687 no trecho de Pernambuco, classificados em quatro perfis diferentes: individual, institucional, empresarial e associação ou cooperativas de agricultores. Para os perfis selecionados, foram identificados os principais sistemas de irrigação utilizados: aspersão convencional, inundação, pivô-central, autopropelido, microaspersão, sulcos de infiltração e gotejamento. Dentre os sistemas mencionados, o sistema que apresentou maior demanda de água foi o sistema de irrigação por superfície (sulcos de infiltração) para o usuário institucional no trecho da Bahia, enquanto os sistemas menos utilizados foram por pivô central, autopropelido e inundação. Das 28 culturas identificadas, as que mais se destacaram tanto em termo de volume, quanto em termos de usuários, foram as culturas da manga, uva e banana. Constatou-se ainda, que 79% das outorgas foram destinadas para os usuários individuais, com prazos de vigência de até 10 anos. Em relação à avaliação da qualidade da água, foram utilizados os dados de qualidade de água de campanhas de monitoramento da Companhia Hidro Elétrica do São Francisco (CHESF) entre os períodos de 2016 e 2018. Foram selecionadas cinco estações de monitoramento, sendo elas: SOB 19, SOB22, SOB24, SOB24 e SOB 29, distribuídas ao longo do trecho principal do Submédio. Para a análise de consistência dos dados foram utilizados os métodos estatísticos propostos por Shapiro-Wilk (1965) e Tukey (1952). Dos parâmetros físico-químicos analisados, foram selecionados os mais relevantes, tais como: temperatura da água, pH, condutividade elétrica; nitrogênio total, fósforo total e a demanda bioquímica de oxigênio, quando confrontados com os padrões estabelecidos pela Resolução CONAMA Nº 357/2005. Os resultados mostraram que todos os pontos tiveram valores acima do permitido pela legislação vigente quanto aos parâmetros: pH, fósforo total e demanda bioquímica de oxigênio. Essas estações encontram-se próximas às áreas com intensa atividade agrícola, o que possivelmente influenciou no resultado das amostras.

Palavras chaves: Outorga de água, agricultura, qualidade da água, gerenciamento hídrico.

3.1 INTRODUÇÃO

A crise hídrica que vem ocorrendo no Brasil está causando impacto na Economia e na qualidade de vida da população. A situação no semiárido torna-se mais complexa em função da forte dependência dos recursos hídricos, principalmente daqueles que atualmente demandam por maior consumo no país, como é o caso do setor agrícola e industrial.

De acordo com a Organização das Nações Unidas para a Alimentação e Agricultura (FAO), a agricultura irrigada é o alvo prioritário para as políticas de controle racional de água, e tem exigido maior atenção dos órgãos gestores, pois cerca de 60% da água utilizada em projetos de irrigação é perdida por fenômenos como a evaporação. Ainda segundo o órgão, uma redução de 10% no desperdício poderia abastecer o dobro da população mundial dos dias atuais (FAO, 2017).

No Brasil, uma das regiões que mais vêm se destacando pelo aumento das áreas agricultáveis, é o semiárido nordestino. Só na Bacia Hidrográfica do Rio São Francisco (BHSF), estima-se que existam entre 330.000 e 340.000 ha irrigados, com potencial para chegar a 1.500.000 ha (ANA, 2004). Para o Submédio São Francisco, Paes (2009) afirma que estão implantados cerca de 120.000 hectares (públicos e privados) com potencial para chegar a 260.000 hectares irrigáveis.

Em relação à bacia do Submédio São Francisco, o uso da água para agricultura representa cerca de 70% da demanda total. O crescimento das práticas agrícolas normalmente tem se concentrado em áreas no entorno de reservatórios de produção de energia elétrica devido ao reassentamento involuntário da população, remanejada em projetos irrigados, como forma de mitigar os impactos negativos sobre essa população com a construção de usinas hidroelétricas. Esses projetos são denominados de perímetros públicos irrigados, constituídos de um conjunto de parcelas irrigadas para a agricultura familiar, áreas de reserva legal e de sequeiro e de núcleos urbanos para as moradias (ANA, 2013).

Após a ocupação dos perímetros pela população ribeirinha, o sistema de agricultura sofreu alterações que tornaram o produto obtido mais comercial do que subsistente e todos tiveram que se adaptar à agricultura irrigada já que a grande maioria trabalhava com agricultura de vazante. Os assentados mudaram para culturas permanentes, conforme orientação técnica da Companhia de Desenvolvimento do Vale do São Francisco (CODEVASF) e da Companhia Hidro Elétrica do São Francisco (CHESF), principalmente fruteiras, o que resolveu o problema

econômico, porém encontraram sérias restrições ambientais, sobretudo problemas relacionados ao solo (SOBRAL, 2006).

Neste sentido, Carvalho (2009) destaca que a implantação dos perímetros irrigados no semiárido pernambucano necessita de adaptações, pois não possuem as dimensões exigidas pelas relações entre os aspectos ecológico, social, econômico e político para a sustentabilidade da agricultura familiar e recursos ambientais, tornando-se um importante fator de pressão sobre a cobertura vegetal, pois o desmatamento, acarreta processos erosivos, como também problemas de qualidade e disponibilidade de água, além de gerar assoreamento dos cursos d'água e do reservatório.

Segundo Sobral *et al.,* (2006) a prática de irrigação de forma inadequada, principalmente do manejo impróprio com excessos de irrigação elevando o lençol freático em alguns lotes, tem ocasionado alguns efeitos da umidade elevada no solo e salinização do mesmo. Assim sendo, a nova perspectiva da sustentabilidade no âmbito do espaço rural requer uma nova forma de gestão de uso da terra, no desenvolvimento de metodologias e instrumentos tecnológicos apropriados a cada especificidade, estando o incremento da agricultura sem, contudo, comprometer a disponibilidade nem a qualidade do recurso.

O uso inadequado da irrigação e seus impactos sobre o ambiente semiárido podem ser reflexos da conversão de uma situação de escassez hídrica para uma ampla oferta de água para a qual os agricultores e formuladores dos projetos estão despreparados.

É importante mencionar que o Brasil dispõe de leis adequadas para realizar a gestão do uso da água. Entre estas leis, a principal é a Lei 9.433 de 1997 – conhecida como "Lei das Águas", que instituiu a Política Nacional de Recursos Hídricos e criou o Sistema Nacional de Gerenciamento de Recursos Hídricos, incluindo instrumentos para definir o acesso à água, como a outorga de direito de uso de recursos hídricos.

No Submédio São Francisco, já existem conflitos instalados entre usuários irrigantes, em razão da escassez de recursos hídricos em épocas de estiagem (períodos com maior frequência), além das construções irregulares de barramentos que impedem o fluxo normal das águas para os usuários à jusante, as retiradas clandestinas de água na bacia para fins desconhecidos, dentre outras práticas que dificultam a gestão dos órgãos públicos. Neste sentido, a outorga de direito de uso tem sido o instrumento utilizado para dirimir as questões, repartindo os recursos hídricos disponíveis entre os usuários e regularizando aqueles barramentos construídos de forma irregular e clandestina.

Vale ressaltar que os usuários de água são obrigados a requerer outorga para uso da água junto às agências de controle estaduais ou federais. Além do mais, como o recurso água está cada dia mais escasso, há tendência de aumentar os conflitos entre os usuários. O direito de uso da água de um usuário localizado à jusante do ponto onde se tenciona captar a água para a irrigação deve ser preservado em termos de quantidade e qualidade da água.

Existem vários desafios a serem vencidos, sejam nos aspectos teóricos e de concepção ou nos aspectos práticos de operacionalização dos sistemas de outorga. Dentre esses desafios poderiam ser citados: a definição do valor adequado para a vazão máxima outorgada, a inexistência de dados fluviométricos nas bacias hidrográficas, o desconhecimento sobre os usuários e as respectivas demandas, as dificuldades na definição dos sistemas subterrâneos, o desenvolvimento de metodologias específicas para o estabelecimento dos valores adequados a serem outorgados como vazão ecológica, assim como de metodologias que integrem os aspectos quantitativos e qualitativos da outorga (EUCLYDES, 2006).

Neste contexto, o estudo tem como objetivo, caracterizar a demanda hídrica para agricultura irrigada no trecho Submédio da bacia do São Francisco .

3.1.1 Gestão dos Recursos Hídricos

O Brasil vem produzindo, desde o início do século passado, legislação e políticas que buscam paulatinamente consolidar uma forma de valorização de seus recursos hídricos. A primeira legislação nacional que visou estabelecer um direcionamento jurídico das águas no Brasil, dispondo sobre a classificação e utilização, bem como sobre o aproveitamento do potencial hidráulico, foi o Código das Águas, Decreto n° 24.643, de julho de 1934.

Mais de meio século depois, foi criada a Política Nacional de Recursos Hídricos (PNRH), através da Lei 9.433, de 8 de janeiro de 1997, e tem em um de seus objetivos assegurar à atual e às futuras gerações a necessária disponibilidade de águas, em padrões de qualidade adequados aos respectivos usos.

A Política institui, no Art. 5º, os instrumentos de gestão de recursos hídricos:

I – Os Planos de Recursos Hídricos;

II – O enquadramento dos corpos de água em classes, segundo os usos preponderantes da água;

III – A outorga dos direitos de uso de recursos hídricos;

IV – A cobrança pelo uso de recursos hídricos;

V – O Sistema de Informações sobre Recursos Hídricos (BRASIL, 1997)

A promulgação dessa lei veio consolidar um avanço na valoração e consolidação da fonte dos recursos hídricos no país. Segundo Machado (2004), a PNRH surgiu como um importante instrumento legal, destacando a água como um bem de domínio público, o que reforça o seu caráter social de ser, pois é um bem de todos. Neste sentido, Yoshida (2007) destaca que a dominialidade pública da água não transforma o Poder Público em proprietário dela, mais sim gestor desse bem de interesse de todos. Isto ocorre porque ela precisa do poder público para administrá-la no interesse do povo e do meio ambiente.

Dentre os instrumentos previsto na PNRH, a outorga dos direitos de uso dos recursos hídricos se configura como um dos instrumentos mais relevantes. A sua efetivação possibilita o controle de todos os usos pelo Poder Público, visando a garantir o cumprimento dos objetivos da política com base nos seus fundamentos e respeitando-se as diretrizes gerais de ação para a implementação. Constitui ainda um meio de identificação dos usuários poluidores ou daqueles que, de qualquer forma, degradam os corpos d'água, possibilitando a aplicação das sanções criminais, administrativas, bem como a responsabilização civil pelo dano causado.

3.1.2 Instrumento de Controle e Uso de Água

A outorga é o ato administrativo mediante o qual o Poder Público outorgante (União, Estado ou Distrito Federal) faculta ao outorgado (requerente) o direito de uso de recursos hídricos, por prazo determinado, nos termos e nas condições expressas no respectivo ato. O ato administrativo é publicado no Diário Oficial da União (no caso da ANA), ou nos Diários Oficiais dos Estados ou do Distrito Federal.

A outorga de direito de uso de recursos hídricos é o instrumento da Política de Recursos Hídricos que tem os objetivos de assegurar:

- O controle quantitativo e qualitativo dos usos da água; e
- O efetivo exercício dos direitos de acesso à água.

No Brasil, a Agência Nacional de Águas (ANA) é o órgão responsável por emitir outorgas para rios, reservatórios, lagos e lagoas sob o domínio da União, que são aqueles corpos de água que passam por mais de um estado brasileiro ou por território estrangeiro, como é o caso do Rio São Francisco. Também são outorgadas pela ANA as águas armazenadas em

reservatórios administrados por entidades federais como açudes do Departamento Nacional de Obras Contra as Secas (DNOCS) e da CODEVASF, por exemplo.

Existem na legislação federal três categorias de outorga: a outorga preventiva, a outorga de direito de uso e a declaração de reserva de disponibilidade hídrica. As categorias serão descritas a seguir:

Outorga preventiva: Não confere o direito de uso de recursos hídricos, e seu prazo de validade é fixado levando-se em conta a complexidade do planejamento do empreendimento, limitando-se ao prazo máximo de três anos. Destina-se a reservar determinada vazão passível de ser outorgada, possibilitando, dessa forma, melhores estudos e planejamento mais detalhado para implantação de empreendimentos por parte dos setores usuários.

No intuito de assegurar a disponibilidade hídrica, esse tipo de outorga deve ser emitida nos casos de grandes empreendimentos que demandem consideráveis períodos de tempo para realização de estudos. Seu prazo de validade é fixado levando-se em conta a complexidade do planejamento do empreendimento, limitando-se ao prazo máximo de três anos. A transformação em outorga de direito de uso, se dá a pedido do requerente.

Outorga de direito de uso: Confere ao seu titular o direito de uso de recursos hídricos. A outorga não autoriza a instalação do empreendimento, apenas confere o direito de uso dos recursos hídricos. Para a instalação do empreendimento são necessárias outras autorizações, como a licença ambiental emitida pelo órgão de meio ambiente.

Declaração de reserva de disponibilidade hídrica (DRDH): Trata-se de um documento, solicitado pela Agência Nacional de Energia Elétrica (ANEEL) à entidade outorgante, conforme o domínio do corpo hídrico em questão, que consiste em garantir a disponibilidade hídrica requerida para aproveitamento hidrelétrico, com potência instalada superior a 1 MW. Essa declaração é, depois, automaticamente transformada em outorga de direito de uso de recursos hídricos para empresas ou instituições que receberem autorização ou concessão da ANEEL para uso do potencial de energia hidráulica.

Existem outros critérios de outorgas estabelecidos em situações de escassez. Por exemplo, no período atual (2013-2019), que vem se constituindo numa época de estiagem prolongada, a ANA limitou o uso de água para irrigação em várias regiões do Semiárido

nordestino para uma área máxima determinada (por exemplo, 5 ha), através da Resolução N° 641 de 14 de abril de 2014 (ANA, 2014d).

Em relação aos prazos máximos legais de vigência das outorgas, a Lei n° 9433/97, estipula sua validade máxima em 35 (trinta e cinco) anos, ainda que possa haver sua renovação. O Quadro 1 apresenta os prazos vigentes das outorgas.

Quadro 1 - Prazos de vigência das outorgas.

Prazos	Finalidades	Observação
10 anos	- Irrigação de lavouras de até 2.000 ha; - Unidades industriais e afins com vazão de captação máxima instantânea de até 1m³/s; - Aquicultura e dessedentação animal; - Extração de areia em leito de rio e outras atividades minerárias; - Outras finalidades não mencionadas acima	Para atividades minerárias em fase de pesquisa mineral, o prazo de validade da outorga mencionado poderá ser reduzido para 5 (cinco) anos.
20 anos	- Irrigação de lavouras superiores a 2.000 ha; - Unidades industriais e afins com vazão de captação máxima instantânea superiores 1 m³/s;	
35 anos	- Barragens de regularização de vazões ou de aproveitamento hidrelétrico sem concessão ou ato administrativo de autorização e outras obras hidráulicas que necessitem de outorga. - Abastecimento público e esgotamento sanitário operados por prestadores de serviços que independem de concessão ou ato administrativo de autorização.	

Fonte: Adaptado de ANA (2010).

Nos casos em que o uso outorgado se localizar em trechos de corpos hídricos de especial interesse para a gestão de recursos hídricos, definidos nos anexos I e II da Portaria Nº 62, de 26 de março de 2012, ou ainda em situações tecnicamente justificadas, inclusive quanto à racionalidade do uso da água, todos os prazos de validade da outorga mencionados anteriormente poderão ser reduzidos.

É de fundamental importância para a sociedade que a aplicação da legislação direcionada à proteção dos recursos naturais seja executável em razão do esgotamento dos mesmos, e da necessidade de sua conservação para o alcance do equilíbrio ambiental e da qualidade de vida. De tal sorte que a utilização racional dos recursos ambientais disponíveis seja de responsabilidade de toda sociedade, incluindo o setor produtivo que, como paradigma

do desenvolvimento econômico, contribui de maneira efetiva no processo de extenuação desses recursos (YOSHIDA, 2007).

3.1.3 Gestão e Qualidade da Água

A experiência brasileira em gestão dos recursos hídricos ganhou um grande impulso com a Lei Federal 9.433/97. Esta Lei, entre outras atribuições, define o enquadramento dos corpos de água como um dos instrumentos da Política Nacional de Recursos Hídricos e, de forma complementar, a Resolução 357/05 do CONAMA, tem sido utilizada para subsidiar a aplicação deste instrumento, classificando os corpos de água segundo os usos preponderantes (Quadro 2).

De acordo com a ANA (2016), o enquadramento dos corpos hídricos representa, indiretamente um mecanismo de controle de uso e de ocupação do solo, já que restringe a implantação de empreendimentos cujos usos não consigam manter a qualidade de água na classe que o corpo d'água fora enquadrado. Além disso, esse importante instrumento de planejamento ambiental permite uma melhor adequação de custos de controle da poluição, pois possibilita que os níveis de controle de poluentes exigidos estejam de acordo com os usos que se pretende dar ao corpo d'água nos seus diferentes trechos.

Segundo a Portaria Nº 715/MINTER/ IBAMA de 1989, os cursos d'água da Bacia Hidrográfica do Rio São Francisco se enquadram nas seguintes classes e a Figura 1 apresenta a proposta de enquadramento da Bacia do São Francisco, por região fisiográfica

I. Das nascentes até a confluência com o Ribeirão das Capivaras : Classe Especial;
II. Da confluência com o Ribeirão das Capivaras até a confluência com o Rio Mombaça: Classe 1;
III. Da confluência com o rio Mombaça até a sua foz no Oceano Atlântico: Classe 2;

Quadro 2 - Classes de uso de águas doces.

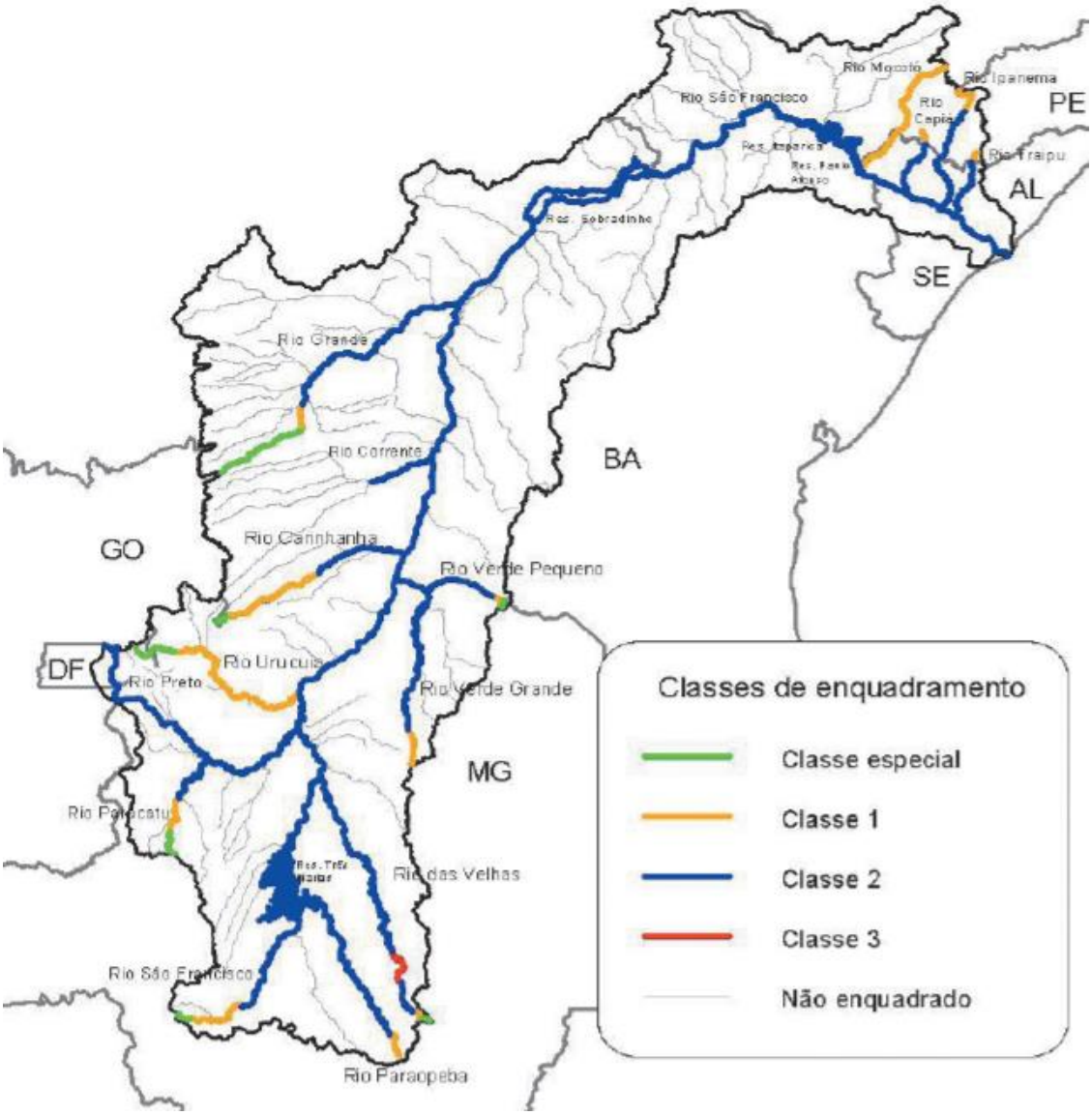
USOS DAS ÁGUAS DOCES	ESPECIAL	1	2	3	4
Preservação do equilíbrio natural das comunidades aquáticas	Classe mandatória em unidades de conservação de Proteção integral				
Proteção das comunidades aquáticas		Classe mandatória em Terras indígenas			
Recreação de contato primário					
Aquicultura					
Abastecimento para consumo humano	Após desinfecção	Após tratamento simplificado	Após tratamento convencional	Após tratamento convencional ou avançado	
Recreação de contato secundário					
Pesca					
Irrigação		Hortaliças consumidas cruas e frutas que se desenvolvam rentes ao solo e que sejam ingeridas cruas sem remoção de película	Hortaliças, frutíferas, parques, jardins, campos de esportes e lazer	Culturas arbóreas, cerealíferas e forrageiras	
Dessedentação de animais					
Navegação					
Harmonia paisagística					

Fonte: Adaptado de ANA (2019).

Em relação à definição da qualidade da água, a legislação brasileira faz referência ao tipo de uso ao qual se destina, e estipula os padrões de qualidade na Resolução Nº 357 (CONAMA, 2005), que teve algumas modificações previstas nas Resoluções Nº 410 (CONAMA, 2009) e Nº 430 (CONAMA, 2011). Conforme as Resoluções citadas, os parâmetros de qualidade são definidos em limites aceitáveis das substâncias presentes de acordo com o uso da água.

.

Figura 1 - Proposta de enquadramento da Bacia do São Francisco, por região fisiográfica, realizado pela ANA/GEF/Pnuma/OEA (2004).



Fonte: IBAMA, 1989.

Sobre os padrões potabilidade, foram criados de forma a identificar e limitar a presença efetiva ou potencial de substâncias ou microrganismos que possam comprometer essa qualidade, avaliando os impactos sobre a biota, decorrentes da atividade humana nas diferentes bacias hidrográficas. Embora sejam inúmeras as espécies químicas potencialmente impactantes sobre a qualidade das águas e dos efluentes, as legislações ambiental e sanitária comtemplam um número limitado, onde são considerados os efeitos sabidamente prejudiciais à saúde e ao meio ambiente e cuja ocorrência é mais provável.

Segundo a ANA (2019), o Índice de Qualidade das Águas (IQA) é o principal indicador qualitativo usado no país e foi desenvolvido para avaliar a qualidade da água para o

abastecimento público, após o tratamento convencional. A Agência ressalta ainda que, a interpretação dos resultados da avaliação do IQA deve levar em consideração este uso da água, e que um valor baixo de IQA indica a má qualidade da água para abastecimento, mas essa mesma água pode ser utilizada em usos menos exigentes, como a navegação ou geração de energia. Para obter o IQA são calculados os seguintes parâmetros: Temperatura da água, pH, Oxigênio Dissolvido, Resíduo Total, Demanda Bioquímica de Oxigênio (DBO), Coliformes Termotolerantes, Nitrogênio Total, Fósforo Total e Turbidez.

Jesus & Sousa (2013) destacam que os principais parâmetros que indicam poluição nos recursos hídricos são: Temperatura, Cor, Turbidez, Demanda Bioquímica de Oxigênio, Oxigênio Dissolvido (DO), Nitrato, Fosfato Total, Sólidos Dissolvidos Total (SDT), pH, Alcalinidade, Coliformes Termotolerantes e Coliformes Totais. A Tabela 1, possui valores que foram estabelecidos pela Resolução Nº357 (CONAMA, 2005) em relação a alguns parâmetros de potabilidade da água .

Tabela 1 - Limites estabelecidos pela Resolução Nº357 (CONAMA, 2005) para alguns parâmetros analisados no trabalho.

Parâmetros	**Unidades**	**Valor Máximo Permitido**
Turbidez	UNT	100
Oxigênio Dissolvido	UNT	≥ 5,0
Fósforo Total	$mg.L^{-1}$ O2	30
Nitrito	$\mu g.L^{-1}$	1000
Nitrato	$\mu g.L^{-1}$	10000
Nitrogênio Amoniacal Total	$\mu g.L^{-1}$	3,7 para pH ≤ 7,5 2,0 para 7,5 < pH ≤ 8,0 1,0 para 8,0 < pH ≤ 8,5 0,5 para pH > 8,5
Sólidos Totais Dissolvidos	$mg.L^{-1}$	500

Fonte: A Autora, 2019.

Neste trabalho será apresentado uma descrição suscinta dos parâmetros de potabilidade da água utilizados na pesquisa (ANA, 2010).

- **pH (Potencial Hidrogeniônico):** influencia de maneira direta os processos bioquímicos, especialmente as trocas iônicas com o meio extracelular; desta forma, processos de absorção e excreção de substâncias orgânicas e iônicas são diretamente afetados. Determinadas condições de pH têm efeito indireto e podem contribuir para a precipitação de elementos químicos tóxicos.
- **Fósforo:** na maioria dos corpos d'água pode ser fator limitador da produtividade e, portanto, é apontado como o principal fator responsável pela eutrofização artificial dos ambientes aquáticos. Sua dinâmica está intimamente ligada aos sedimentos aquáticos.
- **Nitrogênio Amoniacal:** corresponde ao nitrogênio proveniente de um composto derivado do amoníaco. A amônia é a mais reduzida forma de nitrogênio orgânico na água; embora seja um pequeno componente no ciclo total do nitrogênio, contribui para a fertilização da água tendo em vista que o nitrogênio é nutriente essencial para a flora aquática e para a comunidade fitoplanctônica.
- **Oxigênio dissolvido (OD):** dentre os gases dissolvidos na água, é um dos mais importantes na dinâmica e na caracterização de ecossistemas aquáticos. É um componente essencial para o metabolismo dos organismos aeróbios presentes nos corpos hídricos, sendo indispensável para o equilíbrio das comunidades aquáticas
- **DBO:** a demanda bioquímica do oxigênio é a quantidade de oxigênio necessária para oxidar a matéria orgânica para uma forma inorgânica estável. É um parâmetro utilizado para identificar a presença de matéria orgânica na água, é expresso em $mg.L^{-1}$.
- **Sólidos Totais Dissolvidos (STD):** é a soma de todos os constituintes químicos dissolvidos na água. Sua medição é importante para definir as condições ambientais, baseado na premissa de que estes sólidos podem causar danos à vida aquática em geral, como por exemplo, a diminuição da incidência de luz, aumento da sedimentação no leito dos rios destruindo organismos que fornecem alimentos.

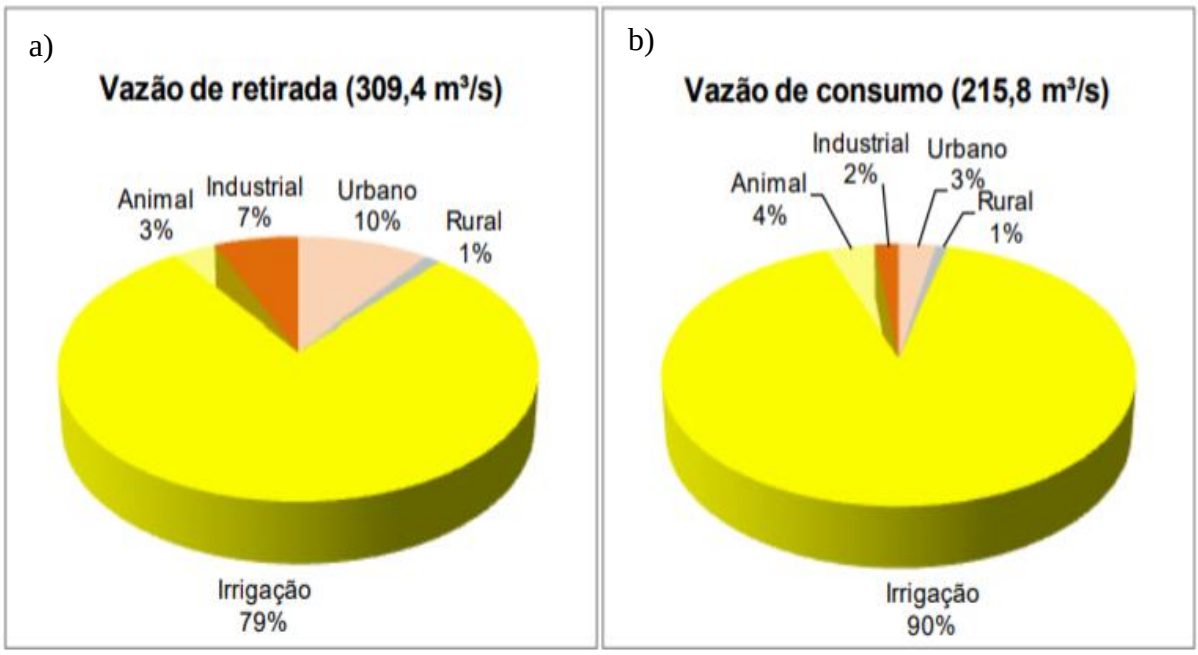
Vale destacar que o monitoramento da qualidade das águas superficiais são fatores primordiais para a adequada gestão dos recursos hídricos, permitindo a caracterização e a análise de tendências em bacias hidrográficas, sendo essenciais para várias atividades de gestão, tais como: planejamento, outorga, cobrança e enquadramento dos cursos de água (ANA, 2017).

3.1.4 Usos da água para agricultura na bacia hidrográfica do rio São Francisco

A água da Bacia Hidrográfica do São Francisco (BHSF) representa cerca de 2/3 da disponibilidade de água doce do Nordeste brasileiro. Ela tem múltiplos usos, servindo para abastecimento humano, irrigação, dessedentação animal, irrigação e agricultura, transporte por hidrovias e aquicultura, mas o seu uso preponderante é para a geração de energia (MMA, 2006).

O Plano Decenal de Recursos Hídricos da Bacia, concebido para o período 2003-2013, apontou que mais de 70% das demandas de água na bacia destinam-se à irrigação, com maior concentração nos trechos Médio e Submédio da BHSF. A área irrigada ocupava, então, 336.200 ha, correspondendo à projetos agrícolas públicos e privados (CBHSF, 2017) (**Figuras 2**).

Figuras 2 - Distribuição da vazão



Fonte: ANA (2015).

a - Distribuição da vazão de retirada entre os usos consultivos.
b - Distribuição da vazão consumida entre os usos consultivos.

No que tange à fruticultura, existem no Brasil cerca de 30 polos fruticultores, distribuídos de Norte a Sul, abrangendo mais de 50 municípios. As regiões Nordeste e Norte destacam-se por possuírem polos fruticultores tropicais que vêm apresentando resultados expressivos nos últimos anos, como os localizados no semiárido nordestino, especialmente os de Juazeiro na Bahia juntamente com Petrolina em Pernambuco, no Vale do São Francisco, e o

de Mossoró, no Rio Grande do Norte, onde as principais frutas produzidas são manga, melão, uva, banana e abacaxi (OLIC, 2005).

No Nordeste, graças aos modernos sistemas de irrigação e das altas temperaturas típicas do clima semiárido durante todo ano, que, em tese, permitem uma produção contínua, são cultivadas frutas tropicais, subtropicais e mesmo frutas temperadas. O clima nestas áreas é seco e com um alto nível de exposição solar, permite uma boa produtividade e prevenção natural de muitas doenças, devido à baixa umidade que predomina em grande parte do ano (NASCIMENTO, 2001).

Nessa região, a agricultura irrigada tem um papel relevante para o desenvolvimento econômico. Estima-se que no ano de 2012, 10,9% das áreas irrigadas no Brasil, estavam inseridas na Bacia do Rio São Francisco (ANA, 2015a). Sendo que 60% da área irrigada na bacia, pertence a projetos públicos e que 79% das demandas de água foram destinadas a este setor no ano de 2013 (CBHSF, 2016). Os polos de maior importância, estão localizados nas cidades de Juazeiro e Petrolina (fruticultura), em Barreiras (produção de soja) e na Bacia do Rio Preto/Paracatu (soja e milho) (ANA, 2015).

Os projetos de irrigação públicos e privados do polo Petrolina/Juazeiro lançaram-se no ramo da fruticultura, atividade que se tornou quase uma especialização desse território, contribuindo para mudanças na estrutura econômica local e criando uma nova organização territorial da produção. De acordo com os dados da CODEVASF (1999), no ano de 1999, já eram mais de 31.000 ha de frutas cultivados no polo. Dentre os frutos cultivados comercialmente no aglomerado, as culturas que se destacam são a banana, a manga, o coco verde e a uva (BUSTAMANTE, 2009)

Por sua região fértil, fortalecida com a irrigação, o Vale do São Francisco se tornou um importante produtor de frutos e hortaliças. A área margeada pelo rio São Francisco nos estados de Minas Gerais, Bahia e Pernambuco, com destaque para as cidades de Juazeiro, na Bahia e Petrolina, em Pernambuco gera um faturamento de R$ 2 bilhões ao ano atualmente nos 120 mil hectares irrigados que abrangem os perímetros irrigados da Bahia e Pernambuco, anualmente são produzidos mais de um milhão de toneladas de frutas, com destaque para uva de mesa e manga. Outras culturas também são desenvolvidas como a goiaba, coco verde, melão, melancia, acerola, maracujá, banana e outras frutas (Figura 3). O faturamento dessas culturas gera um montante de mais de R$ 2 bilhões ao ano, sendo que R$ 440 milhões são relativos às exportações de uva e manga (DINHEIRO RURAL, 2014).

Figura 3 - Plantação de culturas irrigadas no trecho Submédio da Bacia do São Francisco.

Fonte: A autora (2018).

O Vale do Submédio São Francisco (VSMSF) é conhecido em nível nacional pelos investimentos em irrigação pública, que, a partir dos anos 1980, consolidaram a região como importante polo fruticultor que atende tanto ao mercado externo como ao interno. A maior parte das exportações de uva e manga brasileiras é oriunda dessa região. O aglomerado em estudo destaca-se no cenário nordestino pelo seu dinamismo econômico em razão de sua posição estratégica, praticamente equidistante das principais capitais nordestinas, a saber, Recife (PE), Fortaleza (CE) e Salvador (BA) e devido ao acesso ao trecho navegável do Rio São Francisco e à existência de redes de transporte rodoviário e ferroviário (BUSTAMANTE, 2009).

As atividades agropecuárias no Vale do São Francisco alcançaram resultados muito positivos por conta da expansão da agricultura irrigada e pela crescente integração entre as atividades agrícolas e agroindustriais. As frutas mais exportadas do VSMSF são manga e uva e a participação de ambas na Balança Comercial de Pernambuco e Bahia tem um papel importante. A uva e a manga em Pernambuco são o 4º e 5º produtos mais exportados, respectivamente (SECEX/MDIC, 2009). Petrolina (PE) é responsável por 10,8% de toda a uva produzida nacionalmente, ficando assim com o primeiro lugar no *ranking* nacional. Em 2015, foram produzidas 162.448 toneladas em uma área de 4.642 ha (IBGE, 2015). As Figuras 4 e 5

correspondem a duas grandes plantações de uva e manga da fazenda Agrobrás, que é uma fazenda de grande porte no Vale do São Francisco.

Figura 4 - Plantação de uva na fazenda Agrobrás localizada na cidade de Casa Nova, BA.

Fonte: A Autora, 2018.

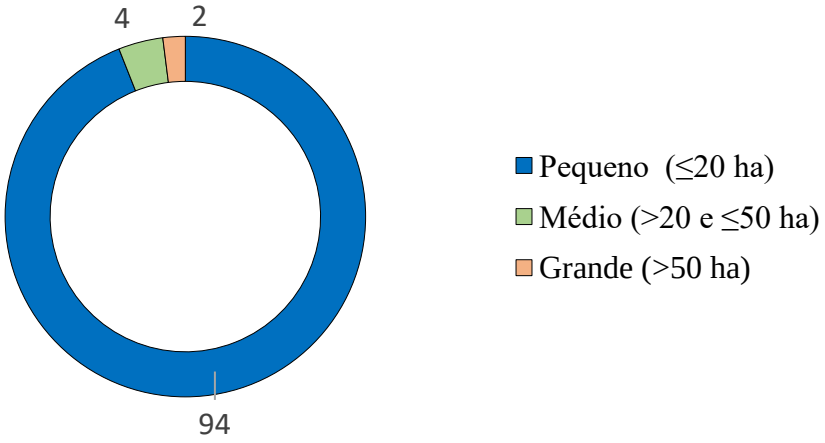
Figura 5 - Plantação de manga na fazenda Agrobrás localizada na cidade de Casa Nova, BA.

Fonte: A Autora, 2018.

A manga produzida na fronteira da Bahia com Pernambuco tem como principal destino os grandes centros do Nordeste, como Salvador, Recife e Fortaleza, além dos estados de Sergipe, Maranhão e Paraíba. A fruta também chega ao Centro-Sul do país, como Brasília, Belo

Horizonte e São Paulo. Ainda de acordo com Dinheiro Rural (2014), no Vale do São Francisco, os empreendimentos de fruticultura estão distribuídos em três categorias: pequenos (com até 20 hectares), correspondendo a 94%; médios (acima de 20 a 50 ha), correspondendo a 4% e grandes (acima de 50 ha), correspondendo a 2%; onde são gerados 240.000 empregos diretos no campo, classificando o Vale do São Francisco como a maior região produtora dessas frutas do Brasil (Figura 6).

Figura 6 - Percentual da categoria dos empreendimentos no Submédio São Francisco.



3.1.5 Sistema de Irrigação no Submédio São Francisco

Para o efetivo manejo adequado da agricultura é necessário levar em conta o histórico de escassez hídrica da região e atender principalmente às exigências requeridas pela Política Nacional de Recursos Hídricos (PNRH) e na Política Nacional de Meio Ambiente (PNMA) que visam a manutenção dos serviços ambientais fornecidos pelo local.

Conforme mencionado, o VSMSF é uma região com potencial agrícola bastante produtivo e as áreas cultiváveis têm crescido exorbitantemente ao longo dos anos, principalmente para agricultura extensiva. A principal preocupação das autoridades públicas tem sido principalmente pela demanda da água destinada a esse setor e a utilização inadequada da terra por parte dos agricultores, uma vez que muitos usuários não dispõem do conhecimento correto para o manuseio do sistema de irrigação aplicado ao plantio.

A eficiência de distribuição de água em áreas irrigadas depende de vários fatores associados ao solo, clima e métodos de irrigação utilizados. No Semiárido brasileiro, há grande

diversidade de sistemas de distribuição de água. As irrigações gravitárias (sulcos ou inundação) ainda predominam nas áreas irrigadas em operação, seguidas por aspersão convencional, raros pivôs e um crescente número de sistemas de irrigação localizada. Em razão da sua baixa eficiência, os métodos gravitários estão sendo paulatinamente substituídos por sistemas localizados; contudo, estas alterações ocorrem, sobretudo, nos perímetros de maior dinamismo, a exemplo dos operados pela CODEVASF, em especial, no Polo Petrolina/Juazeiro.

Em relação aos sistemas de irrigação, Frizzone (2017), ressalta que não existe um único sistema de irrigação ideal, capaz de atender da melhor maneira a todas as condições e objetivos envolvidos. Deve-se selecionar o sistema de irrigação mais adequado a cada condição em particular, considerando-se os interesses envolvidos, em função das exigências de cada sistema de irrigação.

Segundo a ANA (2017), vários sistemas de irrigação vêm sendo utilizados por diferentes usuários na agricultura irrigada no VSMSF. Os mais utilizados serão detalhados a seguir:

- Sistema por sulcos: é um tipo de sistema de irrigação por superfície que consiste da inundação parcial e temporária, por condução da água na superfície do solo, através de pequenos canais ou sulcos, paralelos às fileiras das plantas, durante o tempo necessário para que a água infiltrada ao longo do sulco seja suficiente para armazenar no perfil de solo a quantidade de água necessária à irrigação da cultura;

- Sistema por inundação: consiste na inundação total por contenção da água na superfície do solo. A aplicação de água é feita por meio de bacias ou tabuleiros, que são áreas quase planas, de tamanho variado desde 1 m^2, usados na irrigação de vegetais ou frutíferas.

Em relação aos sistemas por aspersão em geral eles podem ser classificados em dois grupos principais.

- Sistemas convencionais e sistemas mecanizados: no sistema convencional a aspersão pode ser apresentada em diferentes tipos. De forma geral, são constituídos pelas linhas principal, secundárias e laterais e, sobre estas, são acoplados os aspersores. No sistema mecanizado, considerados mais caros, os mecanismos utilizados para a movimentação dos equipamentos podem ser hidráulicos, como as turbinas e pistões hidráulicos, que utilizam como fonte de energia a própria pressão da água fornecida pela motobomba, ou então mecanismos elétricos.

- **Pivô central por aspersão**: nesse sistema uma área circular é projetada para receber uma estrutura suspensa que em seu centro recebe uma tubulação e por meio de um raio que gira em toda área circular, a água é aspergida por cima da plantação.

- **Sistema por microaspersão**: o método localizado (ou microirrigação) consiste na aplicação em uma área bastante limitada, utilizando pequenos volumes de água, sob pressão, com alta frequência.

- **Sistema por gotejamento**: este sistema aplica água em apenas parte da área, reduzindo, assim, a superfície do solo que fica molhada, exposta às perdas por evaporação. Com isso, a eficiência de aplicação é bem maior e o consumo de água menor. A irrigação localizada é usada, em geral, sob a forma de sistema fixo, ou seja, o sistema é constituído de tantas linhas laterais quantas forem necessárias para suprir toda a área, isto é, não há movimentação das linhas laterais. Porém, somente determinado número de linhas laterais deve funcionar por vez, a fim de minimizar a capacidade do cabeçal de controle (SANTOS et al., 2012).

Além da agricultura irrigada há agricultura nas áreas ribeirinha e de sequeiro. De acordo com Paes (2009) a zona ribeirinha encontra-se a um limite de até 3 m da margem do Rio São Francisco; já a zona de sequeiro é aquela totalmente dependente da água da chuva, localizadas em áreas distantes da margem do rio.

Quanto aos riscos ambientais provocados pela agricultura, Dias (1999) afirma que eles se dão principalmente em relação à degradação, contaminação e desequilíbrio de ecossistemas. Dentre os principais impactos negativos desta atividade, o autor cita:

- Redução da diversidade de espécies;
- Erosão, compactação, redução da fertilidade dos solos, com salinização e desertificação das áreas;
- Contaminação dos solos, ar, água, fauna e flora por agrotóxicos e fertilizantes;
- Poluição por fumaça e material particulado devido as queimadas;
- Aumento da velocidade do vento devido ao desmatamento;

Para Glória (2017), os usos múltiplos dos recursos hídricos nas bacias hidrográficas acarretam grandes variações das características físicas, químicas e bacteriológicas ao longo de seu percurso. Estas características ou parâmetros quando avaliados em conjunto, possibilitam verificar os níveis de poluição de um determinado manancial, promovendo a definição da qualidade da água e seu enquadramento dentro de classes.

3.2 MATERIAL E MÉTODOS

A avaliação dos volumes de água requeridos pela agricultura na região do Submédio São Francisco, foi desenvolvida por meio dos dados de outorgas dos recursos hídricos concedidos pela ANA, disponibilizados no endereço (http://www3.ana.gov.br).

Em relação ao critério de seleção das outorgas, optou-se por selecionar apenas as que estão em vigência. Para avaliação da eficiência dos métodos de irrigação, foi utilizado como referência a Resolução Nº 707 (ANA, 2004), detalhada na Quadro 3.

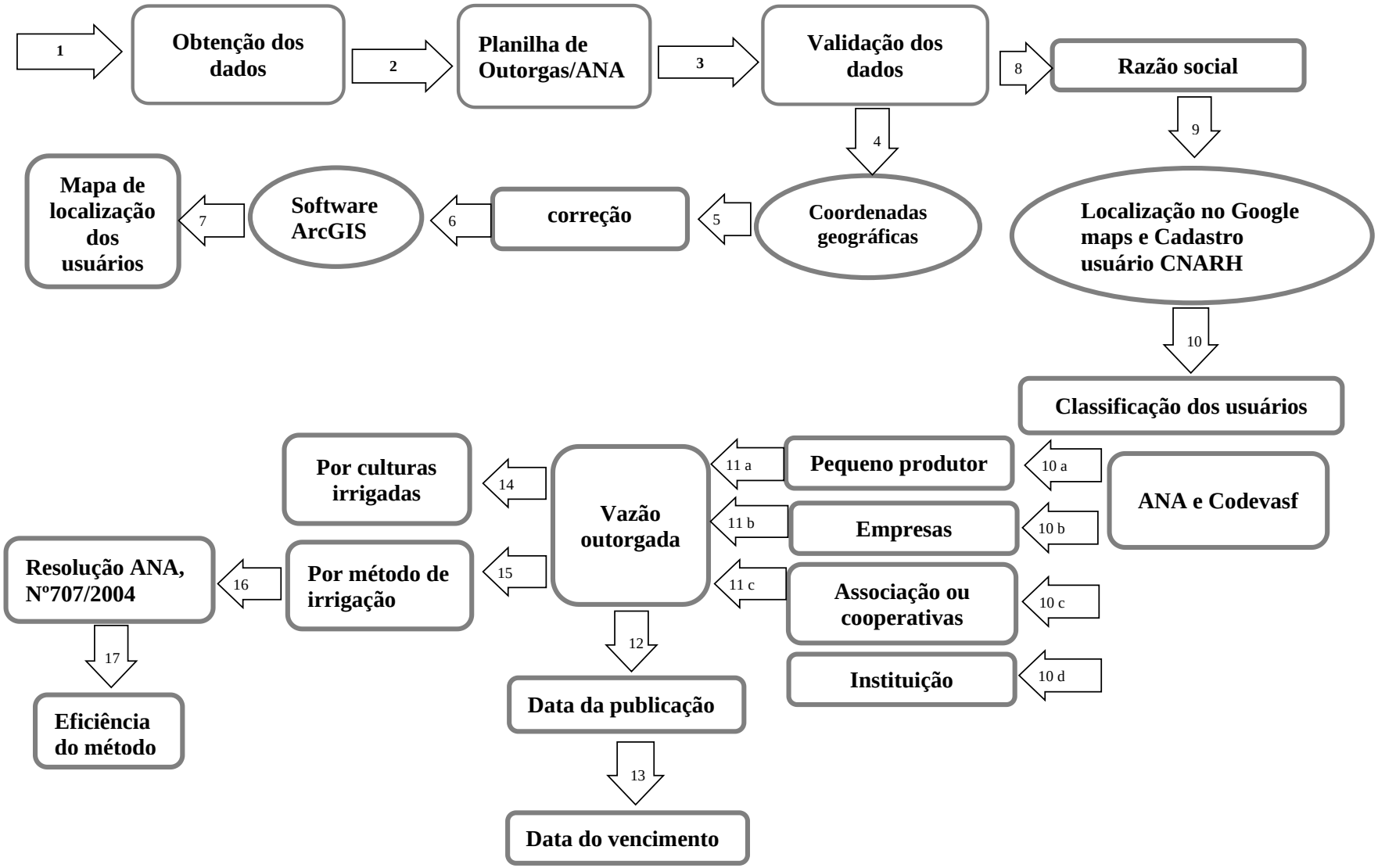
Quadro 3 - Eficiência dos métodos de irrigação estabelecidos pela ANA.

Sistema de irrigação		**Eficiência mínima (%)**	**Perda (%)**
Gotejamento		95*	5
Micro aspersão		90*	10
Tubos perfurados		85*	15
Sub-irrigação		60	40
Gotejamento subterrâneo – tubo poroso		95	5
Aspersão	autopropelido	80	20
	convencional	80	20
	pivô central	85	15
	deslocamento linear	90	10
	pivô central com LEPA	95	5
	em malha	85	15
Sulcos	abertos	65	35
	interligados em bacias	75	25
	Sulcos fechados	75	25
Inundação		60	40

Fonte: ANA, (2004).

A Figura 7 mostra o fluxograma metodológico detalhado das etapas realizadas para avaliação dos volumes outorgados pela ANA.

Figura 7 - Procedimento metodológico.



Sequência das etapas = 1 a 17

3.2.1 Avaliação da qualidade da água

Para analisar a qualidade da água no trecho principal da bacia, foram selecionados cinco pontos de monitoramento pertencentes à Companhia Hidro Elétrica do São Francisco (CHESF) (Quadro 4). Após a seleção dos pontos, foram analisados 44 boletins de acompanhamento, disponíveis até o momento no site, referente ao período entre 2016 e 2018.

Dentre os parâmetros de qualidade da água disponíveis nas campanhas, foram selecionados os mais relevantes para discussão do estudo: pH (Potencial Hidrogeniônico), Condutividade Elétrica (CE), Oxigênio Dissolvido (OD), Demanda Bioquímica de Oxigênio (DBO), Fósforo Total, e Nitrogênio Total (NT).

Para validação dos dados, foram aplicados testes estatísticos. Neste sentido, a hipótese de normalidade dos dados foi verificada pelo teste de Shapiro-Wilk. Para comparar se houve diferenças significativas entre os períodos e os postos selecionados foram aplicados os testes de Tukey e H de Kruskal Wallis, respectivamente, aplicando a este último um nível de 5% de significância.

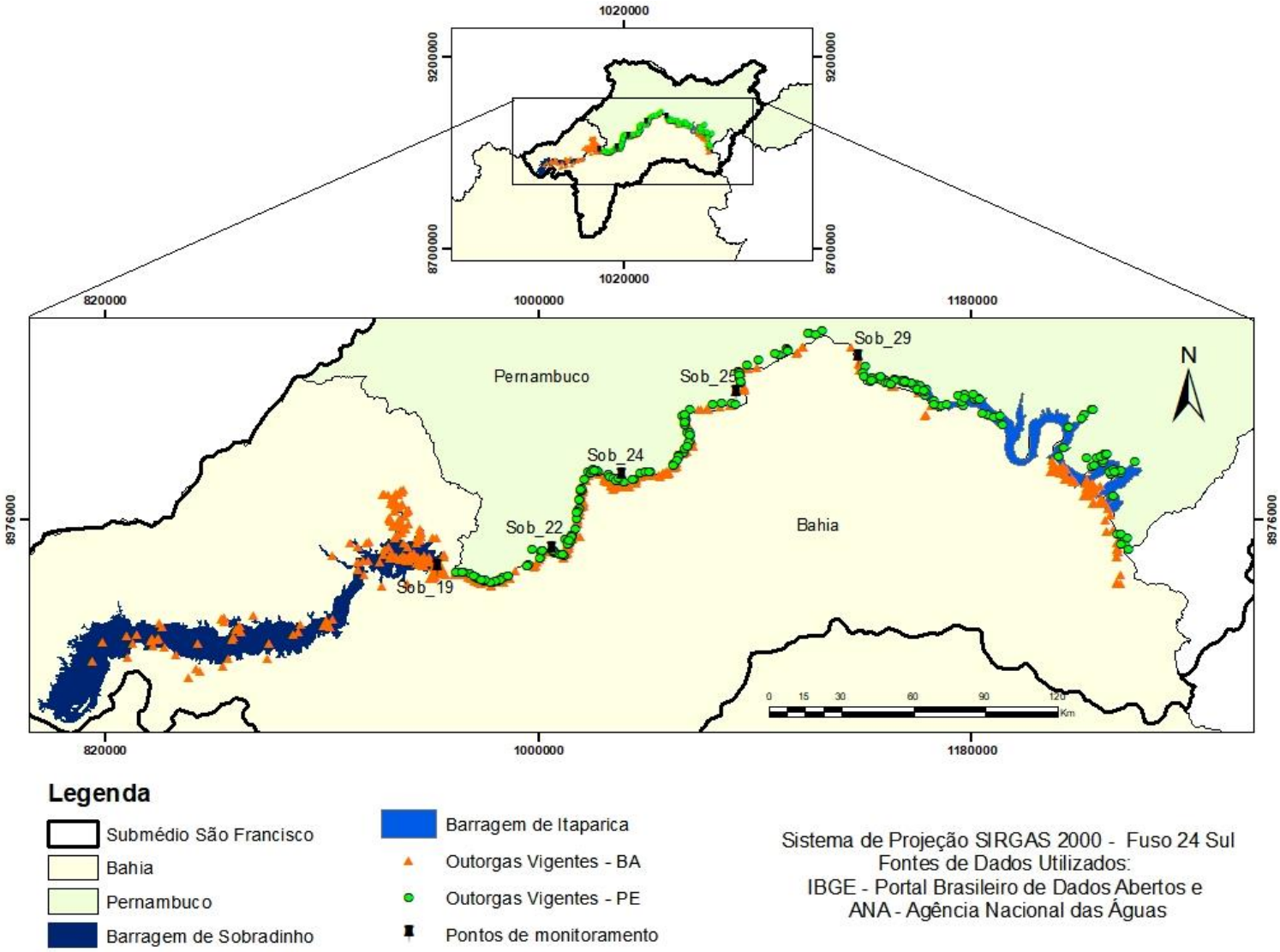
Segundo a Portaria Nº 715 (IBAMA, 1989), na maior parte da calha principal do rio São Francisco, o corpo hídrico está enquadrado na Classe 2 (MIN, 2005). Portanto, para discussão dos resultados, o estudo tomou como referência a Resolução Nº 357 (CONAMA, 2005) na qual estabelece limites máximos de concentração para os parâmetros de qualidade da água em rios também enquadrados nessa classe. A concentração dos usuários outorgantes e os pontos de monitoramento da qualidade da água ao longo do trecho principal da bacia podem ser visualizados na Figura 8.

Quadro 4 - Localização dos pontos de monitoramento da qualidade da água.

Trecho	Estação	Localização	Latitude (S)	Longitude(O)
Reservatório de Sobradinho	SOB 19	Montante da UHE Sobradinho	9°26’01’’	40°50’07’’
Lótico entre Sobradinho e Itaparica	SOB 22	Petrolina/ Juazeiro	9°24’23’’	40°29’47’’
	SOB 24	Vermelhos	9°05’19’’	40°07’16’’
	SOB 25	Santa Maria da Boa Vista	08°48’32’’	39°49’39’’
	SOB 29	Ibó	08°37’54’’	39°14’31’’

Fonte: CHESF, 2017.

Figura 8 - Concentração dos usuários outorgantes e os pontos de monitoramento da qualidade da água ao longo do trecho principal do SMSF.



3.3 RESULTADOS E DISCUSSÃO

3.3.1

Foram identificadas 1992 outorgas vigentes concedidas no Submédio São Francisco, sendo que 687 desses usuários estão distribuídos em 10 municípios de Pernambuco representando 34,5% e 1305 estão distribuídos em 13 municípios da Bahia, representando 65,5% (Tabela 2).

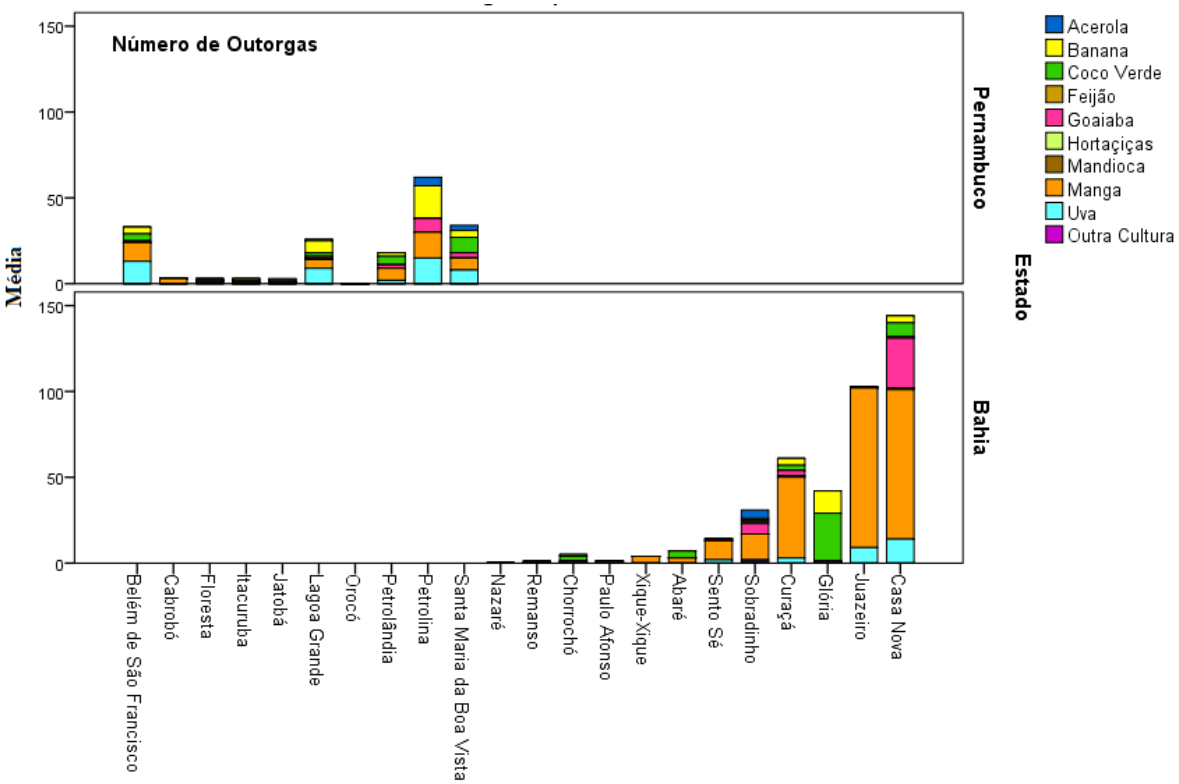
Tabela 2 - Número de outorgas vigentes nos municípios inseridos no SMSF.

Municípios de Pernambuco	**Nº**	**%**	**Municípios da Bahia**	**Nº**	**%**
Belém de São Francisco	83	12,08	Abaré	40	3,06
Cabrobó	2	0,29	Casa Nova	239	18,31
Floresta	15	2,18	Chorrochó	35	2,68
Itacuruba	16	2,33	Curaçá	197	15,09
Jatobá	5	0,73	Glória	368	28,20
Lagoa Grande	114	16,59	Juazeiro	301	23,07
Orocó	9	1,31	Nazaré	0	0
Petrolândia	102	14,85	Paulo Afonso	1	0,08
Petrolina	154	22,42	Remanso	1	0,08
Santa Maria da Boa Vista	187	27,22	Sento Sé	30	2,30
TOTAL	687	100	Sobradinho	75	5,75
			Xique-Xique	18	1,38
			Total	1305	100

De acordo com os dados, no Estado da Bahia o município de Glória liderou o *ranking* com 368 usuários cadastrados e em segundo lugar o município de Casa Nova com 239 usuários. Além disso, entre as 21 culturas identificadas, o cultivo da manga foi o que mais se destacou entre os dois municípios com 87 (54%) e 93 (65%) dos usuários respectivamente.

Para Pernambuco os municípios com maior demanda de usuários foram Santa Maria da Boa Vista e Petrolina somando quase a metade dos usuários cadastrados (341) nesse trecho. Nesses municípios, das 12 culturas identificadas, destacaram-se a banana (21%), manga e uva com 17 % de cada usuário (Figura 27)

Figura 9 - Número de outorgas liberadas e as suas respectivas culturas em municípios na Bahia e Pernambuco no SMSF.

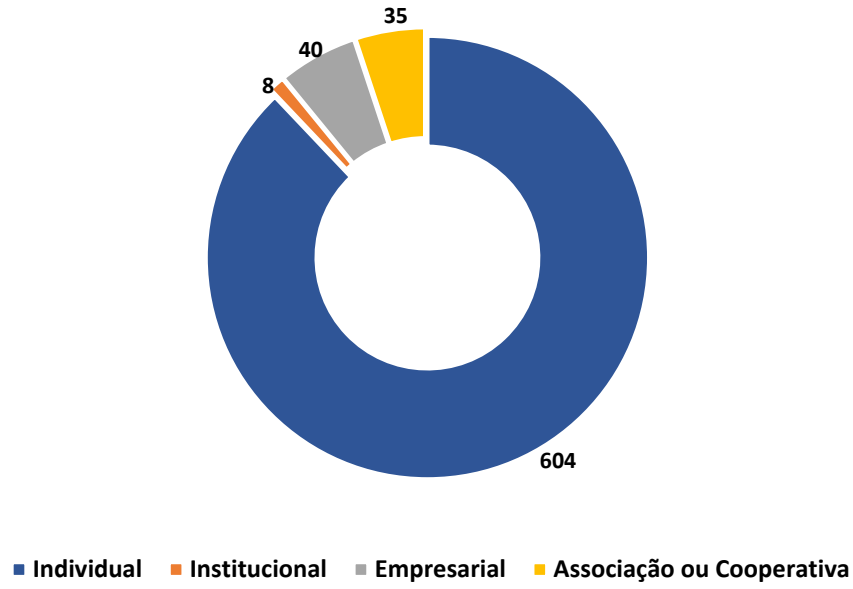


Segundo a CODEVASF (2016), a cultura de maior expressividade encontrada nos lotes familiares foi a manga, ocupando 36% da área cultivada total. Dentre as culturas temporárias, destacaram-se o melão e a cebola.

Em estudos realizados por Leite (2013), o autor ressalta que nessa região concentram-se os maiores polos de fruticultura irrigada do Brasil, destacando a agricultura irrigada como um dos complexos agroindustriais agrícolas mais importante no Nordeste. Além disso, atualmente na região os projetos de irrigação compreendem um total de seis perímetros irrigados, entre eles: Senador Nilo Coelho e Bebedouro em Pernambuco e na Bahia os perímetros Mandacaru, Tourão, Maniçoba e Curaçá, correspondendo a uma área total irrigável de 46.000 ha voltados essencialmente para a produção de frutas (CODEVASF, 2019).

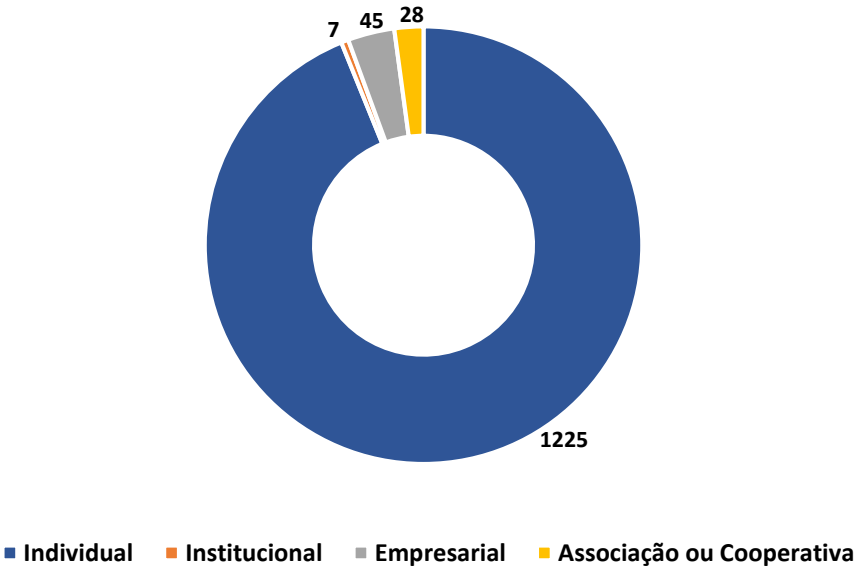
Com relação ao perfil dos usuários identificados na Bahia, 94% são representados por agricultores individuais, 3,5% são empresariais, 0,5% institucionais, e 2% por Associações ou Cooperativas de agricultores (Figura 10).

Figura 10 - Número de outorgas liberadas por usuários para Bahia no SMSF.



Os mesmos perfis foram identificados para Pernambuco, sendo 88% dos usuários representados por agricultores individuais, 6% são empresariais, 1% institucionais e 5% correspondem à Associações ou Cooperativas de agricultores (Figura 11).

Figura 11 - Número de outorgas liberadas por usuários no estado de Pernambuco no SMSF



Dentre as empresas outorgadas 29% estão ligadas aos setores de importação e/ou exportação, 21% ao setor da agropecuária, 19% ao setor agrícola, dentre outras.

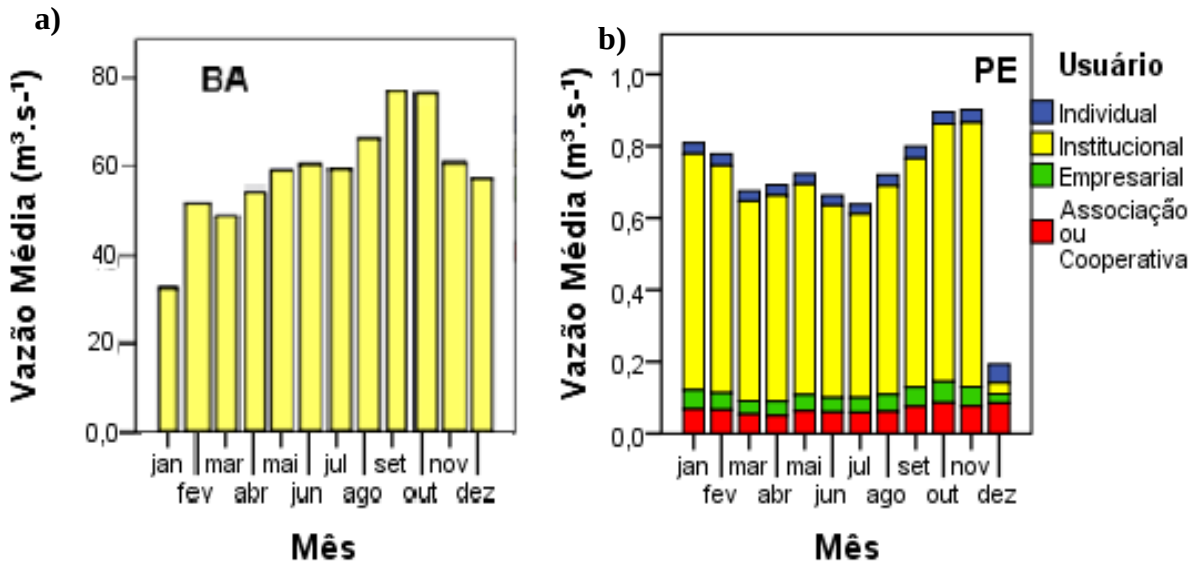
Vale ressaltar que esses resultados refletem apenas os usuários cadastrados no Cadastro Nacional de Usuários de Recursos Hídricos (CNARH), informação essencial para a gestão da quantidade e qualidade das águas ofertados pela bacia, pois segundo a ANA e o Comitê dos efluentes da BHSF as captações de água sem concessão oficial, dificultam o planejamento dos órgãos ambientais para o controle dos recursos hídricos.

3.3.1 Demandas de água no Submédio da bacia do São Francisco

O consumo de água nas áreas irrigadas no Submédio da BHSF foi estimado com base nos dados de outorgas concedidos pela ANA. Neste sentido, a partir da identificação dos perfis dos usuários, serão apresentadas as demandas de água referentes aos principais métodos de irrigação e culturas utilizadas por esses.

Neste sentido, analisando as vazões médias e máximas passíveis de outorgas para os diferentes usuários, observou-se uma demanda considerável pelo usuário institucional (categoria com menor número de usuários), com vazões máximas acima de 60 m^3/s, nos meses de setembro e outubro (Figura 12).

Figuras 12 - Vazão outorgada por usuários

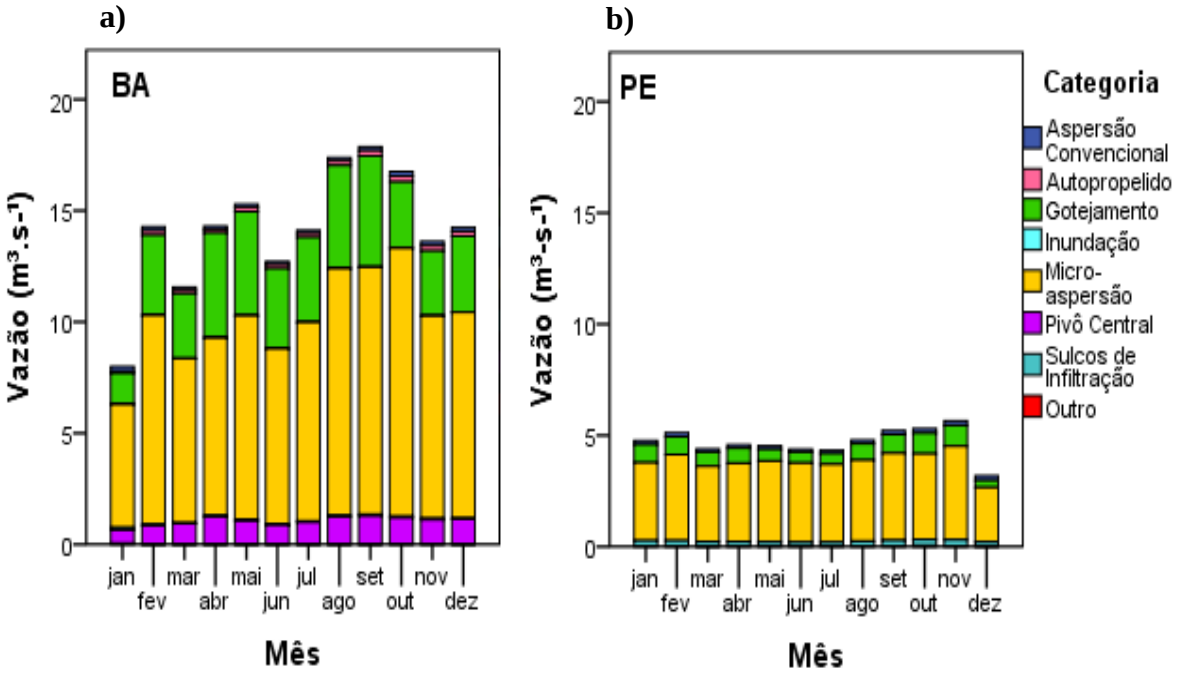


a – Vazão outorgada por usuários no estado da Bahia no SMSF.
b – Vazão outorgada por usuários no estado de Pernambuco no SMSF.

Em relação aos sistemas de irrigação mais utilizados pela categoria usuário individual (Figura 13) (65%) dos outorgantes utilizam microaspersão e (20%) o sistema por gotejamento concentrando-se principalmente nos municípios de Juazeiro e Glória na Bahia. As mesmas

técnicas foram identificadas em Pernambuco, a primeira delas com (51%) dos usuários em Belém de São Francisco e a segunda técnica com (29%) dos usuários distribuídos entre os municípios de Lagoa Grande e Petrolândia.

Figura 13 - Demanda de água por método de irrigação para o usuário individual

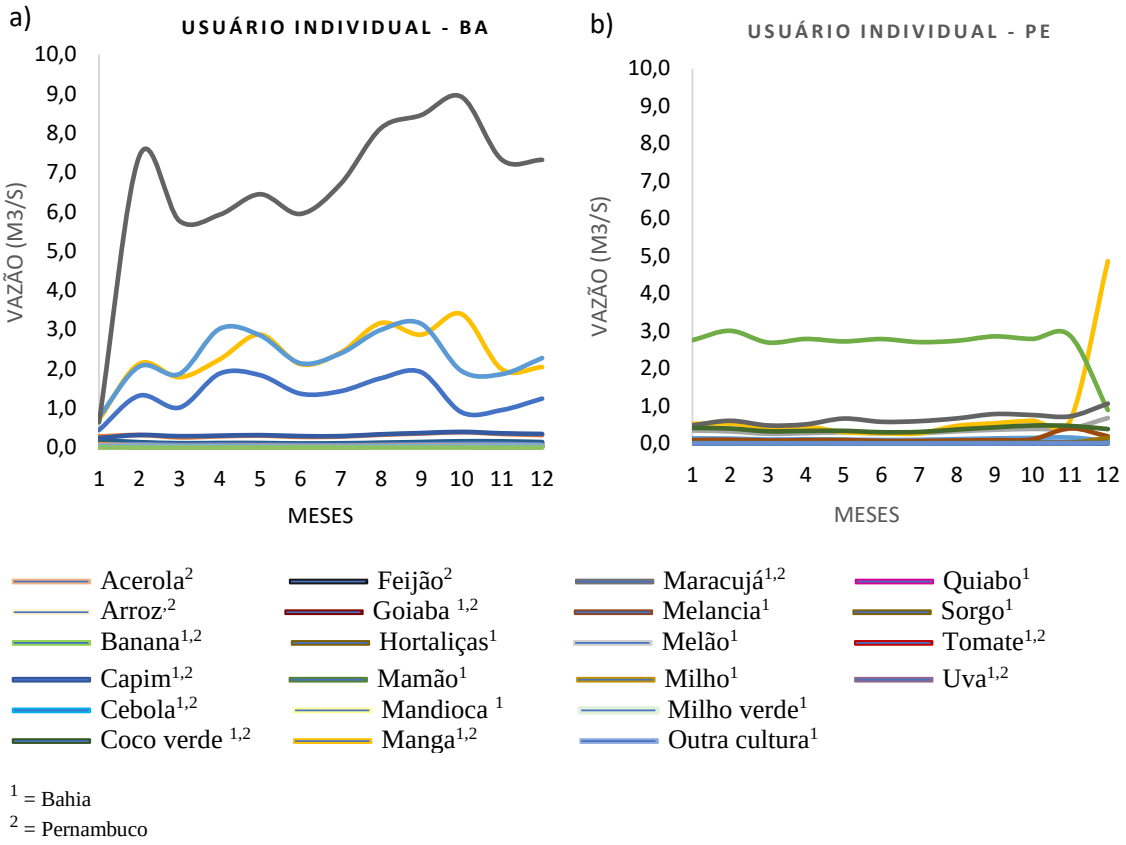


a - Demanda de água por irrigação para o usuário individual na Bahia.
b - Demanda de água por irrigação para o usuário individual em Pernambuco.

Segundo a CODEVASF (2017), o principal sistema de irrigação utilizado atualmente na região do Submédio da BHSF, são os métodos de microaspersão (40% do total), seguido pelo de superfície (28% do total), aspersão (17% do total) e gotejamento (15% do total). A CODEVASF ainda destaca que tem estimulado a substituição dos sistemas de irrigação menos eficientes, como os de sulco (superfície), por sistemas mais eficientes, como gotejamento e microaspersão, por meio do financiamento da elaboração de projetos detalhados, que serão disponibilizados aos produtores.

Em 2016, a cultura de maior expressividade encontrada nos lotes familiares foi a manga, ocupando 36% da área cultivada total. Dentre as culturas temporárias, destacaram-se o melão e a cebola (Figura 14).

Figuras 14 - Demanda de água por culturas para o usuário individual



a - Demanda de água por culturas para o usuário individual na Bahia.
b - Demanda de água por culturas para o usuário individual em Pernambuco.

Entre as culturas de ciclo longo utilizadas pelo usuário individual a cultura do coco-verde obteve demandas parecidas ao longo do ano com vazões entre 2,0 m^3/s e 3,0 m^3/s, em ambos estados, com destaque para Pernambuco que teve uma redução considerável no mês de dezembro.

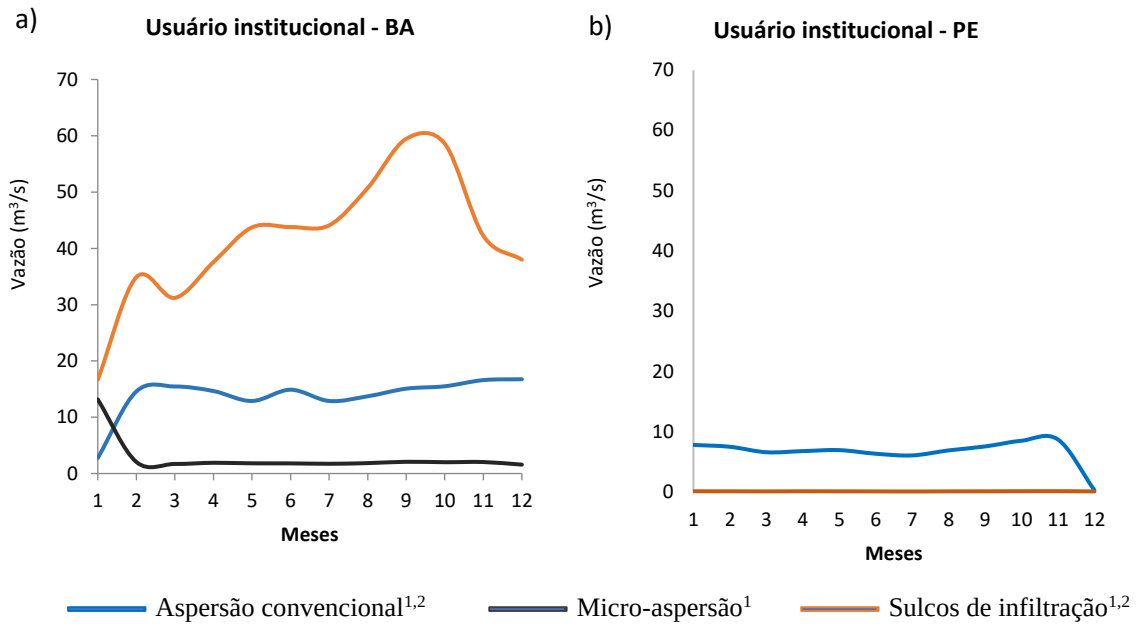
De acordo com a Branco (2014), na região do Submédio da BHSF a bananeira ocupa o terceiro lugar, no que se refere à produção e área cultivada, ficando atrás da uva e da manga; além disso, a banana, nessa região, possui uma produtividade superior à média nacional, sendo boa parte da área cultivada no Perímetro Irrigado Senador Nilo Coelho. Conforme dados da ANA, a concentração dessa cultura tem ocorrido principalmente entre os municípios baianos de Glória e Juazeiro.

Para o usuário institucional no trecho da Bahia, observou-se que os sistemas de irrigação que demandaram maiores volumes foram por sulcos de infiltração e aspersão convencional (Figura 15). O primeiro com 42% dos usuários e o segundo com 50%, concentrando-se nos

municípios de Glória e Xique-Xique respectivamente. Ainda em relação a esses sistemas, observou-se que o período com menor demanda foi em janeiro, aumentando progressivamente a partir de fevereiro para o sistema por sulcos de infiltração intensificando-se entre os meses de setembro e outubro.

Vale ressaltar que dentre os sistemas de irrigação identificados no Submédio São Francisco, o sistema por sulcos de infiltração tem eficiência de (65%), ou seja, uma das menores conforme N. T. 364/2007 da ANA, perdendo apenas para o sistema por inundação que tem eficiência de 50%.

Figura 15 - Demanda de água por método de irrigação para o usuário institucional nos estados da Bahia e Pernambuco no SMSF.



[1] = Bahia
[2] = Pernambuco

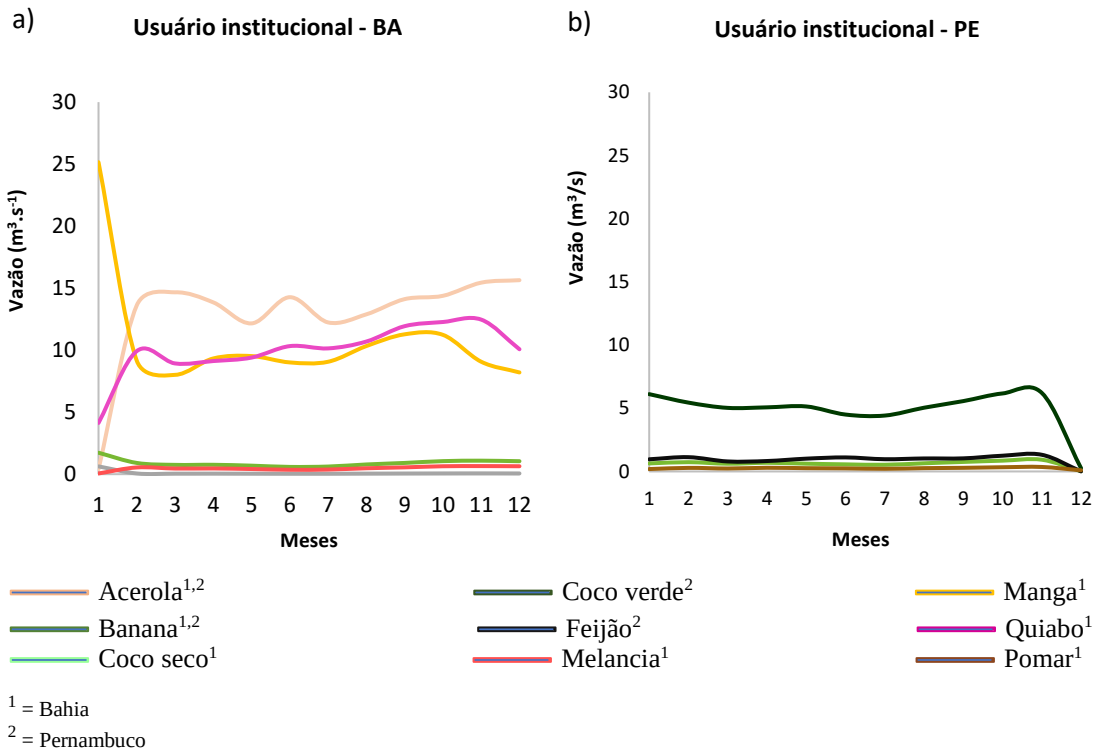
a - Demanda de água por irrigação para o usuário institucional na Bahia.
b - Demanda de água por irrigação para o usuário institucional em Pernambuco.

Além dos sistemas mencionados, foi identificado o sistema por microaspersão por um usuário no município de Juazeiro. Já no trecho de Pernambuco, 91% dos usuários institucionais utilizam o sistema por aspersão convencional e estão localizados no município de Petrolina, sendo que apenas um usuário em Santa Maria da Boa Vista utiliza o sistema por sulcos de infiltração.

Vale ressaltar que apesar de ambos os estados possuírem a mesma quantidade de usuários, os volumes máximos demandados para os que estão localizados no trecho da Bahia são exorbitantes, chegando a 60m^3/s entre os meses de setembro e outubro.

Em relação ao consumo de água por culturas, as maiores demandas foram referentes às culturas da acerola, manga e quiabo, que apresentaram volumes acima de 10 m^3/s durante todo ano, com exceção do mês de janeiro que teve como destaque o cultivo da manga com vazões acima 20 m^3/s (Figura 16).

Figura 16 - Demanda de água por culturas para o usuário institucional nos estados da Bahia e Pernambuco no SMSF.



[1] = Bahia
[2] = Pernambuco

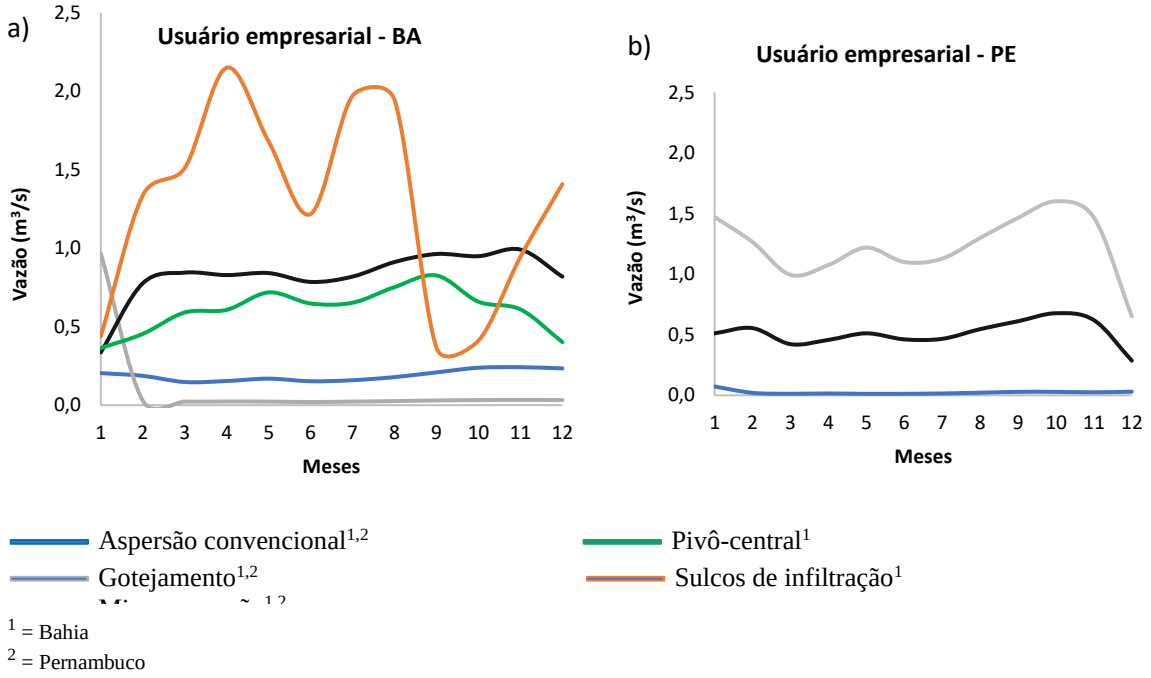
a - Demanda de água por culturas para o usuário institucional na Bahia.
b - Demanda de água por culturas para o usuário institucional em Pernambuco.

Em Pernambuco, das quatro culturas identificadas a que obteve maior demanda de água e usuários (54%), foi a cultura de coco verde, concentrando-se principalmente no município de Petrolina.

Para o usuário empresarial no trecho da Bahia, apesar do maior número de usuários utilizarem o sistema por microaspersão (24%), concentrando-se principalmente entre os municípios de Curaçá e Juazeiro, 18% dos usuários localizados principalmente no município

de Sobradinho, obtiveram as maiores demandas utilizando o sistema por sulcos de infiltração, principalmente nos meses de abril, julho e agosto (Figura 17).

Figuras 17 - Demanda de água por método de irrigação para o usuário empresarial nos estados da Bahia e Pernambuco SMSF.



[1] = Bahia
[2] = Pernambuco

a - Demanda de água por irrigação para o usuário empresarial na Bahia.
b - Demanda de água por irrigação para o usuário empresarial em Pernambuco.

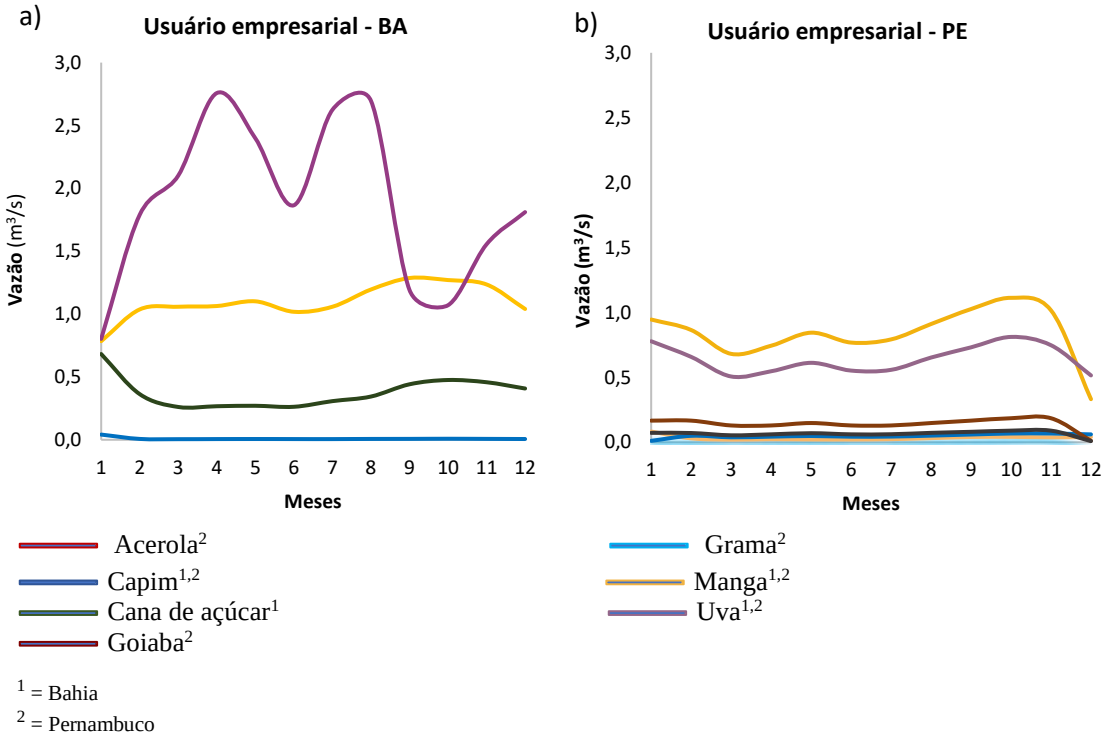
No trecho de Pernambuco, dos três sistemas identificados, o sistema por gotejamento apresentou maior demanda durante todo ano com aumento no mês de outubro, e redução entre novembro e dezembro. Dos 12 usuários indentificados, 54% estão distribuídos entre os municípios de Belém de São Francisco, Lagoa Grande e Petrolina.

As técnicas de gotejamento, aspersão e micro-aspersão são consideradas por Rosegrant *et al.*, (2002), sistemas mais avançados que permitem a melhoria e eficiência do uso de água na agricultura irrigada.

Segundo estudos feitos pela EMBRAPA (2011), o uso dessas técnicas ainda é limitado, o acesso do irrigante à tecnologia é ainda restrito, tanto pela falta de informação quanto pelo custo dos equipamentos e instrumentos destinados ao manejo. Em muitas regiões onde se pratica a agricultura irrigada, o baixo nível de instrução dos irrigantes dificulta a implantação de estratégias mínimas de manejo.

Em relação às culturas mais consumidas, a uva e a manga apresentaram as maiores demandas. No trecho da Bahia, com 32% dos usuários identificados a cultura da uva se destacou com a maior demanda, principalmente nos meses de abril, julho e agosto, com uma brusca redução entre os meses de setembro e outubro, período de maior demanda para a cultura da manga, que apresentou 45% dos usuários. Essas plantações têm sido cultivadas principalmente entre os municípios de Juazeiro e Casa Nova (Figura 18)

Figura 18 - Demanda de água por culturas para o usuário empresarial nos estados da Bahia e Pernambuco no SMSF.



a - Demanda de água por irrigação para o usuário empresarial na Bahia.
b - Demanda de água por irrigação para o usuário empresarial em Pernambuco.

No trecho em Pernambuco apesar das vazões serem bem inferiores em relação às apresentadas pelos usuários na Bahia, a cultura da uva, com 46% dos usuários empresariais apresentou a menor demanda em relação à cultura da manga com 38% dos usuários. Essas culturas estão localizadas nos municípios de Lagoa Grande, Petrolina e Santa Maria da Boa Vista. As Figuras 19 e 20 apresentam dois sistemas de irrigação utilizados em uma empresa localizada no município de Casa Nova.

Figura 19 - Sistema de irrigação por gotejamento utilizado na cultura de uva.

Fonte: A Autora, 2019.

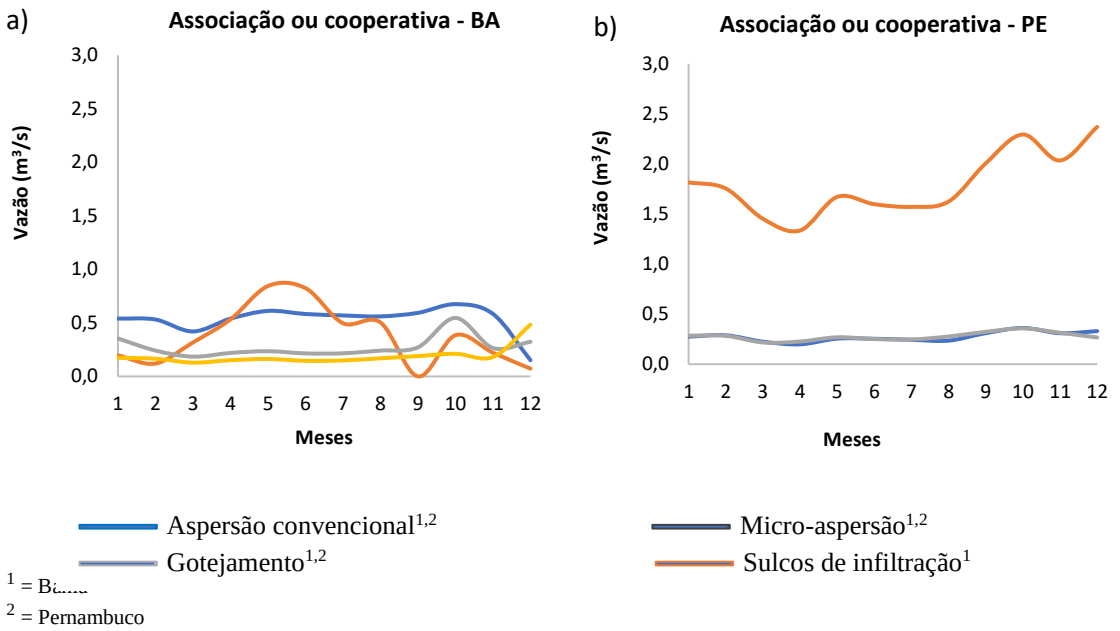
Figura 20 - Sistemas de irrigação por difusor utilizado na cultura de manga na empresa Agrobras.

Fonte: A Autora, 2019.

Para as associações ou cooperativas, as principais técnicas identificadas foram por sulcos de infiltração e por aspersão convencional (Figuras 21).

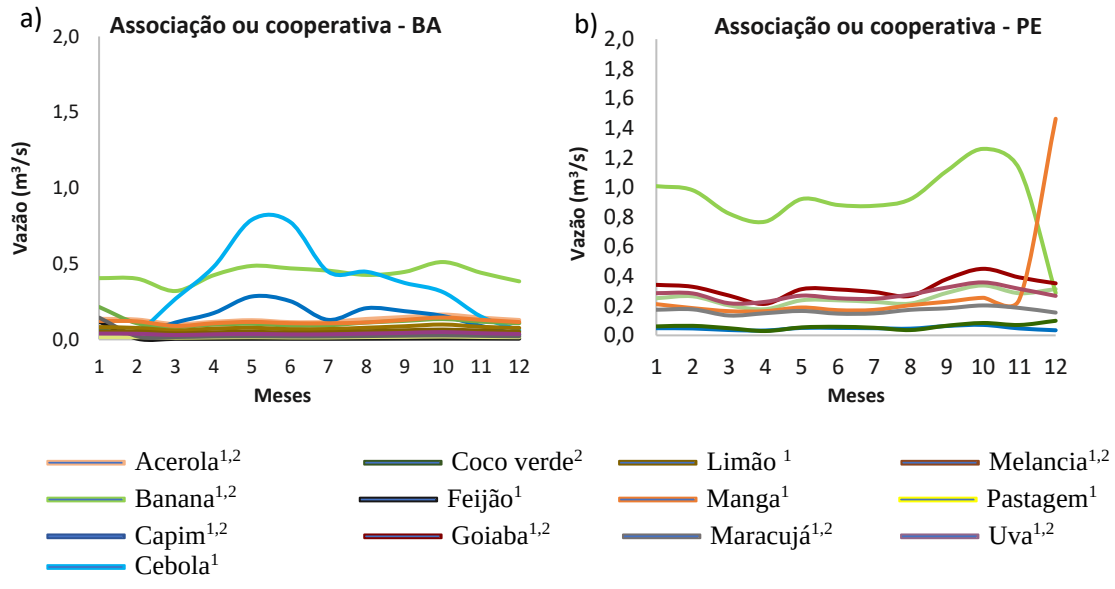
O interessante nesse caso é que diferente dos demais usuários, as associações e cooperativas identificadas no trecho pernambucano além de ter um maior número de usuários (35) em relação à Bahia (28), Pernambuco se destacou com a maior demanda de água, tanto pela técnica empregada, quanto pela cultura, que conforme as Figura 22, foi a cultura da banana.

Figura 21 - Demanda de água por método de irrigação para as associações ou cooperativas nos estados da Bahia e Pernambuco no SMSF .



a - Demanda de água por irrigação para as associações ou cooperativas na Bahia.
b - Demanda de água por irrigação para as associações ou cooperativas em Pernambuco.

Figura 22 - Demanda de água por culturas para as associações ou cooperativas nos estados da Bahia e Pernambuco no SMSF



a - Demanda de água por culturas para as associações ou cooperativas na Bahia
b -

Mesmo com a redução da vazão do Rio São Francisco, a Agência Nacional de Águas (ANA), órgão regulador responsável pela gestão hídrica do rio, não determinou restrição à captação de água para os projetos de irrigação. Nas Figuras 23 e 24 serão apresentados os vencimentos das outorgas conferidas aos usuários para os trechos da Bahia e Pernambuco, em relação aos diferentes perfis e as Figuras 25 e 26 em relação aos tipos de outorgas.

Em relação ao vencimento das outorgas, observou-se que a maioria das concessões são destinadas ao usuário individual, categoria que teve maior número de usuários para o Submédio da Bacia do São Francisco.

Em estudos realizados por Melo (2016), a maioria desses usuários eram representados por famílias com lotes de até 6 ha. Neste sentido, a Lei Nº 9433/97 destaca que irrigação de lavouras de até 2.000 ha, terão prazo de vigência de até 10 anos e áreas acima de 2.000 ha podem chegar até 20 anos.

Observou-se ainda que a maioria das concessões foram destinadas para novas outorgas, podendo ocorrer em duas situações: quando o usuário obtém a autorização pela primeira vez, ou perdendo o prazo da renovação da outorga obrigatoriamente tem que fazer uma nova solicitação. No caso do Submédio São Francisco, a maioria dos usuários, eram cadastrados, sendo a segunda justificativa a mais coerente com o quadro apresentado.

3.3.2 Qualidade da Água no trecho Submédio São Francisco

A bacia hidrográfica do Submédio São Francisco apresentou sérios problemas em relação a qualidade das águas no seu curso principal. Isso se deve, em grande parte, à falta de infraestrutura de saneamento básico nos municípios que compõem a bacia, atrelado às baixas vazões observadas em muitos trechos.

O aumento das áreas irrigadas, atrelado à industrialização e ao crescimento da população têm feito com que os parâmetros físicos, químicos e biológicos da água sejam alterados, ocasionando assim a poluição das águas nesse trecho. As principais atividades às margens do trecho principal da bacia podem ser observadas através do diagrama unifilar (Figura 27).

Figura 23 - Ano de vencimento de outorgas por usuário no estado da Bahia no SMSF

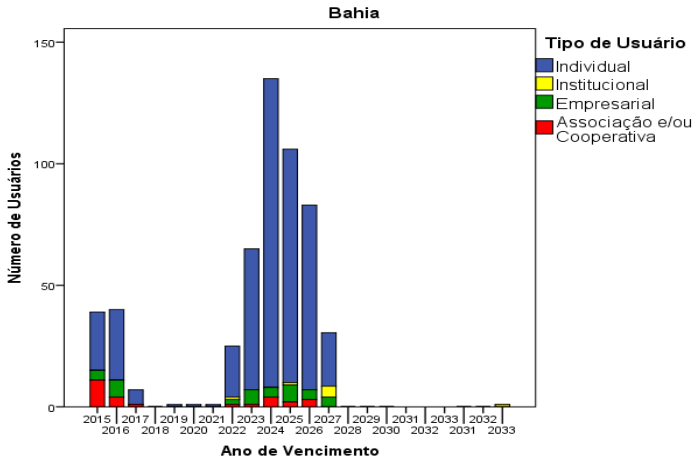


Figura 24 - Ano de vencimento de outorgas por usuário no estado da Pernambuco no SMSF

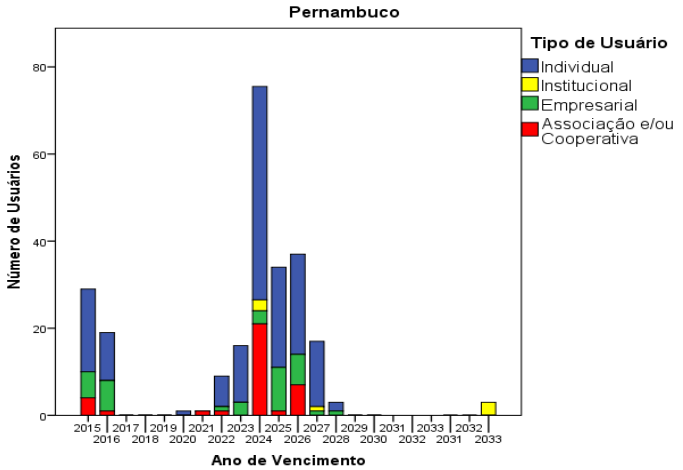


Figura 25 - Ano de vencimento de outorgas por categoria no estado da Bahia no SMSF

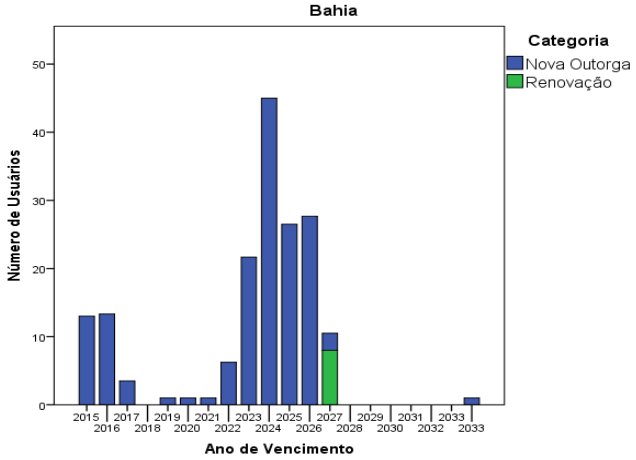


Figura 26 - Ano de vencimento de outorgas autorizadas por categoria no estado da Pernambuco no SMSF

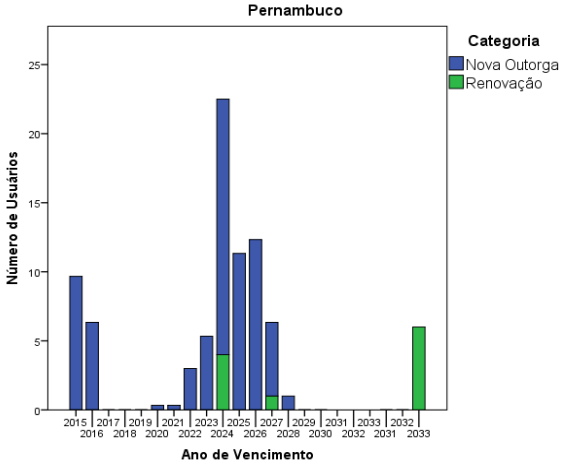
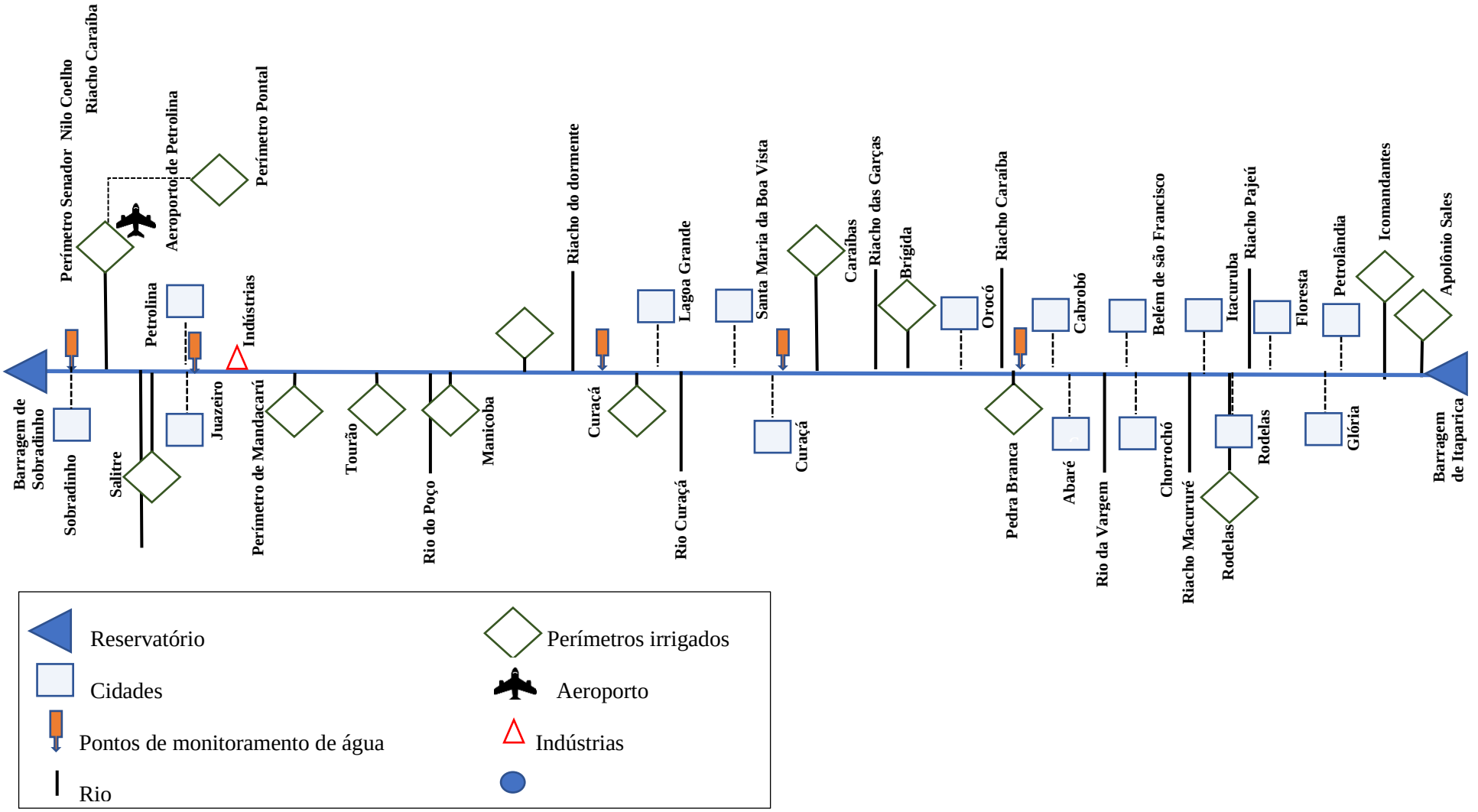


Figura:27 - Diagrama unifilar da área de estudo.



3.3.3 Avaliação da qualidade da água

Foram encontrados pH neutro em todos os pontos monitorados, no entanto, com exceção do ponto SOB 19, os demais pontos registraram pH altamente alcalinos (> 9), pincipalmente nos pontos SOB 24 (agosto/2016) e SOB 25 (novembro/2017), períodos considerados secos na Caatinga, registrando valores de 9,7 e 9,9 respectivamente (Figura 28). Este resultado pode ser influenciado pela localização dos pontos, pois encontram-se próximos a grandes centros urbanos e áreas de cultivos irrigados conforme apresentado na Figura 27.

Durante a estação chuvosa, houve uma redução considerável do pH nos pontos SOB 19, 25 e 29, no entanto, apenas o ponto SOB 25 não ultrapassou a faixa permissível de 6,0 a 9,0 que foi atribuída pela Resolução CONAMA 357/2005, para a adequada manutenção da vida aquática, bem como para as águas destinadas ao abastecimento humano, conforme previsto na Portaria MS N.º 2914/2011, onde estabelece a faixa permissível entre 6,5 e 9,5 (Figura 28a).

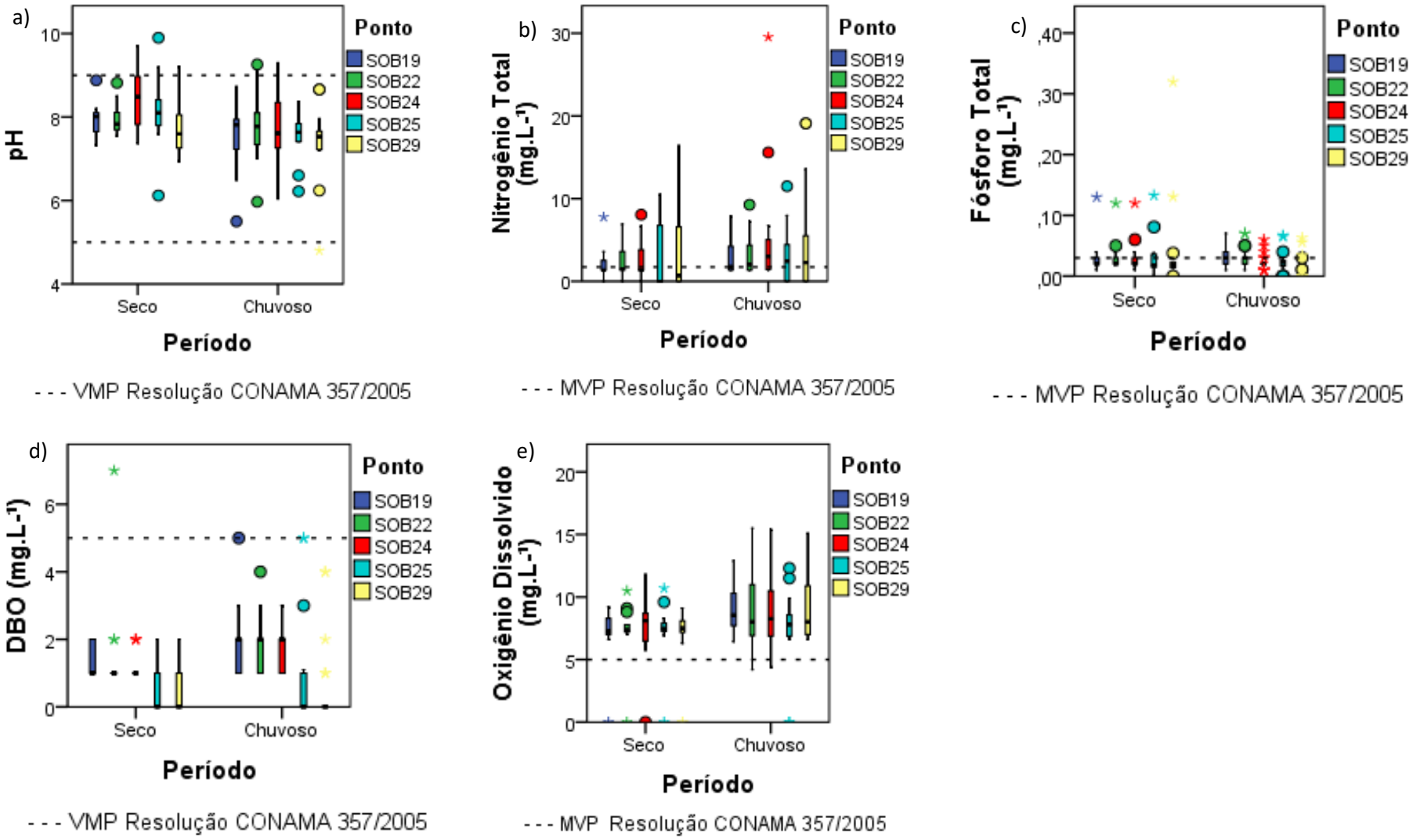
Em um estudo realizado por Peres (2012), em um trecho da Bacia no Alto São Francisco, o autor encontrou valores máximos de pH (0,08), segundo o autor, próximos aos pontos monitorados onde existe grandes plantações agrícolas, e devido ao uso indiscriminado de agrotóxicos a qualidade da água estava comprometida.

Para o nitrogênio total, foi observada uma variação entre 1,36 mg. L^{-1} a 29,54 mg.L^{-1}, apresentando concentrações acima do permitido em 30% das amostras coletadas, durante o período estudado (Figura 28b).

O impacto provocado pelo nitrogênio total no ponto SOB 24 em (março/18) chegou a corresponder a 698% acima do limite permitido pela Resolução CONAMA Nº 357/05, que estabelece para o nitrogênio amoniacal total limites de 3,7 mg. L^{-1} N, quando o pH for ≤ 7,5 em rios de Classes 1 e 2.

Em relação às concentrações de ortofosfato ou fósforo reativo, em geral, ultrapassaram os valores estabelecidos pela legislação citada, que estabelece concentrações de até 0,030 mg/L, em ambientes lênticos; e até 0,050 mg/L em ambientes intermediários. Os valores mais elevados se concentraram no período seco, principalmente no ponto SOB 29 (novembro/2017) obtendo uma concentração de 0,32 mg/L (Figura 28c) Estes valores podem estar influenciados pela introdução de material em suspensão e de material orgânico no rio.

Figuras 28 - Variação sazonal da qualidade da água no trecho SMSF.



Vale ressaltar, que o fósforo é indispensável para o crescimento de algas e quando se encontra em altas concentrações, pode levar a eutrofização – crescimento excessivo de algas, lagos e reservatórios. Além da restrição ao consumo humano, o processo da eutrofização altera o ciclo de vida das comunidades aquáticas podendo levar à perdas irreparáveis.

Em relação a DBO, a maior concentração foi no ponto SOB 22 em (outubro/2016), na estação seca, onde foi registrado DBO de 7,0 mg/ L (Figura 28d). Este resultado excede o limite de 5 mg/ L no qual foi atribuido pela Resolução CONAMA Nº 357/05 para rios de classe 2.

Vale ressaltar que este ponto se encontra no trecho logo após as cidades de Petrolina e Juazeiro, sendo um dos locais mais assoreados da bacia, devido ao lançamento irregular de esgotos domésticos e atividades agrícolas no entorno. Apesar do resultado não atender a legislação vigente, o Ministério da Saúde considera que em ambientes naturais não poluídos, a concentração de DBO é baixa (1 mg/L a 10 mg/L), podendo atingir valores bem mais elevados em corpos d'água sujeitos à poluição orgânica, em geral decorrente do recebimento de esgotos domésticos ou de criatórios de animais.

Também se verificou que este parâmetro é inversamente proporcional a concentração de OD, pois reflete a concentração de OD necessária para estabilizar, através de processos bioquímicos, a matéria orgânica carbonácea adicionada ao meio aquático. Em relação ao parâmetro do OD, apenas os pontos SOB 22 e SOB 24 no período chuvoso, não atenderam à Legislação vigente, que determina em qualquer amostra, não esteja inferior a 5 mg/L O_2. (Figura 28e).

Lima *et al.,* (2018), aplicando uma metodologia para caracterização da qualidade de água na bacia hidrográfica do Açude Acarape do Meio, no semiárido brasileiro encontrou em quatros pontos monitorados, valores de fósforo total entre 2,4 mg/L e 14,8 mg/L.

Este parâmetro é um dos mais significativos para expressar a qualidade de um ambiente aquático e as suas variações nos teores de oxigênio dissolvido estão associadas aos processos físicos, químicos e biológicos que ocorrem nos corpos d'água. Para a manutenção da vida aquática aeróbica são necessários teores mínimos de oxigênio dissolvido de 2 mg/L a 5 mg/L.

3.4 CONCLUSÃO

De acordo com a caracterização da demanda hídrica no trecho Submédio São Francisco, das 1992 outorgas identificadas, 66% estão concentradas no trecho da Bahia, distribuídas em

quatros categorias de usuários, sendo eles: individual, institucional, empresas e associações ou cooperativas.

Observou-se que apesar de (94%) das outorgas terem sidos concedidas aos usuários individuais, o perfil que mais demandou água foi o usuário institucional, que possui apenas (0,5%) dos usuários.

Em relação às técnicas de irrigação mais utilizadas, o sistema que apresentou maior demanda de água foi o sistema de irrigação por sulcos de infiltração que tem eficiência de 65%, enquanto os sistemas menos utilizados foram autopropelido (80%) e pivô central (85%). Além dos sistemas, das 28 culturas identificadas, as que mais se destacaram tanto em termo de volume, quanto em termos de usuários, foram as culturas de manga, uva e banana.

Conforme o levantamento das outorgas concedidas, o volume de água destinado a irrigação é extremamente alto e as projeções chegam até 2033, segundo dados da ANA. Só não sabemos se teremos água suficiente para atender às demandas requeridas. Esse aumento pode ser bem maior, tendo em vista que muitos usuários não são outorgados, retirando a água da bacia de forma irregular.

Vale ressaltar que o instrumento da outorga condiciona o uso de sistemas de irrigação mais eficientes, bem como a orientação e a capacitação dos irrigantes, contribuindo na percepção do agricultor. Neste sentido, a demanda de consumo elevado, bem como um cenário de escassez crescente, determina a exigência de uma atenção especial de todos para o uso cada vez mais criterioso e eficiente da água na agricultura.

As questões relacionadas à outorga nessas áreas ainda são precárias, por isso a cobrança pelo uso da água tem se mostrado como uma das grandes conquistas do Comitê, servindo como instrumento de gestão e conservação da bacia.

Quanto a captação de água na bacia, 70% da água é destinada à atividade agricultura e sua concentração tem sido principalmente nas áreas no entorno de reservatórios de água e ao longo da calha principal do Submédio. Essas atividades provêm de grandes projetos denominados de perímetros irrigados, alguns deles voltados para agricultura familiar.

Em relação a avaliação da qualidade da água, os resultados mostraram que todos os pontos estiveram valores acima do permitido pela Resolução CONAMA Nº 357/2005. Os resultados mostraram que todos os pontos tiveram valores acima do permitido pela legislação vigente quanto aos parâmetros: pH, fósforo total e demanda bioquímica de oxigênio. Essas estações encontram-se próximas às áreas com intensa atividade agrícola, o que possivelmente influenciou no resultado das amostras.

A qualidade da água é um fator que deve ser monitorado sistematicamente. A oferta de água apenas em quantidade não é o bastante para atender às demandas da sociedade e do meio natural. É necessário que a gestão não se detenha às práticas apenas corretivas, com o tratamento das águas apenas após o seu comprometimento, mas adote a prevenção através do monitoramento dos aspectos que podem gerar impactos aos recursos hídricos.

Além disso, tornar disponível à comunidade as informações referentes às captações cadastradas e os estudos existentes, hidrogeológicos e hidrológicos, contribui para o conhecimento da real situação da bacia hidrográfica, além de permitir a participação dos usuários no processo de gestão dos recursos disponíveis influenciando nas ações ou medidas de controle para o uso adequado da água.

Existe vários desafios a serem vencidos, sejam nos aspectos teóricos e de concepção ou nos aspectos práticos de operacionalização dos sistemas de outorga. Dentre esses desafios poderiam ser citados: a definição do valor adequado para a vazão máxima outorgada, a inexistência de dados fluviométricos nas bacias hidrográficas, o desconhecimento sobre os usuários e as respectivas demandas, o desenvolvimento de metodologias específicas para o estabelecimento dos valores adequados a serem outorgados como vazão ecológica, assim como de metodologias que integrem os aspectos quantitativos e qualitativos da outorga.

4 DELIMITAÇÃO DAS ÁREAS IRRIGADAS EM FUNÇÃO DO USO E OCUPAÇÃO DO SOLO NA CALHA PRINCIPAL DO SUBMÉDIO SÃO FRANCISCO EM ANOS DE ANOMALIA CLIMÁTICA

RESUMO

No domínio do semiárido, estudos da vegetação e uso da terra vêm sendo desenvolvidos, com o objetivo de obter informações a partir de imagens de satélite e de outros produtos do sensoriamento remoto, em busca de facilitar a análise e a interpretação dos dados de superfície. Nesse contexto, a pesquisa buscou realizar uma análise espaço temporal do uso e ocupação do solo em um trecho do submédio da bacia do São Francisco. Foram utilizadas imagens dos satélites Landsat-5 TM e Landsat-8 OLI. para os anos de 1988, 1993, 1998, 2006, 2013 e 2018. A classificação supervisionada das imagens Landsat foi feita a partir do plugin Dzetsaka do Software QGIS, que possibilitou a classificação de cinco classes de uso do solo, tais como: água, caatingas densa e rala, áreas antrópicas não agrícolas e agrícolas, com base no manual de classificação do uso da terra do IBGE (2013). Conforme a avaliação espaço temporal das imagens, os resultados indicaram um aumento de mais de 26% do desmatamento da vegetação nativa na área de estudo. A classe da Caatinga densa foi a mais impactada, a maioria convertida em novas pastagens. Além disso, observou-se que o aumento do desmatamento na área o ocasionou também uma redução da Caatinga preservada e da regeneração florestal. Além disso, houve um aumento na área ocupada por agricultura, passando de 2 para 6%. Esse aumento foi resultado do incremento na área plantada das culturas principalmente de ciclo curto. Os resultados também mostraram, que houve um decréscimo dos corpos hídricos, passando de 7% para 6%, sobretudo na área onde está inserido o reservatório de sobradinho. Para realçar as diferenças existentes entre o solo e a vegetação, foram calculados o Índice de Vegetação por Diferença Normalizada (NDVI). Os valores estimados através do NDVI indicaram ausência ou diminuição da vegetação, redução dos corpos hídricos e aumento do solo exposto. Por meio do índice foi possível identificar as áreas mais susceptíveis aos processos de alteração provocados pela ação antrópica, identificando os núcleos de vegetação das bordas do fragmento como mais susceptíveis à degradação.

Palavras-chave: Sensoriamento remoto. NDVI. Mapeamento

4.1 INTRODUÇÃO

As mudanças climáticas resultantes do aquecimento global podem trazer impactos significativos para as regiões áridas e semiáridas do planeta, e como consequência desse aquecimento, em muitas bacias hidrográficas ocorrerá uma redução da água disponível e um aumento dos conflitos pelo uso da água e dos riscos de degradação dos ecossistemas aquáticos.

Em alguns cenários climáticos as temperaturas aumentariam de 2ºC a 5°C no Nordeste, até o final do século. Esse efeito pode ser exacerbado pelas atividades agrícolas nas margens dos reservatórios e corpos d'águas, situação típica em algumas zonas do Nordeste do Brasil, onde o armazenamento de água é feito por um grande número de reservatórios.

Os impactos ambientais dessas atividades alteram o funcionamento natural do sistema e são fatores determinantes no processo de deterioração da qualidade e da disponibilidade da água, tornando-se fonte de conflitos relativos ao uso da água. Esses impactos e conflitos podem ser minimizados pela adoção de ações de manejo integrado, que possibilita a mitigação dos problemas inerentes à degradação da água e o atendimento das expectativas dos usuários inseridas no contexto de sustentabilidade.

Atrelado às possíveis alterações provocadas pela variabilidade climática e espacial dos recursos hídricos, torna-se fundamental o conhecimento das mudanças no uso e ocupação do solo. O conhecimento da sua dinâmica e as possíveis tendências são essenciais para elaboração de um planejamento urbano e regional, além de promover o uso racional dos recursos hídricos. possibilita a elaboração de um diagnóstico e propostas para melhoria da qualidade de vida da população.

Uma das maneiras de se investigar essas grandes alterações provocadas ao meio ambiente pelo homem, tem sido o emprego de dados e técnicas de sensoriamento remoto, uma vez que essa ferramenta pode auxiliar de forma eficaz no monitoramento sistemático e dinâmico dos diversos fenômenos meteorológicos e ambientais, possibilitando a tomada de decisão para preservação ambiental (MOREIRA, 2003).

O avanço tecnológico das últimas décadas favoreceu o desenvolvimento de vários satélites de monitoramento terrestre-ambiental, os quais possibilitam, em escala global, regional ou local, a coleta de dados (quantitativos e qualitativos) sobre o grau de degradação ao meio ambiente, incluindo o acompanhamento de biomas ameaçados de extinção, alterações climáticas, níveis de poluição da água e da atmosfera, dentre outras medições possíveis.

Diversos softwares de Sistema de Informações Geográficas (SIG) são capazes de atender esse interesse, a exemplo do ArcGis. onde é possível manipular os dados das imagens

coletadas através de técnicas de tratamento digital de imagens e de geoprocessamento algébrico, de acordo com o escopo de cada pesquisa. Dentre os modelos mais empregados encontrados na literatura brasileira, sobre este tema, encontra-se o modelo de Maralet *et al.*, (1985) e o modelo SEBAL desenvolvido por Bastiaanssen *et al.,* (1995).

Atualmente, essa técnica representa um sistema consistente de aquisição de dados fundamental para o estudo da superfície terrestre nas diversas aplicações (urbanas, agrícolas, geológicas, ecológicas, florestais, cartográficas, oceanográficas, hidrológicas, limnológicas, climatológicas e militares).

Diante do exposto, torna-se relevante a análise de áreas do semiárido nordestino visando demonstrar possíveis alterações decorrentes das transformações no uso e ocupação do solo, que geram inúmeros problemas de ordem social, econômica e ambiental. Nessa região, o efeito pode ser exacerbado pelas atividades agrícolas nas margens dos corpos d'águas, onde o armazenamento de água é feito por um grande número de açudes/reservatórios.

Qualquer atividade econômica realizada nessas áreas irá comprometer a qualidade e disponibilidade de água ofertada pela bacia hidrográfica, uma vez que a presença de cobertura florestal, bem como as condições naturais do solo são fatores determinantes para a conservação dos mananciais hídricos. O mapeamento dessas áreas pode contribuir para o melhor gerenciamento das suas atividades. Sendo assim, o estudo pretende delimitar as áreas irrigadas em função do uso e ocupação do solo na calha principal do Submédio São Francisco em anos de anomalia climática .

4.1.1 A importância do sensoriamento remoto na avaliação do uso do solo

Atualmente, os avanços tecnológicos favoreceram o surgimento e o aperfeiçoamento de diversas técnicas de coleta de dados. Dentre os vários produtos de obtenção de dados e informações acerca do espaço geográfico, o sensoriamento remoto tem apresentado elevado potencial na aquisição de grandes volumes de dados em diferentes escalas. O uso de imagens de satélite para mapeamento do solo tem se destacado como ferramenta acessível para estudos científicos.

Os produtos de sensoriamento remoto, sobretudo com o advento das imagens de alta resolução espacial, proporcionam uma nova perspectiva para as áreas de mapeamento, tanto pelo aspecto de resolução espacial, como pelo da resolução radiométrica (Carvalho *et al.*, 2014). Os produtos de alta resolução atribuem novos desafios ao processamento digital de imagens,

cuja finalidade é melhorar o aspecto visual das feições estruturais para o analista humano, buscando subsidiar sua interpretação (GONZALEZ; WOODS, 2000).

Com o Coaumento da resolução espacial dessas imagens, os detalhes e as características dos objetos são mais distintos, uma vez que, quanto maior a resolução, maior a capacidade que um sensor possui de diferenciar objetos próximos espacialmente, o que torna a identificação dos elementos mais complexa, devido à grande quantidade de informações (MING *et al.*,, 2009).

Por meio do avanço de técnicas e ferramentas automáticas capazes de interpretar a massa de dados produzida pelas imagens de alta resolução, podem-se extrair informações remotas da superfície terrestre por meio de métodos de classificação, que identificam padrões. A classificação pode ser entendida como um processo que consiste em agrupar *pixels*, com as mesmas características, em classes pré-estabelecidas ou não pelo analista (JENSEN, 2009). Os métodos tradicionais de classificação de imagens agrupam os pixels em classes baseado em características espectrais *pixel*-a-*pixel*.

De acordo com Liu *et al.*, (2006), os algoritmos de classificação podem ser agrupados em classificadores individuais, tais como os estatísticos (K-médias, máxima verossimilhança, distância mínima, paralelepípedo, etc.), classificador por rede neural artificial, por máquina de aprendizagem (árvore de decisão, etc.), classificador *fuzzy*, ou a combinação de distintos classificadores por meio de algum mecanismo específico. Através de processos estatísticos, os algoritmos desses métodos de classificação analisam a característica espectral de cada *pixel* da imagem e os categoriza dentro de uma classe específica.

Para a classificação de imagens de alta resolução essa proposta pode não ser satisfatória em termos de precisão e produção de redundância, uma vez que essas imagens possuem grande variabilidade de respostas espectrais (Campos *et al.*, 2013). Uma técnica bastante utilizada em imagens de alta resolução espacial é a segmentação. Esse procedimento gerado automaticamente se fundamenta nas características de descontinuidade e similaridade dos tons de cinza de uma imagem. O método que avalia a primeira característica considera a mudança abrupta nos níveis de cinza, já a similaridade consiste na agregação de *pixels* em função da sua semelhança com *pixels* vizinhos (DLUGOSZ *et al.*, 2009). A segmentação por regiões fundamenta-se no método da similaridade. Essa operação consiste em agrupar *pixels* com características similares.

De acordo com Liu *et al.*, (2006) esse método de classificação tem como unidade de processamento os objetos/regiões da imagem que partilham atributos parecidos, tais como:

nível de cinza, características espectrais, textura, tamanho, compacidade, forma, informação do contexto dos objetos adjacentes, entre outros. Dessa forma, adotando esses procedimentos de interpretação, a imagem passa a ser representada não apenas por *pixels* individualizados, mas também por objetos e seus relacionamentos mútuos.

No entanto, o êxito de uma análise de classificação de imagens de satélite depende de vários fatores, que vão desde os princípios básicos de interpretação, a época de obtenção das imagens de satélite, o tipo de produto, bandas espectrais, a escala das imagens e, por fim, a experiência do analista. Em áreas de intensas atividades e exploração do uso do solo as imagens Landsat podem fornecer grandes informações, uma vez que a extração de feições geográficas de imagens orbitais de média resolução já se configura como uma das principais fontes de dados em Sistema de Informação Geográfica (SIG), por sua acurácia e atualidade (ANTUNES & LINGNAU, 2001).

4.1.2 O programa Landsat

De acordo com Coelho (2016), o programa Landsat representa o mais longo e contínuo registro de dados de sensoriamento remoto, com resolução moderada, a bordo de plataformas orbitais na Terra. Constitui-se em uma série de oito satélites, desenvolvidos e lançados pela *National Aeronautics and Space Administration* (NASA) há quatro décadas, com objetivo de fornecer informações de grande valor dos recursos terrestres, necessárias para os trabalhos em diversas áreas do conhecimento, como a Hidrologia e a Agricultura.

Os três primeiros satélites da série fazem parte da primeira geração, tendo como principais sensores, o *Multispectral Scanner System* (MSS) e o *Return Bean Vidicon* (RBV). Em razão de problemas técnicos no RBV, e da superioridade técnica do instrumento MSS do ponto de vista espectral e radiométrico, o RBV foi muito pouco utilizado (MARQUES, 2009).

A segunda geração de satélites da série LANDSAT é composta de outro sensor, o TM, sendo mantido o MSS com algumas modificações (ZARATTINI, 1989). Porém, o sensor MSS foi desligado em agosto de 1995, por razões técnicas.

A bordo dos satélites Landsat 4 e Landsat 5 estavam os mesmos sistemas de *scanners*, sendo: o antigo MSS, para fazer comparações com as imagens geradas pelas três primeiras missões; e o novo *Thematic Mapper* (TM), com sistema de varredura mais desenvolvido e concebido para proporcionar resolução espacial mais fina, melhor discriminação espectral entre

objetos da superfície terrestre, maior fidelidade geométrica e melhor precisão radiométrica em relação ao sensor MSS.

Antes do lançamento do mais novo satélite, dos 7 satélites do sistema Landsat, o Landsat 5 lançado em 1984 foi o que mais contribuiu com informações sobre a superfície terrestre, registrando diversas mudanças significativas no planeta, ultrapassando em vários anos a sua vida útil prevista. Já o satélite Landsat 7 foi utilizado por pouco tempo por não ter funcionado da forma planejada (MATOS, 2010). Recentemente em 2013, foi lançado o mais novo satélite da série, o Landsat 8, que atualmente opera no mesmo *slot* orbital utilizado pelo Landsat 5.

Enquanto estava em operação, a órbita do satélite Landsat 5 era heliossíncrona, circular e quase polar, semelhante à de outros satélites do programa. No entanto, a altura de 705 km, adotada após o lançamento do quarto satélite da série, proporcionou um melhor padrão de cobertura do terreno, devido à largura de 185 km das faixas das imagens e à resolução temporal de 16 dias. No Quadro 1, observam-se outros parâmetros orbitais do quinto satélite do programa Landsat.

Quadro 1 - Parâmetros orbitais do satélite Landsat 5.

Item	**Especificações**
Órbita	Circular, heliossíncrina, quase polar
Altitude	705 km
Inclinação orbital	98,2º
Horário de passagem pelo Equador (h)	9,45
Resolução temporal	16 dias
Largura da faixa	185 km

Fonte: Adaptado de NOVO (2010).

Os sensores TM a bordo do quarto e quinto satélites do programa Landsat representaram, há um quarto de século quando eles foram lançados, um avanço no sistema de varredura multiespectral, pois forneceram imagens da superfície terrestre em sete bandas do espectro eletromagnético, localizadas nas regiões do visível, infravermelho próximo, infravermelho médio e infravermelho termal (Quadro 2).

Quadro 2 - Principais características e aplicações do sensor TM.

Banda	**Intervalo (µm)**	**Principais características e aplicações**	**Resolução espacial (m)**
1	0,45 – 0,52	Diferenciação solo/vegetação, em virtude da absorção de pigmentos das plantas; grande penetração em corpos de água com elevada transparência; e sensibilidade às plumas de fumaça	30
2	0,52 – 0,60	Diferenciação do vigor da vegetação pela maior sensibilidade à reflectância do verde; sensibilidade à presença de sedimentos em suspensão; e boa penetração em corpos de água	30
3	0,63 – 0,69	Diferenciação de espécies de plantas em função da presença de pigmentos da clorofila; discriminação entre solo exposto e vegetação; e análises litológicas em regiões com pouca vegetação.	30
4	0,76 – 0,90	Diferenciação entre corpos hídricos e vegetação; identificação de áreas agrícolas; e sensibilidade à morfologia do terreno, permitindo informações sobre a geomorfologia, geologia e solos.	30
5	1,55 – 1,75	Observações de estresse vegetativo causado pelo desequilíbrio hídrico, pois essa região do espectro apresenta sensibilidade ao teor de umidade no tecido foliar das plantas.	30
6	10,40 –12,50	Apresenta sensibilidade aos fenômenos relativos aos contrastes térmicos, servindo para detectar propriedades termais entre diversos alvos (rochas, solos, vegetação e água).	120
7	2,08 – 2,35	Apresenta sensibilidade à morfologia do terreno, permitindo obter informações sobre a geomorfologia, os solos e a geologia; e identificação de minerais com íons hidroxilas	30

Fonte: Adaptado de NOVO (2010).

O satélite Landsat 8, foi lançado no dia 11 de fevereiro de 2013 e começou a transmitir imagens no dia 18 de março, sendo que, apenas no dia 12 de Abril, atingiu a sua órbita final a 705 km acima da terra. É um satélite dos Estados Unidos da América e tem como objetivo observar a terra. É o oitavo da série de satélites do Programa Landsat e o sétimo a alcançar com sucesso a órbita terrestre. O *United States Geological Survey* (USGS) é o responsável por toda aquisição, armazenamento e processamento das imagens (Quadro 3).

Quadro 3 – Principais características e aplicações do satélite Landsat 8.

Bandas Espectrais	**Intervalo (µm)**	**Principais características e aplicações**	**Resolução espacial (m)**
OLI 1	0,43-0,45	Denominada de ultra-azul. Bastante dispersado por partículas de aerossóis e partículas finas	30
OLI 2	0,45-0,51	Composta pelas bandas azul, verde e vermelho: são as bandas usadas para composição em cor natural	30
OLI 3	0,53-0,59		
OLI 4	0,63-0,67		
OLI 5	0,85-0,88	Composta pelo infravermelho próximo, é a mais indicada para estudos de vegetação e utilização de vegetação como NDVI	30
OLI 6	1,57-1,65	Composta pelo infravermelho de ondas curtas SWR1 e SWR2: são particularmente úteis para distinguir terra molhada da terra seca e estudos geológicos	30
OLI 7	2,11-2,29		30
OLI 8	0,50-0,68	Composta pela banda Pancromática: basicamente utilizadas para fazer fusões com outras composições de bandas com o objetivo de melhorar a interpretação visual	15
OLI 9	1,36-1,38	Projetada para detecção de nuvens altas denominadas de Cirrus. Por meio da fusão com outras bandas espectrais pode-se melhorar a interpretação visual.	30
TIRS 10	10,60-11,19	Composta pelo infravermelho termal TRS1 e TRS2): usadas para estudar a variação da temperatura da superfície do planeta.	100
TIRS 11	11,50-12,51		

Fonte: Adaptado de USGS (2013).

Para o Brasil, o sistema Landsat teve um papel fundamental na consolidação de pesquisas e capacitação de uma ampla comunidade de usuários, pois os seus dados foram recepcionados, processados e distribuídos desde 1973 pelo INPE (Instituto Nacional de Pesquisas Espaciais). Atualmente, todos os dados do programa Landsat, inclusive aqueles registrados pelo oitavo satélite da série, são disponibilizados gratuitamente para o Brasil através do seguinte site: http://www.dgi.inpe.br/CDSR/. Informações mais detalhadas sobre o programa Landsat podem ser obtidas em Novo (2010).

4.1.3 Missão SRTM (*Shuttle Radar Topography Mission*)

O sobrevoo da SRTM ocorreu no período de 11 a 22 de fevereiro de 2000, durante o qual foram percorridas 16 órbitas por dia, num total de 176 órbitas. Este foi concluído com a coleta de 12 TB (Tera *Bytes*) de dados processados para a formação de MNT's. Este sobrevoo ocorreu a uma altitude de 233 km, com a inclinação de 57°, tendo sido imageado 80% do planeta, compreendendo as latitudes entre 60° Norte e 56° Sul (MARQUES, 2009). Trata-se de um projeto de cooperação entre a NASA e a NIMA (*National Imagery and Mapping Agency* (NIMA), além de agências espaciais da Alemanha e da Itália.

A bordo do ônibus espacial utilizado na missão estavam dois radares de abertura sintética, separados um do outro por uma haste com distância de 60 m para a realização da interferometria. As informações disponíveis do SRTM passaram a ser disponibilizadas em 2002, através de *Digital Elevation Models* (DEM's) com resoluções espaciais de 30 m e 90 m para a superfície dos Estados Unidos e para o restante do globo, respectivamente. Os dados da missão SRTM são disponibilizados gratuitamente pela ferramenta *Earth Explorer* do *United States Geological Survey* (USGS), através do site https://earthexplorer.usgs.gov. Informações mais detalhadas sobre essa missão também podem ser obtidas em Valeriano (2004).

4.1.4 Métodos de classificação de imagens orbitais

Dentre os métodos de classificação orbitais utilizados, o método da Máxima Verossimilhança (MaxVer) é o mais tradicional e comumente utilizado quando se quer obter classes informacionais a partir de imagens de sensores remotos. Neste método a distribuição espectral das classes de uso do solo é considerada quando os objetos pertencentes à mesma classe apresentarem resposta espectral próxima à média de valores para aquela classe.

O método considera a ponderação das distâncias médias, onde são utilizados parâmetros estatísticos de distribuição dos *pixels* dentro de uma determinada classe (CRÓSTA, 1992). Segundo o autor, para obter bons resultados com esta classificação é imprescindível a escolha de um número elevado de *pixels* para cada amostra de treinamento da classe, tendo eles uma distribuição estatística próxima da distribuição normal (CRÓSTA, 1992). Para aplicação do método é importante que o usuário tenha conhecimento prévio da área analisada, assim como da distribuição das classes, para que se possa obter maior eficiência na escolha das amostras de treinamento.

Além da utilização dos métodos de classificação de imagens para o mapeamento do uso do solo, na região semiárida do Brasil, em virtude da importância e da carência de dados de campo, novas técnicas de sensoriamento remoto vêm sendo utilizadas na modelagem de parâmetros biofísicos da vegetação com intuito de monitorar a dinâmica espaço-temporal da Caatinga, face às mudanças climáticas e ações antropogênicas.

4.1.5 Determinação de Parâmetros biofísicos por Técnicas de Sensoriamento Remoto

A determinação de parâmetros biofísicos da superfície por técnicas e ferramentas avançadas de sensoriamento remoto com dados mínimos da superfície terrestre, vem sendo aplicada em distintos ecossistemas e manejo de grandes áreas, destacando-se como boa alternativa para obtenção em escala regional, demonstrando resposta espectral de distintos usos sobre áreas de superfície heterogênea (TEIXEIRA *et al.*, 2009; LOPES *et al.*, 2010). Além disso, essas ferramentas tem sido empregada em estudos espaciais e temporais na detecção de mudanças ambientais, uma vez que o principal interesse é compreender as mudanças ocorridas na paisagem ao longo do tempo. De tal modo, quantificar e qualificar o grau de degradação por meio de suas aplicações tem importância vital em áreas de risco à desertificação.

Cunha *et al.*, (2012) ressaltam que monitoramento de parâmetros biofísicos em uma bacia hidrográfica pode ajudar a estabelecer condições de uso e ocupação sustentáveis. Com o monitoramento, é possível diagnosticar alterações antrópicas e naturais na paisagem, e orientar o estabelecimento de políticas de reversão de um quadro de degradação ambiental.

Os índices de vegetação realçam a contribuição das propriedades da vegetação e permitem estabelecer comparações espaciais e temporais da atividade fotossintética e das variações estruturais do dossel. Na literatura são encontrados mais de cinquenta índices de vegetação, sendo quase todos obtidos de medidas da refletância nas faixas espectrais do vermelho e infravermelho próximo, do espectro eletromagnético (SILVA JUNIOR, 2019).

Para Brandão *et al.*, (2005), embora sejam encontrados inúmeros estudos sobre o tema na literatura, muitos estudos comprovam a eficácia dos dois índices mais comumente usados, que são, a Razão Simples (RS) e o Normalized Difference Vegetation Índice (NDVI). Estes índices baseiam-se em simples combinações das reflectâncias do visível e do infravermelho próximo e através do NDVI pode-se calcular o índice de área foliar (IAF) e a Radiação Fotossinteticamente Ativa (RFA).

Em relação ao NDVI, foi um modelo desenvolvido por Rouse *et al*., (1974) para medir a "vegetação", utilizando imagens do Landsat - MSS (Multispectral Scanner). Para os autores, a folhagem vegetal verde absorve radiação na parte visível do comprimento de onda. As plantas usam energia para a fotossíntese e refletem fortemente na região do infravermelho próximo por causa do inchaço das folhas saudáveis, que é devido à estrutura celular da folha. Então, diferenças de reflectância foram propostas para estas bandas, sendo normalizadas pela soma dos valores. Portanto, para a estimativa do índice foi proposta na Equação 13:

$$\mathrm{NDVI} = \frac{\rho\mathrm{V} - \rho\mathrm{III}}{\rho\mathrm{V} + \rho\mathrm{III}} \qquad \text{(Eq. 13)}$$

Em que: ρV é a reflectância na faixa do infravermelho próximo e ρIII é a reflectância na faixa do vermelho.

O NDVI é expresso em uma escala que varia de -1 a +1. Valores negativos correspondem a corpos de água ou zonas húmidas em que as reflectâncias na região do infravermelho próximo são inferiores às da região do visível. Para outros alvos, o NDVI varia de 0 a 1. Os valores mais altos estão vinculados a copa de vegetação por causa da grande diferença nas refletâncias em ambas as regiões espectrais. Em contraste, valores próximos de zero indicam a falta de vegetação ou vegetação senescente leva a menores valores de reflectância de diferença em ambos os espectros de infravermelho vermelho e próximo (DI PACE *et al.,* 2008).

Segundo Kogan *et al.,* (2012), este índice pode ser usado como um estimador de variações sazonais e interanuais de plantas. Os valores máximo e mínimo do NDVI calculados para um determinado período e localização, sob um cenário extremo de mudanças climáticas, poderia ser usado como um critério para medir a quantidade de recursos do ecossistema, ou seja, o potencial do ecossistema local ou a capacidade de recarga.

O uso do índice para a região semiárida surgiu como alternativa para modelar e monitorar o estágio de degradação desses ambientes. Em 1998, Kazmierczak com base no trabalho de Mouat (1994) sugeriu o uso do NDVI para estudos das áreas degradadas do sertão nordestino, com o desenvolvimento de um algoritmo para indicar à suscetibilidade a desertificação. Barbosa (1998) associou o uso do NDVI com a precipitação no Nordeste para os anos entre 1982 e 1985.

4.2 MATERIAIS E MÉTODOS

A partir da identificação dos períodos críticos climáticos obtidos pelo cálculo do SPI (descrição detalhada no Capítulo 2), com o intuito de analisar os usos do solo e quantificar temporalmente as áreas destinadas à agricultura irrigada, foram selecionadas as imagens TM/LANDSAT – 5 e 8, do visível e infravermelho próximo/médio do sensor OLI para a geração das composições coloridas, com resolução espacial de 30 m.

As imagens do satélite TM/LANDSAT-5 e 8 foram obtidas junto ao *United States Geological Survey* (USGS) através do endereço eletrônico http://earthexplorer.usgs.gov/.

Devido à indisponibilidade de dados para os anos classificados com anomalias pelo SPI, bem como pela predominância de nuvens na área nos períodos chuvosos, foram selecionados apenas os anos de 1988, 1993, 1998, 2006, 2013 e 2018, conforme Tabela 5, onde inclui o detalhamento das cenas necessárias para o recobrimento da área.

Vale ressaltar, que na análise do SPI foram utilizados dados de precipitação referentes aos períodos de 1970 a 2014. Entretanto, devido a estudos realizados na área comprovarem que 2018 foi considerado como um ano extremamente seco, influenciando negativamente na redução das vazões do rio São Francisco e atividades exercidas na bacia, esse ano foi considerado importante para análise do uso do solo.

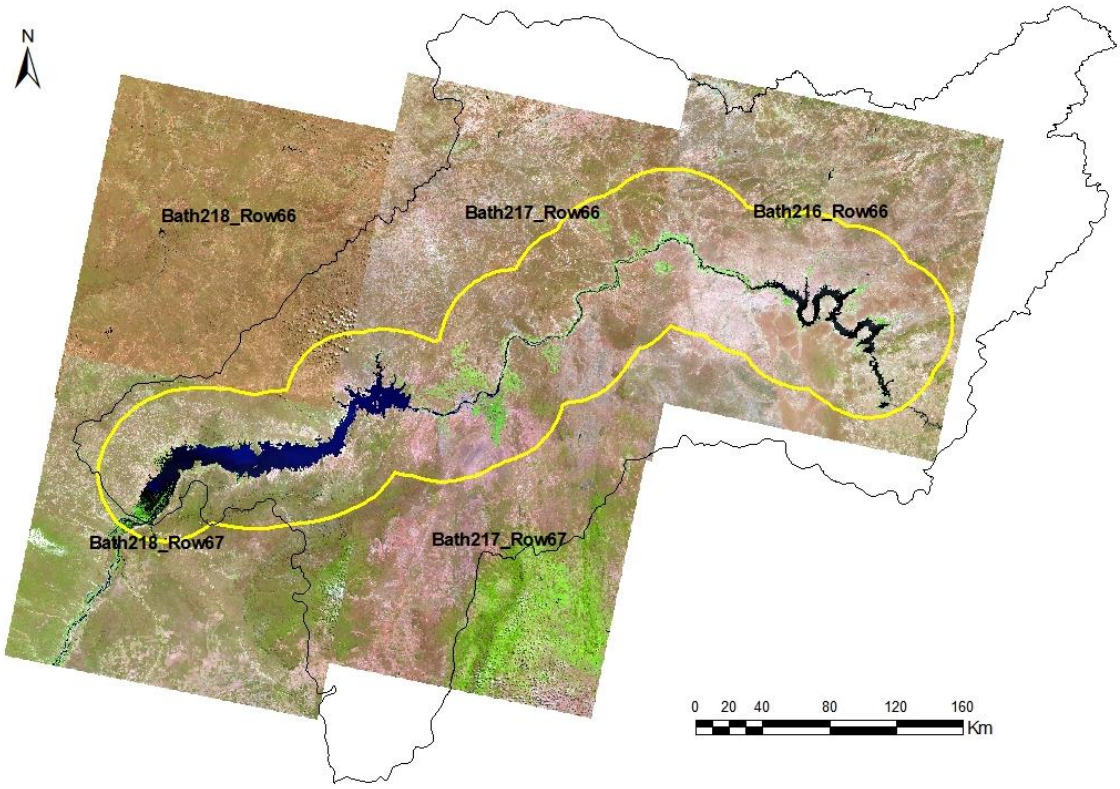
Tabela 1 - Descrição das imagens Landsat utilizadas.

Cenas escolhidas		**Ano**					
		1988	**1993**	**1998**	**2006**	**2013**	**2018**
Órbita	**Ponto**	**Chuvoso**	**Seco**	**Seco**	**Chuvoso**	**Seco**	**Seco**
Path 216	Row 66	X	X	X	X	X	X
Path 217	Row 66	X	X	X	X	X	X
Path 217	Row 67	X	X	X	X	X	X
Path 218	Row 66	X	X	X	X	X	X
Path 218	Row 67	X	X	X	X	X	X

	Satélite Landsat 5
	Satélite Landsat 8
X	Cenas escolhidas

A partir dos resultados obtidos com a caracterização da demanda hídrica para agricultura irrigada no trecho principal do SMSF (descrição detalhada no Cap. 3), foi estabelecido um raio de 45 km no entorno desse trecho. Após a delimitação da área de estudo, foram selecionadas as cenas necessárias para o seu recobrimento e posteriormente, realizados mosaicos para cada ano selecionado. A Figura 1 ilustra um exemplo com a delimitação do raio e a composição das cenas do satélite Landsat 8 para a área de estudo.

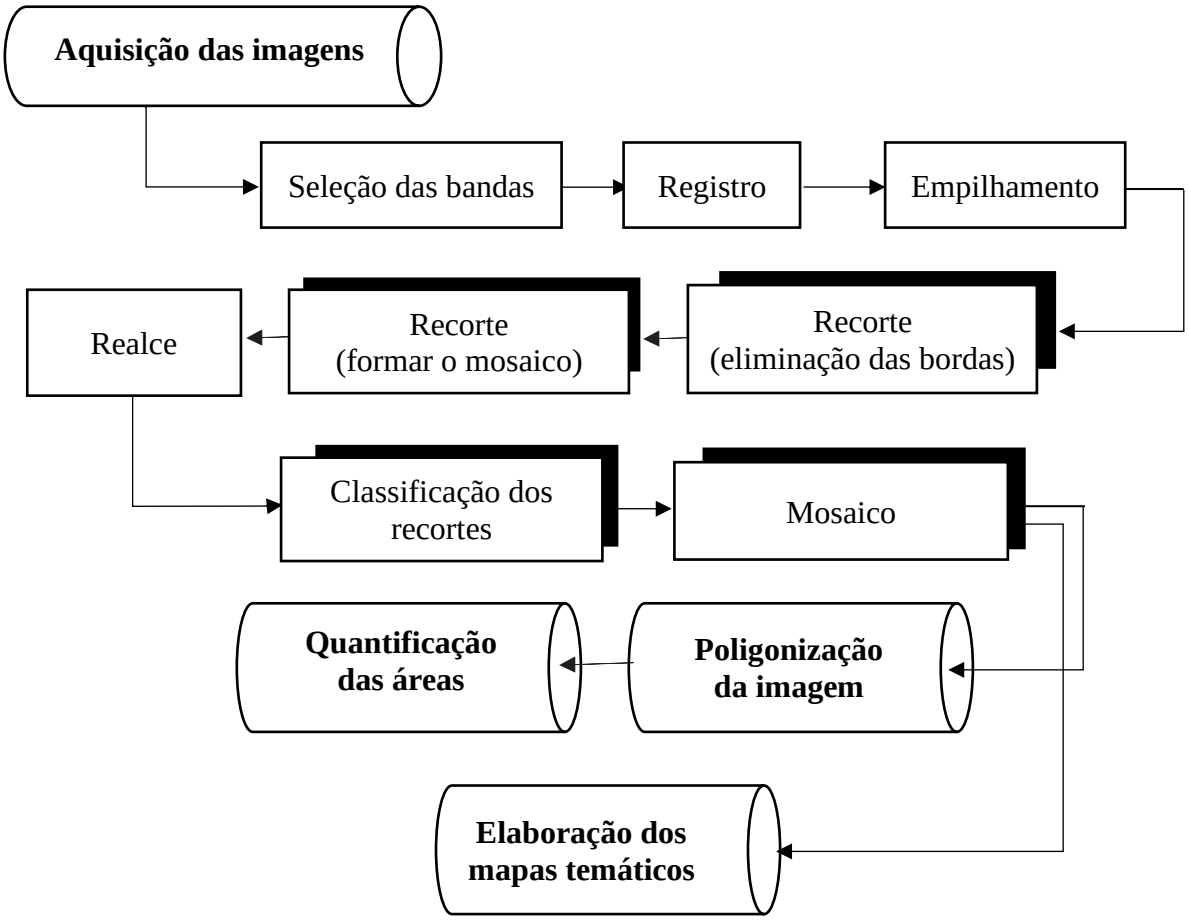
Figura 1 - Composição das cenas para o Submédio da bacia do São Francisco.



Para o tratamento digital das imagens foram utilizados alguns *softwares* de geoprocessamento. Neste sentido, o registro, o recorte, o mosaico, a poligonização e a confecção dos mapas foram realizadas no software ArcMap 10.4.1, fornecido pelo Instituto de Tecnologia de Pernambuco (ITEP). Já o empilhamento e a classificação das imagens foram feitos no QGis, que é um software gratuito, e está disponível no site (https://qgis.org/en/site/forusers/download.html). A sequência das etapas está detalhada na Figura 2.

.

Figura 2 - Fluxograma metodológico para classificação e quantificação dos usos do solo.



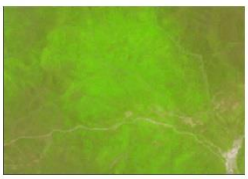
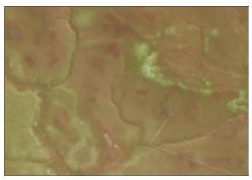
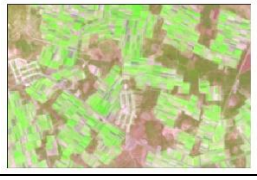
O melhoramento da qualidade visual foi feito a partir da técnica de realce por histogramas, ferramenta disponível no Software SPRING 5.2.7, que é um *software* brasileiro de Sistemas de Informações Geográficas (SIG), desenvolvido pelo Instituto Nacional de Pesquisas Espaciais (INPE), podendo ser obtido gratuitamente pelo endereço eletrônico: http://www.dpi.inpe.br/spring/portugues/download.php.

4.2.1 Método para a classificação do uso do solo

Neste estudo foi utilizado o método de classificação por Máxima Verossimilhança (MaxVer) que consistiu na obtenção das amostras, cujos tipos de cobertura serão identificados, as chamadas áreas de treinamento. A partir do ajuste de uma função de densidade de probabilidade foi possível quantificar a probabilidade de um *pixel* pertencer a uma determinada classe, atribuindo-o à classe mais provável. Neste sentido, para o melhor desempenho dessa técnica foram obtidas amostras em quantidades representativas para aumentar o grau de precisão da classificação.

Com base no manual de classificação do uso da terra do IBGE (2013), foram gerados mapas de uso do solo com agrupamento de cinco classes: água, Caatinga densa, Caatinga rala, áreas antrópicas não agrícolas e áreas antrópicas agrícolas. Quadro 4.

Quadro 4 - Descrição das classes de uso do solo utilizadas no mapeamento.

Classes / Nomenclatura		**Amostra**	**Definição**
Água			Incluem todas as classes de águas interiores e costeiras, como cursos de água e canais
Áreas de vegetação natural	Caatinga densa		Compreende um conjunto de estruturas florestais e campestres
	Caatinga rala		
Áreas não antrópicas agrícolas			Estão associados todos os tipos de uso da terra de natureza não agrícola, florestal ou água
Áreas antrópicas agrícolas			Inclui todas as terras cultivadas

4.2.2 Avaliação de desempenho dos métodos de classificação

Após a classificação das imagens, foram elaboradas matrizes de confusão, com o intuito de identificar os erros cometidos pela classificação supervisionada. Neste sentido, para a avaliação o desempenho do método de classificação foi utilizado o índice Kappa (K) como uma medida de precisão associada à matriz de erro. Esse índice considera a proporção de amostras corretamente classificadas correspondentes à razão entre a soma da diagonal principal da matriz de erros (amostras corretamente classificadas) e a soma de todos os elementos dessa matriz (número total da amostra), tendo como referência o número total de classes (ROSENFIELD *et al.*, 1986), conforme a Equação 1.

$$k = \frac{n\sum_{i=1}^{k} n_{ii} - \sum_{i=1}^{k} n_{i+}n_{+i}}{n^2 - \sum_{i=1}^{k} n_{i+}n_{+i}} \quad \text{(Eq. 1)}$$

Em que K é o índice de concordância Kappa; r = número de linhas na matriz; n_{ii} = número de observações na linha[i] e coluna [i]; ni+ e n+i = totais marginais da linha[i] e coluna[i], respectivamente; e N é o número total de observações. O grau de desempenho dos dados foi avaliado conforme o (Quadro 5).

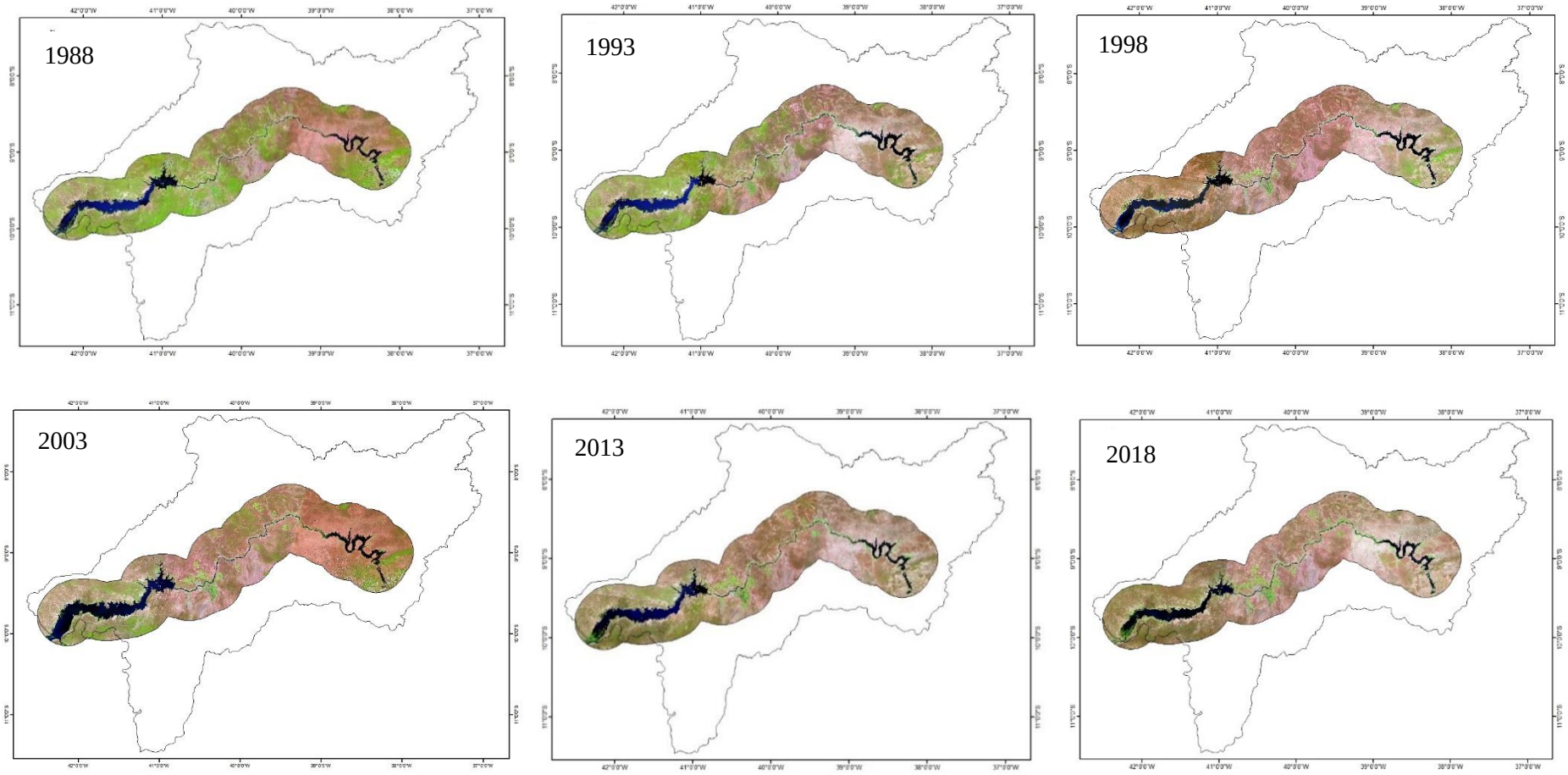
Quadro 5. Agrupamento qualitativo do coeficiente Kappa.

Índice Kappa	**Desempenho**
≤ 0	Péssimo
0 < k ≤ 0,2	Ruim
0,2 < k ≤ 0,4	Razoável
0,4 < k ≤ 0,6	Bom
0,6 < k ≤ 0,8	Muito Bom
0,8 < k ≤ 1,0	Excelente

Fonte: INPE, 2017

Os mapas resultantes das classificações tiveram as suas classes quantificadas por meio da ferramenta Dzetsaka, que é um o *plugin* do *software* QGis. A Figura 3, apresenta os mosaicos que foram utilizados para classificação do uso e ocupação do solo.

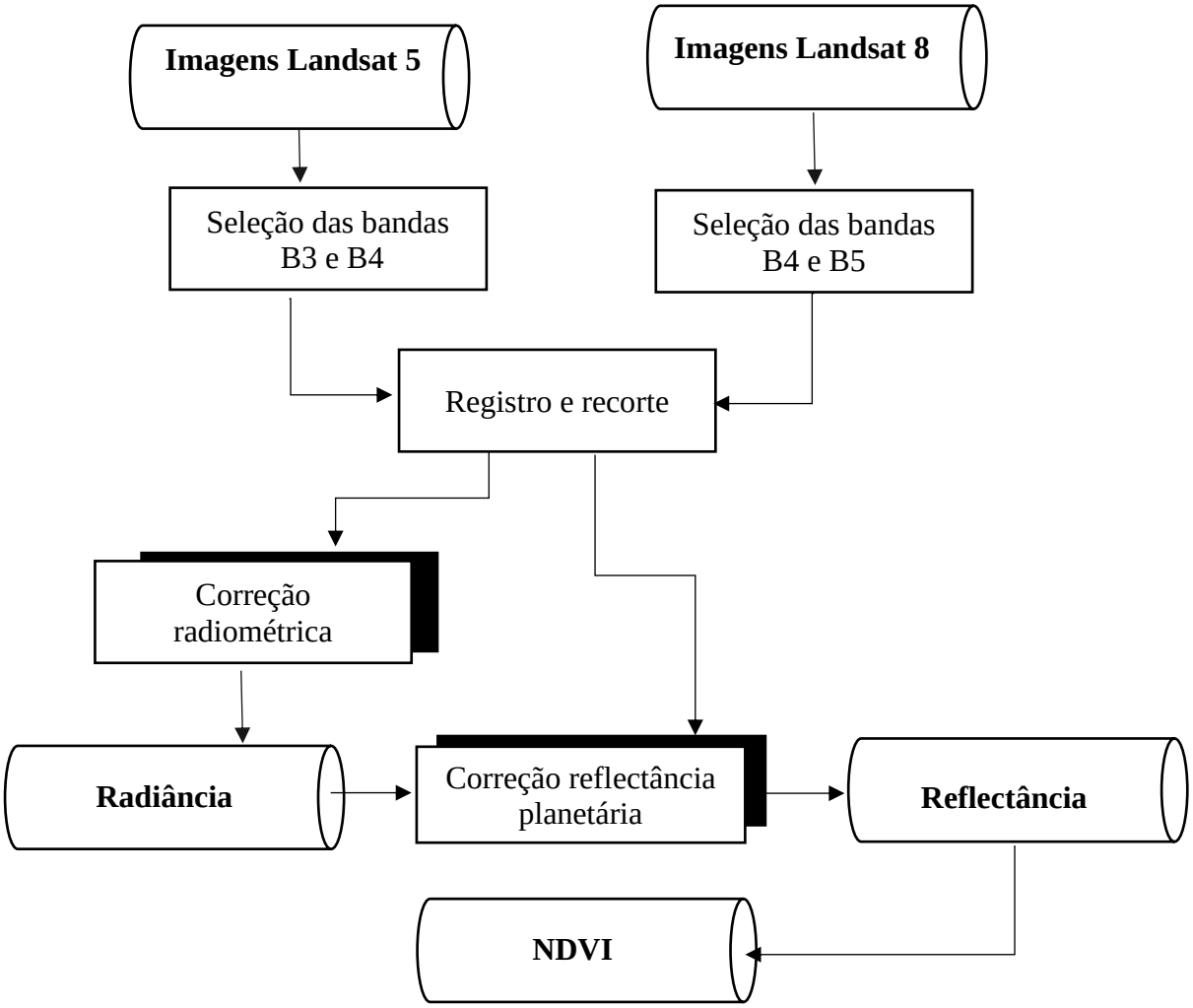
Figura 3 - Mosaicos utilizados para classificação do uso e ocupação do solo.



4.2.3 Obtenção do Índice de Vegetação por Diferença Normalizada (NDVI)

Na aplicabilidade do Índice de Vegetação por Diferença Normalizada (NDVI) , foram utilizadas as bandas espectrais B4 e B3 para as imagens dos satélites Landsat 5, sensor TM e as bandas espectrais B5 e B4 para o Landsat 8, sensor OLI, pois estas representam o intervalo do infravermelho próximo e do vermelho, respectivamente. A Figura 4 apresenta um fluxograma geral com as etapas do processamento dos dados e os resultados obtidos. Todas as etapas foram desenvolvidas através da calculadora raster do *software* QGis 3.6.3.

Figura 4 - Fluxograma metodológico para obtenção do NDVI.



Conforme o fluxograma apresentado na Figura 53, a partir das imagens Landsat 5 e 8, foram selecionadas as cenas necessárias para a obtenção das estimativas do índice de vegetação para os anos estabelecidos, conforme apresentados nas Tabelas 2 e 3.

Tabela 2 - Cenas do Satélite Landsat 5 utilizadas para obtenção do NDVI.

Carta	**Bandas**	**Bath_216 Row_66**	**Bath_217 Row_66**	**Bath_217 Row_66**	**Bath_218 Row_66**	**Bath_218 Row_67**
Radiância	B3	x x x x	x x x x	x x x x	x x x x	x x x x
	B4	x x x x	x x x x	x x x x	x x x x	x x x x
Reflectância	B3	x x x x	x x x x	x x x x	x x x x	x x x x
	B4	x x x x	x x x x	x x x x	x x x x	x x x x
NDVI		x x x x	x x x x	x x x x	x x x x	x x x x
TOTAL		100 cenas				

Tabela 3 - Cenas do Satélite Landsat 8 utilizadas para obtenção do NDVI.

Carta	**Bandas**	**Bath_216 Row_66**	**Bath_217 Row_66**	**Bath_217 Row_66**	**Bath_218 Row_66**	**Bath_218 Row_67**
Reflectância	B4	x x	x x	x x	x x	x x
	B5	x x	x x	x x	x x	x x
NDVI		x x	x x	x x	x x	x x
TOTAL		30 cenas				

Legenda

Anos	1988	1993	1998	2006	2013	2018
x = quantidades de bandas trabalhadas						

Após a seleção das cenas, foram realizados o registro e recorte das bandas, e posteriormente calculadas a radiância e reflectância para a obteção do NDVI. Essas etapas serão detalhadas a seguir.

4.2.4 Calibração radiométrica para imagens Lansad 5

A calibração radiométrica consiste numa conversão do número digital (ND) para valores de reflectância aparente. Essa transformação foi aplicada apenas para as imagens orbitais do satélite LandSAT 5, sensor TM e foi calculada utilizando-se as relações propostas por Markham & Barker (1987), através das seguintes Equação 2.

$$L\lambda i = ai + \frac{(bi - ai)}{255} ND \qquad \text{(Eq. 2)}$$

Em que:

Lλ é a radiância espectral de cada banda (Wm-2 sr-1 µm-1);

"a" e "b" são as radiâncias espectrais mínimas e máximas (Wm^{-2} sr-1 μm^{-1});

ND é o número digital do *pixel* (número inteiro de 0 a 255), pois a resolução radiométrica para as imagens de satélite LandSAT 5 são 8 bits.

Os Coeficientes de calibração, "a" e "b", que correspondem aos valores utilizados para a radiância espectral mínima e máxima respectivamente, foram obtidos pela adaptação proposta por Chander *et. al*. 2009, conforme destacado no Quadro 5.

Quadro 6. Coeficientes de calibração para as bandas espectrais do satélite Landsat 5.

Bandas	**Comprimento de onda (µm)**	**Coeficientes de calibração (Wm-2 sr-1 µm-1)**				**Irradiância Espectral no Topo da Atmosfera – Kλi (Wm^{-2} μm^{-1})**
		a desde 1994	b 01/03/1994 a 04/05/2003	b 05/05/2003 a 01/04/2007	b depois de 02/04/2007	
1 (azul)	0,452 -0,518	-1,52	152,1	193	169	1983
2 (verde)	0,528 - 0,609	-2,84	296,81	365	333	1796
3 (vermelho)	4 (vermelho)	-1,17	204,3	264	264	1536
4 (IV-próximo)	5 (IV-próximo)	-1,51	206,2	221	221	1031
5 (IV-médio)	1,567 - 1,784	-0,37	27,19	30,2	30,2	220
6 (IV-termal)	10,450 - 2,420	1,2378	15,303	15,303	15,303	-
7 (IV-médio)	2,097 - 2,349	-0,15	14,38	16,5	16,5	84,44

Fonte: Adaptado de Ferreira 2018.

4.2.5 Reflectância planetária para imagens Landsat 5

A radiância monocromática, resultado da conversão proposta acima, foi utilizada na Equação 16 proposta por Bastiaanssen (1995), e o resultado correspondeu a uma nova imagem de reflectância monocromática. Segundo Pereira *et. al*. (1996), com o valor da reflectância é possível analisar e monitorar o comportamento de uma determinada cobertura vegetal a partir das respostas espectrais fornecidas devido às variações da estrutura vegetal (Equação 3).

$$\rho\lambda i = \frac{\pi . L\lambda i}{k\lambda i . \cos(Z) . dr} \qquad \text{(Eq. 3)}$$

Onde:

ρλi é a reflectância monocromática de cada banda (Wm^{-2} sr-1 μm^{-1});

Lλ é a radiância espectral monocromática (Wm^{-2} sr-1 μm^{-1});

kʎi é a irradiância solar espectral de cada banda no topo da atmosfera (Wm^{-2} sr^{-1} μm^{-1});

Z é o ângulo zenital solar no momento da aquisição e

dr é o inverso do quadrado distância relativa Terra-Sol em unidades astronômicas.

A determinação do inverso do quadrado da distância relativa Terra-Sol (dr) se deu a partir da Equação 4 proposta por Duffie & Beckman (1980).

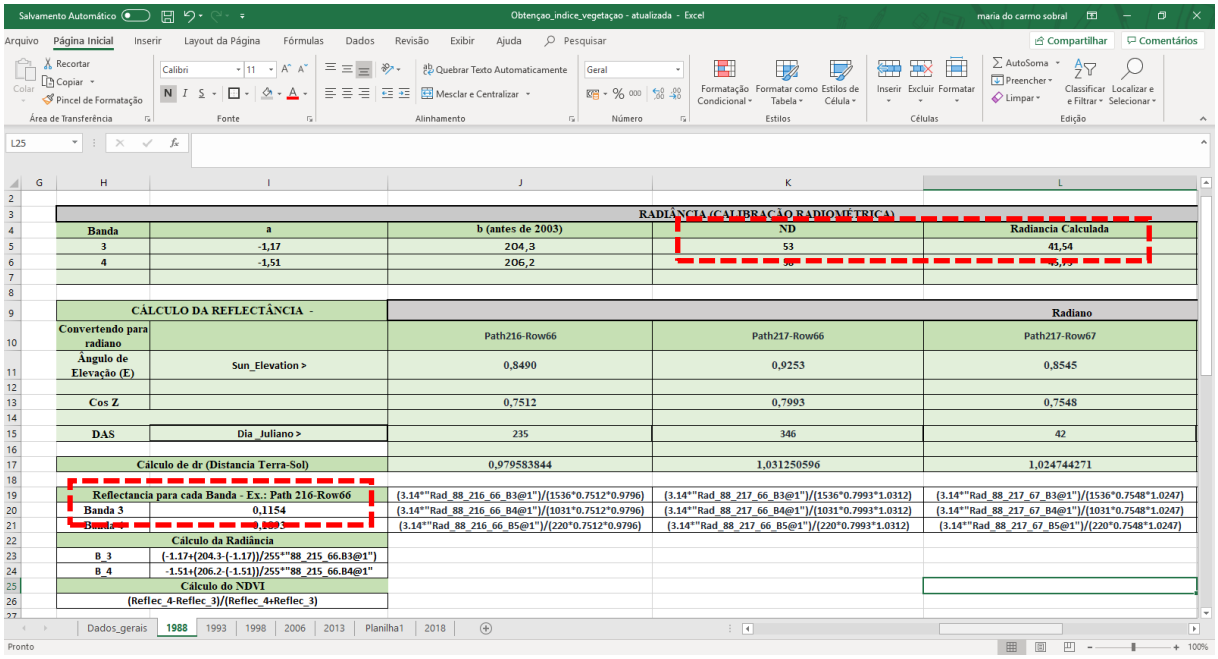
$$dr = 1 + 0.033 . \cos\left(\frac{DOY . 2\pi}{365}\right) \qquad \text{(Eq. 4)}$$

Onde: o DOY corresponde ao dia juliano do ano e o ângulo é dado em radianos.

O ângulo de elevação do Sol (E = SUN_ELEVATION) para TM Landsat 5, foi obtido através no arquivo de metadados de cada imagem. A Figura 5, corresponde à planilha que foi elaborada para correção radiométrica das imagens Landsat 5.

Para verificar a consistência dos dados, foram comparados os valores dos *pixels* obtidos nas imagens (Figura 5) com valores obtidos a partir radiância e reflectância realizados em planilha do excel citados na Figura 6. O mesmo procedimento foi utilizado para as imagens Landsat 8, conforme as Figuras 7 e 8.

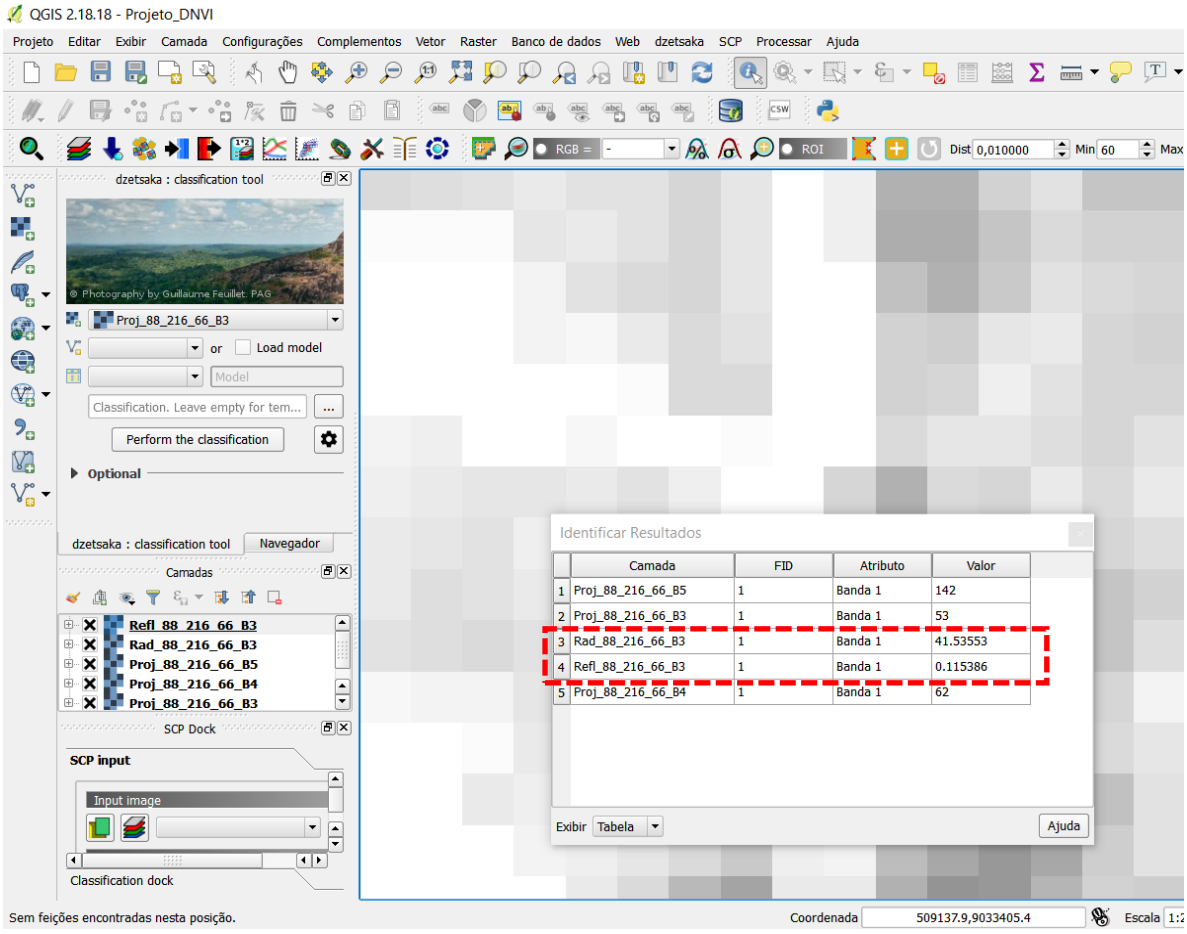
Figura 5 - Planilha elaborada para correção radiométrica das imagens Landsat 5.



RADIÂNCIA (CALIBRAÇÃO RADIOMÉTRICA)				
Banda	a	b (antes de 2003)	ND	Radiancia Calculada
3	-1,17	204,3	53	41,54
4	-1,51	206,2	62	45,73

CÁLCULO DA REFLECTÂNCIA -				Radiano
Convertendo para radiano		Path216-Row66	Path217-Row66	Path217-Row67
Ângulo de Elevação (E)	Sun_Elevation >	0,8490	0,9253	0,8545
Cos Z		0,7512	0,7993	0,7548
DAS	Dia_Juliano >	235	346	42
Cálculo de dr (Distancia Terra-Sol)		0,979583844	1,031250596	1,024744271
Reflectancia para cada Banda - Ex.: Path 216-Row66		(3.14*"Rad_88_216_66_B3@1")/(1536*0.7512*0.9796)	(3.14*"Rad_88_217_66_B3@1")/(1536*0.7993*1.0312)	(3.14*"Rad_88_217_67_B3@1")/(1536*0.7548*1.0247)
Banda 3	0,1154	(3.14*"Rad_88_216_66_B4@1")/(1031*0.7512*0.9796)	(3.14*"Rad_88_217_66_B4@1")/(1031*0.7993*1.0312)	(3.14*"Rad_88_217_67_B4@1")/(1031*0.7548*1.0247)
Banda 4	0,1099	(3.14*"Rad_88_216_66_B5@1")/(220*0.7512*0.9796)	(3.14*"Rad_88_217_66_B5@1")/(220*0.7993*1.0312)	(3.14*"Rad_88_217_67_B5@1")/(220*0.7548*1.0247)
Cálculo da Radiância				
B_3	(-1.17+(204.3-(-1.17))/255*"88_215_66.B3@1")			
B_4	-1.51+(206.2-(-1.51))/255*"88_215_66.B4@1"			
Cálculo do NDVI				
(Reflec_4-Reflec_3)/(Reflec_4+Reflec_3)				

Figura 6 - Análise da consistência das imagens Landsat 5



A imagem de reflectância monocromático resultado deste processo apresenta valores físicos que serão utilizados na determinação do índice de vegetação NDVI proposto por Rouse *et. al* (1973) conforme observado na Equação 5.

$$NDVI = \frac{\rho V - \rho III}{\rho V + \rho III} \quad \text{(Eq. 5)}$$

Onde:
ρV é o valor da reflectância na faixa do infravermelho próximo e
ρIII é o valor da reflectância na faixa do vermelho da região espectral do visível.

4.2.6 Obtenção da reflectância planetária para imagens Landsat 8

A correção radiômetrica não é necessária para as imagens Landsat 8, porque no arquivo metadados de cada imagem, são disponibilizados os valores da radiância para as respectivas bandas, podendo ser inseridas no cálculo da reflectância.

A conversão das imagens em Número Digitais (ND) para reflectância planetária sem correção é dada pela Equação 6.

$$\rho\boldsymbol{\lambda}'_i = M\rho.\ Qcal + A\rho \quad \text{(Eq. 6)}$$

Em que,

$\rho\boldsymbol{\lambda}'_i$ é a reflectância planetária no topo da atmosfera sem correção do ângulo solar;

Mρ é o fator multiplicativo reescalonado da reflectância para a banda específica (REFLECTANCE_MULT_ BAND_i), onde i é número da banda.

Qcal é o Número Digital (ND) do *pixel*; e

Aρ é o fator aditivo reescalonado da reflectância para a banda específica (REFLECTANCE_ADD_ BAND_i), onde i é número da banda.

Os valores de Mρ e Aρ estão disponibilizados na Tabela 4.

Tabela 4 -Valores de reflectância para as bandas 4 e 5

REFLECTANCE_MULT _BAND = Mρ	**Valor**	**REFLECTANCE_ ADD_BAND = Aρ**	**Valor**
REFLECTANCE_MULT_ BAND_4	0,00002	REFLECTANCE_A DD_BAND_4	-0,1
REFLECTANCE_MULT_ BAND_5	0,00002	REFLECTANCE_A DD_BAND_5	-0,1

Fonte: USGS, 2019

Segundo estudos realizados por (USGS, 2016; RUHOFF *et al.*, 2015; SILVA *et al.*, 2016), é necessário corrigir a reflectância de acordo com o ângulo zenital. Neste sentido, a reflectância planetária corrigida foi obtida pela Equação 7.

$$\rho\lambda \mathrm{i} = \frac{\rho\lambda'_i}{Sen(\theta_{SE}) * (\frac{1}{d^2})} \qquad \text{(Eq. 7)}$$

Em que:

$\rho_{\lambda i}$ é a reflectância exoatmosférica ou do topo da atmosfera;

θ_{SE} é o ângulo de elevação solar local equivalente ao valor SUN_ELEVATION; e

d é distância Terra-Sol; presente no arquivo metadados.

Figura 7 - Planilha elaborada para calcular a reflectância das imagens Landsat 8.

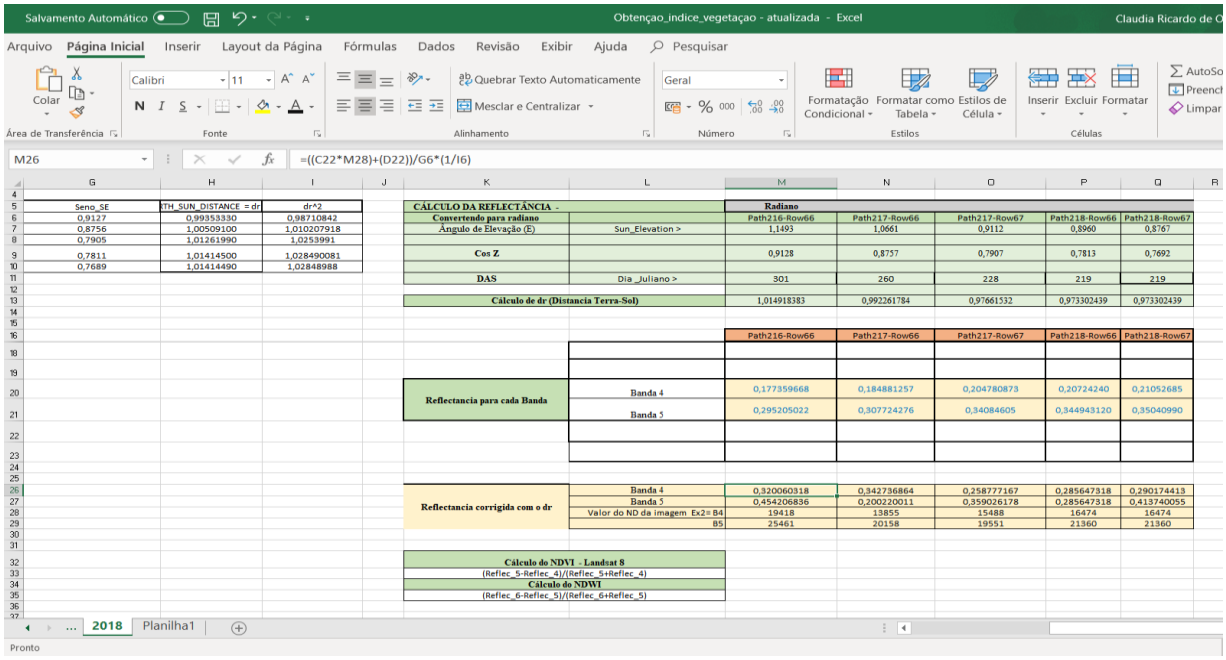
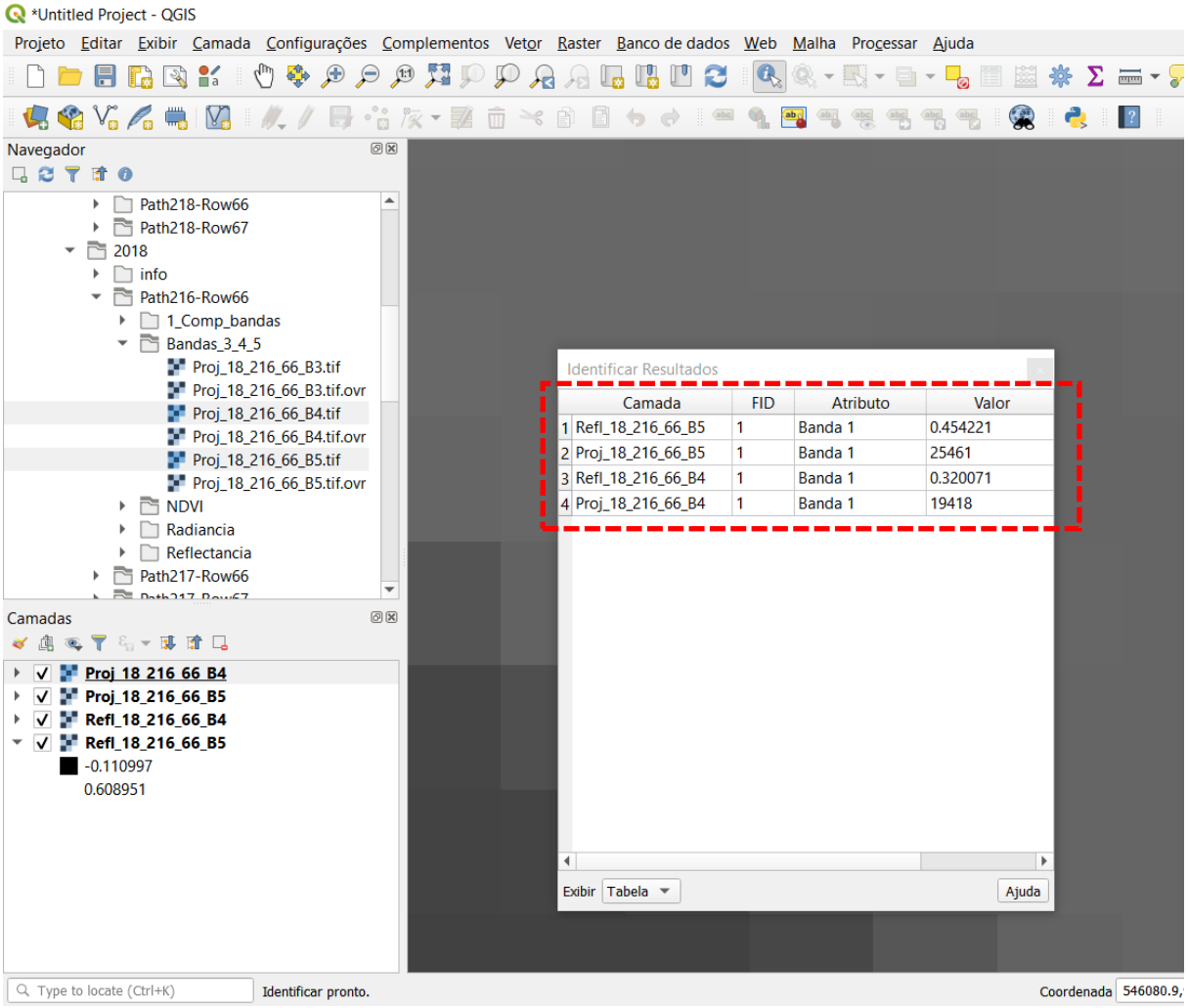


Figura 8 - Análise da consistência das imagens Landsat 8.



Após a obtenção das reflectâncias para as imagens Landsat 8, foram elaboradas os NDVIs para os anos de 2013 e 2018, por meio da Equação 21.

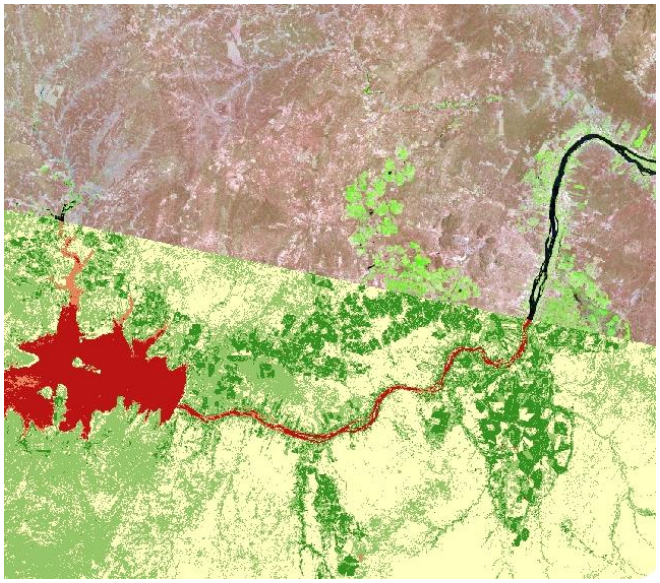
$$NDVI = \frac{\rho IV - \rho V}{\rho IV + \rho V} \qquad \text{(Eq. 8)}$$

Onde:
ρIV é o valor da reflectância na faixa do infravermelho próximo e

ρV é o valor da reflectância na faixa do vermelho da região espectral do visível.

Os padrões de determinação do NDVI podem ser visualizados na Figura 9.

Figura 9 - Padrões de determinação do NDVI.



4.3 RESULTADOS E DISCUSSÃO

Com intuito de subsidiar a avaliação espaço temporal do uso do solo, foi calculado o Índice de Vegetação por Diferença Normalizada (NDVI) a partir das imagens dos satélites Landsat 5 e 8 para o período estudado. Neste sentido, a variação temporal e espacial do NDVI permitiu identificar as áreas com o vigor vegetativo mais acentuado, assim como as áreas, mais suscetíveis as atividades antrópicas.

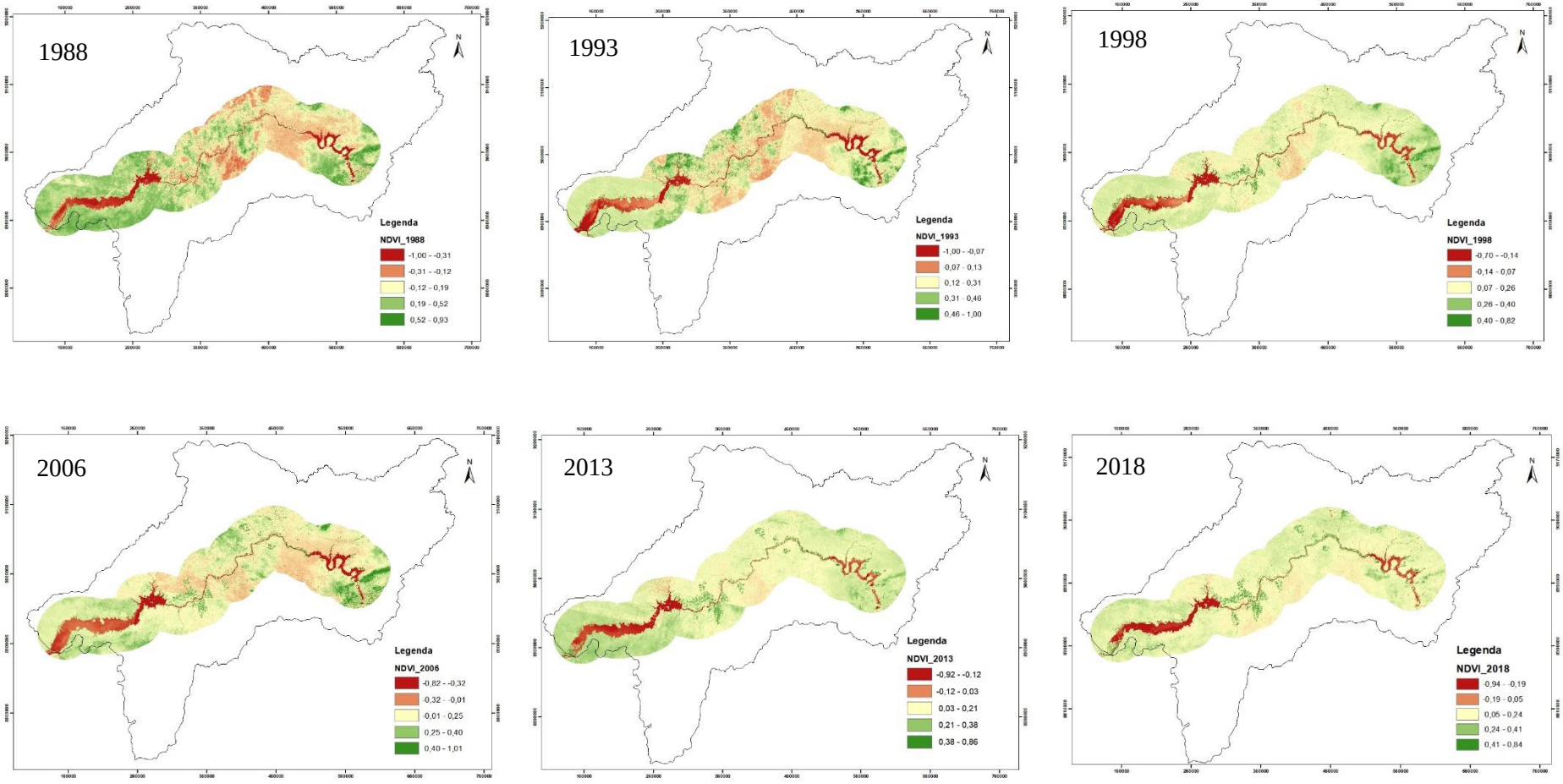
De acordo com classificação do NDVI, os tons em vermelho expressam baixos índices de vegetação e estão associados aos corpos de água, os tons em vermelho claro, correspondem aos alvos urbanos como área construída ou solo exposto, já os tons em amarelo podem pertencer às áreas de baixa atividade antrópica ou pouca cobertura vegetal (Caatinga rala), e os tons em verde claro a escuro representam altos índices de vegetação (Figura 10).

Fonseca (2017), analisando a dinâmica espectro-temporal da cobertura vegetal no município de Petrolina e suas possíveis relações com as mudanças em decorrência do processo agrícola existente na região, no período de 2003, 2011 e 2016, obteve boas estimativas do NDVI para vegetação Caatinga a partir das imagens Landsat.

Conforme a análise temporal, em 1988, as áreas verdes existentes na bacia eram predominantes, indicando forte presença da vegetação nativa. Os maiores valores obtidos pelo NDVI foram entre (0,93 – 0,52) e estão situados nas proximidades do reservatório de Sobradinho e a jusante do reservatório de Itaparica.

Figura 10 - Análise espaço-temporal do comportamento do NDVI no trecho SMSF.

.



Outra observação importante sobre esse ano é que, segundo a classificação do SPI (descrição detalhada no Capítulo 2), ele foi classificado como sendo chuvoso e provavelmente os eventos de precipitação que ocorreram na área, podem ter interferido na umidade do solo e consequentemente contribuíram para realçar o teor vegetativo da Caatinga.

Considerando o período analisado, pode-se afirmar que a variabilidade observada entre as imagens foi ocasionada por variações climáticas sazonais. O aumento das deficiências hídricas no solo durante o período seco diminuiu a reflectância da vegetação verde, visto que, nos períodos de restrição hídrica a Caatinga tende a perder suas folhas. No ano de 1993, por exemplo, classificado como extremamente seco, houve uma redução do teor vegetativo, principalmente nas áreas a jusante do reservatório de Sobradinho.

Já em 1998, apesar de ter sido um ano seco, nas áreas associadas aos alvos urbanos como área construída ou solo exposto, foram parcialmente substituídas pelos tons em amarelo, sendo associados à baixa atividade antrópica ou pouca cobertura vegetal. Essa variação na resposta espectral dos alvos, pode ter sido influenciada por algum evento chuvoso, que ocorreu anteriormente a data de aquisição da imagem.

Em relação a 2006, classificado como ano chuvoso, não houve mudanças significativas no teor vegetativo, quando comparada aos demais anos subsequentes. Neste sentido, foi observado que os menores valores de NDVI (-1,0 e -0,94) estão situados nas margens a montante do reservatório de Itaparica e em algumas áreas na porção central da bacia, representadas pela presença de solo exposto, pequenos aglomerados urbanos ou mesmo áreas cobertas pela vegetação nativa, possivelmente caducifólias ralas que não se mantêm verde na estação seca.

Em um estudo temporal realizado por Oliveira (2013), sobre gestão do uso e ocupação do solo na zona de amortecimento da Reserva Biológica (Rebio) de Saltinho, em Pernambuco, a partir da análise de índices de vegetação, o autor verificou uma redução da cobertura vegetal no intervalo de 14 anos, destacando que as áreas de solo exposto tiveram um amplo crescimento na borda da Rebio. Segundo o autor, a redução ainda foi observada em áreas legalmente protegidas pelo Código Florestal, a exemplo, da mata ciliar em torno dos rios e os topos de colina com fragmentos de vegetação.

Os resultados encontrados nesta pesquisa foram condizentes com os valores encontrados na literatura para áreas de Caatinga (BEZERRA et al., 2014; SANTOS *et al*., 2014; e Silva, 2014). Além desses autores, destacam–se Albuquerque et al., (2014) em suas análises sobre o comportamento do NDVI e NDWI sob diferentes intensidades pluviométricas em Sousa–PB,

onde constataram que o NDVI apresentou valores variando entre 0,01 a 0,29 em áreas de solo exposto e vegetação esparsa; enquanto os intervalos entre 0,3 e 0,5 representam vegetação menos densa; e os maiores que 0,5 indicam que a vegetação apresenta um bom estado fenológico, sendo a vegetação densa representada pelo NDVI superior a 0,7.

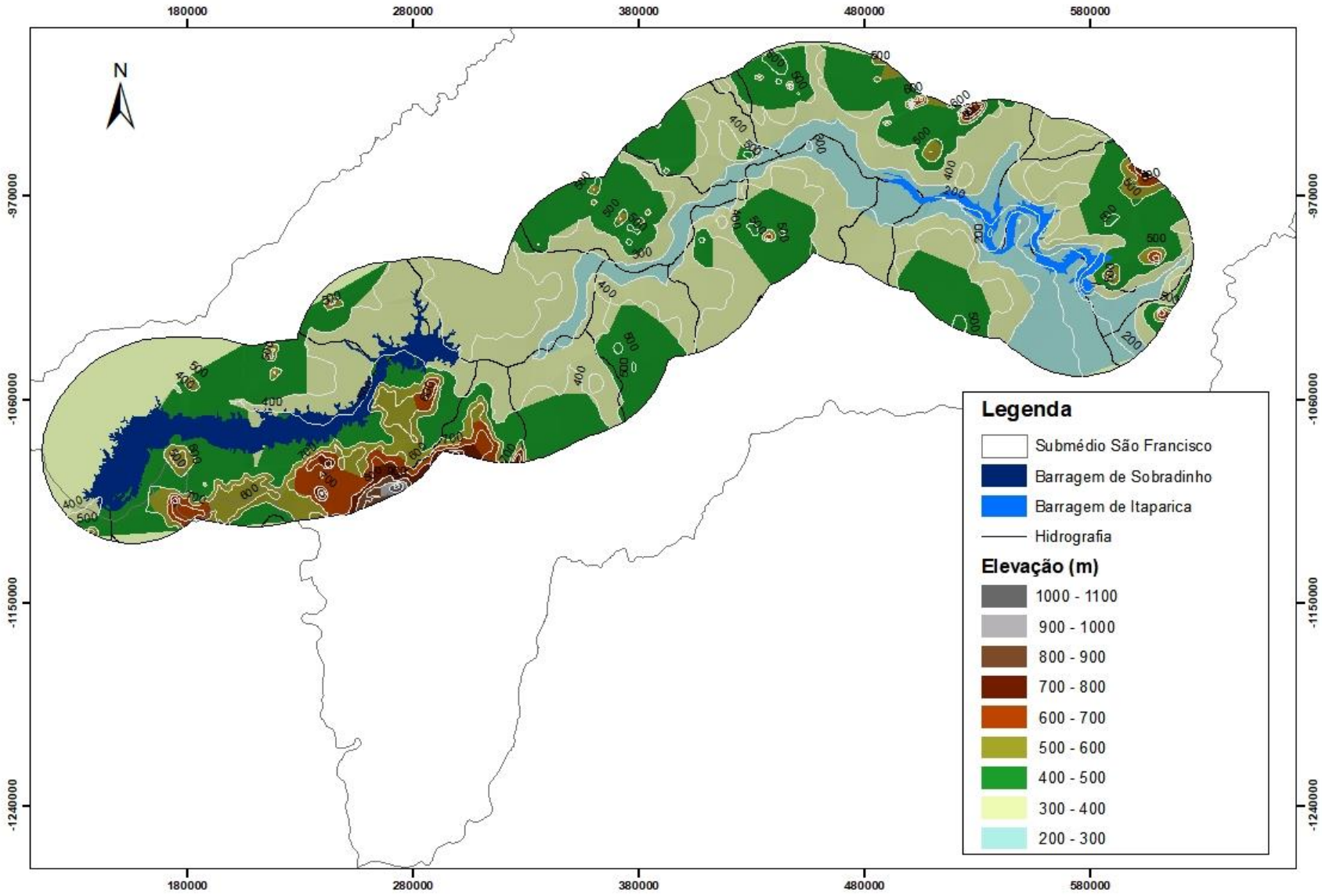
Ferreira (2016) e Oliveira Junior (2016) observaram a alta variabilidade apresentada pelo NDVI ao aplicarem este índice em vegetação de Caatinga entre as estações seca e chuvosa em uma microbacia hidrográfica no município de Portalegre/RN. Ferreira (2016) observou que o NDVI sofreu acréscimo de aproximadamente 68,46% da estação seca para a chuvosa. Já Oliveira Junior (2016) relatou valores de acréscimo de aproximadamente 56% entre a estação seca e chuvosa, evidenciando a alta variação no percentual de cobertura da vegetação de Caatinga, decorrente da mudança no regime de chuvas e variação fenológica da vegetação.

Rosendo (2005), enfatiza que na região espectral do infravermelho próximo (banda TM4), uma vegetação verde e sadia é caracterizada por alta refletância, alta transmitância e baixa absorbância quando comparada com a região do visível (banda TM3), o que reforça a explicação sobre os altos valores para os pixels nas imagens-índice do período úmido. Já Kazmierczac 1993, citado por Maldonado (1999), observou para condição de clima semiárido, que a banda TM4 responde rapidamente ao começo da época úmida.

Rêgo et al., (2012) analisaram comparativamente os índices de vegetação NDVI e SAVI em São Domingos do Cariri–PB, identificaram um crescimento de áreas com nível de degradação muito grave na região norte do município onde puderam observar a intensificação do processo de desertificação no decorrer dos anos devido alguns agentes como grandes períodos de estiagem e das atividades humanas.

Além dos aspectos climáticos, também devem ser considerados os fatores de relevo como determinantes na variação do NDVI. Segundo estudos elaborados por Oliveira (2018), nos locais de altitude superior a 600 m em áreas de relevo plano, são encontrados solos mais desenvolvidos e profundos, com boa capacidade de armazenamento de água. Ademais, existência de nascentes perenes nesses locais também contribuem para a manutenção ecológica de ambientes mais úmidos e influenciam diretamente na conservação da folhagem verde. Nesse sentido, na área de estudo, onde as altitudes foram superiores à 600 m, foram obtidos os melhores valores de NDVI, e constatado que a vegetação nativa esteve mais preservada. A Figura 11, mostra o perfil altimétrico da área de estudo.

Figura 11 - Mapa de elevação da área de estudo (m).



4.3.1 Análise espaço temporal do uso e ocupação do solo

A análise espaço-temporal do uso e ocupação do solo entre o período de 1988 e 2018, através da classificação supervisionada das imagens Landsat 5 e 8, permitiu acompanhar a evolução dos padrões de organização do espaço no trecho principal do Submédio São Francisco. A Tabela 5, exibe um levantamento quantitativo das classes de uso do solo para a área estudada. e a Figura 12 apresenta os mapas temáticos obtidos pela classificação.

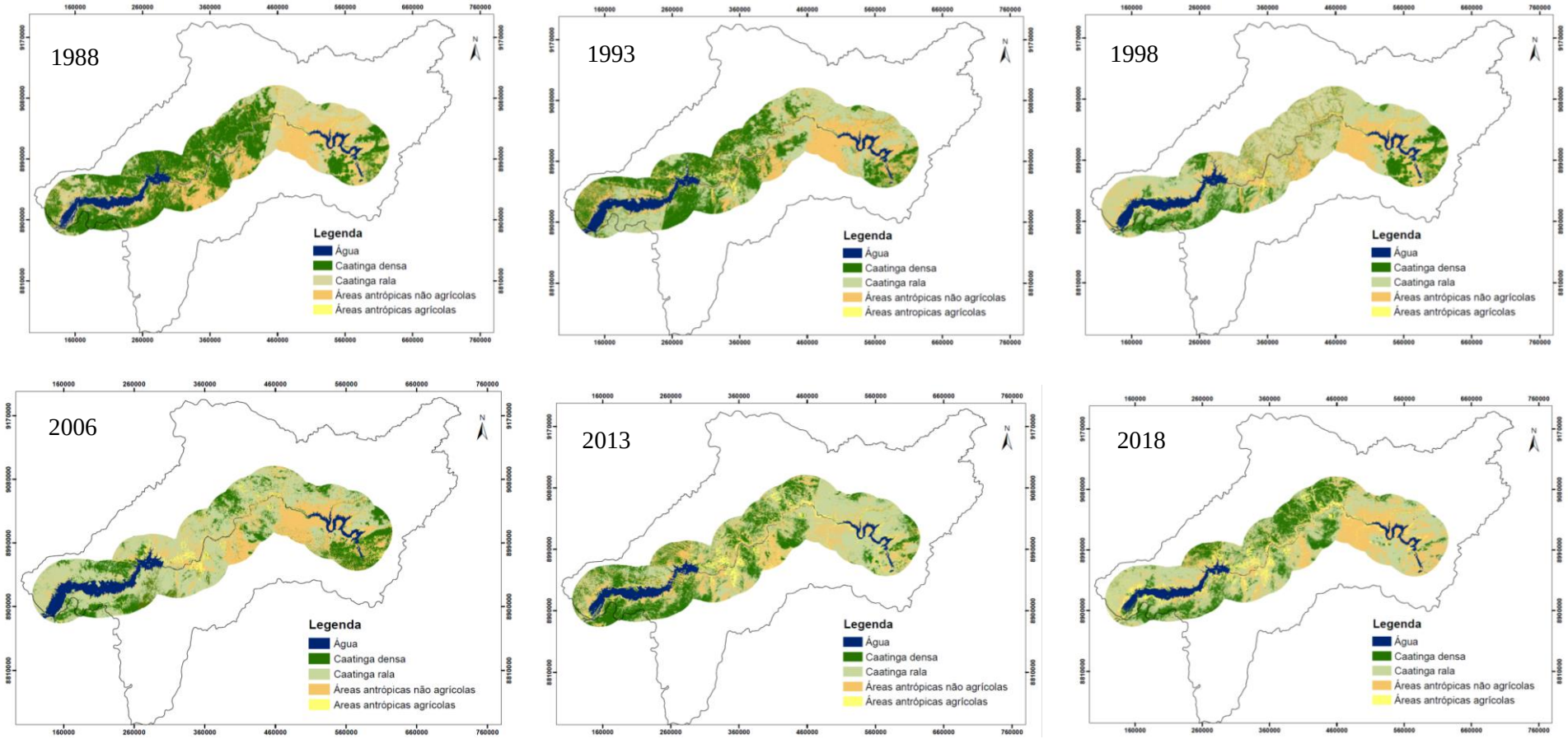
Tabela 5 - Levantamento quantitativo do uso do solo nos anos de eventos críticos.

Classificação	**Área (ha)**					
	1988	**1993**	**1998**	**2006**	**2013**	**2018**
Água	348.546	397.171	357.879	405.480	319.526	296.751
Caatinga densa	2.022.501	1.455.667	974.642	946.855	1.198.874	1.002.928
Caatinga rala	1.029.721	1.497.199	2.231.713	2.257.341	2.000.755	1.892.922
Áreas antrópicas não agrícolas	1.384.896	1.410.883	1.144.074	1.093.620	1.005.367	1.308.231
Áreas antrópicas agrícolas	110.625	135.371	187.983	192.994	371.767	395.458
Total	4.896.290	4.896.290	4.896.290	4.896.290	4.896.290	4.896.290

Conforme os resultados apresentados na Tabela 10, em 1988, as áreas com vegetação natural que são compostas pelas caatingas densa e rala ocuparam 62% da área de estudo, sendo a Caatinga densa a classe mais expressiva, com 41%. Observou-se ainda, que espacialmente, a vegetação natural era mais concentrada nas áreas localizadas as margens do reservatório de Sobradinho e na porção central da bacia, onde atualmente estão inseridos grandes Perímetros Públicos Irrigados (PPI) da Codevasf (Figura 12).

Resultados similares foram encontrados em estudos realizados por Lage *et al.*, apud Moreira (2002), onde analisando temporalmente a composição florística da Caatinga em dois municípios baianos na década de 1970, as autoras afirmaram que a Caatinga se apresentava muito compacta, formada principalmente por árvores de porte e arbustos, ocupando 85% dos municípios estudados.

Figura 12 - Análise espaço-temporal do uso e ocupação do solo no SMSF.



Apesar das mudanças mais substanciais corresponderem às áreas de Caatinga densa, com redução de 21% e aumento de 17% para caatinga rala ao longo de todo o período, em ambientes semiáridos, como o da bacia hidrográfica do Submédio São Francisco, a análise da cobertura vegetal é complexa face ao alto grau de variabilidade interanual da precipitação pluviométrica, o que pode acarretar mudanças no meio, não estando relacionadas diretamente com efeitos de uso e ocupação do solo.

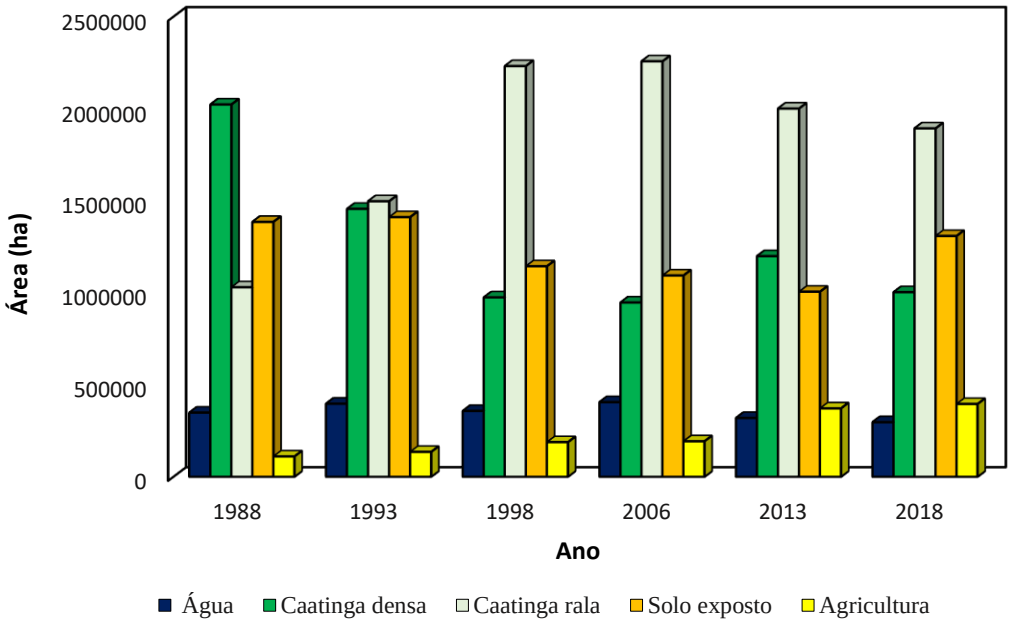
Além disso, fitogeograficamente, a densidade das Caatingas é determinada pelas variações topográficas, tipo de solo e pluviosidade e essa importante diferenciação é evidenciada pelas condições climáticas que não são uniformes no domínio semiárido, onde o relevo desempenha papel fundamental na configuração da paisagem.

Através das informações espaciais apresentadas na Figura 59, foi possível verificar que as áreas classificadas como antrópicas não agrícolas, que estão associadas a todos os tipos de uso da terra de natureza não agrícola, florestal ou água, estão concentradas nas áreas de menores declividades da bacia, sobretudo onde está localizado o reservatório de Itaparica que apresentaram uma baixa densidade de recobrimento da superfície do solo. Os maiores valores obtidos para essa classe, foram registrados em 1993, com 29%, aproximando-se das áreas ocupadas pelas Caatingas densa e rala, com 30% e 31%, respectivamente.

Após esse período, foi observado que as áreas com Caatinga rala foram mais representativas em relação às demais classes, inclusive no ano de 2006, onde ocupou dispersamente 40% do trecho estudado. Com o crescimento da população e as intensas atividades desenvolvidas na bacia, as áreas antrópicas agrícolas que haviam diminuído 8% neste período, voltou a crescer em 2018, influenciando consequentemente na perda da vegetação natural (Figura 13).

Araújo et al., (2012), estudando espacialmente a cobertura florestal da área de preservação permanente (APP) do Rio Mossoró, no Rio Grande do Norte, conseguiram constatar, em toda a área, a quase inexistência da vegetação nativa. Silva et al., (2013), avaliando a dinâmica de uso e de cobertura da terra, no município de Floresta, situado na região semiárida de Pernambuco, também observaram que a cobertura florestal nativa recuou 14,8%, em um período de 21 anos (1987-2008).

Figura 13 - Variação temporal do uso do solo.



Fernandes et al 2015, analisando as mudanças de cobertura da terra através de imagens de satélite Landsat, na região semiárida de Sergipe entre o período de 1992 e 2013, encontrou mudanças mais significativas nas áreas de Caatinga, com diminuição de 22,2%, e redução de 5,9 e 0,2 % para áreas de capoeira e corpos d'água respectivamente.

Silva *et al*., (2016), analisando espaço-temporalmente o uso e a cobertura da terra no município de Exu, Sertão de Pernambuco, verificou que entre as classes de cobertura nativa na região, a Caatinga foi a mais representativa e a mais degradada entre os anos analisados. destacando que em 2006, o bioma ocupava uma área de 30%, passando para 24% em 2016.

Atualmente, mais de 50 % da área de Caatinga já foi alterada ou comprometida, e a perda da cobertura vegetal pode ser considerada como a principal causa da diminuição da diversidade. Esses dados permitem dizer que a Caatinga é um dos ecossistemas brasileiros mais alterados pelas atividades humanas.

Em relação aos corpos de água, as áreas com maior disponibilidade hídrica são representadas espacialmente pelos reservatórios de Sobradinho e Itaparica, que foram planejados com a finalidade de regularização da vazão, devido às cheias que ocorreram no final da década de 70. Segundo a ONS (2019), atualmente o uso prioritário dos reservatórios tem sido para produção de energia elétrica, no entanto, apresentam múltiplos usos, tais: como abastecimento humano, industrial e irrigação.

De acordo com a Codevasf (2019), com os eventos de cheias ocorridos nos anos de 1979 e 1985, as áreas dos lagos de Sobradinho e Itaparica ficaram inundadas e nesse período foram construídas muitas cidades ao redores dos lagos para realocarem a população desabrigada. Essa configuração espacial pode ser observada nas imagens de satélite, uma vez que, ficou evidente a concentração espacial das áreas antropizadas próximas aos corpos hídricos.

No que concerne à variação espaço-temporal da classe de água, os anos mais representativos foram os de 1993 e 2006. Segundo a classificação do SPI (descrição detalhada no Capítulo 2) o ano de 1993 foi classificado como sendo extremamente seco para a região do Submédio São Francisco. Apesar das alterações causadas pelas variações climáticas na bacia, não foram identificadas mudanças significativas em relação às áreas ocupadas pela classe de água, que apresentou 8%.

Em estudos realizados pela ANA (2004), foi constatado que do escoamento total do Rio São Francisco, 70% têm origem na precipitação ocorrida no Estado de Minas Gerais, que ocupa apenas 37% da área da bacia, ou seja, o volume de água no trecho do Submédio São Francisco depende das precipitações que ocorre no Alto São Francisco. Já em relação ao ano de 2006, considerado como um ano chuvoso para a Bacia do São Francisco, foram obtidos os mesmos resultados em termos de área para classe de água, no trecho estudado, no entanto, devido as secas prolongadas a partir de 2012 até 2018, houve uma redução de 2% na oferta hídrica, provocando sérios problemas nos múltiplos usos requeridos.

Assis (2014), em estudo sobre disponibilidade hídrica no solo do semiárido de Pernambuco, encontrou resultados que constaram um déficit hídrico, juntamente com as altas taxas de evapotranspiração na região. Para obtenção desses resultados, o estudo realizou o balanço hídrico climatológico utilizando um período de 40 anos de dados observados e estimados de precipitação e temperatura, respectivamente. Medeiros et al., (2012) em estudo realizado no semiárido paraibano também constatou uma situação crítica das condições dos recursos hídricos na região.

Esse resultado corrobora com Silva, Souza e Azevedo (2012b) que avaliando os índices de detecção de mudanças climáticas para o estado da Bahia no período de 1970 a 2006, diagnosticaram que na região entre o Médio e Baixo São Francisco houve aumento no número de dias com temperatura máxima diária, diminuição das chuvas diárias e da precipitação total anual. Essa variação na precipitação na região pode ser atribuída à circulação de grande escala, enquanto a intensidade das chuvas pode ter influência na variabilidade climática.

Em relação às atividades agrícolas desenvolvidas na área, Carvalho (2009), destaca que desde a década de 40, tem sido praticadas experiências de irrigação na bacia, entretanto, a dinamização e intensificação dessa atividade, ocorreram a partir de 1970, quando se intensificaram os investimentos na área e principalmente nas décadas de 1970 e 1980, nos municípios atingidos pela construção do Reservatório de Itaparica, quando houve a realocação das famílias que moravam na área inundada, para as novas cidades e agrovilas dentro de Perímetros de Irrigação.

Segundo os dados levantados pelo Plano Diretor para o Desenvolvimento do Vale do São Francisco (PLANVASF, 1989), em 1985 a região atingiu 4,5 milhões de hectares dos quais 90% foram ocupados por culturas temporárias e o restante por culturas permanentes. Predominava na região a agricultura de sequeiro, sendo estimado para 1988, um total de 210.000 ha de áreas irrigadas.

Apesar das estimativas apresentadas pelo PLANVASF, os dados obtidos pelas imagens Landsat para 1988 mostraram que, para área de estudo, as áreas antrópicas agrícolas ainda eram incipientes, ocupando apenas 2% do trecho principal da bacia, concentrando-se sobretudo às margens dos reservatórios de água.

Segundo o Plano de Crescimento da Fruticultura elaborado pela Câmara da Fruticultura da Associação Comercial, Industrial e Agrícola de Juazeiro - ACIAJ, em 2007, já existiam 120 mil hectares irrigados do Submédio do Vale do São Francisco, distribuídos nos perímetros públicos e projetos da iniciativa privada, onde se produziam anualmente mais de um milhão de toneladas de frutas, com destaque para uva e manga, que contavam com aproximadamente 10 e 22 mil hectares implantados, respectivamente (SILVA, 2007).

Com o crescimento socioeconômico do Vale do São Francisco, devido tanto aos investimentos do Governo, quanto à fertilidade de suas terras, houve um aumento considerável para agricultura irrigada, tornando-se um importante produtor de frutas e hortaliças. Esse crescimento espacial pode ser identificado principalmente a partir de 2013 onde a classe agricultura já ocupava 8% das áreas.

Sá et al (2007), fazendo uma análise decadal sobre a dinâmica da agricultura irrigada na região de Petrolina e Juazeiro, por meio de técnicas de sensoriamento entre os anos de 1986. e 2006 encontraram um aumento de 47%.

Coelho et al., (2014), avaliando a dinâmica do uso do solo em uma bacia no semiárido nordestino no Estado de Pernambuco, observaram que os resultados entre as

classes de uso passaram por uma grande transição, com aumento do desmatamento pela retirada da vegetação da Caatinga e substituição rápida e progressiva por áreas com pastagem e agricultura.

Em relação ao manejo da terra para agricultura irrigada, Sobral et al (2006) analisando o uso e ocupação do solo no entorno de reservatórios em zonas semiáridas e suas interfaces com a qualidade da água verificaram que as práticas de irrigação eram inadequadas, principalmente em relação ao manejo, que na maioria era utilizada com excessos de água, elevando o lençol freático em alguns lotes, e ocasionado alguns efeitos negativos, entre eles: umidade elevada no solo, salinização e a contaminação por agroquímicos.

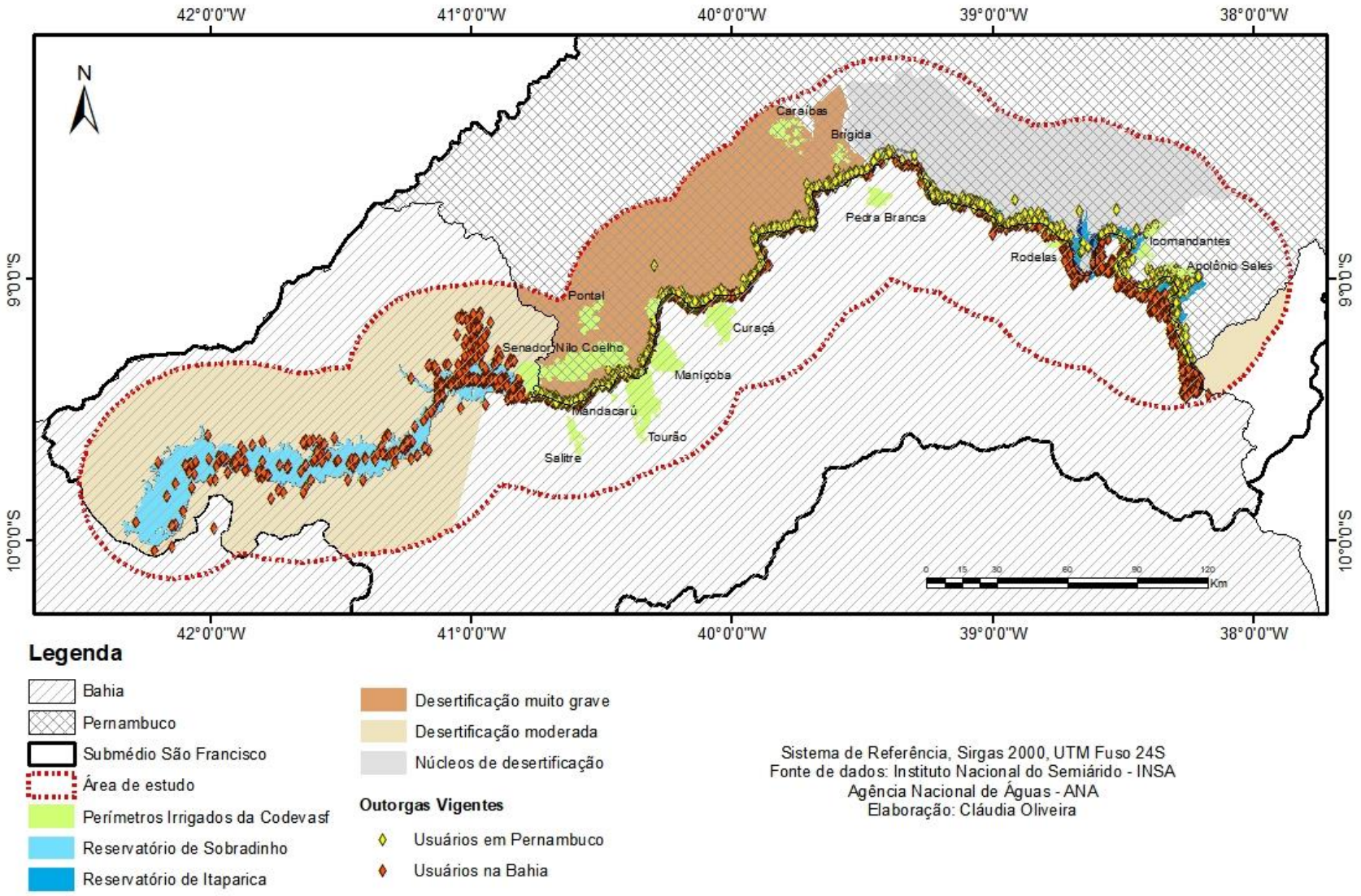
Já Buainain e Garcia (2015), por exemplo, questionam a escolha por parte do Estado de expandir essas áreas irrigadas ao considerarem que, devido à reduzida disponibilidade hídrica, a expansão das atividades antrópicas com elevada demanda de água, caso da irrigação, pode elevar o número de conflitos pelo uso dos recursos hídricos regionais, uma realidade já evidenciada no atual cenário da bacia.

Silva et al., (2009), analisando a dinâmica espaço-temporal da vegetação no semiárido de Pernambuco, verificaram que a vegetação da Caatinga da região diminuiu, mostrando que as áreas analisadas se encontram em processo de perda da vegetação, o que pode levar ao processo de desertificação.

Quanto à desertificação, os resultados mostraram que o bioma Caatinga encontra-se em estágio de alerta. Esse processo vem sendo intensificado pelo uso incorreto das terras, com desmatamentos e queimadas. A vegetação natural vem sofrendo constantes decréscimos em detrimento do aumento da área de solo exposto. Em termos gerais houve uma perda de 26% da área nos últimos 30 anos.

Atualmente, diversas áreas no Submédio São Francisco encontram-se em estágio de desertificação grave, e conforme mencionado, as pressões antrópicas são apontadas como principal agente desse processo. A Figura 14 apresenta as áreas ameaçadas pela desertificação e as demandas de água sobre os recursos hídricos.

Figura 14 - Localização das áreas em processo de desertificação, dos perímetros irrigados e retiradas de água no trecho do Submédio São Francisco.



4.3.2 Avaliação do desempenho da classificação

Neste trabalho foram geradas matrizes de erro a partir da classificação supervisionada do *plugin* Dzetsaka para o período estudado. Serão apresentados como exemplo os valores obtidos para o recorte 1988_216_66 (Tabela 6), e os demais resultados estão inseridos no (Apêndice A).

Tabela 6 - Matriz de erro gerada para o recorte 1988_216_66

Kappa: 95,24% e **Acurácia**: 97,32%						
Classes	**Água**	**Caatinga densa**	**Caatinga rala**	**Áreas antrópicas não agrícolas**	**Áreas antrópicas agrícolas**	Total da linha
Água	67693	61	1	0	0	67.755
Caatinga densa	131	575384	9519	34	311	585.379
Caatinga rala	0	4911	120634	301	0	125.846
Áreas antrópicas não agrícolas	1	2053	2434	39781	0	44.269
Áreas antrópicas agrícolas	43	2229	88	13	753	3.126
Total da coluna	67868	584638	132676	40129	1064	82.6375

Conforme a Tabela 7, nas linhas, estão as informações obtidas pelo usuário (classificação visual) e nas colunas contém as informações obtidas pela classificação automática, referente a quantidade de *pixels* que foram perdidos para determinada classe. Na diagonal (célula cinza) tem-se a precisão de cada classe temática.

Utilizando a classe Caatinga densa como exemplo, a segunda linha da matriz de erro, esta apresentou o número total de *pixels* de 585.379, em razão da soma com as seguintes perdas para as categorias subsequentes: 131 *pixels* para classe Água, 9519 para Caatinga rala (classe com maior confusão), 34 para as Áreas antrópicas não agrícolas e 311 representada pelas Áreas antrópicas agrícolas.

Já em relação à coluna (valores obtidos pela classificação automática) as perdas foram mais acentuadas, ou seja, 61 *pixels* para classe Água, 4911 para Caatinga rala, 2053 para as Áreas antrópicas não agrícolas e por fim 2229 representada pelas Áreas antrópicas agrícolas (classe com maior confusão). Segundo a avaliação visual, outra classe que atribuiu erroneamente alguns *pixels* foram as áreas antrópicas agrícolas com 2434 *pixels* para a Caatinga rala.

É importante, porém considerar algumas particularidades da resposta espectral da vegetação da Caatinga na época da seca. A baixa atividade fotossintética refletida pelo aspecto seco dos estratos que compõem as suas fácies, faz com que a resposta espectral desta formação tenha um importante componente de sombreamento da porção lenhosa (troncos e galhos). Esse processo pode influenciar na resposta espectral da imagem ao confundir a caatinga rala com o solo exposto.

Para analisar a eficiência da classificação, foi utilizado o índice de Kappa. Esse índice é o mais indicado na avaliação da classificação de imagens de satélite, por levar em conta os erros de comissão e omissão da matriz de erros no seu cálculo. No, exemplo citado, apesar da confusão apresentada entre algumas classes, o valor de Kappa foi de 95,24% e o desempenho geral (Acurácia) de 97,32%.

Neste sentido, conforme a classificação de Landis e Koch (1977), pode-se afirmar que a classificação realizada pelo *plugin* Dzetsaka apresentou concordância substancial (0,80 < K <1,0) para todas as imagens utilizadas.

A Tabela 7, apresenta os valores médios obtidos pelo índice de Kappa e acurácia para matrizes de confusão.

Tabela 7 - Resumo do desempenho das Matrizes de confusão gerada para classificação supervisionada

Parâmetro/Ano	**1988**	**1993**	**1998**	**2006**	**2013**	**2018**
Índice de Kappa	96,73	97,60	97,16	97,37	95,57	95,48
Acurácia	98,41	97,98	98,28	98,27	96,61	97,36

Conforme os valores apresentados na Tabela 12, os índices de exatidão global encontrados para as classificações realizadas nas imagens Landsat 5 e 8 foram excelentes. Resultados semelhantes foram encontrados por Suarez & Candeias (2015), ao classificarem uma imagem Landsat 7 onde exatidão global foi de 96% e o índice Kappa 0,94%, representando um excelente grau de aceitação.

4.4 CONCLUSÃO

A avaliação espaço-temporal do uso e ocupação do solo permitiu acompanhar a evolução dos padrões de organização do espaço no trecho principal do Submédio São Francisco. A utilização do geoprocessamento como ferramenta de avaliação foi bastante eficaz na espacialização e quantificação dos recursos disponíveis na área de estudo, permitindo identificar com exatidão as áreas que se encontram ameaçadas pelas atividades antrópicas.

Em relação à acurácia da classificação, apesar das classes Caatinga densa e rala apresentarem discordância em algumas amostras coletadas, no geral, os resultados da classificação segundo o índice Kappa foram considerados como "Excelentes", uma vez que todas as amostras coletadas foram condizentes com as informações classificadas. Dessa forma, a análise permitiu concluir que a classificação supervisionada obtida pelo *plugin* Dzetsaka chegou mais próximo das condições reais da paisagem.

Dentre as classes de uso do solo analisada, a classe da Caatinga densa foi a mais impactada, a maioria convertida em novas pastagens. Além disso, observou-se que o aumento do desmatamento na área ocasionou também uma redução da Caatinga preservada e da regeneração florestal. Além disso, houve um aumento na área ocupada por agricultura, passando de 2% para 6%. Esse aumento foi resultado do incremento na área plantada das culturas, principalmente de ciclo curto. Os resultados também mostraram, que houve um decréscimo dos corpos hídricos, passando de 7% para 6%, sobretudo na área onde está inserido o reservatório de Sobradinho. Neste sentido, os resultados indicaram um aumento de mais de 26% do desmatamento da vegetação nativa na área de estudo.

Já as áreas classificadas como antrópicas não agrícolas, estão concentradas nas áreas de menor declividade da bacia, sobretudo onde está localizado o reservatório de Itaparica e apresentaram uma baixa densidade de recobrimento da superfície do solo. Os maiores valores obtidos para essa classe, foram registrados em 1993, com 29%, aproximando-se das áreas ocupadas pelas Caatingas densa e rala, com 30% e 31%, respectivamente.

Em relação aos valores estimados através do NDVI indicaram ausência ou diminuição da vegetação, redução dos corpos hídricos e aumento do solo exposto. Por meio do índice foi possível identificar as áreas mais susceptíveis aos processos de alteração provocados pela ação antrópica, identificando os núcleos de vegetação das bordas do fragmento como mais susceptíveis à degradação.

Quanto à desertificação, os resultados mostraram que o bioma Caatinga encontra-se em estágio de alerta. Esse processo vem sendo intensificado pelo uso incorreto das terras,

desmatamentos e queimadas. A vegetação natural vem sofrendo constantes decréscimos em detrimento do aumento da área de solo exposto. Em termos gerais houve uma perda de 26% da área nos últimos 30 anos. Vale ressaltar, que o desmatamento acelerado tem sérias implicações para a conservação da biodiversidade, decorrente não apenas da perda direta de habitats, mas também da fragmentação, tendo em vista que, em muitas regiões da Caatinga, os remanescentes de vegetação são muito pequenos e isolados e têm poucas chances de recuperação a curto prazo.

Os maiores impactos identificados na área, são resultados do avanço das áreas agrícolas. Os impactos negativos da irrigação sobre o meio ambiente implicam na necessidade de adoção de medidas de mitigação e regulação pelas autoridades competentes. Entre essas medidas destacam-se o planejamento e monitoramento das áreas irrigadas e aplicação da legislação ambiental mais eficaz. As dificuldades enfrentadas pelo Estado, atualmente, refletem claramente as fragilidades da gestão. Ressalta-se ainda que a realidade atual dos negócios em torno da fruticultura do SMSF sugere, portanto, novos papeis de coordenação e regulação para o setor agrícola.

5 CENÁRIOS DE DEMANDAS HÍDRICAS NO TRECHO SUBMÉDIO DA BACIA HIDROGRÁFICA DO RIO SÃO FRANCISCO

RESUMO

A Bacia do Rio São Francisco vem enfrentando desde 2012, valores de precipitação abaixo da média histórica, o que tem resultado em uma redução significativa nas vazões afluentes dos seus sistemas hídricos, levando-os aos níveis de armazenamento mais baixos já registrados, e colocando em risco o atendimento dos usos múltiplos da água como abastecimento humano, irrigação, energia elétrica, entre outros. O Submédio São Francisco, área de estudo da pesquisa, está condicionado à operação do reservatório de Sobradinho, o qual tem a finalidade de regularização de vazões e devido à crise hídrica, as vazões defluentes mínimas deste reservatório estão limitadas a 1.300 m³/s, e valores inferiores a esta vazão podem ocasionar diversos problemas nas captações de água na bacia. Neste sentido, a pesquisa tem como objetivo construir cenários de demandas hídricas para o trecho Submédio São Francisco, com objetivo de avaliar os efeitos no atendimento das demandas de água, sobretudo para irrigação em consequência das alterações das regras de defluência do sistema de reservatórios do Rio São Francisco, em período de escassez hídrica. Os cenários foram definidos a partir de um período 1981 a 2018, sendo descritos como: Cenário 1 vazão referência, Cenário 2: Vazão ambiental, e Cenário 3: Vazão crítica. A simulação foi feita através do modelo Eco-hidrológico SWIM. Os resultados das simulações indicaram que apesar dos três cenários assumirem configurações distintas, a oferta da vazão estaria abaixo da demanda atual. Neste sentido, o Cenário 1 apresentou-se vantajoso em atender às demandas requeridas. O Cenário 2 foi o mais restritivo em relação ao atendimento das demandas, uma vez que para garantia da manutenção dos estoques hídricos, limitou as captações de água dos usuários. Já o Cenário 3 apesar de apresentar um potencial conflito em relação as vazões de defluências e os volumes máximos de retiradas, foi o cenário mais coerente em relação a atual situação da bacia, uma vez que retiradas cresceram na medida que as demandas foram aumentado.

Palavras chaves: Escassez hídrica. Operação de reservatórios. Usos múltiplos, semiárido**.**

5.1 INTRODUÇÃO

Nos últimos anos, com a crise hídrica provocada principalmente pelas alterações climáticas, os órgãos gestores no Brasil começaram a buscar alternativas para o uso racional da água, sobretudo, na bacia hidrográfica do rio São Francisco, onde estão concentrados os principais reservatórios de água do país.

Com a seca prolongada desde 2012, alguns reservatórios de água sofrem o risco de entrar em colapso, como no caso do reservatório de Sobradinho, considerado o mais importante reservatório de água da região Nordeste, atualmente precisou reduzir a vazão defluente para 600 m^3/s, visando a garantia da segurança hídrica.

Esse déficit hídrico constatado no semiárido não apenas tem influenciado negativamente no setor de produção de energia elétrica, mas também na agricultura, abastecimento de água, indústria, navegação, entre outros setores. Situação que pode se tornar mais crítica por causa do desequilíbrio existente entre oferta e demanda de água.

Em função de haver uma variabilidade temporal, espacial, quantitativa e qualitativa, tanto na demanda quanto na disponibilidade de água, há uma necessidade crescente em estudos que visem o uso sustentável dos recursos hídricos em reservatórios de água.

Os estudos de vazão e processo erosivo da Bacia do Rio São Francisco desenvolvidos pela ANA (2004), já apontaram para a necessidade do aprofundamento de técnicas para avaliação e quantificação dos problemas ambientais ocorridos na bacia. Sendo assim, a realização de estudos hidrológicos para a bacia surge da necessidade de se compreender o funcionamento do balanço hídrico, dos processos que controlam o movimento da água e seus prováveis impactos sobre a quantidade e a qualidade da água.

Neste sentido, Tucci (1998) afirma que umas das formas de prever as consequências das modificações no uso do solo; as vazões decorrentes de determinadas chuvas intensas; efeito da construção de açudes; o impacto da urbanização de uma bacia, etc., é através da modelagem hidrológica, ferramenta que vem se tornando essencial para o manejo dos recursos hídricos, principalmente, nas bacias localizadas na porção semiárida, onde conforme mencionado ocorre grandes eventos extremos de secas e uso inadequado do solo.

Neste contexto, o estudo pretende simular a vazão diária do reservatório de Sobradinho a partir do uso da água para agricultura, tendo em vista que na região do Submédio São Francisco, local onde o reservatório de Sobradinho está inserido, o maior consumo de água tem sido destinado para agricultura. Com a redução da oferta hídrica nessa região em função dos

processos já mencionados, torna-se importante analisar se o reservatório de Sobradinho poderá atender os cenários e demandas de água alocados.

5.1.1 Modelagem hidrológica

Nas últimas décadas, muitos pesquisadores têm buscado entender os processos erosivos através de medidas como o monitoramento de bacias hidrográficas, coletas de dados hidroclimatológicos, utilização de metodologias e técnicas de modelagem para análise dos processos de vazão e erosão.

Um modelo pode ser considerado como uma representação simplificada da realidade, auxiliando no entendimento dos processos que envolvem esta realidade. Os modelos estão sendo cada vez mais utilizados em estudos ambientais, pois ajudam a entender o impacto das mudanças no uso e cobertura da terra e prever alterações futuras nos ecossistemas.

Os processos ambientais no mundo real são geralmente bastante complexos e são tipicamente tridimensionais e dependentes do tempo. Tal complexidade pode incluir comportamentos não lineares e componentes estocásticos sobre múltiplas escalas de tempo e espaço. Pode-se haver um entendimento qualitativo de um processo particular,
mas o entendimento quantitativo pode ser limitado. A possibilidade de expressar os processos físicos como um conjunto de equações matemáticas detalhadas pode não existir, ou as equações podem ser muito complexas, exigindo simplificações para seu uso (STEYAERT, 1993).

Para Tucci (2005), os modelos surgiram dentro da necessidade de responder às diferentes questões práticas e científicas, tentando explicar os componentes da relação precipitação como a infiltração, o escoamento em rios, e a evapotranspiração, integrando os diferentes componentes causais da natureza e dos fatores antrópicos. Estes apresentaram grandes avanços com a entrada da fase do geoprocessamento e do sensoriamento remoto, destacando a evolução dos modelos distribuídos e a representação da diversidade física da bacia hidrográfica.

Atualmente, existem vários modelos hidrológicos que representam o escoamento superficial e a produção de sedimentos em bacias hidrográficas, cada um deles possui suas especificidades e suas particularidades. Nessa perspectiva, os modelos hidrológicos podem ser aplicados nos estudos de impactos devido à mudança no uso e ocupação do solo através da construção de cenários.

No caso da modelagem do escoamento e da erosão do solo está diretamente relacionada a todos os processos do ciclo hidrológico. Por essa razão, modelar matematicamente esses processos implica na consideração de parâmetros físicos do sistema da bacia, tais como a capacidade de infiltração, condutividade hidráulica, tensão do solo e as relações funcionais entre estas e a umidade do solo.

5.1.2 Classificações dos modelos hidrológicos

Os modelos hidrológicos são essenciais para a predição e quantificação dos fenômenos físicos que ocorrem na natureza, visto a impossibilidade de se quantificar diretamente tais fenômenos. Desse modo, caracterizam-se como ferramentas essenciais para o preenchimento de diversas lacunas de informações necessárias no planejamento e gestão de Recursos Hídricos. Lou (2010) elenca as principais aplicações da modelagem hidrológica como sendo:

- análise de consistência e preenchimento de falhas;
- previsão de vazão;
- dimensionamento e previsão de cenários de planejamento;
- efeitos resultantes da modificação do uso do solo.

Os modelos podem ser classificados sob diferentes aspectos. Comumente, os modelos são classificados, dentre outras formas, de acordo com os tipos de variáveis utilizadas na modelagem (estocásticos ou determinísticos), o tipo de relações entre essas variáveis (empíricos ou baseados em processos), a forma de representação dos dados (discretos ou contínuos), a existência ou não de relações espaciais (pontuais ou distribuídos), e a existência de dependência temporal (estáticos ou dinâmicos), apresentada no Quadro 1.

Quadro 1 - Tipos de modelos, características e usos na modelagem hidrológica.

Nome	Tipo	Estrutura	Características	Usos
Precipitação-Vazão	Determinístico Empírico Conceitual	Comportamento	Calcula a vazão de uma bacia a partir da precipitação	Extensão de séries de vazão; dimensionamento; previsão em tempo atual; avaliação do uso da terra.
Vazão-vazão	Determinístico Empírico Conceitual		Calcula a vazão de uma seção a partir de um ponto a montante	Extensão de séries de vazões; Dimensionamento; previsão de cheia.
Geração estocástica de vazão	Estocástico		Calcula a vazão com base nas características da série histórica	Dimensionamento do volume de um reservatório.
Fluxo saturado	Determinístico		Determina o movimento, vazão potencial de águas subterrâneas a partir de dados de realimentação, bombeamento etc.	Capacidade de bombeamento; nível do lençol freático; iteração rio-aquífero etc.
Hidrodinâmico	Determinístico		Sintetiza vazões em rios e rede de canais.	Simulação de alterações do sistema; efeitos de escoamento de jusante.
Qualidade da água (de rios e reservatórios)	Determinístico		Simula a concentração de parâmetros de qualidade da água.	Impacto de efluentes; eutrofização de reservatórios; condições ambientais
Rede de canais e condutos	Determinístico	Comportamento e otimização	Otimiza o diâmetro dos condutos e verifica as condições de projeto.	Rede de abastecimento de água; rede de irrigação.
Operação de reservatórios	Estocástico, determinístico		Determina a operação ótima de sistemas de reservatórios.	Usos múltiplos
Planejamento e gestão de sistemas múltiplos	Estocástico, determinístico	Comportamento, otimização e planejamento	Simula condições de projeto e operação de sistemas (usa vários modelos).	Reservatórios, canais, estações de tratamento, irrigação, navegação fluvial etc.

Fonte: Adaptado de Fayal (2008).

Um dos modelos atualmente utilizados para representar os processos que ocorrem na bacia hidrográfica é o modelo Eco-hidrológico SWIM, que é um modelo semidistribuído capaz de simular processos hidrológicos dominantes, como a evapotranspiração, o crescimento da vegetação, a geração de escoamento e a descarga do rio, e também considera feedbacks entre esses processos (KRYSANOVA *et al.*, 2005). Além disso, o SWIM pode reproduzir a descarga na mesoescala diariamente com alta eficiência e tem sido amplamente utilizado em muitas bacias de grande escala em todo o mundo, inclusive na Bacia do Rio São Francisco onde o modelo já apresentou resultados satisfatórios.

5.1.3 Modelo hidrológico SWIM

O *Soil and Water Integrated Model* – SWIM, é um modelo baseado em duas ferramentas desenvolvidas anteriormente: o *Soil and Water Assessment Tool* - SWAT (Arnold et al., 1993 e 1994) e MATSALU (Krysanova et al., 1989a & b).

De acordo com Krysanova *et al.*, (2000), o modelo SWIM foi desenvolvido para o uso, principalmente na Europa e em áreas temperadas, entretanto, existe a possibilidade da sua aplicação em outras regiões.

O modelo visa proporcionar a modelagem hidrológica e de qualidade da água, em mesoescala, para grandes bacias hidrográficas (de 100 a 10 mil km^2). Trata-se de um modelo semidistribuído, baseado no Sistema Informação Geográfica (SIG), com esquema de desagregação em três níveis: bacia, sub--bacias e hidrotopos (Figura 1)

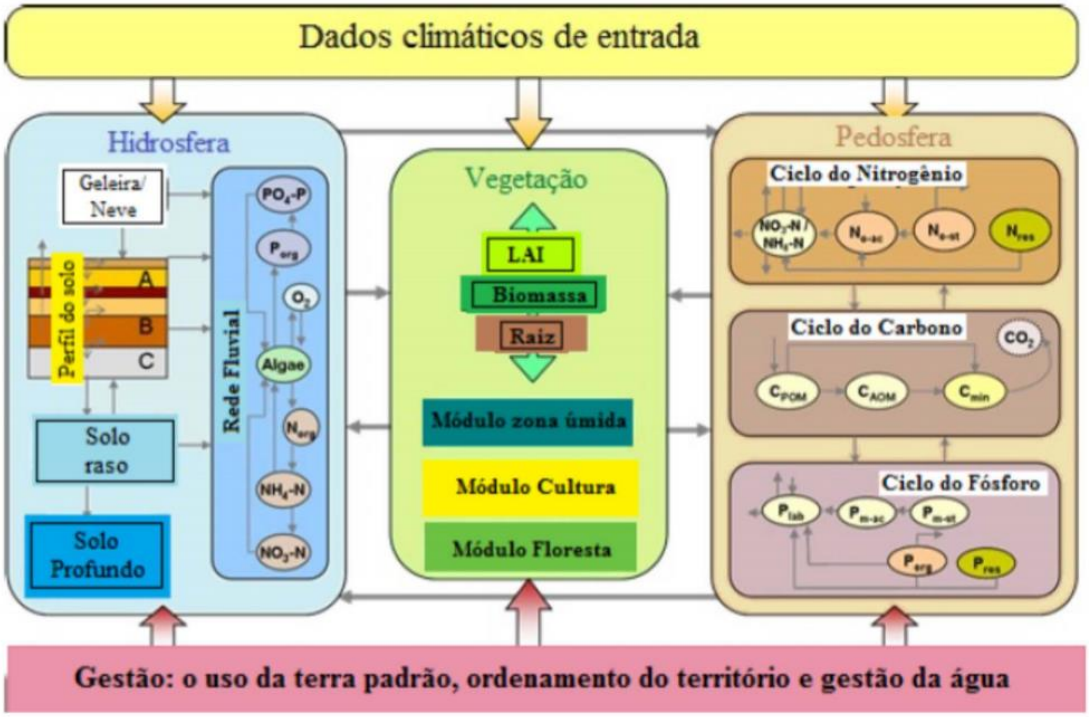
Figura 1 - Modelo semidistribuído, baseado no SIG, com esquema de desagregação em três níveis.

Fonte: Adaptado de Krysanova et al., (2000)

O modelo integra a dinâmica hidrológica, vegetação, erosão e fluxo de nutrientes, baseado na equação do balanço hídrico, que utiliza dados de precipitação, evapotranspiração,

percolação, escoamento superficial e escoamento subsuperficial para a coluna de solo (Figura 2).

Figura 2 - Estrutura do modelo SWIM.



Fonte: Adaptado de Krysanova et al., (2000)

De acordo com Silva (2014), existem poucas aplicações do modelo no Brasil, sendo citado apenas nos estudos desenvolvidos por Junqueira (2008) e Durães (2010), que, utilizaram o modelo SWAT. No entanto, a literatura apresenta a aplicação deste modelo em outros países para simulações hidrológicas dentre os estudos, destacam-se:

- Controle de cheiras e inundações (HATTERMANN; *et al.*,2013);
- Baixas vazões em corpos d'água (KRYSANOVA; *et al.,* 2013);
- Evapotranspiração (CONRADT *et al.*,, (2013);
- Mudanças Climáticas (HATTERMANN *et al* 2011 e NĚMEČKOVÁ et al., 2011);
- Qualidade de água (HUANG *et al.*,2009) e
- Gestão das águas (CONRADT *et al.*,2007)).

Para Koch (2015), uma importante vantagem do SWIM é a integração do ciclo hidrológico com a vegetação e as interações entre os fluxos da água e os ecossistemas. O modelo permite a mudança sazonal de estágios de crescimento da planta em condições de temperaturas

elevadas. Por isso, representa mais uma ferramenta confiável para a avaliação do impacto das mudanças climáticas ou do uso da terra.

5.2 MATERIAL E MÉTODOS

Para a simulação dos cenários de demandas hídricas no trecho Submédio São Francisco, foi utilizado o modelo eco-hidrológico SWIM. A escolha do modelo se deu justamente pela experiência adquirida pelo grupo de pesquisa do *Potsdam Institute for Climate Impact Research* – PIK da Alemanha. Este modelo foi aplicado em vários projetos antes desenvolvidos, como na Bacia do Rio Elba (Hattermann et al., 2004, 2005, 2006, 2007, 2008a), Krysanova et al., (2007), Huang et al., (2010) e Hattermann et al., (2005), onde foi realizada uma abrangente análise de sensibilidade e incerteza. Considerando que seus parâmetros já foram calibrados (1965-1974) e validados (1998-2010) para a Bacia do Rio São Francisco, em simulações com cenários de uso do solo e do clima, para projeções até 2015, foram incluídos dados atualizados no modelo, para criação de novos cenários de vazões para os reservatórios Sobradinho e Itaparica, tendo como foco as demandas e retiradas de água para agricultura irrigada. A Figura 3 apresenta uma síntese das etapas para obtenção dos cenários e a Figura 4, corresponde à planilha que foi elaborada para correção dos volumes outorgados pela ANA para os usuários no trecho Submédio inseridos no estado da Bahia.

Figura 3 - Procedimento metodológico para obtenção dos cenários no modelo SWIM na bacia do rio São Francisco

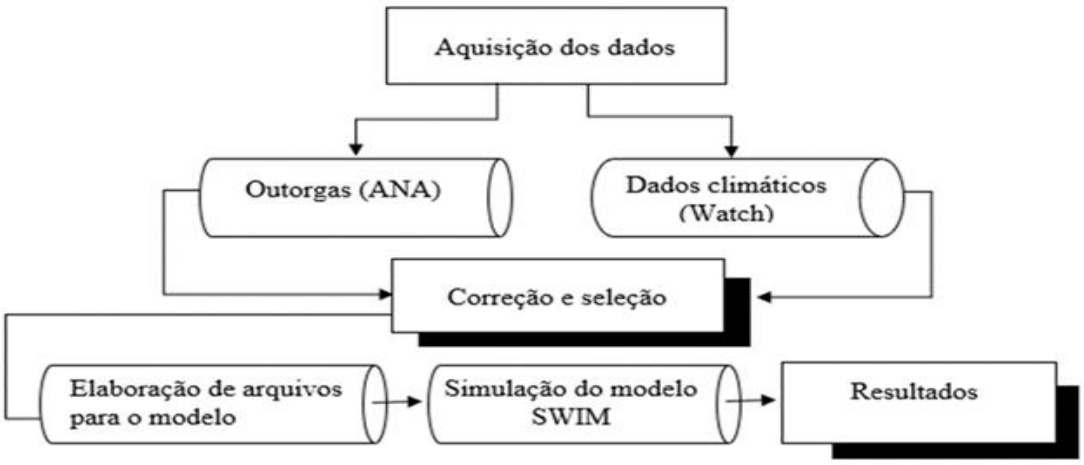
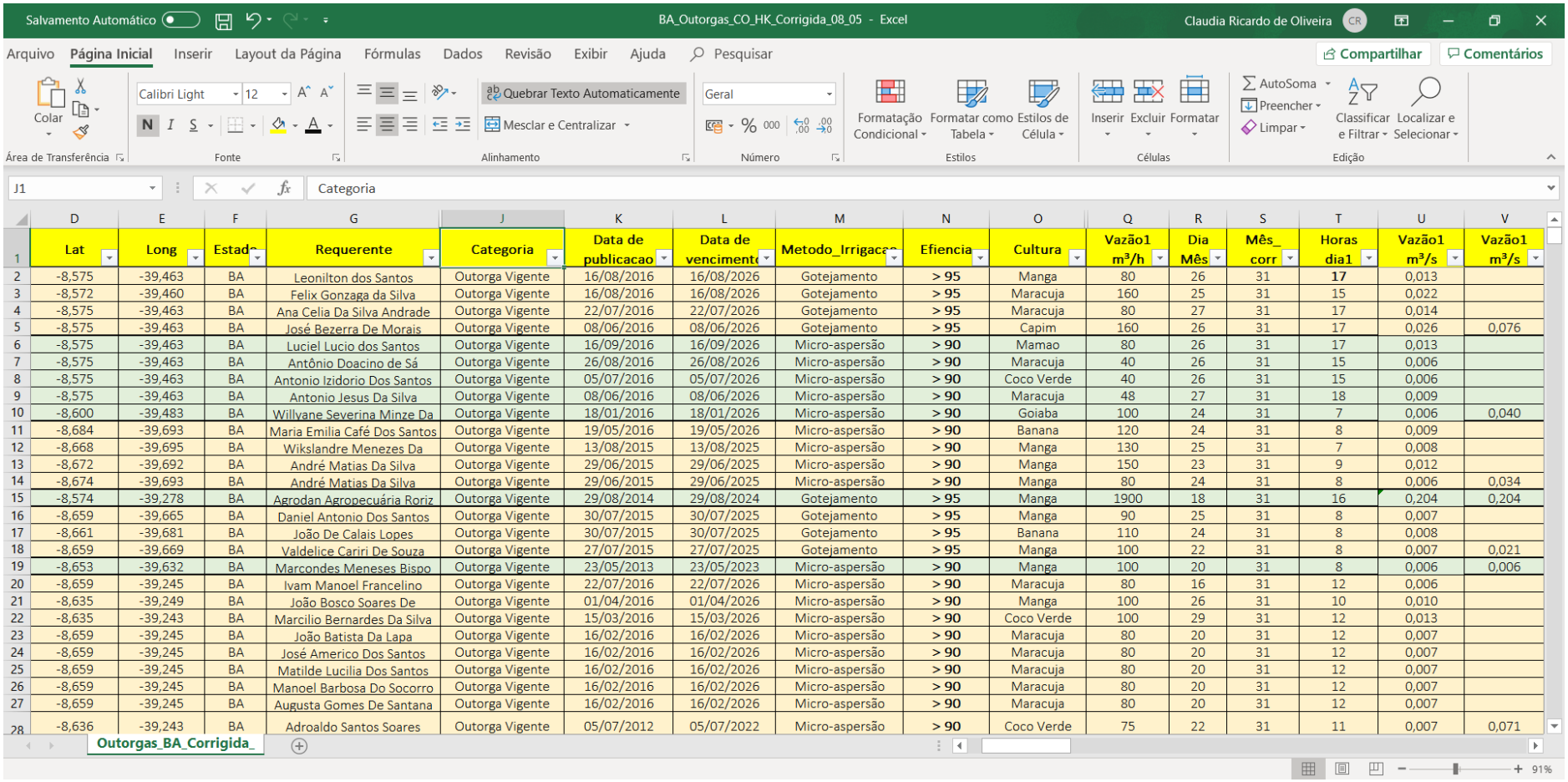


Figura 4 - Planilha para correção dos volumes outorgados pela ANA para os usuários de irrigação no estado da Bahia.



Salvamento Automático — BA_Outorgas_CO_HK_Corrigida_08_05 - Excel — Claudia Ricardo de Oliveira

Arquivo | Página Inicial | Inserir | Layout da Página | Fórmulas | Dados | Revisão | Exibir | Ajuda | Pesquisar | Compartilhar | Comentários

Colar | Calibri Light | 12 | Quebrar Texto Automaticamente | Geral | Mesclar e Centralizar | Formatação Condicional | Formatar como Tabela | Estilos de Célula | Inserir | Excluir | Formatar | AutoSoma | Preencher | Limpar | Classificar e Filtrar | Localizar e Selecionar

Área de Transferência | Fonte | Alinhamento | Número | Estilos | Células | Edição

J1 | Categoria

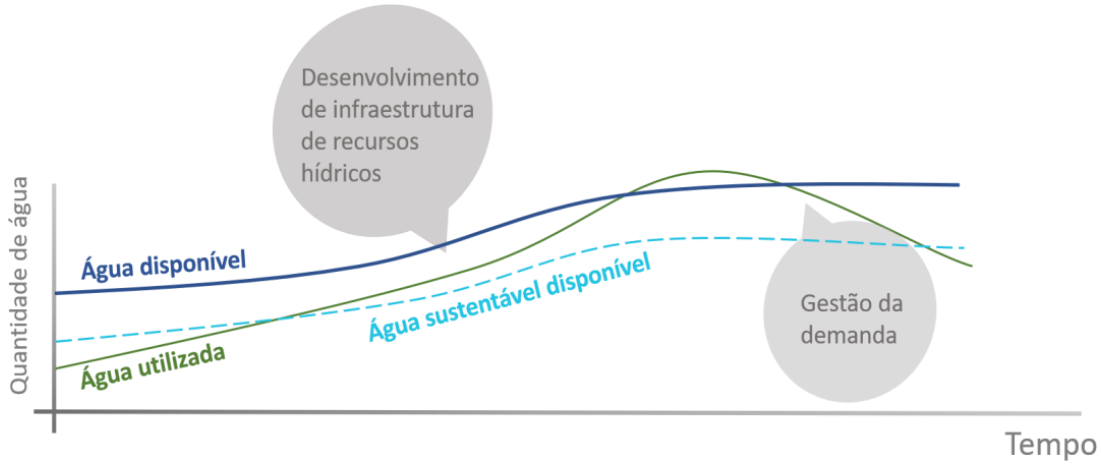
	D	E	F	G	J	K	L	M	N	O	Q	R	S	T	U	V
1	Lat	Long	Estad	Requerente	Categoria	Data de publicacao	Data de vencimento	Metodo_Irrigacao	Efiencia	Cultura	Vazão1 m³/h	Dia Mês	Mês_ corr	Horas dia1	Vazão1 m³/s	Vazão1 m³/s
2	-8,575	-39,463	BA	Leonilton dos Santos	Outorga Vigente	16/08/2016	16/08/2026	Gotejamento	> 95	Manga	80	26	31	17	0,013	
3	-8,572	-39,460	BA	Felix Gonzaga da Silva	Outorga Vigente	16/08/2016	16/08/2026	Gotejamento	> 95	Maracuja	160	25	31	15	0,022	
4	-8,575	-39,463	BA	Ana Celia Da Silva Andrade	Outorga Vigente	22/07/2016	22/07/2026	Gotejamento	> 95	Maracuja	80	27	31	17	0,014	
5	-8,575	-39,463	BA	José Bezerra De Morais	Outorga Vigente	08/06/2016	08/06/2026	Gotejamento	> 95	Capim	160	26	31	17	0,026	0,076
6	-8,575	-39,463	BA	Luciel Lucio dos Santos	Outorga Vigente	16/09/2016	16/09/2026	Micro-aspersão	> 90	Mamao	80	26	31	17	0,013	
7	-8,575	-39,463	BA	Antônio Doacino de Sá	Outorga Vigente	26/08/2016	26/08/2026	Micro-aspersão	> 90	Maracuja	40	26	31	15	0,006	
8	-8,575	-39,463	BA	Antonio Izidorio Dos Santos	Outorga Vigente	05/07/2016	05/07/2026	Micro-aspersão	> 90	Coco Verde	40	26	31	15	0,006	
9	-8,575	-39,463	BA	Antonio Jesus Da Silva	Outorga Vigente	08/06/2016	08/06/2026	Micro-aspersão	> 90	Maracuja	48	27	31	18	0,009	
10	-8,600	-39,483	BA	Willyane Severina Minze Da	Outorga Vigente	18/01/2016	18/01/2026	Micro-aspersão	> 90	Goiaba	100	24	31	7	0,006	0,040
11	-8,684	-39,693	BA	Maria Emilia Café Dos Santos	Outorga Vigente	19/05/2016	19/05/2026	Micro-aspersão	> 90	Banana	120	24	31	8	0,009	
12	-8,668	-39,695	BA	Wikslandre Menezes Da	Outorga Vigente	13/08/2015	13/08/2025	Micro-aspersão	> 90	Manga	130	25	31	7	0,008	
13	-8,672	-39,692	BA	André Matias Da Silva	Outorga Vigente	29/06/2015	29/06/2025	Micro-aspersão	> 90	Manga	150	23	31	9	0,012	
14	-8,674	-39,693	BA	André Matias Da Silva	Outorga Vigente	29/06/2015	29/06/2025	Micro-aspersão	> 90	Manga	80	24	31	8	0,006	0,034
15	-8,574	-39,278	BA	Agrodan Agropecuária Roriz	Outorga Vigente	29/08/2014	29/08/2024	Gotejamento	> 95	Manga	1900	18	31	16	0,204	0,204
16	-8,659	-39,665	BA	Daniel Antonio Dos Santos	Outorga Vigente	30/07/2015	30/07/2025	Gotejamento	> 95	Manga	90	25	31	8	0,007	
17	-8,661	-39,681	BA	João De Calais Lopes	Outorga Vigente	30/07/2015	30/07/2025	Gotejamento	> 95	Banana	110	24	31	8	0,008	
18	-8,659	-39,669	BA	Valdelice Cariri De Souza	Outorga Vigente	27/07/2015	27/07/2025	Gotejamento	> 95	Manga	100	22	31	8	0,007	0,021
19	-8,653	-39,632	BA	Marcondes Meneses Bispo	Outorga Vigente	23/05/2013	23/05/2023	Micro-aspersão	> 90	Manga	100	20	31	8	0,006	0,006
20	-8,659	-39,245	BA	Ivam Manoel Francelino	Outorga Vigente	22/07/2016	22/07/2026	Micro-aspersão	> 90	Maracuja	80	16	31	12	0,006	
21	-8,635	-39,249	BA	João Bosco Soares De	Outorga Vigente	01/04/2016	01/04/2026	Micro-aspersão	> 90	Manga	100	26	31	10	0,010	
22	-8,635	-39,243	BA	Marcilio Bernardes Da Silva	Outorga Vigente	15/03/2016	15/03/2026	Micro-aspersão	> 90	Coco Verde	100	29	31	12	0,013	
23	-8,659	-39,245	BA	João Batista Da Lapa	Outorga Vigente	16/02/2016	16/02/2026	Micro-aspersão	> 90	Maracuja	80	20	31	12	0,007	
24	-8,659	-39,245	BA	José Americo Dos Santos	Outorga Vigente	16/02/2016	16/02/2026	Micro-aspersão	> 90	Maracuja	80	20	31	12	0,007	
25	-8,659	-39,245	BA	Matilde Lucilia Dos Santos	Outorga Vigente	16/02/2016	16/02/2026	Micro-aspersão	> 90	Maracuja	80	20	31	12	0,007	
26	-8,659	-39,245	BA	Manoel Barbosa Do Socorro	Outorga Vigente	16/02/2016	16/02/2026	Micro-aspersão	> 90	Maracuja	80	20	31	12	0,007	
27	-8,659	-39,245	BA	Augusta Gomes De Santana	Outorga Vigente	16/02/2016	16/02/2026	Micro-aspersão	> 90	Maracuja	80	20	31	12	0,007	
28	-8,636	-39,243	BA	Adroaldo Santos Soares	Outorga Vigente	05/07/2012	05/07/2022	Micro-aspersão	> 90	Coco Verde	75	22	31	11	0,007	0,071

Outorgas_BA_Corrigida_

91%

Para definição dos cenários, além das vazões de restrições defluentes propostas pela ANA, foi realizada uma análise temporal do crescimento das demandas de água para irrigação, tomando como base a análise proposta por Speed *et al.*,(2013) (Figura 5), onde os autores apresentam o crescimento das demandas de água.

Figura 5 - Evolução entre a oferta e as demandas de água e as medidas de gestão para alcançar o uso sustentável da água.



Fonte: SPEED *et al.*,(2013)

Em um rio, para retirar determinado volume de água, normalmente são estabelecidas restrições legais e tecnológicas. Nas restrições tecnológicas, cada ponto de retirada de água, varia de acordo com as características de cada usuário. Essas condições, dificilmente são conhecidas. No entanto, em uma situação hipotética onde em todos pontos de retirada de água exista uma restrição legal, as restrições tecnológicas independentemente de serem desconhecidas, deverão ser adaptadas.

Para compreensão das restrições citadas, serão apresentadas duas situações hipotéticas, onde o nível da água estabelecido foi de 900 m^3/s. Na Figura 6, o ponto de retirada é fixo e está instalado acima do nível da água, portanto, não pode haver captação de água. Já na Figura 7, apesar da restrição tecnológica não ser definida, como o ponto fixo de retirada está abaixo do nível da água e existe uma restrição mínima legal de 1300 m^3/s, o usuário poderá retirar 400 m^3/s de água.

Neste contexto, no modelo SWIM, para todos os pontos de retirada foram incluídas vazões mínimas com restrição, estabelecendo que as vazões de defluências dos reservatórios deverão atender às restrições legais e as captações de águas só poderão ser feitas quando o volume retirado não comprometer a vazão mínima do rio.

Figura 6 - Captações de água sem autorização.

Restrição tecnológica

Nível da água em (m) eq. Q =900 m^3/s

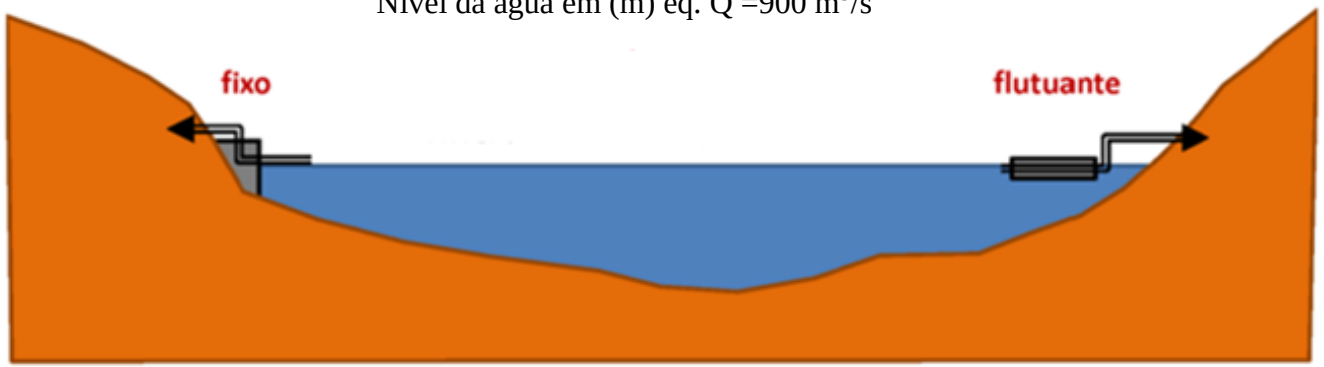
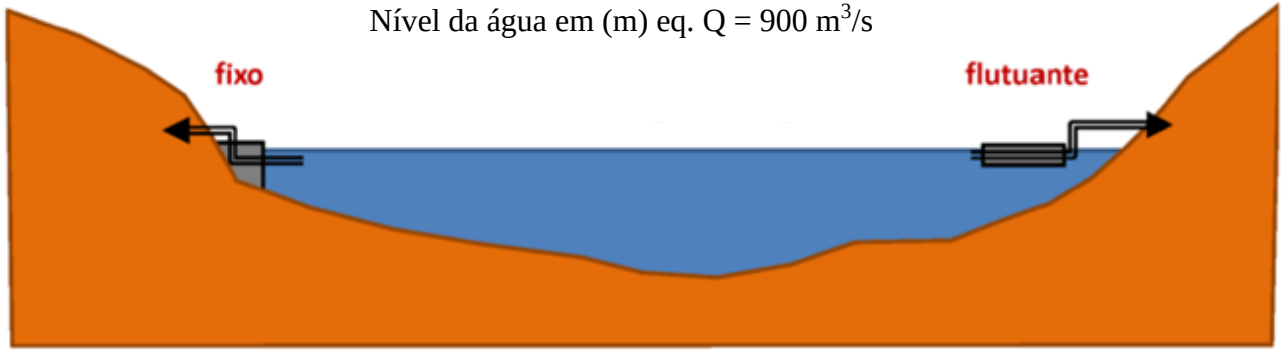


Figura 7. Captações de água com autorização

Restrição legal (outorga) Qmin = 1100 m^3/s

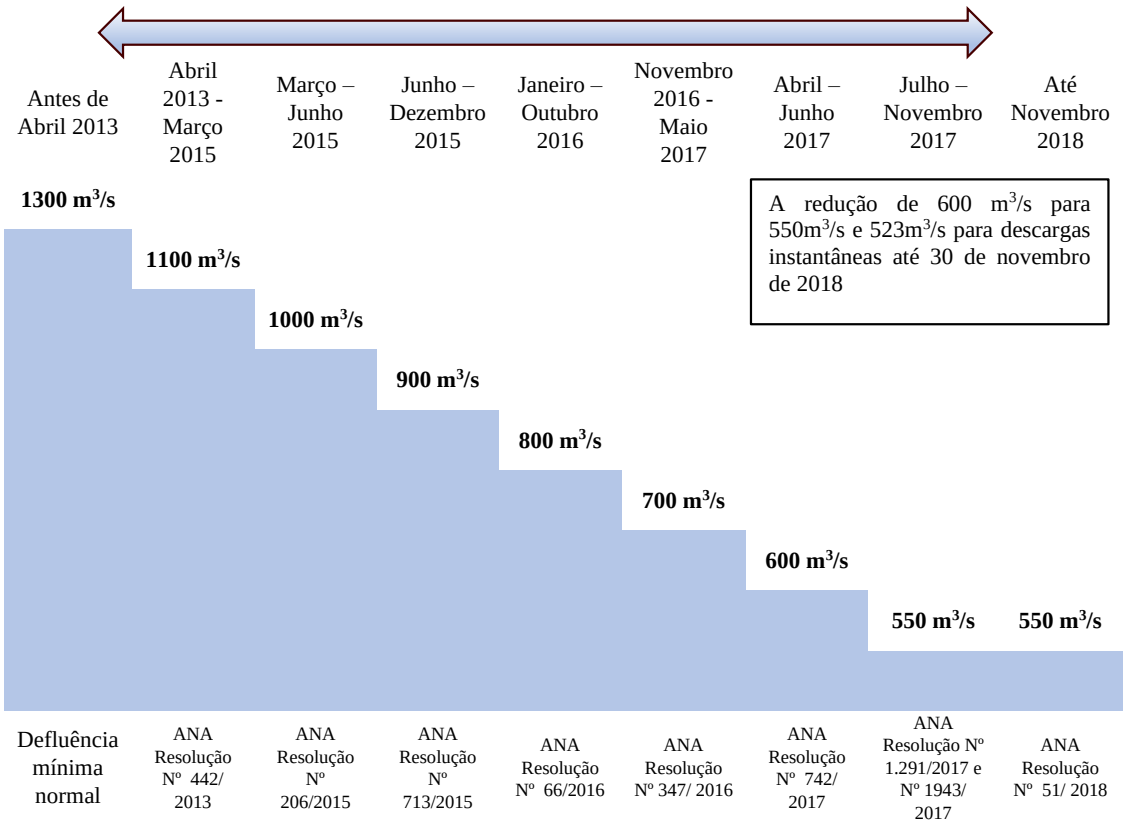
Nível da água em (m) eq. Q = 900 m^3/s



5.2.2 Descrição dos cenários

Em razão dos baixos volumes dos seus reservatórios e incertezas hidrológicas, a ANA autorizou a flexibilização da restrição das vazões mínimas defluentes dos reservatórios Sobradinho e Xingó, com a finalidade de preservar o armazenamento hídrico e garantir o seu fornecimento para os múltiplos usos. A Figura 8, apresenta uma série de Resoluções para reduções de descarga mínima defluente do reservatório de Sobradinho.

Figura 8 - Vazão defluente do reservatório de Sobradinho autorizada pelo MMA.



Fonte: Adaptado de ANA (2018).

Diante da crise hídrica vivenciada na Bacia do São Francisco, foram simulados três cenários da operação dos reservatórios e de demandas hídricas para o trecho Submédio São Francisco: Cenário 1 – Vazão de referência; Cenário 2 - Vazão ambiental/ecológica e Cenário 3 – Vazão crítica, conforme detalhados a seguir.

Nos três cenários, as demandas de água são iguais e correspondem às vazões outorgadas pela ANA para irrigação no trecho do Submédio São Francisco**.**

Cenário 1: Vazão de referência

Neste cenário foi utilizada uma vazão defluente média mínima diária para os reservatórios de Sobradinho e Itaparica de 1300 m^3/s (operação normal). Segundo a Resolução CONAMA Nº 357/2005, essa vazão é classificada como vazão de referência e corresponde à vazão do corpo hídrico utilizada como base para o processo de gestão, tendo em vista o uso múltiplo das águas e a necessária articulação das instâncias do Sistema Nacional de Meio Ambiente - SISNAMA e do Sistema Nacional de Gerenciamento de Recursos Hídricos - SINGREH.

Essas vazões foram obtidas através do Inventário das Restrições Operativas Hidráulicas dos Aproveitamentos Hidroelétricos do ONS (2019), onde informa que as vazões inferiores a 1300m^3/s, ocasionam problemas na navegação (trecho Sobradinho / Juazeiro), em diversas captações de industrias, bem como em tomadas d´água para abastecimento de cidades e projetos agrícolas localizados no trecho Sobradinho / Itaparica. Já em relação aos usuários no Submédio São Francisco, foi estabelecida uma vazão mínima de 1100 m^3/s. Neste sentido, os usuários só poderão retirar água acima deste volume.

Cenário 2: Vazão ambiental/ecológica

Neste cenário, para os reservatórios de Sobradinho e Itaparica, foram utilizadas as vazões ambientais mínimas recomendadas por Medeiros (2014) e adaptado por Azevedo (2014).

Neste sentido, as vazões mínimas ambientais para o ano normal (Tabela 1), foram incluídos no modelo SWIM, como sendo as descargas dos reservatórios de Sobradinho e Itaparica, uma vez que as descargas dos reservatórios se aproximam desses valores. Já em relação às vazões do ano seco, foram incluídas no modelo SWIM, como sendo as vazões mínimas de retirada para os usuários, ou seja, o mínimo necessário para manter o ecossistema em equilíbrio.

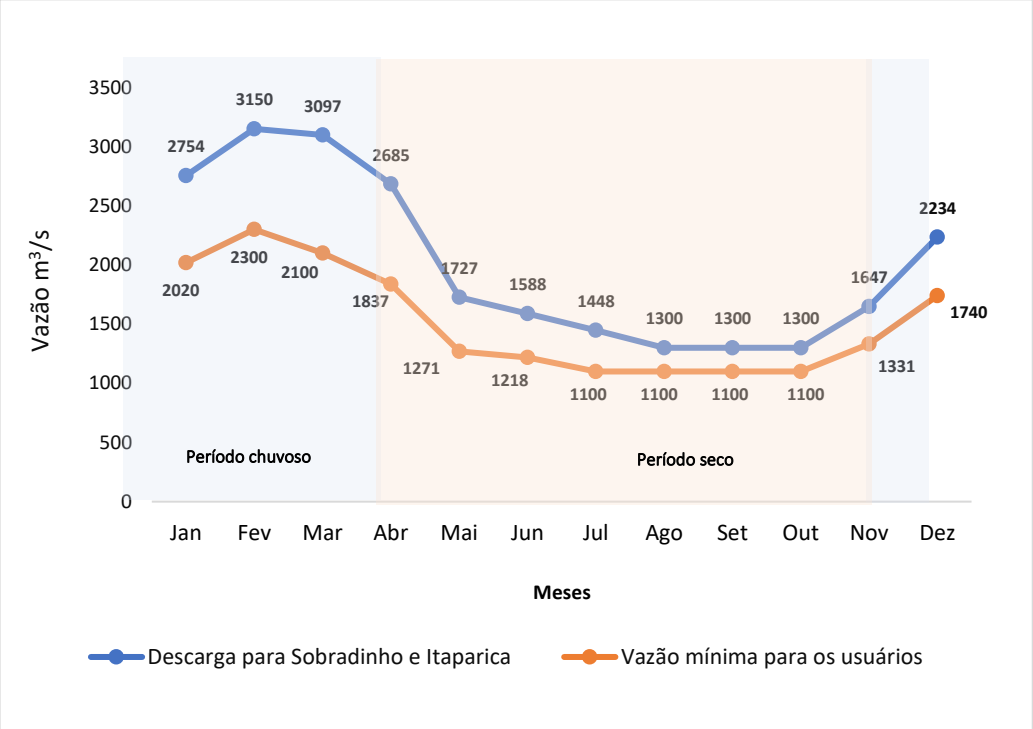
Tabela 1 - Vazões ambientais utilizadas no modelo SWIM.

Mês	Vazões mínimas (m^3/s)	
	Ano normal	**Ano seco**
Janeiro	2754	2020
Fevereiro	3150	2300
Março	3097	2100
Abril	2685	1837
Maio	1727	1271
Junho	1588	1218
Julho	1448	1100
Agosto	1300	1100
Setembro	1300	1100
Outubro	1300	1100
Novembro	1647	1331
Dezembro	2234	1740

Fonte: Adaptado de Azevedo (2014).

Como exemplo, no caso em que a vazão de descarga de Sobradinho em janeiro for de 2754 m^3/s, os usuários só poderão retirar água acima de 2020 $m^{3/}s$ (Figura 9).

Figura 9 - Relação entre as descargas e as vazões mínimas ambientais.



Nesta análise, foram considerados os períodos secos e chuvosos com base no Art. 2º do Ofício Circular nº 1/2019/AA-CD-ANA, onde diz que:

Para fins de operação do Sistema Hídrico do Rio São Francisco, ficam definidos os seguintes períodos:

I. **Período úmido:** de dezembro a abril; e

II. **Período seco:** de maio a novembro.

Quanto à definição da vazão ambiental, Cruz (2005) e Medeiros et al., (2011) classificam como sendo a quantidade de água que deve permanecer no leito dos rios para atendimento das demandas do ecossistema aquático, para preservação da flora e da fauna relacionada ao corpo hídrico.

Cenário 3: Vazão crítica

Neste cenário, a vazão mínima para os reservatórios de Sobradinho e Itaparica foi adaptada para 550 m^3/s e para os usuários no Submédio São Francisco foi de 500 m^3/s. Essa vazão foi definida com base na Resolução da ANA Nº 51/ 2018, conforme apresentada na Figura 68, e foi estabelecida com a finalidade de analisar a disponibilidade hídrica para atender às demandas requeridas numa situação de escassez hídrica.

Vale ressaltar que essa regra só deve ser usada quando o volume de Sobradinho estiver abaixo de 20% do seu volume útil. No entanto, em situações em que o volume de Sobradinho estiver acima de 60%, a descarga poder ser de acima de 1300m^3/s.

Apesar da medida restringir as vazões de retirada para todos os usos, as captações para abastecimento humano e dessedentação animal, deverão ser considerados prioritárias em casos de escassez, conforme a Política Nacional de Recursos Hídricos (Lei Nº 9.433/97).

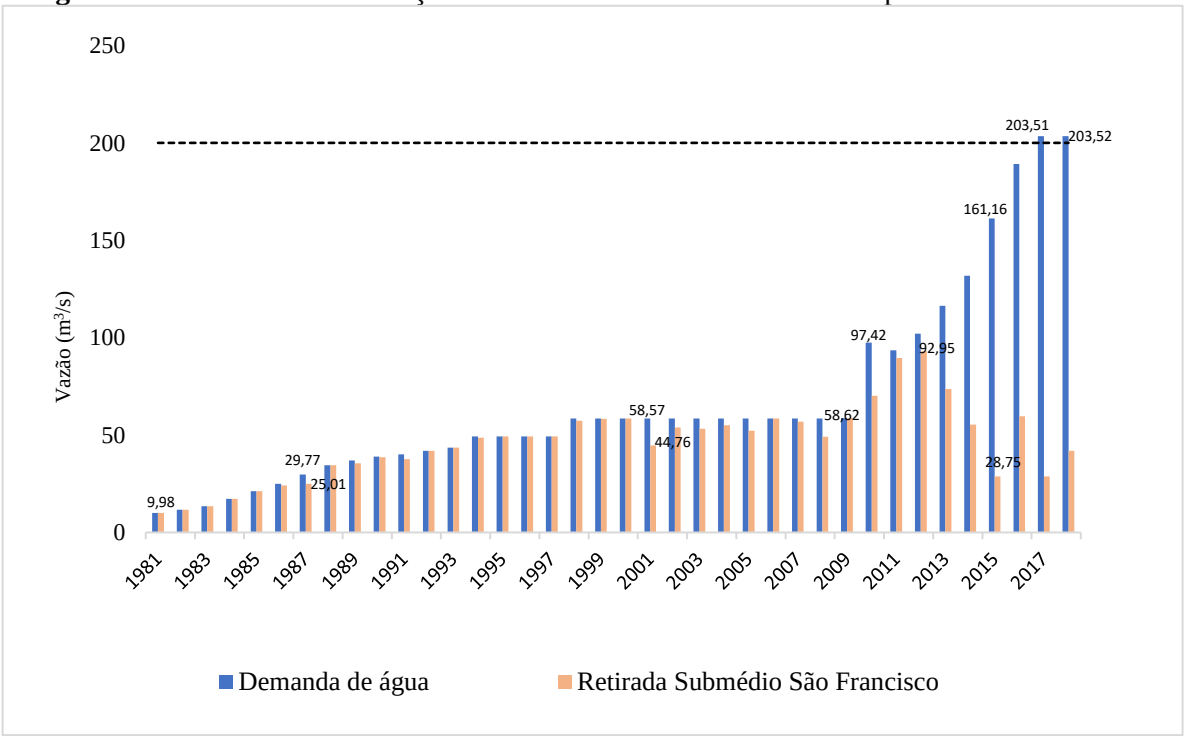
5.3 RESULTADOS E DISCUSSÃO

Analisando a retirada e disponibilidade de água para os diversos usuários no Submédio São Francisco, apesar dos três cenários assumirem configurações distintas, a oferta da vazão estaria abaixo da demanda atual.

No Cenário 1: Vazão de referência (Figura 10), com base no histórico apresentado, as demandas e retiradas de água até 1986 cresceram de forma semelhante. A partir de 1987, a demanda já representava 198% e estava 19% acima do que foi retirado pelos usuários.

Conforme a simulação, entre os anos de 1988 e 2000, as demandas e retiradas continuaram crescendo, sem apresentar grandes variações. Nesse período, foram registrados alguns eventos de seca no trecho do Submédio São Francisco (conforme a classificação do SPI, detalhada no Capítulo 2).

Figura 10 - Resultado da simulação do Cenário 1 – Vazão de referência para o trecho do SMSF



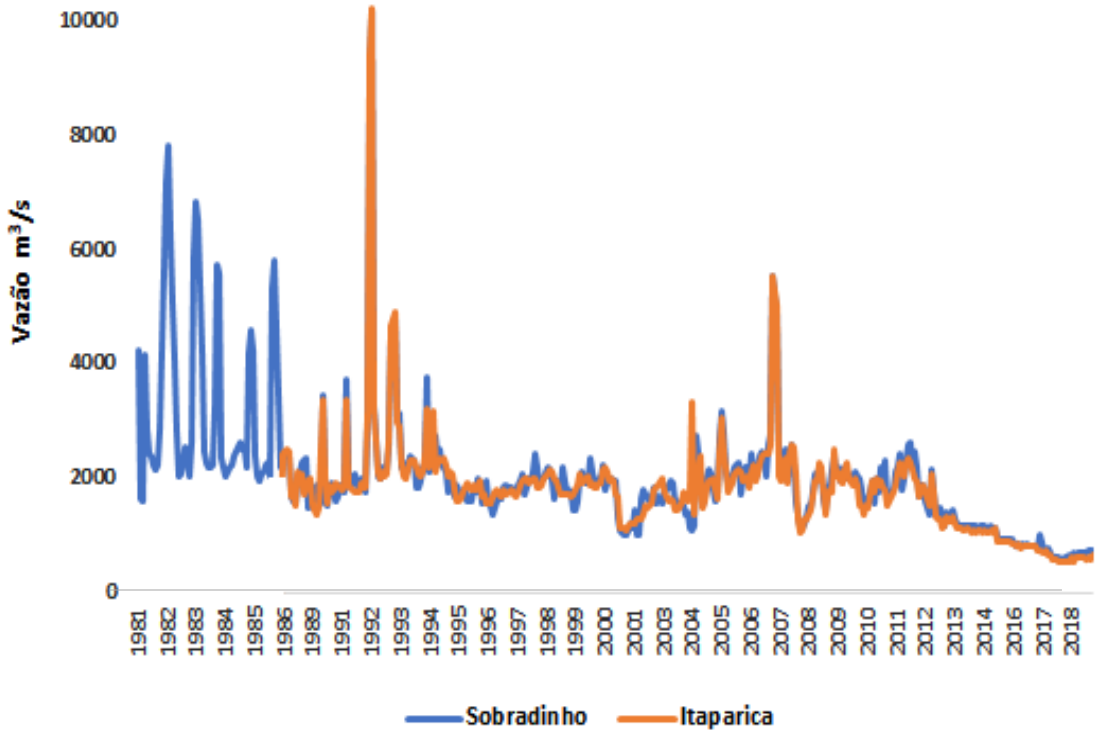
No ano de 1993 por exemplo, considerado como um ano extremamente seco, apesar da seca identificada na sub-bacia, não foram observadas reduções nas vazões de descargas dos reservatórios de Sobradinho de Itaparica, que obtiveram vazão defluente média anual de 2540 m^3/s e 2525 m^3/s respectivamente. A Figura 11, apresenta o histórico das vazões médias defluentes para os reservatórios.

Segundo a CHESF (2018), como a maior parte da vazão dos reservatórios de Sobradinho e Itaparica são originadas na Bacia do Alto São Francisco, os eventos de seca que ocorrerem apenas no Submédio São Francisco, não necessariamente afetaram os volumes disponíveis dos reservatórios.

Neste sentido, no ano de 2001, devido à uma grande seca na bacia do São Francisco que se estendeu até 2002, foram registradas descargas (defluentes) entre 900 a 1000 m^3/s para Sobradinho e de 700 a 900 m^3/s para Itaparica. Neste ano, conforme apresentado no Cenário 1, as demandas de água já haviam crescido 97%.

Nos anos seguintes até 2010, não houve grande variações, no entanto, a partir de 2011 elas se intensificaram de tal forma que em 2018 já haviam crescido 107%. Já em relação às retiradas, elas foram diminuindo ao longo dos anos, e apesar de terem aumentado 59% entre 2009 e 2012, houve uma redução de 69% até o ano de 2015.

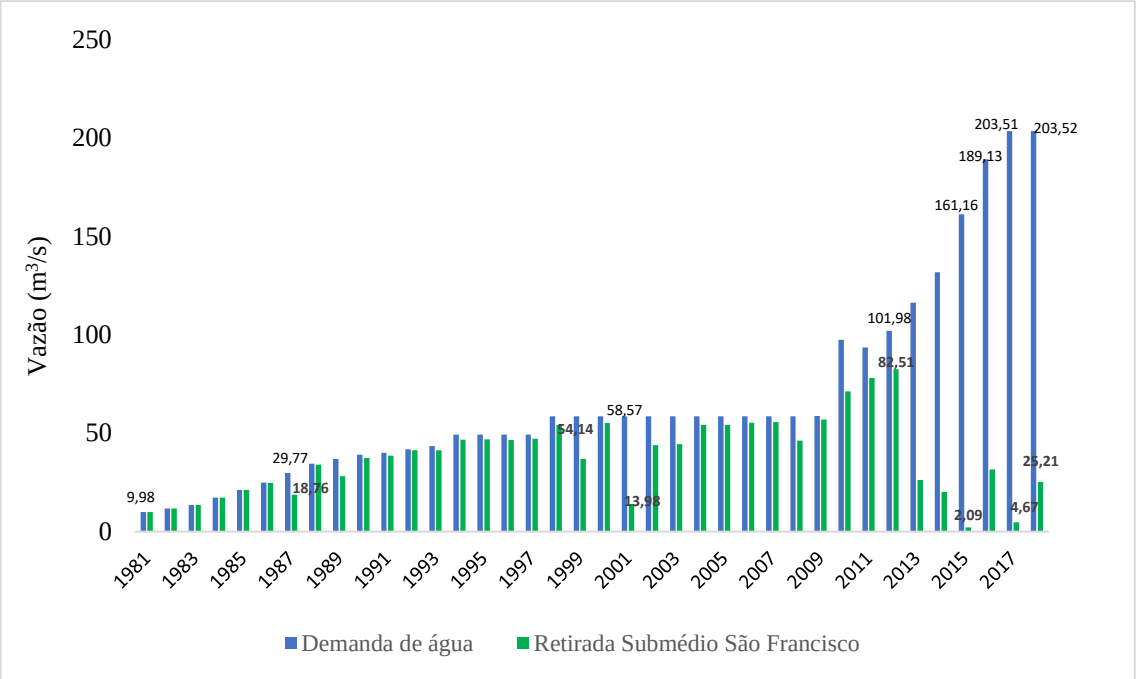
Figura 11 - Histórico das vazões médias defluentes para os reservatórios de Sobradinho e Itaparica



Vale ressaltar que os valores máximos para captações neste cenário não podem ser superiores a 200 m^3/s e conforme os resultados apresentados, as retiradas ficaram abaixo desse volume, apenas as demandas entre 2017 e 2018 que superaram os limites estabelecidos.

Em relação ao Cenário 2: Vazão ambiental/ecológica (Figura 12), assim como no Cenário 1, as demandas e retiradas de água até 1986 tiveram crescimentos semelhantes. No entanto, a partir de 1987, as retiradas começaram a diminuir. Neste ano, por exemplo, apenas 37% da demanda de água foram atendidas.

Figura 12 - Resultado da simulação do Cenário 2 – Vazão ambiental/ecológica para o trecho do SMSF



Conforme os resultados apresentados, entre os anos de 1987 e 1998, as retiradas aumentaram 188%, no entanto, entre 2000 e 2001, houve uma redução de 76%. Após esse período houve um aumento em paralelo às demandas, com destaque para o ano de 2012 onde foram atendidas 81% das demandas de água.

Após 2012, houve uma redução considerável em relação às retiradas, sendo que os anos de 2015 e 2017 foram os mais afetados, atendendo apenas 2,5% e 5,7% das demandas respectivamente.

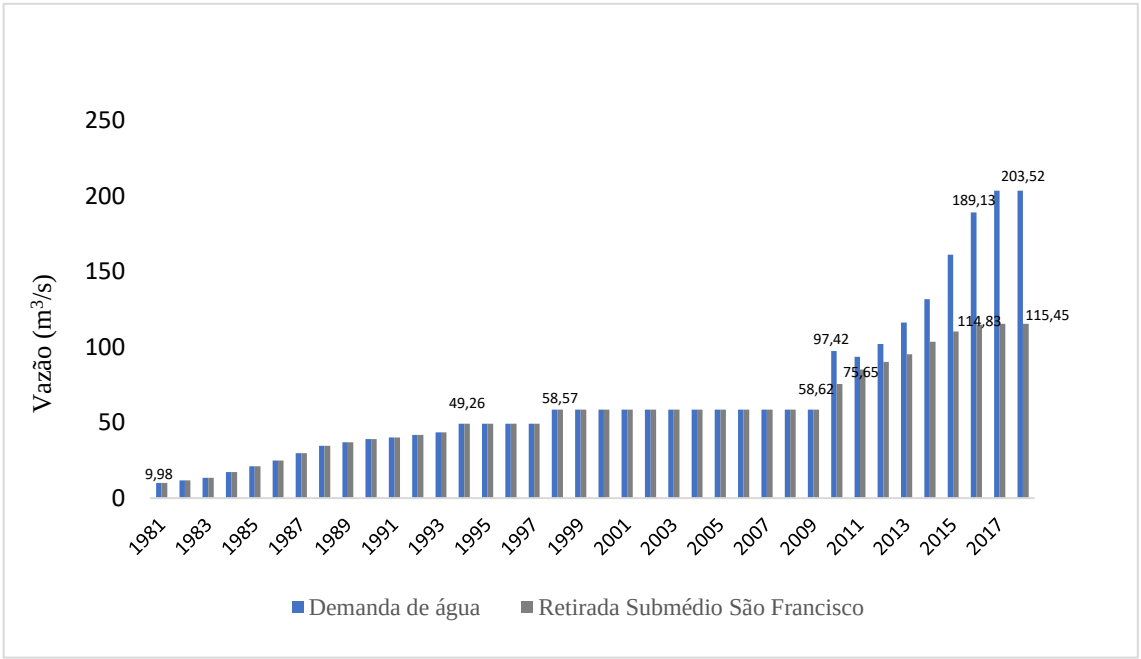
De acordo com a ANA (2019), desde 2012, a Bacia do São Francisco vem enfrentando, ano após ano, valores de precipitação abaixo da média histórica, o que tem resultado em uma redução significativa nas vazões afluentes aos reservatórios das hidrelétricas da Bacia do Rio São Francisco, levando-os aos níveis de armazenamento mais baixos já registrados, e colocando em risco o atendimento continuado aos usos múltiplos da água.

Apesar das reduções afetarem os usos múltiplos requeridos, elas são necessárias, uma vez que as captações a jusante dos reservatórios de água devem garantir aos corpos hídricos uma quantidade mínima de água, vital para a manutenção dos ecossistemas fluviais. Por isso que no Cenário 2: Vazão ambiental, os usuários devem retirar o mínimo necessário para manter o ecossistema em equilíbrio. Além disso, o conhecimento dessas vazões é de suma importância para se determinar a disponibilidade do corpo hídrico.

Diferente dos Cenários 1 e 2, o Cenário 3: Vazão crítica (Figura 13), se mostrou mais coerente em relação às condições reais do Submédio São Francisco. Observou-se que, entre os anos de 1981 e 2009, as retiradas de água foram compatíveis com as demandas requeridas. Houve poucas variações entre os anos de 1998 e 2009. Contudo, a partir de 2010 embora as demandas tenham sido maiores, as retiradas também aumentaram.

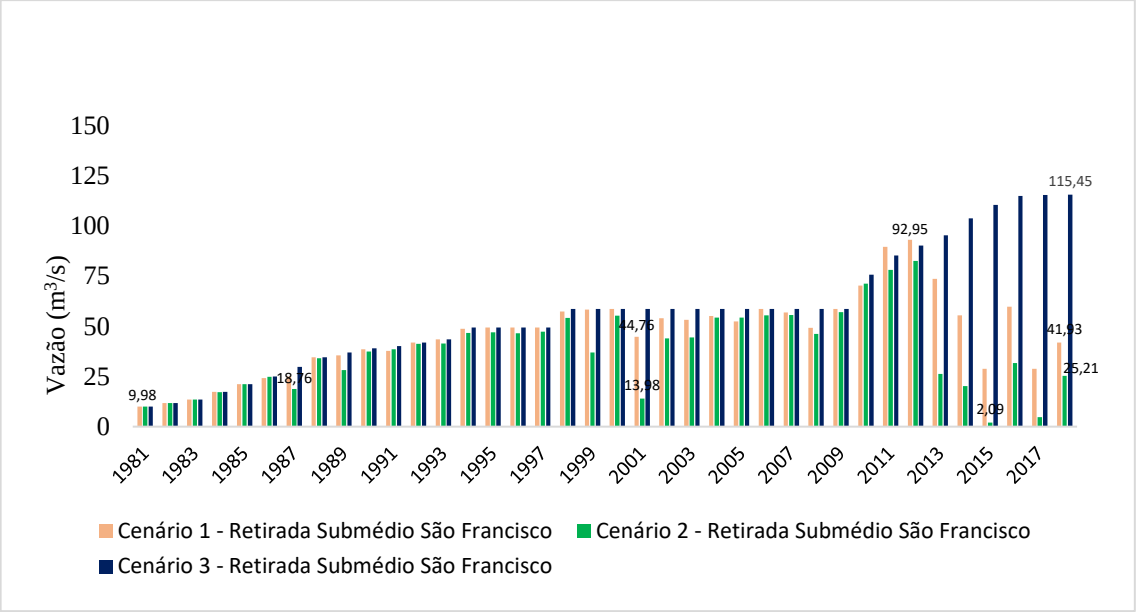
Nos períodos em que o reservatório de Sobradinho esteve inferior a 20% do seu volume útil, como aconteceu durante a seca, especificamente entre os anos de 2017 e 2018, a descarga do reservatório foi de 550 m ^{3}/s, ou seja, nesse cenário crítico, os usuários só poderiam retirar água acima de 500 m^3/s. Neste sentido, conforme a Figura 73, a retiradas estiveram acima do valor estabelecido. Vale ressaltar, que se as medidas de redução das vazões mínimas não tivessem sido implementadas, o reservatório de Sobradinho teria esgotado seu volume útil desde 2014. A regulação dos usos da água baseada apenas na outorga é insuficiente para reduzir os impactos que os reservatórios sofrem em situações de escassez, notadamente na ocorrência de períodos de seca.

Figura 13 - Resultado da simulação do Cenário 3 – Vazão crítica para o trecho do SMSF



Analisando os 3 cenários simulados, podemos observar que até o ano de 2000, houve poucas variações em relação as retiradas de água (Figura 14).

Figura 14 - Resultado das simulações para o trecho do SBSF.



A partir de 2012, os cenários foram tomando configurações bem distintas. Em 2018 por exemplo, enquanto os Cenários 1 e 2 diminuíram as suas retiradas, captando apenas 21% e 12% respectivamente da água, o Cenário 3 aumentou consideravelmente e atendeu a 57% das demandas requeridas.

5.4 CONCLUSÃO

Os resultados mostraram que desde 2013, a Bacia do Rio São Francisco vem enfrentando condições hidrológicas adversas, com precipitações e vazões abaixo da média, com consequências nos níveis de armazenamento dos reservatórios localizados na bacia, o que levou a ações de flexibilização das vazões mínimas defluentes dos reservatórios no Submédio São Francisco. De abril de 2013 a maio de 2017, foi autorizada a redução das defluências mínimas de Sobradinho de 1.300 m³/s para 550 m³/s através de uma série de Resoluções publicadas pela ANA.

Neste contexto, diante dos problemas advindos da crise, o estudo construiu três cenários de demandas hídricas para o trecho do Submédio São Francisco, com objetivo de avaliar os efeitos no atendimento das demandas de água, sobretudo para irrigação em consequência das alterações das regras de defluência do sistema de reservatórios do rio São Francisco.

As simulações realizadas pelo modelo SWIM mostraram que, as demandas de água para irrigação estiveram acima da oferta da vazão. Os resultados obtidos para o Cenário 1: Vazão de referência, mostram que embora as retiradas tenham diminuindo nos últimos anos, o cenário

apresentou-se mais vantajoso em atender às demandas requeridas, pois apesar das condições de restrições dos reservatórios, visto que as captações no rio só poderiam ser feitas se o volume estivesse acima de 1100 m^3/s, entre 1981 até 2009, boa parte das demandas foram atendidas. As captações só começaram a reduzir intensamente em função da seca constatada em 2012.

Foi observado que as reduções nos volumes de água dos reservatórios de Itaparica e Sobradinho não tiveram uma relação direta com os períodos de seca ocorridas no Submédio São Francisco. Esse fato foi constatado com o evento crítico que ocorreu em 1993, onde não foram identificadas reduções nas vazões dos reservatórios. Já os eventos críticos que ocorreram na Bacia do São Francisco entre os anos de 1999 e 2001, além de comprometer a disponibilidade hídrica da bacia, causou graves consequências nos usos múltiplos, inclusive no setor elétrico culminando uma crise energética no país.

No Cenário 2: Vazão ambiental/ecológica, foram mais restritivos em relação ao atendimento das demandas, uma vez que para garantia da manutenção dos estoques hídricos, a ANA limitou as captações de água dos usuários, principalmente a partir de 2013, onde a captações foram diminuindo. Os anos de 2015 e 2017 por exemplo, foram os mais afetados, atendo apenas 2,5% e 5,7% das demandas respectivamente.

As simulações realizadas para o Cenário 3 – Vazão de referência mostraram que apesar de apresentar um potencial conflito em relação às vazões de defluências e os volumes máximos de retiradas, foi o cenário mais coerente em relação a atual situação da bacia, uma vez que as retiradas cresceram na medida em que as demandas foram aumentado. Levando em conta as demandas atuais e futura necessária, este cenário é o mais preocupante, uma vez que as vazões defluentes mínimas dos reservatórios no Submédio São Francisco estão limitadas a 1.300 m^3/s, e valores inferiores a esta vazão podem ocasionar diversos problemas nas captações de água da bacia. Por outro lado, a regularização do regime de vazões também pode potencializar condições específicas de conflito de uso entre as demandas atualmente existentes como, por exemplo, em situações críticas de disponibilidade, nas quais há necessidade de armazenar água para geração de energia reduzindo, assim, a magnitude das vazões a jusante das barragens, elevando o risco do não atendimento das demandas.

Ressalta-se que os conflitos de uso dos recursos hídricos, principalmente, pela escassez, tendem a aumentar no futuro. Diante disso, o planejamento e o gerenciamento de recursos hídricos são fundamentais para prevenir e minimizar problemas ambientais, à medida que garante uma quantidade mínima de vazão ecológica, fundamental à conservação do ecossistema fluvial.

6 CONCLUSÕES E RECOMENDAÇÕES

Nesta seção serão apresentados as conclusões e as recomendações do trabalho.

6.1 CONCLUSÕES

A identificação dos períodos críticos climáticos no trecho Submédio da Bacia Hidrográfica do Rio São Francisco a partir do *Stantardized Precipitacion Index* (SPI) constatou que a principal característica da dinâmica temporal das séries na área de estudo foi o caráter aleatório no qual uma condição de déficit ou excesso de precipitação pluvial pode ter início ou fim de forma bastante abrupta.

A aplicação do índice permitiu a visualização espacial da tendência de déficit hídrico em grande escala, se concentrando principalmente em áreas onde estão localizados os reservatórios de água de Sobradinho e Itaparica, incluindo os grandes perímetros irrigados da região. Segundo o SPI-PR, os anos com anomalias mais intensas foram 1974, 1985, 1993 e 2012 Os dois primeiros anos classificados como severamente úmidos ($\bar{x}$ = 1,53 e $\bar{x}$ = 1,66) e os dois últimos anos como extremamente secos ($\bar{x}$ = -2,12 e $\bar{x}$ = -2,03), respectivamente.

Os resultados da pesquisa evidenciaram que os padrões de precipitação pluviométrica estão mudando ao longo dos anos, e que os impactos das mudanças climáticas têm comprometido o desenvolvimento econômico e social, principalmente nas regiões de clima semiárido, que ainda carecem de políticas mitigatórias para enfrentar a problemática das secas.

Sabe-se que em situação de escassez hídrica, o uso prioritário deve ser para o abastecimento humano. No entanto, ao se caracterizar a demanda hídrica no Submédio São Francisco, observou-se que o principal uso da água tem sido para o setor agrícola, que demanda cerca de 70% do recurso hídrico e tem gerado diversos conflitos. Além disso, a concentração das áreas agrícolas tem sido principalmente nas margens dos reservatórios de água e ao longo da calha principal do Rio São Francisco. Essas atividades provêm de grandes projetos denominados de Perímetros Públicos Irrigados, alguns deles voltados para agricultura familiar.

Das 1992 outorgas vigentes no Submédio, 1305 (66%) estão concentradas no trecho da Bahia e 687 (34%) no trecho de Pernambuco, distribuídas em quatros categorias de usuários: individual, institucional, empresarial e associações ou cooperativas.

A categoria com maior número de outorgas concedias foi a do usuário individual com (94%) das concessões, apresentando demanda hídrica máxima de 5 m^3/s e 17 m^3/s para os

trechos de Pernambuco e Bahia, respectivamente. Já o usuário institucional apesar de possuir apenas (0,5%) das outorgas, a demanda hídrica máxima foi de 9 m^3/s e 77m^3/s para os trechos de Pernambuco e Bahia, respectivamente, ou seja, bem superior à primeira categoria.

Em relação às técnicas de irrigação mais utilizadas, o sistema que apresentou maior demanda de água foi o por sulcos de infiltração, que tem eficiência de 65%, enquanto os sistemas menos utilizados foram autopropelido (80%) e pivô central (85%). Já em relação às principais culturas, das 28 culturas identificadas, as que mais se destacaram tanto em termo de volume, quanto em termos de usuários, foram as culturas de manga, uva e banana.

Ainda, segundo o levantamento, o volume de água destinado à irrigação é extremamente alto e as projeções quanto ao vencimento de algumas outorgas chegam até 2033. Um cenário difícil de prever se haverá água suficiente para atender a todas as demandas, diante da escassez hídrica que a bacia tem enfrentado nos últimos anos. Um outro agravante são as retiradas de água de forma irregular que não puderam ser contabilizadas no estudo.

Em relação à qualidade da água, os resultados revelaram que todos os pontos apresentaram valores acima do permitido pela Resolução CONAMA Nº 357/2005, quanto aos parâmetros: pH (9,9), fósforo total (0,32 mg/L) e demanda bioquímica de oxigênio (7,0 mg/ L). Essas estações encontram-se próximas às áreas com intensa atividade agrícola, o que possivelmente influenciou no resultado das amostras.

Ao se delimitar as áreas irrigadas em função do uso e ocupação do solo no trecho principal do Submédio São Francisco, das cinco classes de uso do solo analisadas: água, Caatingas densa e rala, áreas antrópicas agrícolas e não agrícolas, a classe Caatinga densa foi a mais impactada. A maioria das áreas foram convertidas em novas pastagens ou destinada à agricultura. Houve um aumento na área ocupada por agricultura, passando de 110.625 ha (2%) para 395.458 ha (6%), principalmente pelas culturas de ciclo curto.

Os resultados também mostraram, que houve um decréscimo dos corpos hídricos, passando de 348.546 ha (7%) para 296.751 ha (6%), sobretudo na área onde está inserido o reservatório de Sobradinho. Foi observado que as áreas antrópicas não agrícolas, estão concentradas principalmente às margens do reservatório de Itaparica, apresentando baixa densidade de recobrimento da superfície do solo. Durante o período analisado, o ano que mais se destacou foi 1993, onde a classe ocupou 1.410.883 ha (29%).

A construção de cenários de demandas hídricas para agricultura irrigada a partir das vazões defluentes dos reservatórios de Sobradinho e Itaparica, a partir das simulações realizadas pelo modelo SWIM mostraram que, as demandas de água para irrigação estiveram acima da oferta

da vazão. Os resultados obtidos para o Cenário 1: Vazão de referência, mostram que embora as retiradas tenham nos últimos sete anos, o cenário apresentou-se mais vantajoso em atender às demandas requeridas, pois apesar das condições de restrições dos reservatórios, exigirem que as retiradas fossem feitas quando o volume estivesse acima de 1100 m^3/s, entre os anos de 1981 até 2009, boa parte das demandas foram atendidas. As captações só começaram a reduzir intensificamente em função da seca constatada em 2012.

O Cenário 2: Vazão ambiental/ecológica, foi mais restritivo em relação ao atendimento das demandas, uma vez que para garantia da manutenção dos estoques hídricos, limitou as captações de água dos usuários, principalmente a partir de 2013, onde a captações foram diminuindo. Os anos de 2015 e 2017 por exemplo, foram os mais afetados, atendendo apenas 2,5% e 5,7% das demandas, respectivamente.

As simulações realizadas para o Cenário 3 – Vazão de referência mostraram que apesar de apresentar um potencial conflito em relação às vazões de defluências e os volumes máximos de retiradas, foi o cenário mais coerente em relação à atual situação da bacia, uma vez que as retiradas cresceram na medida em que as demandas foram aumentado. Levando em conta a demanda atual e futura necessária, este cenário é o mais preocupante, uma vez que as vazões defluentes mínimas dos reservatórios no Submédio São Francisco estão limitadas a 1.300 m^3/s, e valores inferiores a esta vazão podem ocasionar diversos problemas nas captações de água da bacia.

6.2 RECOMENDAÇÕES

As informações pontuais das águas superficiais e dos reservatórios na região do Submédio São Francisco ainda são limitadas, principalmente onde estão localizados os reservatórios de Sobradinho e Itaparica, a maioria das estações climatológicas ou hidrológicas disponíveis pelos órgãos públicos contém falha. Isso provoca um desconhecimento da real situação hídrica da região, podendo subestimar ou superestimar as informações, além de interferir no planejamento das ações direcionadas à gestão dos recursos hídricos.

Portanto, buscar soluções para um monitoramento e gerenciamento adequados desses recursos, deverá ser prioridade dos órgãos gestores, uma vez que o conhecimento da distribuição temporal e espacial da chuva diária no país tem um impacto relevante para uma efetiva avaliação da disponibilidade hídrica, dentre outros recursos naturais disponíveis, principalmente em regiões onde a escassez de água sempre se fez presente.

Outra medida importante para a regulação do uso da água no Rio São Francisco, é a atualização do banco de dados de outorgas disponibilizado pelo Cadastro Nacional de Usuários de Recursos Hídricos (CNARH), que é de responsabilidade da ANA. As informações contidas no cadastro não contemplam a real situação quanto aos usuários de recursos hídricos (superficiais e subterrâneos) que captam água, lançam efluentes ou realizam demais interferências diretas em corpos hídricos.

Além disso, os órgãos competentes também devem disponibilizar informações dos programas de monitoramento da qualidade de água superficial e subterrânea realizadas na Bacia do São Francisco, principalmente quanto ao número de parâmetros analisados, uma vez que o compartilhamento desses dados ainda são bastante limitados.

Em relação à disponibilidade hídrica, as captações de água às margens dos reservatórios ou na calha do Rio São Francisco, devem ser adaptadas aos novos níveis decorrentes da redução das vazões defluentes. Recomenda-se que seja implantado um sistema de outorgas sazonais, ou seja, os limites de captações devem ser fixados conforme o nível dos cursos d'água, ao longo do ano, visando a garantia do uso igualitário de acesso à água, bem como quantidade mínima de vazão ecológica, fundamental à conservação do ecossistema fluvial.

No que se refere às medidas emergenciais tomadas pelo Governo, quanto às restrições das vazões mínimas defluentes para os reservatórios de água, independentemente da demanda existente a montante do reservatório, elas devem ser mantidas. Com estes artifícios, busca-se garantir a segurança hídrica dos reservatórios durante a crise hídrica e ajustar o gerenciamento de recursos hídricos com a realidade operacional e de infraestrutura existente na bacia.

Além dessas medidas, recomenda-se que o governo apoie as atividades de Pesquisa e Desenvolvimento de tecnologias e métodos capazes de proporcionar o manejo sustentável de uso da água e a conservação do solo de forma acessível a todos os usuários. Que haja incentivos institucionais e econômicos para disseminar boas práticas e hábitos de consumo hídrico sustentável.

Espera-se que o estudo possa servir de estímulo à reflexão e análise do tema, visto a importância da dinâmica climática na atual conjuntura mundial, podendo contribuir para a formulação de estudos futuros, mais abrangentes e em diferentes áreas da pesquisa, além de auxiliar os tomadores de decisão na elaboração de propostas que tenham por objetivos mitigar os efeitos das mudanças e variabilidades climáticas e na utilização dos recursos hídricos de forma sustentável.

REFERÊNCIAS

AGÊNCIA NACIONAL DE ÁGUAS. **Conjuntura dos recursos hídricos no Brasil 2010**: informe anual. Brasília: ANA, 2010. Disponível em: http://www.snirh.gov.br/portal/snirh/centrais-de-conteudos/conjuntura-dos-recursos-hidricos/conj2010_inf.pdf. Acesso em : 19 out. 2018.

ABRAMOWT, M. STEGUN, I. A. **Handbook of mathematical functions with formulas, graphs and graphs and mathematical tables**. New York: Dover Publications, 1965. 470 p. (United States Departament of Commerce. Dover Publications, 55).

ALBUQUERQUE, C. G.; MONTENEGRO, S. M. G L.; MONTENEGRO, A. A. A.; FONTES JÚNIOR, R. V. P. Recarga de aquífero aluvial sob uso agrícola. **Águas Subterrâneas**, v. 29, p. 6071, 2015.

ALBUQUERQUE, E. M. Análise do comportamento do NDVI e NDWI sob diferentes intensidades pluviométricas no município de Sousa-PB. **Revista Estudos Geoambientais,** Rio Tinto, n. 01, v. 01; jan-abr, 2014.

ANTUNES, A.F & LINGNAU, C. **Uso de índices de acurácia para avaliação de mapas temáticos obtidos por meio de classificação digital**. Publicado nos Anais da GIS Brasil, Curitiba. 1997. CDROM.

ARAUJO, L. E.; **Climatologia e vulnerabilidade socioeconômica e ambiental da bacia hidrográfica do rio Paraíba –** estudo de caso do açude Epitácio Pessoa (Boqueirão). 2010. Tese (Doutorado) - Programa da Pós-Graduação em Recursos Naturais, Universidade Federal de Campina Grande, Campina Grande – PB, 2010. 116 p.

ARAÚJO, D. R; SILVA, P. C .M; DIAS N. S; LIRA D. L. C. Estudo da área de preservação permanente do rio Mossoró no sítio urbano de Mossoró-RN por meio de técnicas de geoprocessamento. **Revista Caatinga,** v**.** 25, n. 2, p. 177-183, 2002.

ARNOLD, J. G; ENGEL, B. A. SIRINIVASAN, R. Continuous-time, grid cell watershad model. *In*: CONFERENCE SPOKANE, Washington, 1993. **Proceedings** [...]. Washington, 1993. p. 267-278.

ARNOLD, J. G.; ALLEN. P. M.; MUTTIAH, R. S.; BERNHARDT. Automated Base Flow Separation and Recession Analysis Techniques. **Ground Water**, v. 33, n. 6, p. 1010-1018, 1995.

ASSIS, J. M. O.; SOBRAL, M. C. M. ; SOUZA, W. M. Análise de detecção de variabilidades climáticas com base na precipitação nas bacias hidrográficas do sertão de Pernambuco. **Revista Brasileira de Geografia Física**, v. 5, p. 630-645, 2012.

ASSIS, J. M. O., Sobral, M. C. Impactos das projeções das mudanças climáticas na deficiência hídrica do solo no semiárido de Pernambuco. *In*: SIMPÓSIO ÍTALO-BRASILEIRO DE ENGENHARIA SANITÁRIA E AMBIENTAL, 12., 2014, Natal. **Anais** [...]. Natal, 2014.

ASSIS, J. M O. **Variabilidade do clima e cenários futuros de mudanças climáticas no trecho submédio da bacia hidrográfica do Rio São Francisco**. 2016. Tese (Doutorado) - Programa da Pós-Graduação em Engenharia Civil, Universidade Federal de Pernambuco, Recife, 2016. 187 p.

BARBOSA, H. A. **Análise espaço temporal de índice de vegetação AVHRR/NOAA e precipitação na região nordeste do Brasil em 1982-85**. 1999. Dissertação (Mestrado em Sensoriamento Remoto) - Instituto Nacional de Pesquisas Espaciais, São José dos Campos, 1999. 164 p.

BARDELIN. C. E. A. 2004. **Os efeitos do racionamento de energia elétrica ocorridos no Brasil em 2001 e 2002 com ênfase no consumo de energia elétrica**. 2004. Dissertação (Mestrado) - Escola Politécnica, Universidade de São Paulo, São Paulo, 2004. 113p.

BASTIAANSSEN, W. G. M. **Regionalization of surface flux densities and moisture indicators in composite terrain. a remote sensing approach under clear skies in mediterranean climates**. 1995. Thessis (land bouw), Universiteit Wageningen, Netherlands, 1995. p. 273.

BEZERRA, J. M. Parâmetros biofísicos obtidos por sensoriamento remoto em região semiárida do estado do Rio Grande do Norte, Brasil. **Revista Brasileira de Engenharia Agrícola e Ambiental**, v. 18, n. 1, p. 73 – 84, 2014.

BLAIN, G. C.; BRUNINI, O. Análise comparativa dos índices de seca de Palmer, Palmer adaptado e índice padronizado de precipitação no estado de São Paulo. **Revista Brasileira de Meteorologia,** v.22, n.1, p.105-111, 2007.

BRANCO, D. K. S. **Impactos da ferrovia transnordestina na exportação de manga e uva do Vale Submédio São Francisco**. 2014. Dissertação (Mestrado em Economia) - Centro Acadêmico do Agreste, Universidade Federal de Pernambuco, Caruaru, 2014.

BRASIL. **Lei Nº 9433, de 8 de janeiro de 1997**. Institui a Política Nacional de Recursos Hídricos, cria o Sistema Nacional de Gerenciamento de Recursos Hídricos, regulamenta o inciso XIX do art. 21 da Constituição Federal, e altera o art. 1º da Lei nº 8.001, de 13 de março de 1990, que modificou a Lei nº 7.990, de 28 de dezembro de 1989. Disponível em: http://www.planalto.gov.br/ccivil_03/LEIS/L9433.htm. Acesso em: 20 jan. 2019.

BRASIL. **Resolução ANA Nº 707, de 21 de Dezembro de 2004.** Dispõe sobre procedimentos de natureza técnica e administrativa a serem observados no exame de pedidos de outorga, e dá outras providências. Disponível em: http://arquivos.ana.gov.br/resolucoes/2004/707-2004.pdf. Acesso em: 20 jan. 2019.

BRASIL. **Resolução CONAMA Nº 357, de 17 de março de 2005**. Dispõe sobre a classificação dos corpos de água e diretrizes ambientais para o seu enquadramento, bem como estabelece as condições e padrões de lançamento de efluentes, e dá outras providências. Publicada no DOU nº 053, de 18/03/2005, págs. 58-63.

BRASIL. **Resolução CONAMA Nº 430, de 13 de maio de 2011**. Dispõe sobre as condições e padrões de lançamento de efluentes, complementa e altera a Resolução n 357, de 17 de

março de 2005, do Conselho Nacional do Meio Ambiente-CONAMA. Disponível em: http://www2.mma.gov.br/port/conama/legiabre.cfm?codlegi=646. Acesso em: 20 jan. 2019.

BRASIL. **Resolução ANA Nº 442, de abril de 2013**. Dispões sobre a redução temporária da descarga mínima defluente dos reservatórios de Sobradinho e Xingó, no rio São Francisco. Publicada no DOU nº 043. Disponível em: http://arquivos.ana.gov.br/resolucoes/2013/442-2013.pdf. Acesso em: 20 jan. 2019.

BRASIL. **Resolução ANA Nº 641, de 14 de Abril de 2014** . Dispõe sobre a reunião ordinária que trata da seca no semiárido brasileiro e os baixos níveis históricos dos Açudes Curema, Mãe D'Água e Itans. Disponível em: http://arquivos.ana.gov.br/resolucoes/2014/ANALegis/LEGISResolucao641-2014.pdf. Acesso em: 20 jan. 2019.

BRASIL. **Resolução ANA Nº 206, de 23 de março de 2015**. Dispõe sobre a redução temporária da descarga mínima defluente dos reservatórios de Sobradinho e Xingó, no rio São Francisco. Disponível em: http://agenciapeixevivo.org.br/wp-content/uploads/2011/12/images_arquivos_legislacaoambiental_federal_206_2015.pdf. Acesso em: 20 jan. 2019.

BRASIL. **Resolução ANA Nº 742, de 24 de abril de 2017**. Dispõe sobre a redução temporária da descarga mínima defluente dos reservatórios de Sobradinho e Xingó, no rio São Francisco. Disponível em: https://agenciapeixevivo.org.br/images/arquivos/legislacaoambiental/federal/742_2017.pdf. Acesso em: 20 jan. 2019.

BRASIL. **Resolução ANA Nº 51, de 26 de julho de 2018**. Dispõe sobre a redução temporária da descarga mínima defluente dos reservatórios de Sobradinho e Xingó, no rio São Francisco. Disponível em : http://arquivos.ana.gov.br/resolucoes/2018/0051-2018_Ato_Normativo.pdf?174843. Acesso em: 20 jan. 2019.

BUAINAIN, A. M.; GARCIA, J. R. Evolução recente do agronegócio no Cerrado Nordestino. **Estudos Sociedade e Agricultura** (UFRRJ), v. 23, p. 166-195, 2015.

BUSTAMANTE, P. M. A. C. A fruticultura no Brasil e no Vale do São Francisco: Vantagens e Desafios. Documentos Técnicos Científicos. **Revista Econômica do Nordeste**, v. 40, n. 01, jan.-mar. 2009.

BORGES, G. M; PACHÊCO, A. P; SANTOS, F. K. S. Sensoriamento Remoto: Avanços e Perspectivas. **Revista de Geografia** (UFPE) v. 32, n. 2, 2015.

COMPANHIA HIDRO ELÉTRICA DO SÃO FRANCISCO. **Redução temporária da vazão mínima do rio São Francisco para 900 m³/s, a partir da UHE Sobradinho**. 20º Relatório mensal de acompanhamento. Disponível em: https://www.chesf.gov.br/SistemaChesf/StyleLibraryCanal/GestaoRecursosHidricos/2015/RT-DORH%2016-%202015-ANA.pdf. Acesso em: 15 fev. 2019.

CAMPOS, J. N. B. **Um laboratório computacional de teoria da estocagem de águas**. Net.2003. Disponível em: www.deha.ufc.br/nilson. Acesso em: 20 jun. 2017.

CARVALHO, M. C. M. O. **Avaliação dos perímetros de irrigação na perspectiva da sustentabilidade da agricultura familiar no semiárido Pernambuco**. 2009. Tese (Doutorado) - Programa da Pós-Graduação em Engenharia Civil, Universidade Federal de Pernambuco, Recife, 2009.

COMITÊ DA BACIA HIDROGRÁFICA DO RIO SÃO FRANCISCO. **Plano de recursos hídricos da Bacia Hidrográfica do rio São Francisco 2016-2025**. RP2 – Diagnóstico consolidado da bacia hidrográfica do rio São Francisco. Relatório de diagnóstico, 2015b.

COMITÊ DA BACIA HIDROGRÁFICA DO RIO SÃO FRANCISCO. **A Bacia (do rio São Francisco). Net.** Belo Horizonte: CBHSF, [s.d.]. Disponível em: http://cbhsaofrancisco.org.br/a-bacia. Acesso em: 25 jul. 2017.

COELHO, V. H. R. **Estimativa da recarga subterrânea em bacia hidrográfica do semiárido pernambucano a partir de técnicas de sensoriamento remoto e sistemas de informações geográficas**. 2009. Tese (Doutorado) - Programa da Pós-Graduação em Engenharia Civil, Universidade Federal de Pernambuco, Recife, 2009.

COELHO, V. H. R.; MONTENEGRO, S. M. G. L.; ALMEIDA, C. N.; LIMA, E. R. V.; Ribeiro Neto, A.; MOURA, G. S. S. Dinâmica do uso e ocupação do solo em uma bacia hidrográfica do semiárido brasileiro. **Revista Brasileira de Engenharia Agrícola e Ambiental**, v.18, p.64-72, 2014.

COMPANHIA DE DESENVOLVIMENTO DOS VALES DO SÃO FRANCISCO E DO PARNAÍBA. **Relatório de Gestão do Exercício de 2016.** Brasília: CODEVASF, 2016. Disponível em: http://www2.codevasf.gov.br/empresa/auditoria-interna/processos-de-contas-anuais/relatorio_de_gestao_2016.pdf. Acesso em: 25 jul. 2017.

COMPANHIA DE DESENVOLVIMENTO DO VALE DO SÃO FRANCISCO**. Cadastro frutícola 1999 do Vale do São Francisco**. Brasília, DF: CODEVASF, 1999. Pailazul Multimídia. 1 CD-ROM.

CONRADT, T. et al., Impacts of global change on water-related sectors and society in a trans-boundary central European river basin – Part 2: from eco-hydrology to water demand management. **Adv. Geosci**., v. 11, p. 93-99, 2007.

CONRADT, T.; WECHSUNG, F.; BRONSTERT, A. Three perceptions of the evapotranspiration landscape: comparing spatial patterns from a distributed hydrological model, remotely sensed surface temperatures, and sub-basin water balances. **Hydrol. Earth Syst. Sci**., v. 17, n. 7, p. 2947-2966, 2013.

COMPANHIA DE PESQUISA DE RECURSOS MINERAIS. Serviço Geológico do Brasil. **Plano de ação estratégico em recursos hídricos no semiárido brasileiro**: convivência com a seca. Brasília, DF: CPRM, 20017. 25p.

COSTA J. N. ARAÚJO S. M. S. Congresso Internacional da Diversidade do Semiárido I. Anais. Campina Grande. 2016.

COSTA, J. C; OLIVEIRA, A.A; PAIVA, Y. S; SILVA, J. B. O. **Desenvolvimento Do Semiárido Brasileiro Pelo Programa Social de Cisternas P1MC**. *In:* CONGRESSO INTERNACIONAL DA UNIVERSIDADE DO SEMIÁRIDO, 2., 2017. Petrolina: CONIDIS, 2017.

CRÓSTA, A. P. **Processamento digital de imagens de sensoriamento remoto**. Campinas: OG/Unicamp, 1992.

CRUZ. R. C. **Prescrição de vazão ecológica: aspectos conceituais e técnicos para bacias com carência de dados**. 2005. 135f. Tese (Doutorado em Ecologia) - Instituto de Biociências, Universidade Federal do Rio Grande do Sul, Porto Alegre, 2005.

CUNHA T. J. F.; SILVA F. H. B.; SILVA V. G. P.; SÁ L. B.; NETO A. C. C. **Solos do Submédio do Vale do São Francisco:** potencialidades e limitações para uso agrícola. Petrolina, PE: Embrapa semiárido, 2008. (Documentos, 211). ISSN 1808-9992. 60 p.

CYSNE, A. P.; STUDART, T. M C.; LUNA, R. M. Vulnerabilidade de reservatórios superficiais às mudanças climáticas: o caso de rios com deflúvios anuais de alta variabilidade. **Rev. Tecnol. Fortaleza**, v. 33, n. 2, p. 133-144, dez. 2012.

DI PACE, F. T; SILVA, B. S; SILVA, V. P. R; SILVA, S. T. A. Mapeamento do saldo de radiação com imagens Landsat 5 e modelo de elevação digital. **Revista Brasileira de Engenharia Agrícola e Ambiental**, v.12, n.4, p.385–392, 2008.

DINHEIRO RURAL. **Região do Vale do São Francisco se destaca como polo produtor de fruticultura.** Net. 2016. Disponível em: https://www.dinheirorural.com.br . Acesso em: 22.10.2017.

DLUGOSZ, F. L; ROSOT, N. C; ROSOT, M. A. D; OLIVEIRA, I. M. M. Índice para a Avaliação de Segmentação de Imagens. **Revista Floresta**, Curitiba, PR, v. 39, n. 1, p. 131-143, 2009.

EMPRESA BRASILEIRA DE PESQUISA AGROPECUÁRIA. **Sistema brasileiro de classificação de solos**. 2 ed. Rio de Janeiro: EMBRAPA, 2006.

EUCLYDES, H. P; FERREIRA, P. A; FARIA FILHO, R. F. **Critério de outorga sazonal para a agricultura irrigada no estado de Minas Gerais.** Estudo de Caso. ITEM – Irrigação & Tecnologia Moderna, nº 71/72, 2006.

ORGANIZAÇÃO DAS NAÇÕES UNIDAS PARA ALIMENTAÇÃO E AGRICULTURA. **The State of World Fisheries and Aquaculture**, Net. 2010. Disponível em: http://www.fao.org/fishery/sofia/en. Acesso em: 09 mar. 2018.

FERNANDES, D. S.; HEINEMANN, A. B.; PAZ, R. L.; AMORIM, A. O.; CARDOSO, A. S. **Índice para a quantificação da seca**. Goiana, GO: EMBRAPA, 2009. p. 48. ISSN 1678-9644. (Documentos 244).

FERNANDES, M. R. M; MATRICARDI, E. A. T; ALMEIDA, A. Q. FERNANDES, M. M. Mudanças do Uso e de Cobertura da Terra na Região Semiárida de Sergipe**. Floresta e Ambiente**; v. 22, n. 4, p. 472-482, 2015.

FERREIRA, L. **Simulação hidrológica utilizando o modelo TOPMODEL em bacias rurais, estudo de caso na bacia do Ribeirão dos Marins –** seção Monjolinho – SP. (Tese de Doutorado).

FERREIRA, J. J; FERREIRA. M. J. Análise do albedo da superfície e de índices de vegetação por sensoriamento remoto na bacia hidrográfica do Rio Pacoti/CE. **Rev. Tecnologia.** e-ISSN: 2318-0730. Disponível em: doi: 10.5020/23180730.2018.8132 . Acesso em: 25 jan. 2018.

FUNDO NACIONAL DE MEIO AMBIENTE. **Experiências de desenvolvimento sustentável no bioma Caatinga**. Natal, RN: FMMA, 2006. 60p.

FOBES, C. K. A.; KIENZLI, S. W.; COBURN C. A. RASMUSSEN, J.; Simulating the hydrological response to predicted climate change on a watershed in southern Alberta. **Rev. Climatic Change**, v. 105, p. 555–576, 2011.

FONSECA, R. C., **Análise de índices de vegetação (NDVI e SAVI) no estudo da dinâmica geoespacial e espectro-temporal da vegetação de caatinga, cultura irrigada e solo exposto do município de Petrolina-PE**. Trabalho de conclusão apresentado ao Departamento de Engenharia Cartográfica e Agrimensura da Universidade Federal de Pernambuco – UFPE, Recife, 2017.

França M. C. F. **Cisterna de placas:** construção, uso e conservação**.** Secretaria dos Recursos Hídricos, (Cartilhas temáticas tecnologias e práticas hidroambientais para convivência com o Semiárido, 2). Fortaleza – CE, 2010. 33p.

FRIZZONE J. A. **Os métodos de irrigação**. São Carlos: ESALQ/USP, 2017. Disponível em: http://www.leb.esalq.usp.br/leb/disciplinas/Frizzone/LEB_1571/TEXTO_COMPLEMENTAR_1_-_METODOS_DE_IRRIGACAO.pdf. TEXTO_COMPLEMENTAR_1_-_METODOS_DE_IRRIGACAO.pdf>. Acesso em: 20 mai. 2018.

G. TSAKIRIS and H. VANGELIS. Towards a Drought Watch System based on Spatial SPI. **Water Resources Management,** v. 18, p. 1–12, 2004.

GLÓRIA, L. O; HORN, B. C; HILGERMANN, M. Avaliação da qualidade da água de bacias hidrográficas através da ferramenta do Índice de Qualidade da Água – IQA. **Caderno pedagógico,** Lajeado, v. 14, n. 1, p. 103-119, ISSN 1983-0882. 2017.

GODIM J. FIORESE. P A. ALVES. R. F. F. SOUZA. W. G. **A Seca atual no semiárido nordestino** – impactos sobre os recursos hídricos. Brasília-DF, 2017. v. 22, n. 44, p. 277-300.

LLOYD-HUGHES, B; SAUNDERS, M. A. A drought climatology for Europe. **Int. J. Climatol**., v. 22, p. 1571–1592, 2002. Disponível em: doi:10.1002/joc.846. Acesso em: : 09 mar. 2018.

HATTERMANN, F. F., Krysanova, V., , WECHSUNG. F, WATTENBACH. M. Integrating groundwater dynamics in regional hydrological modelling. **Environ Model Softw**. v. 19, n.11, p.1039–1051, 2004.

HATTERMANN, F. F., WATTENBACH, M., Krysanova, V., WECHSUNG, F. Runoff simulations on the macroscale with the ecohydrological model SWIM in the Elbe catchment—validation and uncertainty analysis**. Hydrol Process,** v. 19, p. 693–714, 2005.

HATTERMANN, F. F., KRYSANOVA, V., HABECK A., BRONSTERT. A Integrating wetlands and riparian zones in river basin modeling. **Ecol Model**., v. 199, p. 379–392, 2006.

HATTERMANN, F. F., GÖMANN H., CONRADT, T., KALTOFEN, M., KREINS P., WECHSUNG F. Impacts of global change on water-related sectors and society in a trans-boundary central European river basin— Part 1: project framework and impacts on agriculture. **Adv. Geosci.,** v. 11, p. 85–92, 2007.

HATTERMANN F. F., KRYSANOVA. V, POST, J., DWORAK T. H., LEIPPRAND, A., KADNER S., KABAT, P. Understanding consequences of climate change - the adaptiveness of IWRM, an analysis of European IWRM research. **IWA**, London, p. 89–112, 2008.

HATTERMANN, F. F., KUNDZEWICZ Z.W. Water framework directive: model supported implementation - a water manager's guide. **International Water Association,** London, p 282, 2010.

HATTERMANN, F. et al., Model-supported impact assessment for the water sector in Central Germany Under Climate Change - a case study. **Water Resources Management**, v. 25, n. 13, p. 3113-3134, 2011.

SISTEMA de geração de energia. Disponível em: https://www.chesf.gov.br/SistemaChesf/Pages/SistemaGeracao/LuizGonzaga.aspx. Acesso em: 20 mai. 2019.

HUANG, S.; KRYSANOVA, V.; HATTERMANN, F. Projection of low flow conditions in Germany under climate change by combining three RCMs and a regional hydrological model. **Acta Geophysica**, v. 61, n. 1, p. 151-193, 2013.

HUANG, S. et al., Simulation of spatiotemporal dynamics of water fluxes in Germany under climate change. **Hydrological Processes**, v. 24, n. 23, p. 3289-3306, 2010.

INSTITUTO BRASILEIRO DE GEOGRAFIA E ESTATÍSTICA. **Produção agrícola municipal 2015**. Brasília, DF.: IBGE, 2016. 59p.

INSTITUTO DE PESQUISA ECONÔMICA APLICADA. **A agricultura no nordeste brasileiro:** oportunidades e limitações ao desenvolvimento. Brasília, DF.: IPEA, 2012. ISSN 1415-4765.

JENSEN, J. R. **Sensoriamento remoto do ambiente:** uma perspectiva em recursos terrestres. São José dos Campos, SP: Parêntese, 2009. 598p.

KRYSANOVA, V.; HABERLANDT, U. Assessment of nitrogen leaching from arable land in large river basins: Part I. Simulation experiments using a process-based model, **Ecological Modelling**, v. 150, n. 3, p. 255-275, 2002.

LOPEZ-URREA, R. et al., Testing evapotranspiration equations using lysimeter observations in a semiarid climate, **Agricultural Water Management**, v. 85, 2006.

MARENGO J. A., R. JONES, L, ALVES, M. VALVERDE. Future change of temperature and precipitation extremes in South America as derived from the PRECIS regional climate modeling system. **International Journal of Climatology** (In press), 2009.

MARENGO, J. A. LINCOLN, M. A. BESERRA, E. A. LACERDA. F. F. Variabilidade e mudanças climáticas no semiárido brasileiro. *In*: INSTITUTO NACIONAL DO SEMIÁRIDO. **Desertificação e mudanças climáticas no semiárido**. Campina Grande, PB: INSA, 2011.

MEDEIROS. Y. D. P.; PINTO. I. M.; STIFELMAN. G. M.; FARIA. A.S. F; PELLI. J. C. S.; RODRIGUES. R. F.; SILVA. E. R.; COSTA. T.; BOCCACIO. M. X.; SILVA. E. B. G. Participação Social no Processo de Alocação de Água. no Baixo Curso do Rio São Francisco. *In*: UNIVERSIDADE FEDERAL DA BAHIA. **Estudo do regime de vazão ecológica para o Baixo curso do rio São Francisco:** uma abordagem multicriterial. Salvador, BA: UFBA, 2010. (Projeto 3.1).

MEDEIROS, R. M.; FRANCISCO, P. R. M.; BANDEIRA, M. M. Balanço hídrico climatológico, em decorrência do aquecimento global, no município de Picuí - semiárido paraibano. **Revista Brasileira de Geografia Física,** Recife, v. 1, 2012.

MINISTÉRIO DA AGRICULTURA, PECUÁRIA E ABASTECIMENTO. **Informativo sobre a Estiagem no Nordeste** - nº 115, de 31 de dezembro de 2017. Brasília, DF: MAPA, 2017. Disponível em: http://www.agricultura.gov.br/assuntos/politica-agricola/combate-a-seca-1/arquivos-combate-a-seca/InformativoestiagemNE115.pdf. Acesso em: 20 mai. 2019.

NÚCLEO DE ASSUNTOS ESTRATÉGICOS DA PRESIDÊNCIA DA REPÚBLICA NAE. Mudança do Clima Negociações Internacionais Sobre a Mudança de Clima: Vulnerabilidade, Impactos e Adaptação á Mudança de Clima**. Cadernos**, Brasília-DF, v. 1, n. 3, 2005.

NASCIMENTO, J. S. **Competitividade das exportações brasileiras de frutas:** uma análise a partir dos obstáculos comerciais encontrados na União Europeia. 2001. Dissertação (Mestrado em Economia) - Universidade Federal da Paraíba, João Pessoa, 2001. 92p.

NĚMEČKOVÁ, S.; SLÁMOVÁ, R.; ŠÍPEK, V**.** Climate change impact assessment on various components of the hydrological regime of the Malše River basin. **Journal of Hydrology and Hydromechanics**, v. 59, n. 2, p. 131, 2011.

NOVO, E M. L. de M. **Sensoriamento remoto:** princípios e aplicações. 3. ed. São Paulo: Blucher, 2008. 388 p.

NÓBREGA, R.S.; FARIAS, R.F.L.; DOS SANTOS, C.A. Variabilidade temporal e espacial da precipitação pluviométrica em Pernambuco através de índices de extremos climáticos. **Revista brasileira de meteorologia**, v.30, n.2, p. 171-180, 2015.

OLIC, N. B. Brasil: exportações frutificando. **Revista Pangea** – Quinzenário de Política, Economia e Cultura. Net. 2005. Disponível em: http://www.clubemundo.com.br/revistapangea/show-news.asp?. Acesso em: 1 out. 2018.

OLIVEIRA, D. B. S. de.; et. al. A questão hídrica no semiárido paraibano: conflitos pelo uso da água e as tecnologias sociais hídricas. *In*: JORNADA DO TRABALHO, 15., 2011, Curitiba, PR. **Anais** [...]. Curitiba-PR, 2011.

OLIVEIRA, L. M. M. O**. Estimativa da evapotranspiração real por sensoriamento remoto na bacia do rio Tapacurá – PE.** Tese (Doutorado em Engenharia Civil) – Centro de Tecnologia e Geociências, Universidade Federal de Pernambuco, Recife, 2012. 136p.

OPERADOR NACIONAL DO SISTEMA ELÉTRICO. **Plano da operação energética 2016/2020 PEN 2016**. Sumário Executivo. Rio de Janeiro: ONS, 2016.

OPERADOR NACIONAL DO SISTEMA ELÉTRICO. **Situação dos Principais Reservatórios do Brasil**. Net. 2015. Rio de Janeiro: ONS, 2015. Disponível em http://www.ons.org.br/resultados_operacao/boletim_diario/. Acesso em: 10 set. 2019.

PAINEL BRASILEIRO DE MUDANÇAS CLIMÁTICAS. **Contribuição do grupo de trabalho 2 ao primeiro relatório de avaliação nacional do painel brasileiro de mudanças climáticas**. Sumário Executivo do GT2. Rio de Janeiro: PBMC, 2013.

PERES, J. M. **Avaliação da qualidade da água da água do Rio São Francisco nos municípios de Petrolina – PE e Juazeiro – BA**. 2012. Tese (Doutorado) - Programa da Pós-Graduação em Engenharia Civil, Universidade Federal de Pernambuco, Recife, 2012.

RIZZI, R. LOPES, P. MALDONADO, F. **Influência dos fenômenos "El Niño" e "La Niña" no rendimento da cultura da soja no RS**. Trabalho Final de Análise Espacial. São José dos Campos, 2001.

ROSEGRANT, M. W.; CAI, X.; CLINE, S. A. **Global water outlook to 2025:** averting an impending crisis. Washington, DC: International Food Policy Research Institute; International Water Management Institute, 2002. 28 p.

ROSENFIELD, G. H., AND K. FITZPATRICK-LINS. A Coefficient of Agreement as a Measure of Thematic Classification Accuracy. **Photogrammetric Engineering and Remote Sensing**, v. 52, n.2, p. 223-227, 1986.

ROUSE J. W.; HAAS Jr, R. H.; SCHELL J. A. and D. W. DEERING. **Monitoring vegetation systems in the Great Plains with ERTS.** Proceedings of the Third ERTS Symposium, NASA SP-351. Washington, DC: NASA, 1973. v. I, p. 309–317.

SAMBUICHI, R. H. R. **A sustentabilidade ambiental da agropecuária brasileira:** impactos, políticas públicas e desafios. Rio de Janeiro: IPEA, 2012.

SANTOS, E. B; SILVA, D. G. S; PAES, H. M. F; SOUZA, E. F. **Irrigação por gotejamento**. Niterói: Programa Rio Rural, 2012. (Manual Técnico, 32). ISSN 1983-5671.

SANTOS, J. Y. G. Assessment of land use change on the streamflow using GIS, remote sensing and physically-based model**. IAHS-AISH Publication**, v. 368, p. 232–239, 2014.

SISTEMA E ANÁLISE DAS INFORMAÇÕES DE COMÉRCIO EXTERIOR. **(ALICEWeb) vários anos.** Net. 2010. Disponível em: http://desenvolvimento.aliceweb.gov.br. Acesso em: 10 set. 2016.

SECRETARIA DE CIÊNCIA TECNOLOGIA E MEIO AMBIENTE. **Atlas de bacias hidrográficas de Pernambuco.** Recife: SECTMA, 2006. 104p.

SILVA, D. F. S.; SOUSA, A. B.; MAIA, L. M.; RUFINO, L. L. Efeitos da associação de eventos de ENOS e ODP sobre o Estado do Ceará**. Revista de Geografia**, v.29, n.2, 2012.

SILVA, E. A; FERREIRA R. L. C; SILVA, J. A. A; SÁ, I. B. DUARTE S. M. A. Dinâmica do uso e cobertura da terra do município de Floresta - PE. **Floresta**, v. 43, n. 4, p. 611-620, 2013. Disponível em: http://dx.doi. org/10.5380/rf.v43i4.27931. Acesso em: 25 fev. 2019.

SILVA, A. L. C. U**tilização do modelo swim para análise da evapotranspiração de referência diária na bacia hidrográfica de Gameleira-Pernambuco**. 2014. Dissertação (Mestrado) – Programa de Pós-Graduação em Engenharia Civil, Universidade Federal de Pernambuco. 2014.

SILVA, A. M.; SILVA, R. M.; SILVA, B. B. **Estimativa de parâmetros biofísicos em diferentes tipos de uso e ocupação do solo no semiárido paraibano**. Trabalho apresentado no XXVI Congresso Brasileiro de Cartografia, V Congresso Brasileiro de Geoprocessamento, XXV Exposicarta, Gramado, RS, 2014.

SILVA JUNIOR, O. M.; FUCKNER, M.A. **Análise comparativa dos dados de NDVI obtidos de imagens TM/Landsat 5 na área urbana da cidade de Marabá – PA para os anos de 1984 e 200**7. Disponível em: http://www.anppas.org.br/encontro4/cd/ARQUIVOS/GT8-676-363-20080509120947.pdf. Acesso em: 08 jun. 2019.

SOBRAL, M. C. M; CARVALHO, R. M. C. M. O; SILVA, M. M.; MELO, G. L. Uso e Ocupação do Solo no Entorno de reservatórios no Semiárido brasileiro como fator determinante da Qualidade da Água. *In*: CONGRESSO INTERNACIONAL DE ENGENHARIA SANTITÁRIA E AMBIENTAL, 2006, Punta Del Leste. **Anais** [...]. Punta Del Leste: AIDIS, 2006.

SPEED. R.;LI. Y.; LE QUESNE. T.; PEGRAM. G.; ZHIWEI. Z. **Basin Water Allocation Planning**. Principles. procedures and approaches for basin allocation planing. Paris: UNESCO, 2013.

STEYAERT, L.T. A perspective on the state of environmental simulation modeling. *In*: GOODCHILD, M.F.; PARKS, B.O.; STEYAERT, L.T. (eds.). **Environmental modeling with GIS**. New York: Oxford University Press, 1993. cap. 3, p. 16-30.

SUAREZ, A. F.; CANDEIAS, A. L. B. Avaliação de acurácia de dados de sensoriamento remoto para o município de Maragogipe. *In*: SIMPÓSIO BRASILEIRO DE CIÊNCIAS GEODÉSICAS E TECNOLOGIA DA GEOINFORMAÇÃO, 4., Recife, 2012. p. 1-10. Disponível em: https://www.ufpe.br/cgtg/SIMGEOIV/CD/artigos/SReFOTO/172_4.pdf. Acesso em: 13 nov. 2018.

TEIXEIRA, A. H. C. Determining regional actual evapotranspiration of irrigated crops and natural vegetation in the São Francisco river basin (Brazil) using remote sensing and Penman-Monteith equation, **Remote Sensing,** v.2, p.1287-1319, 2010.

TONKAZ, T. Spatio-Temporal Assessment of Historical Droughts using SPI with GIS in GAP Region, Turkey, **Journal of Applied Sciences**, v. 6, p. 2565-2571, 2006.

APÊNDICE A – MATRIZ DE ERRO

Tabela 13. Matriz de erro gerada para o recorte 1988_217_66

Kappa: 95,62% e **Acurácia**: 97,61%

Classes	Água	Caatinga densa	Caatinga rala	Áreas antrópicas não agrícolas	Áreas antrópicas agrícolas	Soma linha
Água	73763	0	0	0	0	73763
Caatinga densa	0	456437	440	291	4501	461669
Caatinga rala	0	22	124634	0	0	124656
Áreas antrópicas não agrícolas	319	6263	611	33272	979	41444
Áreas antrópicas agrícolas	40	3234	1	554	17741	21570
Soma coluna	74122	465956	125686	34117	23221	723102

Tabela 14. Matriz de erro gerada para o recorte 1988_217_67

Kappa: 96,72% e **Acurácia**: 98,93%

Classes	Água	Caatinga densa	Caatinga rala	Áreas antrópicas não agrícolas	Áreas antrópicas agrícolas	Soma linha
Água	138080	0	0	0	0	138080
Caatinga densa	0	674125	39	0	117	674281
Caatinga rala	0	2621	6396	17	0	9034
Áreas antrópicas não agrícolas	63	3915	32	4840	59	8909
Áreas antrópicas agrícolas	0	2172	0	13	11891	14076
Soma coluna	138143	682833	6467	4870	12067	844380

Tabela 15. Matriz de erro gerada para o recorte 1988_218_66

Kappa: 97,23% e **Acurácia**: 98,86%

Classes	Água	Caatinga densa	Caatinga rala	Áreas antrópicas não agrícolas	Áreas antrópicas agrícolas	Soma linha
Água	83594	48	0	0	0	83642
Caatinga densa	1	502624	1338	1	155	504119
Caatinga rala	0	710	56322	6	0	57038
Áreas antrópicas não agrícolas	21	2560	81	23066	9	25737
Áreas antrópicas agrícolas	30	2640	0	79	392	3141
Soma coluna	83646	508582	57741	23152	556	673677

Tabela . 16. Matriz de erro gerada para o recorte 1988_218_67

Kappa: 98,82% e **Acurácia**: 99,34%

Classes	Água	Caatinga densa	Caatinga rala	Áreas antrópicas não agrícolas	Áreas antrópicas agrícolas	Soma linha
Água	550185	1	0	0	0	550186
Caatinga densa	111	301986	1630	25	40	303792
Caatinga rala	5	182	69903	184	0	70274
Áreas antrópicas não agrícolas	0	1157	310	23628	12	25107
Áreas antrópicas agrícolas	270	2286	11	32	1239	3838
Soma coluna	550571	305612	71854	23869	1291	953197

Tabela 17. Matriz de erro gerada para o recorte 1993_216_66

Kappa: 97,8% e **Acurácia**: 98,43%

Classes	Água	Caatinga densa	Caatinga rala	Áreas antrópicas não agrícolas	Áreas antrópicas agrícolas	Soma linha
Água	97558	0	20	0	0	97578
Caatinga densa	0	116943	4592	79	15	121629
Caatinga rala	11	931	250690	126	0	251758
Áreas antrópicas não agrícolas	0	564	1714	138721	49	141048
Áreas antrópicas agrícolas	116	613	48	768	1743	3288
Soma coluna	97685	119051	257064	139694	1807	615301

Tabela 18. Matriz de erro gerada para o recorte 1993_217_66

Kappa: 98,0% e **Acurácia**: 98,71%

Classes	Água	Caatinga densa	Caatinga rala	Áreas antrópicas não agrícolas	Áreas antrópicas agrícolas	Soma linha
Água	69899	0	0	0	0	69899
Caatinga densa	0	158893	845	2	40	159780
Caatinga rala	0	70	76488	0	0	76558
Áreas antrópicas não agrícolas	187	1792	706	9183	20	11888
Áreas antrópicas agrícolas	0	462	3	32	3191	3688
Soma coluna	**70086**	**161217**	**78042**	**9217**	**3251**	**321813**

Tabela 19. Matriz de erro gerada para o recorte 1993_217_67

Kappa: 99,2% e **Acurácia**: 99,46%

Classes	Água	Caatinga densa	Caatinga rala	Áreas antrópicas não agrícolas	Áreas antrópicas agrícolas	Soma linha
Água	121309	0	0	0	0	121309
Caatinga densa	0	136850	91	159	60	137160
Caatinga rala	0	69	17726	41	3	17839
Áreas antrópicas não agrícolas	76	780	103	42267	19	43245
Áreas antrópicas agrícolas	6	304	2	55	10275	10642
Soma coluna	121391	138003	17922	42522	10357	330195

Tabela 20. Matriz de erro gerada para o recorte 1993_218_66

Kappa: 96,0% e **Acurácia**: 96.60%

Classes	Água	Caatinga densa	Caatinga rala	Áreas antrópicas não agrícolas	Áreas antrópicas agrícolas	Soma linha
Água	105708	1498	3864	31	49	111150
Caatinga densa	997	178966	483	21	935	181402
Caatinga rala	59	331	198069	66	0	198525
Áreas antrópicas não agrícolas	504	350	1272	18876	137	21139
Áreas antrópicas agrícolas	1102	1164	1089	943	4257	8555
Soma coluna	108370	182309	204777	19937	5378	520771

Tabela 21. Matriz de erro gerada para o recorte 1993_218_67

Kappa:97,0 % e **Acurácia**:96,7 %

Classes	Água	Caatinga densa	Caatinga rala	Áreas antrópicas não agrícolas	Áreas antrópicas agrícolas	Soma linha
Água	713607	0	33	0	0	713640
Caatinga densa	0	227797	23642	2403	1	253843
Caatinga rala	3	5067	575930	30	0	581030
Áreas antrópicas não agrícolas	21	1471	804	26677	18	28991
Áreas antrópicas agrícolas	26	2	4	255	1044	1331
Soma coluna	713657	304337	532413	27365	1063	1578835

Tabela 22. Matriz de erro gerada para o recorte 1998_216_66

Kappa: 96,02% e **Acurácia**: 97,38%

Classes	Água	Caatinga densa	Caatinga rala	Áreas antrópicas não agrícolas	Áreas antrópicas agrícolas	Soma linha
Água	64705	0	9	0	0	64714
Caatinga densa	0	171380	4394	1	238	176013
Caatinga rala	0	4634	244911	72	1	249618
Áreas antrópicas não agrícolas	0	87	1958	45596	518	48159
Áreas antrópicas agrícolas	59	971	798	488	1744	4060
Soma coluna	64764	177072	252070	46157	2501	542564

Tabela 23. Matriz de erro gerada para o recorte 1998_217_66

Kappa: 98,65% e **Acurácia**: 99,31%

Classes	Água	Caatinga densa	Caatinga rala	Áreas antrópicas não agrícolas	Áreas antrópicas agrícolas	Soma linha
Água	151825	0	0	0	0	151825
Caatinga densa	0	33604	1730	0	7	35341
Caatinga rala	0	179	338480	0	0	338659
Áreas antrópicas não agrícolas	207	263	558	3686	7	4721
Áreas antrópicas agrícolas	1	68	636	18	2604	3327
Soma coluna	152033	34114	341404	3704	2618	533873

Tabela 24. Matriz de erro gerada para o recorte 1998_217_67

Kappa: 96,39% e **Acurácia**: 97,99%

Classes	Água	Caatinga densa	Caatinga rala	Áreas antrópicas não agrícolas	Áreas antrópicas agrícolas	Soma linha
Água	165018	0	0	0	0	165018
Caatinga densa	0	27877	2824	33	0	30734
Caatinga rala	0	1620	44793	35	0	46448
Áreas antrópicas não agrícolas	203	313	168	14001	22	14707
Áreas antrópicas agrícolas	0	2	0	84	6417	6503
Soma coluna	165221	29812	47785	14153	6439	263410

Tabela 25. Matriz de erro gerada para o recorte 1998_218_66

Kappa: 97,04% e **Acurácia**: 98,06%

Classes	Água	Caatinga densa	Caatinga rala	Áreas antrópicas não agrícolas	Áreas antrópicas agrícolas	Soma linha
Água	65318	32	0	0	0	65350
Caatinga densa	0	133430	1816	2	10	135258
Caatinga rala	0	2527	75174	103	1	77805
Áreas antrópicas não agrícolas	0	156	466	5746	60	6428
Áreas antrópicas agrícolas	7	305	6	94	3027	3439
Soma coluna	65325	136450	77462	5945	3098	288280

Tabela 26. Matriz de erro gerada para o recorte 1998_218_67

Kappa: 97,71% e **Acurácia**: 98,66%

Classes	Água	Caatinga densa	Caatinga rala	Áreas antrópicas não agrícolas	Áreas antrópicas agrícolas	Soma linha
Água	420474	1	0	0	0	420475
Caatinga densa	1	86835	3275	3	1	90115
Caatinga rala	0	6482	642638	67	0	649187
Áreas antrópicas não agrícolas	0	135	5890	43190	4	49219
Áreas antrópicas agrícolas	14	156	127	145	4478	4920
Soma coluna	420489	93609	651930	43405	4483	1213916

Tabela 27. Matriz de erro gerada para o recorte 2006_216_66

Kappa:97,21 % e **Acurácia**: 97,98%

Classes	Água	Caatinga densa	Caatinga rala	Áreas antrópicas não agrícolas	Áreas antrópicas agrícolas	Soma linha
Água	118604	0	30	1	0	118635
Caatinga densa	300	153222	2000	9	55	155586
Caatinga rala	3	3120	147648	182	0	150953
Áreas antrópicas não agrícolas	40	205	2672	52642	6	55565
Áreas antrópicas agrícolas	0	1011	16	129	1958	3114
Soma coluna	118947	157558	152366	52963	2019	483853

Tabela 28. Matriz de erro gerada para o recorte 2006_217_66

Kappa:98,47 % e **Acurácia**: 98,9%

Classes	Água	Caatinga densa	Caatinga rala	Áreas antrópicas não agrícolas	Áreas antrópicas agrícolas	Soma linha
Água	105904	0	0	0	0	105904
Caatinga densa	0	89208	1102	40	86	90436
Caatinga rala	0	153	175275	28	0	175456
Áreas antrópicas não agrícolas	38	164	2110	46877	126	49315
Áreas antrópicas agrícolas	0	754	23	221	16789	17787
Soma coluna	105942	90279	178510	47166	17001	438898

Tabela 29. Matriz de erro gerada para o recorte 2006_217_67

Kappa: 93,54% e **Acurácia**: 95,8%

Classes	Água	Caatinga densa	Caatinga rala	Áreas antrópicas não agrícolas	Áreas antrópicas agrícolas	Soma linha
Água	174673	0	0	0	0	174673
Caatinga densa	0	245838	11337	3	125	257303
Caatinga rala	0	16612	376047	998	6	393663
Áreas antrópicas não agrícolas	274	835	5218	5608	8	11943
Áreas antrópicas agrícolas	0	124	142	31	12373	12670
Soma coluna	174947	263409	392744	6640	12512	850252

Tabela 30. Matriz de erro gerada para o recorte 2006_218_66

Kappa: 98,96% e **Acurácia**: 99,31%

Classes	Água	Caatinga densa	Caatinga rala	Áreas antrópicas não agrícolas	Áreas antrópicas agrícolas	Soma linha
Água	142118	0	0	0	0	142118
Caatinga densa	0	91386	507	3	12	91908
Caatinga rala	0	535	62065	3	0	62603
Áreas antrópicas não agrícolas	28	303	513	12916	13	13773
Áreas antrópicas agrícolas	46	66	97	37	1659	1905
Soma coluna	142192	92290	63182	12959	1684	312307

Tabela 31. Matriz de erro gerada para o recorte 2006_218_67

Kappa: 98,68% e **Acurácia**: 99,37%

Classes	Água	Caatinga densa	Caatinga rala	Áreas antrópicas não agrícolas	Áreas antrópicas agrícolas	Soma linha
Água	626736	0	0	0	18	626754
Caatinga densa	0	172342	1017	1	6	173366
Caatinga rala	0	1172	62970	846	2	64990
Áreas antrópicas não agrícolas	1648	64	434	32622	0	34768
Áreas antrópicas agrícolas	26	406	6	10	3092	3540
Soma coluna	628410	173984	64427	33479	3118	903418

Tabela 32. Matriz de erro gerada para o recorte 2013_216_66

Kappa: 96,0% e **Acurácia**: 96,55%

Classes	Água	Caatinga densa	Caatinga rala	Áreas antrópicas não agrícolas	Áreas antrópicas agrícolas	Soma linha
Água	55628	0	2	1	6	55637
Caatinga densa	4	129511	1161	274	549	131499
Caatinga rala	118	8103	459120	959	822	469122
Áreas antrópicas não agrícolas	6	935	631	162046	675	164293
Áreas antrópicas agrícolas	422	1436	1265	1269	28036	32428
Soma coluna	56178	139985	462179	164549	30088	852979

Tabela 33. Matriz de erro gerada para o recorte 2013_217_66

Kappa: 94,56% e **Acurácia**:96,61 %

Classes	Água	Caatinga densa	Caatinga rala	Áreas antrópicas não agrícolas	Áreas antrópicas agrícolas	Soma linha
Água	53496	0	0	0	0	53496
Caatinga densa	0	244952	2335	30	369	247686
Caatinga rala	0	3087	60709	516	180	64492
Áreas antrópicas não agrícolas	497	881	1215	31233	1591	35417
Áreas antrópicas agrícolas	83	3056	294	624	30775	34832
Soma coluna	54076	251976	64553	32403	32915	435923

Tabela 34. Matriz de erro gerada para o recorte 2013_217_67

Kappa:92,54 % e **Acurácia**: 94,37%

Classes	Água	Caatinga densa	Caatinga rala	Áreas antrópicas não agrícolas	Áreas antrópicas agrícolas	Soma linha
Água	157341	0	0	0	0	157341
Caatinga densa	0	143647	11748	189	73	155657
Caatinga rala	0	6485	147745	5903	134	160267
Áreas antrópicas não agrícolas	211	746	5794	72145	374	79270
Áreas antrópicas agrícolas	0	691	122	138	25200	26151
Soma coluna	157552	151569	165409	78375	25781	578686

Tabela 35. Matriz de erro gerada para o recorte 2013_218_66

Kappa: 97,73% e **Acurácia**: 98,44%

Classes	Água	Caatinga densa	Caatinga rala	Áreas antrópicas não agrícolas	Áreas antrópicas agrícolas	Soma linha
Água	85858	0	0	0	0	85858
Caatinga densa	4	83462	1167	21	0	84654
Caatinga rala	0	221	41506	49	0	41776
Áreas antrópicas não agrícolas	389	1197	306	14512	0	16404
Áreas antrópicas agrícolas	119	73	26	14	1384	1616
Soma coluna	86370	84953	43005	14596	1384	230308

Tabela 36. Matriz de erro gerada para o recorte 2013_218_67

Kappa: 97,0% e **Acurácia**: 97,06%

Classes	Água	Caatinga densa	Caatinga rala	Áreas antrópicas não agrícolas	Áreas antrópicas agrícolas	Soma linha
Água	592881	0	0	0	0	592881
Caatinga densa	2686	331455	6628	174	132	341075
Caatinga rala	0	3952	202453	1188	40	207633
Áreas antrópicas não agrícolas	26	1852	291	35013	64	37246
Áreas antrópicas agrícolas	3616	1356	79	164	5153	10368
Soma coluna	599209	338615	209451	36539	5389	1189203

Tabela 37. Matriz de erro gerada para o recorte 2018_216_66

Kappa: 95,82% e **Acurácia**:97,81 %

Classes	Água	Caatinga densa	Caatinga rala	Áreas antrópicas não agrícolas	Áreas antrópicas agrícolas	Soma linha
Água	79487	3927	446	1	8	83869
Caatinga densa	454	125123	838	1	211	126627
Caatinga rala	2118	14738	1210984	4958	90	1232888
Áreas antrópicas não agrícolas	157	916	6887	246625	511	255096
Áreas antrópicas agrícolas	248	721	1732	3044	28143	33888
Soma coluna	82464	145425	1220887	254629	28963	1732368

Tabela 38. Matriz de erro gerada para o recorte 2018_217_66

Kappa: 95,41% e **Acurácia**: 97,0%

Classes	Água	Caatinga densa	Caatinga rala	Áreas antrópicas não agrícolas	Áreas antrópicas agrícolas	Soma linha
Água	132762	0	0	3	2	132767
Caatinga densa	0	453467	6540	4176	781	464964
Caatinga rala	0	694	405879	2053	1205	409831
Áreas antrópicas não agrícolas	910	5535	6121	186315	6241	205122
Áreas antrópicas agrícolas	30	3161	1982	3694	67675	76542
Soma coluna	133702	462857	420522	196241	75904	1289226

Tabela 39. Matriz de erro gerada para o recorte 2018_217_67

Kappa: 95,38% e **Acurácia**:97,5%

Classes	Água	Caatinga densa	Caatinga rala	Áreas antrópicas não agrícolas	Áreas antrópicas agrícolas	Soma linha
Água	184271	0	0	0	0	184271
Caatinga densa	0	338142	7937	181	64	346324
Caatinga rala	0	6397	732562	8183	541	747683
Áreas antrópicas não agrícolas	822	4324	7112	131313	3165	146736
Áreas antrópicas agrícolas	10	313	2287	4331	55191	62132
Soma coluna	185103	349176	749898	144008	58961	1487146

Tabela 40. Matriz de erro gerada para o recorte 2018_218_66

Kappa: 91,62% e **Acurácia**:93,79 %

Classes	Água	Caatinga densa	Caatinga rala	Áreas antrópicas não agrícolas	Áreas antrópicas agrícolas	Soma linha
Água	139489	0	0	0	0	139489
Caatinga densa	0	93663	5541	2321	60	101585
Caatinga rala	0	4503	59731	3032	567	67833
Áreas antrópicas não agrícolas	23	1860	2739	53934	689	59245
Áreas antrópicas agrícolas	466	137	794	1117	13270	15784
Soma coluna	139978	100163	68805	60404	14586	383936

Tabela 41. Matriz de erro gerada para o recorte 2018_218_67

Kappa: 89,14 % e **Acurácia**: 92,58%

Classes	Água	Caatinga densa	Caatinga rala	Áreas antrópicas não agrícolas	Áreas antrópicas agrícolas	Soma linha
Água	400040	27	0	11	2	400080
Caatinga densa	1778	350095	37412	5576	700	395561
Caatinga rala	5	63888	1057981	21014	1883	1144771
Áreas antrópicas não agrícolas	679	7783	20748	333713	2083	365006
Áreas antrópicas agrícolas	368	939	1051	8199	30444	41001
Soma coluna	402870	422732	1117192	368513	35112	2346419