



UNIVERSIDADE ESTADUAL PAULISTA
"JÚLIO DE MESQUITA FILHO"
Campus de Botucatu



DANIELA PATRICIA GUZMÁN ROJO

**METODOLOGIA PARA ANÁLISE DE RECARGA POTENCIAL
EM ÁREAS DE AFLORAMENTO DO AQUÍFERO GUARANÍ NO
ESTADO DE SÃO PAULO**

Botucatu

2022

DANIELA PATRICIA GUZMÁN ROJO

**METODOLOGIA PARA ANÁLISE DE RECARGA POTENCIAL
EM ÁREAS DE AFLORAMIENTO DO AQUÍFERO GUARANÍ NO
ESTADO DE SÃO PAULO**

Tese apresentada à Faculdade de Ciências
Agronômicas da Unesp Câmpus de
Botucatu-SP, para obtenção do título de
Doutor em Irrigação e Drenagem

Orientador: Alexandre Dal Pai

Botucatu

2022

G993m Guzmán-Rojo, Daniela Patricia
Metodologia para análise de recarga potencial em áreas de
afloramiento do aquífero Guaraní no estado de São Paulo / Daniela
Patricia Guzmán-Rojo. -- Botucatu, 2022
114 p. : il., tabs.

Tese (doutorado) - Universidade Estadual Paulista (Unesp),
Faculdade de Ciências Agrônômicas, Botucatu
Orientador: Alexandre Dal Pai

1. Água Conservação. 2. Aquíferos. 3. Imagens de sensoriamento
remoto. I. Título.

Sistema de geração automática de fichas catalográficas da Unesp. Biblioteca da Faculdade de
Ciências Agrônômicas, Botucatu. Dados fornecidos pelo autor(a).

Essa ficha não pode ser modificada.

CERTIFICADO DE APROVAÇÃO

TÍTULO DA TESE: METODOLOGIA PARA ANÁLISE DE RECARGA POTENCIAL EM ÁREAS DE AFLORAMENTO DO AQUIFERO GUARANÍ NO ESTADO DE SÃO PAULO

AUTORA: DANIELA PATRICIA GUZMAN ROJO

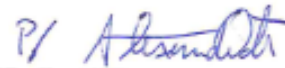
ORIENTADOR: ALEXANDRE DAL PAI

Aprovada como parte das exigências para obtenção do Título de Doutora em AGRONOMIA (IRRIGAÇÃO E DRENAGEM), pela Comissão Examinadora:

Prof. Dr. ALEXANDRE DAL PAI (Participação Virtual)
Bioprocessos e Biotecnologia / FCA UNESP Botucatu



Prof. Dr. RAUL ANDRES MARTINEZ URIBE (Participação Virtual)
Engenharia de Biosistemas / Faculdade de Ciências e Engenharia - UNESP - Tupã/SP



Prof. Dr. ÉRICO TADAO TERAMOTO (Participação Virtual)
Engenharia e Pesca / UNESP - Campus Experimental de Registro



Prof. Dr. OSMAR DELMANTO JUNIOR (Participação Virtual)
Agronegócio / Faculdade de Tecnologia de Botucatu



Prof. Dr. EDUARDO NARDINI GOMES (Participação Virtual)
Engenharia Agrônômica / Campus Experimental de Registro - UNESP



Botucatu, 30 de agosto de 2022

Para

Samira

AGRADECIMENTOS

Primeiramente quero agradecer a Deus, por ser o criador de tudo, por me conduzir pela vida. À minha filha Sami, que ouviu minha defesa desde a minha barriga. Aos meus queridos pais Norman e Hilda pela minha vida. À minha irmã Mônica por todos os conselhos, ajuda e por estar sempre presente do seu jeito. Ao meu irmãozinho Andrés por todo o seu amor. Ao meu marido por sempre se orgulhar de mim e me acompanhar nesta fase. Ao meu orientador Alexandre Dal Pai por toda ajuda, colaboração, paciência e por orientar meu trabalho.

À Secretaria de Agricultura da FCA-UNESP e ao programa de pós-graduação.

O presente trabalho foi realizado com apoio da Coordenação de Aperfeiçoamento de Pessoal de Nível Superior - Brasil (CAPES) - Código de Financiamento AIR180051.”

RESUMO

A recarga dos aquíferos é um parâmetro essencial na gestão sustentável da água doce, pois informa-nos sobre a quantidade de água que podemos extrair sem afetar o nível do aquífero. Atualmente, poucos estudos são realizados previamente à extração de água por falta de informações, metodologias acessíveis, dados ou conhecimento. Uma metodologia acessível é proposta para obter a recarga potencial do aquífero Guarani na zona de afloramento no estado de São Paulo. A metodologia BALSEQ é a selecionada e utilizada no capítulo 2 juntamente com as informações meteorológicas de precipitação e temperatura, extraídas de imagens de satélite no capítulo 1. Os valores de recarga anual e mensal obtidos são consistentes com outros autores desta área. Fornecendo assim uma metodologia simples, com dados de fácil obtenção para estudos futuros em termos de recarga potencial de aquíferos.

Palavras-chave: recarga do aquífero; BALSEQ; imagens de satélite.

ABSTRACT

Aquifer recharge is an essential parameter in the sustainable management of fresh water, it informs us about the amount of water that we can extract without affecting the aquifer level. Currently, few studies are carried out prior to the extraction of water due to lack of information, accessible methodologies, data or knowledge. An accessible methodology is proposed to obtain the potential recharge of the Guaraní aquifer in the upwelling zone in the state of Sao Paulo. The BALSEQ methodology is the one selected and used in chapter 2 together with meteorological information on precipitation and temperature, extracted from satellite images in chapter 1. The annual and monthly recharge values obtained are consistent with other authors in this area. Thus providing a simple methodology, with easily obtained data for future studies in terms of potential aquifer recharge.

Keywords: aquifer recharge; BALSEQ; satellite images.

LISTA DE ILUSTRAÇÕES

CAPÍTULO 1

Figura 1 – Distribuição do aquífero guarani no Brasil.....	25
Figura 2 – Unidades geológicas do componente SAG na área APRM.....	26
Figura 3 – UGRHI na área de interesse.....	26
Figura 4 – Interface interativa do Google Earth Engine	27
Figura 5 – Interface do produto CHIRPS do Google Earth Engine entre latitudes 50N e 50S	27
Figura 6 – Interface do produto CFSV2 do Google Earth Engine	30
Figura 7 – Interface do produto ERA5 Daily aggregates do Google Earth Engine	31
Figura 8 – Interface do produto ERA5 Daily aggregates do Google Earth Engine	32
Figura 9 – Interface do produto TRMM 3B42: 3-Hourly Precipitation Estimates do Google Earth Engine	32
Figura 10 - Parâmetros estatísticos básicos para cada sensor utilizado e estatísticas para os registros obtidos nas estações meteorológicas.....	36
Figura 11 – Ajustes lineares para cada estação	58
Figura 12 – Ajuste linear de temperatura	73

CAPÍTULO 2

Figura 13 – Distribuição do aquífero Guarani no Sao Paulo.....	84
Figura 14 – Unidades litológicas do componente SAG	85
Figura 15 – Fluxograma do modelo BALSEQ.....	87
Figura 16 – Localização das estacoes meteorológicas no SAG	90
Figura 17 – Interfaz do Google Earth Enginee para estimar o CNII.....	93
Figura 18 – Valores médios mensais dos componentes do balanço hídrico para o período2009-2014.....	95

LISTA DE TABELAS

CAPÍTULO 1

Tabela 1 – Resumo dos satélites usados e suas características.....	32
Tabela 2 – Dados das estações meteorológicas	33
Tabela 3 – Análise estatística anterior para todas as estações de estudo.....	34
Tabela 4 – Resultados de ajuste linear para cada estação.....	56

CAPÍTULO 2

Tabela 5 – Resumo das estações usadas.....	93
Tabela 6 – Precipitação média mensal ponderada para a área de estudo.....	95
Tabela 7 – Valores médios mensais de temperatura para a área em estudo.....	95
Tabela 8 – Grupos hidrológicos de solos.....	96
Tabela 9 – Condições de umidade antecedentes.....	97
Tabela 10 – Valores médios dos componentes do balanço hídrico para o período 2009-2014	99

SUMÁRIO

INTRODUÇÃO GERAL.....	19
CAPÍTULO 1 - VALIDAÇÃO DE DADOS HIDRO-METEOROLÓGICOS DE SATÉLITES POR MEDIDAS IN-SITU, EM AREAS DE AFLORAMENTO, NO ESTADO DE SÃO PAULO, DO AQUÍFERO GUARANÍ.....	21
1.1 INTRODUÇÃO.....	24
1.2 MATERIAL E MÉTODOS.....	25
1.2.1 ÁREA DE ESTUDO.....	25
1.2.2 IMAGENS DE SATÉLITE.....	27
1.2.2.1 PRECIPITAÇÃO.....	28
1.2.2.1.1 CHIRPS.....	29
1.2.2.1.2 CFSV2.....	29
1.2.2.1.3 ERA 5.....	30
1.2.2.1.4 PERSIANN.....	31
1.2.2.1.5 TRMM.....	31
1.2.2.2 TEMPERATURA.....	32
1.2.3 ANÁLISE ESTATÍSTICA DOS DADOS.....	33
1.2.3.1 ANÁLISE ESTATÍSTICA PARA DADOS DE PRECIPITAÇÃO E TEMPERATURA.....	33
1.3	79
RESULTADOS.....	
1.4 DISCUSSÃO.....	80
1.5 CONCLUSÃO.....	82
REFERÊNCIAS	83
CAPÍTULO 2 – ESTIMATIVA DO POTENCIAL DE RECARGA DA ZONA DO AFLORAMENTO DO AQUÍFERO GUARANÍ COM A METODOLOGIA BALSEQ COM DADOS METEOROLÓGICOS OBTIDOS ATRAVÉS DE IMAGENS DE SATÉLITE.....	85
2.1 INTRODUÇÃO.....	88
2.2 MATERIAL E MÉTODOS.....	89
2.2.1 CARACTERIZACAO DA AREA DE ESTUDO.....	89
2.2.2 MODELO BALSEQ.....	90
2.2.2.1 DADOS NECESSARIOS PARA O MODELO BALSEQ.....	91
2.2.2.2 ETAPAS PARA ESTIMAR A RECARGA POTENCIAL.....	91

	APLICACAO DO MODELO BALSEQ N9A ÁREA DE AFLORAMENTO	
2.2.3	DO AQUÍFERO GUARANÍ (APRM-SAG).....	
	PRECIPITACAO MÉDIA.....	93
2.2.3.1	TEMPERATURA.....	93
2.2.3.2	CN.....	95
2.2.3.3	GRUPOS HIDROLÓGICOS DE SOLOS.....	96
2.2.3.3.1	CONDICOES DE INFILTRACAO.....	96
2.2.3.3.2	CONDICOES DE UMIDADE ANTECEDENTES.....	97
2.2.3.3.3	MODELO DO SCS CN NO GEE.....	97
2.2.3.3.5	TWS.....	97
2.2.3.4	AVALIACAO DO POTENCIAL DE RECARGA ATRAVÉS DO MODELO	98
2.2.4	BALSEQ.....	
2.3	RESULTADOS.....	99
2.4	DISCUSSAO.....	99
2.5	CONCLUSAO	102
	REFERÊNCIAS	103
	CONSIDERAÇÕES FINAIS	104
	REFERÊNCIAS	105
	ANEXO A	106
	ANEXO B	108

INTRODUÇÃO GERAL

Cerca de 1/3 das maiores bacias subterrâneas da Terra estão sendo rapidamente exauridas pelo consumo humano. Isso foi observado em um estudo dos 37 maiores aquíferos do planeta realizado pela NASA. A pesquisa realizada entre 2003 e 2013 classificou 8 desses aquíferos como "estressados", quase sem recarga natural e outros 5 como "extremamente stressados" sem recarga (RICHEY et al., 2015).

A recarga de um aquífero é um dos processos mais importantes na hidrologia das águas subterrâneas, uma vez que constitui a reserva renovável. A principal substituição dessa reserva ocorre através da infiltração durante as chuvas e varia de acordo com o ciclo hidrológico (SOUZA et al., 2019). O primeiro passo para determinar a recarga do aquífero é baseado na disponibilidade de informações relacionadas a diversos parâmetros, tais como dados climáticos, hidrológicos, geomorfológicos e de uso do solo, dados fundamentais para o balanço hídrico (BRITO et al., 2008).

Os modelos de estimativa de recarga através dos balanços hídricos determinam o equilíbrio entre as entradas e saídas de água em um sistema. O modelo BALSEQ é um modelo desse tipo, com etapas diárias e ênfase nos processos do solo (LOBO FERRERA, 2015). A simplicidade desse modelo permitiu que ele fosse aplicado com sucesso em vários estudos em todo o mundo. Na China e na Índia, foi aplicado por Chachadi et al. (2001 e 2004). No Brasil, por Brito et al. (2008) e Pontes et al. (2016), entre outros. No entanto, sua eficácia depende da qualidade dos dados de entrada.

Os principais dados do modelo são coletados em uma estação meteorológica. Isso pode ser definido como um equipamento eletrônico composto por sensores, que registram medições em intervalos de tempo definidos. Entre as medidas que podem ser feitas estão os parâmetros de temperatura, umidade relativa do ar, pressão, umidade do solo, precipitação, velocidade e direção do vento, entre outros (ROMANO, 2007).

Atualmente, nos países desenvolvidos, as estações meteorológicas são automatizadas. Estes, diferentemente dos convencionais, não requerem pessoal treinado, nem presentes na estação para coleta de dados. Eles também podem

transmitir as medições em tempo real e em intervalos de tempo diferentes, de acordo com os requisitos. Uma limitação das estações meteorológicas automatizadas (EMA) é o alto custo que elas podem ter e, portanto, apenas algumas regiões têm essas condições. Vale ressaltar que algumas regiões remotas ou isoladas não possuem nenhum tipo de estação meteorológica.

Nos últimos anos, com o avanço da tecnologia, uma nova opção foi desenvolvida para a obtenção de dados meteorológicos, por meio do sensoriamento remoto. As imagens de satélite começaram a ser usadas para coletar essas informações a partir de 1972, na qual foi lançado o primeiro satélite ERTS (Earth Resources Technology Satellite), posteriormente renomeado como Landsat 1. Este projeto consiste na série de dados de imagens de satélite mais longas, de média resolução, para obter diferentes variáveis meteorológicas. Atualmente, está em sua versão 8 e estima-se que até 2020 o produto Landsat 9 seja lançado (USGS, 2018).

No Brasil, ainda existem regiões isoladas que não possuem estações meteorológicas automatizadas, resultando em projetos de baixa qualidade e confiabilidade. Na área de estudo, a região de afloramento do aquífero Guarani, que atravessa o estado de São Paulo, não possui EMA suficientes para estimar a potencial recarga e, portanto, poder gerenciar de forma sustentável a água proveniente do aquífero.

As imagens de satélite disponíveis para corrigir esta deficiência são inúmeras, fornecendo dados horários, a cada 3 horas, a cada 6 horas, diariamente, a cada 8 dias, etc. Com resoluções de 0,05°, 0,1°, 0,5°, etc. mas para seu uso é necessário fazer uma análise prévia sobre a validade dos dados para nossa área de estudo, uma vez que vários desses produtos foram elaborados e codificados para áreas específicas e depois foram expandidos globalmente. Da mesma forma, cada produto usa seus próprios algoritmos para fornecer diferentes variáveis hidrometeorológicas, com diferentes períodos de latência e com calibração com dados de estação em alguns casos. É por esta razão que neste artigo será realizada a validação e escolha do melhor produto satélite, com base em parâmetros estatísticos, para posterior utilização no modelo BALSEQ. As variáveis que serão validadas com os dados medidos são: Precipitação pluvial e temperatura do ar a 2m.

CAPÍTULO 1

**VALIDAÇÃO DE DADOS HIDRO-METEOROLÓGICOS DE SATÉLITES POR
MEDIDAS IN-SITU, EM AREAS DE AFLORAMIENTO, NO ESTADO DE SÃO
PAULO, DO AQUÍFERO GUARANÍ
DANIELA PATRICIA GUZMÁN ROJO, ALEXANDRE DAL PAI**

RESUMO

Este projeto teve como objetivo a seleção criteriosa de sensores para a coleta de dados meteorológicos na área de estudo. A análise comparativa desses dados com informações de estações meteorológicas permitiu avaliar a qualidade e adequação dos sensores, sendo fundamental para a estimativa do potencial de recarga do Aquífero Guarani na área de afloramento do estado de São Paulo, em conjunto com dados de uso do solo, umidade antecedente e outros fatores aplicados à metodologia BALSEQ.

Os resultados da análise descritiva dos dados de temperatura do ar e precipitação revelaram diferentes padrões. A temperatura do ar apresentou uma distribuição normal e simétrica, enquanto a precipitação anual também exibiu essas características. No entanto, a precipitação diária mostrou uma tendência assimétrica à direita, indicando maior variabilidade nessa medição.

A variabilidade dos dados, medida pelo coeficiente de variação (CV), variou entre os satélites e estações testadas. O satélite TRMM obteve o menor CV devido à frequência de medição a cada 3 horas. Outros satélites foram classificados em categorias de baixa, média e alta variabilidade, seguindo critérios estabelecidos.

Com base em critérios como ajuste linear, correlação, R^2 , valores extremos e médias, foram selecionados satélites específicos para cada estação. Essa seleção robusta servirá como entrada no modelo BALSEQ para a determinação do potencial de recarga do Aquífero Guarani na região de afloramento do estado de São Paulo.

Caso necessário, análises estatísticas adicionais serão conduzidas no futuro para aprimorar a compreensão e a precisão dos resultados. Este projeto enfatiza a importância da integração de dados de sensores e estações meteorológicas na pesquisa hidrometeorológica e na gestão sustentável dos recursos hídricos, contribuindo para um entendimento abrangente do comportamento dos aquíferos e apoiando decisões informadas e medidas de preservação futuras

Palavras-chave: sensores; satélites; dados meteorológicos; aquíferos.

ABSTRACT

This project aimed at the careful selection of sensors for collecting meteorological data in the study area. Comparative analysis of these data with information from meteorological stations allowed for the evaluation of the quality and suitability of the sensors, which is essential for estimating the recharge potential of the Guarani Aquifer in the outcrop area of the state of São Paulo, in conjunction with land use data, antecedent moisture, and other factors applied to the BALSEQ methodology.

The results of the descriptive analysis of air temperature and precipitation data revealed different patterns. Air temperature exhibited a normal and symmetric distribution, while annual precipitation also displayed these characteristics. However, daily precipitation showed a right-skewed trend, indicating greater variability in this measurement.

Data variability, measured by the coefficient of variation (CV), varied among the tested satellites and stations. The TRMM satellite obtained the lowest CV due to its measurement frequency every 3 hours. Other satellites were classified into categories of low, medium, and high variability, following established criteria.

Based on criteria such as linear fit, correlation, R^2 , extreme values, and averages, specific satellites were selected for each station. This robust selection will serve as input in the BALSEQ model to determine the recharge potential of the Guarani Aquifer in the outcrop region of the state of São Paulo.

If necessary, additional statistical analyses will be conducted in the future to enhance understanding and precision of the results. This project underscores the importance of integrating sensor data and meteorological stations in hydro-meteorological research and sustainable water resource management. It contributes to a comprehensive understanding of aquifer behavior and supports informed decision-making and future preservation measures.

Keywords: sensors; satellites; meteorological data; groundwater

1.1 INTRODUCAO

A gestão sustentável dos recursos hídricos é de extrema importância, especialmente quando consideramos que cerca de um terço das maiores bacias subterrâneas do mundo está enfrentando uma rápida exaustão devido ao consumo humano. Este fenômeno foi detalhadamente observado em um estudo realizado pela NASA, que analisou 37 dos maiores aquíferos globais entre os anos de 2003 e 2013, identificando oito deles como "estressados" e cinco como "extremamente stressados", indicando uma preocupante falta de recarga natural (RICHEY et al., 2015).

A recarga de aquíferos é um processo crítico na hidrologia das águas subterrâneas, pois representa a renovação dessa reserva vital. Essa renovação é amplamente impulsionada pela infiltração de água durante as chuvas, e sua magnitude varia de acordo com o ciclo hidrológico (SOUZA et al., 2019). A obtenção de estimativas precisas da recarga depende da disponibilidade de informações relacionadas a vários parâmetros, incluindo dados climáticos, hidrológicos, geomorfológicos e de uso do solo, que são essenciais para a elaboração de balanços hídricos confiáveis (BRITO et al., 2008).

Neste contexto, a coleta de dados meteorológicos desempenha um papel crucial. As estações meteorológicas tradicionais, equipadas com sensores que registram medições em intervalos de tempo definidos, têm sido a base para a obtenção desses dados. No entanto, nos países desenvolvidos, as estações meteorológicas automatizadas têm se destacado. Essas estações não exigem pessoal treinado no local para coleta de dados e são capazes de transmitir medições em tempo real, adaptando-se às necessidades específicas de cada aplicação. No entanto, a implementação de estações meteorológicas automatizadas pode ser limitada devido ao seu custo, deixando algumas regiões, especialmente as remotas ou isoladas, sem acesso a esses dados cruciais.

Uma alternativa promissora para suprir essa lacuna na coleta de dados meteorológicos é o uso de sensoriamento remoto por meio de imagens de satélite. A partir de 1972, com o lançamento do primeiro satélite ERTS (Earth Resources Technology Satellite), posteriormente renomeado como Landsat 1, as imagens de satélite têm sido utilizadas para coletar informações meteorológicas em larga escala. Essas imagens, atualmente na versão 8, com a expectativa do lançamento do Landsat

9 em 2020 (USGS, 2018), fornecem uma série de dados de média resolução e são essenciais para diversos estudos hidrometeorológicos.

No Brasil, a questão da disponibilidade de dados meteorológicos é particularmente relevante em regiões isoladas, como na área de estudo da região de afloramento do Aquífero Guarani, que abrange o estado de São Paulo. A falta de estações meteorológicas automatizadas suficientes representa um desafio para a estimativa da recarga potencial desse aquífero e, conseqüentemente, para a gestão sustentável dos recursos hídricos provenientes dele.

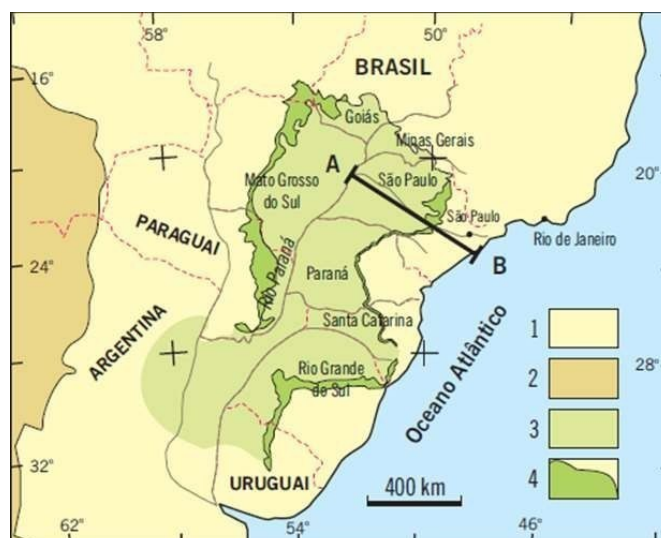
Neste contexto, a escolha e validação dos melhores produtos de imagens de satélite para a região de estudo tornam-se fundamentais, garantindo a qualidade e confiabilidade dos dados que alimentarão modelos e estudos futuros.

1.2 MATERIAL E MÉTODOS

1.2.1 Área De Estudo

Este estudo foi realizado no aquífero Guarani, localizado na América do Sul entre paralelos 16° e 32° S e meridianos 47° e 56° O. O aquífero é compartilhado pelos países da Argentina (19%), Brasil (71. %), Paraguai (6%) e Uruguai (4%), como mostra a Figura 1, com uma área aproximada de 1.194.000 km² (CAMPOS, 1999). Dentro do território brasileiro, o aquífero abrange os estados de São Paulo, Goiás, Mato Grosso do Sul, Mato Grosso do Sul, Minas Gerais, Paraná, Rio Grande do Sul e Santa Catarina.

Figura 1- Distribuição do aquífero guarani no Brasil. 1. Embasamento e unidades mais jovens, 2. Cadeia Andina, 3. Parte confinada, 4. Parte de afloramento, composta pela Formação Botucatu e Pirambóia (Carneiro 2008).



A área de interesse será delimitada pela Área de Proteção e Recuperação de nascentes da Zona de Afloramento do Sistema Aquífero Guarani (APRM-SAG) apresentada na Figura 2, proposta pelo Instituto de Pesquisa Tecnológica do Estado de São Paulo IPT (2010). Ela inclui as áreas de afloramento das formações de Botucatu e Piramboia, com um buffer de 2 km. A região é composta por 26.100 km².

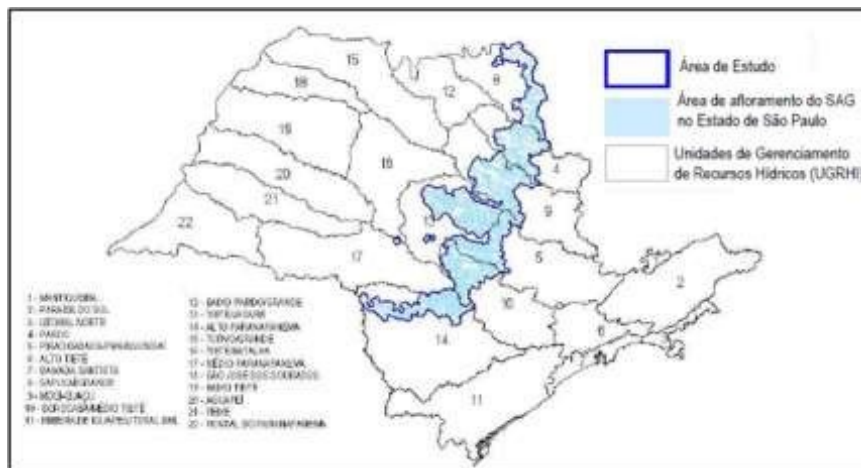
Figura 2- Unidades geológicas do componente SAG na área APRM



Fonte: IPT (2010)

A área de interesse abrange 9 Unidades de Gerenciamento de Recursos Hídricos (URGHIs): UGRHI 4 (Brown); UGRHI 5 (Piracicaba / Capivari / Jundiá); UGRHI 8 (Sapucai / Grande); UGRHI 9 (Mogi-Guaçu); UGRHI 10 (Tietê / Sorocaba); UGRHI 13 (Tietê / Jacaré); UGRHI 14 (Alto Paranapanema); UGRHI 16 (Tietê / Batalha); e UGRHI 17 (Médio Paranapanema) (Rocha et al.,2015).

Figura 3- UGRHI na área de interesse



Estações meteorológicas

As estações meteorológicas e o registro de dados usados na validação e seleção de produtos de satélite para a área de estudo deste projeto estão resumidos a seguir:

SÃO CARLOS

BOTUCATU

PIRACICABA

FRANCA

ITUVERAVA

AVARE

1.2.2 Imagens de satélite

O presente estudo teve como objetivo validar dados de precipitação e temperatura obtidos a partir de imagens de satélite com base em dados registrados nas estações meteorológicas mencionadas acima. Essas imagens serão obtidas da plataforma Google Earth Engine, esta é uma plataforma on-line criada para análise geoespacial em uma escala global, o que facilita o acesso a recursos de computação de alto desempenho para processar conjuntos de dados geoespaciais. Com essa ferramenta, desmatamento, seca, gestão da água, monitoramento climático, entre outros problemas, podem ser abordados (GORELICK, 2017).

O Earth Engine consiste em uma coleção de dados geoespaciais prontos para uso e análise. Seu acesso está online e disponível ao público. Ele é controlado por meio de uma interface de programação de aplicativos (API) e é baseado em um ambiente de desenvolvimento interativo (IDE) que permite prototipagem rápida e visualização de resultados.

Os usuários podem acessar a API através de bibliotecas públicas ou criar seus próprios códigos através do ambiente de desenvolvimento interativo criado com base nelas (Figura 4).

Figura 4- Interface interativa do Google Earth Engine, adaptada de GORELICK (2017)



1.2.2.1 Precipitação

Os dados diários de precipitação por imagens de satélite são geralmente obtidos a partir de uma combinação de sensores individuais e produtos multisatélites. Radiômetros de microondas, radares de alta resolução são responsáveis por fornecer a medição física da chuva, que é combinada com dados medidos e calibrados em regiões que possuem este último.

The Tropical Rainfall Measurement Mission (TRMM) (TMPA; 0,25°, 3 horas, Huffman et al., 2007), baseada em bandas de infravermelho (TIR) junto com microondas (TMI), PERSIANN (0,25°, 1 hora; Hsu et al., 1997), também baseado em TIR passivo e microondas (TMI, SSM / I e AMSU), CMOPRH (0,07°, 30 min; Joyce et al., 2004), GSMAP (0,1°, a cada hora; Aonashi et al., 2009) e a mais recente The Global Precipitation Measurement missão (GPM; Smith et al., 2004), juntamente com o produto IMERG, são alguns dos produtos que combinam micro-ondas e radares de alta resolução, para estimativa de precipitação.

CHIRPS (Funk et al., 2015), MSWEP (Beck et al., 2019) são alguns dos produtos que estimam a precipitação combinando imagens de satélite com registros de dados. O primeiro contém uma resolução espacial de 0,05°, com uma resolução temporal diária e uma série de dados de 1979 até o presente.

1.2.2.1.1 CHIRPS

The Climate Hazards group Infrared Precipitation with Stations (CHIRPS) (figura 5), abrange as latitudes 50°S e 50°N (Figura 2) e foi desenvolvido inicialmente para os Estados Unidos (FEWS NET), com base em produtos de sucesso para medir a precipitação através dos sensores infravermelhos (TIR), como o Rainfall Estimate (RFE2), da National Oceanic and Atmospheric Administration (NOAA) ou TAMSAT, da University of Reading's, African Rainfall Climatology And Time series (TARCAT) (FUNK et al., 2015). O CHIRPS usa o TMPA 3B42 v7 (Tropical Rainfall Measuring Mission Multi-satellite Precipitation Analysis version 7) para calibrar a estimativa de precipitação do CCD (Cold Cloud Duration).

Figura 5- Interface do produto CHIRPS do Google Earth Engine entre latitudes 50°N e 50°S.



1.2.2.1.2 CFSV2

O sistema de previsão climática do National Center for Environmental Forecasting (NCEP), (figura 6) é um modelo acoplado que representa a interação entre a atmosfera, a terra e o gelo marinho. Este produto foi desenvolvido pelo Centro de Modelagem Ambiental (EMC) do NCEP. O CFS foi atualizado para a versão 2, denominada CFSV2 em 30 de março de 2011, que será testada no presente estudo.

As previsões deste produto são iniciadas 4 vezes ao dia nas horas 0:00, 06:00, 12:00 e 18:00 UTC, e sua resolução espacial é de 0,2°. Alguns dados que podemos obter são radiação de ondas longas e curtas, temperatura máxima e mínima, taxa de evaporação, precipitação, tudo isso em um intervalo de 6 horas. O teor de umidade volumétrica do solo a 5cm, 25cm, 70cm, 150cm e a velocidade do vento podem ser obtidos em intervalos diários.

Figura 6- Interface do produto CFSV2 do Google Earth Engine



1.2.2.1.3 ERA 5

Este produto é a quinta geração do ECMWF (Centro Europeu de Previsões Meteorológicas de Médio Prazo). A reanálise combina dados do modelo com observações de todo o mundo em um conjunto de dados consistente. O ERA 5 substitui o ERA-Interim, que parou de produzir dados em 31 de agosto de 2019.

Fornece dados agregados diários para 7 parâmetros: temperatura do ar, temperatura do ponto de orvalho, precipitação total, pressão média ao nível do mar, pressão de superfície, velocidade do vento, temperatura mínima e máxima do ar. Os dados deste satélite estão disponíveis desde 1979, com período de latência de 3 meses e resolução espacial de 0,25 °.

Figura 7- Interface do produto ERA5 Daily aggregates do Google Earth Engine



1.2.2.1.4 PERSIANN

Este produto estima apenas a precipitação diária de sensoriamento remoto usando redes neurais artificiais e registros de dados climáticos, sua resolução espacial é de $0,25^\circ$ cobrindo latitudes entre 60° S e 60° N de 1983 até o presente. A estimativa é realizada usando o algoritmo PEERSIANN em dados do satélite infravermelho GridSat-B1. As estimativas são ajustadas usando o produto mensal do Global Precipitation Climatology Project (GPCP) versão 2.2.

Contém mais de 30 anos de dados, começando em 1983, atualizados a cada 3 meses.

Figura 8- Interface do produto ERA5 Daily aggregates do Google Earth Engine



1.2.2.1.5 TRMM

A Tropical Rainfall Mission (TRMM) é uma missão conjunta entre a NASA e a Japan Aerospace Exploration Agency (JAXA), e foi projetada para monitorar e estudar as chuvas tropicais. O TRMM3B42 usa bandas infravermelhas para estimar a precipitação a cada 3 horas e as ajusta com as observações, com resolução espacial de $0,25^\circ$. Contém dados a partir do ano 1998.

Figura 9- Interface do produto TRMM 3B42: 3-Hourly Precipitation Estimates do Google Earth Engine



A tabela de resumo dos diferentes produtos usados é mostrada abaixo:

Dados de precipitação diária

Tabela 1- Resumo dos satélites usados e suas características

Dados de precipitação diária		
Satélite	Resolução espacial	Data de início
CFSV2	0.2°	1979
CHIRPS	0.05°	1979
ERA5	0.25°	1979
PERSIAN	0.25°	1983
N		
TRMM	0.25°	1998

Dados diários de temperatura		
Satélite	Resolução espacial	Data de início
CFSV2	0.2°	1979
ERA5	0.25°	1979

1.2.2.2 Temperatura

Alguns produtos disponíveis para a estimativa da temperatura da superfície da Terra (e subsequente cálculo do ET) são o Landsat (30m multiespectral; 100m térmico, 16 dias; <https://landsat.usgs.gov>), AVHRR (1km, diariamente;

<https://lta.cr.usgs.gov/AVHRR>), ASTER (90m, 16 dias; <https://asterweb.jpl.nasa.gov/data.asp>), MODIS (1km, diariamente; <https://modis.gsfc.nasa.gov/data/dataproduct/mod11.php>), Sentinel-3 (1km, diariamente; <https://sentinel.esa.int/web/sentinel/sentinel-data-access>), ECOSTRESS (38x69m, 4 dias; Hulley et al., 2017).

Neste estudo, foram utilizadas as bandas correspondentes à temperatura a 2 m acima da superfície dos satélites CFSV2 e ERA 5.

1.2.3 Análise Estatística Dos Dados

O comprimento da série histórica de dados medidos juntamente com as respectivas coordenadas de cada estação para comparação de dados é mostrado na tabela abaixo:

Tabela 2- Dados das estações meteorológicas

ESTACOES	LAT (°)	LONG (°)	ALT (m)	REGISTRO	
FRANCA	-20.58	-47.38	1026	1/1/2005	31/12
PIRACICABA	-22.7	-47.62	573	26/9/2006	31/12
SAO CARLOS	-21.98	-47.88	863	6/9/2006	31/12
ITUVERAVA	-20.35	-47.77	600	17/7/2008	31/12
AVARE	-23.07	-48.88	654	22/9/2006	31/12
BOTUCATU	-22.85	-48.43	786	1/1/2005	31/12

1.2.3.1 Análise estatística para dados de precipitação e temperatura

Uma análise estatística prévia das medidas de posição e dispersão, bem como dos valores máximos e mínimos de cada sensor utilizado em cada estação foi realizada para verificar a variabilidade dos dados e estão resumidos na tabela 3.

Tabela 3- Análise estatística anterior para todas as estações de estudo

FRANCA:

PRECIPITAÇÃO	MÉDIA	DES. PAD.	MÍNIMO	MÁXIMO	Q25	Q50
MEDIDA	4.52	10.98	0.00	128.40	0.00	0.00
CFSV2	5.92	11.17	0.00	123.39	0.00	1.03
CHRIPS	4.41	9.19	0.00	108.68	0.00	0.00
ERA5	4.09	7.38	0.00	81.00	0.00	0.00
PERSIANN	4.41	7.83	0.00	82.04	0.00	0.49
TRMM	1.59	3.50	0.00	32.51	0.00	0.00

TEMPERATURA	MÉDIA	DES. PAD.	MÍNIMO	MÁXIMO	Q25	Q50
MEDIDA	21.33	2.55	9.45	29.99	19.87	21.46
CFSV2	20.61	2.74	8.60	30.34	18.93	20.80
ERA5	22.10	2.47	11.36	29.98	20.47	22.35

PIRACICABA:

PRECIPITAÇÃO	MÉDIA	DES. PAD.	MÍNIMO	MÁXIMO	Q25	Q50
MEDIDA	3.64	9.50	0.00	109.80	0.00	0.00
CFSV2	6.30	11.51	0.00	160.67	0.02	1.24
CHRIPS	3.56	7.43	0.00	65.60	0.00	0.00
ERA5	3.93	7.08	0.00	73.00	0.00	0.00
PERSIANN	4.29	7.90	0.00	81.12	0.00	0.48
TRMM	1.34	3.23	0.00	42.79	0.00	0.00

TEMPERATURA	MÉDIA	DES. PAD.	MÍNIMO	MÁXIMO	Q25	Q50
MEDIDA	21.18	3.27	9.58	32.83	19.57	22.18
CFSV2	20.96	3.15	8.54	29.84	18.89	21.35
ERA5	22.56	3.03	9.57	30.67	20.26	22.56

SÃO CARLOS:

PRECIPITAÇÃO	MÉDIA	DES. PAD.	MÍNIMO	MÁXIMO	Q25	Q50
MEDIDA	3.80	10.25	0.00	99.20	0.00	0.00
CFSV2	5.37	10.79	0.00	160.67	0.01	0.62
CHRIPS	4.05	9.44	0.00	89.20	0.00	0.00
ERA5	3.60	7.54	0.00	104.00	0.00	0.00
PERSIANN	4.21	7.73	0.00	63.92	0.00	0.46
TRMM	1.39	3.27	0.00	47.75	0.00	0.00

TEMPERATURA	MÉDIA	DES. PAD.	MÍNIMO	MÁXIMO	Q25	Q50
MEDIDA	20.87	2.97	8.44	29.32	18.90	21.20
CFSV2	20.59	3.02	8.03	29.93	18.60	20.99
ERA5	22.82	2.94	10.34	31.68	20.97	23.15

ITUVERAVA:

PRECIPITAÇÃO	MÉDIA	DES. PAD.	MÍNIMO	MÁXIMO	Q25	Q50
MEDIDA	3.54	10.12	0.00	188.20	0.00	0.00
CFSV2	6.68	12.34	0.00	137.63	0.00	1.63
CHRIPS	4.01	8.39	0.00	82.23	0.00	0.00
ERA5	3.18	6.81	0.00	117.00	0.00	0.00
PERSIANN	3.99	7.25	0.00	63.85	0.00	0.43
TRMM	1.44	3.24	0.00	36.36	0.00	0.00

TEMPERATURA	MÉDIA	DES. PAD.	MÍNIMO	MÁXIMO	Q25	Q50
MEDIDA	22.61	2.90	10.20	33.64	20.78	23.06
CFSV2	22.20	2.68	9.76	33.58	20.50	22.20
ERA5	24.65	2.56	12.72	32.60	23.06	24.76

AVARÉ:

PRECIPITAÇÃO	MÉDIA	DES. PAD.	MÍNIMO	MÁXIMO	Q25	Q50
MEDIDA	3.39	9.49	0.00	103.60	0.00	0.00
CFSV2	5.77	10.93	0.00	136.16	0.14	1.09
CHRIPS	3.97	8.55	0.00	97.33	0.00	0.00
ERA5	3.67	7.38	0.00	110.00	0.00	0.00
PERSIANN	4.10	7.75	0.00	92.56	0.00	0.45
TRMM	1.43	3.65	0.00	65.96	0.00	0.00

TEMPERATURA	MÉDIA	DES. PAD.	MÍNIMO	MÁXIMO	Q25	Q50
MEDIDA	20.62	3.39	6.21	29.74	18.45	21.01
CFSV2	19.41	3.25	6.31	28.54	17.37	19.82
ERA5	21.41	3.31	8.63	30.82	19.28	21.78

BOTUCATU:

PRECIPITAÇÃO	MÉDIA	DES. PAD.	MÍNIMO	MÁXIMO	Q25	Q50
MEDIDA	4.14	11.73	0.00	234.12	0.00	0.00
CFSV2	5.98	11.92	0.00	162.77	0.02	0.88
CHRIPS	3.73	8.29	0.00	83.29	0.00	0.00
ERA5	3.55	6.92	0.00	70.00	0.00	0.00
PERSIANN	4.32	8.08	0.00	76.28	0.00	0.52
TRMM	1.38	3.47	0.00	62.39	0.00	0.00

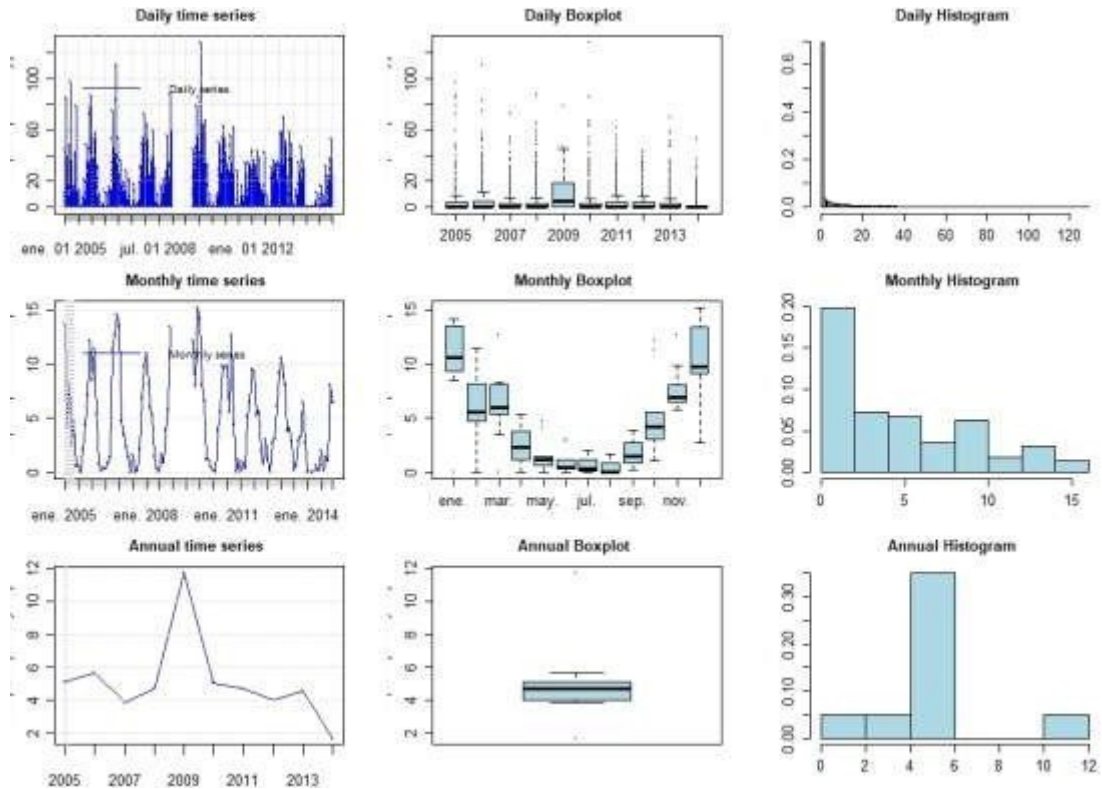
TEMPERATURA	MÉDIA	DES. PAD.	MÍNIMO	MÁXIMO	Q25	Q50
MEDIDA	20.65	3.48	3.20	32.00	18.40	20.80
CFSV2	19.34	3.24	7.13	29.00	17.15	19.72
ERA5	21.87	3.26	9.09	31.54	19.70	22.28

Os gráficos a seguir mostram os parâmetros estatísticos básicos para cada sensor utilizado em cada estação e as estatísticas para os registros do precipitação obtidos nas estações meteorológicas, as unidades estão em milímetros. Em cada gráfico, as séries históricas diárias, as séries agregadas mensal e anual são apresentadas na primeira coluna, a segunda coluna corresponde aos box-plots de cada série e a terceira coluna seus respectivos histogramas.

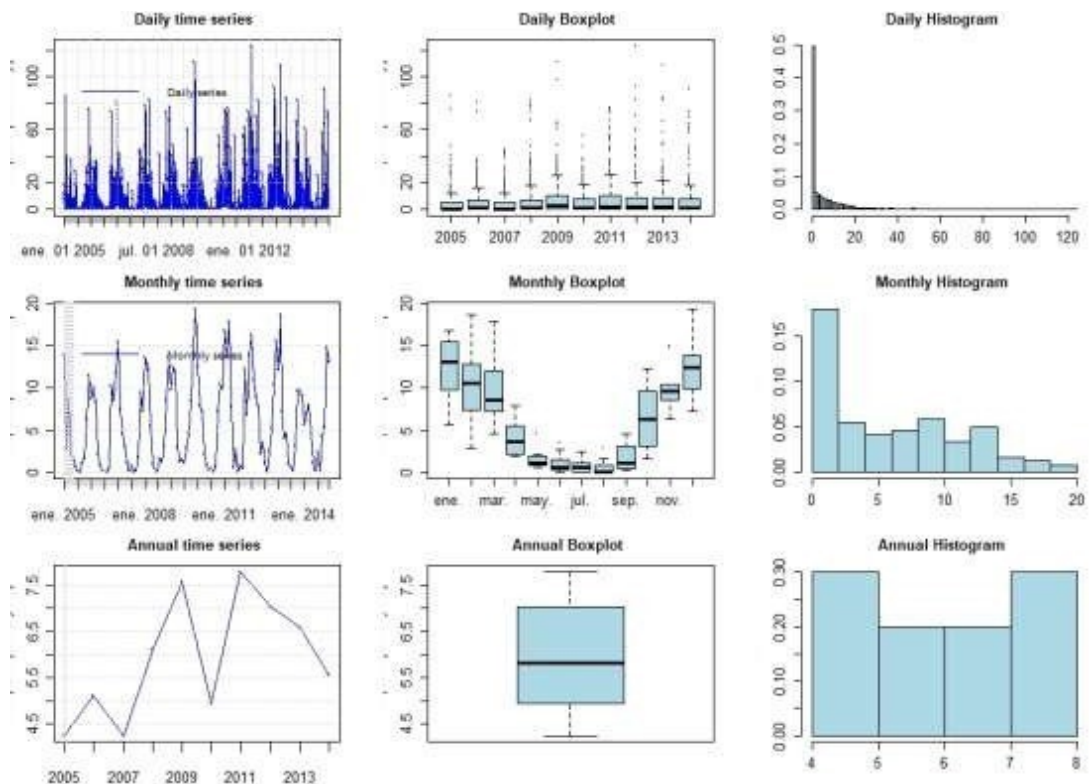
Figura 10. Parâmetros estatísticos básicos para cada sensor utilizado e

estadísticas para os registros obtidos nas estações meteorológicas

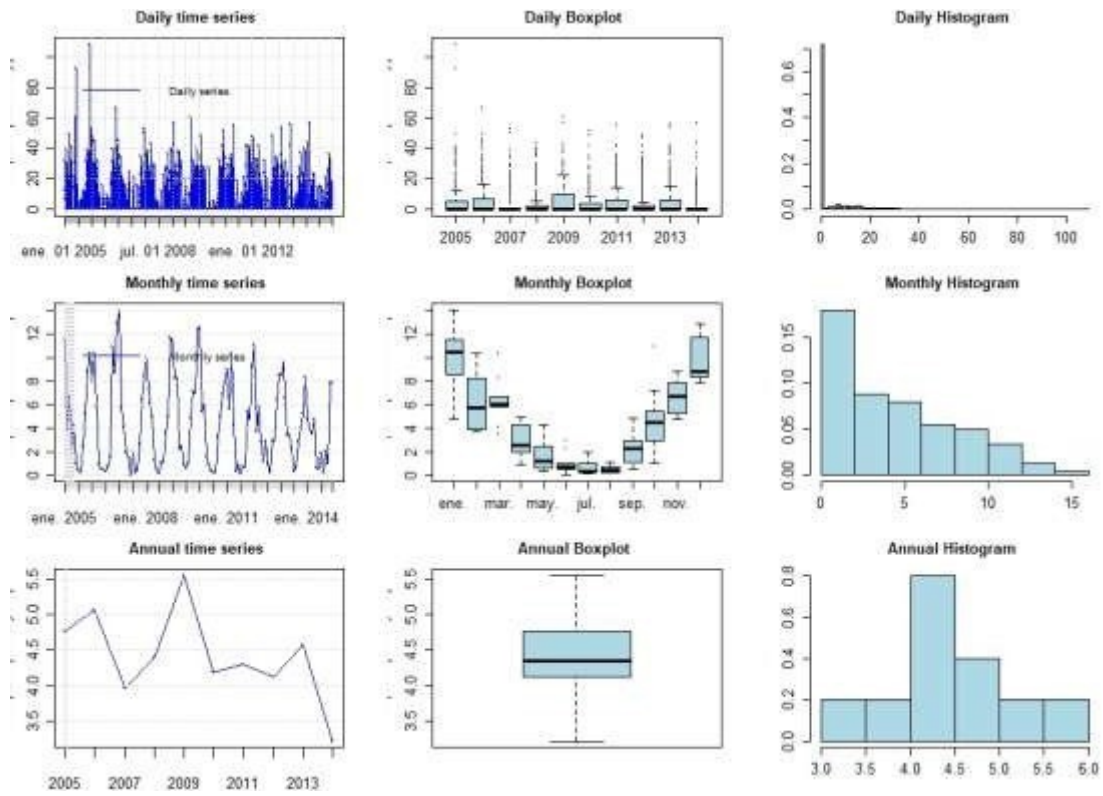
FRANCA MEDIDA:



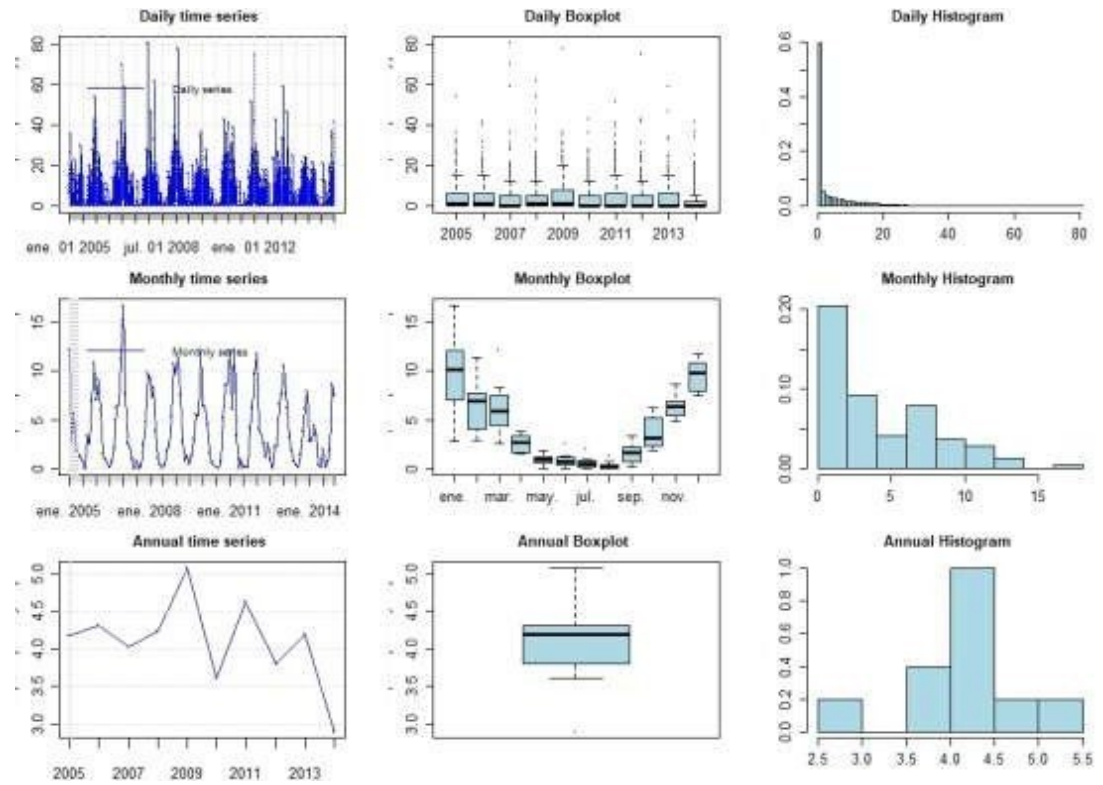
FRANCA CFSV2:



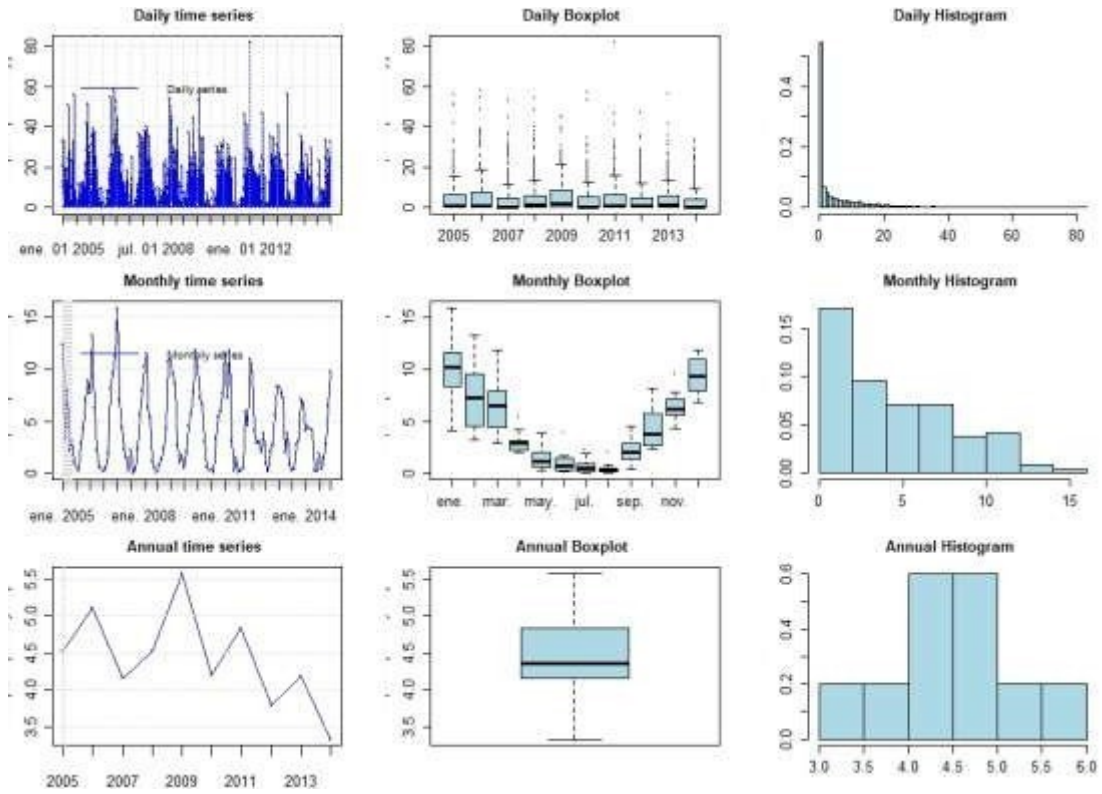
FRANCA CHIRPS:



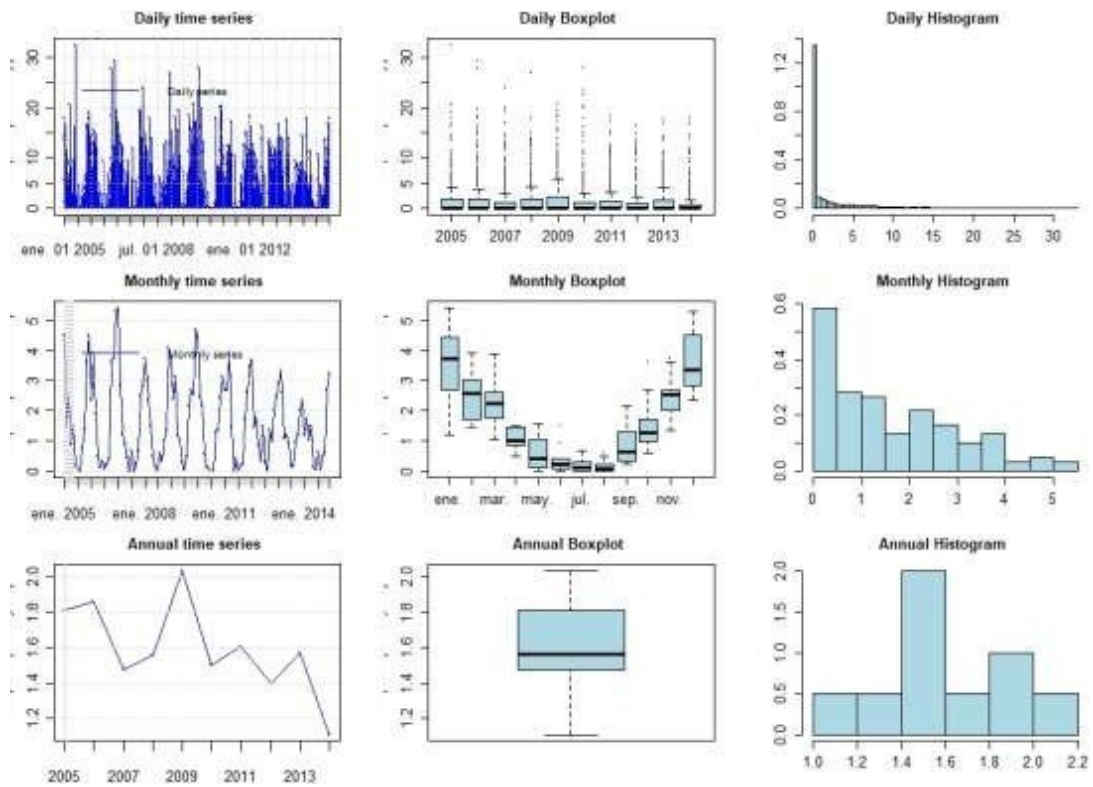
FRANCA ERA5:



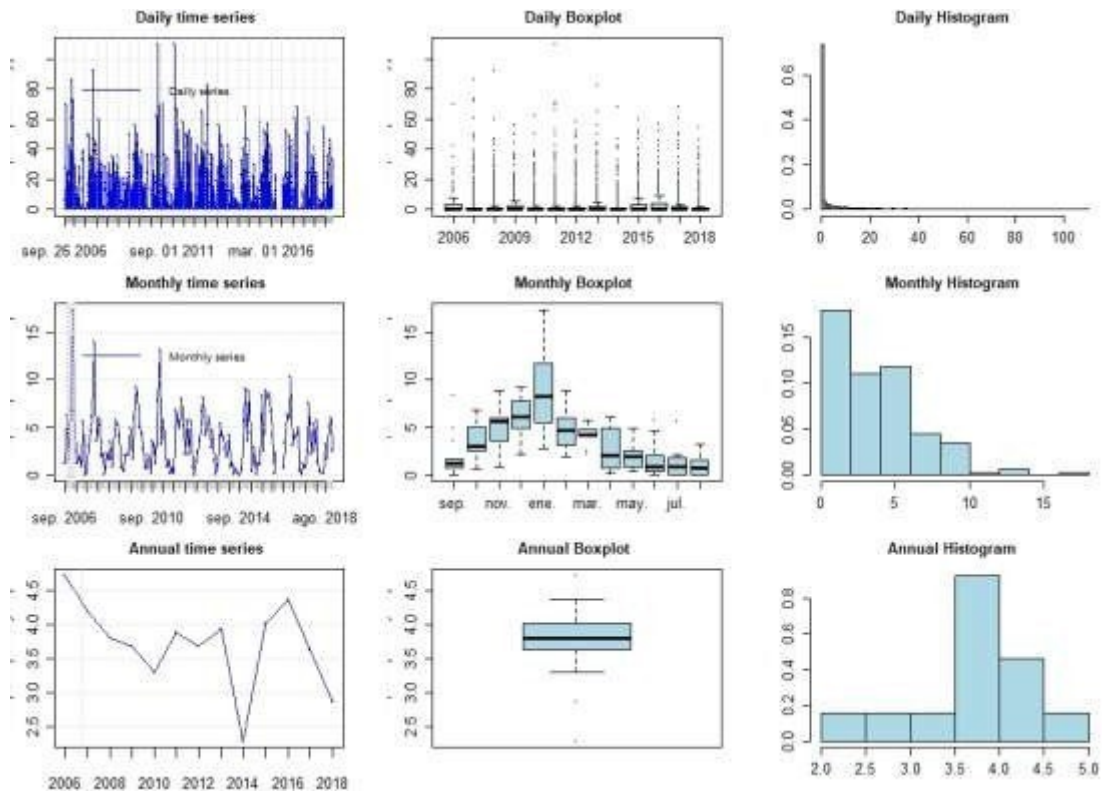
FRANCA PERSIANN:



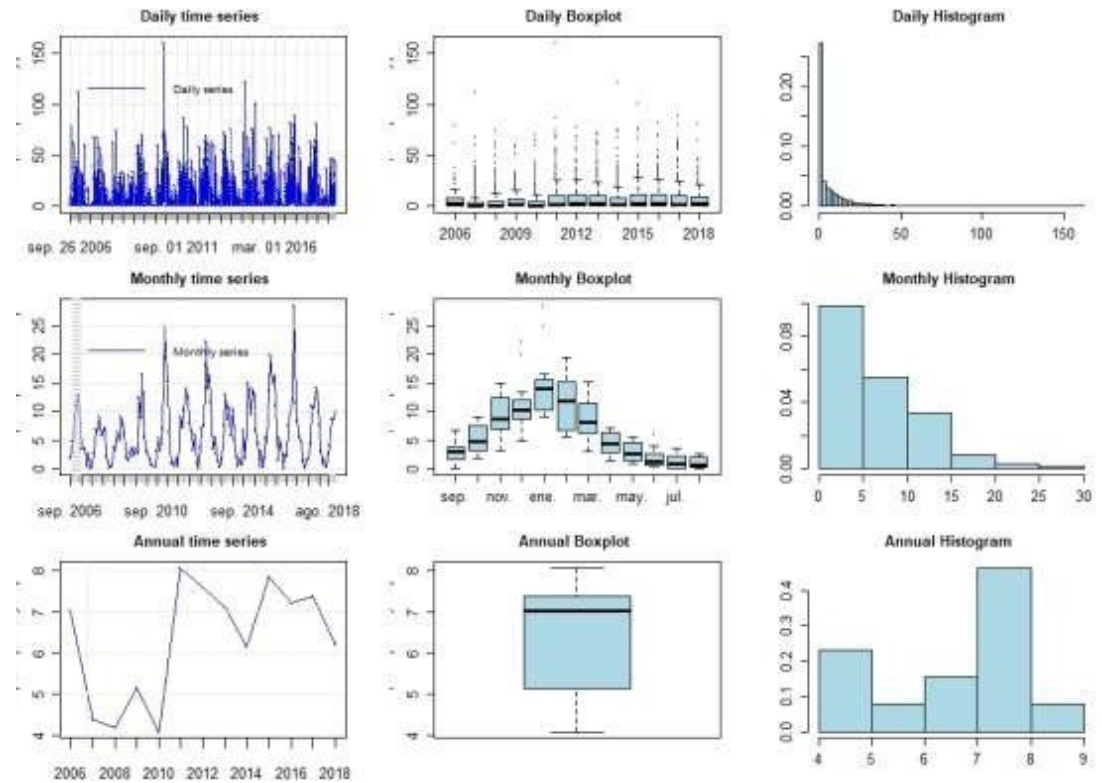
FRANCA TRMM:



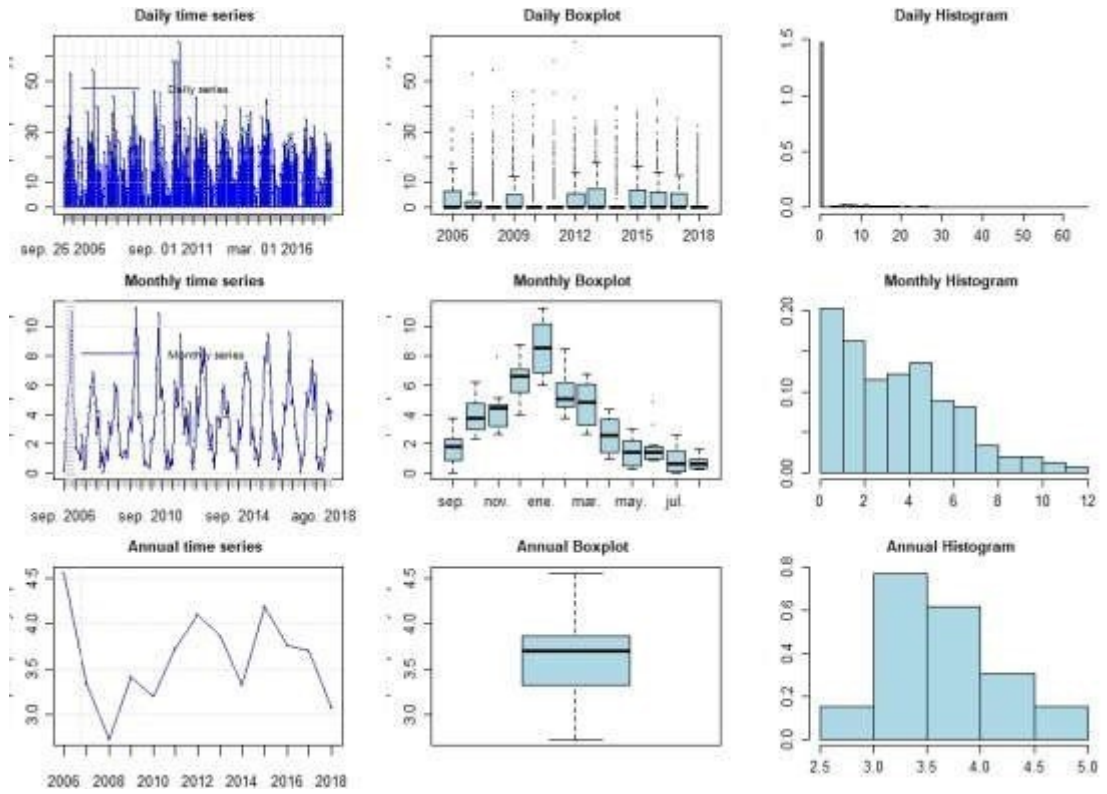
PIRACICABA MEDIDA:



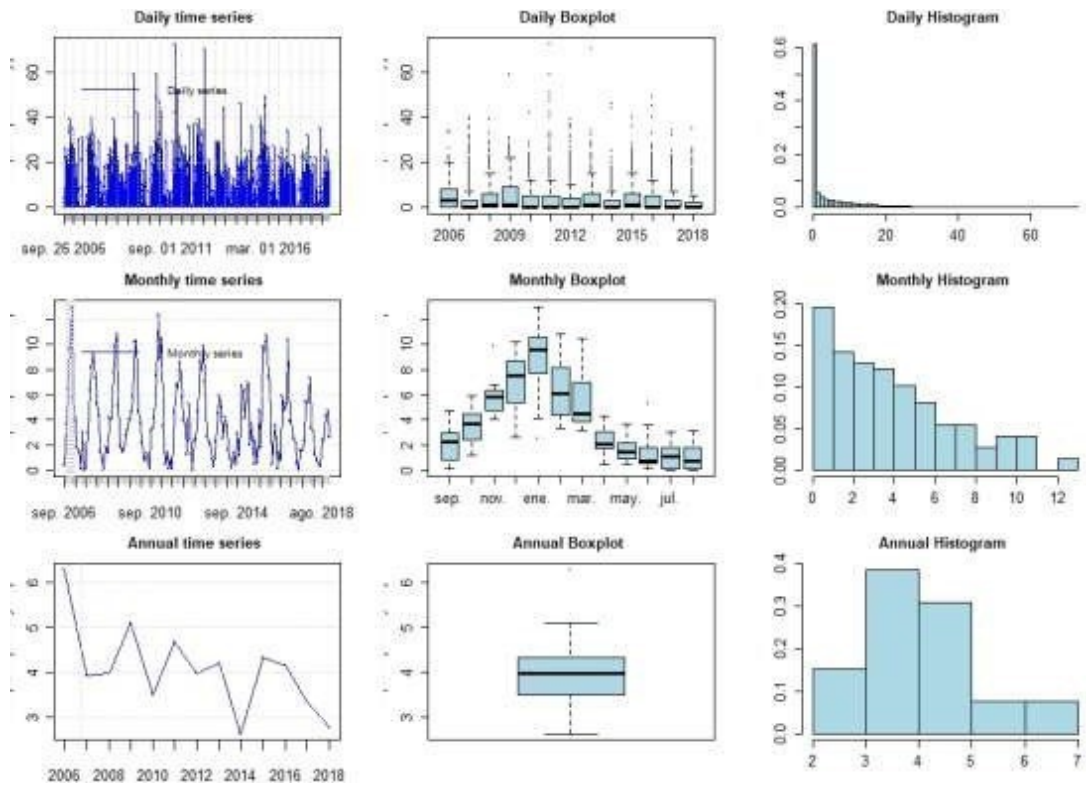
PIRACICABA CFSV2:



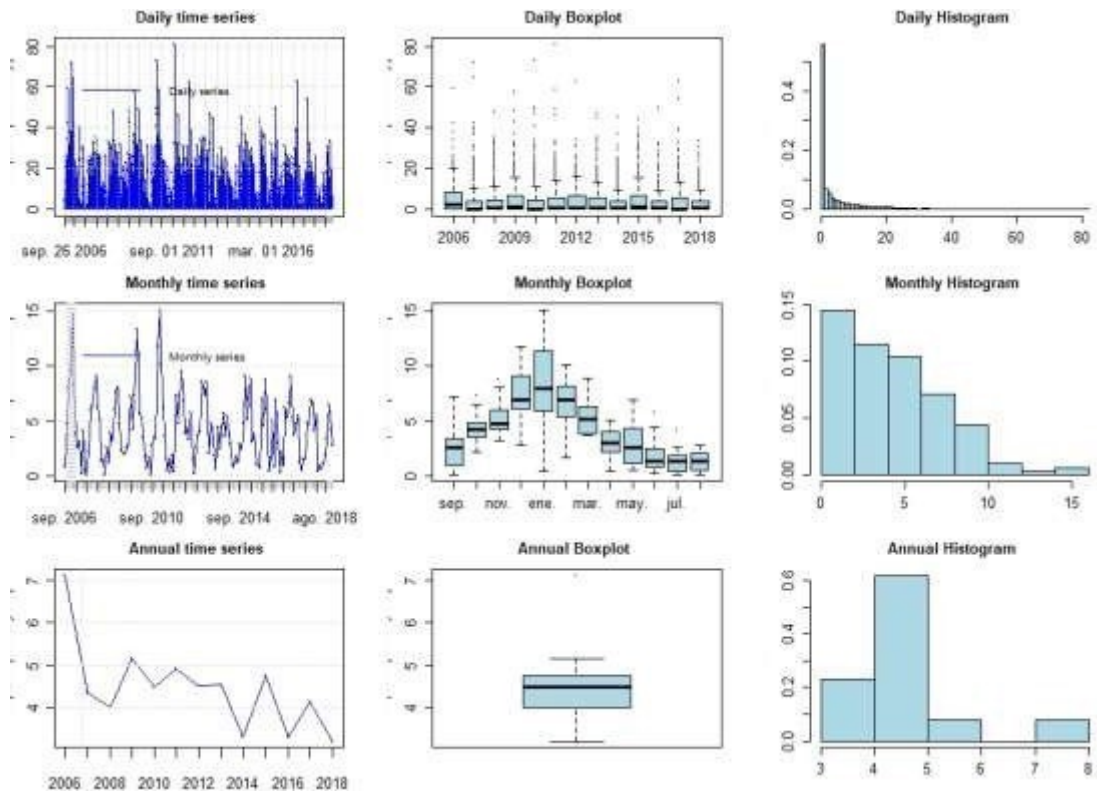
PIRACICABA CHIRPS:



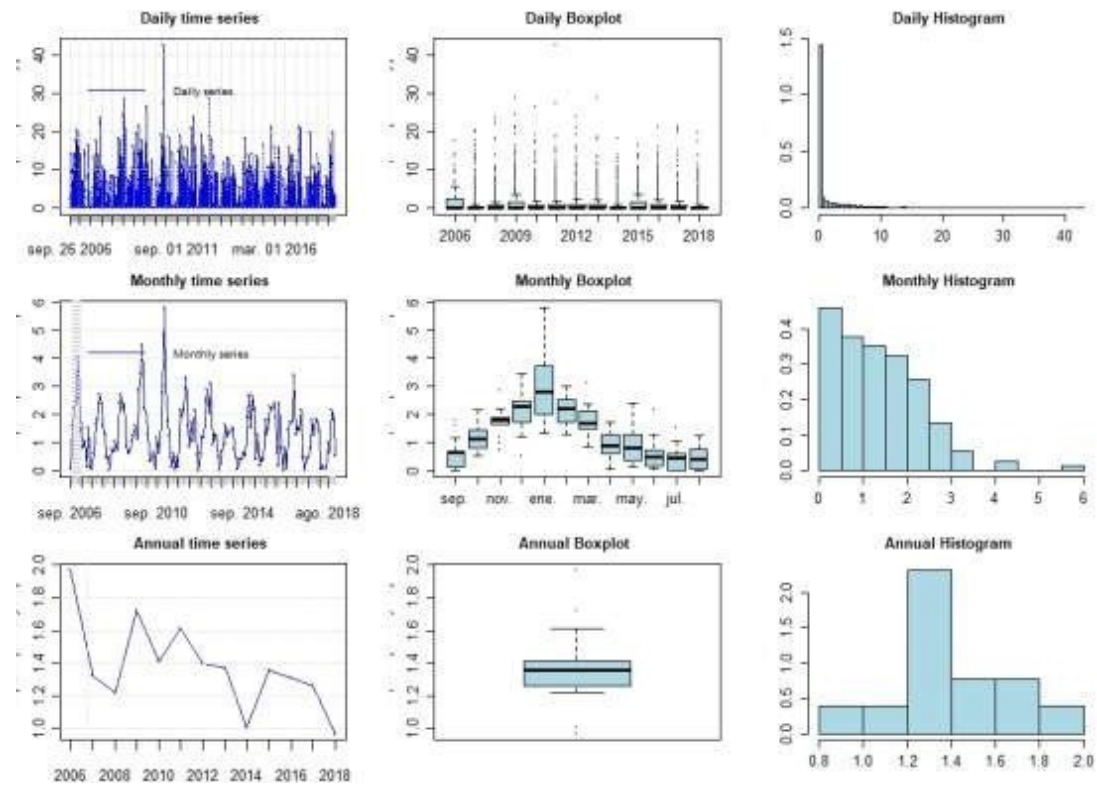
PIRACICABA ERA5:



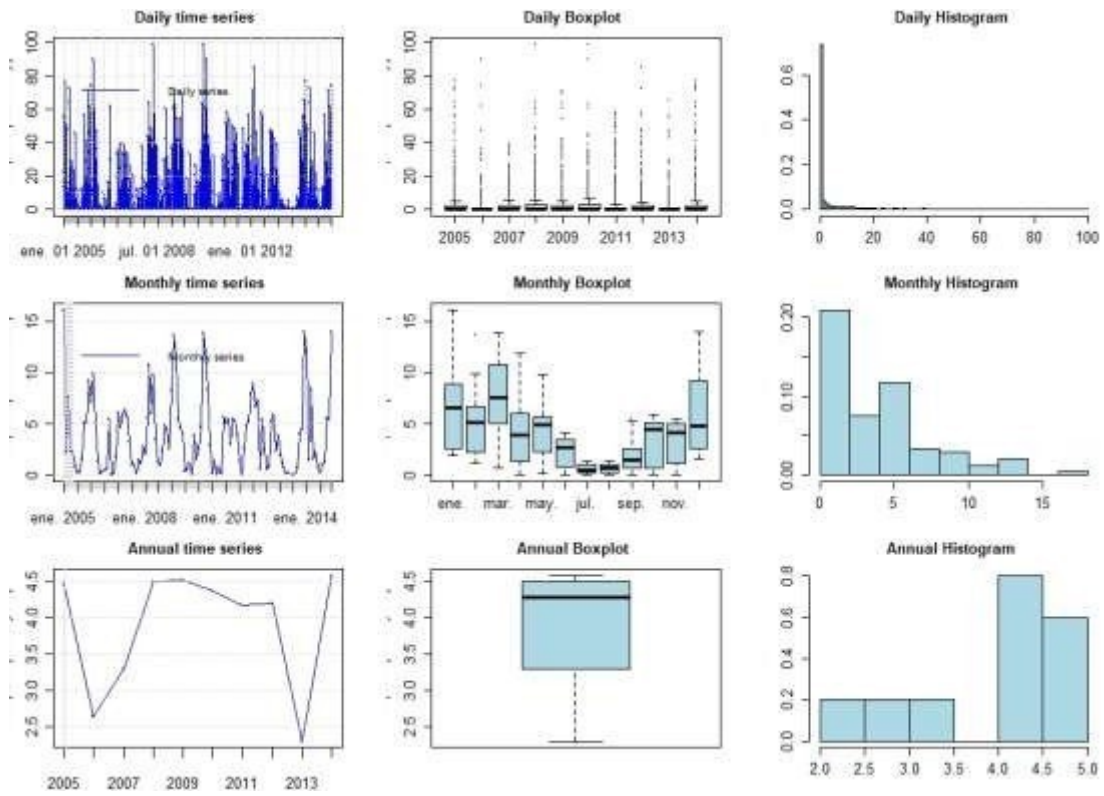
PIRACICABA PERSIANN:



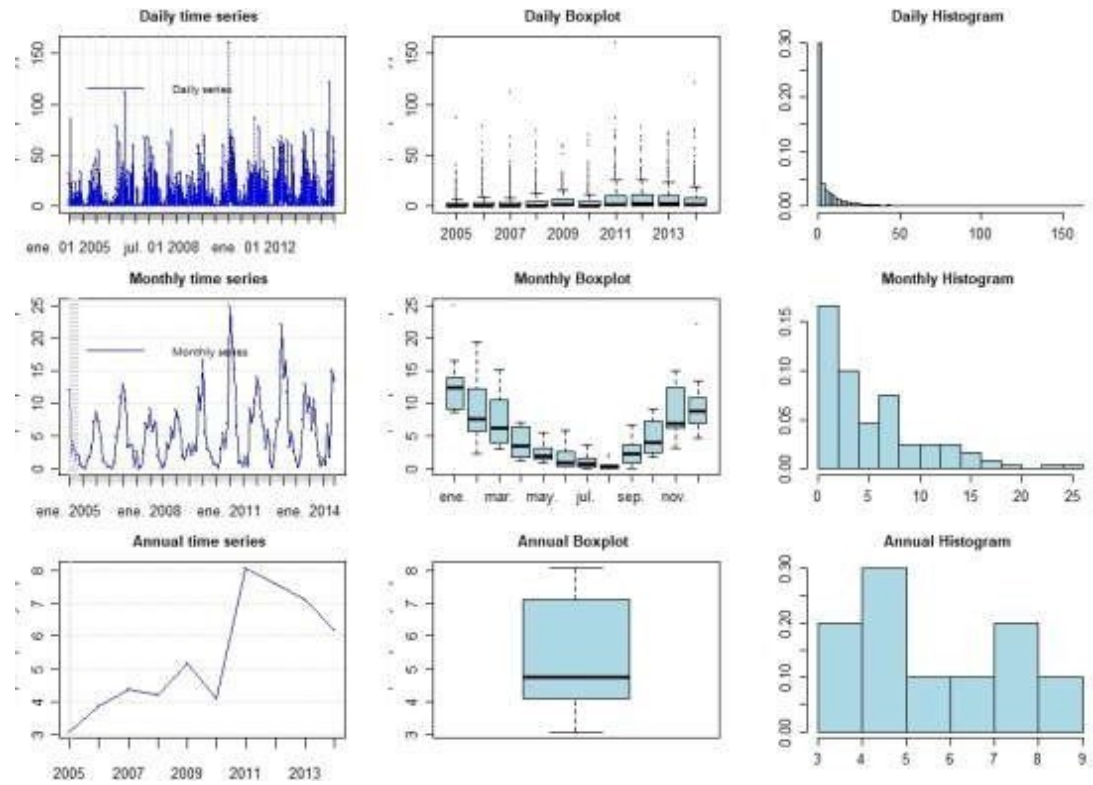
PIRACICABA TRMM:



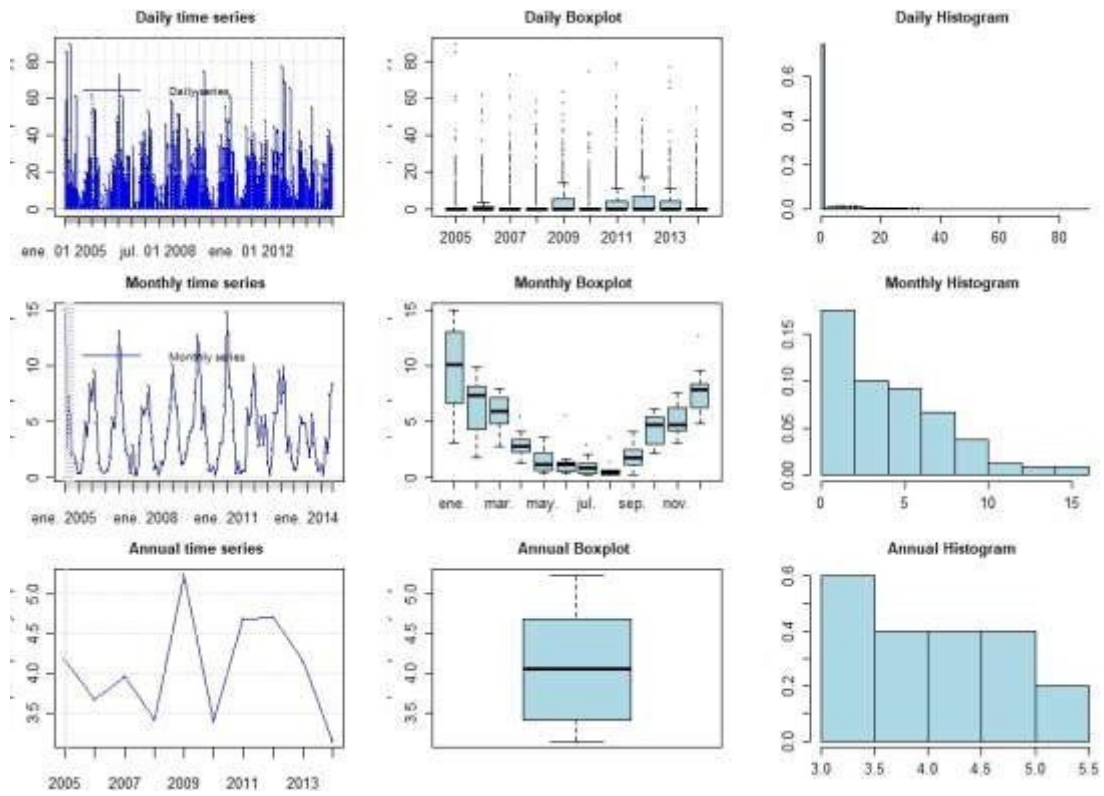
SÃO CARLOS MEDIDA:



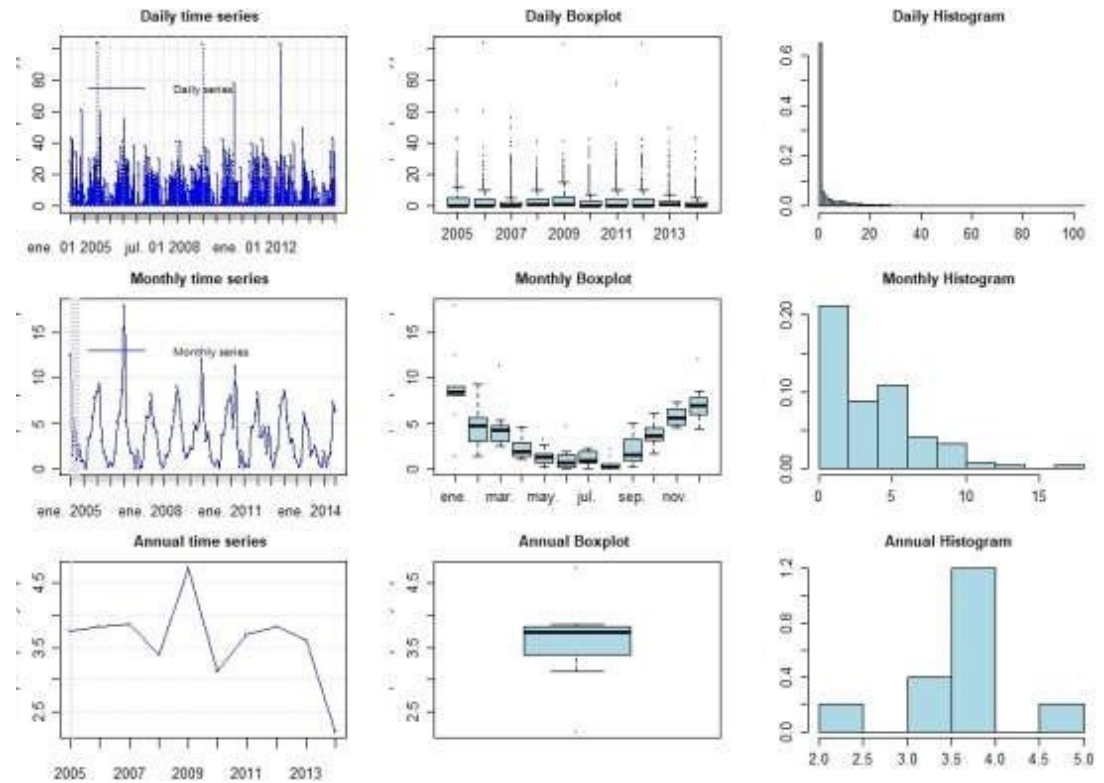
SÃO CARLOS CFSV2:



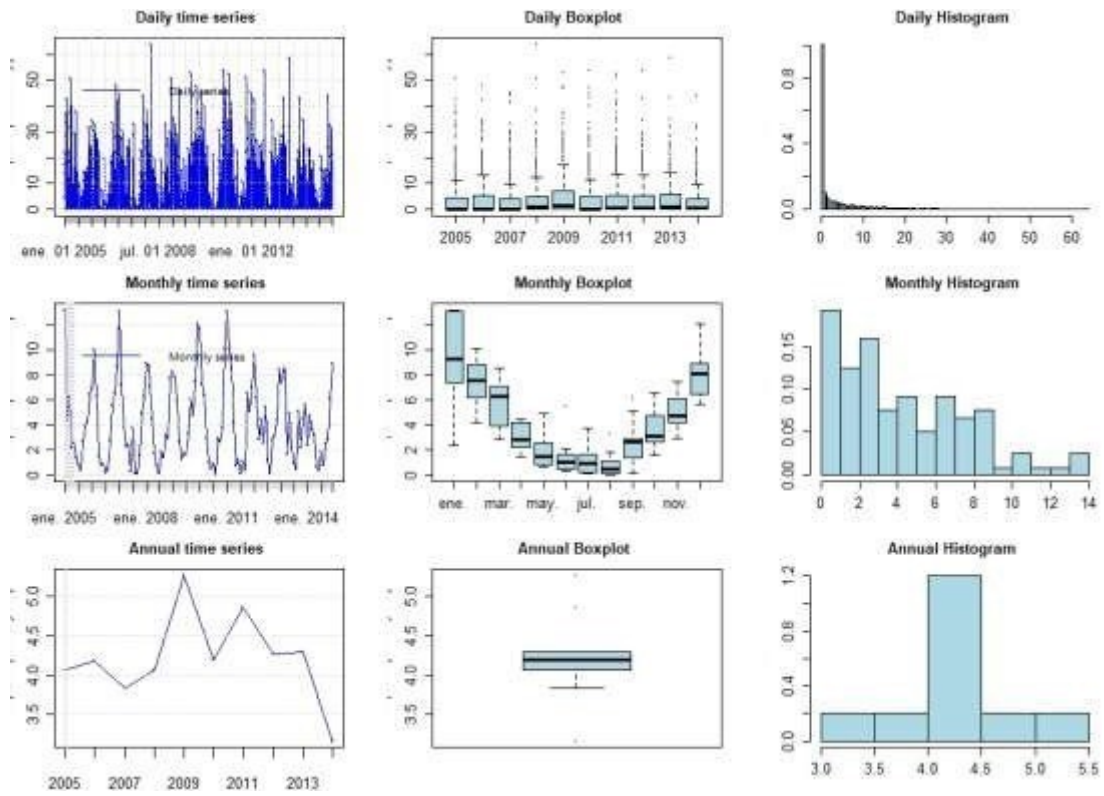
SÃO CARLOS CHIRPS:



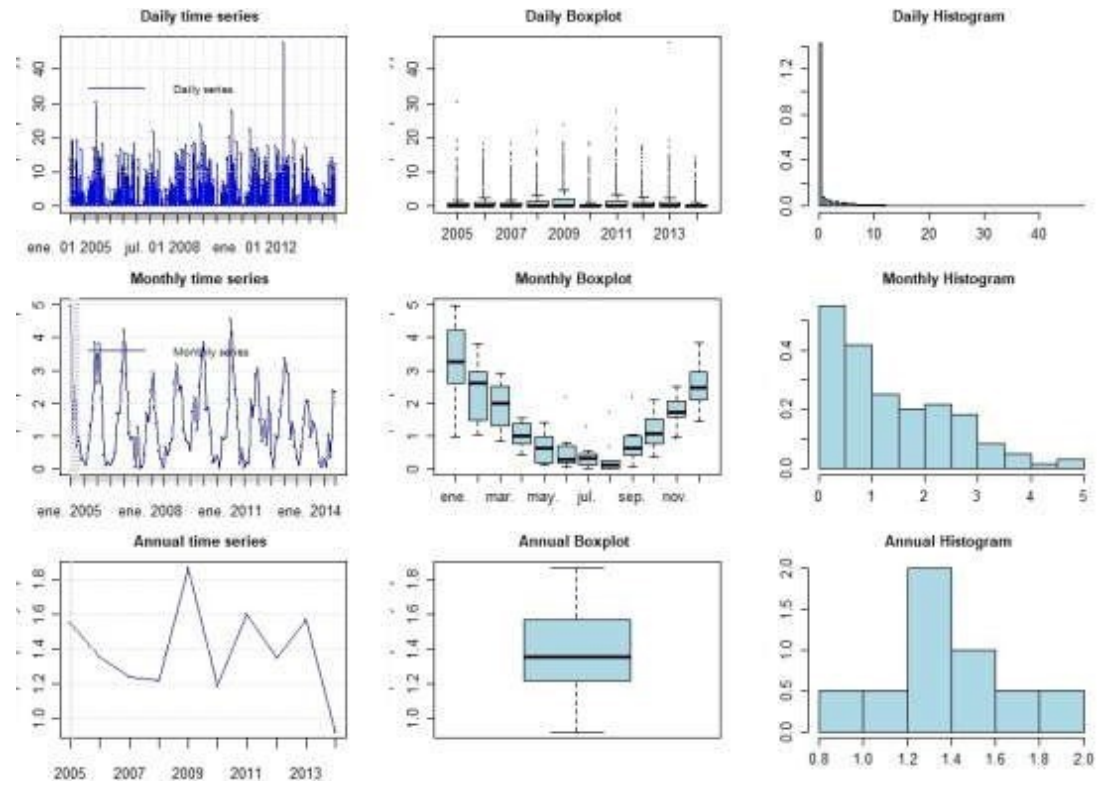
SÃO CARLOS ERA5:



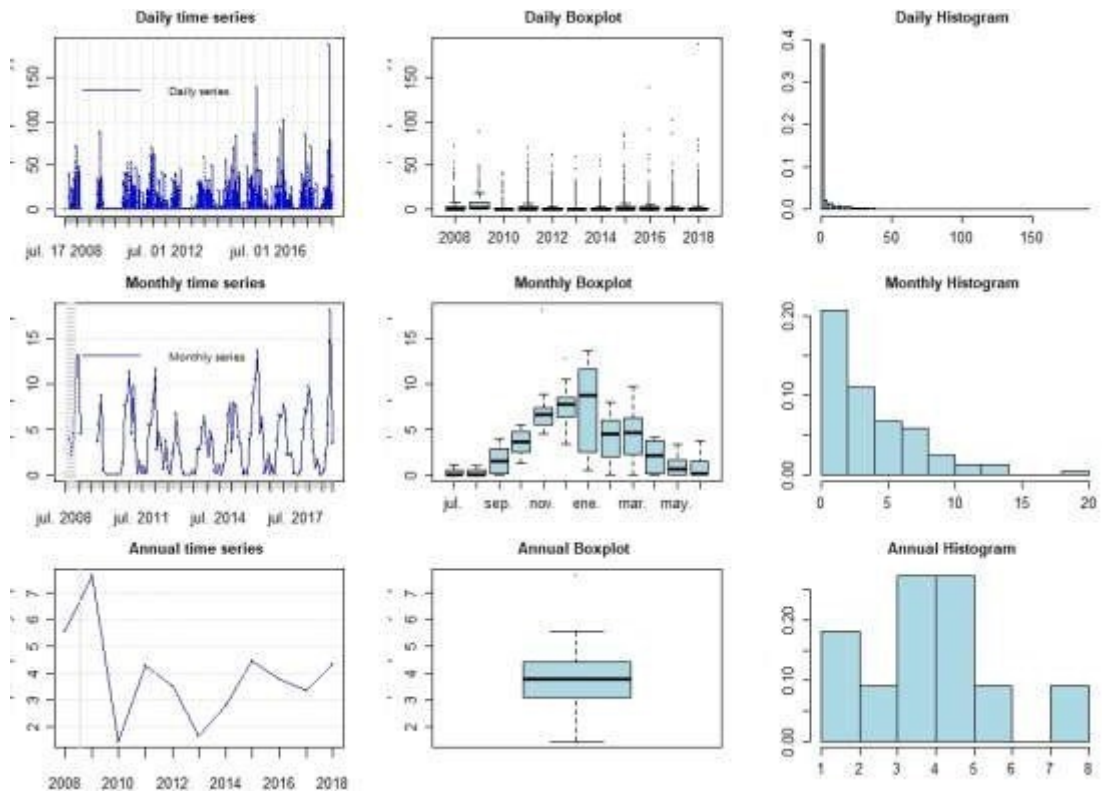
SÃO CARLOS PERSIANN:



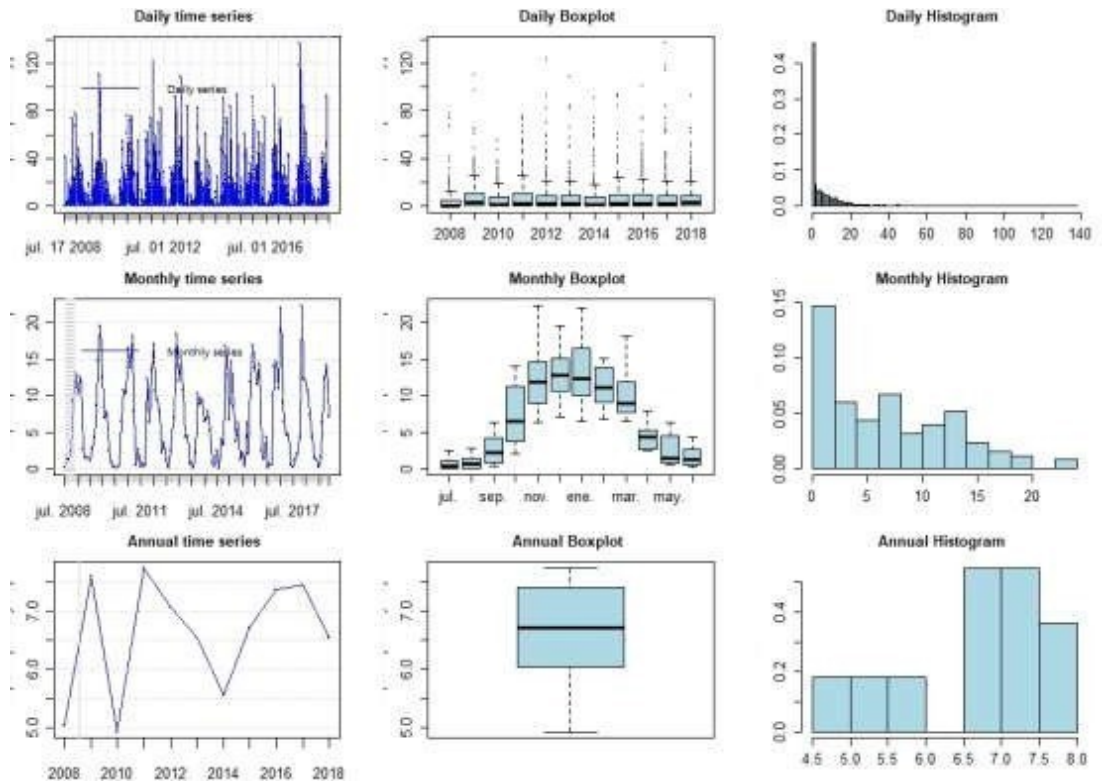
SÃO CARLOS TRMM:



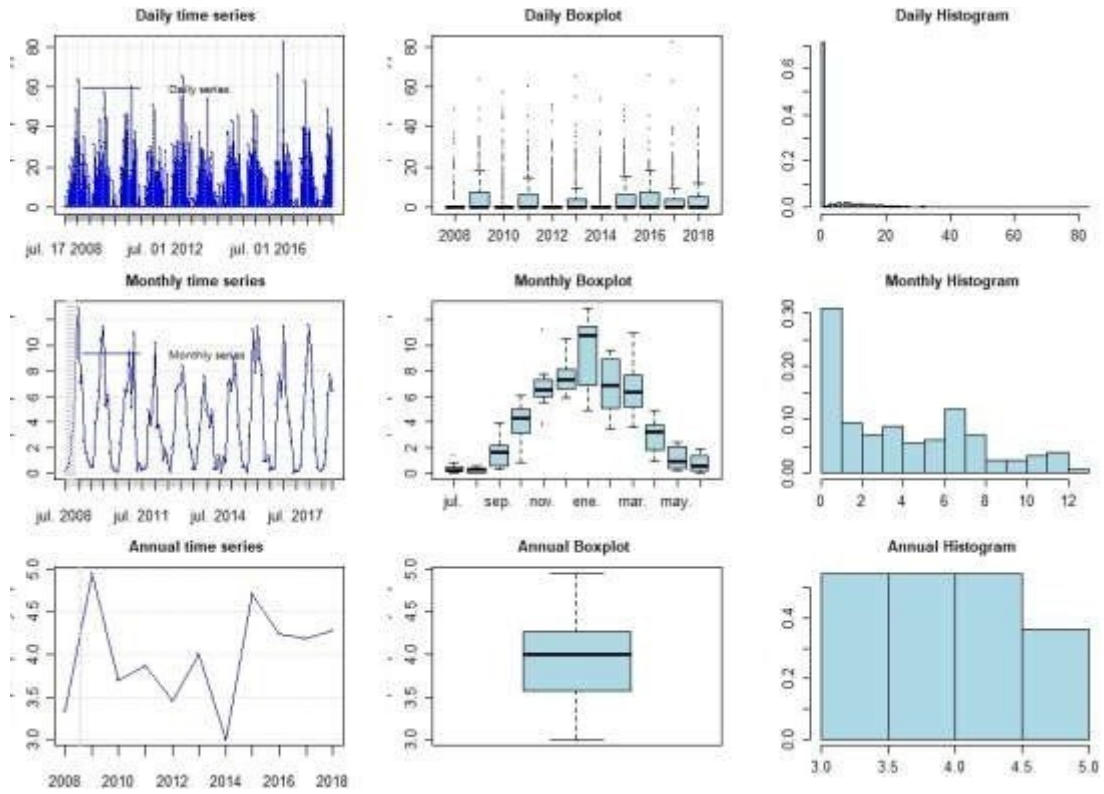
ITUVERAVA MEDIDA:



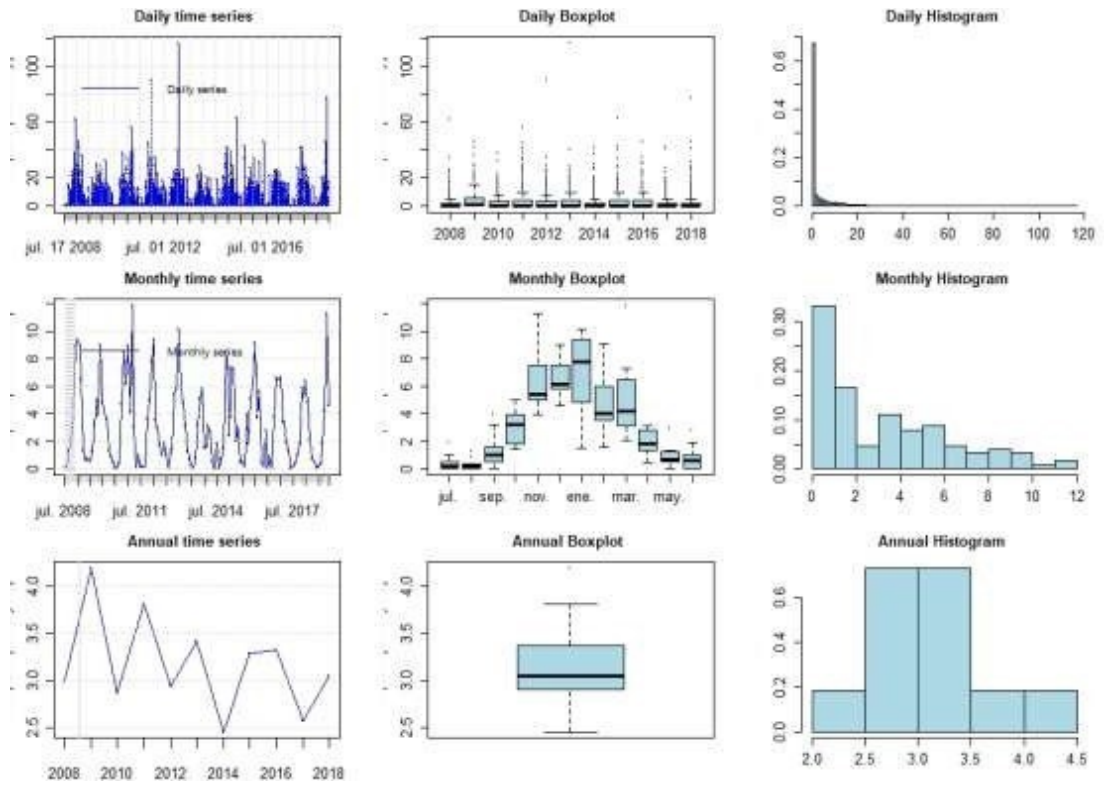
ITUVERAVA CFSV2:



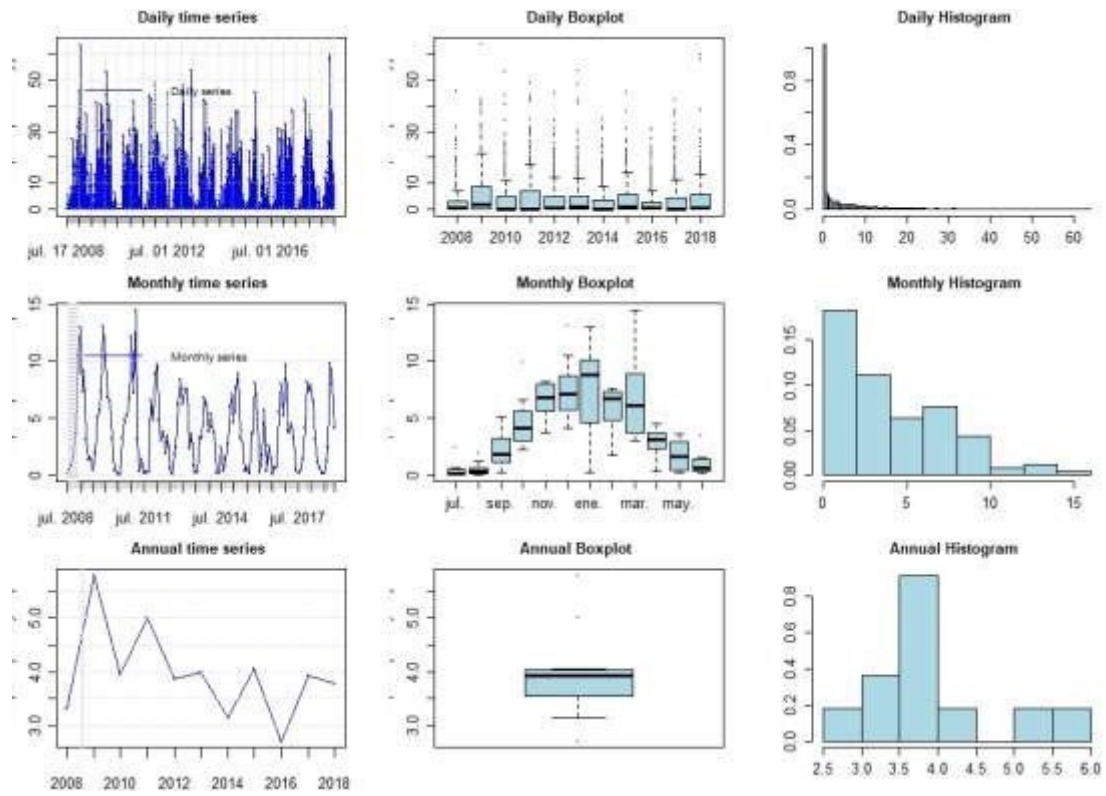
ITUVERAVA CHIRPS:



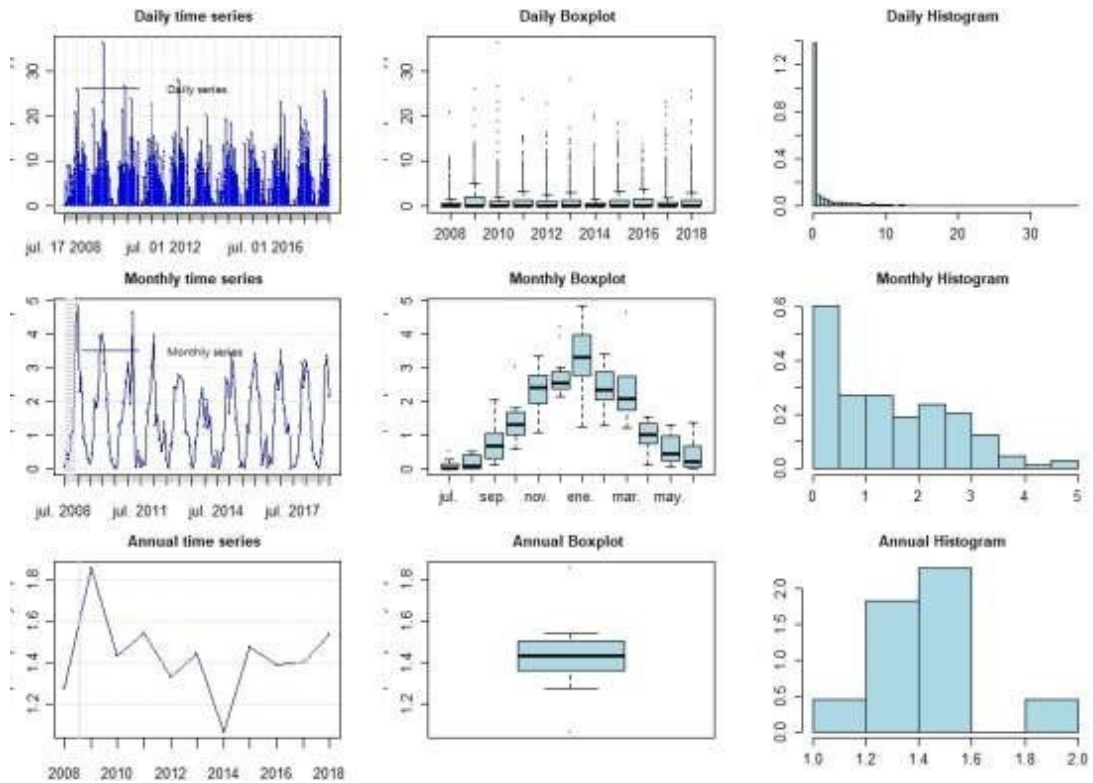
ITUVERAVA ERA5:



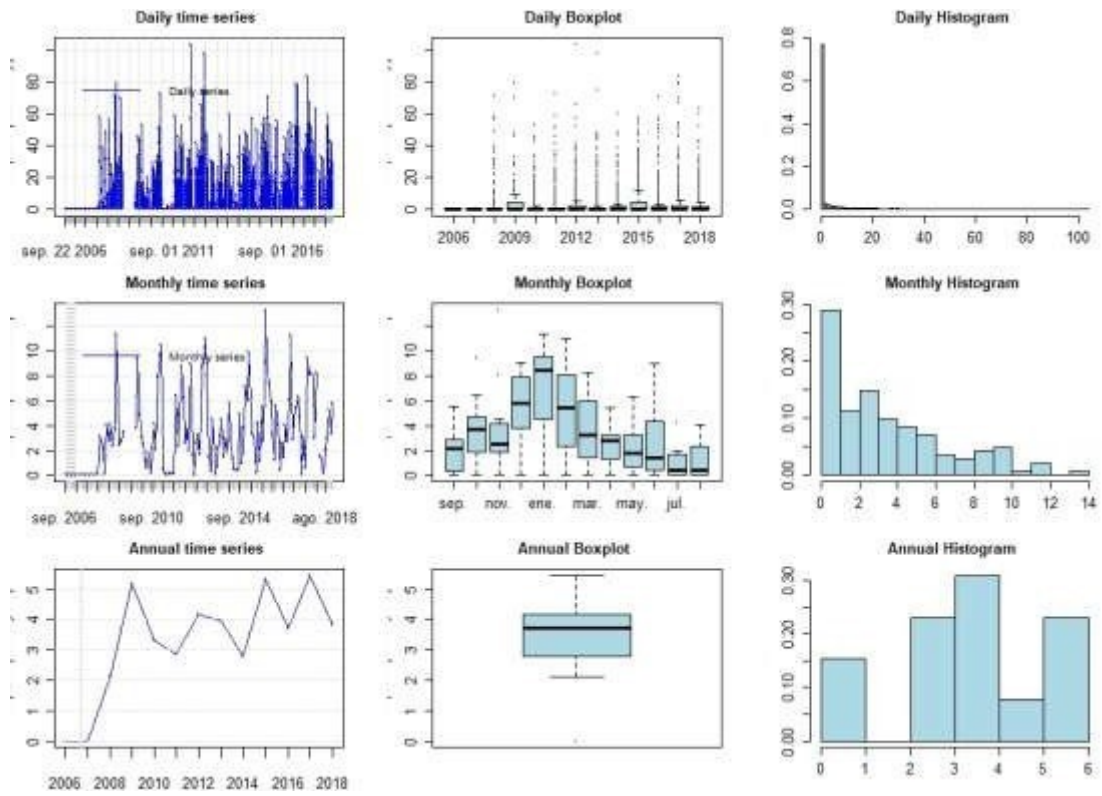
ITUVERAVA PERSIANN:



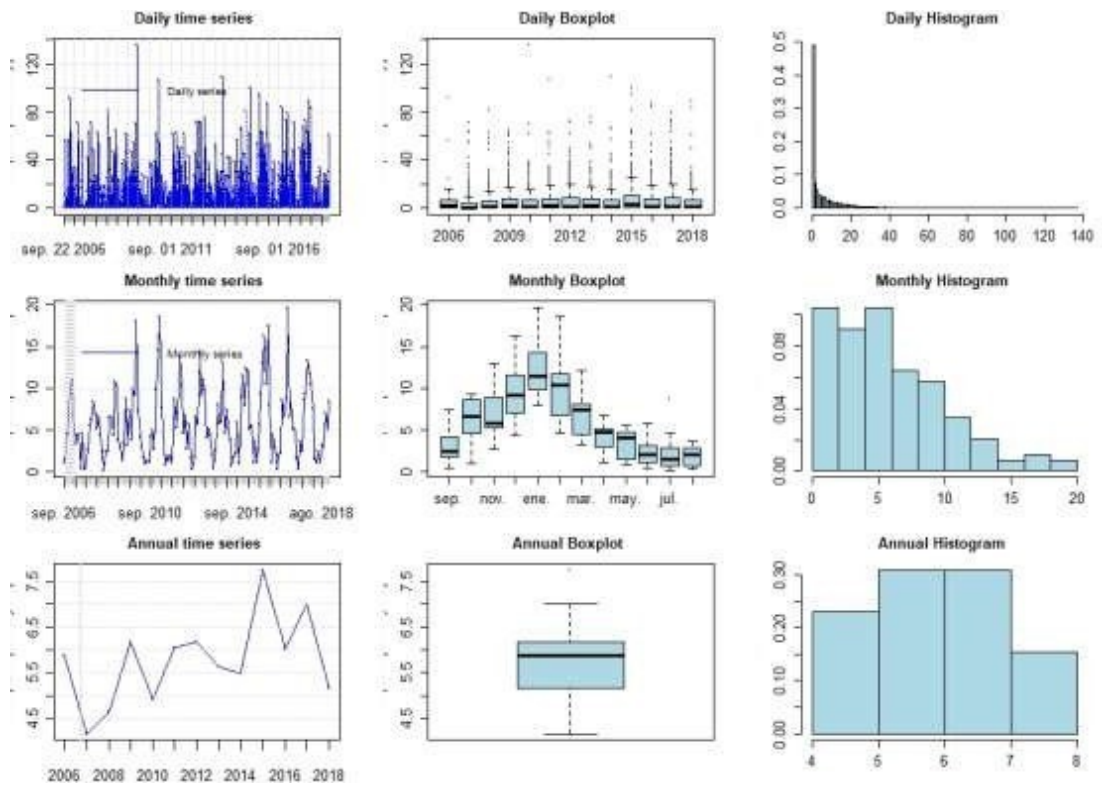
ITUVERAVA TRMM:



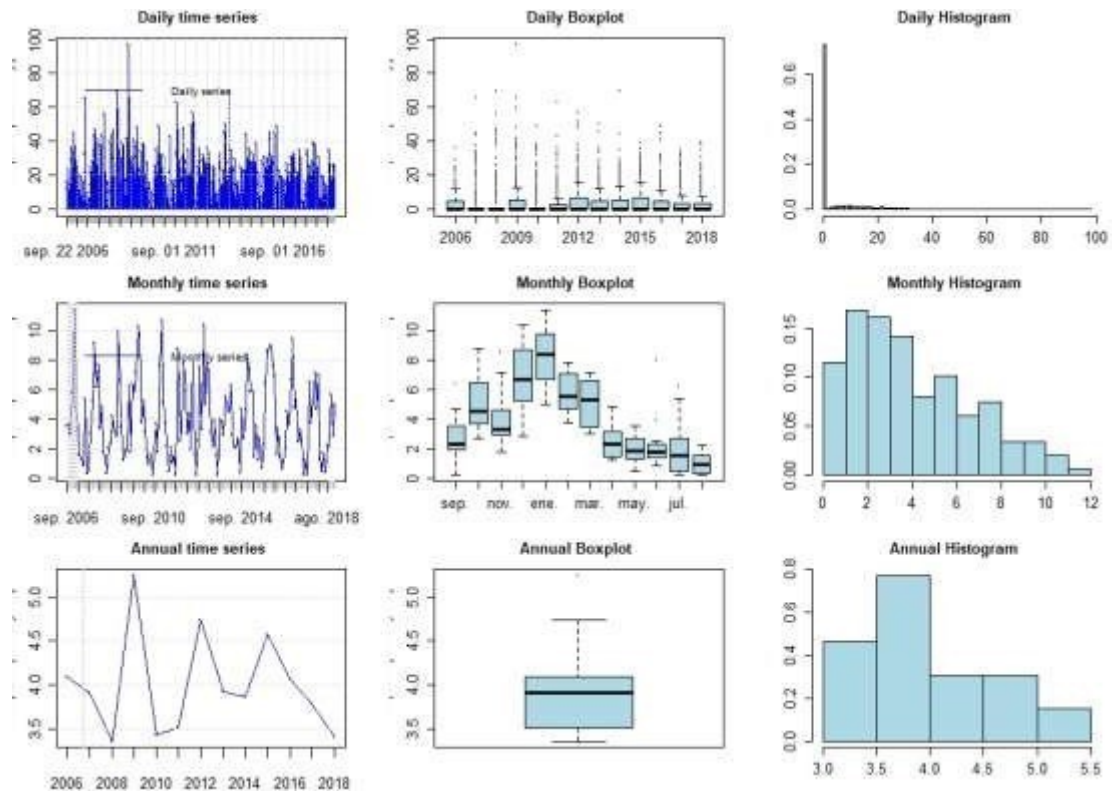
AVARÉ MEDIDA:



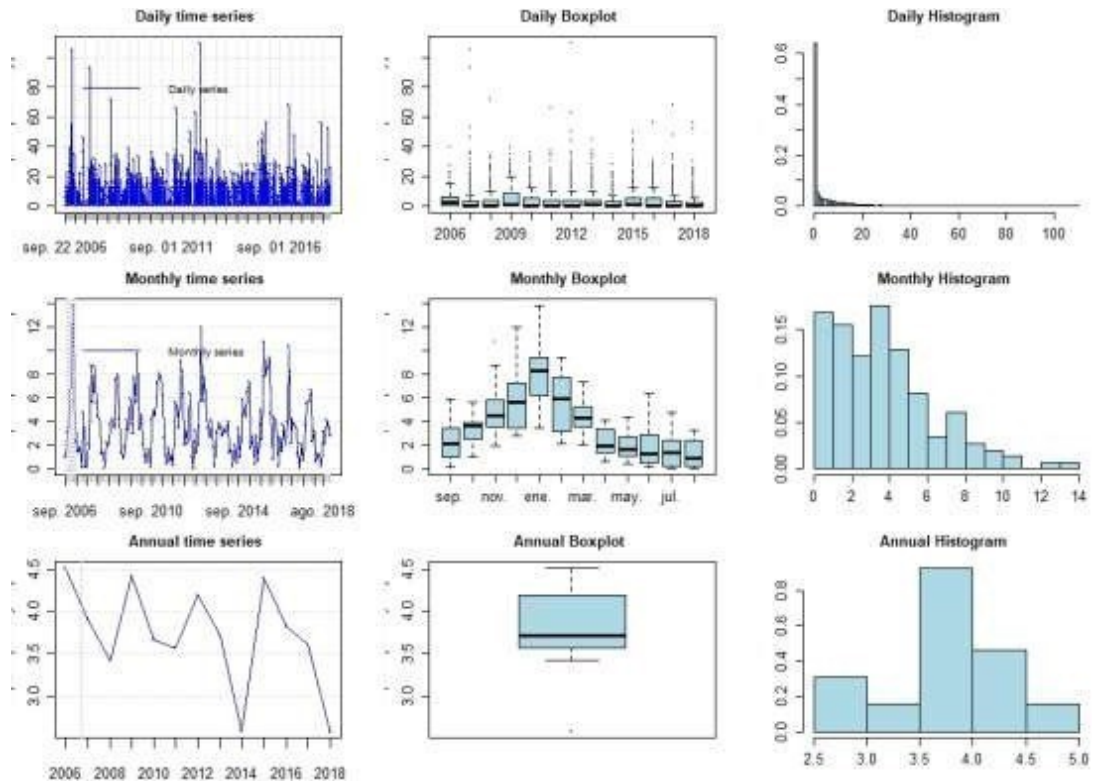
AVARÉ CFSV2:



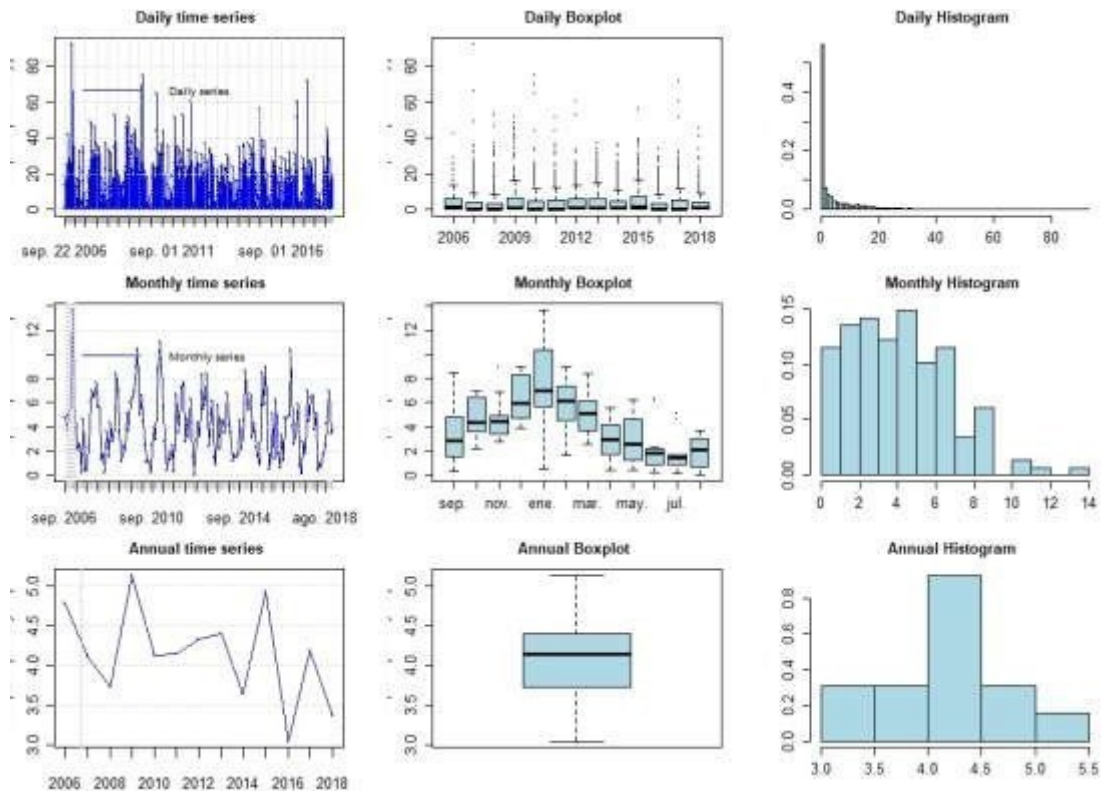
AVARÉ CHIRPS:



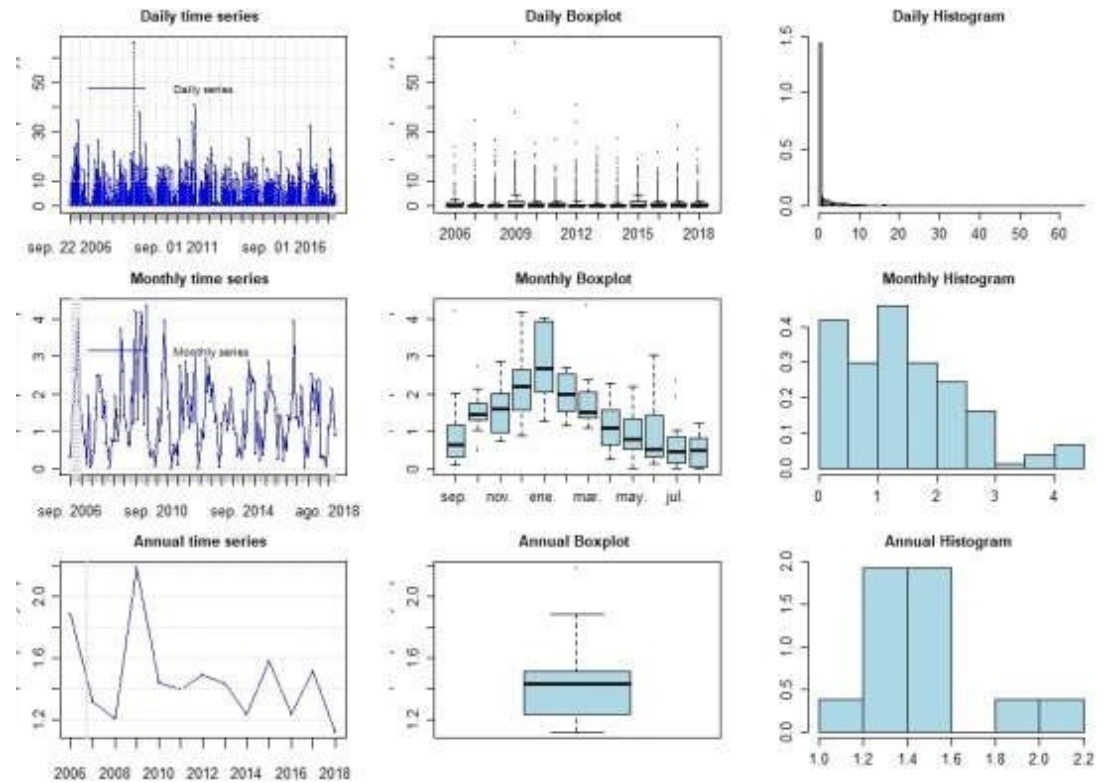
AVARÉ ERA5:



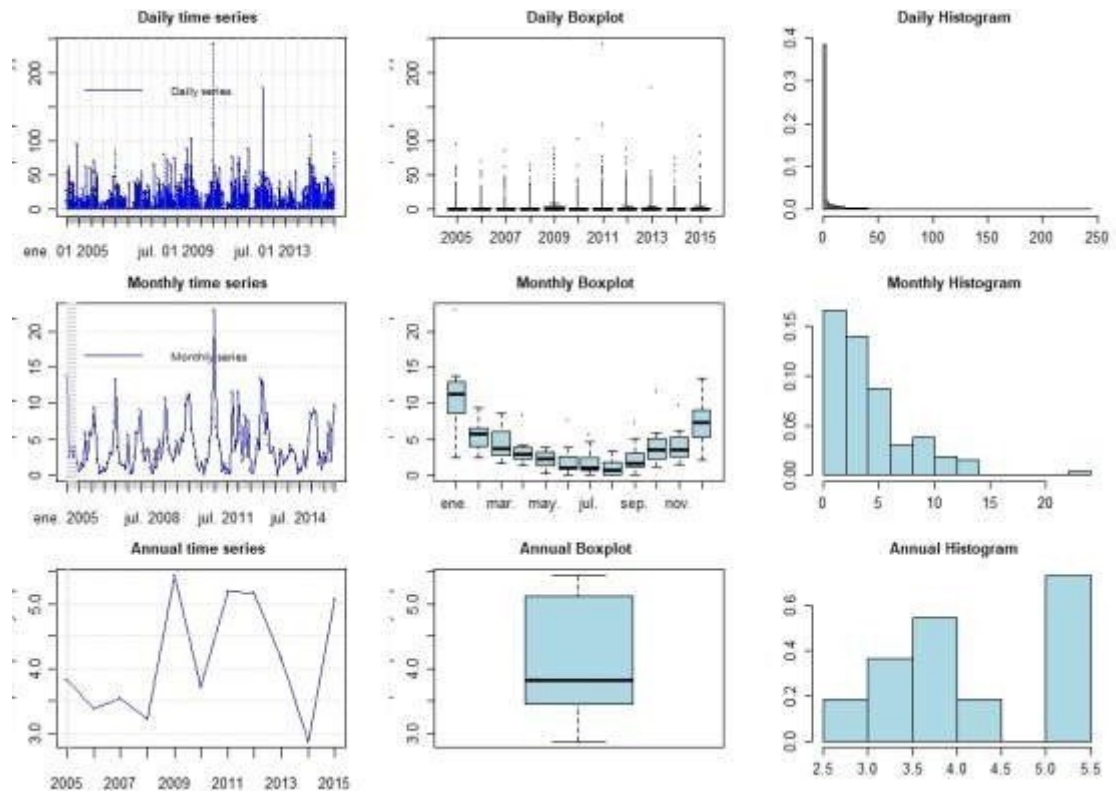
AVARÉ PERSIANN:



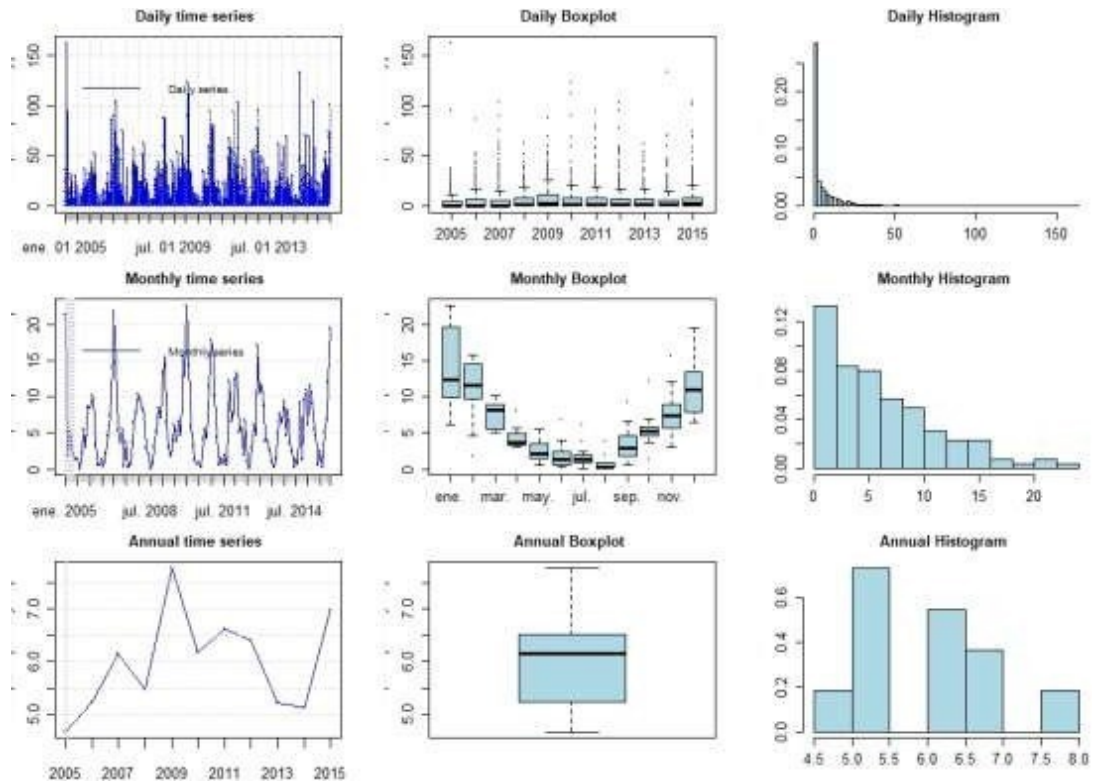
AVARÉ TRMM:



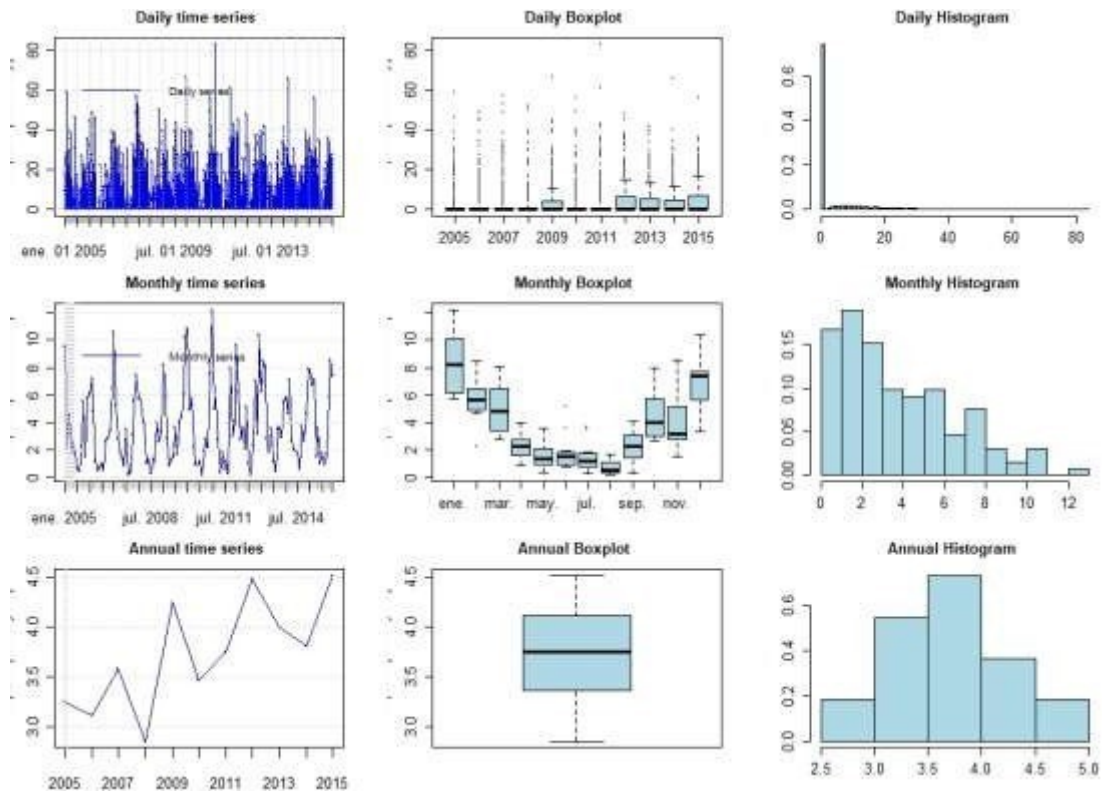
BOTUCATU MEDIDA:



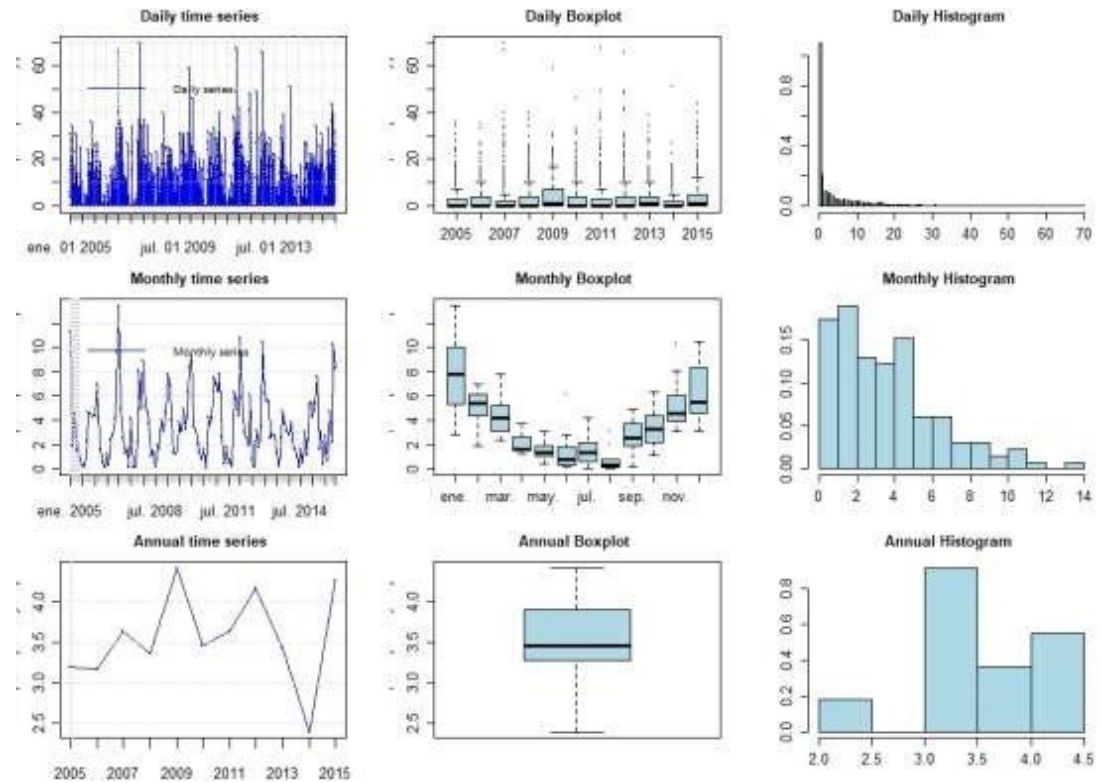
BOTUCATU CFSV2:



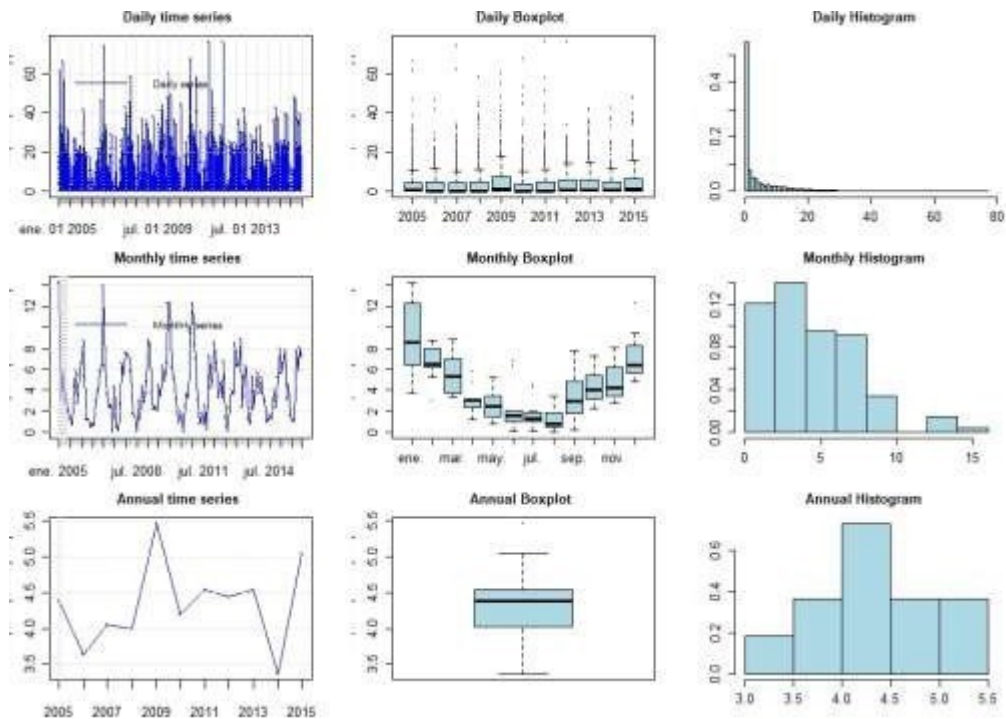
BOTUCATU CHIRPS:



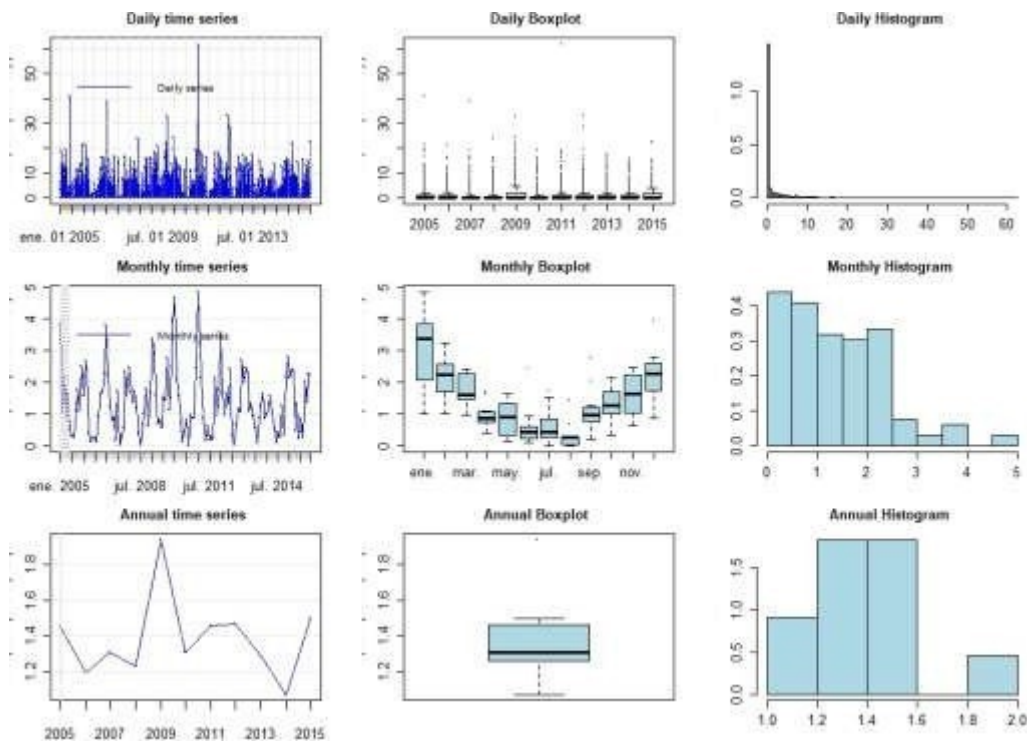
BOTUCATU ERA5:



BOTUCATU PERSIANN:



BOTUCATU TRMM:



Em relação aos histogramas anuais, pode-se verificar que o produto PERSIANN segue uma distribuição normal, ou seja, um formato de sino simétrico, em todas as estações testadas, com um pequeno lag na estação de Ituverava, o que significa que o processo é estável nesse intervalo de tempo. Os produtos CFSV2 apresentam

distribuição normal apenas na estação Avaré, CHIRPS nas estações Botucatu e Franca (esta última com pequeno lag), ERA5 nas estações Avaré, Ituverava e Franca (também com lag), TRMM tem quase normal distribuição nas estações Ituverava, São Carlos, Piracicaba e Franca. O histograma dos valores anuais nas estações medidas não segue uma distribuição normal, possivelmente devido à curta duração da série de dados com que trabalhamos neste projeto e alguns erros de medição, visto que várias estações apresentam lacunas nos seus registros. Os histogramas mensais mostram uma distribuição distorcida para a direita em todos os sensores testados e dados medidos, assim como os valores diários, que são extremamente distorcidos para a direita.

Os box-plots, que são um resumo gráfico da distribuição da amostra, nos fornecem informações sobre a forma, tendência central e variabilidade, dando-nos mais informações sobre as caudas de distribuição, ou seja, se a amostra possui elementos “outliers”, que são valores excepcionalmente distantes do centro.

Todos os sensores testados e as estações medidas apresentam o mesmo comportamento nos box-plots, maior dispersão nos meses úmidos, correspondendo a janeiro, fevereiro, março, abril, setembro, outubro e novembro, e menor dispersão nos meses secos, que é dizer, maio, junho, julho e agosto.

Para a escolha do produto a ser utilizado no presente trabalho, também foi realizado um ajuste linear simples para os valores de temperatura e precipitação, ou seja, com base nos valores de R^2 e declive, levando em consideração também o coeficiente de correlação entre os dados históricos das séries, foi escolhido o sensor que melhor representa os dados medidos.

Em relação à temperatura, foi feito um ajuste linear simples para os dados diários, uma vez que esses valores não apresentam variação significativa de um dia para o outro. Para o ajuste linear dos valores de precipitação, uma agregação dos valores diários aos mensais foi realizada como uma primeira etapa, uma vez que os valores diários são eventos únicos e muito difíceis de reproduzir por qualquer satélite. Posteriormente, foi realizado o ajuste linear em relação aos dados medidos, com os resultados apresentados na tabela 4. O ajuste linear para cada par de dados (medido e satélite utilizado) também é mostrado no gráfico 10.

Tabela 4- Resultados de ajuste linear para cada estação

FRANCA:

PRECIPITAÇÃO (MENSAL)			
	R ²	INCLINAÇÃO	CORRELAÇÃO
CFSV2	0.7738	1.1592	0.8797
CHRIPS	0.9376	0.8704	0.9683
ERA5	0.8393	0.8458	0.9161
PERSIANN	0.8884	0.8650	0.9425
TRMM	0.9412	0.3303	0.9701

TEMPERATURA			
	R ²	INCLINAÇÃO	CORRELAÇÃO
CFSV2	0.7185	0.9119	0.8477
ERA5	0.8992	0.9184	0.9482

PIRACICABA:

PRECIPITAÇÃO (MENSAL)			
	R ²	INCLINAÇÃO	CORRELAÇÃO
CFSV2	0.5431	1.3122	0.7369
CHRIPS	0.6918	0.7146	0.8317
ERA5	0.6957	0.8469	0.8341
PERSIANN	0.6670	0.8282	0.8167
TRMM	0.7344	0.2816	0.8570

TEMPERATURA			
	R ²	INCLINAÇÃO	CORRELAÇÃO
CFSV2	0.6963	0.8004	0.8344
ERA5	0.7031	0.7785	0.8385

SAO CARLOS:

PRECIPITAÇÃO (MENSAL)			
	R ²	INCLINAÇÃO	CORRELAÇÃO
CFSV2	0.5166	1.0447	0.7187
CHRIPS	0.7771	0.8424	0.8815
ERA5	0.6757	0.6908	0.8220
PERSIANN	0.7487	0.7958	0.8653
TRMM	0.8250	0.2902	0.9082

TEMPERATURA			
	R ²	INCLINAÇÃO	CORRELAÇÃO
CFSV2	0.8224	0.9355	0.9068
ERA5	0.9159	0.9596	0.9570

ITUVERAVA:

PRECIPITAÇÃO (MENSAL)			
	R ²	INCLINAÇÃO	CORRELAÇÃO
CFSV2	0.5825	1.2009	0.7632
CHRIPS	0.6655	0.7911	0.8158
ERA5	0.7225	0.7138	0.8500
PERSIANN	0.6103	0.7578	0.7812
TRMM	0.7137	0.2824	0.8448

TEMPERATURA			
	R ²	INCLINAÇÃO	CORRELAÇÃO
CFSV2	0.6092	0.7157	0.7805
ERA5	0.7107	0.7409	0.8430

AVARÉ:

PRECIPITAÇÃO (MENSAL)			
	R ²	INCLINAÇÃO	CORRELAÇÃO
CFSV2	0.6619	1.1724	0.8135
CHRIPS	0.6211	0.6955	0.7881
ERA5	0.6835	0.6976	0.8267
PERSIANN	0.6191	0.6571	0.7868
TRMM	0.5784	0.2438	0.7605

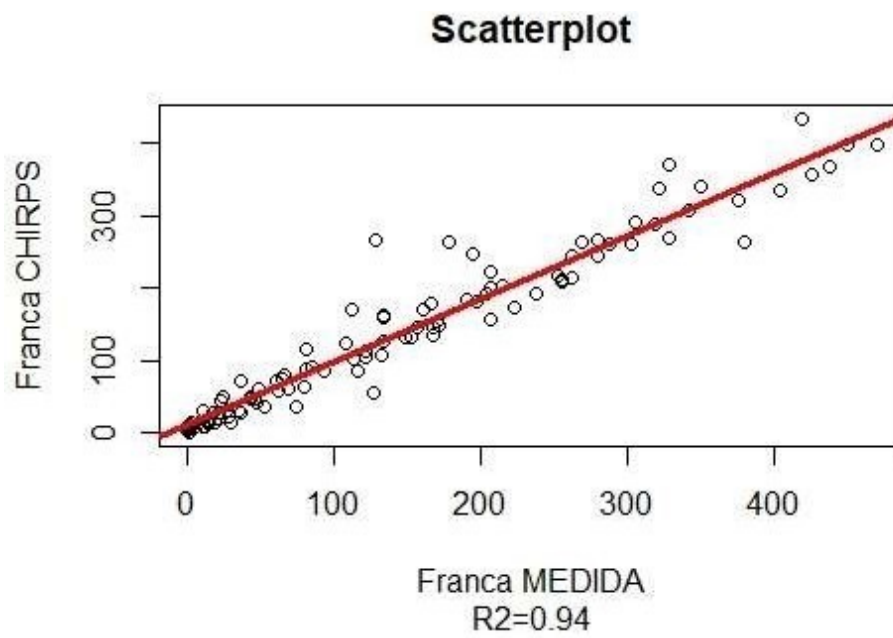
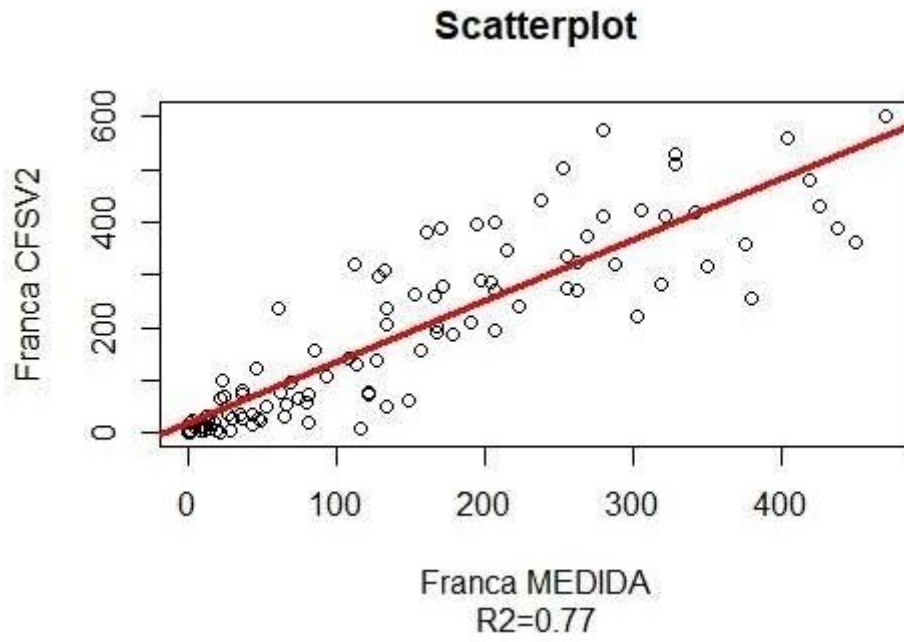
TEMPERATURA			
	R ²	INCLINAÇÃO	CORRELAÇÃO
CFSV2	0.6257	0.7586	0.7910
ERA5	0.6951	0.8127	0.8337

BOTUCATU:

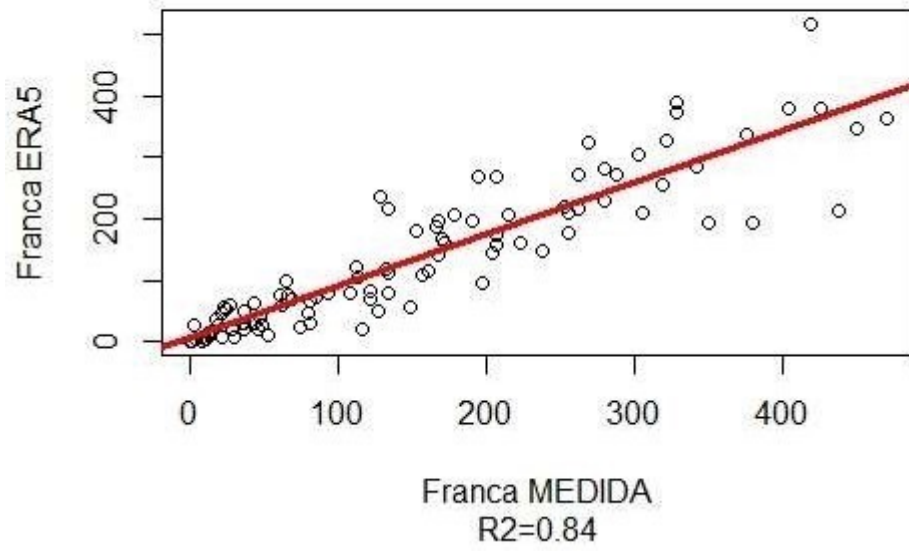
PRECIPITAÇÃO (MENSAL)			
	R ²	INCLINAÇÃO	CORRELAÇÃO
CFSV2	0.6712	1.1237	0.8192
CHRIPS	0.7529	0.6548	0.8677
ERA5	0.6777	0.6194	0.8232
PERSIANN	0.7423	0.6871	0.8616
TRMM	0.7194	0.2266	0.8482

TEMPERATURA			
	R ²	INCLINAÇÃO	CORRELAÇÃO
CFSV2	0.5126	0.6663	0.7160
ERA5	0.6490	0.7645	0.8056

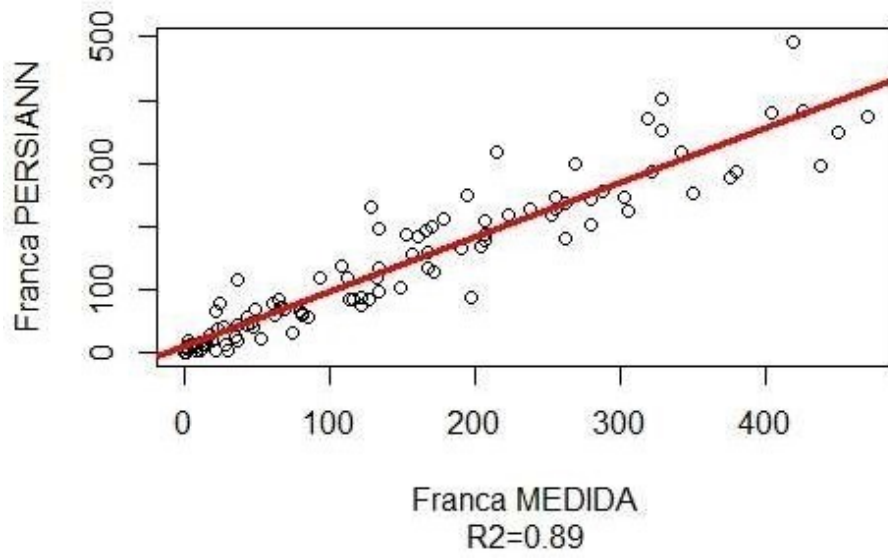
Figura 11- Ajustes lineares para cada estação



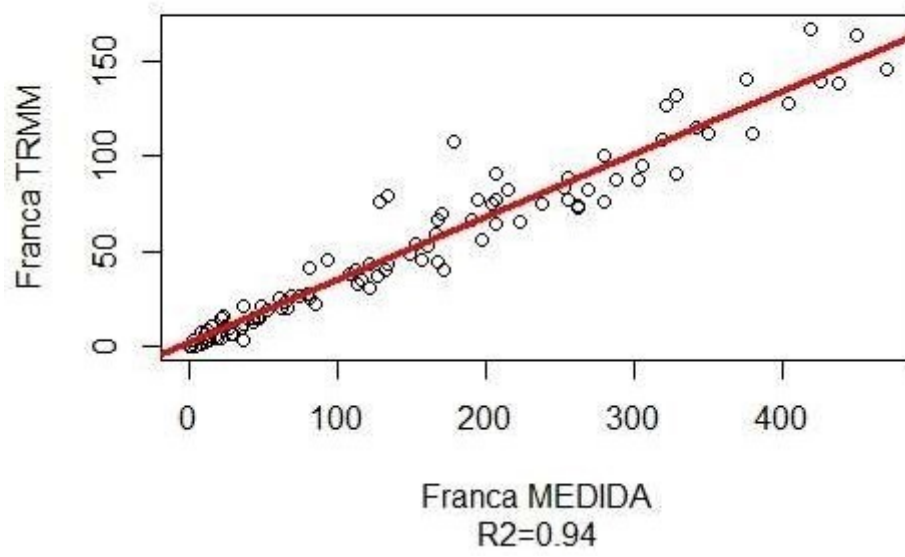
Scatterplot



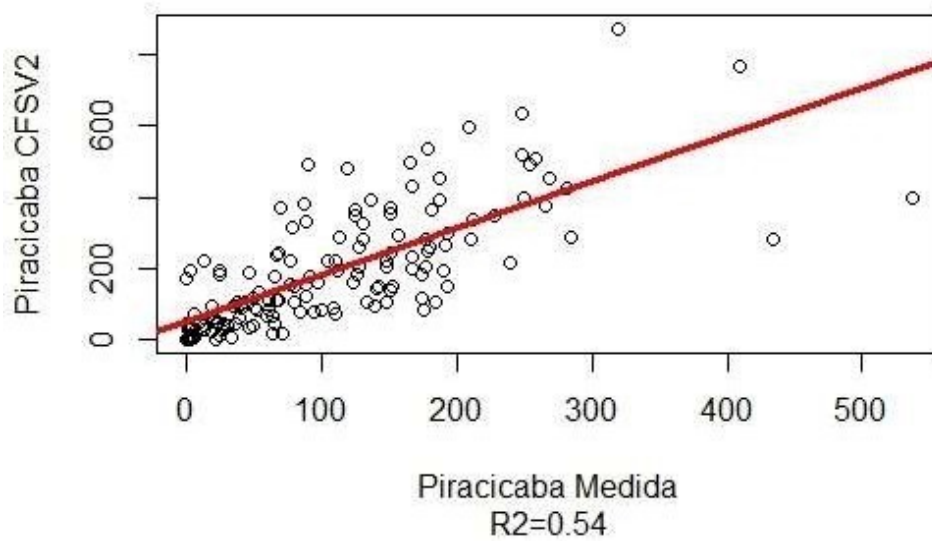
Scatterplot

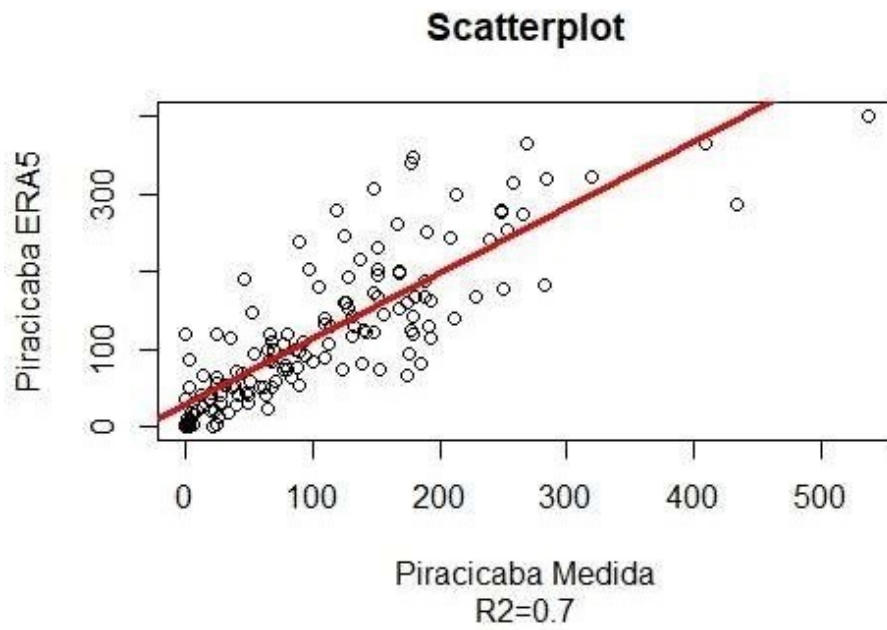
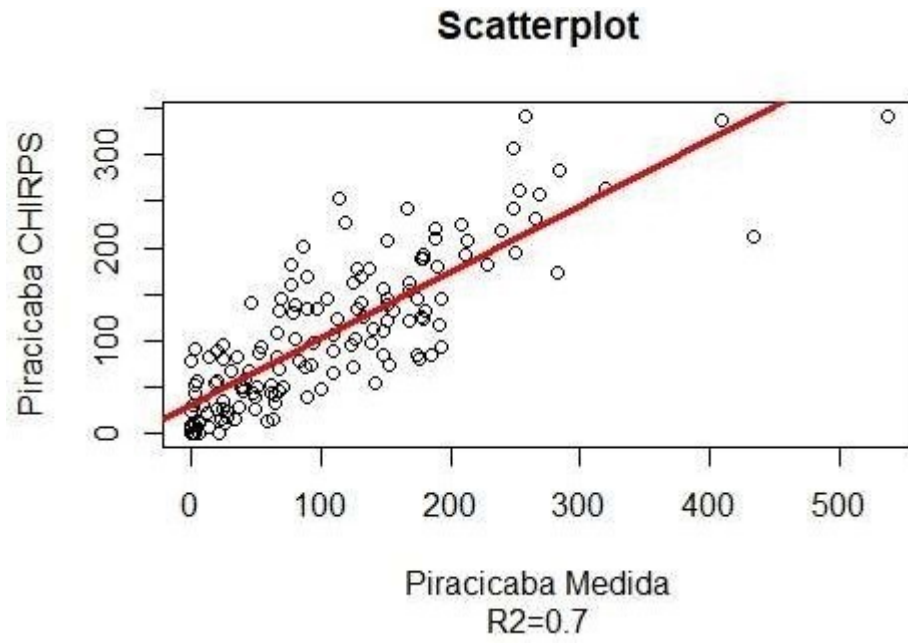


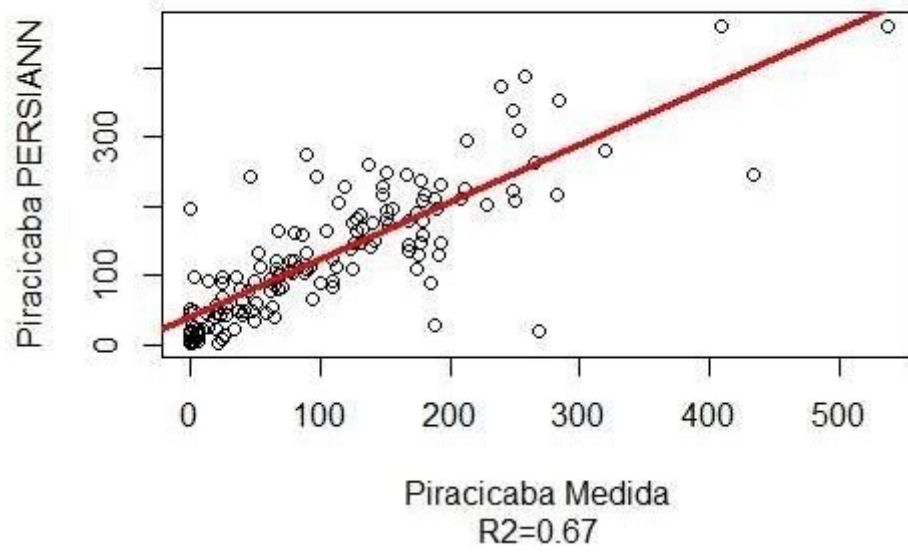
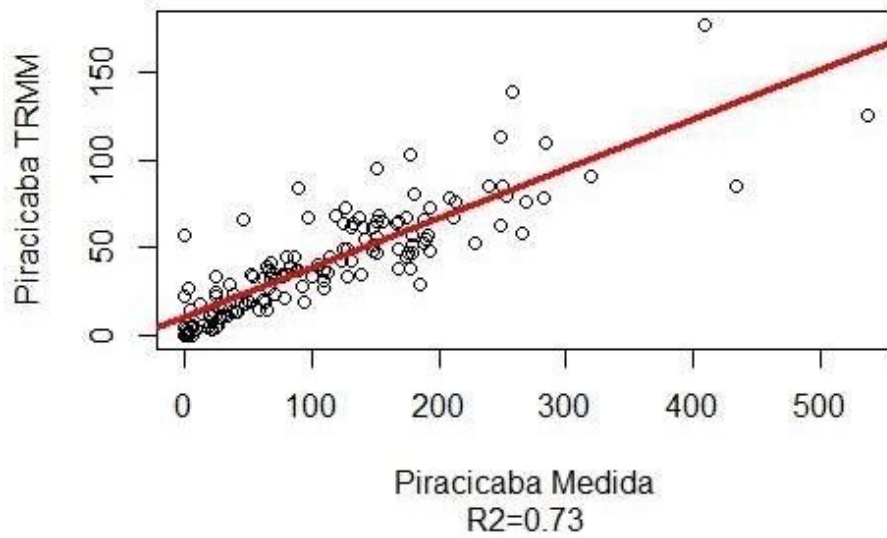
Scatterplot



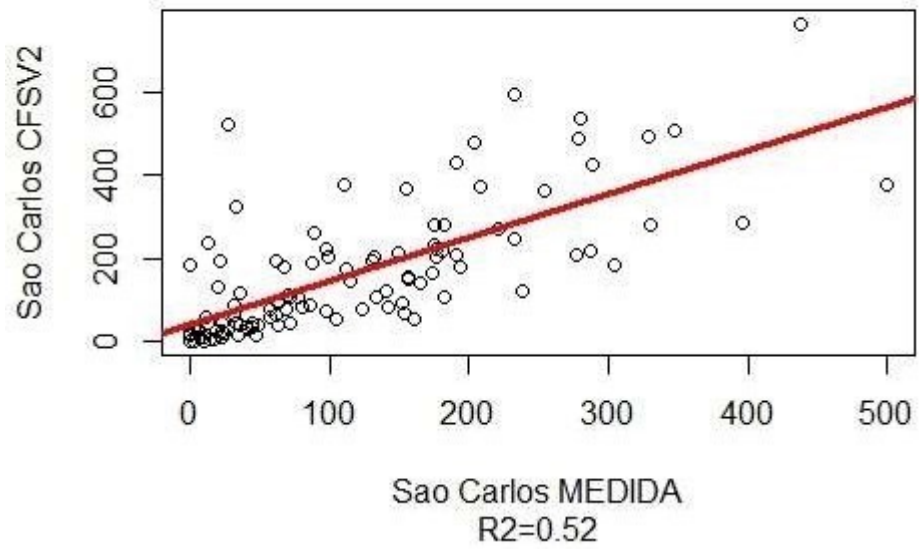
Scatterplot



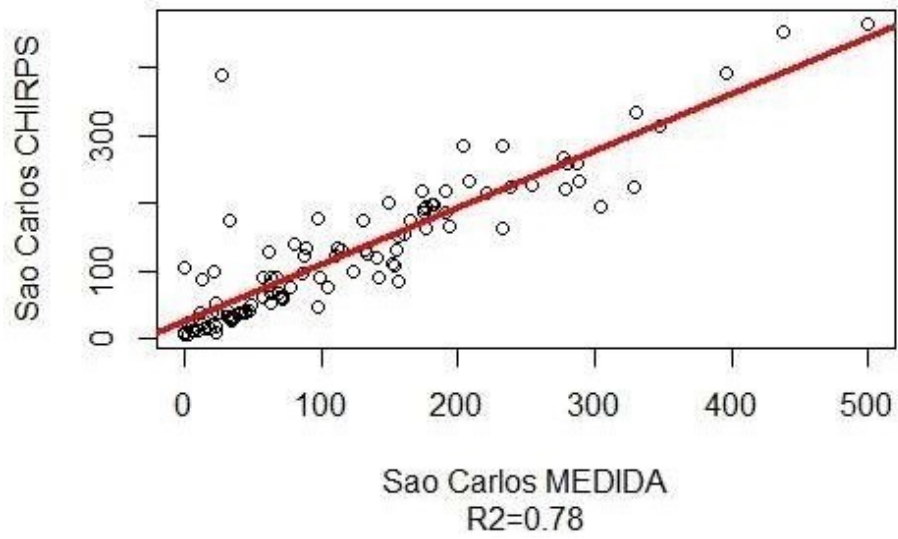


Scatterplot**Scatterplot**

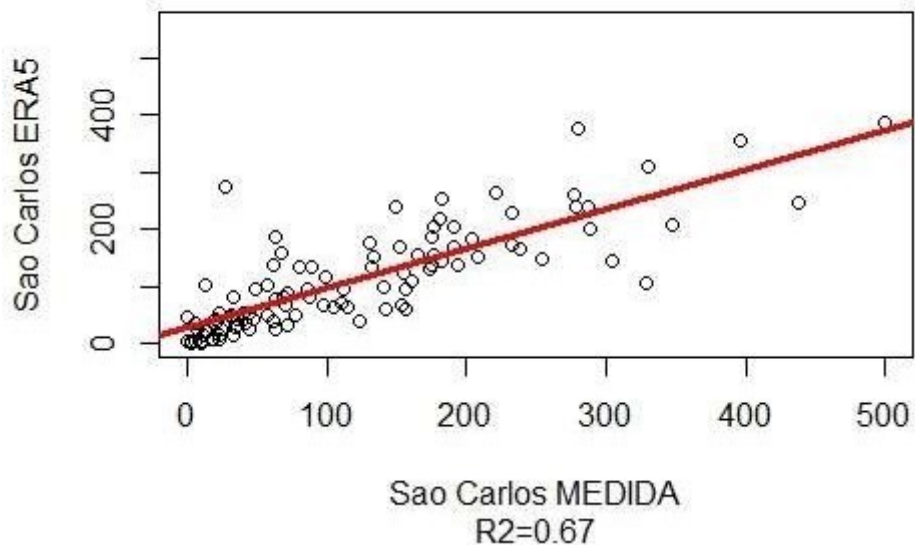
Scatterplot



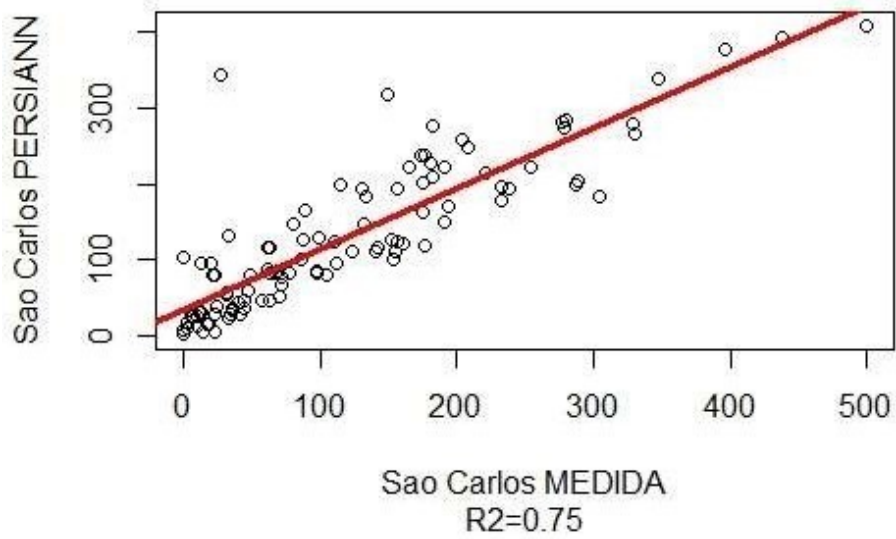
Scatterplot



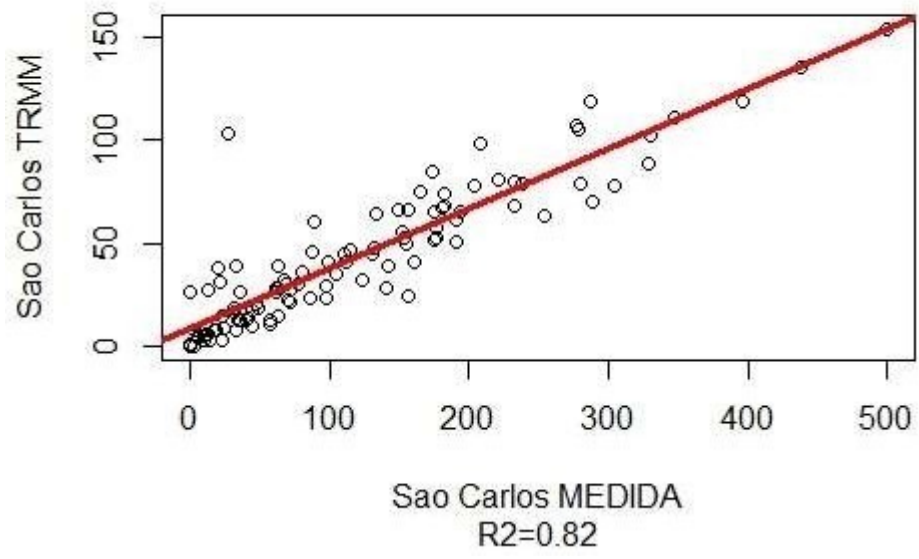
Scatterplot



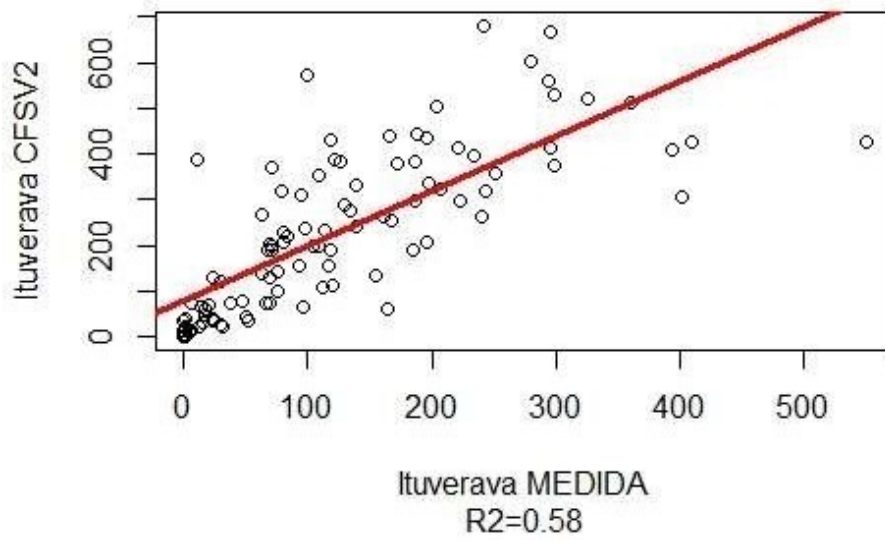
Scatterplot

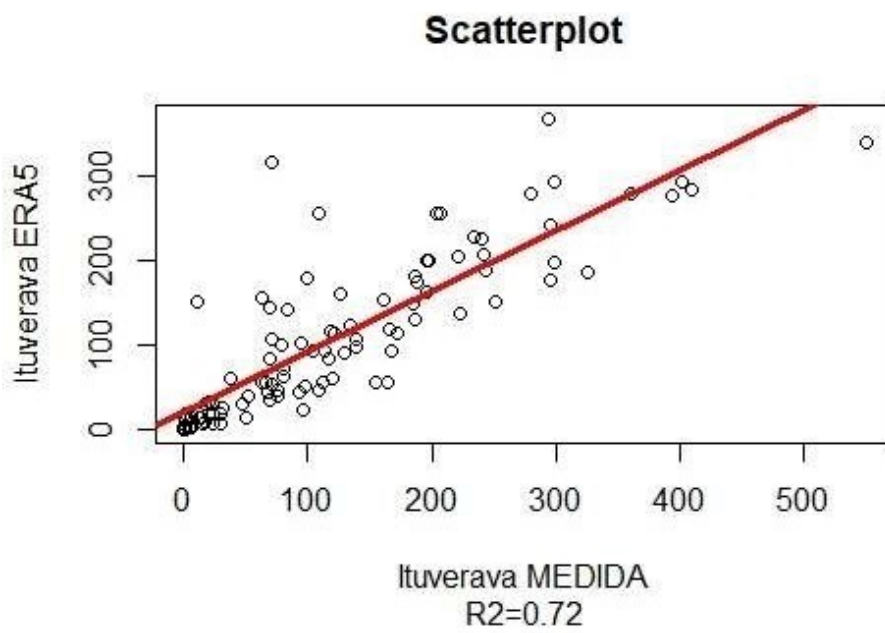
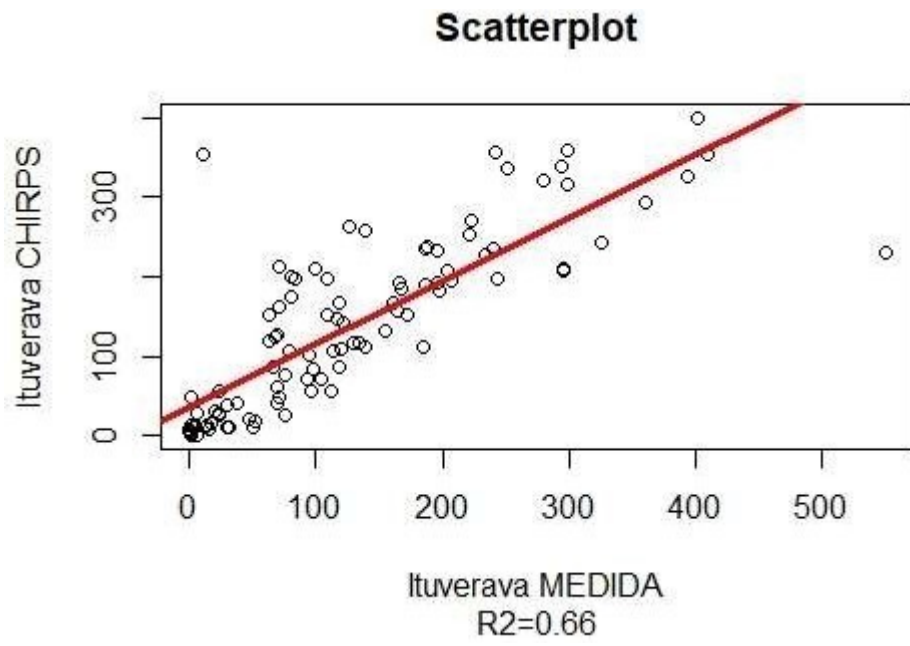


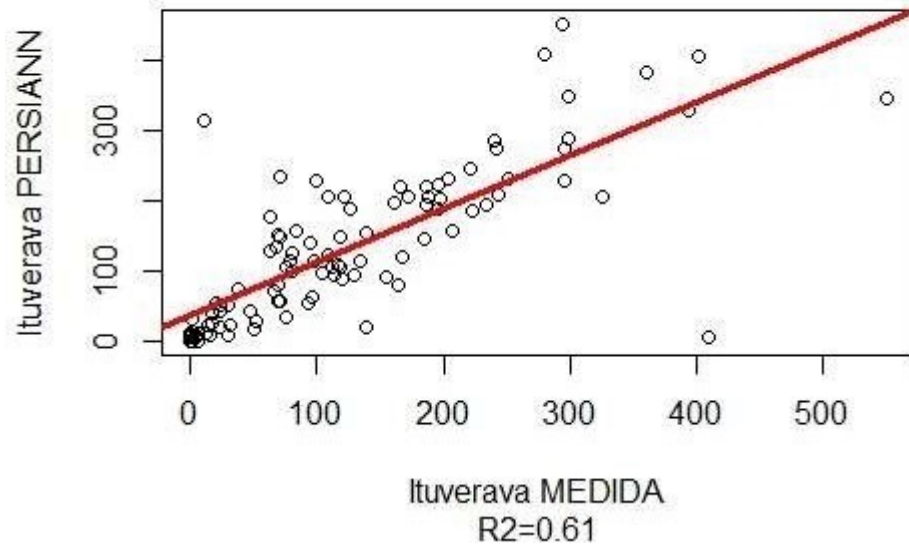
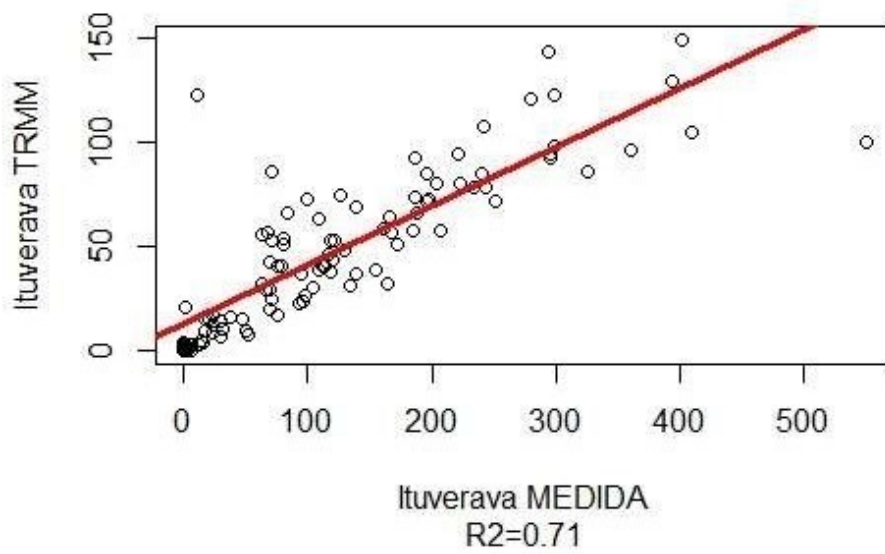
Scatterplot



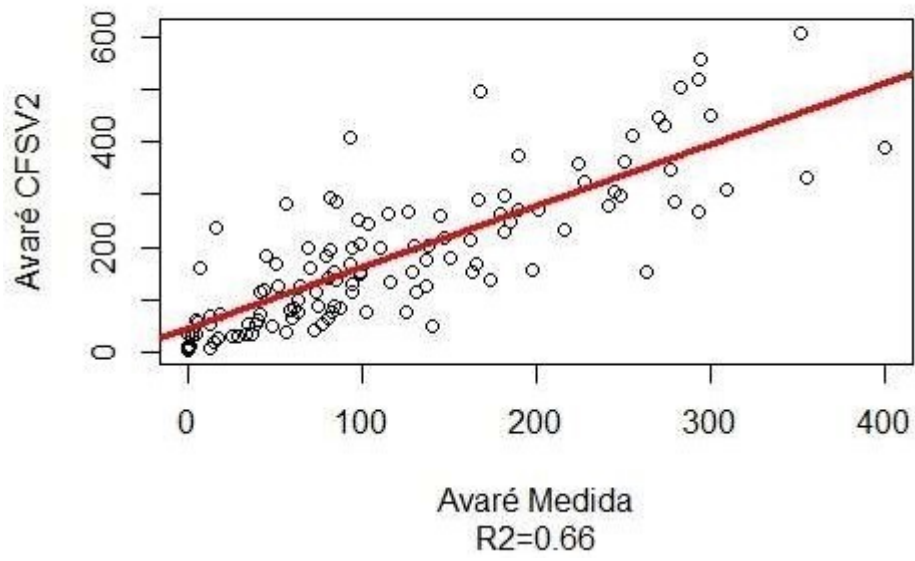
Scatterplot



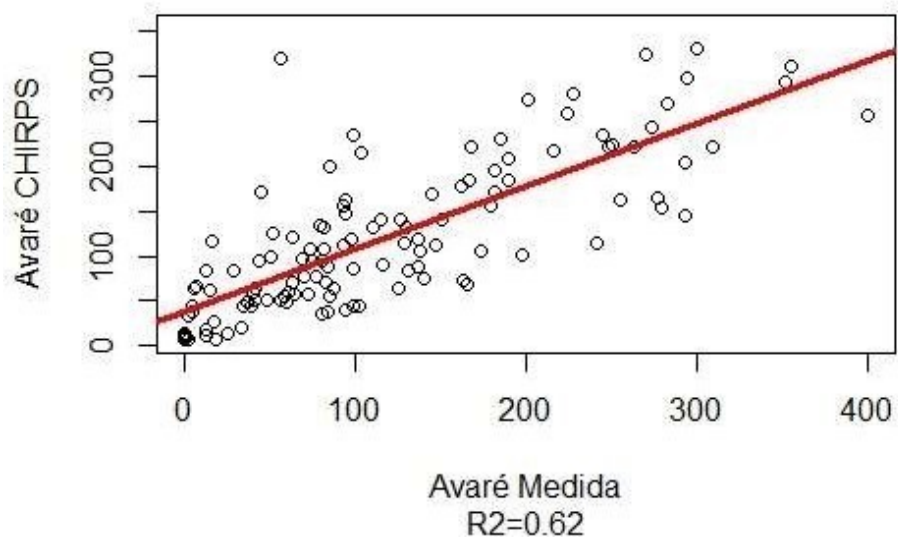


Scatterplot**Scatterplot**

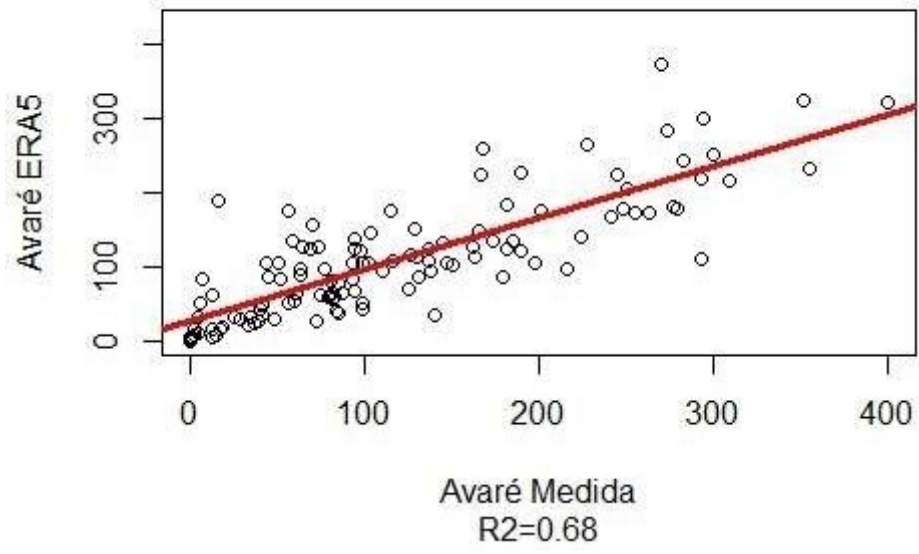
Scatterplot



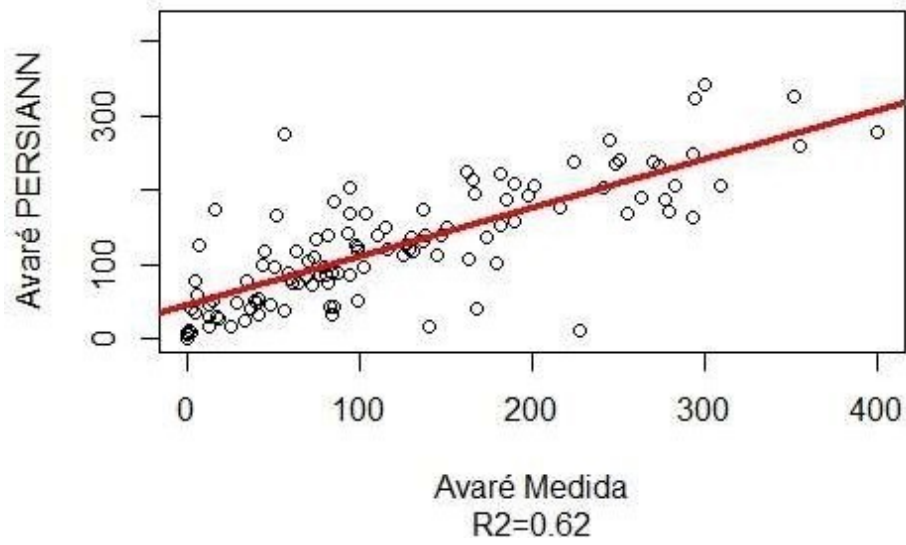
Scatterplot



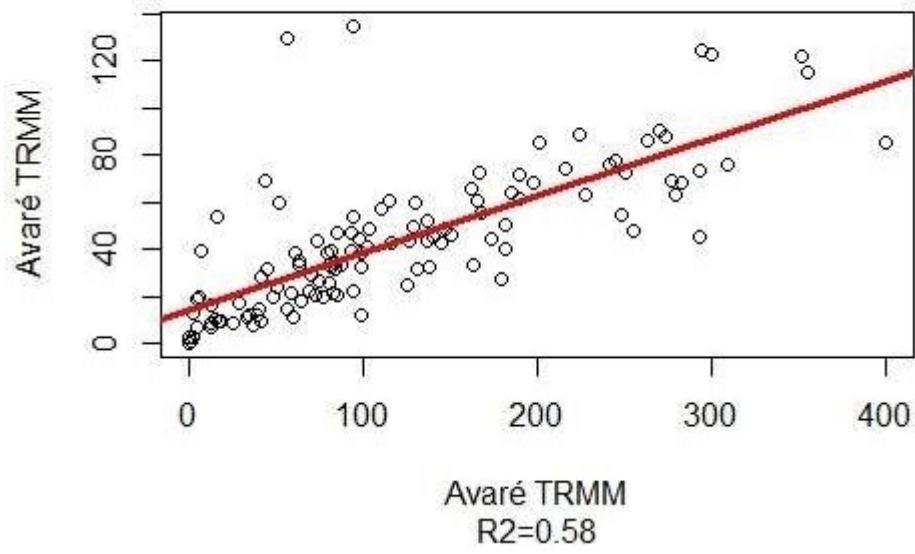
Scatterplot



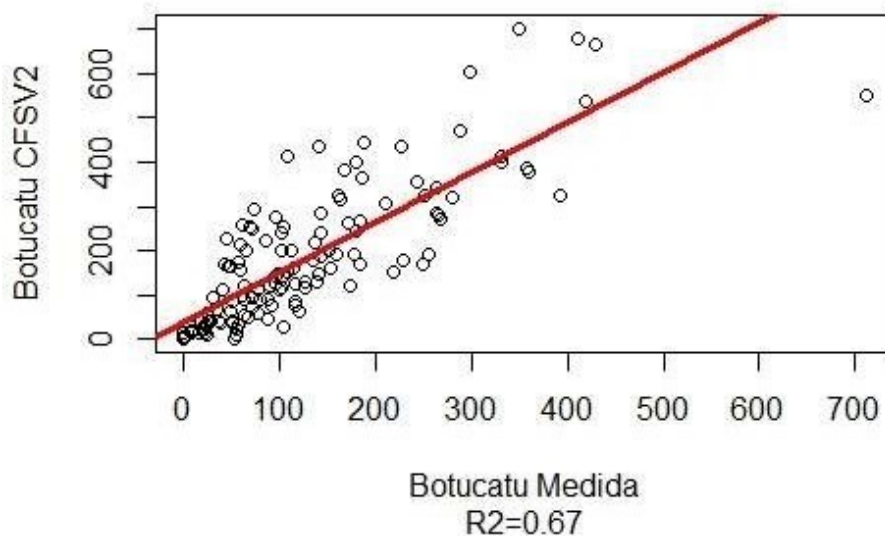
Scatterplot

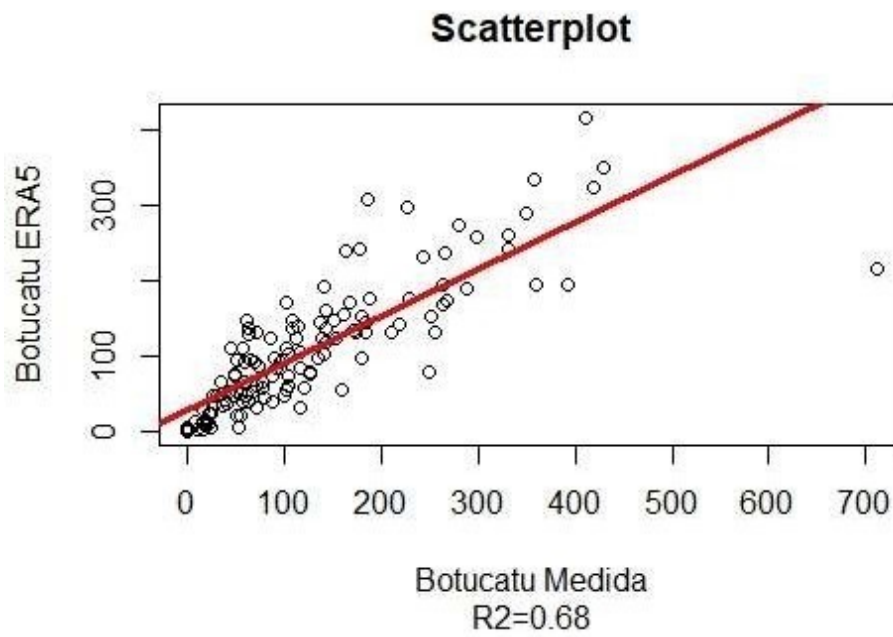
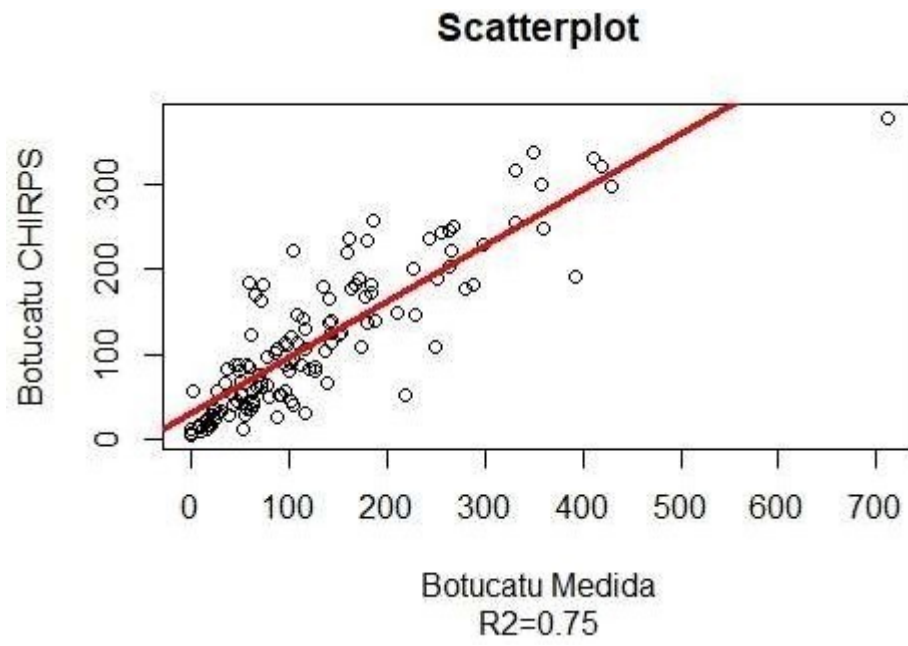


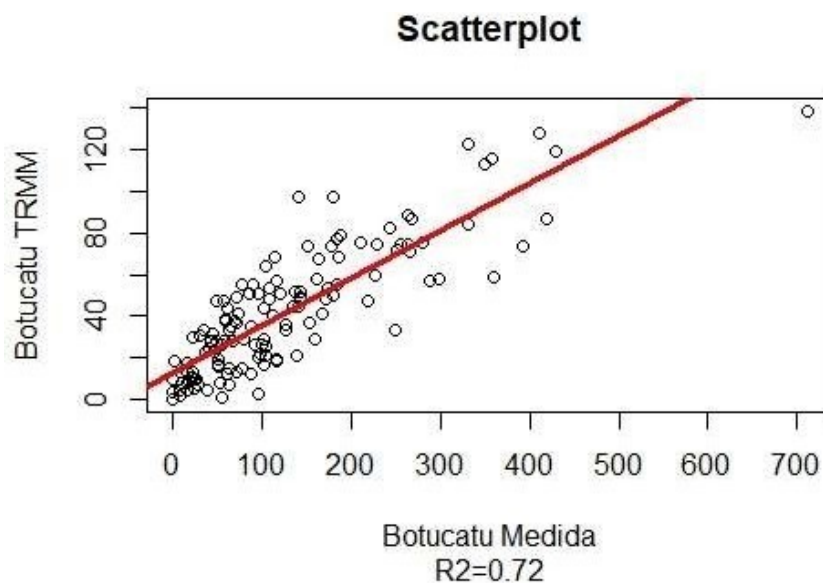
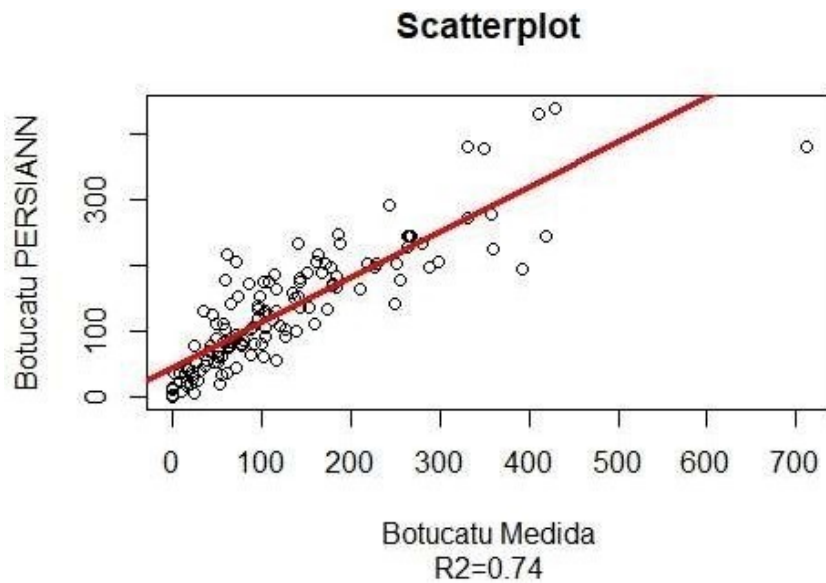
Scatterplot



Scatterplot







Os melhores ajustes entre os dados medidos pela estação meteorológica e o medido por satélite foram observados a partir dos dados do satélite CHIRPS para Franca, São Carlos e Botucatu, e ERA5 para Piracicaba, Ituverava e Avaré.

É sabido que os 2 produtos de satélite, CHIRPS e ERA5, estão adaptados à nossa área de estudo, nos dando os valores mais próximos aos medidos nas diferentes estações meteorológicas do estado de São Paulo, resultado este que

coincide com muitos estudos realizados no Brasil (Paredes-Trejo, et al., 2017, 2018). Embora a escolha tenha sido feita principalmente com base nos resultados de um ajuste linear simples, isso mostrou bons resultados para autores como D.A. Hughes (2005).

As respectivas configurações de temperatura são:

Franca com ERA5

Piracicaba com ERA5

Sao Carlos com ERA5

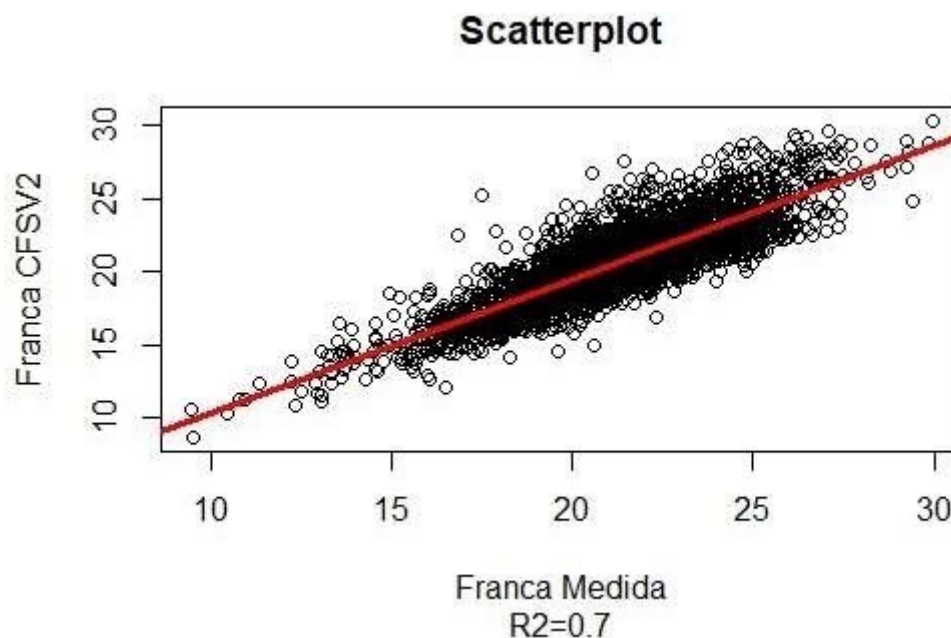
Ituverava com ERA5

Avaré com ERA5

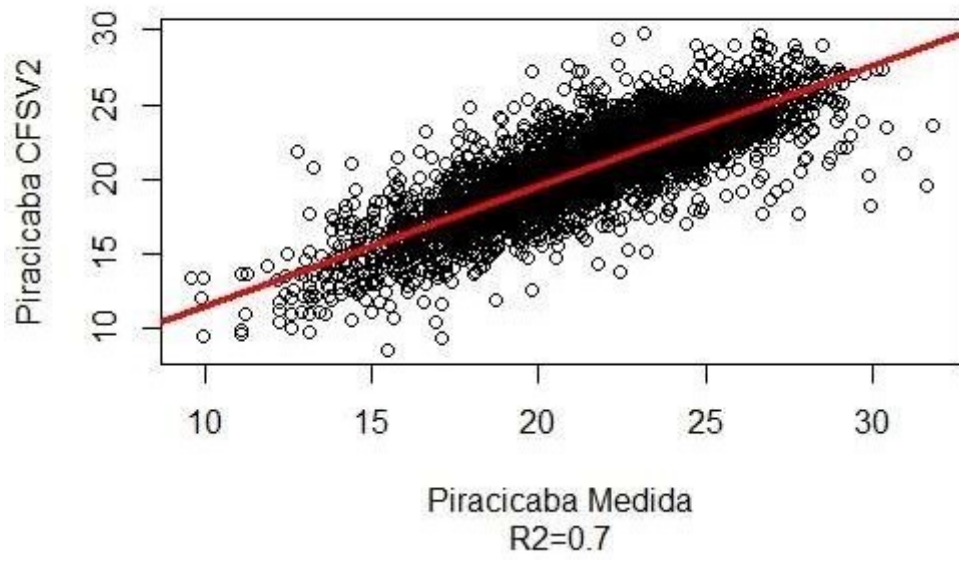
Botucatu com ERA5

O produto ERA5 apresentou os melhores resultados com relação ao ajuste linear de temperatura e com relação às análises estatísticas básicas, para todas as estações utilizadas no presente trabalho. Os gráficos são mostrados abaixo

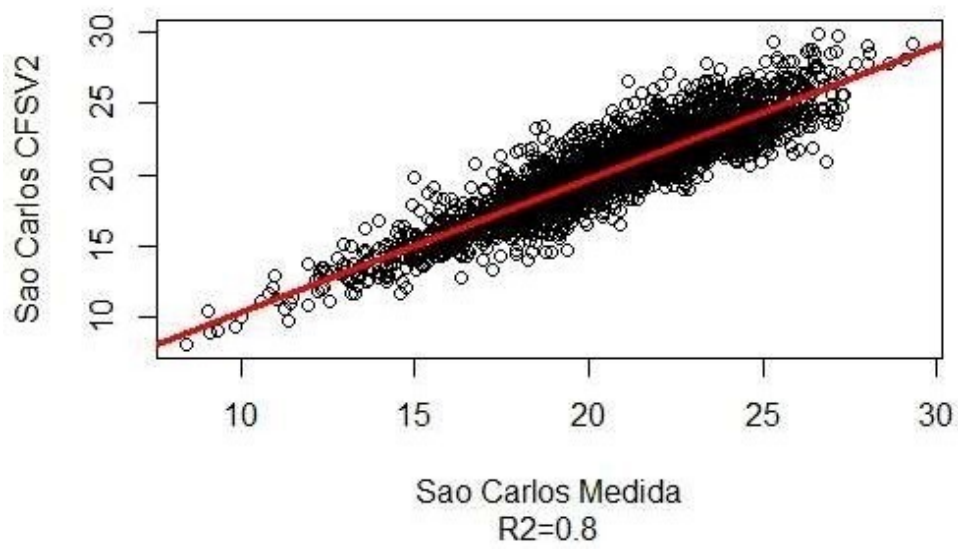
Figura 12- Ajuste linear de temperatura

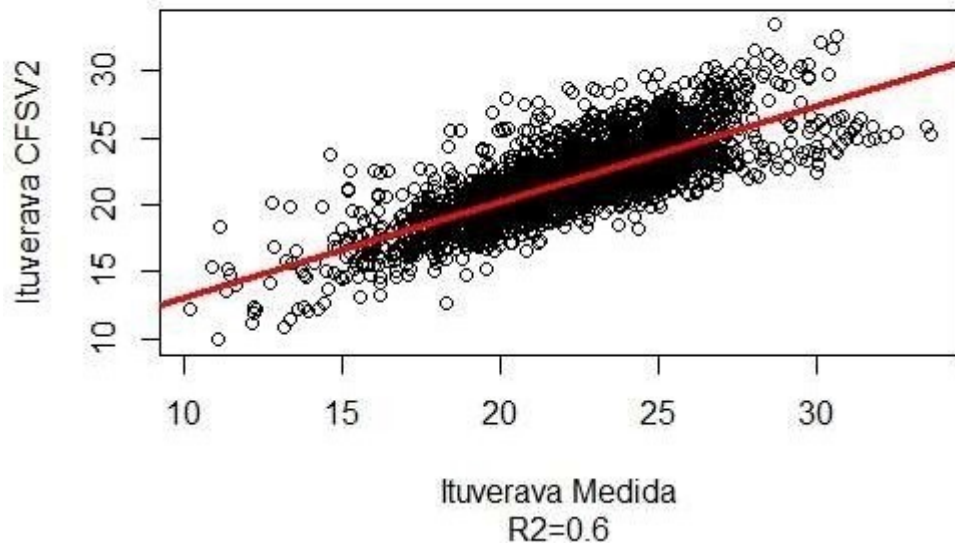
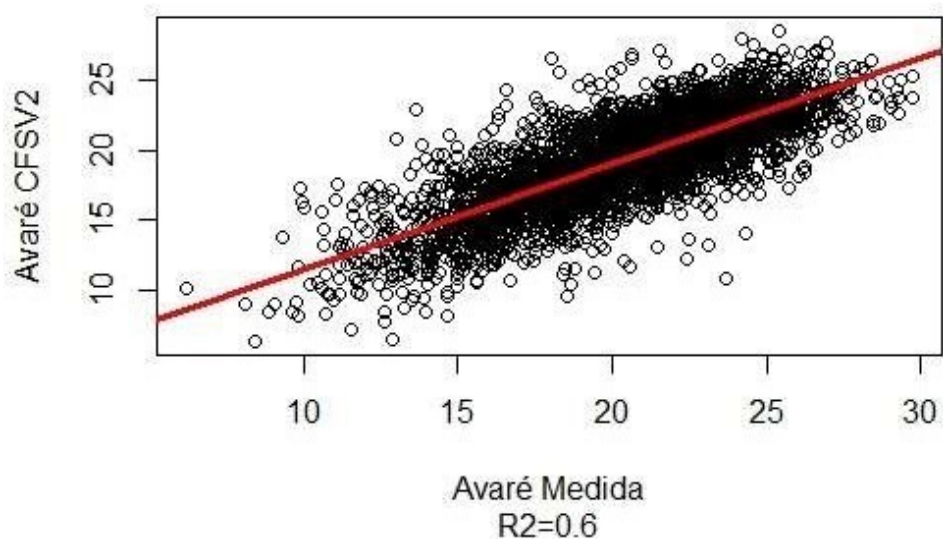


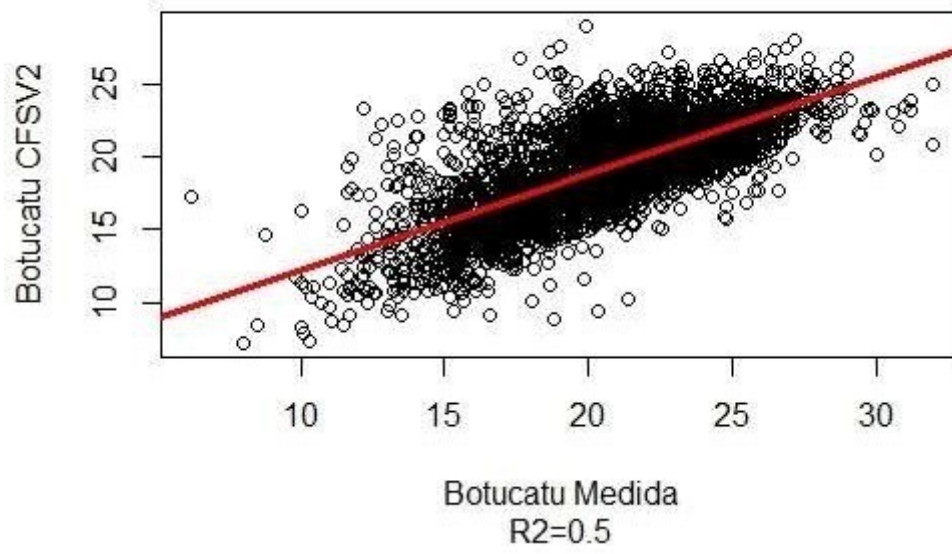
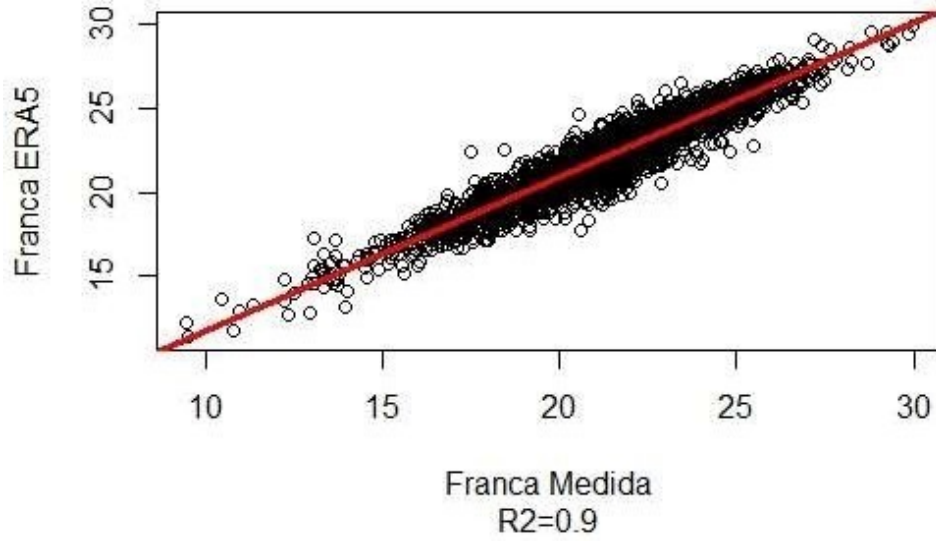
Scatterplot



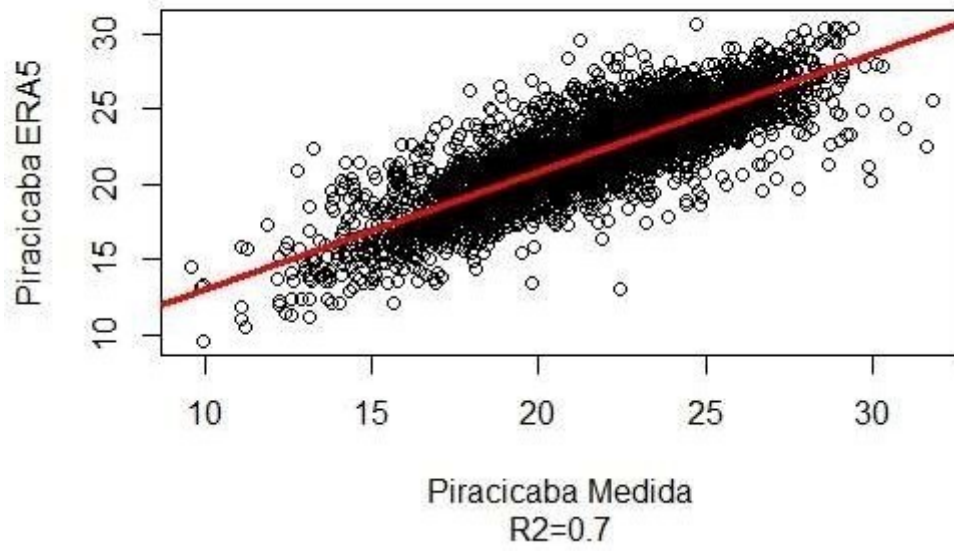
Scatterplot



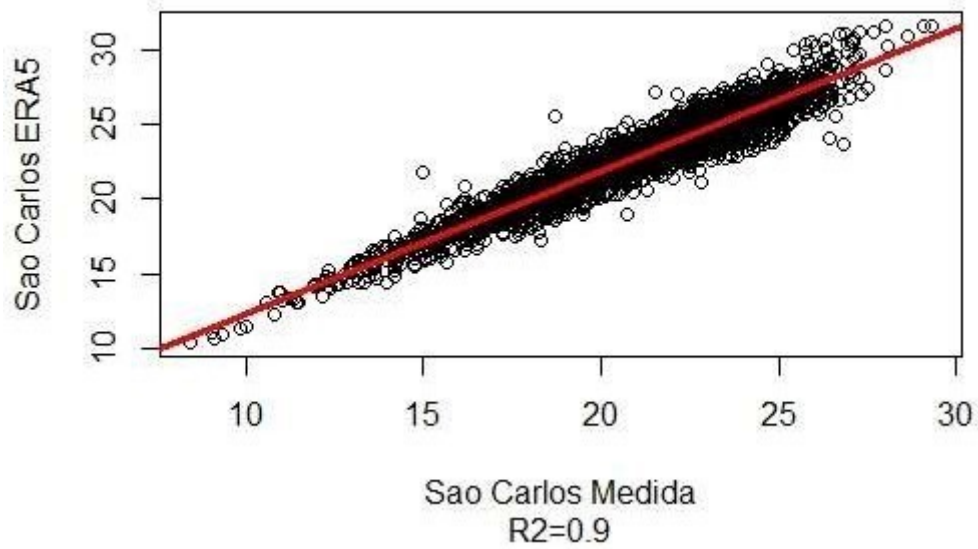
Scatterplot**Scatterplot**

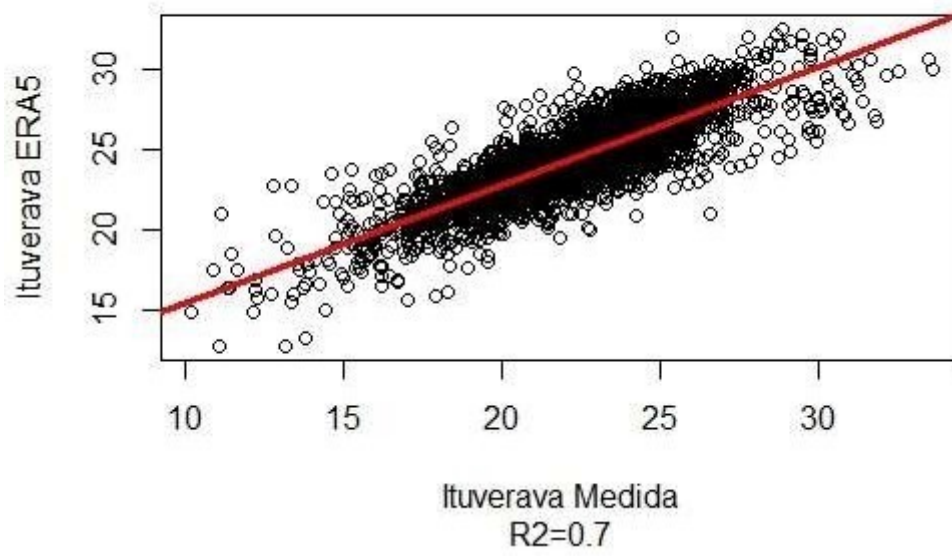
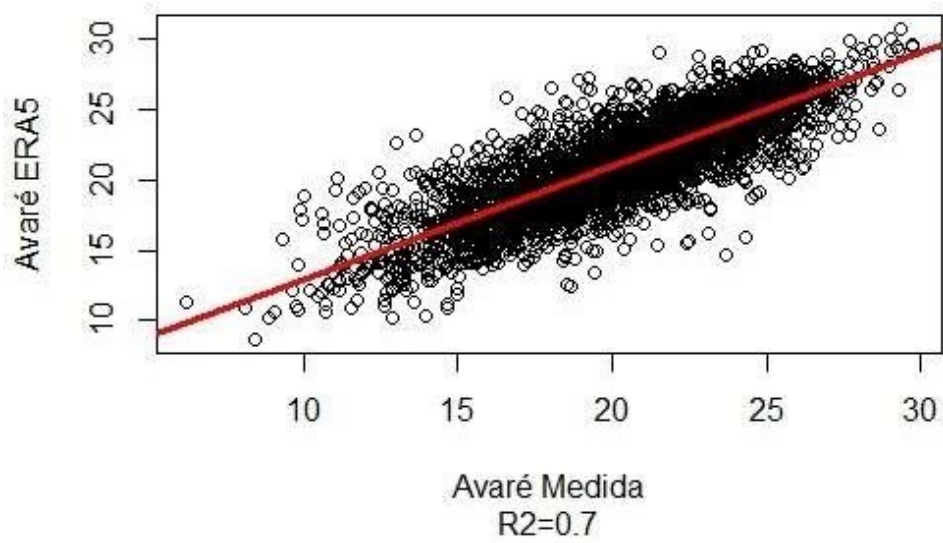
Scatterplot**Scatterplot**

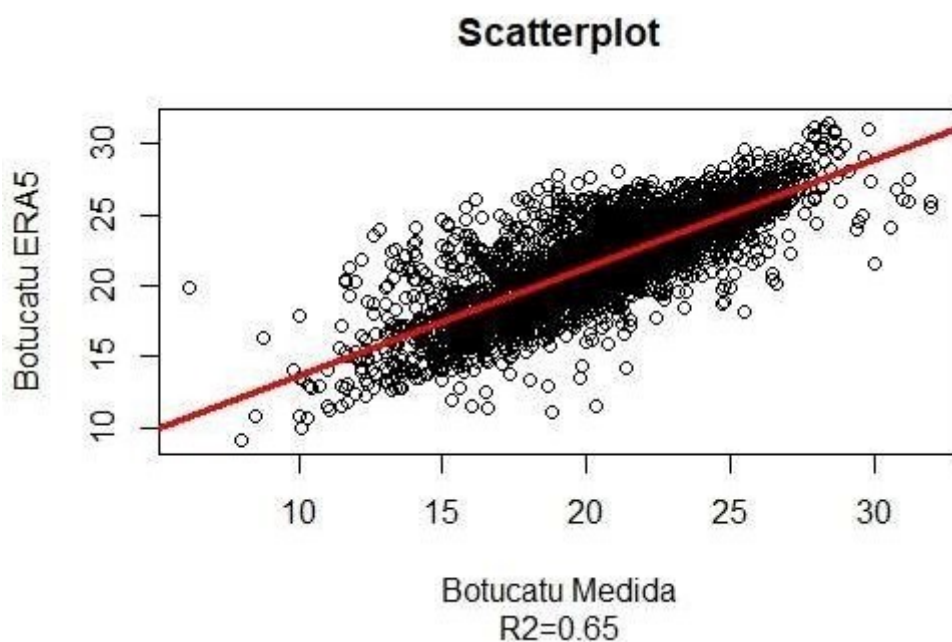
Scatterplot



Scatterplot



Scatterplot**Scatterplot**



1.3 RESULTADOS

O objetivo deste projeto é selecionar os melhores sensores para a área de estudo em questão, comparando com os dados registrados em estações meteorológicas. Seu uso posterior será na utilização de sensores selecionados para a estimativa do potencial de recarga do aquífero Guarani em área de afloramento do estado de São Paulo, em conjunto com dados de uso do solo, umidade antecedente e outros fatores necessários aplicar a metodologia BALSEQ.

Os resultados da análise descritiva da temperatura do ar a 2 metros da superfície produziram uma distribuição de frequência normal e simétrica juntamente com os dados de precipitação em escala anual. Os dados de precipitação diária mostraram um viés para a direita. Sobre o coeficiente de variação CV que mede a variabilidade dos dados, verificou-se que o menor valor resultou do satélite TRMM para todas as estações testadas, o que devido às suas características particulares (chuva em intervalo de 3 horas), e muito valores baixos têm consistência no resultado. Os demais valores de CV mínimos correspondem aos satélites com o melhor ajuste linear mostrado anteriormente, estes foram classificados de acordo com os propostos por Warrick e Nielsen (1980), em baixo ($CV < 12\%$), médio ($12\% < CV < 60\%$) e alto ($CV > 60\%$). Os registros dos dados de precipitação pertencentes à estação Franca foram classificados com alta variabilidade, assim como São Carlos

e Botucatu, todos com o satélite CHIRPS escolhido. As estações Piracicaba, Ituverava e Avaré com o produto do satélite ERA5 se enquadram na categoria de média variabilidade. Com relação à temperatura, todas as estações juntamente com o produto escolhido ERA5 se enquadram na categoria de baixa variabilidade.

Com base no ajuste linear, correlação, R², valores máximo e mínimo e médias, os seguintes produtos mostrados na tabela foram selecionados para cada estação:

PRECIPITAÇÃO	
ESTAÇÃO	SATÉLITE ESCOLHIDO
FRANCA	CHIRPS
PIRACICABA	ERA5
SAO CARLOS	CHIRPS
ITUVERAVA	ERA5
AVARÉ	ERA5
BOTUCATU	CHIRPS

TEMPERATURA	
ESTAÇÃO	SATÉLITE ESCOLHIDO
FRANCA	ERA5
PIRACICABA	ERA5
SAO CARLOS	ERA5
ITUVERAVA	ERA5
AVARÉ	ERA5
BOTUCATU	ERA5

Esses satélites selecionados serão usados no próximo capítulo como dados de entrada para determinar o potencial de recarga do aquífero Guarani com a metodologia BALSEQ junto com outros parâmetros necessários. Se necessário, outras análises estatísticas serão realizadas para complementar este capítulo.

1.4 DISCUSSÃO

Neste projeto, a seleção cuidadosa de sensores desempenhou um papel fundamental na coleta de dados meteorológicos para a área de estudo. Ao comparar esses dados com as informações registradas pelas estações meteorológicas, pudemos avaliar a qualidade e a adequação dos sensores, o que é crucial para a próxima fase da pesquisa - a estimativa do potencial de recarga do Aquífero Guarani na área de

afloramento do estado de São Paulo, utilizando a metodologia BALSEQ.

Os resultados da análise descritiva dos dados de temperatura do ar e precipitação revelaram padrões diversos. A distribuição de frequência normal e simétrica dos dados de temperatura do ar a 2 metros da superfície e os dados de precipitação em escala anual indicam um comportamento mais previsível dessas variáveis. Por outro lado, os dados de precipitação diária mostraram uma tendência assimétrica à direita, sugerindo uma variabilidade mais pronunciada nessas medições.

É interessante notar que o coeficiente de variação (CV), que mede a variabilidade dos dados, variou entre os satélites testados e as estações meteorológicas. O satélite TRMM apresentou o menor CV, principalmente devido à sua frequência de medição a cada 3 horas, o que reduz a ocorrência de valores extremamente altos ou baixos. Outros satélites foram classificados em categorias de baixa, média e alta variabilidade, de acordo com os critérios propostos por Warrick e Nielsen (1980).

Os satélites selecionados para cada estação com base em critérios como ajuste linear, correlação, R², valores extremos e médias foram cuidadosamente escolhidos. Essa seleção proporciona uma base sólida para a próxima etapa do projeto, na qual esses satélites serão usados como dados de entrada no modelo BALSEQ para determinar o potencial de recarga do Aquífero Guarani na região de afloramento do estado de São Paulo. Além disso, a categorização das estações em relação à variabilidade dos dados de precipitação e temperatura do ar fornece informações valiosas sobre a natureza desses dados e seu comportamento ao longo do tempo.

É importante destacar que, se necessário, futuras análises estatísticas complementares podem ser realizadas para aprimorar a compreensão e a precisão dos resultados. Este projeto destaca a relevância da integração de dados de sensores e estações meteorológicas na pesquisa hidrometeorológica e na gestão sustentável dos recursos hídricos. A combinação de diferentes fontes de dados e a seleção criteriosa de sensores contribuem para um conhecimento mais abrangente e preciso do comportamento dos aquíferos, essencial para tomadas de decisões informadas e ações de preservação futuras.

1.5 CONCLUSÃO

Com base nos resultados deste projeto, fica claro que a seleção adequada de sensores é essencial para a pesquisa em questão. A comparação dos dados registrados pelos sensores com os das estações meteorológicas proporcionou uma análise detalhada da qualidade e adequação desses sensores para a área de estudo. Essa seleção cuidadosa de sensores é um passo crucial para garantir a precisão e confiabilidade dos dados que serão posteriormente utilizados na estimativa do potencial de recarga do Aquífero Guarani na área de afloramento do estado de São Paulo, juntamente com informações sobre o uso do solo, umidade antecedente e outros fatores necessários para aplicar a metodologia BALSEQ.

Os resultados da análise descritiva da temperatura do ar e da precipitação mostraram distribuições variadas, com diferentes níveis de variabilidade, dependendo do satélite escolhido e da estação meteorológica em questão. Essas variações são importantes para compreender a natureza dos dados e seu ajuste aos modelos futuros.

Com base em critérios como ajuste linear, correlação, R^2 , valores máximos e mínimos, e médias, foram selecionados satélites específicos para cada estação. Essa seleção criteriosa proporciona uma base sólida para o próximo capítulo do projeto, onde esses satélites selecionados serão utilizados como dados de entrada na determinação do potencial de recarga do Aquífero Guarani com a metodologia BALSEQ, juntamente com outros parâmetros essenciais.

É importante destacar que, se necessário, futuras análises estatísticas serão conduzidas para complementar este capítulo, garantindo a robustez e a precisão dos resultados. Em última análise, esse projeto demonstra a importância da integração de dados de sensores e estações meteorológicas na pesquisa hidrometeorológica e na gestão sustentável dos recursos hídricos, contribuindo para um entendimento mais completo e preciso do comportamento dos aquíferos.

REFERÊNCIAS

- Aonashi, Kazumasa, et al. GSMaP passive microwave precipitation retrieval algorithm: Algorithm description and validation. *Journal of the Meteorological Society of Japan. Ser. II*, vol. 87, p. 119-136, 2009.
- Beck, Hylke E., et al. MSWEP V2 global 3-hourly 0.1° precipitation: methodology and quantitative assessment. *Bulletin of the American Meteorological Society*, vol. 100, no 3, p. 473-500, 2019.
- Brito, Gracieli Louise M.; SCHUSTER, Hans Dieter Max; SRINIVASAN, Vajapeyam Srirangachar. Estimativa da taxa de recarga na bacia sedimentar do rio do peixe no semi-árido paraibano pelo método do balanço hídrico sequencial diário (BALSEQ). *Águas Subterrâneas*, 2008.
- Carneiro, Celso Dal Ré. Viagem virtual ao Aquífero Guarani em Botucatu (SP): Formações Pirambóia e Botucatu, Bacia do Paraná. *Terrae Didactica*, vol. 3, no 1, p. 50-73, 2008.
- Chachadi, A. G., et al. Estimation of surface runoff and ground water recharge in Goa mining area using daily sequential water balance model-BALSEQ. *Hydrology Journal*, vol. 27 (1-2), 2004.
- Chachadi AG, Raikar PS, Lobo Ferreira JP & Oliveira MM – GIS and Mathematical Modelling for the Assessment of Groundwater Vulnerability to Pollution: Application to an Indian Case Study Area in Goa. Lisboa, Laboratório Nacional de Engenharia Civil, Relatório 115/01-GIAS,69 pp, 2001.
- Funk, Chris, et al. The climate hazards infrared precipitation with stations—a new environmental record for monitoring extremes. *Scientific data*, vol. 2, p. 150066, 2015.
- Gorelick, Noel, et al. Google Earth Engine: Planetary-scale geospatial analysis for everyone. *Remote Sensing of Environment*, vol. 202, p. 18-27, 2017.
- Hsu, Kou-lin, et al. Precipitation estimation from remotely sensed information using artificial neural networks. *Journal of Applied Meteorology*, vol. 36, no 9, p. 1176-1190, 1997.
- Huffman, G. J., et al. Y. Stocker, Hong, EF, and Wolff, D. B.: The TRMM multisatellite precipitation analysis (TMPA): quasi-global, multiyear, combined-sensor precipitation estimates at fine scales. *Journal of Hydrometeorology*, vol. 8, p. 38-55, 2007.
- Hulley, Glynn, et al. Ecostress, a nasa earth-ventures instrument for studying links between the water cycle and plant health over the diurnal cycle. En 2017 IEEE International Geoscience and Remote Sensing Symposium (IGARSS). IEEE. p. 5494- 5496, 2017.
- Instituto de Pesquisas Tecnológicas do Estado de São Paulo -IPT. Diagnóstico Ambiental para Subsídio ao Plano de Desenvolvimento e Proteção Ambiental da

Área de Afloramento do Sistema Aquífero Guarani no Estado de São Paulo. Sao Paulo: IPT, 7v. 384p, 2010.

Joyce, Robert J., et al. CMORPH: A method that produces global precipitation estimates from passive microwave and infrared data at high spatial and temporal resolution. *Journal of Hydrometeorology*, vol. 5, no 3, p. 487-503, 2004.

Oliveira, M. M. Recarga de águas subterrâneas: Métodos de avaliação. PhD Thesis, University of Lisbon, Faculty of Sciences, Geology Department, Lisbon (in Portuguese), 2004.

Paredes-Trejo, Franklin J.; BARBOSA, H. A.; KUMAR, TV Lakshmi. Validating CHIRPS-based satellite precipitation estimates in Northeast Brazil. *Journal of arid environments*, vol. 139, p. 26-40, 2017.

Pontes, Lucas Machado, et al. Avaliação de modelo de balanço hídrico com base na estimativa da recarga potencial. *Ambiente & Água-An Interdisciplinary. Journal of Applied Science*, vol. 11, no 4, p. 915-928, 2016.

Richey, Alexandra S., et al. Quantifying renewable groundwater stress with GRACE. *Water Resources Research*, vol. 51, no 7, p. 5217-5238, 2015.

Rocha, O. et al. Espécies invasoras em águas doces: estudos de caso e propostas de manejo em São Carlos. São Carlos: Editora da UFSCar, 2005.

Romano, Emanuele; GIUDICI, Mauro. Experimental and modeling study of the soil-atmosphere interaction and unsaturated water flow to estimate the recharge of a phreatic aquifer. *Journal of Hydrologic Engineering*, vol. 12, no 6, p. 573-584, 2007.

Smith, Eric A., et al. International global precipitation measurement (GPM) program and mission: An overview. *Measuring precipitation from space*. Springer, Dordrecht, p. 611-653, 2007.

Souza, Eliana de, et al. Spatial and Temporal Potential Groundwater Recharge: the Case of the Doce River Basin, Brazil. *Revista Brasileira de Ciência do Solo*, vol. 43, 2019.

United STATES GEOLOGICAL SURVEY (USGS). Landsat8. Disponível em: <https://www.usgs.gov/landresources/nli/landsat/landsat8?qtscience_support_page_related_con=0#qt-science_support_page_related_con>. 2018. Acesso em: 18/out/2019.

Walter, Ivan A., et al. ASCE's standardized reference evapotranspiration equation. *En Watershed management and operations management 2000*. p. 1-11. 2000.

CAPÍTULO 2

**ESTIMATIVA DO POTENCIAL DE RECARGA DA ZONA DO AFLORAMENTO DO
AQUÍFERO GUARANÍ COM A METODOLOGIA BALSEQ COM DADOS
METEOROLÓGICOS OBTIDOS ATRAVÉS DE IMAGENS DE SATÉLITE**

DANIELA PATRICIA GUZMÁN ROJO, ALEXANDRE DAL PAI

RESUMO

Este estudo apresenta os valores médios mensais da recarga potencial, obtidos por meio do modelo BALSEQ, para a área de afloramento do aquífero Guarani. Os valores são acompanhados das médias mensais de precipitação, escoamento superficial e evapotranspiração real durante o período de 2009 a 2014. A recarga potencial mostrou-se próxima a 69% da precipitação total, com variações notáveis ao longo do ano. O volume calculado com base nessa média de recarga potencial é significativo, ressaltando a importância do aquífero como fonte de água subterrânea. Observou-se que, em alguns meses, a evapotranspiração real superou a precipitação, sugerindo problemas relacionados ao uso do solo. A variabilidade da recarga potencial também está relacionada aos períodos de seca e ao retorno das chuvas nos meses úmidos. Os resultados destacam a necessidade de considerar padrões sazonais e climáticos na gestão do aquífero e apontam questões críticas relacionadas ao planejamento urbano e ao uso do solo que requerem monitoramento e ação adequada para a preservação desse recurso vital.

Palavras-chave: BALSEQ; aquífero; recarga potencial.

ABSTRACT

This study presents the monthly average values of potential recharge, obtained through the BALSEQ model, for the Guarani aquifer outcrop area. These values are accompanied by monthly averages of precipitation, surface runoff, and actual evapotranspiration during the period from 2009 to 2014. Potential recharge was found to be close to 69% of the total precipitation, with notable variations throughout the year. The calculated volume based on this average potential recharge is significant, highlighting the aquifer's importance as a source of groundwater. It was observed that in some months, actual evapotranspiration exceeded precipitation, suggesting issues related to land use. The variability of potential recharge is also linked to dry periods and the return of rainfall in wet months. The results emphasize the need to consider seasonal and climatic patterns in aquifer management and raise critical issues related to urban planning and land use that require monitoring and appropriate action for the preservation of this vital resource.

Keywords: BALSEQ; groundwater; potential recharge.

2.1 INTRODUÇÃO

A gestão eficiente dos recursos hídricos é um desafio crescente em todo o mundo, à medida que aproximadamente um terço das maiores bacias subterrâneas da Terra enfrenta uma rápida exaustão devido à crescente demanda humana. Este fenômeno alarmante foi documentado em um estudo realizado pela NASA, que analisou 37 dos principais aquíferos do planeta entre 2003 e 2013, identificando oito deles como "estressados" e cinco como "extremamente stressados", caracterizados pela escassa recarga natural (RICHEY et al., 2015).

A recarga de aquíferos é um dos processos cruciais na hidrologia das águas subterrâneas, pois representa a fonte renovável desses recursos hídricos. A principal reposição dessa reserva ocorre por meio da infiltração durante eventos de chuva, e sua magnitude varia ao longo do ciclo hidrológico (SOUZA et al., 2019). Para determinar de forma precisa a recarga de um aquífero, é necessário dispor de informações detalhadas sobre uma variedade de parâmetros, incluindo dados climáticos, hidrológicos, geomorfológicos e de uso do solo, essenciais para a elaboração de balanços hídricos (BRITO et al., 2008).

Nesse contexto, os modelos de estimativa de recarga baseados em balanços hídricos desempenham um papel crucial. Um desses modelos, conhecido como BALSEQ, é particularmente relevante, pois é projetado com etapas diárias e se concentra nos processos do solo (LOBO FERRERA, 2015). Sua simplicidade e eficácia permitiram sua aplicação bem-sucedida em estudos em todo o mundo, incluindo China, Índia e Brasil (Chachadi et al., 2001; Brito et al., 2008; Pontes et al., 2016), entre outros. No entanto, a precisão desse modelo depende da qualidade dos dados de entrada.

Os principais dados necessários para alimentar o modelo BALSEQ são coletados por meio de estações meteorológicas. Esses dispositivos eletrônicos são equipados com sensores que registram medições em intervalos de tempo definidos, abrangendo uma variedade de parâmetros, como temperatura, umidade relativa do ar, pressão atmosférica, umidade do solo, precipitação e direção do vento, entre outros (ROMANO, 2007).

Atualmente, em países desenvolvidos, as estações meteorológicas são frequentemente automatizadas, eliminando a necessidade de pessoal treinado no local para coleta de dados. Além disso, essas estações têm a capacidade de transmitir medições em tempo real e em intervalos personalizados, tornando-as altamente eficientes. No entanto, a implementação de estações meteorológicas automatizadas pode ser limitada devido ao seu custo, deixando algumas regiões, especialmente aquelas remotas ou isoladas, desprovidas desses recursos essenciais.

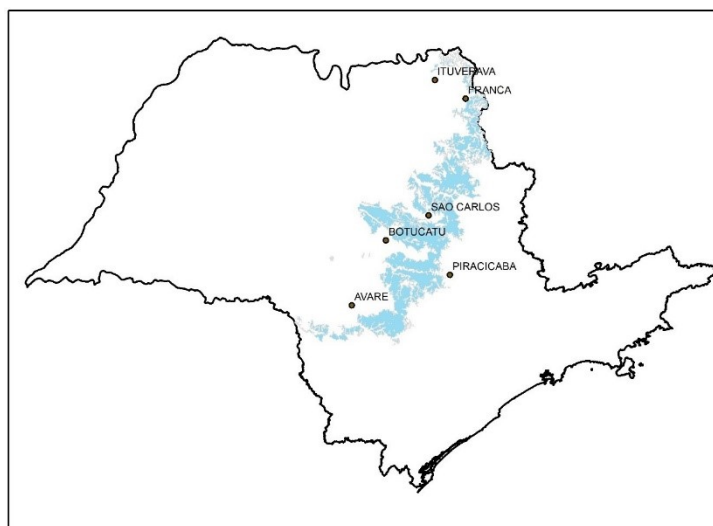
Neste contexto, a escolha e a validação dos produtos de imagens de satélite para obter dados meteorológicos precisos tornam-se cruciais, garantindo a qualidade dos dados que alimentarão modelos como o BALSEQ em estudos futuros.

2.2 MATERIAIS E MÉTODOS

2.2.1 Caracterização da área de estudo

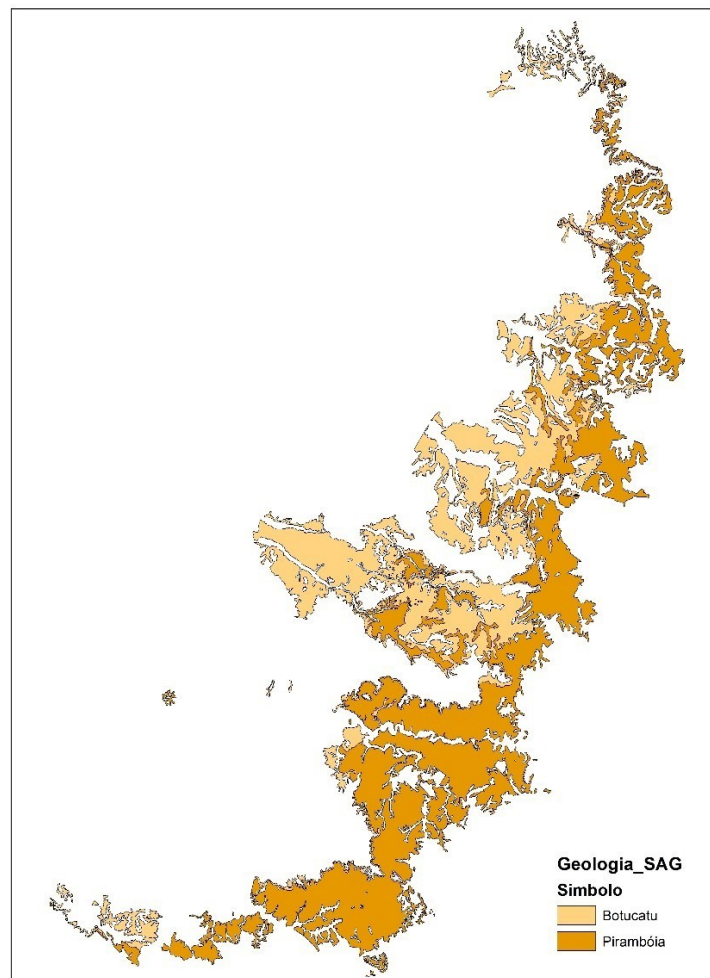
Este estudo será realizado no aquífero Guarani, localizado na América do Sul entre os paralelos 16° e 32° S e os meridianos 47° e 56° W. O aquífero é compartilhado pelos países da Argentina (19%), Brasil (71. %), Paraguai (6%) e Uruguai (4%), conforme mostra a Figura 1, com área aproximada de 1.194.000 km² (CAMPOS, 1999). Dentro do território brasileiro, ou aquíferos, abrangem os estados de São Paulo, Goiás, Mato Grosso, Mato Grosso do Sul, Minas Gerais, Paraná, Rio Grande do Sul e Santa Catarina.

Figura 13-Distribuição do aquífero Guarani no São Paulo.



A área de interesse será delimitada pela Área de Proteção e Recuperação de Nascentes da Zona de Fuga do Sistema Aquífero Guarani (APRM-SAG) apresentada na Figura 2, proposta pelo Instituto de Pesquisas Tecnológicas do Estado de São Paulo IPT (2010). Inclui também as áreas de afloramento das formações Botucatu e Pirambóia, com 2 km de amortecimento. A região é composta por 26.100 km².

Figura 14 - Unidades litológicas do componente SAG



A área de interesse abrange 2 formações litológicas: Botucatu e Pirambóia

2.2.2 Modelo BALSEQ

O modelo numérico de balanço hídrico sequencial diário BALSEQ, foi desenvolvido por Lobo Ferreira (1981) para estimar a recarga das águas subterrâneas em Portugal. O modelo original foi projetado para áreas com falta de dados hidrogeológicos. Portanto, tem a vantagem de ser simples e não requerer dados complexos para obter,

razão pela qual foi selecionada para este estudo.

Este modelo consiste em dividir a água em 5 componentes: escoamento direto, infiltração superficial, evapotranspiração, água retida no solo e infiltração profunda (OLIVEIRA ET AL., 2004). Portanto, para aplicar o método são necessários: dados diários de precipitação e evapotranspiração; Dados CN (parâmetro empírico usado na hidrologia para prever o escoamento direto ou a infiltração do excesso de chuva), para determinar o escoamento superficial; quantidade de água armazenada no solo de acordo com a capacidade de campo, densidade do solo e profundidade da raiz; e o valor da água armazenada no primeiro dia do balanço hídrico (BRITO ET AL., 2008).

2.2.2.1 Dados necessários para o modelo BALSEQ

Os dados necessários para o modelo de passo diário BALSEQ são:

Precipitação (P);

Temperatura (T);

Evapotranspiração (ETP)

CN (número da curva), método dos EUA Serviço de Conservação (SCS) para determinar o escoamento superficial;

TWS, quantidade de água disponível para evapotranspiração, obtida através da capacidade de campo do solo (C_c), densidade do solo e profundidade de raízes das plantas (R_p), definida pela seguinte expressão $TWS = C_c \cdot d_s \cdot z$;

O valor da quantidade de água retida no solo no primeiro dia do balanço hídrico (A_i).

2.2.2.2 Etapas para estimar a recarga potencial

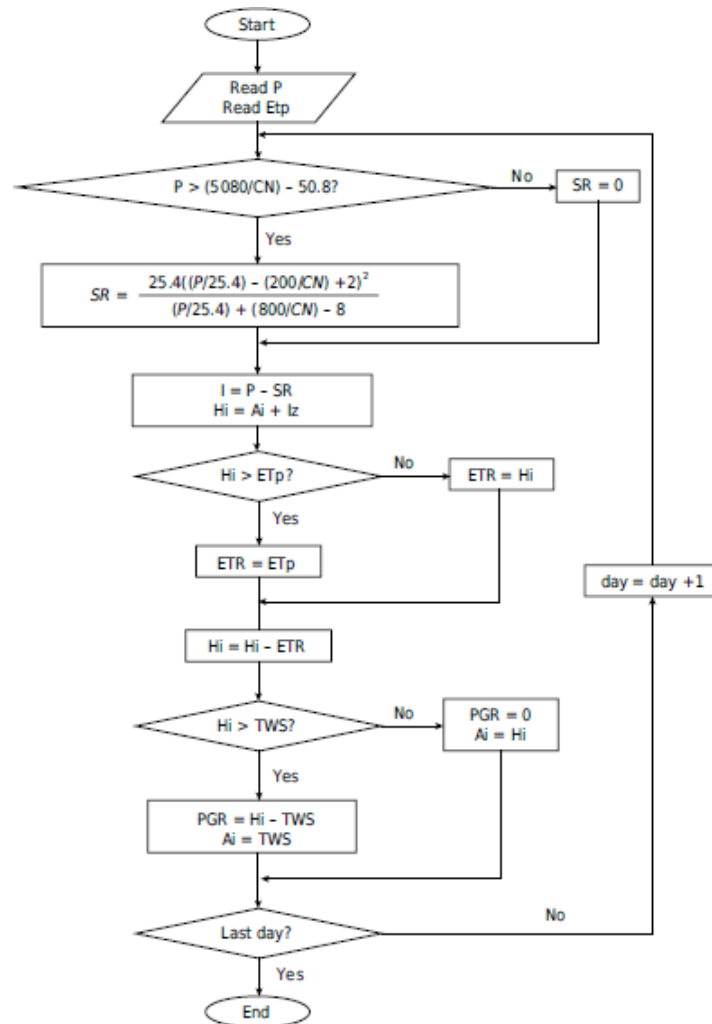
Cálculo da precipitação média diária na bacia;

Cálculo da evapotranspiração potencial com o método de Thornthwaite;

Estimação dos parâmetros CN, TWS e A_i ;

Aplicação do modelo BALSEQ, apresentado no fluxograma a seguir:

Figura 15- Fluxograma do modelo BALSEQ



A primeira etapa consiste na leitura dos dados de precipitação diária e evapotranspiração potencial diária estimada pelo método de Thornthwaite.

A segunda etapa consiste em determinar a taxa de escoamento superficial SR, no caso em que a precipitação P supere o valor de $5080/CN - 50,8$.

$$SR = \frac{25.4 * \left(\frac{P}{25.4} - \frac{200}{CN} + 2 \right)^2}{\frac{P}{25.4} + \frac{800}{CN} - 8}$$

A terceira etapa consiste em calcular a taxa diária de infiltração superficial I, e a taxa de água armazenada no solo ao longo do dia, Hi, o valor de Ai para o primeiro dia foi considerado igual a zero para a primeira iteração. posteriormente o valor utilizado foi correspondente ao último dia da simulação.

A quarta etapa consiste na comparação da água armazenada, se H_i é menor ou maior que a evapotranspiração potencial (ETP).

A quinta etapa é comparar se a água armazenada, H_i , é maior ou menor que a quantidade máxima de água disponível no solo para evapotranspiração, TWS:

$$TWS = CC * ds * z$$

Onde Cc é a umidade do solo na capacidade de campo, ou seja, na pressão de 33KPa, ds é a densidade do solo em gr/cm^3 e z é a profundidade do solo sujeito à evapotranspiração, normalmente a profundidade efetiva da raiz em cm .

Em caso afirmativo, então a infiltração profunda, denominada recarga potencial, PGR, é a água armazenada no solo ao final do dia, A_i :

$$PGR = H_i - TWS$$

$$A_i = TWS$$

O balanço hídrico com esta metodologia termina após um ciclo de i dias.

2.2.3 Aplicação do modelo BALSEQ na área de afloramento do aquífero Guarani (APRM-SAG)

2.2.3.1 Precipitação média

Para a determinação da precipitação média em uma bacia com várias estações, diferentes metodologias podem ser aplicadas, entre elas, a média aritmética, os polígonos de Thiessen e as isoietas. Para o presente estudo, optou-se por obter a precipitação média por meio da média aritmética, pois as estações utilizadas estão distribuídas por toda a área de estudo e não apresentam grandes variações nos registros. A precipitação média diária foi obtida no período de 01/01/2009 a 31/12/2014 para as 6 estações mostradas abaixo:

Tabela 5- Resumo das estações usadas

ESTACOES	LAT (°)	LONG (°)	ALT (m)	REGISTRO
FRANCA	-20,58	-47,38	1026	1/1/2005 31/12/2014
PIRACICABA	-22,7	-47,62	573	26/9/2006 31/12/2014
SAO CARLOS	-21,98	-47,88	863	6/9/2006 31/12/2014
ITUVERAVA	-20,35	-47,77	600	17/7/2008 31/12/2014
AVARE	-23,07	-48,88	654	22/9/2006 31/12/2014
BOTUCATU	-22,85	-48,43	786	1/1/2005 31/12/2015

Os dados obtidos das imagens de satélite que foram utilizados para estimar o potencial de recarga através da metodologia BALSEQ foram:

Precipitação:

Franca com CHIRPS

Piracicaba com ERA5

São Carlos com CHIRPS

Ituverava com ERA5

Avaré com ERA5

Botucatu com CHIRPS

Temperatura:

França com ERA5

Piracicaba com ERA5

São Carlos com ERA5

Ituverava com ERA5

Avaré com ERA5

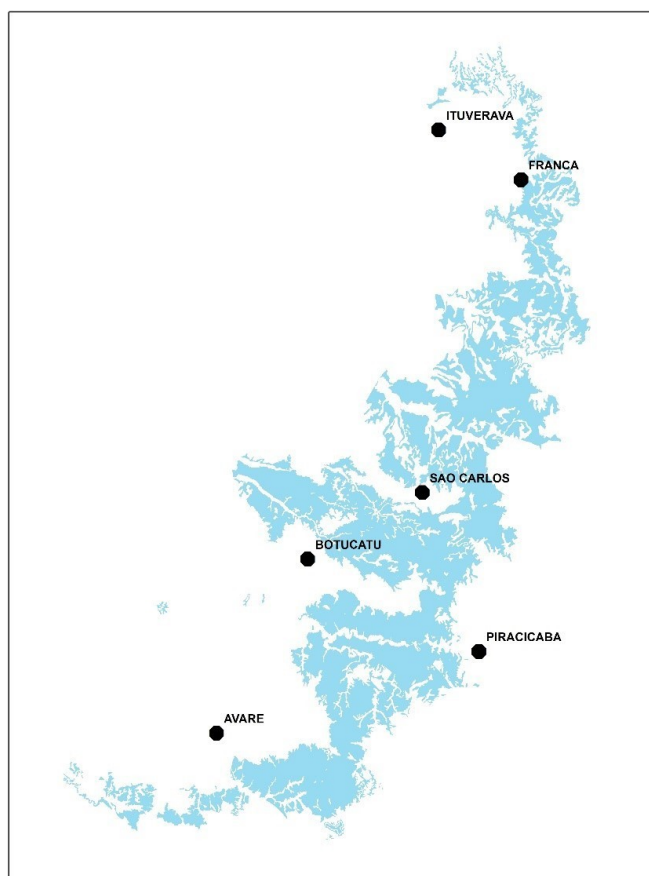
Botucatu com ERA5

Ressalta-se que esses dados hidrometeorológicos foram validados no capítulo I com medições in situ.

A tabela 6 a seguir mostra a precipitação média mensal ponderada para a área de estudo, e a figura 16 a localização das estações utilizadas.

Tabela 6- Precipitação média mensal ponderada para a área de estudo

	JAN	FEV	MAR	ABR	MAI	JUN	JUL	AGO	SET	OUT	NOV	DEZ
P (mm)	262,8	169,2	174,1	81,0	40,9	53,6	36,8	20,4	73,7	121,3	161,7	234,2

Figura 16 -Localização das estações meteorológicas no SAG

2.2.3.2 Temperatura

O valor médio da temperatura foi utilizado para determinar o valor da evapotranspiração potencial diária na bacia em estudo, foi realizada uma ponderação simples com os valores das estações utilizadas. No anexo I estão os valores de ETP para os registros utilizados, bem como todos os cálculos realizados, a Tabela 7 mostra os valores médios mensais de temperatura para a área em estudo:

Tabela 7 - Valores médios mensais de temperatura para a área em estudo

	J	F	M	A	M	J	J	A	S	O	N	D
T (°C)	24,2	25,2	24,0	22,6	20,1	18,8	19,3	20,6	22,7	23,5	23,9	24,5

2.2.3.3 CN

O modelo BALSEQ determina o escoamento superficial E_d com base na curva característica CN (número da curva) e na infiltração profunda ou recarga potencial.

O CN pode ser calculado seguindo a metodologia SCS, para isso é necessário conhecer o tipo de solo, a cobertura vegetal, o potencial de infiltração do solo e informações temáticas. Os seguintes fatores precisam ser identificados com o máximo de detalhes possível:

- Os grupos hidrológicos do solo
- Usos e tratamentos do solo
- Condições de infiltração
- As condições de umidade antecedentes

2.2.3.3.1 Grupos hidrológicos de solos

A classificação hidrológica dos solos estabelece quatro tipos de solos de acordo com suas características de potencial de infiltração.

Esses solos, agrupados por classes, características hidrológicas e tipos de solos, são apresentados na tabela a seguir:

Tabela 8 -Grupos hidrológicos de solos

Clase	Características hidrológicas	Tipo de solo
A	Potencial mínimo de escoamento	Areias profundas
B	potencial médio de infiltração	Areias mais rasas
C	Menor infiltração	Areia e argilas
D	Alto potencial de escoamento	argilas e rochas expansivas

2.2.3.3.2 Usos e tratamento do solo

Eles contemplam as atividades necessárias para a preservação das bacias, dentre as quais podem ser citadas:

- Rotação de culturas ou cultivo em faixas (áreas agrícolas)
- Construção de terraços para estabilização de taludes

- Construção de diques para controle de erosão

2.2.3.3.3 Condições de infiltração

Eles estão relacionados com a capacidade de infiltração dos solos em uma bacia, e podem ser classificados de acordo com o seguinte detalhe:

Más condições de infiltração (<50% de cobertura vegetal)

Condições de infiltração aceitáveis (50 a 75% de cobertura vegetal)

Boas condições de infiltração (>75% de cobertura vegetal)

2.2.3.3.4 Condições de umidade antecedentes

Refere-se à quantidade de chuva acumulada que caiu nos últimos cinco dias, situação difícil de estabelecer, principalmente se não houver registros diários de chuva.

Três condições estão presentes:

Tabela 9 - Condições de umidade antecedentes

Condição	Precipitação acumulada	Condição do solo
I	Menos de 35 mm	Seco
II	De 35 a 52 mm	Normal
III	Mais de 52 mm	Molhado

Uma vez que esses quatro fatores tenham sido identificados em detalhes, é possível obter o número da curva de escoamento a partir das tabelas fornecidas pelo SCC.

O valor de CN assim obtido das tabelas SCS corresponde à condição II, ou seja, o estado do solo em condições normais.

2.2.3.3.5 Modelo do SCS CN no GEE

Graças à quantidade de dados e mapas disponíveis no GEE, é possível obter o valor do CN diretamente da plataforma por meio de codificação. Primeiramente, obtemos o

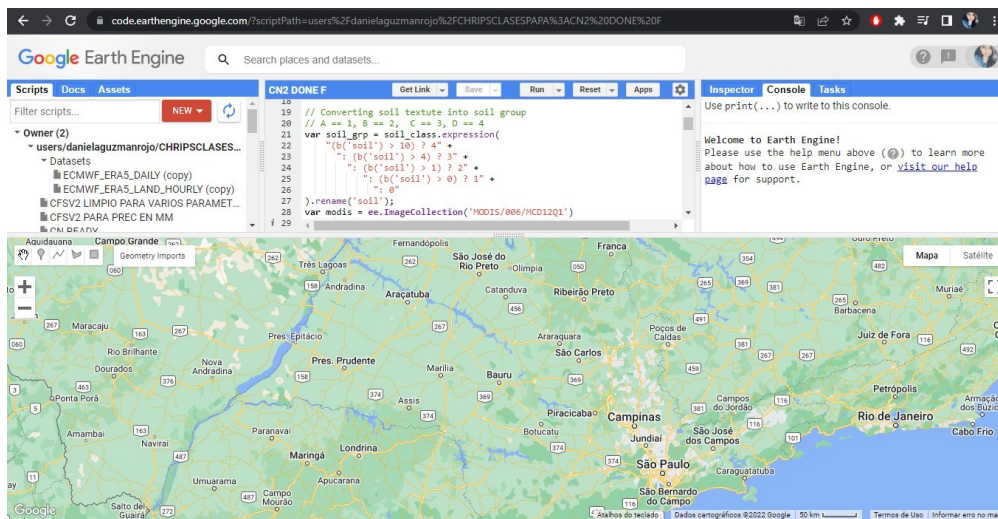
mapa de textura do SCS, o discretizamos em grupos hidrológicos de solos (A, B, C e D) usando um operador ternário. Em seguida, obtemos a banda LULC do satélite MODIS, e com isso calculamos o CN nas condições II através da combinação das 17 classes de dados da banda LULC do satélite MODIS para os 4 grupos hidrológicos do solo, seguindo a metodologia e código proposto por Jain, et al., 2021.

A partir do GEE, foi obtido um valor CN representativo para toda a área de estudo correspondente a:

CNII=73

O código em GEE encontra-se na seção de anexos. A Figura 17 mostra a interface GEE usada

Figura 17- Interface do Google Earth Engine para estimar o CNII



2.2.3.3.6 TWS

Para a determinação do TWS, foram utilizados os parâmetros de capacidade de campo (CC), densidade do solo (ρ_s) e profundidade do solo sujeito à evapotranspiração (R_p). Os valores de capacidade de campo e densidade do solo foram obtidos da plataforma GEE, por meio do produto OpenLandMap Soil Water Content at 33kPa (Field Capacity) e do produto OpenLandMap Soil Bulk Density, respectivamente. Os valores para a profundidade do solo sujeito à evapotranspiração foram obtidos dos trabalhos de Almeida e Soares (2003).

2.2.4 Avaliação do potencial de recarga através do modelo BALSEQ

Uma vez coletados esses dados, foi realizado o balanço hídrico diário do BALSEQ em tabela Excel, para o intervalo de 01/01/2009 a 31/12/2014, que é o intervalo de tempo comum das estações.

2.3 RESULTADOS

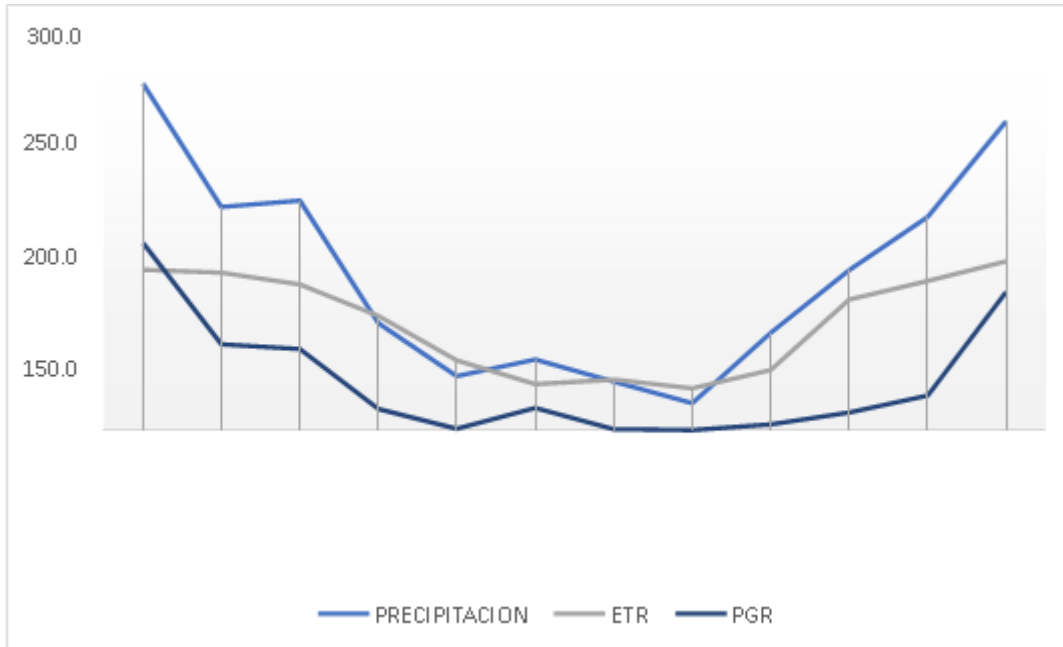
São apresentados os valores médios mensais da recarga potencial, correspondente à infiltração profunda, obtidos através do modelo BALSEQ para toda a área de afloramento do aquífero Guarani juntamente com os valores médios de precipitação, escoamento superficial e evapotranspiração real, na tabela 10 em mm.

Tabela 10 -Valores médios dos componentes do balanço hídrico para o período 2009- 2014

MES	P (media mensual)	ETR (media mensual)	SR	PGR
janeiro	262,8	121,52	1,50	141,95
fevereiro	169,2	119,53	0,28	65,31
março	174,1	110,30	0,92	61,49
Abril	81,0	86,60	0,06	16,12
MAIO	40,9	52,75	0,21	0,94
JUNHO	53,6	34,75	0,16	16,85
JULHO	36,8	38,22	0,00	0,84
AGOSTO	20,4	31,66	0,00	0,00
SETEMBRO	73,7	45,47	0,14	4,39
OUTUBRO	121,3	99,07	0,36	13,49
NOVEMBRO	161,7	113,21	1,31	26,40
DEZEMBRO	234,2	127,98	1,50	104,77
TOTAL				
ANUAL	1429,7	981,07	6,44	452,54

A variação mensal de todos os componentes do balanço hídrico do modelo BALSEQ é mostrada na figura 18.

Figura 18 -Valores médios mensais dos componentes do balanço hídrico para o período 2009-2014



A recarga potencial apresentou valores próximos a 69% da precipitação total, a maior variação ocorreu no mês de novembro e a menor variação no mês de agosto. O volume de água calculado para este valor médio é 6.382.500 hm³, valor obtido considerando apenas a área de afloramento do aquífero Guarani, um valor considerável porque estamos estimando infiltrações profundas na área de afloramento do aquífero Guarani.

Em alguns meses, a evapotranspiração apresenta valores maiores que a precipitação, isso pode ser devido ao fato de a superfície impermeável estar aumentando próximo à zona SAG, devido a maus hábitos de planejamento urbano. Esse valor apresenta pouca variação temporal, devido à demanda hídrica das plantas e ao volume de água armazenado no solo.

A variabilidade da recarga potencial está relacionada aos períodos secos, de modo que seu valor aumenta quando a precipitação retorna nos meses úmidos.

2.4 DISCUSSÃO

Os resultados apresentados na Tabela 10 e na Figura 18 fornecem uma visão detalhada dos componentes do balanço hídrico na área de afloramento do Aquífero

Guarani durante o período de 2009 a 2014. Esses componentes incluem a precipitação média mensal (P), a evapotranspiração real média mensal (ETR), o escoamento superficial (SR) e a recarga potencial (PGR) em milímetros.

Uma observação importante é que a recarga potencial mostrou-se próxima a 69% da precipitação total, o que indica uma considerável contribuição da precipitação para a infiltração profunda no aquífero. Essa variação mensal na recarga potencial é notável, com o mês de novembro apresentando a maior variação e o mês de agosto a menor. O volume de água calculado com base nesse valor médio de recarga potencial é significativo, totalizando 6.382.500 hectômetros cúbicos, destacando a importância desse aquífero como fonte de água subterrânea na região de afloramento.

Um ponto de preocupação identificado nos resultados é o fato de que, em alguns meses, a evapotranspiração real excede a precipitação, sugerindo uma possível tendência de aumento de superfícies impermeáveis na zona SAG devido a práticas de planejamento urbano inadequadas. Esse fenômeno pode ser um indicativo de problemas relacionados ao uso do solo e à expansão urbana que precisam ser monitorados e gerenciados adequadamente para evitar a degradação do aquífero.

A variabilidade da recarga potencial também está relacionada aos períodos de seca, com seu valor aumentando quando a precipitação retorna nos meses úmidos. Isso ressalta a importância de considerar os padrões sazonais e climáticos na gestão sustentável do Aquífero Guarani e na preservação desse recurso vital.

Em suma, os resultados deste estudo fornecem informações valiosas sobre os componentes do balanço hídrico na área de afloramento do Aquífero Guarani, destacando a contribuição da precipitação para a recarga potencial do aquífero. Além disso, eles chamam a atenção para questões relacionadas ao uso do solo e ao planejamento urbano, que podem afetar a disponibilidade de água subterrânea no futuro. Essas descobertas são cruciais para a gestão sustentável dos recursos hídricos nessa região e para a tomada de decisões informadas sobre sua preservação e uso responsável.

2.5 CONCLUSÃO

O modelo de passe diário BALSEQ foi aplicável em conjunto com os dados obtidos das imagens de satélite para a área de estudo, resultando em valores consistentes de infiltração profunda. Os valores potenciais de recarga foram de 69% do volume total de precipitação, correspondendo a 425,5mm por ano. Obteve-se uma evapotranspiração real total de 981,07mm e uma pluviosidade de 1429,7mm, o valor do escoamento foi de 6,44mm, valor baixo por estarmos na área de afloramento do aquífero.

Existem algumas limitações no modelo, principalmente na determinação do valor da profundidade efetiva da raiz, para o qual é necessário realizar campanhas in situ para caracterizá-lo de melhor forma, os valores de CN e ds foram contrastados com a literatura existente para corroborar os valores obtidos através do GEE.

REFERÊNCIAS

- Almeida, Auro Campi de; SOARES, João Viane. Comparação entre uso de água em plantações de *Eucalyptus grandis* e floresta ombrófila densa (Mata Atlântica) na costa leste do Brasil. *Revista árvore*, 2003, vol. 27, p. 159-170.
- Brito, Gracieli Louise M.; SCHUSTER, Hans Dieter Max; SRINIVASAN, Vajapeyam Srirangachar. Estimativa da taxa de recarga na bacia sedimentar do rio do peixe no semi-árido paraibano pelo método do balanço hídrico sequencial diário (BALSEQ). *Águas Subterrâneas*, 2008.
- Chachadi, A. G., et al. Estimation of surface runoff and ground water recharge in Goa mining area using daily sequential water balance model- BALSEQ. *Hydrology Journal*, vol. 27 (1-2), 2004.
- Chachadi AG, Raikar PS, Lobo Ferreira JP & Oliveira MM – GIS and Mathematical Modelling for the Assessment of Groundwater Vulnerability to Pollution: Application to an Indian Case Study Area in Goa. Lisboa, Laboratório Nacional de Engenharia Civil, Relatório 115/01-GIAS,69 pp, 2001.
- Instituto de Pesquisas Tecnológicas do Estado de São Paulo -IPT. Diagnóstico Ambiental para Subsídio ao Plano de Desenvolvimento e Proteção Ambiental da Área de Afloramento do Sistema Aquífero Guarani no Estado de São Paulo. São Paulo: IPT, 7v. 384 p, 2010.
- Jain, Sukant, et al. Development of cloud-based rainfall-run-off model using Google Earth Engine. *Current Science* (00113891), 2021, vol. 121, no 11.
- Oliveira, M. M. Recarga de águas subterrâneas: Métodos de avaliação. PhD Thesis, University of Lisbon, Faculty of Sciences, Geology Department, Lisbon (in Portuguese), 2004.
- Paredes-Trejo, Franklin J.; BARBOSA, H. A.; KUMAR, TV Lakshmi. Validating CHIRPS-based satellite precipitation estimates in Northeast Brazil. *Journal of arid environments*, vol. 139, p. 26-40, 2017.
- Pontes, Lucas Machado, et al. Avaliação de modelo de balanço hídrico com base na estimativa da recarga potencial. *Ambiente & Água-An Interdisciplinary. Journal of Applied Science*, vol. 11, no 4, p. 915-928, 2016.
- Richey, Alexandra S., et al. Quantifying renewable groundwater stress with GRACE. *Water Resources Research*, vol. 51, no 7, p. 5217-5238, 2015.
- Souza, Eliana de, et al. Spatial and Temporal Potential Groundwater Recharge: the Case of the Doce River Basin, Brazil. *Revista Brasileira de Ciência do Solo*, vol. 43, 2019.

CONSIDERAÇÕES FINAIS

Para o futuro, sugerimos que um trabalho adicional seja realizado, processando todos os códigos e imagens dentro da plataforma GEE (Google Earth Engine). Essa plataforma oferece uma ampla gama de ferramentas e recursos para análise de imagens de satélite e dados geoespaciais, o que pode aprimorar ainda mais a qualidade e eficácia da coleta e análise de dados meteorológicos. Com a integração de informações provenientes de estações meteorológicas, imagens de satélite e modelos como o BALSEQ, será possível avançar significativamente em nossos esforços para compreender e gerenciar de forma sustentável os recursos hídricos subterrâneos.

Em resumo, a combinação de tecnologias e abordagens, como a utilização de estações meteorológicas e imagens de satélite, aliada à exploração de plataformas avançadas como o GEE, oferece um caminho promissor para abordar os desafios complexos relacionados à gestão de aquíferos e à preservação dos recursos hídricos em todo o mundo.

REFERENCIAS

Brito, Gracieli Louise M.; SCHUSTER, Hans Dieter Max; SRINIVASAN, Vajapeyam Srirangachar. Estimativa da taxa de recarga na bacia sedimentar do rio do peixe no semi-árido paraibano pelo método do balanço hídrico sequencial diário (BALSEQ). Águas Subterrâneas, 2008.

Chachadi, A. G., et al. Estimation of surface runoff and ground water recharge in Goa mining area using daily sequential water balance model-BALSEQ. Hydrology Journal, vol. 27 (1-2), 2004.

Chachadi AG, Raikar PS, Lobo Ferreira JP & Oliveira MM – GIS and Mathematical Modelling for the Assessment of Groundwater Vulnerability to Pollution: Application to an Indian Case Study Area in Goa. Lisboa, Laboratório Nacional de Engenharia Civil, Relatório 115/01-GIAS,69 pp, 2001.

Pontes, Lucas Machado, et al. Avaliação de modelo de balanço hídrico com base na estimativa da recarga potencial. Ambiente & Água-An Interdisciplinary. Journal of Applied Science, vol. 11, no 4, p. 915-928, 2016.

Richey, Alexandra S., et al. Quantifying renewable groundwater stress with GRACE. Water Resources Research, vol. 51, no 7, p. 5217-5238, 2015.

Romano, Emanuele; GIUDICI, Mauro. Experimental and modeling study of the soil-atmosphere interaction and unsaturated water flow to estimate the recharge of a phreatic aquifer. Journal of Hydrologic Engineering, vol. 12, no 6, p. 573-584, 2007.

Souza, Eliana de, et al. Spatial and Temporal Potential Groundwater Recharge:the Case of the Doce River Basin, Brazil. Revista Brasileira de Ciência do Solo, vol. 43, 2019.

United States Geological Survey (USGS). Landsat8. Disponível em:<
https://www.usgs.gov/landresources/nli/landsat/landsat8?qtscience_support_page_related_con=0#qt-science_support_page_related_con>. 2018. Acesso em: 18/out/2019.

ANEXO A

Cálculo da evapotranspiração potencial pelo método de Thornthwaite

DATOS DE TEMPERATURAS (°C)

Latitud: 22 ° S

MESES	E	F	M	A	M	J	J	A	S	O	N	D
t _{med} (°C)	24.2	25.2	24.0	22.6	20.1	18.8	19.3	20.6	22.7	23.5	23.9	24.5

EVAPOTRANSPIRACION POTENCIAL THORNTHWAITE

MESES	Ecuación	E	F	M	A	M	J	J	A	S	O	N	D	
t (°C)	A partir de imágenes satelitales	24.2	25.2	24.0	22.6	20.1	18.8	19.3	20.6	22.7	23.5	23.9	24.5	$I = \sum_{j=1}^{j=12} i_j$
i	$i_j = \left(\frac{t}{5}\right)^{1.514}$	10.87	11.58	10.78	9.81	8.23	7.42	7.73	8.56	9.89	10.41	10.65	11.09	117.3
e	$e = 16 \left(\frac{10t}{I}\right)^a$	106.6	118.8	105.0	89.3	65.9	55.2	59.1	70.5	90.5	98.8	102.9	110.3	
K	De tablas	1.14	1.00	1.05	0.97	0.95	0.90	0.94	0.99	1.00	1.09	1.10	1.16	
ETP	ETP = K * e	121.5	118.8	110.3	86.6	62.6	49.7	55.6	69.8	90.5	107.7	113.2	128.0	
ETP (diario)		3.9	4.2	3.6	2.9	2.0	1.7	1.8	2.3	3.0	3.5	3.8	4.1	

El valor de "a"

$$a = 6.75 \times 10^{-7} I^3 - 7.71 \times 10^{-5} I^2 + 1.79 \times 10^{-2} I + 0.4924$$

$$a = 2.6131$$

La evapotranspiración potencial anual

Es la suma de la evapotranspiración potencial de los 12 meses

$$ETP_{\text{anual}} = 1114.3 \text{ mm/año}$$

ANEXO B

Código em GEE para obter CNII (Adaptado de Jain et al., 2021)

```
//This Script is created by Sukant Jain,
//Research Scientist, National Institute of Hydrology, Bhopal
// Define your Area of Interest either via shape file or created Geometry
//var aoi = ee.FeatureCollection("users/sukkiisukant/Shipra_Ujjain");
// Define period for study var startDate = '2019-01-01' var endDate = '2020-01-01'
// Year for Land Use var year = 2019
Map.centerObject(aoi)
var soil_class = ee.Image("OpenLandMap/SOL/SOL_TEXTURE-
CLASS_USDA-TT_M/v02")
.select("b0").clip(aoi)
.rename('soil');
// Converting soil texture into soil group
// A == 1, B == 2, C == 3, D == 4
var soil_grp = soil_class.expression( "(b('soil') > 10) ? 4" +
": (b('soil') > 4) ? 3" +
": (b('soil') > 1) ? 2" +
": (b('soil') > 0) ? 1" + ": 0"
).rename('soil');
var modis = ee.ImageCollection('MODIS/006/MCD12Q1')
.filter(ee.Filter.calendarRange(year,year,'year')) var lulc =
modis.select('LC_Type1').first().clip(aoi)
.rename('lulc');
//Map.addLayer(soil, {}, "Soil texture class");
//Map.addLayer(lulc, {}, "LULC");
// Combined LULC & SOil in single image var lulc_soil = lulc.addBands(soil_grp)
//print (lulc_soil);
Map.addLayer (lulc_soil, {}, 'Soil & LULC', 0)
// Create CN map using an expression var CN_whole = lulc_soil.expression(
"(b('soil') == 1) and(b('lulc')==1) ? 35" +
": (b('soil') == 1) and(b('lulc')==2) ? 25" +
": (b('soil') == 1) and(b('lulc')==3) ? 45" +
```

": (b('soil') == 1) and(b('lulc')==4) ? 39" +
": (b('soil') == 1) and(b('lulc')==5) ? 45" +
": (b('soil') == 1) and(b('lulc')==6) ? 49" +
": (b('soil') == 1) and(b('lulc')==7) ? 68" +
": (b('soil') == 1) and(b('lulc')==8) ? 36" +
": (b('soil') == 1) and(b('lulc')==9) ? 45" +
": (b('soil') == 1) and(b('lulc')==10) ? 30" +
": (b('soil') == 1) and(b('lulc')==11) ? 95" +
": (b('soil') == 1) and(b('lulc')==12) ? 67" +
": (b('soil') == 1) and(b('lulc')==13) ? 72" +
": (b('soil') == 1) and(b('lulc')==14) ? 63" +
": (b('soil') == 1) and(b('lulc')==15) ? 100" +
": (b('soil') == 1) and(b('lulc')==16) ? 74" +
": (b('soil') == 1) and(b('lulc')==17) ? 100" +
": (b('soil') == 2) and(b('lulc')==1) ? 50" +
": (b('soil') == 2) and(b('lulc')==2) ? 55" +
": (b('soil') == 2) and(b('lulc')==3) ? 66" +
": (b('soil') == 2) and(b('lulc')==4) ? 61" +
": (b('soil') == 2) and(b('lulc')==5) ? 66" +
": (b('soil') == 2) and(b('lulc')==6) ? 69" +
": (b('soil') == 2) and(b('lulc')==7) ? 79" +
": (b('soil') == 2) and(b('lulc')==8) ? 60" +
": (b('soil') == 2) and(b('lulc')==9) ? 66" +
": (b('soil') == 2) and(b('lulc')==10) ? 58" +
": (b('soil') == 2) and(b('lulc')==11) ? 95" +
": (b('soil') == 2) and(b('lulc')==12) ? 78" +
": (b('soil') == 2) and(b('lulc')==13) ? 82" +
": (b('soil') == 2) and(b('lulc')==14) ? 75" +
": (b('soil') == 2) and(b('lulc')==15) ? 100" +
": (b('soil') == 2) and(b('lulc')==16) ? 84" +
": (b('soil') == 2) and(b('lulc')==17) ? 100" +
": (b('soil') == 3) and(b('lulc')==1) ? 73" +
": (b('soil') == 3) and(b('lulc')==2) ? 70" +
": (b('soil') == 3) and(b('lulc')==3) ? 77" +

": (b('soil') == 3) and(b('lulc')==4) ? 74" +
 ": (b('soil') == 3) and(b('lulc')==5) ? 77" +
 ": (b('soil') == 3) and(b('lulc')==6) ? 79" +
 ": (b('soil') == 3) and(b('lulc')==7) ? 86" +
 ": (b('soil') == 3) and(b('lulc')==8) ? 73" +
 ": (b('soil') == 3) and(b('lulc')==9) ? 77" +
 ": (b('soil') == 3) and(b('lulc')==10) ? 71" +
 ": (b('soil') == 3) and(b('lulc')==11) ? 95" +
 ": (b('soil') == 3) and(b('lulc')==12) ? 85" +
 ": (b('soil') == 3) and(b('lulc')==13) ? 87" +
 ": (b('soil') == 3) and(b('lulc')==14) ? 83" +
 ": (b('soil') == 3) and(b('lulc')==15) ? 100" +
 ": (b('soil') == 3) and(b('lulc')==16) ? 90" +
 ": (b('soil') == 3) and(b('lulc')==17) ? 100" +
 " : (b('soil') == 4) and(b('lulc')==1) ? 79" +
 ": (b('soil') == 4) and(b('lulc')==2) ? 77" +
 ": (b('soil') == 4) and(b('lulc')==3) ? 83" +

 ": (b('soil') == 4) and(b('lulc')==4) ? 80" +
 ": (b('soil') == 4) and(b('lulc')==5) ? 83" +
 ": (b('soil') == 4) and(b('lulc')==6) ? 89" +
 ": (b('soil') == 4) and(b('lulc')==7) ? 89" +
 ": (b('soil') == 4) and(b('lulc')==8) ? 79" +
 ": (b('soil') == 4) and(b('lulc')==9) ? 83" +
 ": (b('soil') == 4) and(b('lulc')==10) ? 78" +
 ": (b('soil') == 4) and(b('lulc')==11) ? 95" +
 ": (b('soil') == 4) and(b('lulc')==12) ? 89" +
 ": (b('soil') == 4) and(b('lulc')==13) ? 89" +
 ": (b('soil') == 4) and(b('lulc')==14) ? 87" +
 100 il') == 4) and(b('lulc')==15) ? 100" +
 ": (b('soil') == 4) and(b('lulc')==16) ? 92" +
 ": (b('soil') == 4) and(b('lulc')==17) ? 100" + ": (b('soil') == 0) ? 100" +
 ": 0"
);

```

var CN2 = CN_whole.clip(aoi).rename('CN2'); Map.addLayer(CN2, {}, 'CN2 values', 0);
//Get the scale
var scale_image = CN2.projection().nominalScale();
// For an image use reduceRegion var mean_CN2= CN2.reduceRegion({ reducer:
ee.Reducer.mean(), geometry:aoi,
scale:30
});
//The reducer will return a dictionary, so you need to use get(key)
print(mean_CN2.get('CN2'))
print('CN2',mean_CN2)
var CN1 = CN2.expression( 'CN2 /(2.281-(0.0128*CN2))',{
'CN2': CN2.select('CN2')
}).rename('CN1');
var CN3 = CN2.expression(
'CN2 /(0.427+(0.00573*CN2))',{
'CN2': CN2.select('CN2')
}).rename('CN3');
var S_image1 = CN1.expression( '(25400/CN1)-254', {
'CN1': CN1.select('CN1')
}).rename('S_value1');
var S_image2 = CN2.expression( '(25400/CN2)-254', {
'CN2': CN2.select('CN2')
}).rename('S_value2');
var S_image3 = CN3.expression( '(25400/CN3)-254', {
'CN3': CN3.select('CN3')
}).rename('S_value3');
Map.addLayer (S_image1, {}, 'S1', 0)
Map.addLayer (S_image2, {}, 'S2', 0)
Map.addLayer (S_image3, {}, 'S3', 0)
//var rainfall = ee.ImageCollection('UCSB-CHG/CHIRPS/DAILY')
//    .filter(ee.Filter.date('2019-08-01', '2019-08-03'))
//print (rainfall)
//Map.addLayer (rainfall, {}, 'Rainfall')
var rainfall = ee.ImageCollection('UCSB-CHG/CHIRPS/DAILY')

```

```

.filter(ee.Filter.date(startDate, endDate))
//print (rainfall);
//Map.addLayer (rainfall, {}, 'Rainfall', 0);
var listOfImages = rainfall.toList(rainfall.size()); print ('No of Rainfall Images: ',
listOfImages);
var  calculated_list  =  listOfImages.map(function(img)  {  var  index  =
listOfImages.indexOf(img)
img = ee.Image(img);
var firstIndex = ee.Algorithms.If(index.lte(3), index, index.subtract(4)); var firstImage =
ee.Image(listOfImages.get(firstIndex));
var  secondIndex  =  ee.Algorithms.If(index.lte(3),  index,  index.subtract(3));  var
secondImage = ee.Image(listOfImages.get(secondIndex));
var thirdIndex = ee.Algorithms.If(index.lte(3), index, index.subtract(2)); var thirdImage
= ee.Image(listOfImages.get(thirdIndex));
var  fourthIndex  =  ee.Algorithms.If(index.lte(3),  index,  index.subtract(1));  var
fourthImage = ee.Image(listOfImages.get(fourthIndex));
var change = ee.Image(firstImage.add(secondImage).add(thirdImage)
.add(fourthImage).add(img).copyProperties(img, ["system:time_start"]));
return change;
})
//print (calculated_list)
var listOfAMC = calculated_list.size(); print ('No of AMC Images: ', listOfAMC);
var AMCcollection = ee.ImageCollection(calculated_list);
//print (AMCcollection)
Map.addLayer (AMCcollection, {}, 'AMCcollection', 0)
//joining Rainfall Collection and AMCcollection
// Define the join and filter var Join = ee.Join.inner();
var FilterOnStartTime = ee.Filter.equals({'leftField': 'system:time_start',
'rightField': 'system:time_start'
});

// Join the two collections, passing entries through the filter
var rain_AMC = Join.apply(rainfall, AMCcollection, FilterOnStartTime);
// A function to merge the bands together after a join

```

```

// the bands are referred to as the 'primary' and 'secondary' properties var MergeBands
= function(aRow) {
var anImage = ee.Image.cat(aRow.get('primary'), aRow.get('secondary')); return
anImage;
};
var merged = rain_AMC.map(MergeBands);
var MergedRain_AMC = ee.ImageCollection(merged);
print('MergedRain_AMC: ', MergedRain_AMC); Map.addLayer (MergedRain_AMC, {},
'MergedRain_AMC', 0);
var zeroImage = ee.Image(0);
// Defining function for Runoff .
var runoff_func = function(image) {
var AMC = image.select('precipitation_1') var ppt = image.select('precipitation')
var AMCreplaced = S_image2.where(AMC.lte(13), S_image1); var AMCreplaced2 =
AMCreplaced.where(AMC.gt(28), S_image3) var s_value =
AMCreplaced2.select('S_value2')
var Q2 = image.expression(
'((ppt-(0.2*S_image))**2)/(ppt-(0.2*S_image)+S_image)', { 'ppt':
image.select('precipitation'),
'S_image': AMCreplaced2.select('S_value2')
});
var Q3 = Q2.where(ppt.lt(s_value.multiply(0.2)), zeroImage) return
Q3.clip(aoi).rename('runoff')
.copyProperties(image, ["system:time_start"]);
};
var runoff = MergedRain_AMC.map(runoff_func) print (runoff)
// Joining Rainfall and Runoff var Join = ee.Join.inner();
var FilterOnStartTime = ee.Filter.equals({'leftField': 'system:time_start',
'rightField': 'system:time_start'
});

// Join the two collections, passing entries through the filter var JoinedRR =
Join.apply(rainfall, runoff, FilterOnStartTime);
// A function to merge the bands together after a join

```

```

// the bands are referred to as the 'primary' and 'secondary' properties var MergeBands
= function(aRow) {
var  anImage    =    ee.Image.cat(aRow.get('primary'),
aRow.get('secondary')).clip(aoi);
return anImage;
};
var RainfallRunoff1 = JoinedRR.map(MergeBands);
var RainfallRunoff = ee.ImageCollection(RainfallRunoff1);
//Visualization Parameters
var  palettes   =   require('users/gena/packages:palettes');   var  palette   =
palettes.colorbrewer.RdYlGn[9];
var pptVis = { min: 0,
max: 2000, palette: palette,
};
Map.addLayer (RainfallRunoff, {}, 'RainfallRunoff',0)
Map.addLayer  (RainfallRunoff.select('precipitation').sum(),  pptVis,  'Rainfall')
Map.addLayer (RainfallRunoff.select('runoff').sum(), pptVis, 'runoff')
print(RainfallRunoff);
var chart = ui.Chart.image.series({ imageCollection: RainfallRunoff, region: aoi,
reducer: ee.Reducer.mean(), scale: 500,
}).setOptions({
title: 'Rainfall Runoff Time series (Mean)', vAxis: {title: 'Rainfall & Runoff in mm'}, hAxis:
{title: 'Dates'},
});
print(chart)

```