

Universidade de São Paulo
Instituto de Astronomia, Geofísica e Ciências Atmosféricas
Departamento de Ciências Atmosféricas

Bruna Ferreira Ramim

Avaliação da previsão sub-sazonal da
precipitação nas grandes bacias das
regiões Sul e Sudeste.

São Paulo
2022

Bruna Ferreira Ramim

Versão Corrigida.

O original encontra-se disponível na Unidade.

Avaliação da previsão sub-sazonal da precipitação nas grandes bacias das regiões Sul e Sudeste.

Dissertação apresentada ao Departamento de Ciências Atmosféricas do Instituto de Astronomia, Geofísica e Ciências Atmosféricas da Universidade de São Paulo como requisito parcial para obtenção do título de Mestre em Ciências.

Área de Concentração: Meteorologia Sinótica
Orientadora: Prof.^a Dra. Maria Assunção Faus da Silva Dias

São Paulo

2022

AGRADECIMENTOS

A Deus por estar sempre comigo.

A minha orientadora Prof.^a Dra. Maria Assunção Faus da Silva Dias por toda paciência, suporte, compreensão e apoio.

Aos meus pais, Leonardo e Marluce, e à minha irmã, Bianca, que me apoiaram em todos os momentos e me deram todo incentivo e amor possíveis. Sem eles eu nunca teria conseguido a determinação final para a conclusão desta dissertação.

Às minhas amigas Izabella, Janne e Lara, que compartilharam comigo toda esta jornada, nos momentos alegres e difíceis.

Aos meus amigos Giovanni, Lucas e Nicolás, por todo apoio e por dividirem comigo momentos tão divertidos e eternamente guardados na minha memória.

Aos meus amigos da equipe de Gestão de Energia Jayme, Letícia, Paulo e João, que estiveram comigo durante grande parte deste desafio e compartilharam comigo seus conhecimentos sobre o setor elétrico brasileiro.

A empresa Alupar Investimento S.A pela concepção do projeto e flexibilidade oferecida para que eu pudesse dar seguimento a este mestrado.

Ao IAG/USP e seu corpo docente por todo suporte durante a pós-graduação.

RESUMO

O objetivo deste estudo foi avaliar a previsão de 60 dias do modelo Coral (desenvolvido na empresa Alupar Investimento S.A através de um projeto de P&D) nas bacias hidrográficas dos rios Paranaíba, Grande, Paranapanema, Iguaçu e Uruguai. O estudo da chuva realizada foi feito a partir das bases de dados do CHIRPS, TRMM e GPM, e foi utilizado para determinar a sazonalidade das bacias, bem como para definição de eventos de chuva de interesse. As bacias do Paranaíba e Grande possuem um regime de precipitação caracterizado por um seco e um período úmido bem definido. O estudo foi conduzido a partir desta sazonalidade (DJF, MAM, JJA e SON). Foram estudados os eventos extremos chuvosos e secos, bem como chuva dentro/acima/abaixo da média através dos percentis de 99%, 01%, 95%, 05%, 66% e 33%. A análise das previsões do modelo foi feita a partir do método de contingência e índices derivados (SKILL, POD, ICS, BIAS, F, FAR e RMSE). O curto horizonte de previsões operacionais do modelo resultou em parâmetros de contingência nulos na maioria dos casos, interferindo na interpretação dos índices derivados. De modo geral, a previsão do modelo Coral é melhor em SON e MAM, e pior em DJF. O RMSE é maior para as bacias do Sul, e nas bacias do Sudeste é menor no período seco.

ABSTRACT

The objective of this study was to evaluate the 60-day forecast of the Coral model (developed at Alupar Investimento S.A through an R&D project) in the river basins of the Paranaíba, Grande, Paranapanema, Iguaçu, and Uruguai. The rainfall study was done from the CHIRPS, TRMM and GPM databases, and was used to determine the seasonality of the basins, as well as to define rainfall events of interest. The Paranaíba and Grande basins have a precipitation regime characterized by a well-defined dry and wet period. The study was conducted based on this seasonality (DJF, MAM, JJA and SON). The extreme wet and dry events, as well as rainfall within/above/below average were studied through the 99%, 01%, 95%, 05%, 66% and 33% percentiles. Analysis of the model predictions was done from the contingency method and derived indexes (SKILL, POD, ICS, BIAS, F, FAR and RMSE). The short operational forecasting horizon of the model resulted in null contingency parameters in most cases, interfering with the interpretation of the derived indexes. Overall, the Coral model forecast is better in SON and MAM, and worse in DJF. The RMSE is higher for the southern basins, and in the southeastern basins it is lower in the dry period.

Índice de Figuras

Figura 1: Sistema Interligado Nacional.	17
Figura 2: Representação espacial das 12 divisões hidrográficas brasileiras.	18
Figura 3: Principais bacias hidrográficas brasileiras no SIN.	18
Figura 4: Dilema do ONS sobre o despacho hidrotérmico no SIN. (Adaptado de PEN, 2019).....	20
Figura 5: Unidades geradoras da RH Paraná.	20
Figura 6: Localização espacial da bacia hidrográfica do rio Uruguai.....	24
Figura 7: Ilustração da tabela de contingência utilizada para a análise de um evento.	32
Figura 8: Diagrama de dispersão entre os dados diários do CHIRPS e do TRMM, para o período de 1998 a 2014.	40
Figura 9: Diagrama de dispersão entre os dados diários do CHIRPS e do GPM, para o período de 2015 a 2020.	40
Figura 10: Dados mensais acumulados para o período analisado. As bacias estão representadas da seguinte maneira: bacia do Grande (GR), bacia do Paranaíba (PB), bacia do Paranapanema (PN), bacia do Uruguai (UR) e bacia do Iguaçu (IG); dados do CHIRPS (.C), dados do GPM (.G) e dados do TRMM (.T).	42
Figura 11: Acumulados mensais médios de chuva na Bacia do Paranaíba por série de dados considerada.	44
Figura 12: Mesmo que a Figura 11, mas para a bacia do Grande.	44
Figura 13: Mesmo que a Figura 11, mas para a bacia do Paranapanema.	45
Figura 14: Mesmo que a Figura 11, mas para a bacia do Iguaçu.	45
Figura 15: Mesmo que a Figura 11, mas para a bacia do Uruguai.	46
Figura 16: Ciclo anual da bacia do rio Paranaíba.	47
Figura 17: Ciclo anual da bacia do rio Grande.	47
Figura 18: Ciclo anual da bacia do rio Paranapanema.	48
Figura 19: Ciclo anual da bacia do rio Iguaçu.	48
Figura 20: Ciclo anual da bacia do rio Uruguai.....	49
Figura 21: Chuva realizada em 2020 (linha azul), 2021 (linha amarela), 2022 (linha roxa) e média histórica mensal (linha preta) e percentis sazonais (DJF, MAM, JJA, SON) encontrados para extremos chuvosos (p99, p95 e p90, em verde tracejado) e para extremos secos (p10, p05 e p01, em marrom tracejado) para a bacia do Paranaíba.	50
Figura 22: Mesmo que a Figura 21, para a bacia do Grande.	50
Figura 23: Mesmo que a Figura 21, para a bacia do Paranapanema.	51
Figura 24: Mesmo que a Figura 21, para a bacia do Iguaçu.....	51
Figura 25: Mesmo que a Figura 21, para a bacia do Uruguai.....	52
Figura 26: Chuva realizada em 2020 (linha azul), 2021 (linha amarela), 2022 (linha roxa) e média histórica mensal (linha preta) e percentis mensais encontrados para extremos chuvosos (p99, p95 e p90, em verde tracejado) e para extremos secos (p10, p05 e p01, em marrom tracejado) para a bacia do Paranaíba.....	53
Figura 27: Mesmo que a Figura 26, para a bacia do Grande.	53
Figura 28: Mesmo que a Figura 26, para a bacia do Paranapanema.	54
Figura 29: Mesmo que a Figura 26, para a bacia do Iguaçu.....	54

Figura 30: Mesmo que a Figura 26, para a bacia do Uruguai.....	55
Figura 31: Previsões do modelo Coral LSTM 60 dias para o acumulado mensal de precipitação no mês de fevereiro de 2020.	58
Figura 32: Mesmo que a Figura 31, para o mês de julho de 2021.....	58
Figura 33: Mesmo que a Figura 31, para o mês de outubro de 2021.....	59
Figura 34: Mesmo que a Figura 31, para a bacia do Grande, para o mês de março de 2020.....	59
Figura 35: Mesmo que a Figura 31, para a bacia do Grande, para o mês de outubro de 2021.....	60
Figura 36: Mesmo que a Figura 31, para a bacia do Paranapanema, para o mês de setembro de 2020.	60
Figura 37: Mesmo que a Figura 31, para a bacia do Paranapanema, para o mês de abril de 2021.....	61
Figura 38: Mesmo que a Figura 31, para a bacia do Paranapanema, para o mês de outubro de 2021.....	61
Figura 39: Mesmo que a Figura 31, para a bacia do Iguaçu, para o mês de setembro de 2020.	62
Figura 40: Mesmo que a Figura 31, para a bacia do Iguaçu, para o mês de outubro de 2020.....	62
Figura 41: Mesmo que a Figura 31, para a bacia do Iguaçu, para o mês de janeiro de 2021.....	63
Figura 42: Mesmo que a Figura 31, para a bacia do Iguaçu, para o mês de abril de 2021.....	63
Figura 43: Mesmo que a Figura 31, para a bacia do Iguaçu, para o mês de dezembro de 2021.	64
Figura 44: Mesmo que a Figura 31, para a bacia do Uruguai, para o mês de junho de 2020.....	64
Figura 45: Mesmo que a Figura 31, para a bacia do Uruguai, para o mês de outubro de 2020.....	65
Figura 46: Mesmo que a Figura 31, para a bacia do Uruguai, para o mês de julho de 2021.....	65
Figura 47: Mesmo que a Figura 31, para a bacia do Uruguai, para o mês de dezembro de 2021.	66

Índice de Tabelas

Tabela 1: Seleção final de índices por bacia.....	26
Tabela 2: Índices utilizados para análise da destreza do modelo.....	33
Tabela 3: Distribuição dos dias faltantes de previsão do modelo Coral por bacia analisada.....	35
Tabela 4: Valor do coeficiente de correlação de Pearson (ρ) entre os conjuntos de dados.....	41
Tabela 5: Estatísticas básicas dos conjuntos de dados por estimativa de satélite.	43
Tabela 6: Valores dos coeficientes de correlação de Pearson, entre a série média mensal de chuva do ONS e de cada conjunto de dados de chuva por estimativa de satélite (CHIRPS, TRMM, GPM e TRMM_GPM).	46
Tabela 7: Distribuição dos eventos extremos secos/chuvosos para as bacias do Paranaíba, Grande e Paranapanema.	56
Tabela 8: Mesmo que a Tabela 7, para as bacias do Iguaçu e Uruguai.....	57
Tabela 9: Valores encontrados para os percentis de 66% e 33% considerando-se os períodos sazonais.....	66
Tabela 10: Mesmo que a tabela 3, mas para o período mensal.....	67
Tabela 11: Meses de referência das previsões selecionadas do modelo Coral.....	67
Tabela 12: Parâmetros da tabela de contingência, considerando-se os percentis sazonais, e analisando a previsão do Coral e a chuva realizada do CHIRPS para um mesmo período.....	68
Tabela 13: Mesmo que a Tabela 12, mas considerando-se os percentis mensais.....	69
Tabela 14: Índices avaliadores do modelo Coral encontrados para a bacia do Paranaíba.....	72
Tabela 15: Mesmo que a Tabela 14, mas para a bacia do Grande.....	74
Tabela 16: Mesmo que a Tabela 14, mas para a bacia do Paranapanema.....	76
Tabela 17: Mesmo que a Tabela 14, mas para a bacia do Iguaçu.....	78
Tabela 18: Mesmo que a Tabela 14, mas para a bacia do Uruguai.....	80
Tabela 19: Valores encontrados para o RMSE.....	81

Lista de Siglas

AAO - Oscilação Antártida
ANEEL - Agência Nacional de Energia Elétrica
CMO - Custo Marginal de Operação
CNRH - Conselho Nacional de Recursos Hídricos
CVU - Custo Variável Unitário
ECMWF - European Centre for Medium-Range Weather Forecasts
ENOS - El Niño Oscilação Sul
EOF - Empirical Orthogonal Functions
GPM - Global Precipitation Measurement
IA - Inteligência Artificial
JAXA - Japan Aerospace Exploration Agency
LISAM - Large-scale index for South America Monsoon
LSTM - Long Short-Term Memory
MEI - Índice Multivariado ENOS
MCP - Mercado de Curto Prazo
MJO - Madden-Julian Oscillation
NASA - National Aeronautics and Space Administration
OMM - Organização Meteorológica Mundial
ONS - Operador Nacional do Sistema
P&D - Pesquisa e Desenvolvimento
PDO - Oscilação Decadal do Pacífico
PSA - Pacífico – América do Sul
RH - Regiões Hidrográficas
SAODI - South Atlantic Ocean Dipole Index
SIN - Sistema Interligado Nacional
SMAS - Sistema de Monção da América do Sul
SOI - Índice Oscilação Sul
S2S - Subseasonal to Seasonal Forecast
TSM - Temperaturas da Superfície do Mar
TRMM - Tropical Rainfall Measuring Mission
WMO - World Meteorological Organization
ZCAS - Zona de Convergência do Atlântico Sul

Sumário

1. Introdução.....	14
1.1 Contextualização e revisão literária.....	14
1.2 Motivação e objetivos.....	16
1.3 Sistema Interligado Nacional (SIN).....	16
1.4 Bacias hidrográficas.....	20
1.4.1 Bacia Hidrográfica do Rio Paranaíba.....	21
1.4.2 Bacia Hidrográfica do Rio Grande.....	22
1.4.3 Bacia Hidrográfica do Rio Paranapanema.....	23
1.4.4 Bacia Hidrográfica do Rio Iguaçu.....	23
1.4.5 Bacia Hidrográfica do Rio Uruguai.....	24
1.5 Modelo Coral.....	25
2. Metodologia.....	29
2.1 Dados de precipitação.....	29
2.2 Sazonalidade da precipitação nas bacias.....	31
2.3 Avaliação da previsão do Modelo Coral LSTM 60 dias.....	32
2.4 Eventos de precipitação.....	37
2.4.1 Eventos extremos chuvosos/secos.....	38
2.4.2 Eventos dentro da média.....	39
2.4.3 Eventos acima/abaixo da média.....	39
3. Resultados.....	40
3.1 Dados chuva realizada.....	40
3.2 Sazonalidade do regime de precipitação.....	46
3.3 Eventos extremos de precipitação.....	49
3.4 Previsão do modelo Coral LSTM 60 dias.....	67
4. Conclusões.....	82
Referências bibliográficas.....	84

1. Introdução

1.1 Contextualização e revisão literária

O estudo dos casos extremos de precipitação na América do Sul tem sido feito por vários autores. Haylock et al. (2006) analisaram extremos diários e suas tendências ao longo de 40 anos encontrando regiões com aumento na frequência de extremos e outras com diminuições, assim como um deslocamento para sul das trajetórias de ciclones. Grimm et al. (1998) e Grimm e Tedeschi (2009) associaram os extremos de chuva com as fases opostas do El Niño e La Niña. Carvalho et al. (2002), Carvalho et al. (2004), Gan et al. (2004) e Zilli et al. (2017) analisaram aspectos do Sistema de Monção da América do Sul (SMAS), e particularmente da Zona de Convergência do Atlântico Sul (ZCAS) e suas conexões regionais e globais.

A relação entre extremos de precipitação e os índices climáticos globais foi usada por Silva Dias et al. (2013) e Pedron et al. (2017) para São Paulo e Curitiba, respectivamente. Sena et al. (2018) analisaram a relação entre os índices climáticos e a estação chuvosa na Amazônia e Brasil Central. Esses trabalhos mostram que existe uma relação entre os índices climáticos e a chuva observada. Isso basicamente indica que a chuva deve ser previsível em função de padrões climáticos regionais e globais.

O programa de previsão da Organização Meteorológica Mundial (OMM ou WMO – *World Meteorological Organization*), denominado de previsão subsazonal a sazonal (subseasonal to seasonal forecast - S2S), enfoca justamente a extensão do prazo útil das previsões na escala entre 15 dias e 2 meses. A hipótese é que os padrões climáticos globais aumentem a previsibilidade nesta escala. Dentre os padrões importantes para a previsibilidade na escala S2S está a oscilação de Madden e Julian ou MJO (*Madden-Julian Oscillation*) que consiste, basicamente, do deslocamento para leste, pelas águas superficiais quentes dos oceanos Índico e Pacífico, de uma célula zonal de grande escala termicamente direta e de intensa atividade convectiva, em uma lenta propagação que causa variações na convecção

tropical (Madden e Julian (1971); Madden e Julian (1994)), podendo atuar também na variabilidade subtropical e extratropical. Em 1994, Kousky e Kayano sugeriram que a MJO tem influência nas variações da posição e intensidade da ZCAS. Quando ocorre a passagem da MJO sobre a América do Sul, há o favorecimento de sistemas transientes que contribuem para a formação de ZCAS, possibilitando o aumento das chuvas. Estudos indicam que quando a convecção é localizada sobre o Oeste do Pacífico, há um aumento da convecção sobre a América do Sul, favorecendo a ocorrência de eventos extremos de precipitação (Souza e Ambrizzi (2006); Grimm e Ambrizzi (2009)). Os eventos de El Niño têm seu início e desenvolvimento influenciados pela MJO (Kessler e McPhaden (1995)). Shimizu e Ambrizzi (2016) investigaram a ação combinada das fases da MJO e El Niño Oscilação Sul (ENOS) sobre a América do Sul no verão (novembro a março) e inverno (maio a setembro). Os resultados mostraram que a precipitação e anomalias da temperatura observadas durante os eventos ENSO podem ser fortalecidas ou enfraquecidas quando ocorrem simultaneamente com o MJO, especialmente durante o verão austral. Segundo Madeira et al. (2018), o subsistema Sudeste/Centro-Oeste do Sistema Interligado Nacional (SIN) tem mais eventos de chuva acima do normal quando a MJO se encontra nas fases 8, 1 e 2, sendo observado um aumento do nível nos reservatórios dessa região. No subsistema Sul, o favorecimento da chuva ocorre nas fases 1 e 2 da MJO, enquanto no subsistema Norte esta influência é mais evidente na fase 1, com escassez hídrica na fase 5. E, no subsistema Nordeste, encontram-se os maiores volumes nos reservatórios quando a MJO está nas fases 8 e 1.

Desse modo, a MJO é o modo dominante de oscilação atmosférica na escala intrasazonal, isto é, de 30 a 90 dias Zhang (2005) e sua previsão é um dos grandes desafios atuais, encontrando dificuldades de representação nos modelos numéricos em escala S2S. Recentemente, Son et al. (2017) encontraram uma influência entre padrões estratosféricos e a MJO, lançando mais uma variável na previsão do fenômeno. O limite teórico de previsibilidade da oscilação de Madden-Julian não é totalmente claro, mas os modelos de previsão da MJO se configuram como uma importante peça na melhora da previsão do tempo e clima (Waliser et al. (1999); Lo e Hendon (2000); Wheeler

e Weickmann (2001); Mo(2001)). Ferranti et al. (1990) conseguiram mostrar que uma melhor representação da MJO no modelo de tempo do *European Centre for Medium-Range Weather Forecasts* (ECMWF) levava a um considerável aumento da *skill* do modelo nos extras trópicos após 10 dias de previsão, indicando previsibilidade na escala intrasazonal.

1.2 Motivação e objetivos

Os modelos de previsão baseados em padrões dos indicadores dos diversos índices climáticos já começaram a ser desenvolvidos utilizando métodos mais complexos de Inteligência Artificial (IA). O aprendizado de máquina é uma técnica estatística que tem proporcionado avanços na previsão de chuva (como, por exemplo, em Perez (2018)). A operacionalização de um modelo baseado em índices climáticos para previsão de chuva na escala S2S para grandes bacias do SIN foi implantada para a área de gestão em energia na empresa Alupar, uma *holding* de controle nacional privado com atuação no setor de energia, mais especificamente nos segmentos de transmissão e geração (Alupar, 2020).

O objetivo deste trabalho foi uma avaliação do desempenho do produto final de previsão da precipitação do modelo desenvolvido neste projeto de Pesquisa e Desenvolvimento (P&D) na escala de 15 dias a 2 meses (intrasazonal) nas bacias principais hidrográficas dos subsistemas Sudeste e Sul do SIN.

1.3 Sistema Interligado Nacional (SIN)

O Sistema Interligado Nacional (Figura 1) é constituído por quatro subsistemas: Sudeste/Centro-Oeste, Sul, Nordeste e grande parte da região Norte (a maioria dos cerca de 250 sistemas isolados, que são sistemas elétricos não conectados ao SIN, estão nesta região (EPE, 2020)). Esse sistema de transmissão e produção de energia elétrica no território brasileiro tem base hídrica, térmica e eólica e suas operações de transmissão e geração são controladas e coordenadas pelo Operador Nacional do Sistema – ONS (órgão

federal criado em 1998, fiscalizado e regulado pela ANEEL (Agência Nacional de Energia Elétrica), que visa garantir a segurança e o suprimento de energia elétrica para o país; os sistemas isolados também estão sob sua competência). A ideia central da operação do sistema é a mitigação dos efeitos dos distintos regimes hidrológicos dos diferentes subsistemas, vista a vasta extensão territorial do Brasil e suas variabilidades climáticas, garantindo a segurança energética do país (ONS, 2020).

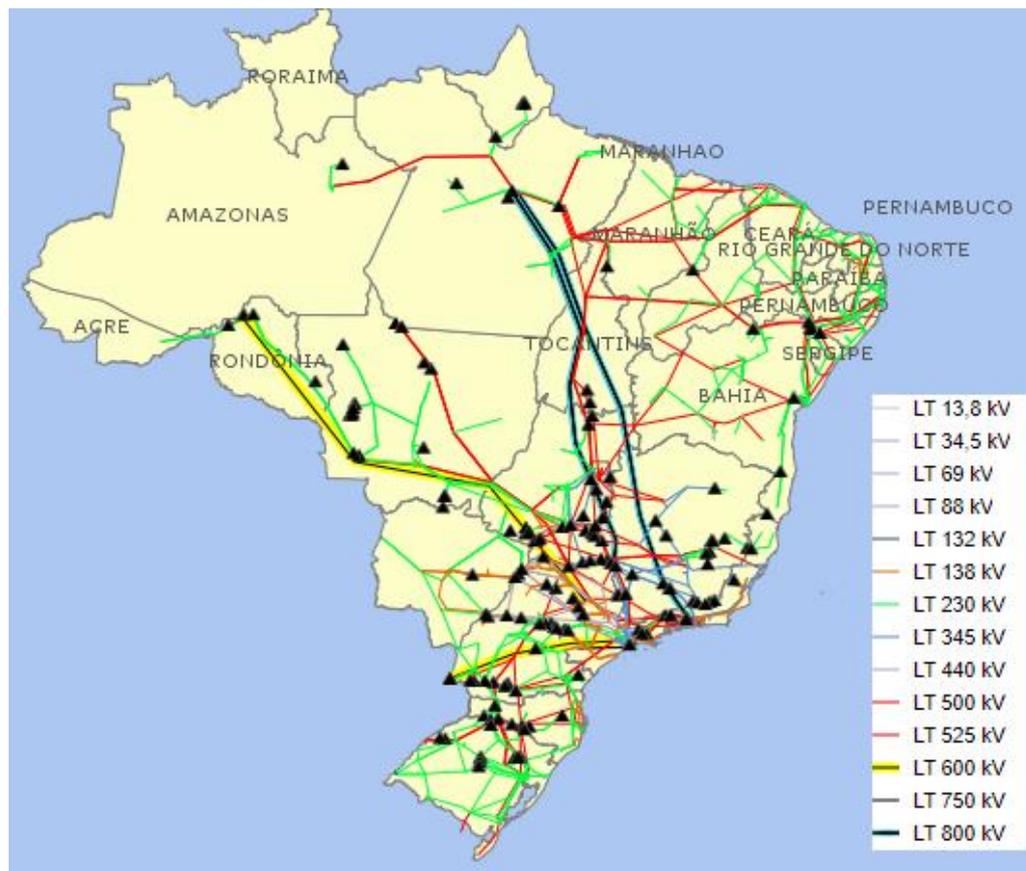


Figura 1: Sistema Interligado Nacional.

Os triângulos pretos correspondem as usinas hidrelétricas em operação e as linhas coloridas representam as linhas de transmissão de diferentes tensões.
(Adaptado de SINDAT, 2019)

O Brasil possui 12 Regiões Hidrográficas (RH), ilustradas na Figura 2, instituídas pelo Conselho Nacional de Recursos Hídricos (CNRH) por meio da Resolução nº 32, de 15 de outubro de 2003. As usinas hidrelétricas, distribuídas nas principais bacias hidrográficas brasileiras (englobadas nas RHs e ilustradas nas Figuras 2 e 3), são as principais constituintes da capacidade instalada de

geração no SIN, correspondendo a 114.147 MWmed (ou 66.2%) dos 172.438 MWmed projetados para 2020 (PMO, 2020).



Figura 2: Representação espacial das 12 divisões hidrográficas brasileiras. (Adaptado de Panorama das Águas – ANA, 2020)



Figura 3: Principais bacias hidrográficas brasileiras no SIN.

As usinas térmicas são despachadas pelo ONS de modo a otimizar a gestão dos armazenamentos de água (reservatórios) das usinas hidrelétricas, de acordo com as condições hidro-meteorológicas presentes. A localização das térmicas é geralmente próxima dos grandes centros de demanda da carga, de modo a garantir a segurança energética do SIN. Desse modo, o caráter essencial dos reservatórios na Matriz Elétrica Brasileira e, assim, a energia armazenada nos subsistemas, é peça central na precificação da energia elétrica no Mercado de Curto Prazo (MCP), visto que para a preservação dos reservatórios é necessário o acionamento das usinas termoelétricas, que possuem maior custo de operação (precificado através do Custo Variável Unitário (CVU) das térmicas, definido pela ANEEL em 2019 como “valor expresso em reais por megawatt-hora (R\$/MWh) necessário para cobrir todos os custos operacionais do empreendimento termoelétrico”, que varia de acordo com o combustível utilizado.

Na modelagem vigente para precificação energética, o reflexo da decisão de preservação dos reservatórios das usinas hidrelétricas culmina em um aumento do Custo Marginal de Operação (CMO), definido pela ANEEL em 2004 como o “custo por unidade de energia produzida para atender a um acréscimo de carga no sistema”, ou seja, remete ao CVU da próxima térmica a ser despachada pelo ONS caso seja necessário, para a manutenção da segurança de atendimento energético do SIN. A capacidade máxima de armazenamento do SIN é da ordem de 292 GWmed (PEN, 2019), dos quais cerca de 203 GWmed estão no subsistema Sudeste/Centro-Oeste (sendo que a Bacia do Paranaíba representa 38% deste total, a Bacia do Grande 26% e a Bacia do Paranapanema 6%), 20 GWmed no subsistema Sul (sendo a Bacia do Iguaçu responsável por 52% e a Bacia do Uruguai responsável por 30%), 52 GWmed no subsistema Nordeste e 15 GWmed no subsistema Norte (ONS, 2020). A Figura 4 ilustra o dilema que o ONS deve resolver sobre o despacho hidrotérmico no SIN.

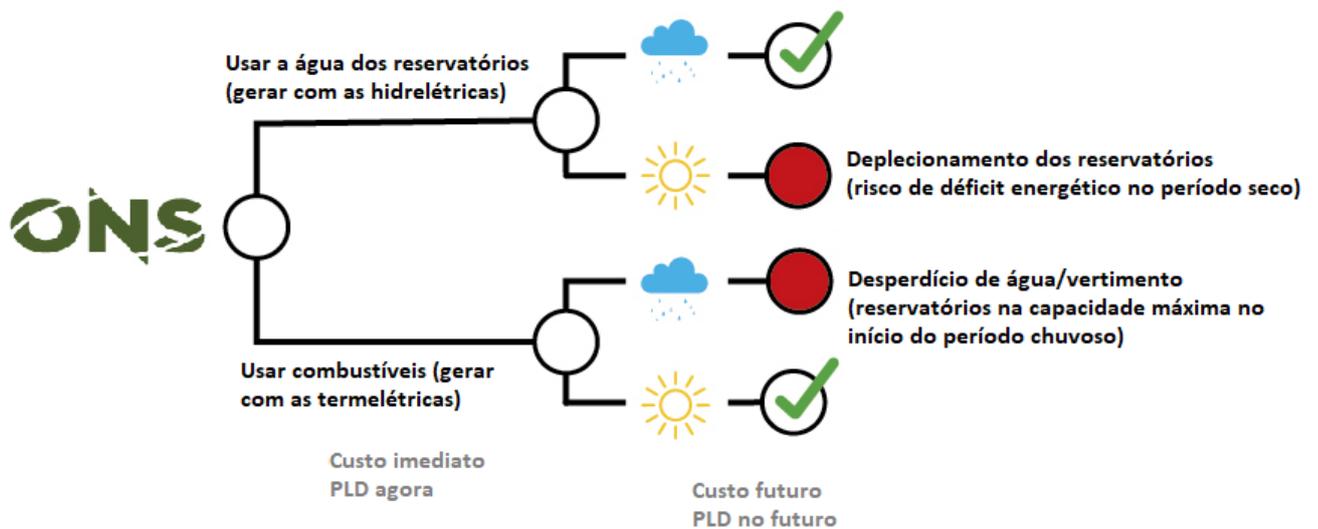


Figura 4: Dilema do ONS sobre o despacho hidrotérmico no SIN.
(Adaptado de PEN, 2019)

1.4 Bacias hidrográficas

As bacias hidrográficas do rio Grande, Paranaíba, Paranapanema e Iguaçu (pertencentes à RH Paraná, como ilustrado na Figura 5 abaixo) e a RH Uruguai (ou bacia hidrográfica do Uruguai) foram escolhidas para análise neste estudo pela importância das mesmas na configuração dos reservatórios de seus subsistemas de origem, como discutido anteriormente.

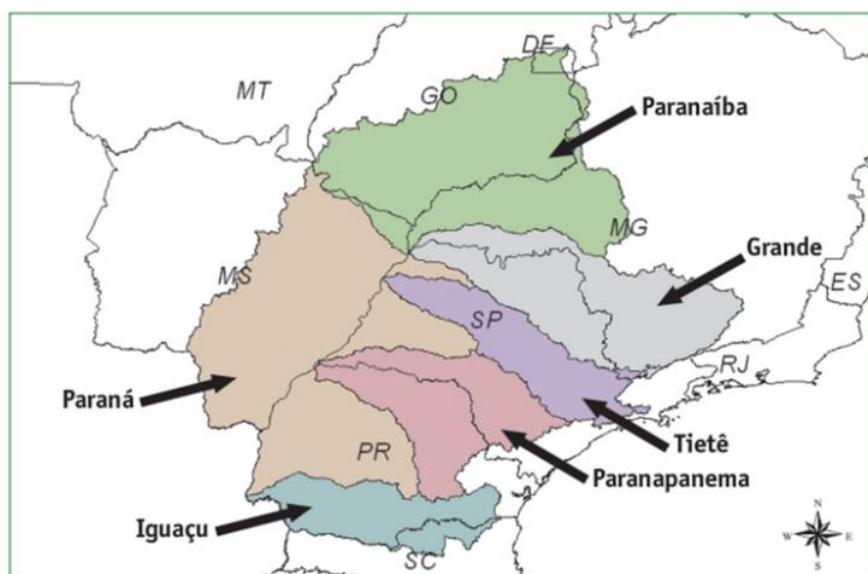


Figura 5: Unidades geradoras da RH Paraná.
(Adaptado de Caderno da RH Paraná, 2006)

A escolha do estudo das bacias do subsistema Sul em detrimento das bacias do subsistema Nordeste (que possui maior capacidade de energia armazenada) se justifica pelo fator físico limitante de transmissão entre subsistemas existente atualmente, considerado na modelagem de precificação da energia elétrica de longo e curto prazo. Em síntese, não é possível escoar todo o excedente de energia produzida nos subsistemas Norte e Nordeste para o subsistema Sudeste/Centro-Oeste, que demanda a maior parte da carga no Brasil (região de maior desenvolvimento econômico) e geralmente é importador de energia dos outros subsistemas. Assim, a escolha de preservar os reservatórios do Sul implica em exportar menos energia para o Sudeste/Centro-Oeste, possivelmente acarretando um maior CMO neste subsistema.

A caracterização geral das bacias hidrográficas escolhidas para análise é apresentada a seguir de forma a dar uma visão básica dos aspectos de cada região analisada.

1.4.1 Bacia Hidrográfica do Rio Paranaíba

A bacia hidrográfica do rio Paranaíba é a segunda maior unidade da RH Paraná, com uma área de drenagem de aproximadamente 223.000 km². A nascente do rio Paranaíba está situada na Serra da Mata da Corda, no município de rio Paranaíba/MG. O rio configura a divisa entre os Estados de Minas Gerais e Mato Grosso do Sul, confluindo com o rio Grande e formando o rio Paraná. A bacia atende 197 municípios e sua localização abrange áreas que incluem os estados de Goiás, Mato Grosso do Sul e Minas Gerais, além do Distrito Federal.

O clima da bacia do rio Paranaíba pode ser caracterizado como tropical quente em todo o ano, com invernos secos. A sazonalidade presente no regime de precipitação da bacia é bem-marcada, com meses secos apresentando acumulados médios mensais inferiores a 50 mm, com valores próximos de zero, e os meses úmidos (outubro a abril) com médias mensais que superam 100 mm, podendo chegar aos 400 mm. O valor médio de precipitação na bacia do rio Paranaíba está em torno de 1.500 mm, com uma distribuição anual das chuvas caracterizando uma estação seca na região que se prolonga entre três a quatro

meses do ano (maio, junho, julho e/ou agosto) (PRH Paranaíba, 2015). A bacia possui 19 aproveitamentos hidrelétricos integrantes do SIN (Paranaíba, 2018).

1.4.2 Bacia Hidrográfica do Rio Grande

A bacia hidrográfica do rio Grande abrange uma área de aproximadamente 143.271 km² na divisa entre os Estados de Minas Gerais e São Paulo. O rio Grande nasce na mineira Serra da Mantiqueira, percorrendo cerca de 1.286 km até receber as águas do rio Paranaíba e formar o rio Paraná, na divisa entre os Estados de São Paulo e Mato Grosso do Sul; assim, a bacia acolhe, total ou parcialmente, 393 municípios, dos quais 179 estão no Estado de São Paulo e 214 no Estado de Minas Gerais (ANA, 2015).

O rio Grande é reconhecido nacionalmente por sua força de geração hidrelétrica (7.640 MWmed), que corresponde a cerca de 13% do total da bacia do rio Paraná, que tem uma capacidade instalada de geração de energia hidrelétrica de 38.660 MWmed. As usinas de Camargos, Itutinga, Funil, Furnas, Mascarenhas de Moraes, L. C. B de Carvalho, Jaguará, Volta Grande, Porto Colômbia, Marimbondo e Água Vermelha estão em cascata no rio Grande, de montante para jusante. A bacia hidrográfica do rio Grande está localizada na região do submercado energético Sudeste/Centro-Oeste e confronta ao sul com as bacias dos rios Tietê, Piracicaba e Jaguari, ao norte com as bacias dos rios Paranaíba, São Francisco e Doce e ao leste com a bacia do rio Paraíba do Sul (CEMIG,2019). O ONS classifica como tropical o clima na região do Alto rio Grande, com chuvas de verão e estiagem no inverno, com temperatura média anual de 20°C. A precipitação média anual na bacia é estimada em torno de 1.500mm, com estação chuvosa no verão, estendendo-se de outubro a março, e estação seca nos meses de junho, julho e agosto, no inverno. Os meses de abril, maio e setembro são considerados meses de transição entre as estações seca e chuvosa. Os principais sistemas meteorológicos responsáveis pela precipitação na bacia do rio Grande são as frentes frias e a ZCAS. O trimestre mais chuvoso é formado pelos meses de dezembro, janeiro e fevereiro, sendo que o mês mais chuvoso do ano oscila entre dezembro e janeiro (ONS, 2008).

1.4.3 Bacia Hidrográfica do Rio Paranapanema

A bacia hidrográfica do rio Paranapanema abrange uma área de cerca de 106.720 km² (ANA, 2019). O rio Paranapanema é localizado na divisa entre os estados do Paraná e São Paulo, e sua nascente está na Serra de Agudos Grandes, no sudeste paulista. O percurso feito pelo rio, de cerca de 900 km no sentido oeste, se destina a sua foz no rio Paraná. A bacia drena áreas de 247 municípios, dos quais 115 estão localizados no Estado de São Paulo e 132 no Estado do Paraná, abrigando cerca de cinco milhões de habitantes (PIRH, 2016).

O rio Paranapanema percorre 930 km fluindo por uma cascata de reservatórios operativos, tendo seu regime de escoamento definido e controlado pelo ONS. A precipitação média na bacia é de cerca de 1.450 mm. O trimestre mais seco vai de junho a agosto, e o mais úmido de dezembro a fevereiro. A sazonalidade é mais acentuada nas regiões do Alto, Médio e Pontal do Paranapanema, em São Paulo (PIRH, 2016).

1.4.4 Bacia Hidrográfica do Rio Iguaçu

O rio Iguaçu se configura como um dos principais afluentes do rio Paraná, com uma área de drenagem totalizando cerca de 70.800 km², dos quais mais de 80% estão dispostos em território paranaense e o restante no Estado de Santa Catarina. As condições climáticas na bacia do rio Iguaçu seguem os padrões da Região Sul do país, sendo, de um modo geral, caracterizadas pelas massas de ar que atingem a região e sofrem influência da posição relativa dos anticiclones localizados sobre os oceanos Pacífico e Atlântico e dos centros de baixa pressão que atuam na área. Há uma correlação direta de aumento das afluências na bacia com o El Niño, geralmente no inverno (junho e julho) e na primavera (novembro) e correlação inversa com a La Niña, com baixas afluências na primavera (outubro e novembro) (Guetter et al. (2000)). A precipitação média anual sobre a bacia é de cerca de 1.500 mm com uma distribuição da chuva irregular no tempo e no espaço, sem um período úmido muito bem definido, (ONS, 2007).

1.4.5 Bacia Hidrográfica do Rio Uruguai

A RH Uruguai possui 405 municípios e, juntamente com as RHs do Paraná e Paraguai, forma a grande região hidrográfica da bacia do Prata (ANA, 2014). A área total drenada pelo rio Uruguai é de cerca de 385.000 km², dos quais 45% (ou seja, cerca 175.000 km²) estão situados em território nacional; 73% de sua área está no Rio Grande do Sul e 27% em Santa Catarina. O rio Uruguai se forma da confluência do rio Pelotas com o rio Canoas, dividindo os Estados do Rio Grande do Sul e Santa Catarina e materializando a fronteira entre o Brasil e Argentina e entre Uruguai e Argentina (Caderno da RH Uruguai, 2006). As chuvas na bacia do Uruguai são distribuídas ao longo de todo o ano, com certa elevação no período de maio a setembro, coincidindo com o inverno. O clima da região é temperado e a precipitação média anual é de 1.623 mm (ANA, 2014). A Figura 6 mostra a localização geográfica da bacia do rio Uruguai.

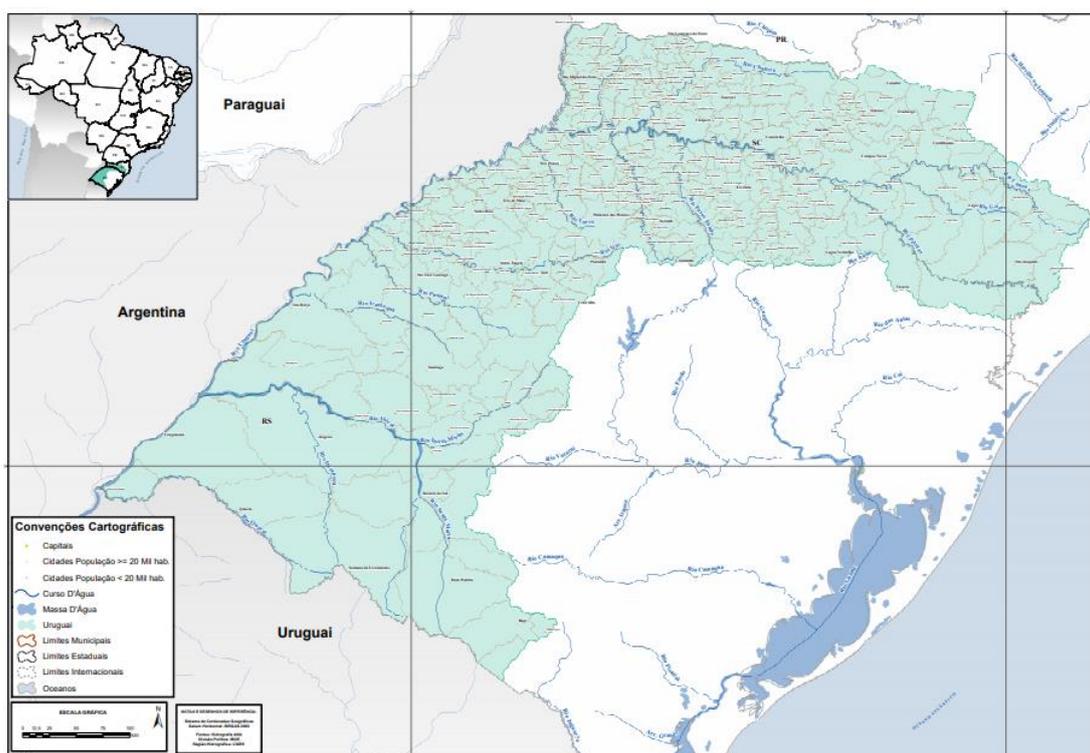


Figura 6: Localização espacial da bacia hidrográfica do rio Uruguai. (Adaptado de ANA, 2017)

1.5 Modelo Coral

O objetivo inicial do P&D foi gerar um modelo de previsão de precipitação na escala intrasazonal (denominado modelo Coral) a partir de novos métodos operacionais de baixo custo computacional para as principais bacias hidrográficas do setor elétrico no Brasil. Assim, foram empregadas técnicas de IA para a melhoria das previsões S2S disponibilizadas pelos grandes institutos internacionais de meteorologia.

A indicação na literatura de que a chuva pode ser previsível em função de padrões climáticos regionais e globais geriu a concepção do modelo Coral, e assim foram investigados os potenciais preditores (índices climáticos) de precipitação em cada bacia brasileira de interesse para a empresa Alupar (Madeira, Xingu, Tocantins, Serra da Mesa, São Francisco, Paranaíba, Paraná, Rio Grande, Rio Tietê, Itaipu, Paranapanema, Iguaçu, Jacuí e Uruguai). As previsões do modelo baseadas em IA foram fundamentadas no uso de séries temporais de índices climáticos globais e regionais que caracterizaram a variabilidade estimada, sendo que a escolha dos índices para cada bacia hidrográfica levou em conta a sua melhor relação à chuva média observada na bacia, garantindo que somente os índices climáticos que influenciam espacialmente cada bacia, e em determinada época do ano, fossem utilizados.

As previsões baseadas em IA foram construídas testando várias técnicas disponíveis na literatura, como Modelo de Regressão Linear, *Support Vector Machine*, *Random Forest* e as redes *Long Short-Term Memory* (LSTM). O modelo construído com as redes neurais LSTM se mostrou superior aos demais em termos de desempenho na previsão, sendo escolhido como técnica a ser aplicada operacionalmente. A Tabela 1 abaixo ilustra os índices climáticos finais selecionados para as bacias de interesse neste estudo. Os índices climáticos foram resumidos a pêntadas e o modelo considera como entrada as 20 pêntadas anteriores para construir a série de 12 pêntadas futuras (60 dias). O modelo Coral LSTM 60 dias foi o modelo operacional final do P&D.

Tabela 1: Seleção final de índices por bacia.

Modelo Coral LSTM 60 dias	
Bacia	Índices
Paranaíba	LISAM, MEI
Grande	LISAM, PSA1, PSA2
Paranapanema	LISAM, MEI, PDO
Iguaçu	LISAM, ZCAS, MEI, NINO34, AAO, PSA1, PSA2, SAODI
Uruguai	LISAM, MEI, SOI

Os índices LISAM (*Large-scale index for South America Monsoon*) e ZCAS são importantes para identificar períodos de precipitação no Brasil, principalmente nas regiões Sudeste, Centro-Oeste e costa sul do Brasil durante a estação chuvosa (Carvalho et al., 2004; Garreaud et al. (2009)). O desenvolvimento dos índices foi baseado na metodologia de Silva e Carvalho (2007), utilizando o primeiro e segundo modo da EOF (*Empirical Orthogonal Functions*) combinados. O LISAM representa em um único índice os mecanismos dinâmicos mais importantes do SMAS, com o primeiro modo da EOF combinada representa a maior componente de variabilidade da série temporal e está associado com o SMAS (24% da variância explicada. O segundo modo da EOF combinada explica 10% da variância total dos dados e é estatisticamente independente do primeiro modo da EOF combinada. A segunda EOF representa a ZCAS na porção oceânica, isto é, sua extensão desde o sudeste do Brasil em direção ao Oceano Atlântico subtropical e uma pequena parte continental. Em síntese, estes índices descrevem variações intrasazonais a interanuais do SMAS.

A oscilação Pacífico – América do Sul (PSA) é um padrão de multi-escala temporal de variabilidade de baixa frequência, caracterizado por trens de onda emanados da costa leste da Austrália em direção ao Pacífico Sul e sobre a América do Sul. Segundo Mo e Higgins (1998), o modo PSA apresenta dois padrões: PSA1 e PSA2 e apresentam períodos entre 16 a 40 dias. O PSA1 está associado com a intensificação da convecção no Pacífico Central entre 140°E e 170°W e a supressão de convecção sobre o oceano Índico, padrão que se assemelha com o do fenômeno ENOS. O PSA2 está associado com a

intensificação da convecção no Pacífico Central, estendendo-se de 160°E a 150°W, próximo ao sul do Equador, e com a supressão no Pacífico Oeste. Como resposta na precipitação da América do Sul, são observadas anomalias de precipitação negativa (positiva) em torno da região Sul do Brasil, quando o aquecimento da TSM ocorre a oeste (leste) equatorial do Oceano Pacífico.

A Oscilação Decadal do Pacífico (PDO) representa uma variabilidade interdecadal (20 a 30 anos) na configuração das temperaturas de superfície do mar (TSM) no Oceano Pacífico e apresenta duas fases distintas: a fase positiva ou quente, caracterizada por anomalias positivas na costa oeste dos Estados Unidos e Pacífico Central, negativas no restante do Pacífico Norte, desde aproximadamente 20°N na direção do polo, e a fase negativa ou fria, quando o aquecimento/resfriamento nas duas áreas se inverte. O índice PDO é obtido a partir da primeira componente principal das anomalias da TSM no Pacífico Norte, entre as latitudes 20°N e 90°N (Mantua et al. (1997)).

O El Niño Oscilação Sul (ENOS) relaciona-se a um fenômeno de grande escala com interação atmosfera-oceano, associado a alterações dos padrões normais da temperatura da superfície do mar e dos ventos alísios na região do Pacífico equatorial, entre a Costa Peruana, e no Pacífico Oeste, próximo à Austrália. A variação interanual (3-7 anos) do sistema ocorre em torno das condições normais nas componentes oceânicas (El Niño) e atmosféricas (Oscilação Sul) desta região, apresentando duas fases opostas do fenômeno, El Niño e La Niña (Trenberth e Hurrell (1994)). A intensidade do ENOS é avaliada através de alguns índices climáticos, dentre eles os índices MEI (Índice Multivariado ENOS, MEI; Wolter e Timlin (1998)), NINO34 (Niño 3.4 - área 5°N-5°S, 170°W-120°W) e SOI (Índice Oscilação Sul, Ropelewski e Jones (1987)).

A Oscilação Antártida (AAO) é definida como a oscilação entre cinturões de pressão de latitudes médias e altas no Hemisfério Sul, apresentando duas fases distintas. Quando a AAO está em sua fase positiva, há uma maior diferença de pressão entre latitudes médias e altas do Hemisfério Sul, prevalecendo uma baixa pressão em latitudes altas e alta pressão nas latitudes médias. Na fase negativa, essa condição se altera e uma alta pressão prevalece em latitudes altas e baixa pressão nas latitudes médias. O índice da AAO é obtido a partir da

primeira componente principal das anomalias de altura geopotencial, entre as latitudes 20°S e 90°S.

O índice SAODI (*South Atlantic Ocean Dipole Index*) corresponde há anomalias da temperatura da superfície do mar no oceano Atlântico nas latitudes do sul do Brasil e Uruguai e positivas na parte mais tropical (Nnamchi e Li (2011)).

2. Metodologia

2.1 Dados de precipitação

O uso de satélites meteorológicos tem aumentado a resolução espaço-temporal do monitoramento da Terra e diminuiu o problema da falta de medições em regiões remotas do planeta, como desertos e oceanos, além de diminuir a diferença na qualidade da previsão numérica entre os hemisférios Norte e Sul (Vitart (2014)). Desse modo, muitas técnicas para estimativa de chuva a partir dos dados de satélite, que combinam as medidas dos sensores de infravermelho e micro-ondas (Kidd e Levizzani (2011)), foram desenvolvidas e têm sido usadas. As medidas de chuva em superfície (pluviômetros) e as estimativas nas áreas remotas (radares) são usadas para validar essas técnicas.

O estudo da precipitação nas bacias hidrográficas escolhidas para análise foi feito a partir dos produtos CHIRPS (Funk et al. (2015)), TRMM 3B42 e GPM, que foram utilizados durante a elaboração do banco de dados operacionais do projeto. O CHIRPS (*Climate Hazards Group InfraRed Precipitation with Station data*) a estimativa de precipitação deste produto é produzida por diversas instituições americanas (como *United States Geological Survey* (USGS); *U.S.A Agency for International Development* (USAID); *National Aeronautics and Space Administration* (NASA) e *National Oceanic and Atmospheric Administration* (NOAA)) e abrange de 50°S e 50°N de latitude, para todas as longitudes. Os dados estão disponíveis de 1981 até o presente, com resolução temporal diária e espacial de 0.05°. Trata-se de um produto combinado entre dados de satélite e pluviômetros de centros nacionais de meteorologia e diversas instituições privadas. O TRMM (*Tropical Rainfall Measuring Mission*) utiliza o algoritmo de estimativa de chuva denominado 3B42 (Huffman et al. (2007)). O satélite foi lançado pela NASA (*National Aeronautics and Space Administration*) e a *Japan Aerospace Exploration Agency* (JAXA) em 1997, e utiliza sensores de micro-ondas passivos e ativos para medir a chuva, integrando essa informação com a de outros satélites e dados observados em estações de superfície para construir um produto acurado em termos de volume. As taxas de precipitação são fornecidas de 3 em 3 horas, com resolução espacial de 0.25° grau de latitude e

longitude, cobrindo todo o globo, entre 50°S e 50°N de latitude. O GPM (*Global Precipitation Measurement*) é uma rede de satélites internacionais, embasados no TRMM, centrada na implantação de um satélite principal com um radar. Lançado em 2014 pela NASA e JAXA como sucessor do TRMM, o GPM compreende um consórcio de agências espaciais internacionais. A resolução espacial do produto no nível 3 (mais refinado) é 0.1°x0.1 de latitude e longitude, abrangendo de 60°S a 60°N de latitude, em todo o globo em longitude, e 30 minutos de resolução espacial, com latência de 4 horas. Os dados horários foram integrados para acumulados diários e foi feita uma média dos pontos de grade da estimativa por satélite que estavam dentro da delimitação de cada bacia hidrográfica, assim os conjuntos de dados passaram a ser diários e para cada bacia. No estudo, para o TRMM, foram utilizados os acumulados diários de chuva na região da bacia no período de 01/01/1998 a 31/12/2014 e para o GPM os acumulados diários de chuva na região da bacia no período de 01/01/2015 a 31/12/2020. O período utilizado dos dados do CHIRPS foi de 01/01/1981 a 31/12/2020. O tratamento das três séries de dados incluiu, para os anos bissextos, uma média da chuva entre os dias 28 e 29 de fevereiro, e o valor obtido foi associado ao dia 28. Desse modo, todos os anos estudados tinham 365 dias e os ciclos anuais de cada bacia hidrográfica foram obtidos para avaliação e eliminação da sazonalidade (Hartmann e Michelsen (1989)). O cálculo do coeficiente de correlação de Pearson (ρ) foi feito entre a série de dados do CHIRPS (mais longa) e as séries de dados do TRMM e GPM.

A série de dados diários e por bacia foi integrada para uma série mensal por bacia pois a chuva é uma variável melhor representada em maiores áreas e maiores períodos de acumulação, de forma a minimizar sua não-uniformidade (Filho et al. (2018)). A média histórica mensal de chuva por bacia foi calculada. Os dados de chuva histórica média mensal utilizados pelo ONS, e consequentemente pelo setor de energia, foram usados para identificar qual das séries de dados de chuva realizada seria escolhida para a análise da previsão do modelo Coral LSTM 60 dias, a partir do cálculo do coeficiente de correlação de Pearson entre os dados dos acumulados médios mensais do ONS (considerada como referência) e do CHIRPS, do TRMM, do GPM e da combinação TRMM_GPM. A série de dados do CHIRPS foi a que apresentou os

maiores valores de correlação com a série de referência e por isso foi escolhida para as demais análises no decorrer deste estudo; a operacionalização do modelo também optou pela mesma base no decorrer do projeto. Os valores utilizados pelo ONS são baseados nas estações da ANA, e para as bacias do Paranaíba, Grande, Paranapanema e Uruguai compreendem o período entre 1961 e 1990 e para a bacia do Iguaçu de 1977 a 2000. Estes valores são disponibilizados no portal SINTEGRE (<https://sintegre.ons.org.br/>), pelo relatório OPHEN.

2.2 Sazonalidade da precipitação nas bacias

A partir dos dados diários para a região de cada bacia analisada foram obtidos dados em pântadas (média dos volumes acumulados em cinco dias, com o valor obtido atribuído a data central compreendida nos 5 dias). A opção de utilizar os dados de precipitação em pântadas foi baseada na rotina operacional da equipe de comercialização de energia na Alupar, que analisa os dados do setor elétrico nesta base, assim como as demais empresas ligadas a este ramo; ressalta-se que a saída da previsão de 60 dias do modelo Coral LSTM também é feita em pântadas (12 no total, ou 60 dias).

Os ciclos anuais, com os dados em pântadas, foram obtidos com a série de precipitação realizada (CHIRPS), e reproduzidos com 12 harmônicos, servindo de base da avaliação da sazonalidade nas séries de dados. A análise dos ciclos anuais permitiu caracterizar o período chuvoso e seco (Rao e Hada (1990)), das bacias, em especial as do subsistema Sudeste/Centro-Oeste. As bacias do Sul não apresentaram uma sazonalidade tão evidente. A divisão dos períodos de estudo foi, então, orientada pela sazonalidade presente nas bacias do sudeste e se configurou da seguinte forma: dezembro, janeiro e fevereiro (DJF); março, abril e maio (MAM); junho, julho e agosto (JJA) e setembro, outubro e novembro (SON). A divisão dos períodos na série temporal do CHIRPS apresentou 3.510 dias englobados em DJF, 3.588 dias nos períodos de MAM e de JJA e 3.550 dias em SON, totalizando um total de 14.236 dias (39 anos).

2.3 Avaliação da previsão do Modelo Coral LSTM 60 dias

A avaliação do desempenho das previsões do modelo foi feita conforme Doswell (1990), a partir dos diferentes índices de acerto construídos a partir Método de Análise de Contingência (MAC) (Murphy e Winkler (1987)), cujo objetivo é descrever da melhor forma possível as propriedades da distribuição de probabilidades das previsões de chuva, partindo da comparação entre as saídas de previsão do modelo e dados de referência (observados). A Figura 7 ilustra a construção desta tabela de contingência, que é feita a partir da definição de um evento de interesse (exemplo: chuva na bacia excedendo o percentil de 99% (p99)) e então o estudo da ocorrência deste evento nos dados realizados pode ser feito, e comparado com a previsão ou não deste evento nas saídas do modelo. Idealmente, um modelo deveria ter os parâmetros b e c nulos, pois eles significam que o modelo previu um evento que não se realizou ou então que o modelo não foi capaz de prever um evento que foi realizado, respectivamente. Os parâmetros a e d representam a previsão/não previsão e a ocorrência/não ocorrência do evento, ou seja, previsões corretas do modelo.

		Evento aconteceu nos dados realizados de chuva (CHIRPS)?		
		SIM	NÃO	
Evento aconteceu na previsão do modelo Coral LSTM 60 dias?	SIM	a	b	a+b
	NÃO	c	d	c+d
		a+c	b+d	a+b+c+d

Figura 7: Ilustração da tabela de contingência utilizada para a análise de um evento.

Os parâmetros determinados com o método acima podem então ser utilizados para compor os índices de destreza do modelo, ilustrados na Tabela 2 abaixo.

Tabela 2: Índices utilizados para análise da destreza do modelo.

Índice	Fórmula	Valor Ideal
POD	$POD = \frac{a}{(a + c)}$	POD = 1
F	$F = \frac{b}{(b + d)}$	F = 0
FAR	$FAR = \frac{b}{(a + b)}$	FAR = 0
SKILL	$SKILL = \frac{2(ad - bc)}{(a + c)(c + d) + (a + b)(b + d)}$	SKILL = 1
ICS	$ICS = \frac{(a + d)}{(a + b + c + d)}$	ICS = 1
BIAS	$BIAS = \frac{(a + c)}{(a + b)}$	BIAS = 1

A taxa de acerto, chamada também de probabilidade de detecção (POD), é a representação empírica da probabilidade condicional do sistema de previsão ter previsto a ocorrência do evento, dado que o evento de fato ocorreu. Um sistema de previsão perfeito possui $POD = 1$, ou seja, o evento nunca acontece sem que o sistema de previsão o tenha previsto. Quanto maior o valor de POD, menor é a chance de se observar um evento que não tenha sido previsto.

A taxa de alarme falso (F) representa a probabilidade condicional do sistema de previsão ter previsto chuva acima de um determinado limite pré-estabelecido, dado que a observação foi abaixo deste limite. A razão de alarme falso (FAR) também representa uma probabilidade condicional, porém ela expressa a probabilidade de não observar chuva acima de um determinado limite, dado que o sistema de previsão previu chuva acima deste limite.

O Heidke Skill Score (SKILL) é uma das estatísticas mais utilizadas para fornecer uma ideia da qualidade relativa de um sistema de previsão. O SKILL utiliza a proporção de acertos (PC) como métrica para calcular a qualidade relativa do sistema de previsão. O sistema de referência neste caso consiste em uma previsão que independe das observações e que conserva as probabilidades

marginais de previsão do sistema que está sendo analisado; expressa a qualidade relativa de um sistema de previsão.

O índice crítico de sucesso (ICS) representa o número de previsões corretas divididas pelo número total de ocasiões na qual aquele evento foi previsto e/ou observado, podendo ser interpretado como a proporção de acerto para a quantidade prevista, depois de remover acertos não previstos considerados, representando a razão entre o número de previsões de ocorrência de precipitação com o número de dias realmente chuvosos.

O *bias* (BIAS) é uma medida de tendência ou “vício” do sistema de previsão, e representa o número de eventos de precipitação dividido pelo número de previsões de precipitação. O índice para sistemas sem viés possui valor igual a 1. Em situações onde $BIAS > 1$, o sistema está superestimando o número de ocorrência de precipitação e quando $BIAS < 1$ o sistema está subestimando o número de previsões de precipitação.

O erro médio quadrático (RMSE) é uma forma de medida do desvio médio entre a observação de chuva e a previsão do modelo, e foi utilizado conforme a equação disposta abaixo.

$$RMSE = \sqrt{\frac{1}{n} \sum_{i=1}^n (\hat{y}_i - y_i)^2} \quad (I)$$

Onde \hat{y}_i representa a chuva observada no mês i e y_i representa a chuva prevista pelo modelo para o mês i , e n representa o número de previsões do modelo para o mês em análise.

As previsões operacionais disponíveis para análise do modelo Coral LSTM 60 dias compreenderam o período de 27/12/2019 até 31/12/2021, correspondendo ao horizonte de previsão mensal de janeiro de 2020 a fevereiro de 2022. Os dias nos quais a previsão do modelo Coral não foi disponibilizada por motivos técnicos/operacionais estão dispostos na Tabela 3 a seguir e totalizam 36 dias para as bacias do Paranaíba, Paranapanema e Uruguai; 16 dias para a bacia do Grande e 85 dias para a bacia do Iguaçu.

Tabela 3: Distribuição dos dias faltantes de previsão do modelo Coral por bacia analisada.

Data	Paranaíba	Grande	Parapanema	Iguaçu	Uruguai
25/02/2020	x	x	x	x	x
12/12/2020	x			x	x
13/12/2020	x			x	x
14/12/2020	x			x	x
15/12/2020	x			x	x
16/12/2020	x			x	x
17/12/2020	x			x	x
18/12/2020	x			x	x
19/12/2020	x			x	x
20/12/2020	x			x	x
21/12/2020	x			x	x
22/12/2020	x			x	x
23/12/2020	x			x	x
24/12/2020	x			x	x
25/12/2020	x			x	x
26/12/2020	x			x	x
27/12/2020	x			x	x
28/12/2020	x			x	x
29/12/2020	x			x	x
30/12/2020	x			x	x
31/12/2020	x			x	x
09/02/2021	x	x	x	x	x
10/02/2021	x	x	x	x	x
11/02/2021	x	x	x	x	x
12/02/2021				x	
13/02/2021				x	
14/02/2021				x	
15/02/2021				x	
16/02/2021				x	
17/02/2021				x	
18/02/2021				x	
19/02/2021				x	
20/02/2021				x	
21/02/2021				x	
22/02/2021				x	
23/02/2021				x	
24/02/2021				x	
25/02/2021				x	
26/02/2021				x	
27/02/2021				x	
28/02/2021				x	
01/03/2021				x	
02/03/2021				x	
03/03/2021				x	
04/03/2021				x	
05/03/2021				x	
06/03/2021				x	
07/03/2021				x	
08/03/2021				x	
09/03/2021				x	
10/03/2021				x	
11/03/2021				x	

12/03/2021				x	
13/03/2021				x	
14/03/2021				x	
15/03/2021				x	
16/03/2021				x	
17/03/2021				x	
18/03/2021	x	x	x	x	x
19/03/2021	x	x	x	x	x
20/03/2021	x	x	x	x	x
21/03/2021				x	
22/03/2021				x	
23/03/2021				x	
24/03/2021				x	
25/03/2021				x	
26/03/2021				x	
27/03/2021				x	
28/03/2021				x	
29/03/2021				x	
24/09/2021				x	
25/09/2021				x	
26/09/2021				x	
27/09/2021				x	
28/09/2021				x	
29/09/2021				x	
19/10/2021	x	x	x	x	x
20/10/2021	x	x	x	x	x
21/10/2021	x	x	x	x	x
22/10/2021	x	x	x	x	x
23/10/2021	x	x	x	x	x
24/10/2021	x	x	x	x	x
25/10/2021	x	x	x	x	x
26/10/2021	x	x	x	x	x
27/10/2021	x	x	x	x	x
17/11/2021			x		
18/11/2021			x		
19/11/2021			x		
20/11/2021			x		
21/11/2021			x		
22/11/2021			x		
23/11/2021			x		
24/11/2021			x		
25/11/2021			x		
26/11/2021			x		
27/11/2021			x		
28/11/2021			x		
29/11/2021			x		
30/11/2021			x		
01/12/2021			x		
02/12/2021			x		
03/12/2021			x		
04/12/2021			x		
05/12/2021			x		
06/12/2021			x		
Total de días faltantes	36	16	36	85	36

2.4 Eventos de precipitação

O objetivo inicial deste estudo era estudar a previsão do modelo Coral para eventos extremos secos e chuvosos nas bacias selecionadas. A partir da definição do evento de interesse, a tabela de contingência (Figura 7) seria construída para que as métricas sobre a previsão do modelo Coral LSTM pudessem ser analisadas. Estes percentis foram calculados, em princípio, com a série dos dados em pântadas (os dados acumulados em pântadas foram utilizados inicialmente pois a concepção do projeto se baseou na rotina operacional da empresa idealizadora do projeto, que solicitou a construção das análises com base nos períodos de cinco dias, comumente utilizado no setor de energia), mas não foi possível identificar a previsão destes eventos extremos pelo modelo Coral, pois a definição utilizada para extremos chuvosos/secos resultou apenas em valores nulos do coeficiente a (quando há previsão e há observação do evento) e na maioria dos casos o coeficiente b (quando há previsão, mas não há observação do evento) também foi nulo, ou seja, as definições utilizadas não possibilitaram que existissem previsões do modelo que se encaixassem nas definições estabelecidas, tornando a análise sem sentido. Dessa forma, a substituição da análise por pântadas para uma análise mensal foi feita, como tentativa de balizar o problema. Seguindo com a abordagem mensal, foram selecionadas todas as previsões do modelo Coral que conseguiam prever a totalidade de um mês futuro. Considerando que o começo das previsões foi em 27/12/2019 e a última previsão utilizada foi em 31/12/2021, e considerando-se ainda que no horizonte de previsão de 60 dias, a previsão pode enxergar a totalidade do próprio mês (m), do mês seguinte ($m+1$) ou do segundo mês de previsão ($m+2$). Exemplos:

- (I) Previsão do dia 01/01/2020: o horizonte de previsão vai do dia 01/01/2020 a 29/02/2020; neste caso, considera-se que o Coral estava prevendo a totalidade do próprio mês (m ou janeiro/20) e do mês seguinte ($m+1$ ou fevereiro/20).
- (II) Previsão do dia 02/01/2020: o horizonte de previsão vai do dia 02/01/2020 a 01/03/2020; neste caso, considera-se que o Coral

estava prevendo a totalidade apenas do mês seguinte (m+1 ou fevereiro/20).

- (III) Previsão do dia 31/01/2021: o horizonte de previsão vai do dia 31/01/2021 a 30/03/2021; neste caso, considera-se que o Coral estava prevendo a totalidade do mês seguinte (m+1 ou fevereiro/21), assim como o exemplo (II).
- (IV) Previsão do dia 02/07/2021: o horizonte de previsão vai do dia 02/07/2021 a 30/08/2021; neste caso, considera-se que o Coral não estava prevendo a totalidade de nenhum mês no seu horizonte de 12 semanas.

2.4.1 Eventos extremos chuvosos/secos

Os percentis de 99% (p99), 95% (p95) e 90% (p90) foram calculados e um evento extremo de chuva foi considerado como aquele cujo volume acumulado igualasse ou excedesse, inicialmente, o valor obtido do p99 (Carvalho et al., 2002; Penalba; Robledo (2010); Silva Dias et al., 2013; Doss-Gollin et al. (2018)). Os percentis de 10% (p10), 5% (p05) e 1% (p01) foram calculados e um evento extremo seco foi considerado como aquele cujo volume acumulado fosse menor ou igual ao valor obtido do p01. O cálculo inicial foi a partir dos dados em pântadas, considerando-se qual seria o p99 e p01 de uma pântada nos períodos definidos anteriormente (DJF, MAM, JJA e SON), já que um único valor anual para o p99 e p01 não levaria em conta a sazonalidade expressiva da precipitação em algumas das bacias analisadas. O cálculo dos percentis p95, p90, p05 e p10 foi feito para analisar se os parâmetros a e b seriam não-nulos, mas para todas as bacias, isso não foi observado. Resumindo, a análise dos eventos extremos secos/chuvosos com base nas pântadas resultou na montagem da tabela de contingência com coeficientes nulos de a e b , indicando que no período de previsões utilizado, o modelo Coral não previu extremos, e a análise deles seria sem sentido, então o estudo da previsão passou a ser na base mensal, como apontado anteriormente.

2.4.2 Eventos dentro da média

A análise mensal não foi suficiente para resolver os valores nulos/muito pequenos de a e b nas bacias e assim, o evento de precipitação escolhido para estudo foi alterado. O novo evento de interesse seria a chuva dentro da média histórica (CHIRPS), definida aqui como: $p33 \leq \text{chuva} \leq p66$ (onde $p33$ é o percentil de 30% e $p66$ o de 66%, novamente o cálculo destes percentis foi feito considerando-se a base mensal e a divisão sazonal para cada bacia).

2.4.3 Eventos acima/abaixo da média

O evento chuva acima da média foi considerado como aquele onde o realizado mensal ou a previsão do modelo Coral LSTM 60 dias para o mês em questão excedesse o $p66$ ($\text{chuva} > p66$). O evento chuva abaixo da média foi considerado como aquele onde o realizado mensal ou a previsão do modelo Coral para o mês fosse menor que o $p33$ ($\text{chuva} < p33$).

3. Resultados

3.1 Dados chuva realizada

As Figuras 8 e 9 mostram os diagramas de dispersão e valores encontrados de correlação para as diferentes séries de dados diários utilizadas em cada bacia. As correlações encontradas foram todas positivas e próximas de 1, e estão sintetizadas na Tabela 4.

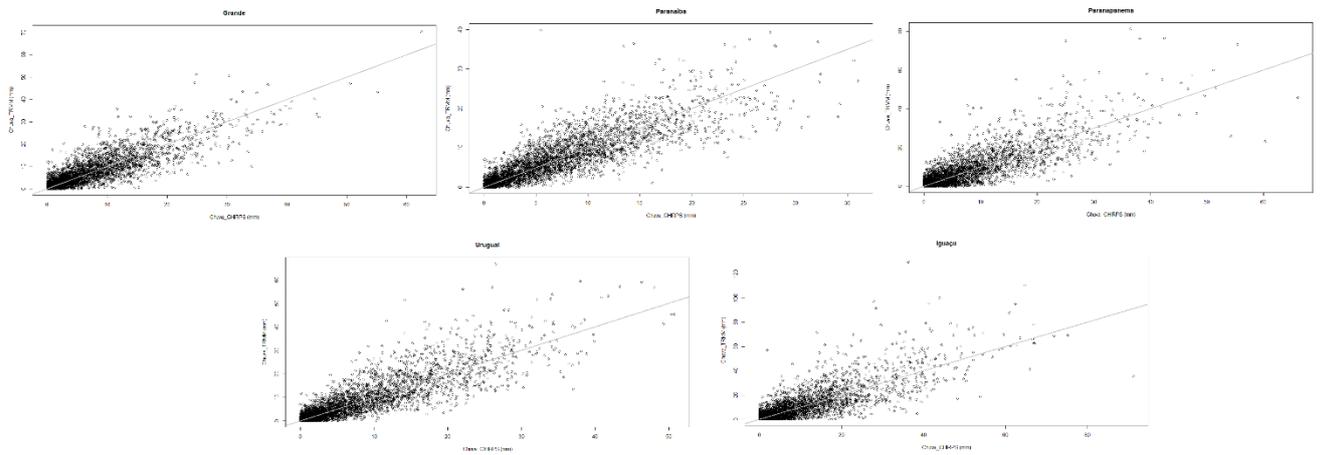


Figura 8: Diagrama de dispersão entre os dados diários do CHIRPS e do TRMM, para o período de 1998 a 2014.

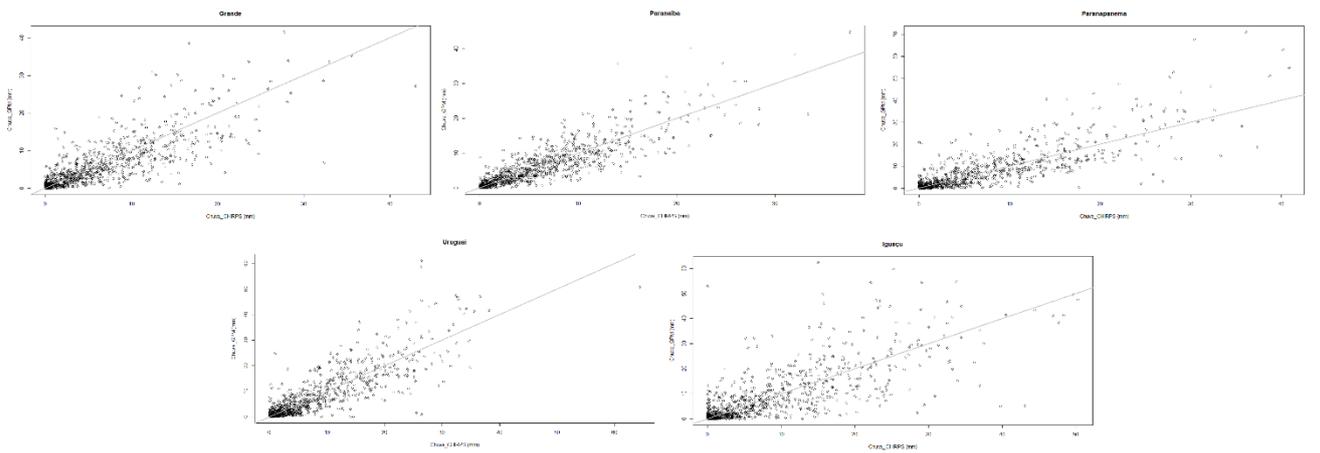


Figura 9: Diagrama de dispersão entre os dados diários do CHIRPS e do GPM, para o período de 2015 a 2020.

Tabela 4: Valor do coeficiente de correlação de Pearson (ρ) entre os conjuntos de dados.

Coeficiente de Correlação (ρ)		
Bacia	CHIRPS x TRMM	CHIRPS x GPM
Paranaíba	0.90	0.90
Grande	0.89	0.85
Paranapanema	0.86	0.86
Iguaçu	0.85	0.80
Uruguai	0.89	0.88

A análise dos valores encontrados para as autocorrelações das distintas séries utilizadas com *lags* variando de 1 a 10 dias também foi feita e os baixos valores encontrados corroboram com o caráter da variável chuva, indicando que há pouca memória da variável na série temporal. Os valores diminuíram com o aumento da defasagem.

A Figura 10 mostra os acumulados mensais das três séries de dados (CHIRPS, GPM e TRMM) e a Tabela 5 dispõe as estatísticas básicas dos conjuntos de dados utilizados. O deslocamento entre média e mediana, observado em todas as bacias e em todos os conjuntos de dados, reflete a distribuição assimétrica da variável chuva.

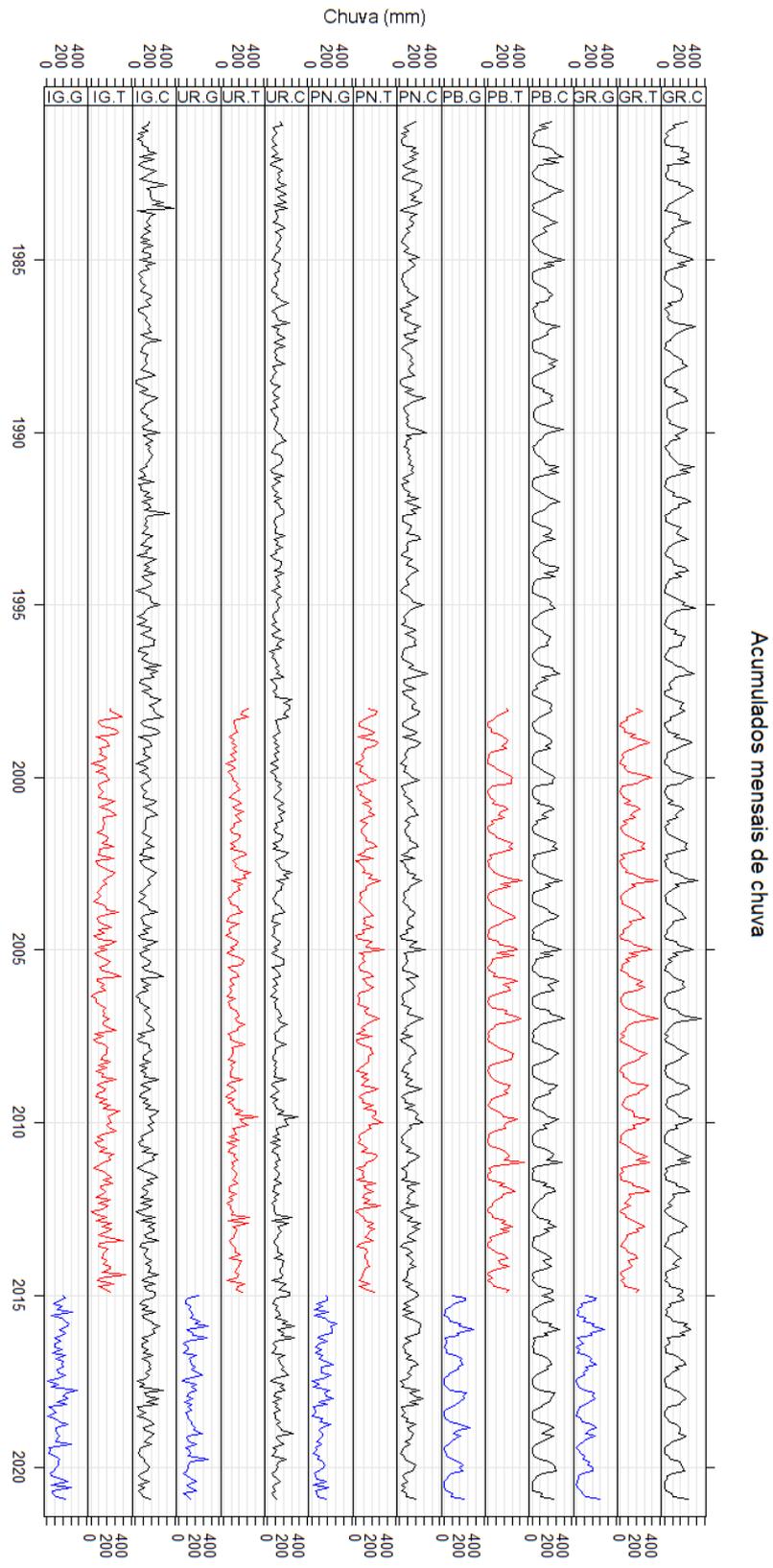


Figura 10: Dados mensais acumulados para o período analisado. As bacias estão representadas da seguinte maneira: bacia do Grande (GR), bacia do Paranaíba (PB), bacia do Paranapanema (PN), bacia do Uruguai (UR) e bacia do Iguaçu (IG); dados do CHIRPS (.C), dados do GPM (.G) e dados do TRMM (.T).

Tabela 5: Estatísticas básicas dos conjuntos de dados por estimativa de satélite.

Dados	Parâmetro	CHIRPS	GPM	TRMM	TRMM_GPM
Paranaíba	Mínimo	2	0	0	0
	Mediana	101	91	96	95
	Média	123	113	127	123
	Máximo	408	378	448	448
Grande	Mínimo	3	1	0	0
	Mediana	98	93	101	98
	Média	121	110	127	122
	Máximo	466	360	474	474
Paranapanema	Mínimo	6	3	2	2
	Mediana	108	124	115	118
	Média	118	127	129	128
	Máximo	354	313	351	351
Iguaçu	Mínimo	14	3	8	3
	Mediana	144	139	153	153
	Média	149	151	166	163
	Máximo	484	383	436	436
Uruguai	Mínimo	33	36	30	30
	Mediana	120	136	139	138
	Média	130	149	145	146
	Máximo	382	363	434	434

As Figuras de 11 a 15 mostram os acumulados médios mensais nos períodos analisados, bem como os valores climatológicos de referência, utilizados pelo ONS. A Tabela 6 dispõe os valores encontrados de correlação entre as médias mensais das séries de dados de precipitação por estimativa de satélite e os dados de referência utilizados pelo ONS. Nota-se que para todas as bacias analisadas, a série do CHIRPS foi a que apresentou os maiores valores do coeficiente de correlação (todos próximos de 1.00), enquanto a série do GPM foi a que apresentou os menores valores. A partir deste resultado, a série de dados do CHIRPS foi escolhida como referência para as análises das previsões do modelo Coral para todas as bacias estudadas neste trabalho.

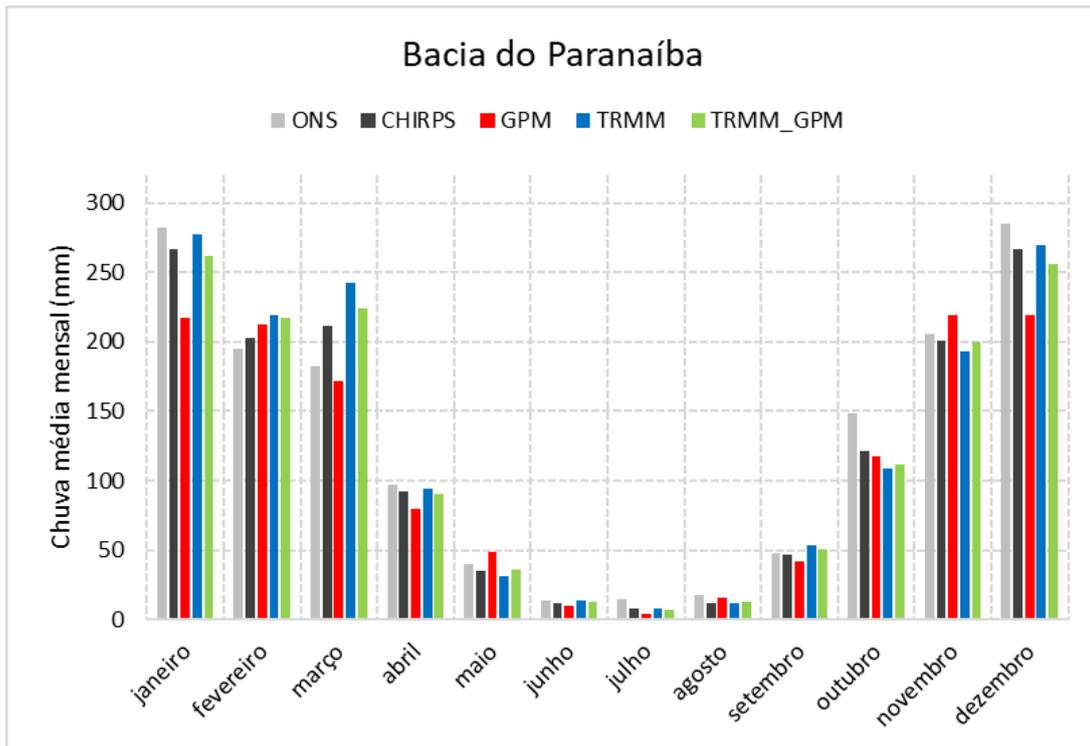


Figura 11: Acumulados mensais médios de chuva na Bacia do Paranaíba por série de dados considerada.

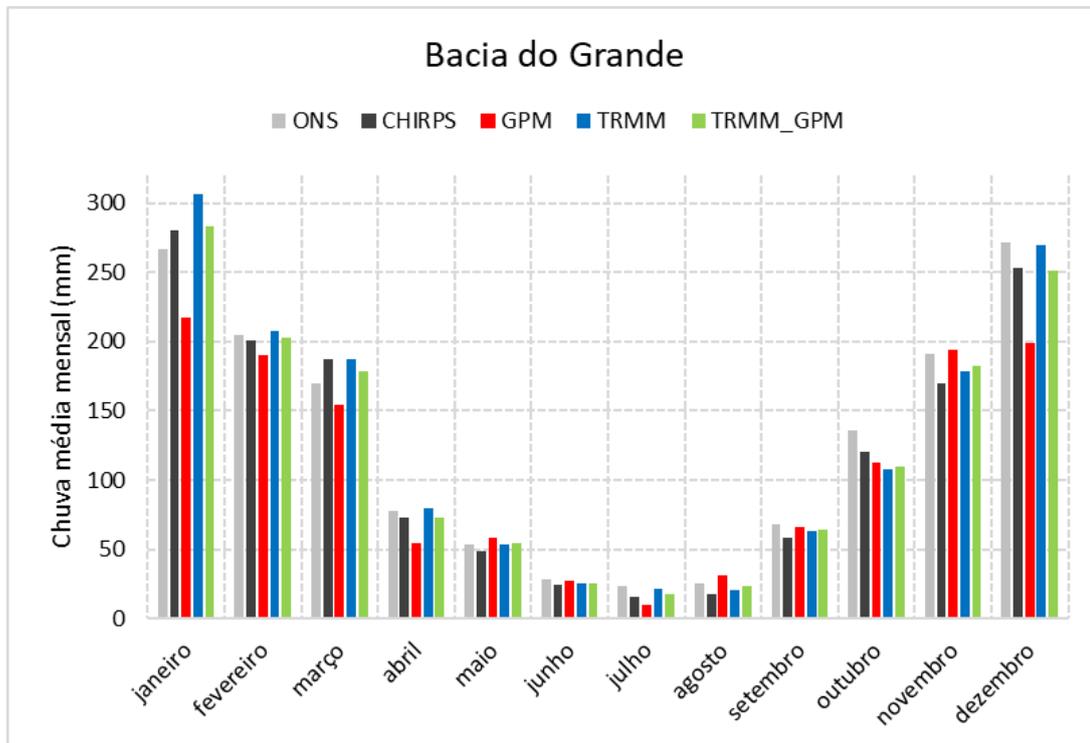


Figura 12: Mesmo que a Figura 11, mas para a bacia do Grande.

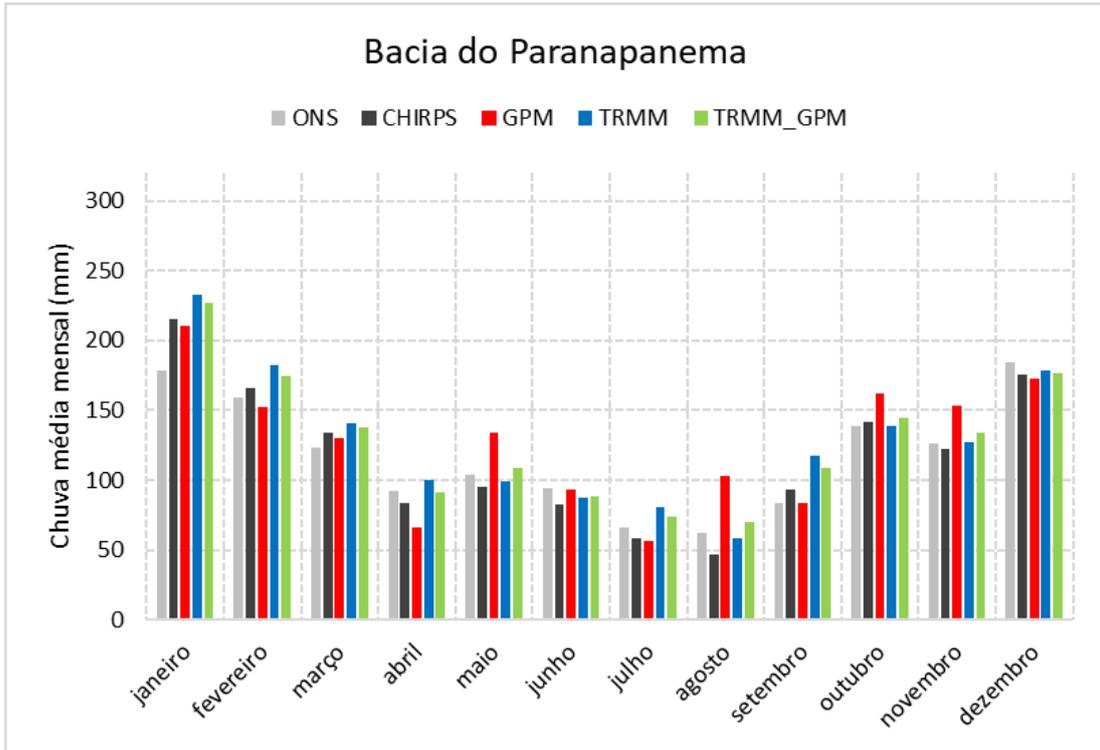


Figura 13: Mesmo que a Figura 11, mas para a bacia do Paranapanema.

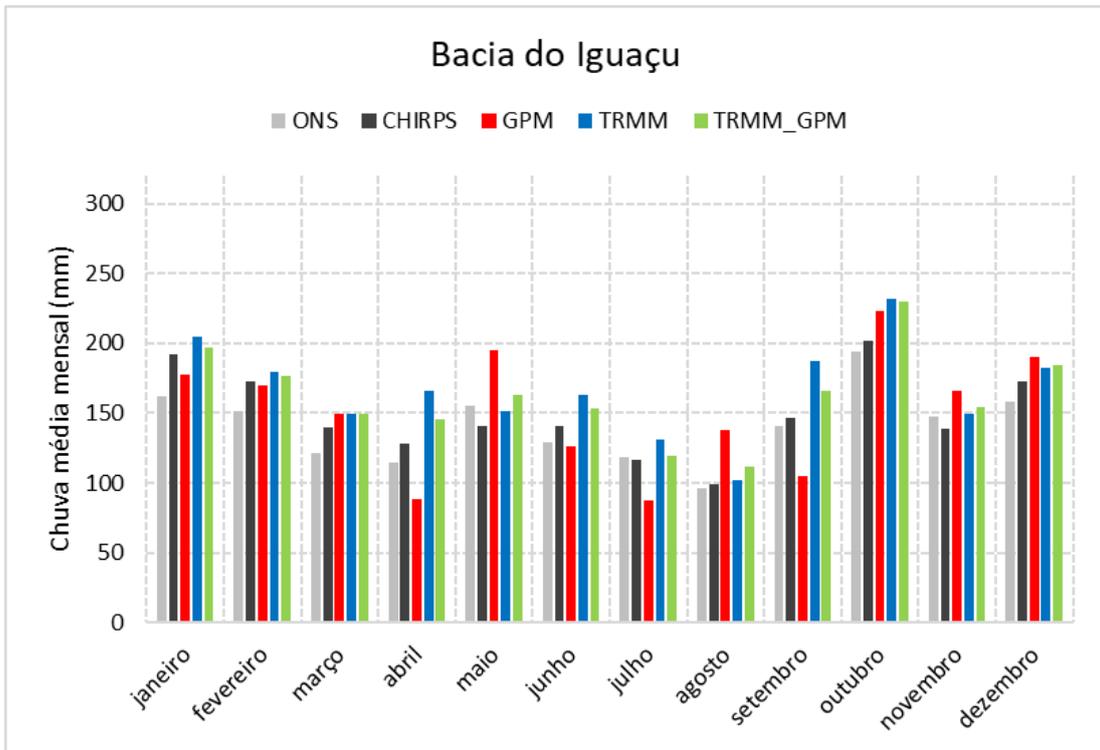


Figura 14: Mesmo que a Figura 11, mas para a bacia do Iguaçu.

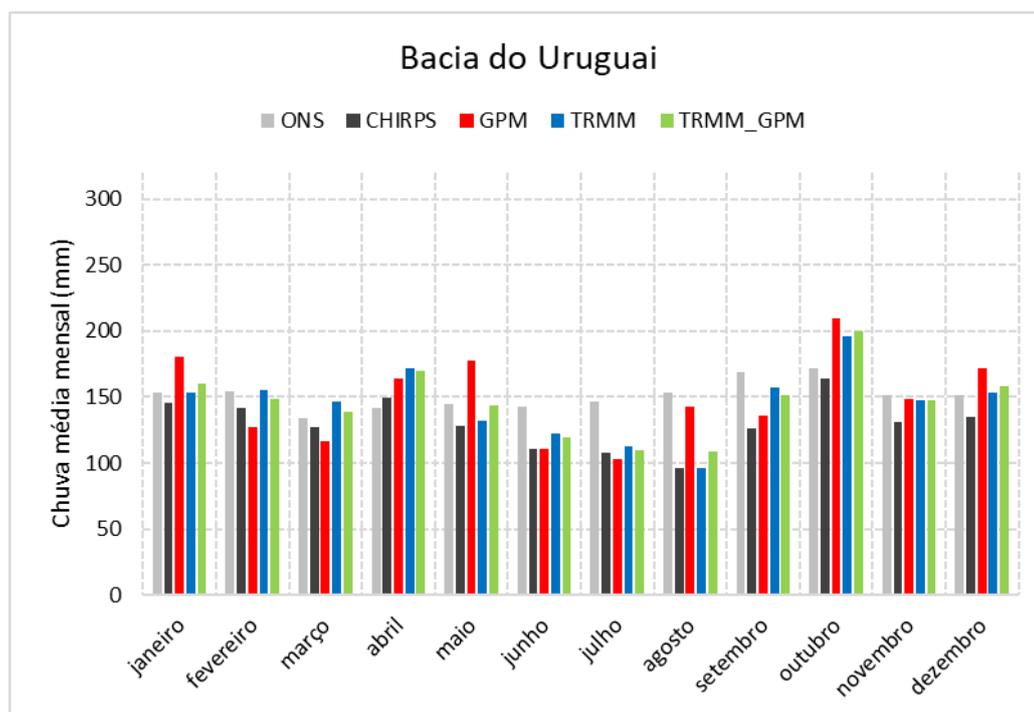


Figura 15: Mesmo que a Figura 11, mas para a bacia do Uruguai.

Tabela 6: Valores dos coeficientes de correlação de Pearson, entre a série média mensal de chuva do ONS e de cada conjunto de dados de chuva por estimativa de satélite (CHIRPS, TRMM, GPM e TRMM_GPM).

Coeficiente de Correlação (ρ)				
Bacia	CHIRPS	GPM	TRMM	TRMM_GPM
Paranaíba	0.9907	0.9681	0.9741	0.9786
Grande	0.9929	0.9776	0.9889	0.9926
Paranapanema	0.9720	0.8923	0.9334	0.9534
Iguaçu	0.9076	0.7890	0.8514	0.9417
Uruguai	0.9734	0.8603	0.9143	0.9803

3.2 Sazonalidade do regime de precipitação

As Figuras de 16 a 20 apresentam os ciclos anuais obtidos com os dados em pântadas (linha contínua) do CHIRPS e o ajuste dos mesmos com um truncamento com 12 harmônicos (linha tracejada) na série de Fourier (Wang; Ho (2002)). As bacias do Grande e Paranaíba apresentaram um período chuvoso de dezembro a fevereiro e um período seco de maio a meados de setembro. A bacia do Paranapanema, já em uma região de transição de sistemas

meteorológicos dominantes que influenciam o Sul e centro-oeste do país, apresentou sazonalidade mais suave que as bacias do Grande e Paranaíba, e mais marcante que as bacias do Iguaçu e Uruguai.

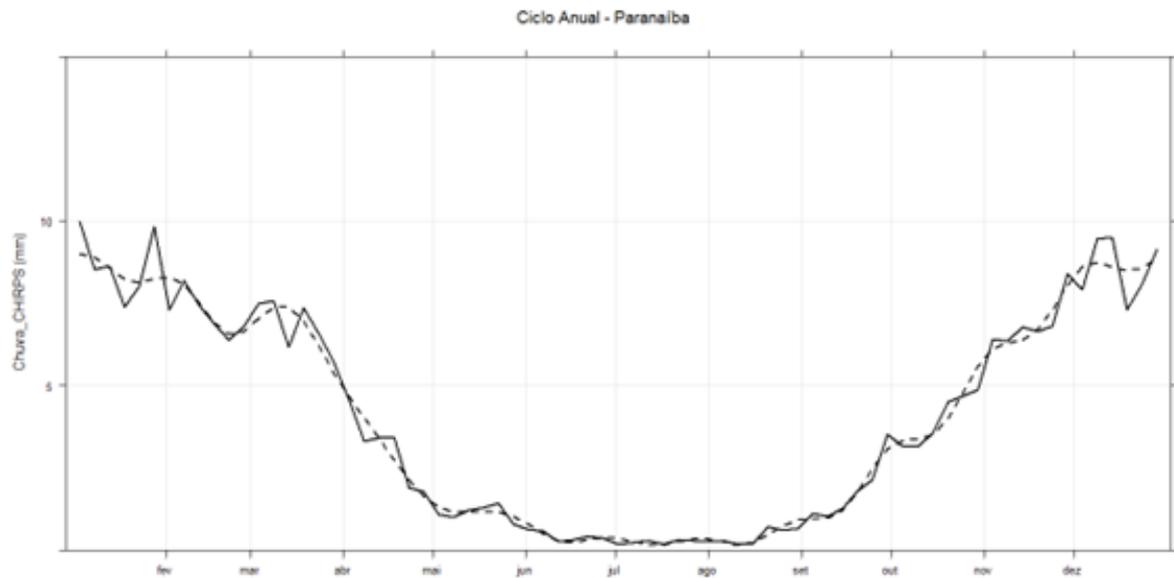


Figura 16: Ciclo anual da bacia do rio Paranaíba.

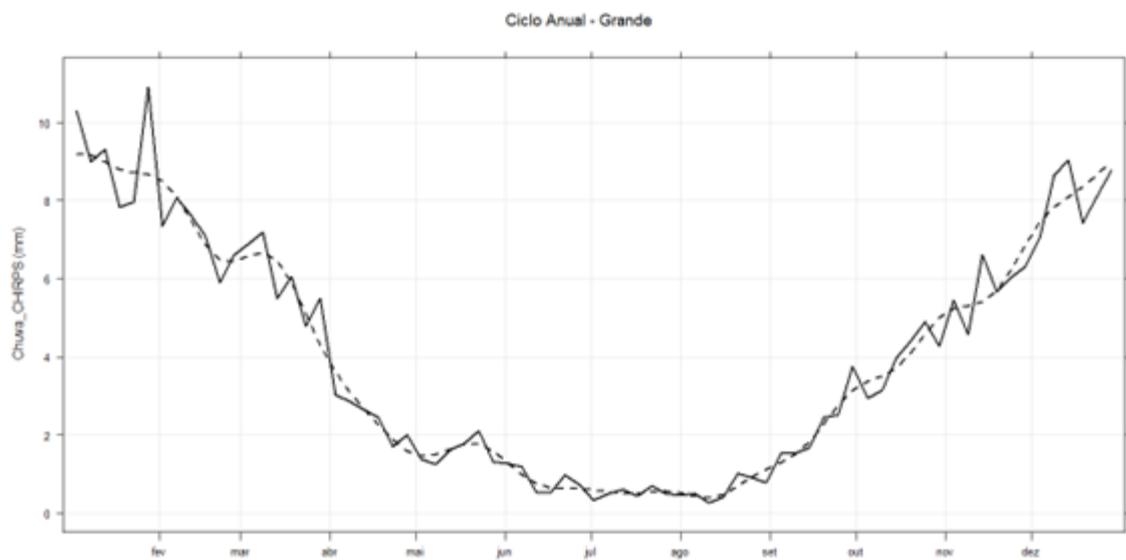


Figura 17: Ciclo anual da bacia do rio Grande.

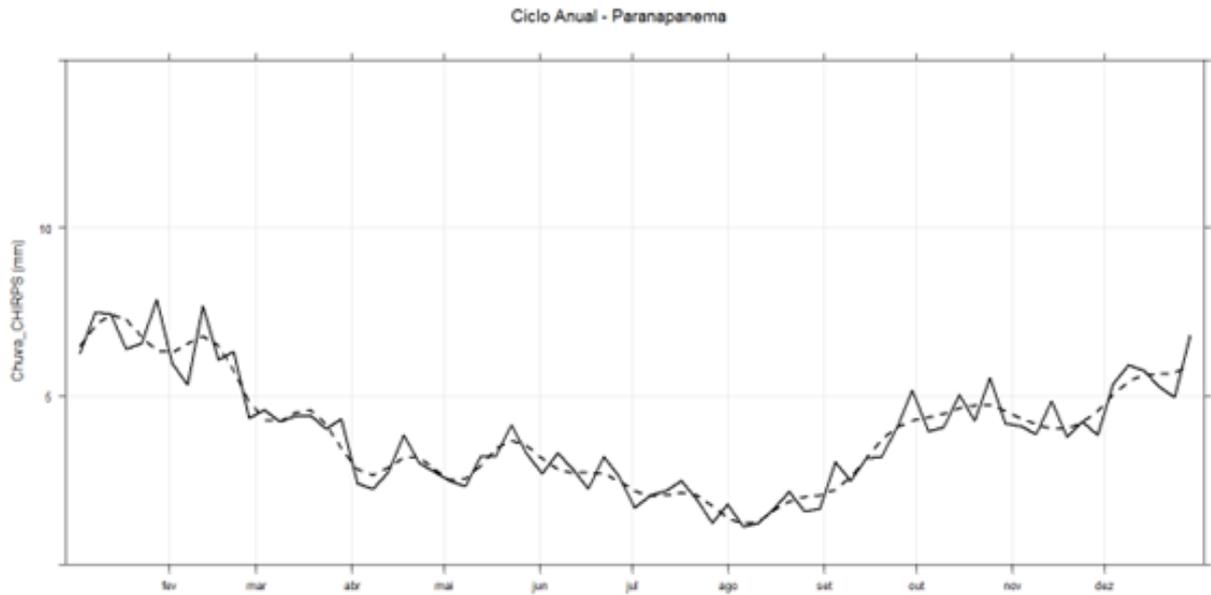


Figura 18: Ciclo anual da bacia do rio Paranapanema.

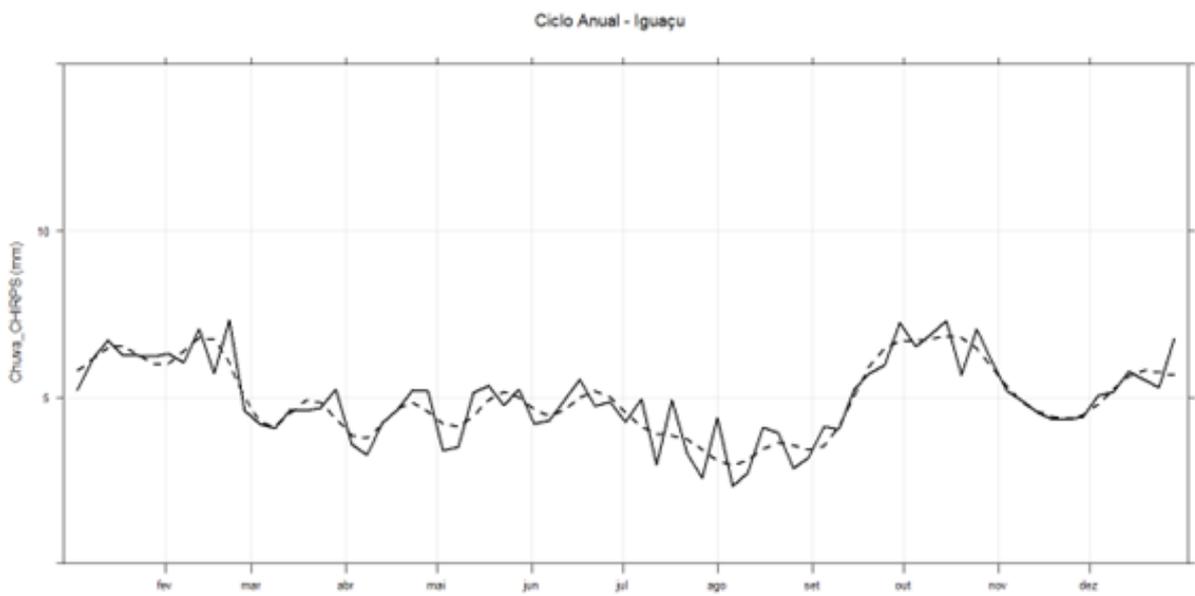


Figura 19: Ciclo anual da bacia do rio Iguçu.

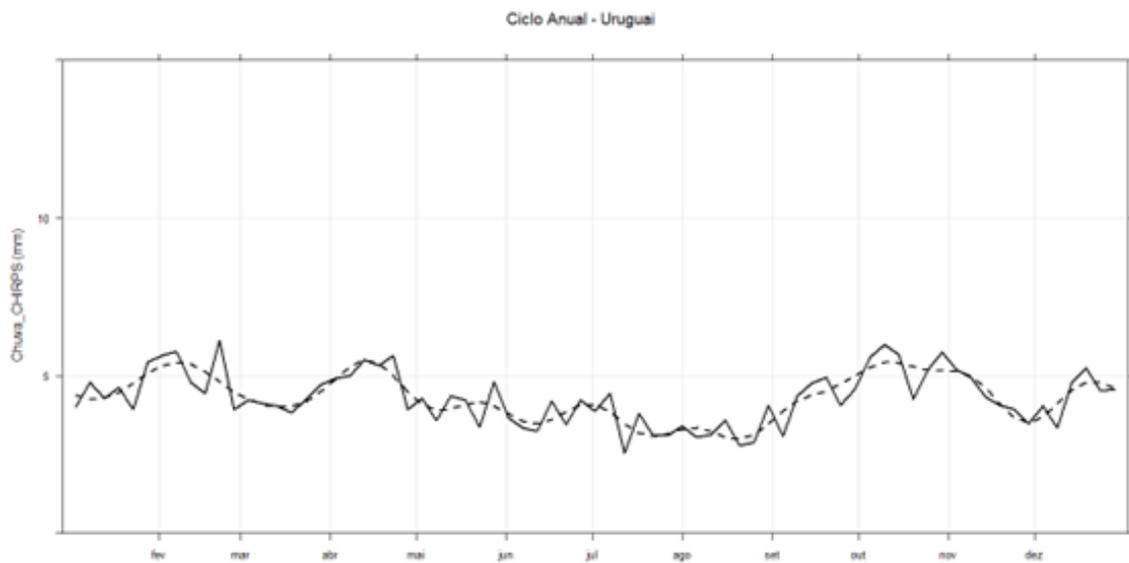


Figura 20: Ciclo anual da bacia do rio Uruguai.

3.3 Eventos extremos de precipitação

As Figuras de 21 a 25, dispostas abaixo, mostram os dados mensais de chuva realizada para as bacias analisadas, bem como os percentis sazonais encontrados. Com base nos percentis sazonais, nota-se que nas bacias do Paranaíba não há eventos extremos chuvosos nos anos de 2020 até fevereiro de 2022 (horizonte de previsões do modelo Coral), considerando-se a realização de um evento chuvoso como um acumulado acima ou igual ao p99, p95 ou p90. Nas bacias do Grande e Paranapanema, outubro de 2021 foi o único evento extremo realizado, considerando o p95. Na bacia do Iguaçu, janeiro de 2021 foi o único extremo chuvoso encontrado considerando-se o p99 e na bacia do Uruguai, junho de 2020 foi um extremo chuvoso de acordo com o liminar do p90. Os meses de setembro e novembro de 2020 e julho de 2021 foram meses com extremos secos na bacia do Paranaíba, com base no liminar estabelecido pelo p01. A bacia do Grande não apresentou nenhum extremo seco (considerando-se o p01). A bacia do Paranapanema teve extremos secos nos meses de setembro de 2020 e abril de 2021, seguindo o p01. As bacias do Iguaçu e Uruguai apresentaram um evento extremo seco em julho e abril de 2021, respectivamente. Apesar da identificação de alguns extremos nos dados de chuva realizada, na previsão do modelo Coral não foram identificados extremos de precipitação, sobretudo os chuvosos.

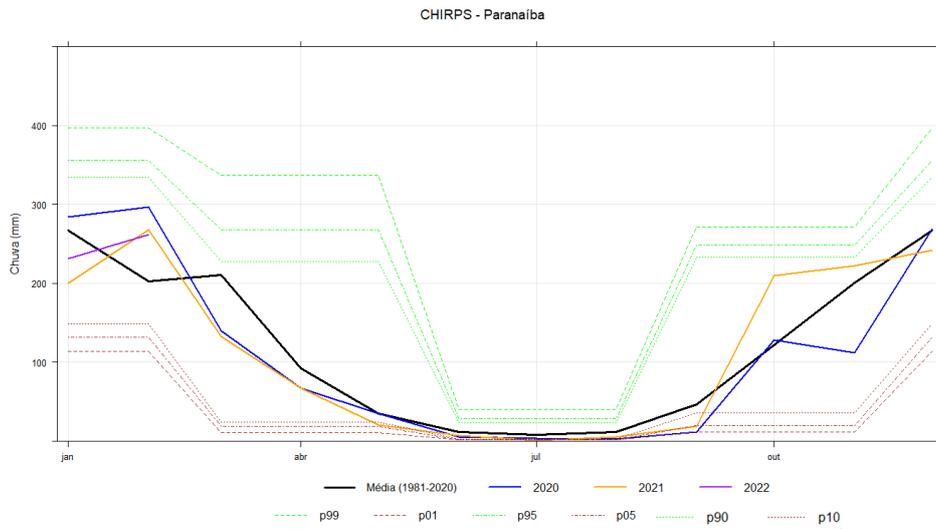


Figura 21: Chuva realizada em 2020 (linha azul), 2021 (linha amarela), 2022 (linha roxa) e média histórica mensal (linha preta) e percentis sazonais (DJF, MAM, JJA, SON) encontrados para extremos chuvosos (p99, p95 e p90, em verde tracejado) e para extremos secos (p10, p05 e p01, em marrom tracejado) para a bacia do Paranaíba.

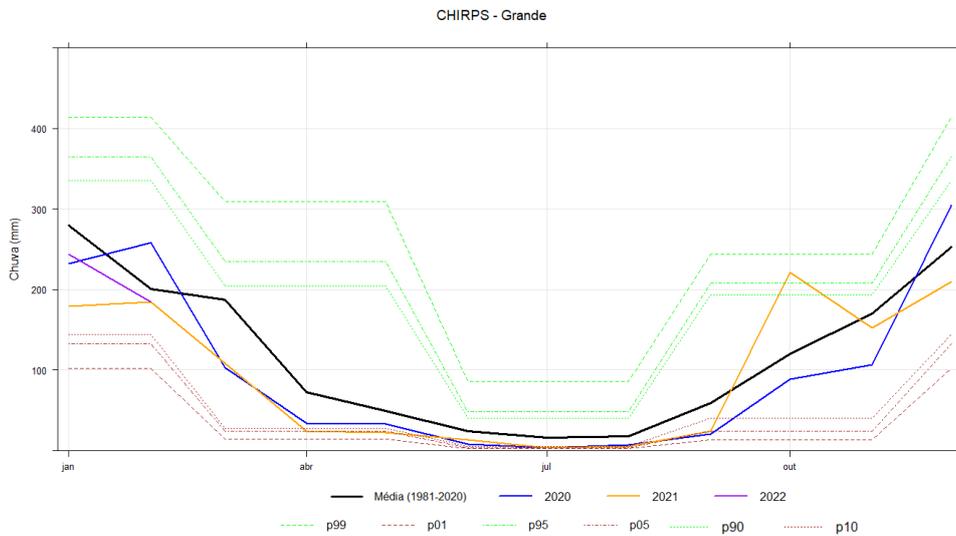


Figura 22: Mesmo que a Figura 21, para a bacia do Grande.

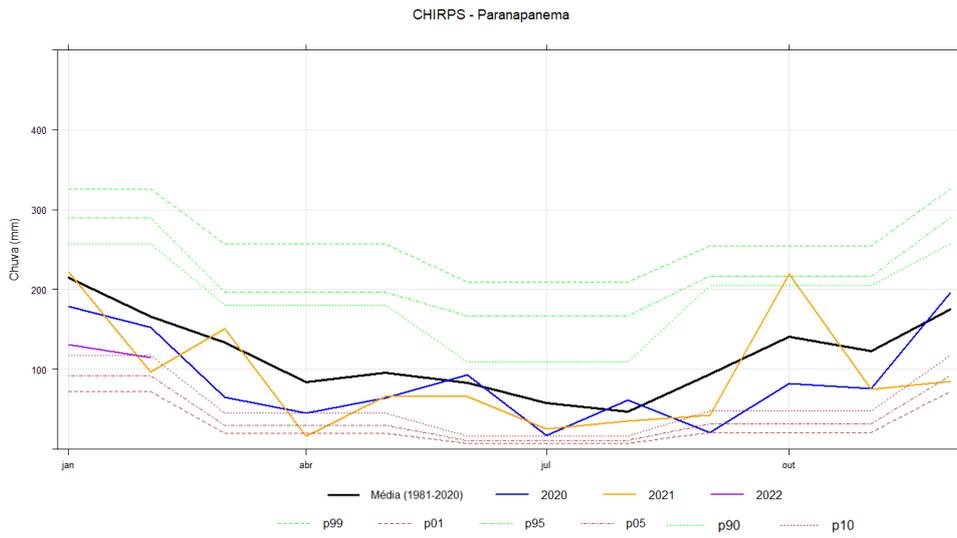


Figura 23: Mesmo que a Figura 21, para a bacia do Paranapanema.

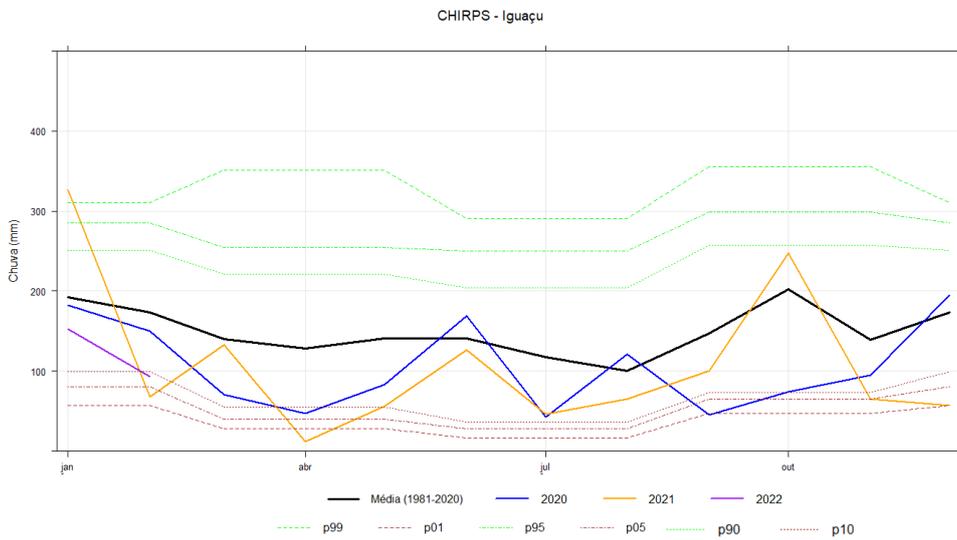


Figura 24: Mesmo que a Figura 21, para a bacia do Iguazu.

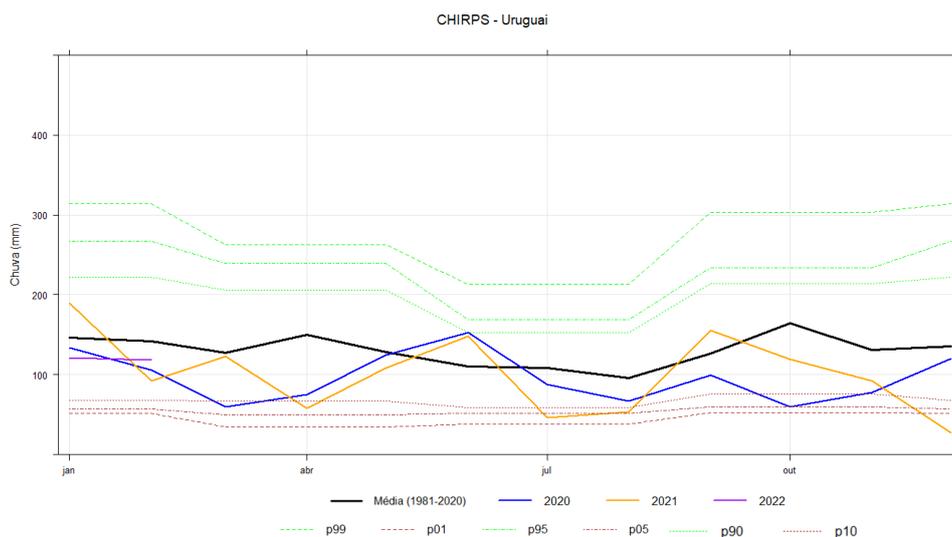


Figura 25: Mesmo que a Figura 21, para a bacia do Uruguai.

A análise feita acima também foi feita considerando-se os percentis mensais. As Figuras de 26 a 30 ilustram os resultados encontrados para as bacias analisadas. A bacia do Paranaíba apresentou extremos chuvosos nos meses de fevereiro de 2020 e outubro de 2021, conforme o liminar do p95. As bacias do Grande e Paranapanema apresentaram um extremo chuvoso em outubro de 2021. Os meses de janeiro de 2021 e junho de 2020 foram extremos chuvosos nas bacias do Iguaçu e Uruguai, respectivamente. A análise dos extremos secos (chuva < p33), resultou em um evento para as bacias do Paranaíba e Grande, em julho de 2021 e março de 2020, respectivamente. A bacia do Paranapanema apresentou dois extremos secos: em setembro de 2020 e abril de 2021. A bacia do Iguaçu teve quatro eventos extremos identificados: em setembro e outubro de 2020 e abril e dezembro de 2021. A bacia do Uruguai apresentou dois eventos extremos: em julho e dezembro de 2021. Apesar da identificação da realização de eventos extremos secos/chuvosos em ambas as abordagens (definidos aqui como acumulados inferiores ao p01 e superiores ao p95, respectivamente), a falta da identificação de eventos extremos secos/chuvosos no período analisado das previsões do Coral tornou necessária uma mudança nos eventos escolhidos para análise da previsão do modelo Coral LSTM 60 dias.

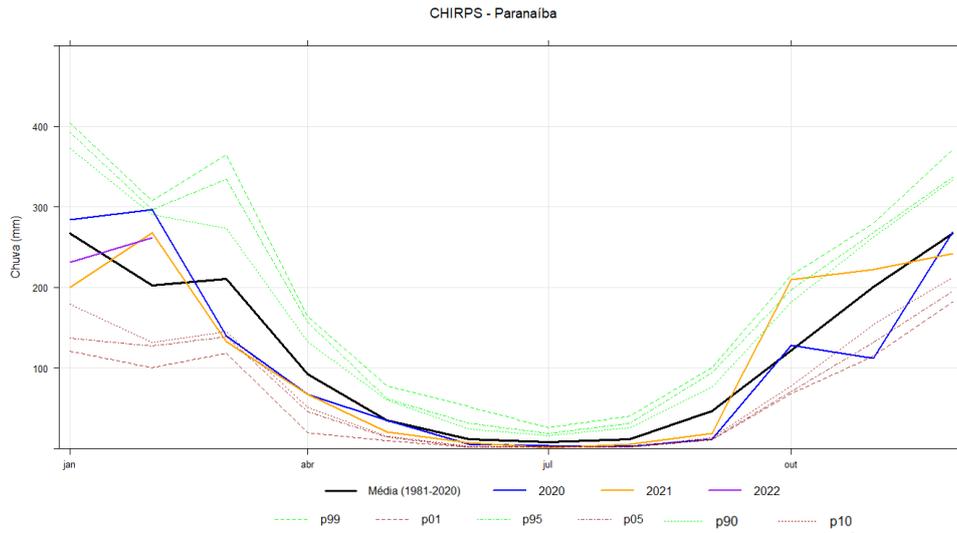


Figura 26: Chuva realizada em 2020 (linha azul), 2021 (linha amarela), 2022 (linha roxa) e média histórica mensal (linha preta) e percentis mensais encontrados para extremos chuvosos (p99, p95 e p90, em verde tracejado) e para extremos secos (p10, p05 e p01, em marrom tracejado) para a bacia do Paranaíba.

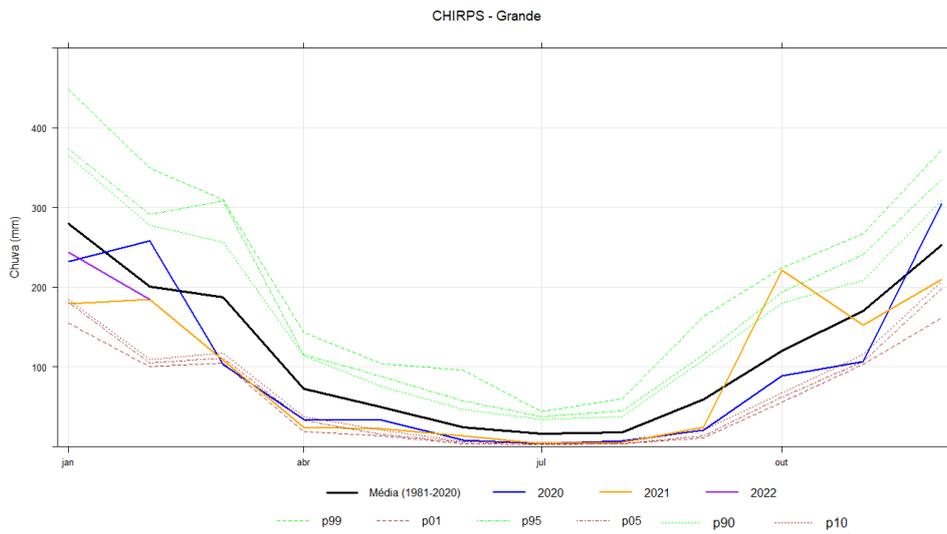


Figura 27: Mesmo que a Figura 26, para a bacia do Grande.

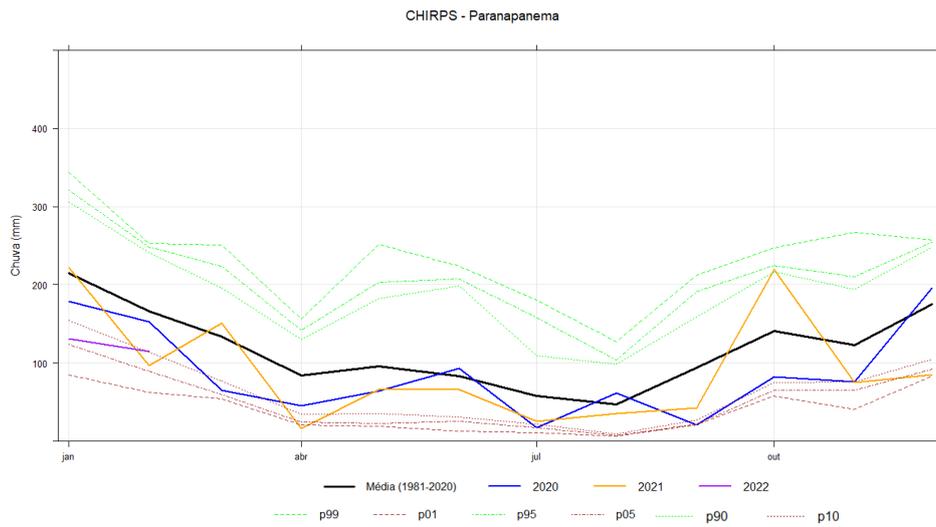


Figura 28: Mesmo que a Figura 26, para a bacia do Paranapanema.

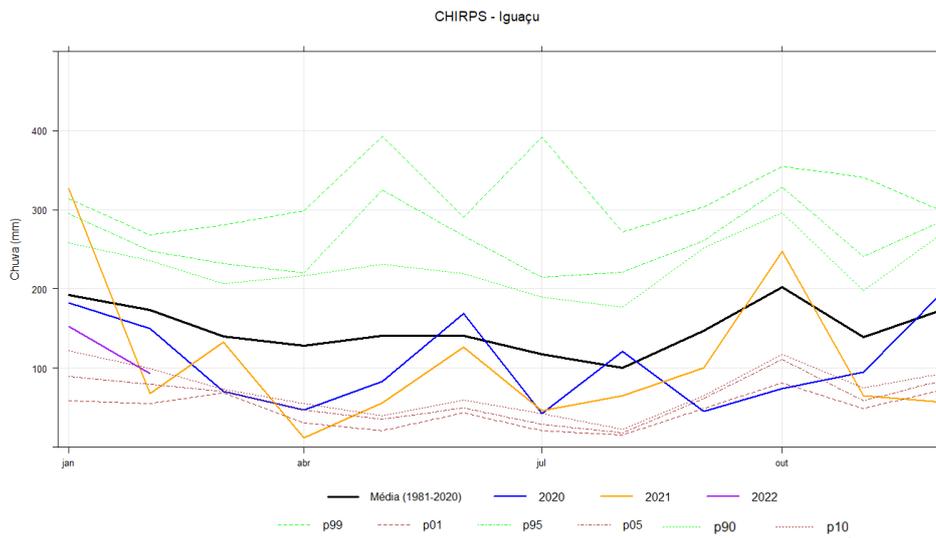


Figura 29: Mesmo que a Figura 26, para a bacia do Iguazu.

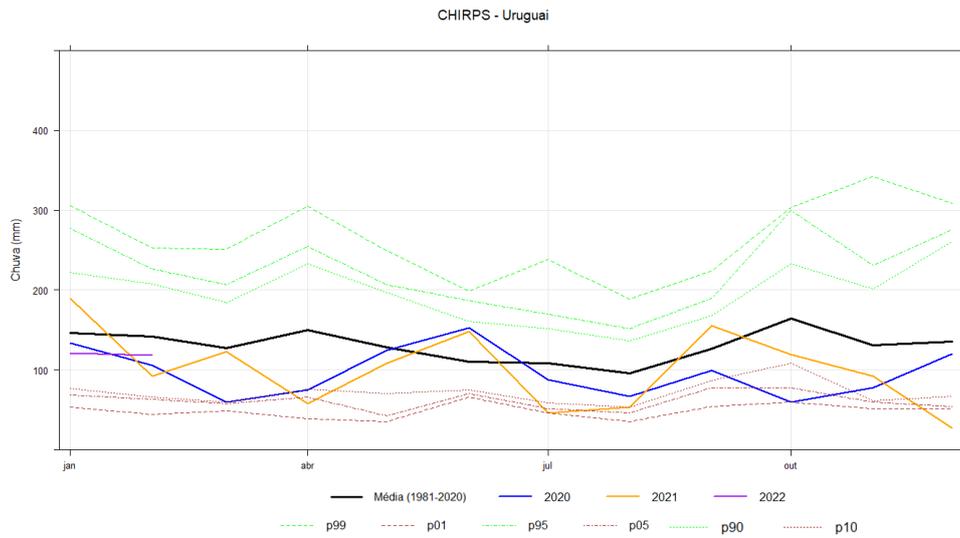


Figura 30: Mesmo que a Figura 26, para a bacia do Uruguai.

As Tabelas 7 e 8 ilustram a distribuição, de acordo com os percentis sazonais e mensais, dos eventos extremos de precipitação realizada. Os destaques em verde/vermelho indicam os eventos chuvosos/secos nos quais analisou-se a previsão do Coral para o acumulado mensal de interesse. Os eventos secos foram considerados como aqueles onde chuva < p01 e os eventos chuvosos aqueles nos quais chuva > p95.

Tabela 7: Distribuição dos eventos extremos secos/chuvosos para as bacias do Paranaíba, Grande e Parapanema.

	Paranaíba				Grande				Parapanema			
	Extremo chuvoso		Extremo seco		Extremo chuvoso		Extremo seco		Extremo chuvoso		Extremo seco	
	Sazonal	Mensal	Sazonal	Mês	Sazonal	Mês	Sazonal	Mês	Sazonal	Mês	Sazonal	Mês
Mas	zp99 zp95 zp90:	zp99 zp95 zp90	sp01 sp05 sp10	sp01 sp05 sp10	zp99 zp95 zp90:	zp99 zp95 zp90	sp01 sp05 sp10	sp01 sp05 sp10	zp99 zp95 zp90:	zp99 zp95 zp90	sp01 sp05 sp10	sp01 sp05 sp10
Jan/20		X										
Feb/20		X										
Mar/20			X				X	X				X
Abr/20												
Mai/20												
Jun/20							X	X				X
Jul/20												
Ago/20												
Set/20			X	X			X	X				X
Out/20			X	X			X	X				X
Nov/20												
Dez/20												
Jan/21							X	X				
Feb/21							X	X				
Mar/21			X	X			X	X				X
Abr/21							X	X				X
Mai/21							X	X				X
Jun/21			X	X			X	X				X
Jul/21							X	X				X
Ago/21												
Set/21												
Out/21		X										
Nov/21		X										
Dez/21												
Jan/22												
Feb/22												

Tabela 8: Mesmo que a Tabela 7, para as bacias do Iguazu e Uruguai.

Mês	Iguazu						Uruguai					
	Extremo chuvoso			Extremo seco			Extremo chuvoso			Extremo seco		
	Sazonal	Mensal	Mês	Sazo	Mês	Mês	Sazonal	Mensal	Mês	Sazo	Mês	Mês
Jan/20	zp99 zp95 zp90:	zp99 zp95 zp90:	zp99 zp95 zp90:	sp01 sp05 sp10:	sp01 sp05 sp10:	sp01 sp05 sp10:	zp99 zp95 zp90:	zp99 zp95 zp90:	zp99 zp95 zp90:	sp01 sp05 sp10:	sp01 sp05 sp10:	sp01 sp05 sp10:
fev/20												
mar/20												
abr/20												
mai/20												
jun/20												
jul/20												
ago/20												
set/20												
out/20												
nov/20												
dez/20												
Jan/21	x	x	x									
fev/21												
mar/21												
abr/21												
mai/21												
jun/21												
jul/21												
ago/21												
set/21												
out/21												
nov/21												
dez/21												
Jan/22												
fev/22												

As previsões do modelo Coral para os eventos extremos realizados identificados com os percentis mensais (discutidas logo acima) foram estudadas e estão dispostas nas Figuras de 31 a 47. Nota-se que os meses do período chuvoso, apresentam mais casos de extremos chuvosos e os meses do período seco mais extremos secos. Na maioria dos casos estudados, a previsão do modelo Coral não apresentou variações bruscas e tendeu a ser mais acurada conforme o dia inicial da previsão se aproxima do mês previsto.

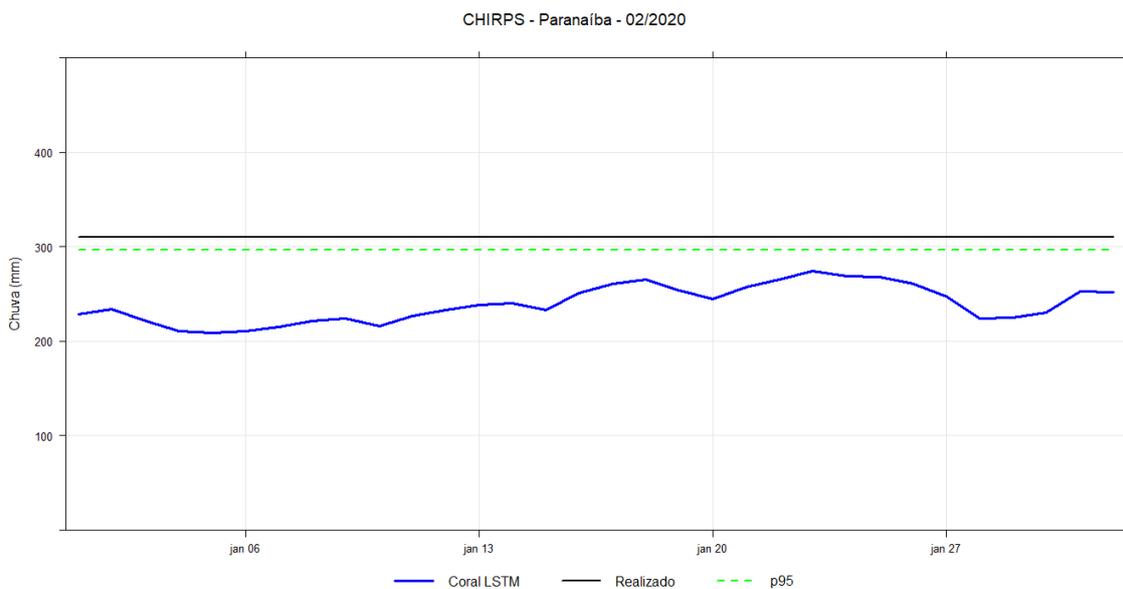


Figura 31: Previsões do modelo Coral LSTM 60 dias para o acumulado mensal de precipitação no mês de fevereiro de 2020.

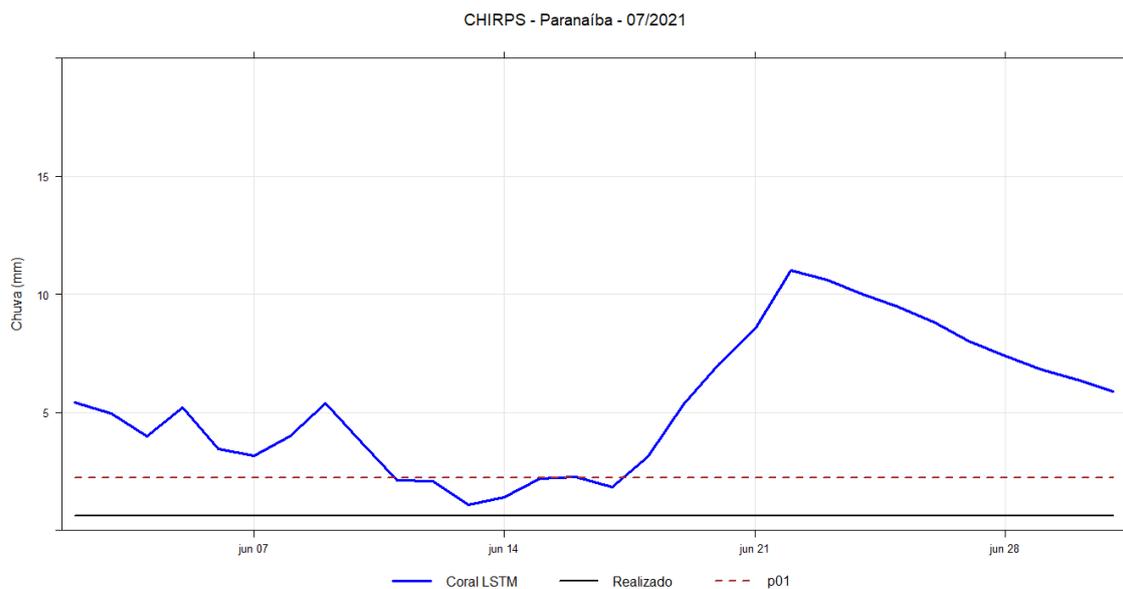


Figura 32: Mesmo que a Figura 31, para o mês de julho de 2021.

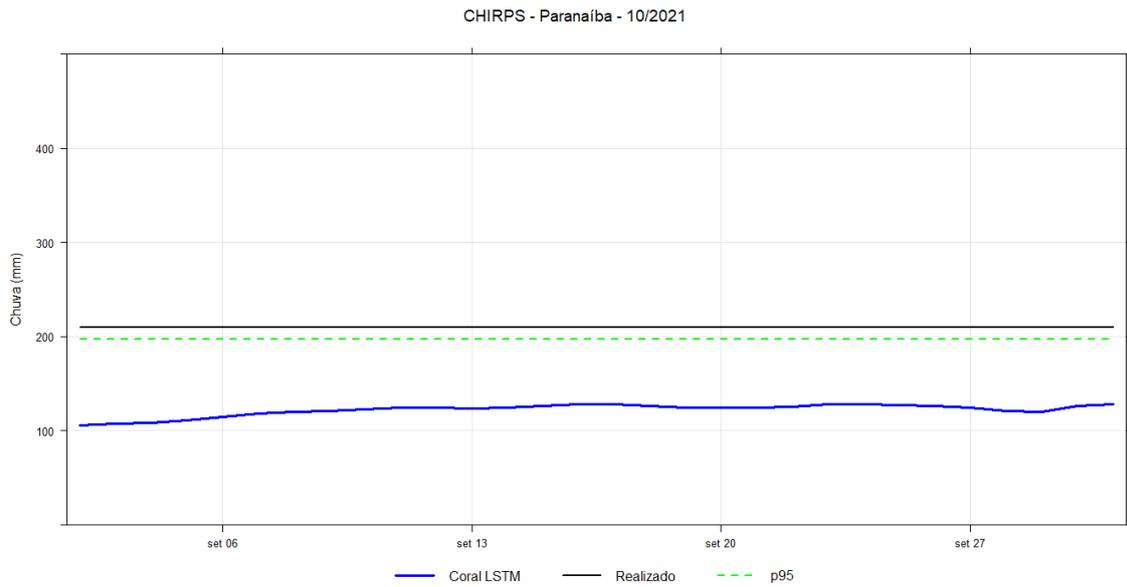


Figura 33: Mesmo que a Figura 31, para o mês de outubro de 2021.

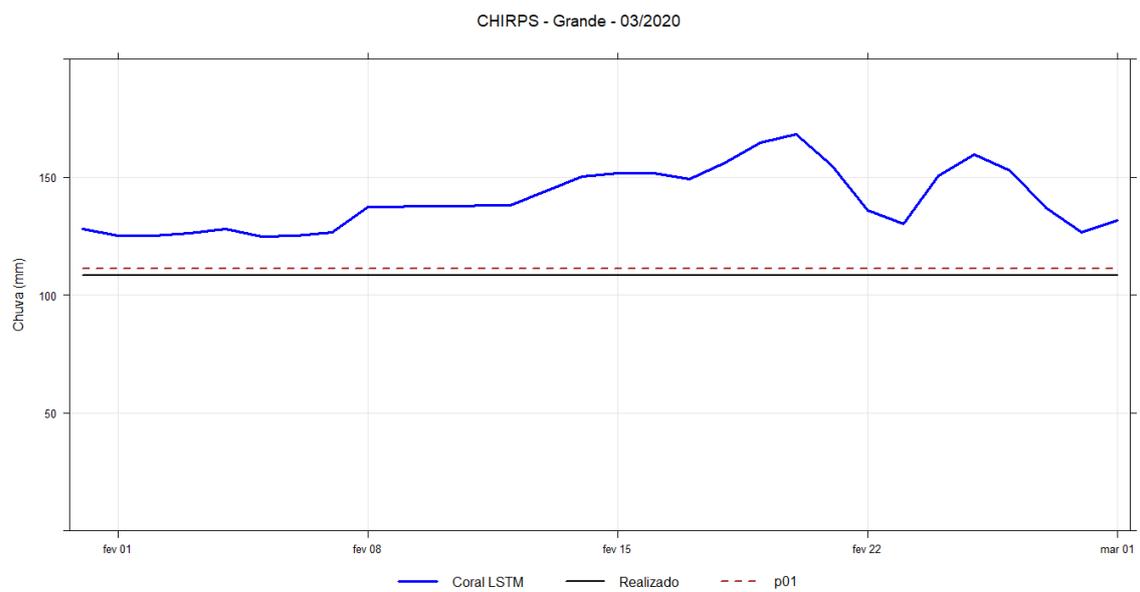


Figura 34: Mesmo que a Figura 31, para a bacia do Grande, para o mês de março de 2020.

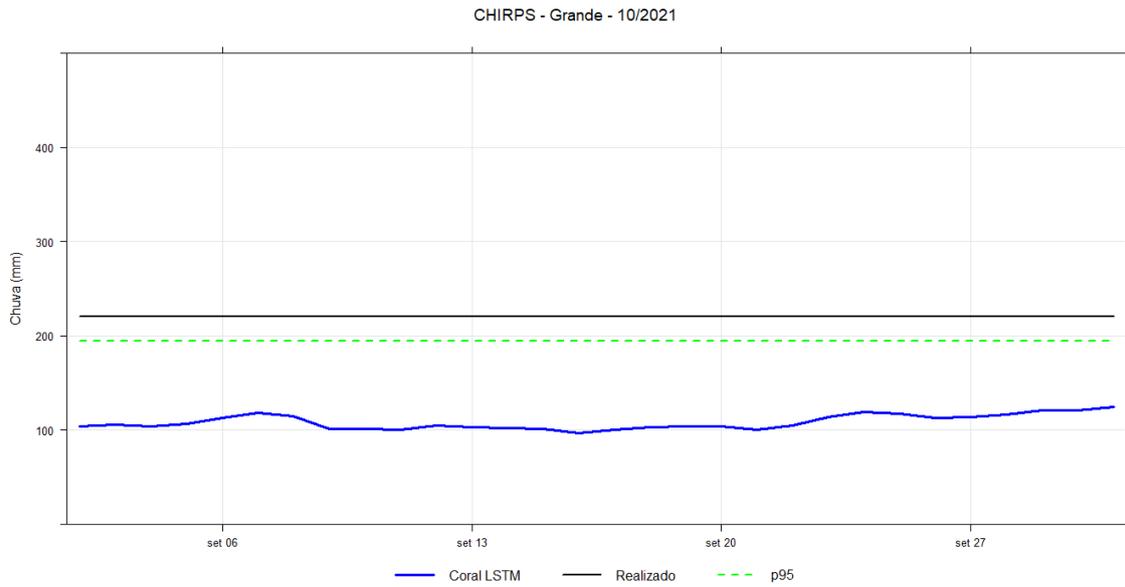


Figura 35: Mesmo que a Figura 31, para a bacia do Grande, para o mês de outubro de 2021.

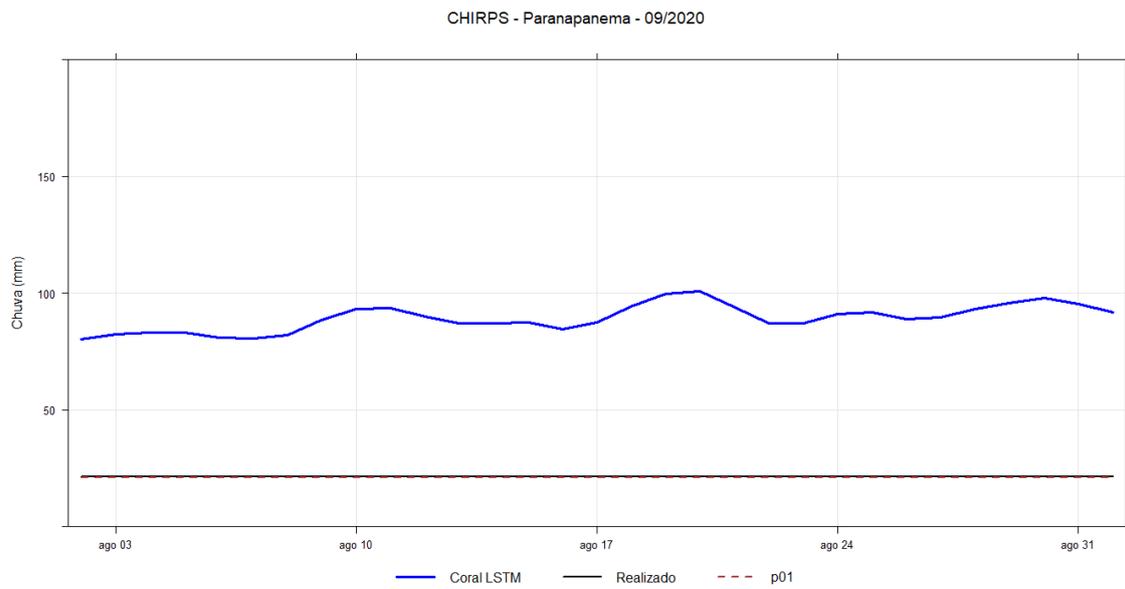


Figura 36: Mesmo que a Figura 31, para a bacia do Paranapanema, para o mês de setembro de 2020.

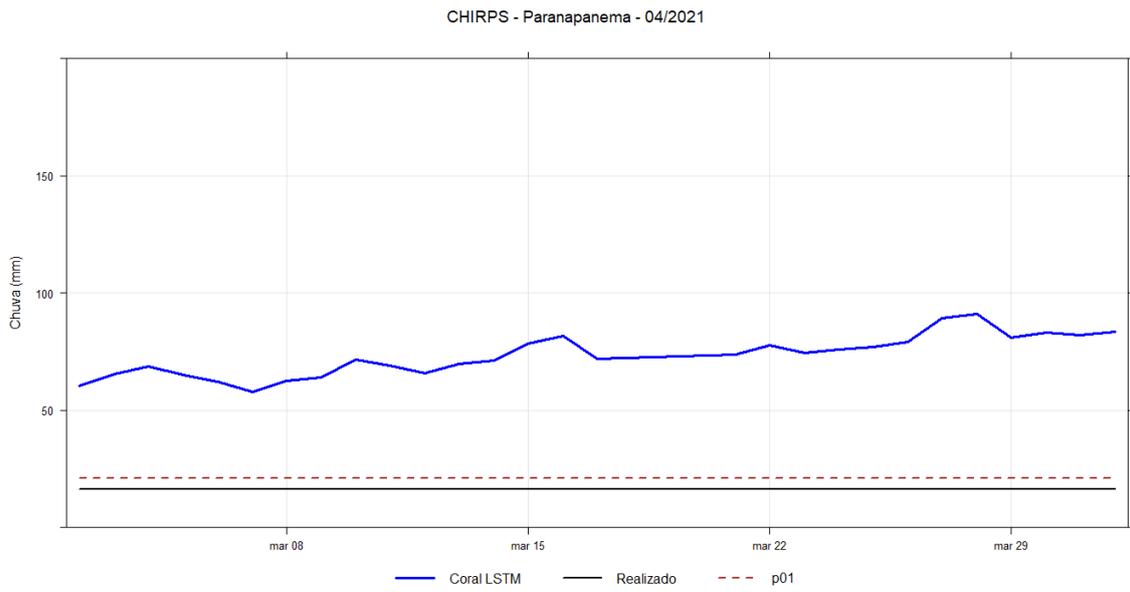


Figura 37: Mesmo que a Figura 31, para a bacia do Paranapanema, para o mês de abril de 2021.

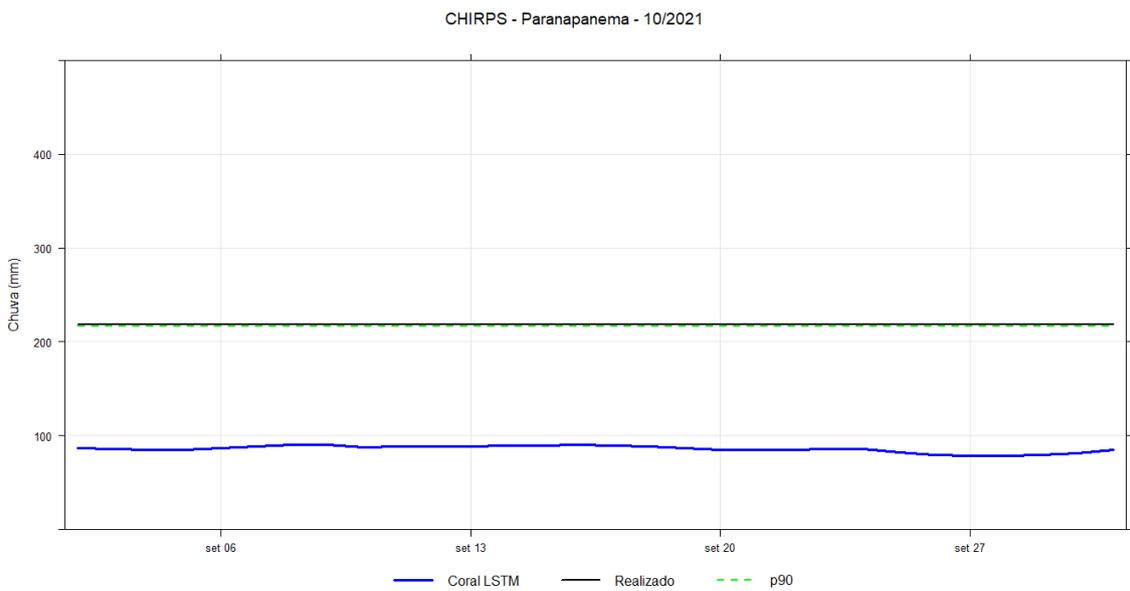


Figura 38: Mesmo que a Figura 31, para a bacia do Paranapanema, para o mês de outubro de 2021.

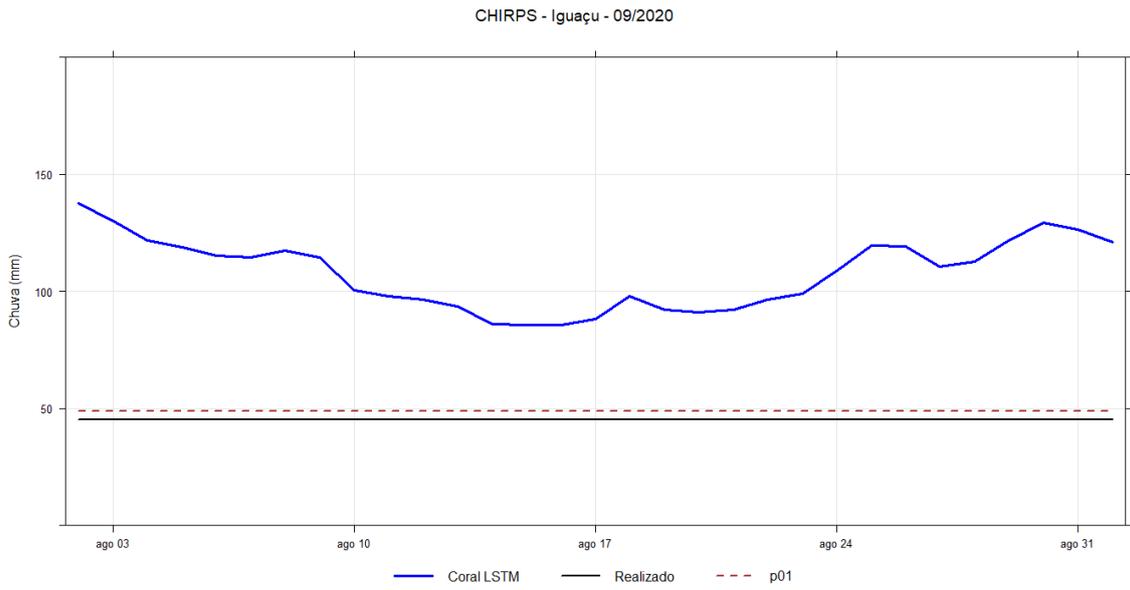


Figura 39: Mesmo que a Figura 31, para a bacia do Iguaçu, para o mês de setembro de 2020.

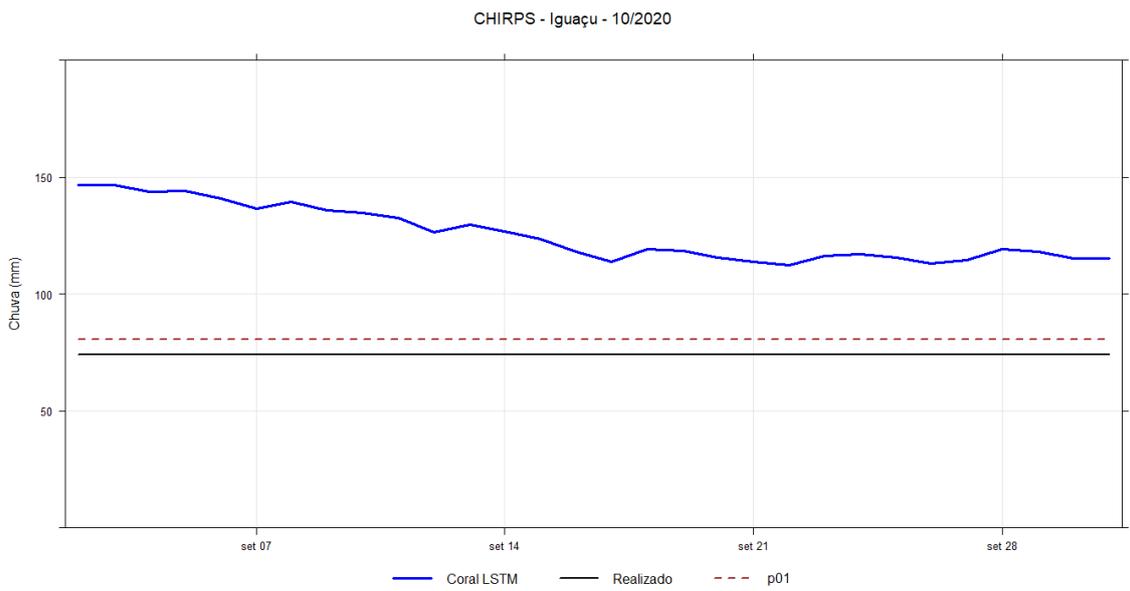


Figura 40: Mesmo que a Figura 31, para a bacia do Iguaçu, para o mês de outubro de 2020.

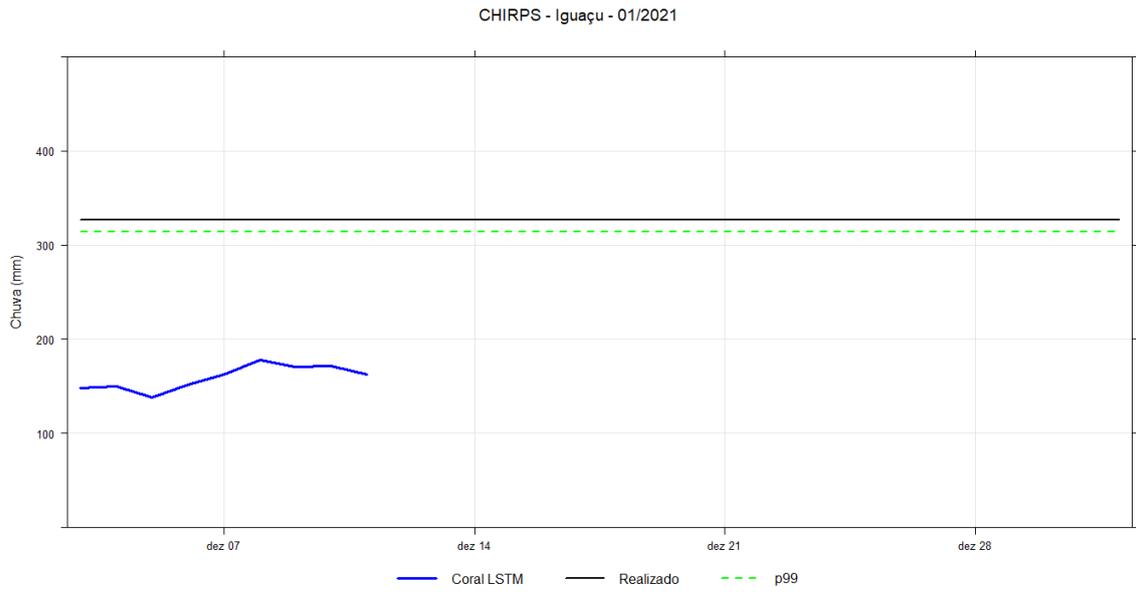


Figura 41: Mesmo que a Figura 31, para a bacia do Iguaçu, para o mês de janeiro de 2021.

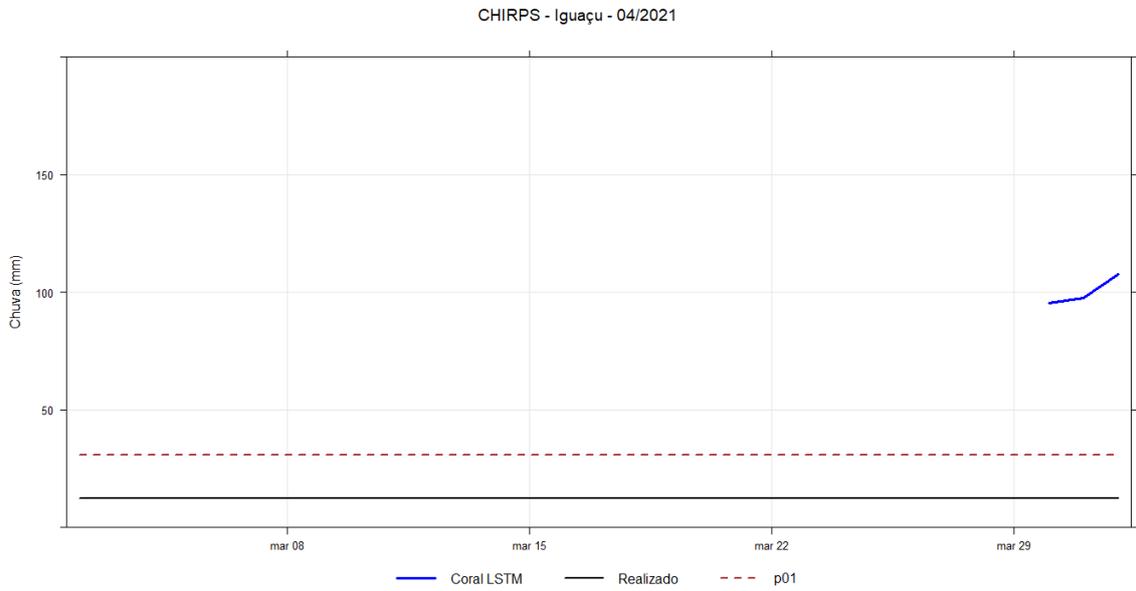


Figura 42: Mesmo que a Figura 31, para a bacia do Iguaçu, para o mês de abril de 2021.

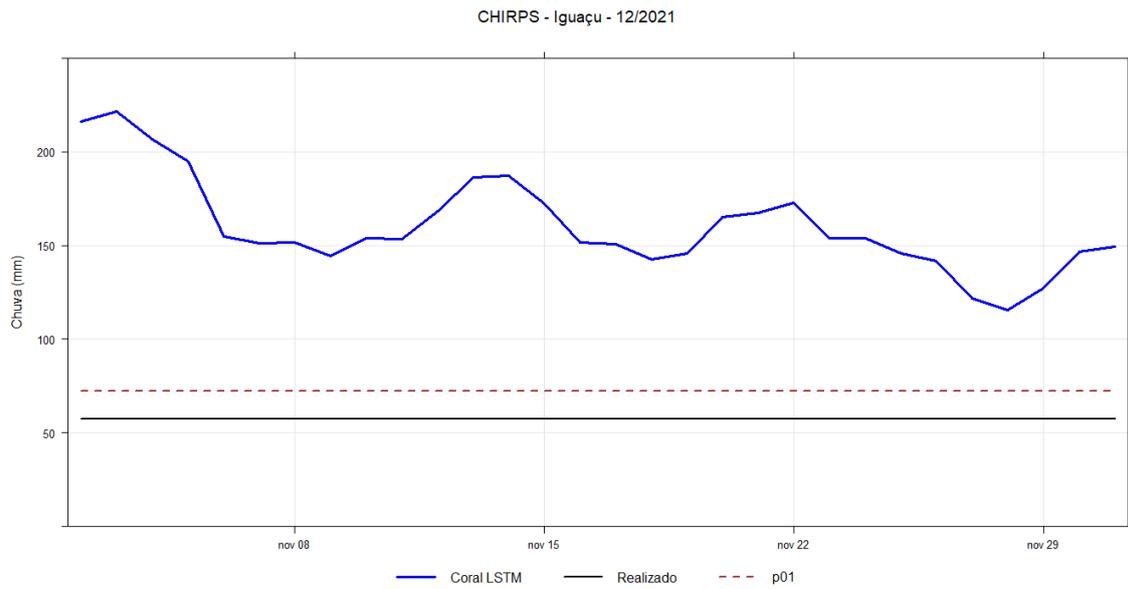


Figura 43: Mesmo que a Figura 31, para a bacia do Iguaçu, para o mês de dezembro de 2021.

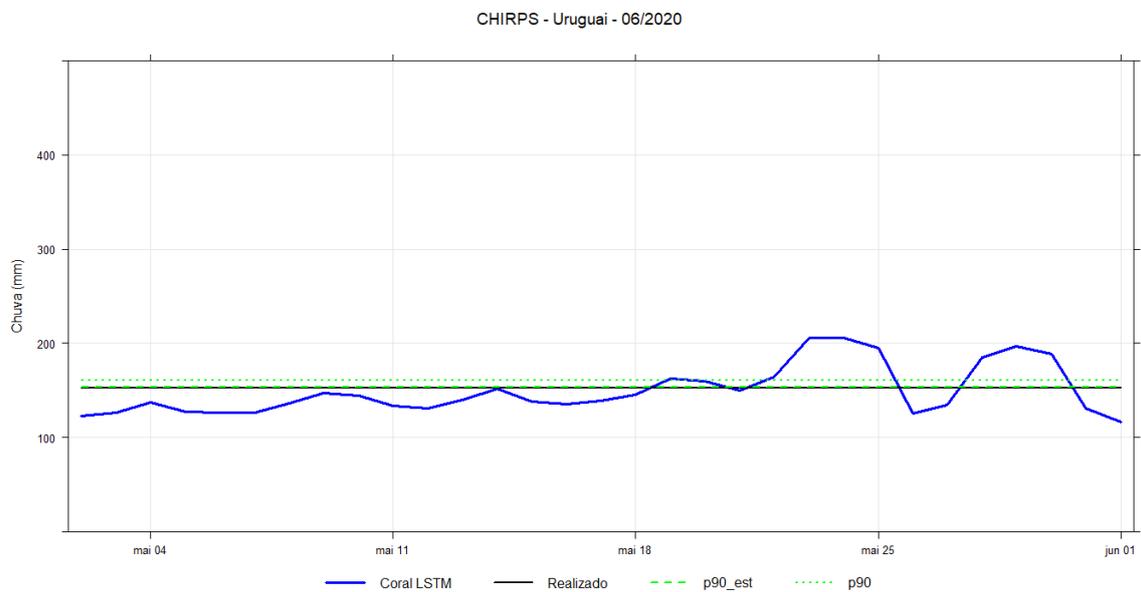


Figura 44: Mesmo que a Figura 31, para a bacia do Uruguai, para o mês de junho de 2020.

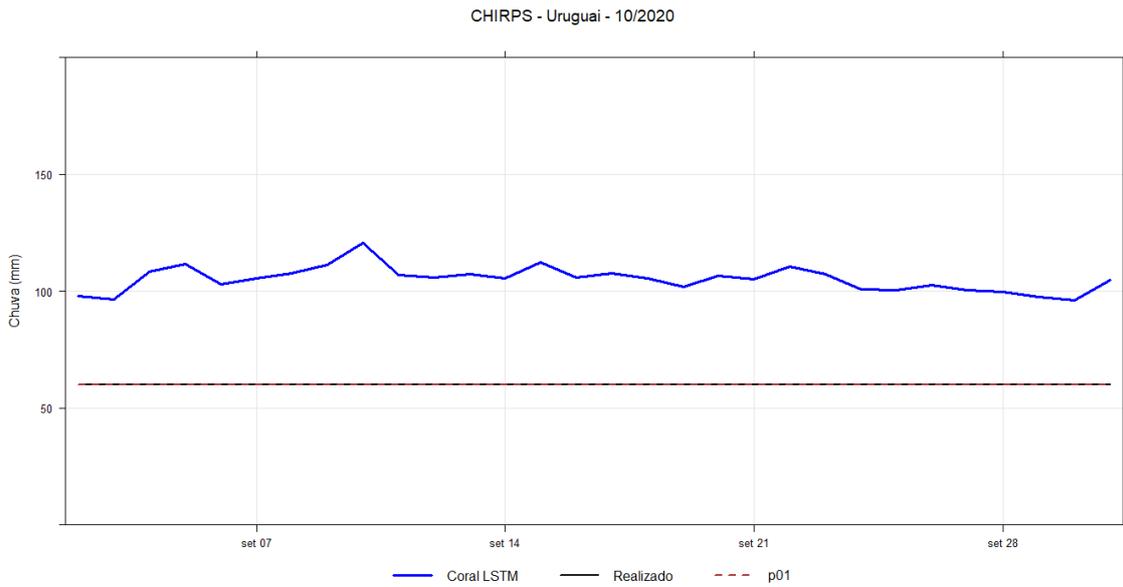


Figura 45: Mesmo que a Figura 31, para a bacia do Uruguai, para o mês de outubro de 2020.

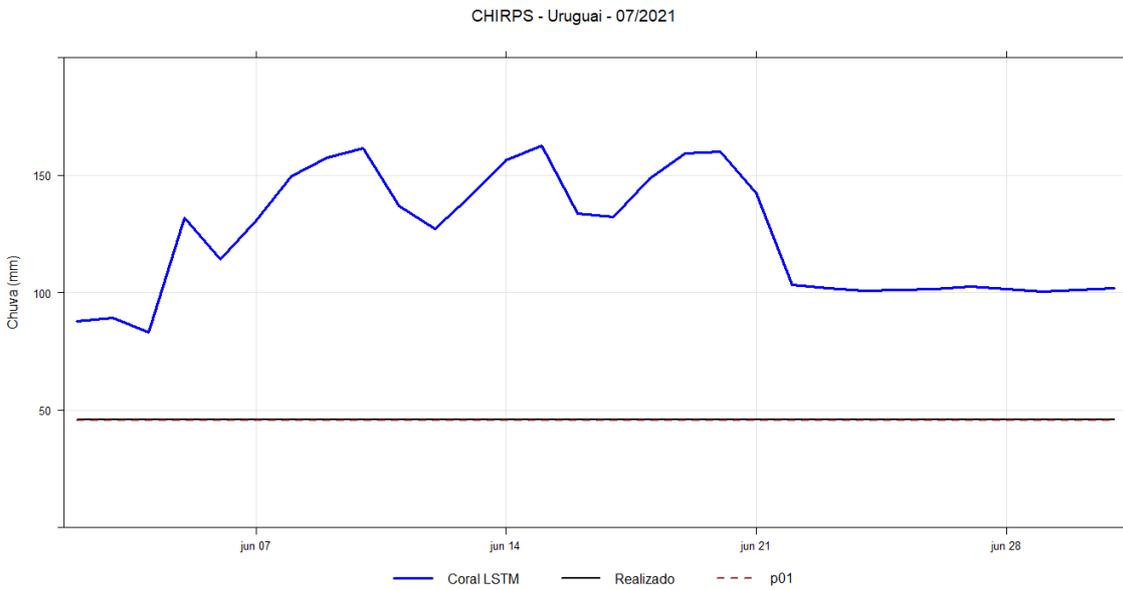


Figura 46: Mesmo que a Figura 31, para a bacia do Uruguai, para o mês de julho de 2021.

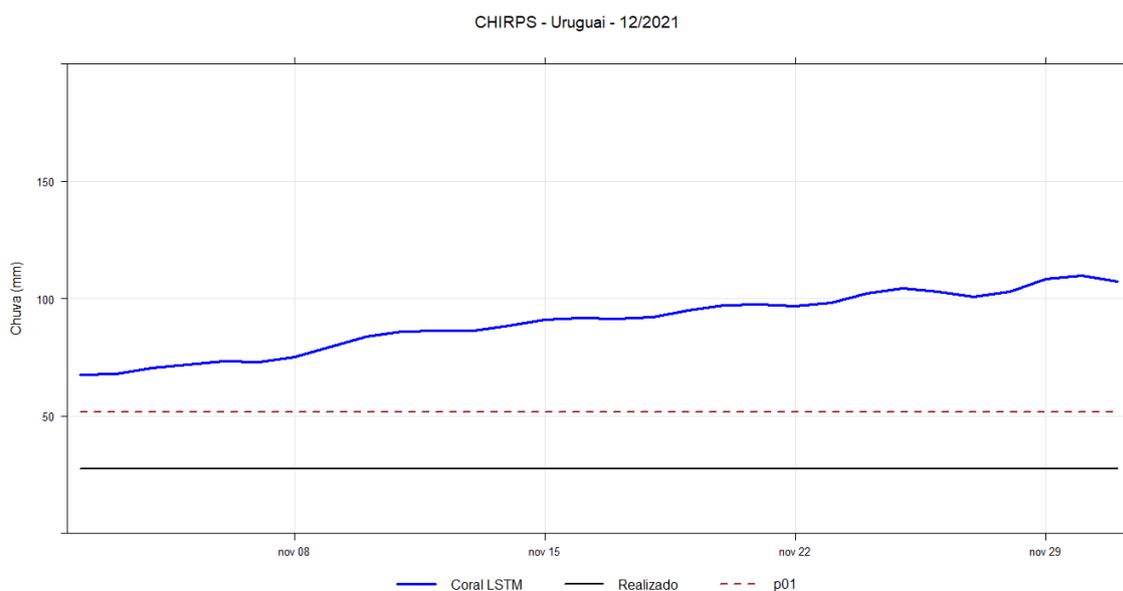


Figura 47: Mesmo que a Figura 31, para a bacia do Uruguai, para o mês de dezembro de 2021.

A mudança na análise do evento procurado tornou-se necessária, sobretudo pelo curto horizonte de tempo das previsões, como discutido anteriormente. Assim, os eventos a serem estudados foram considerados como aqueles que estivessem dentro da média (definidos neste estudo como $p33 \leq \text{chuva} \leq p66$), acima da média ($\text{chuva} > p66$) e abaixo da média ($\text{chuva} < p33$). As Tabelas 9 e 10 abaixo ilustram os valores encontrados, por bacia, para os percentis de 66% e 33%, por período sazonal (DJF, MAM, JJA, SON) e por mês.

Tabela 9: Valores encontrados para os percentis de 66% e 33% considerando-se os períodos sazonais.

		Valores dos percentis sazonais em mm (CHIRPS)				
		Paranaíba	Grande	Parapanema	Iguaçu	Uruguai
p66	DJF	269.64	272.57	201.40	197.92	151.30
	MAM	142.34	114.16	119.55	159.96	156.46
	JJA	10.99	20.94	69.90	135.75	114.35
	SON	158.68	147.76	136.66	186.63	152.53
p33	DJF	216.43	216.67	161.84	153.91	109.51
	MAM	53.60	56.15	78.37	95.86	107.31
	JJA	4.53	9.10	35.55	84.01	87.08
	SON	74.84	79.23	88.50	118.43	110.24

Tabela 10: Mesmo que a tabela 3, mas para o período mensal.

		Valores dos percentis mensais em mm (CHIRPS)				
		Paranaíba	Grande	Paranapanema	Iguaçu	Uruguai
p66	janeiro	301.13	305.51	237.04	213.10	139.80
	fevereiro	226.10	230.23	183.69	204.86	164.27
	março	222.48	201.28	143.87	155.15	149.24
	abril	109.75	85.58	92.58	142.20	168.60
	maio	35.19	55.75	97.56	161.49	148.02
	junho	13.50	26.63	87.42	165.04	113.43
	julho	7.02	17.05	60.63	130.46	118.77
	agosto	12.24	20.75	59.90	123.07	112.28
	setembro	54.42	65.68	116.34	175.21	138.60
	outubro	126.83	133.96	153.29	219.90	179.61
	novembro	230.06	185.99	133.07	157.58	148.42
	dezembro	277.38	267.85	195.15	185.29	141.87
p33	janeiro	234.25	243.95	177.00	174.71	120.68
	fevereiro	165.58	161.88	139.86	150.71	117.25
	março	185.67	166.92	113.17	104.55	103.39
	abril	75.37	56.86	67.40	94.17	120.78
	maio	27.10	38.31	65.23	82.12	106.21
	junho	4.85	9.72	53.79	108.83	88.07
	julho	4.65	8.06	35.43	83.84	86.40
	agosto	4.01	8.71	25.20	58.61	81.12
	setembro	39.38	43.01	64.25	98.34	108.13
	outubro	96.08	99.91	110.68	166.83	132.25
	novembro	167.91	152.71	97.42	108.53	94.31
	dezembro	246.14	233.05	158.99	149.11	90.77

3.4 Previsão do modelo Coral LSTM 60 dias

A análise inicial das previsões do Coral para as bacias estudadas está sintetizada na Tabela 11, que mostra as distribuições mensais da amostra (m , $m+1$ ou $m+2$). As diferenças nos totais se devem a falta de dados em diferentes períodos nas bacias, como ilustrado anteriormente na Tabela 3.

Tabela 11: Meses de referência das previsões selecionadas do modelo Coral.

Distribuição das Previsões do Modelo Coral				
Bacia	m	$m+1$	$m+2$	Total
Paranaíba	24	677	2	703
Grande	24	697	3	724
Paranapanema	23	678	3	704
Iguaçu	23	629	2	654
Uruguai	24	677	2	703

As Tabelas 12 e 13, mostram, respectivamente, a distribuição sazonal dos parâmetros a , b , c e d , conforme a definição dos eventos de interesse, considerando-se os valores sazonais e mensais do p66 e p33 para as bacias analisadas.

Tabela 12: Parâmetros da tabela de contingência, considerando-se os percentis sazonais, e analisando a previsão do Coral e a chuva realizada do CHIRPS para um mesmo período.

Parâmetros de contingência - Paranaíba					
Evento	Parâmetro	DJF	MAM	JJA	SON
p33 ≤ chuva ≤ p66	a	65	43	36	43
	b	37	5	50	30
	c	58	72	56	18
	d	11	55	40	84
chuva > p66	a	6	0	0	22
	b	27	54	61	12
	c	32	0	0	30
	d	106	121	121	111
chuva < p33	a	0	55	35	62
	b	36	18	0	6
	c	10	5	55	0
	d	125	97	92	107

Parâmetros de contingência - Grande					
Evento	Parâmetro	DJF	MAM	JJA	SON
p33 ≤ chuva ≤ p66	a	31	0	10	30
	b	54	74	75	30
	c	37	56	21	31
	d	70	45	76	84
chuva > p66	a	0	0	0	22
	b	44	59	97	31
	c	30	0	0	30
	d	118	116	85	92
chuva < p33	a	49	42	0	62
	b	14	0	0	0
	c	45	77	151	0
	d	84	56	31	113

Parâmetros de contingência - Paranapanema					
Evento	Parâmetro	DJF	MAM	JJA	SON
p33 ≤ chuva ≤ p66	a	7	0	53	0
	b	75	115	60	91
	c	29	0	8	0
	d	61	60	61	84
chuva > p66	a	11	7	27	0
	b	0	23	42	0
	c	19	20	4	30
	d	142	125	109	145
chuva < p33	a	50	30	0	63
	b	29	0	0	21
	c	56	118	90	82
	d	37	27	92	9

Parâmetros de contingência - Iguaçu					
Evento	Parâmetro	DJF	MAM	JJA	SON
p33 ≤ chuva ≤ p66	a	9	4	61	0
	b	81	21	50	108
	c	27	5	0	0
	d	54	102	71	61
chuva > p66	a	0	0	31	2
	b	8	96	32	16
	c	10	0	0	22
	d	153	36	119	129
chuva < p33	a	42	11	8	41
	b	31	0	0	2
	c	83	112	82	104
	d	15	9	92	22

Parâmetros de contingência - Uruguai					
Evento	Parâmetro	DJF	MAM	JJA	SON
p33 ≤ chuva ≤ p66	a	34	12	1	30
	b	9	15	40	50
	c	33	75	29	0
	d	95	73	112	95
chuva > p66	a	0	0	34	0
	b	35	66	105	1
	c	10	0	28	31
	d	126	109	15	143
chuva < p33	a	57	26	1	94
	b	36	56	1	0
	c	37	62	89	20
	d	41	31	91	61

Tabela 13: Mesmo que a Tabela 12, mas considerando-se os percentis mensais.

Parâmetros de contingência - Paranaíba					
Evento	Parâmetro	DJF	MAM	JJA	SON
p33 ≤ chuva ≤ p66	a	7	0	32	22
	b	74	51	45	65
	c	29	0	29	0
	d	61	124	76	88
chuva > p66	a	34	18	0	6
	b	25	25	72	3
	c	31	12	0	54
	d	81	120	110	112
chuva < p33	a	2	77	33	49
	b	29	4	0	30
	c	68	68	88	44
	d	72	26	61	52

Parâmetros de contingência - Grande					
Evento	Parâmetro	DJF	MAM	JJA	SON
p33 ≤ chuva ≤ p66	a	34	0	20	0
	b	107	51	39	136
	c	0	0	11	0
	d	51	124	112	39
chuva > p66	a	18	0	0	0
	b	0	52	123	3
	c	44	0	0	30
	d	130	123	59	142
chuva < p33	a	18	72	0	35
	b	15	0	0	1
	c	78	103	151	110
	d	81	0	31	29

Parâmetros de contingência - Paranapanema					
Evento	Parâmetro	DJF	MAM	JJA	SON
p33 ≤ chuva ≤ p66	a	56	29	31	0
	b	58	67	83	122
	c	12	1	30	0
	d	46	78	38	53
chuva > p66	a	0	0	28	0
	b	6	52	40	1
	c	30	27	33	30
	d	136	96	81	144
chuva < p33	a	17	15	0	22
	b	35	12	0	30
	c	57	103	60	123
	d	63	45	122	0

Parâmetros de contingência - Iguaçu					
Evento	Parâmetro	DJF	MAM	JJA	SON
p33 ≤ chuva ≤ p66	a	2	3	57	27
	b	90	30	39	63
	c	4	36	34	4
	d	75	63	52	75
chuva > p66	a	0	0	25	0
	b	7	97	42	21
	c	40	0	6	24
	d	124	35	109	124
chuva < p33	a	41	2	0	42
	b	31	0	19	16
	c	84	91	60	72
	d	15	39	103	39

Parâmetros de contingência - Uruguai					
Evento	Parâmetro	DJF	MAM	JJA	SON
p33 ≤ chuva ≤ p66	a	13	6	1	0
	b	39	27	38	55
	c	24	81	29	0
	d	95	61	114	120
chuva > p66	a	0	0	35	2
	b	39	58	105	3
	c	10	0	27	29
	d	122	117	15	141
chuva < p33	a	51	28	1	115
	b	29	56	2	0
	c	73	60	89	29
	d	18	31	90	31

A Tabela 14 dispõe os valores encontrados dos índices de avaliação do modelo Coral LSTM 60 dias, considerando os eventos encontrados com os diferentes percentis (mensal e sazonal) para os índices de avaliação do modelo Coral, para a bacia do Paranaíba. Considerando-se a abordagem com os percentis sazonais, o valor da SKILL (que indica a qualidade da previsão e tem valor ideal 1.00) foi pequeno para todas as estações analisadas; em SON, o maior valor deste índice foi encontrado (0.42), isso indicou que a previsão teve melhor qualidade quando o mês previsto pertenceu a este período para esta bacia, apesar do valor ser relativamente distante do valor ideal. A taxa de acerto (POD, indicador da qualidade do modelo de prever a ocorrência do evento) foi maior em SON (0.70; o valor ideal é 1.00) e menor em MAM (0.37), indicando que em SON o modelo Coral consegue prever melhor o evento chuva dentro da média para os meses de setembro, outubro e novembro. O BIAS indicou que a ocorrência de chuva dentro da média foi subestimada (<1.00) em SON (0.84) e superestimada (>1.00) nos demais períodos. O modelo teve menor viés em JJA (1.07) e maior em MAM (2.40). Os valores de F e FAR (que indicam quando o modelo prevê o evento e o mesmo não acontece) em MAM foram próximos do valor ideal (0.08 e 0.10, respectivamente); os valores próximos de 1.00 nos demais períodos indicaram que o modelo frequentemente prevê chuva dentro da média, mas isto não ocorreu na realidade. O ICS (métrica das previsões corretas do modelo em relação ao evento (parâmetros a e d)) teve o maior valor em SON (0.73) e o menor em JJA (0.42), isso indicou que no período seco desta bacia o modelo tendeu a prever chuva dentro da média, mas a não realização deste evento ocorreu frequentemente e/ou o modelo frequentemente não previu que a chuva no mês seria dentro da média, mas a realização da chuva ficou dentro da média. A previsão do modelo Coral para o evento chuva acima da média (chuva $> p66$), teve maior SKILL em SON (0.36), bem como o ICS (0.76) e POD (0.42). Em DJF os valores de ICS e POD foram os menores, 0.65 e 0.16, respectivamente. A ocorrência deste evento foi superestimada em DJF (BIAS = 1.15) e SON (BIAS = 1.53). Em MAM e JJA a e c foram nulos (não houve realização do evento de chuva considerado), zerando os valores de POD, SKILL e BIAS. Os valores de F foram mais distantes/próximos de 0.00 em JJA/SON, 0.34 e 0.10, respectivamente, indicando, por essa métrica, que em SON houve maior credibilidade na previsão de um evento de chuva acima da média que nos

outros períodos (FAR foi menor em SON também, sendo 0.35). A previsão do modelo Coral para o evento chuva abaixo da média (chuva < p33), apresentou maiores valores (e próximos do valor ideal) de SKILL em MAM (0.72) e SON (0.93), indicando uma boa qualidade da previsão do modelo nestes períodos. O ICS foi próximo do valor ideal em todos os períodos, sendo maior em SON (0.97). Em JJA, a previsão de eventos de chuva abaixo da média foi superestimada (BIAS = 2.57) e nos demais períodos foi subestimada, especialmente em DJF (0.28). O POD foi próximo do valor ideal em MAM (0.92). Os índices F e FAR foram próximos dos valores ideais, sendo menores em SON (0.05 e 0.09, respectivamente). Em DJF, o parâmetro *a* foi nulo, *b* foi nulo em JJA e *c* foi nulo em SON.

A análise com os índices construídos a partir da definição do evento de chuva dentro da média ($p33 \leq \text{chuva} \leq p66$) utilizando-se os percentis mensais mostrou que a SKILL do modelo foi maior em SON (0.25). O ICS foi mais próximo do valor ideal em MAM (0.71) e SON (0.63). Os eventos de chuva dentro da média foram subestimados na maior parte do ano (em MAM *a* e *c* foram nulos (não houve realização do evento de chuva considerado); *c* foi nulo em SON). O valor de POD foi maior em JJA (0.52). Os índices F e FAR tem os valores mais distantes do ideal em DJF (0.55 e 0.91, respectivamente). Em MAM o valor de F foi menor (0.29) e FAR foi menor/mais próximo do ideal em JJA (0.58; F=0.37). A previsão para o evento chuva acima da média, teve maior SKILL em MAM (0.36), bem como o ICS (0.79) e POD (0.60), e menor valor em SON (SKILL = 0.09). A análise do BIAS indicou que o modelo superestimou a ocorrência de chuva acima da média em DJF (1.10) e especialmente em SON (6.67), em JJA *a* e *c* foram nulos. Os índices F e FAR foram mais próximos dos valores ideais em SON (0.03 e 0.33, respectivamente). A previsão para o evento chuva abaixo da média, teve maior SKILL em MAM (0.22), bem como o ICS (0.59) e POD (0.53). O menor valor de SKILL foi em SON (0.16). O ICS e POD foram menores em DJF (0.43 e 0.03, respectivamente). Os valores do BIAS indicaram que o modelo superestimou a ocorrência de chuva acima da média no ano, especialmente em JJA (3.67) e DJF (2.26), em JJA *b* foi nulo. Os índices F e FAR foram mais próximos dos valores ideais em MAM (0.13 e 0.05, respectivamente).

Tabela 14: Índices avaliadores do modelo Coral encontrados para a bacia do Paranaíba.

Paranaíba - Análise Sazonal					
Evento	Índice	DJF	MAM	JJA	SON
p33 ≤ chuva ≤ p66	ICS	0,44	0,56	0,42	0,73
	BIAS	1,21	2,40	1,07	0,84
	POD	0,53	0,37	0,39	0,70
	F	0,77	0,08	0,56	0,26
chuva > p66	FAR	0,36	0,10	0,58	0,41
	SKILL	-0,27	0,23	-0,16	0,42
	ICS	0,65	0,69	0,66	0,76
	BIAS	1,15	0,00	0,00	1,53
chuva < p33	POD	0,16	-	-	0,42
	F	0,20	0,31	0,34	0,10
	FAR	0,82	1,00	1,00	0,35
	SKILL	-0,05	0,00	0,00	0,36
RMSE	ICS	0,73	0,87	0,70	0,97
	BIAS	0,28	0,82	2,57	0,91
	POD	0,00	0,92	0,39	1,00
	F	0,22	0,16	0,00	0,05
	FAR	1,00	0,25	0,00	0,09
SKILL	-0,10	0,72	0,39	0,39	
RMSE	51,78	34,46	6,85	49,24	

Paranaíba - Análise Mensal					
Evento	Índice	DJF	MAM	JJA	SON
p33 ≤ chuva ≤ p66	ICS	0,40	0,71	0,59	0,63
	BIAS	0,44	0,00	0,79	0,25
	POD	0,19	-	0,52	1,00
	F	0,55	0,29	0,37	0,42
chuva > p66	FAR	0,91	1,00	0,58	0,75
	SKILL	-0,24	0,00	0,14	0,25
	ICS	0,67	0,79	0,60	0,67
	BIAS	1,10	0,70	0,00	6,67
chuva < p33	POD	0,52	0,60	-	0,10
	F	0,24	0,17	0,40	0,03
	FAR	0,42	0,58	1,00	0,33
	SKILL	0,29	0,36	0,00	0,09
RMSE	ICS	0,43	0,59	0,52	0,58
	BIAS	2,26	1,79	3,67	1,18
	POD	0,03	0,53	0,27	0,53
	F	0,29	0,13	0,00	0,37
	FAR	0,94	0,05	0,00	0,38
SKILL	-0,28	0,22	0,20	0,16	
RMSE	51,78	34,46	6,85	49,24	

A análise da Tabela 15, considerando os eventos encontrados com os percentis sazonais, mostrou para a bacia do Grande o maior valor da SKILL em SON (0.23), bem como do ICS e POD (0.65 e 0.49, respectivamente). Neste período, os valores de BIAS (1.02), F (0.26) e FAR (0.50) foram os mais próximos dos valores ideais. Em DJF, MAM e JJA o modelo Coral tendeu a subestimar a ocorrência dos eventos de chuva dentro da média histórica (BIAS < 1.00). No período mais seco e de transição, os parâmetros F e FAR foram mais próximos de 1.00, indicando uma previsão deste evento na bacia com pouca credibilidade. Em MAM *a* foi nulo. O evento de chuva acima da média foi mais bem previsto em SON (SKILL = 0.17, ICS = 0.65, POD = 0.42). Os valores de F e FAR foram os menores, mas ainda sim bem distantes dos valores ideais. O modelo Coral tendeu a subestimar os eventos de chuva acima da média em todos os períodos. Em MAM e JJA, os parâmetros *a* e *c* foram nulos; *a* foi nulo em DJF. A ocorrência do evento chuva abaixo da média na bacia do Grande tendeu a ser superestimada pelo Coral. O melhor desempenho do modelo foi em DJF (ICS = 0.69, POD = 0.52, SKILL = 0.38, F = 0.14 e FAR = 0.22). Os parâmetros *a* e *c* foram nulos em JJA e SON, respectivamente e *b* foi nulo em todos os períodos, exceto DJF.

A análise com os índices construídos a partir da definição do evento de chuva dentro da média utilizando-se os percentis mensais teve os parâmetros *a* e *c* nulos em MAM e SON; *c* foi nulo em DJF. O período de JJA teve o melhor desempenho da previsão do Coral (ICS = 0.73, POD = 0.65, SKILL = 0.28, F = 0.26 e FAR = 0.66). A análise do BIAS mostrou que o modelo tendeu a subestimar os eventos de precipitação dentro da média em DJF e JJA. O estudo dos eventos de precipitação acima da média na bacia do Grande resultou nos parâmetros *a* e *c* nulos em MAM e JJA; *b* foi nulo em DJF e *a* foi nulo em SON. O ICS teve o maior valor em SON (0.81). O BIAS do Coral foi maior neste período (10.00); em DJF e SON os eventos de chuva acima da média foram superestimados. O evento de chuva abaixo da média teve maior SKILL em SON (0.09), ICS em DJF (0.52) e POD em MAM. Os indicadores F e FAR tiveram os menores valores em SON (0.03, para ambos).

Tabela 15: Mesmo que a Tabela 14, mas para a bacia do Grande.

Grande - Análise Sazonal					
Evento	Índice	DJF	MAM	JJA	SON
p33≤chuva≤p66	ICS	0.53	0.26	0.47	0.65
	BIAS	0.80	0.76	0.36	1.02
	POD	0.46	0.00	0.32	0.49
	F	0.44	0.62	0.50	0.26
	FAR	0.64	1.00	0.88	0.50
SKILL	0.02	-0.57	-0.10	0.23	
chuva > p66	ICS	0.61	0.66	0.47	0.65
	BIAS	0.68	0.00	0.00	0.98
	POD	0.00	-	-	0.42
	F	0.27	0.34	0.53	0.25
	FAR	1.00	1.00	1.00	0.58
SKILL	-0.23	0.00	0.00	0.17	
chuva < p33	ICS	0.69	0.56	0.17	1.00
	BIAS	1.49	2.83	-	1.00
	POD	0.52	0.35	0.00	1.00
	F	0.14	0.00	0.00	0.00
	FAR	0.22	0.00	-	0.00
SKILL	0.38	0.26	0.00	1.00	
RMSE	53.57	43.36	17.42	54.33	

Grande - Análise Mensal					
Evento	Índice	DJF	MAM	JJA	SON
p33≤chuva≤p66	ICS	0.44	0.71	0.73	0.22
	BIAS	0.24	0.00	0.53	0.00
	POD	1.00	-	0.65	-
	F	0.68	0.29	0.26	0.78
	FAR	0.76	1.00	0.66	1.00
SKILL	0.14	0.00	0.28	0.00	
chuva > p66	ICS	0.77	0.70	0.32	0.81
	BIAS	3.44	0.00	0.00	10.00
	POD	0.29	-	-	0.00
	F	0.00	0.30	0.68	0.02
	FAR	0.00	1.00	1.00	1.00
SKILL	0.36	0.00	0.00	-0.03	
chuva < p33	ICS	0.52	0.41	0.17	0.37
	BIAS	2.91	2.43	-	4.03
	POD	0.19	0.41	0.00	0.24
	F	0.16	-	0.00	0.03
	FAR	0.45	0.00	-	0.03
SKILL	0.03	0.00	0.00	0.09	
RMSE	53.57	43.36	17.42	54.33	

A análise da Tabela 16, considerando os eventos encontrados com os percentis sazonais, mostrou para a bacia do Paranapanema em DJF e JJA uma subestimativa dos eventos de precipitação dentro da média pelo modelo Coral. O período de JJA, em todas as métricas, foi o período no qual a qualidade da previsão do Coral foi maior. Os parâmetros a e c foram nulos para MAM e JJA. Na análise da precipitação acima da média, o parâmetro a foi nulo em SON e o parâmetro b foi nulo em DJF e SON. Em DJF, o modelo tendeu a superestimar os eventos acima da média, e em MAM e JJA a tendência foi de subestimar a ocorrência desses eventos. O ICS foi maior em DJF (0.89), bem como a SKILL (0.49). O POD foi maior em JJA (0.87). A análise dos eventos abaixo da média mostrou o parâmetro a nulo em JJA e o parâmetro b foi nulo em MAM e JJA. O período de DJF teve maior ICS (0.51) e POD (0.47). O modelo Coral tendeu a superestimar a ocorrência destes eventos em DJF, MAM e SON. Em SON, o valor de F (0.70) indicou que o Coral fez muitas previsões de que a chuva seria abaixo da média, mas no realizado a chuva não foi abaixo da média.

Para a análise com os percentis mensais, para o evento dentro da média, o modelo Coral teve um melhor desempenho no período de MAM, mas o valor de FAR foi alto (0.70). A SKILL foi 0.27, ICS 0.61 e POD 0.97. Os parâmetros a e c foram nulos em SON. O evento de chuva acima da média foi mais bem previsto em JJA (ICS = 0.60, BIAS = 0.90, POD = 0.46, F = 0.33, FAR = 0.59 e SKILL = 0.12). O modelo tendeu a superestimar a ocorrência desses eventos em DJF (5.00) e especialmente em SON (30.00). O parâmetro a foi nulo em todos os períodos, exceto JJA. A previsão do modelo Coral para os eventos abaixo da média mostrou o valor mais alto de ICS em JJA (0.67). Os parâmetros a e b foram nulos em JJA e em SON o parâmetro d foi nulo.

Tabela 16 Mesmo que a Tabela 14, mas para a bacia do Paranapanema.

Paranapanema - Análise Sazonal					
Evento	Índice	DJF	MAM	JJA	SON
p33 ≤ chuva ≤ p66	ICS	0,40	0,34	0,63	0,48
	BIAS	0,44	0,00	0,54	0,00
	PODD	0,19	-	0,87	-
	F	0,55	0,66	0,50	0,52
chuva > p66	FAR	0,91	1,00	0,53	1,00
	SKILL	-0,24	0,00	0,31	0,00
	ICS	0,89	0,75	0,75	0,83
	BIAS	2,73	0,90	0,45	-
chuva < p33	PODD	0,37	0,26	0,87	0,00
	F	0,00	0,16	0,28	0,00
	FAR	0,00	0,77	0,61	-
	SKILL	0,49	0,10	0,40	0,00
Hmse	ICS	0,51	0,33	0,51	0,41
	BIAS	1,34	4,93	-	1,73
	PODD	0,47	0,20	0,00	0,43
	F	0,44	0,00	0,00	0,70
Hmse	FAR	0,37	0,00	-	0,25
	SKILL	0,03	0,07	0,00	-0,15
	Hmse	47,34	50,13	30,72	68,50

Paranapanema - Análise Mensal					
Evento	Índice	DJF	MAM	JJA	SON
p33 ≤ chuva ≤ p66	ICS	0,59	0,61	0,38	0,30
	BIAS	0,60	0,31	0,54	0,00
	PODD	0,82	0,97	0,51	-
	F	0,56	0,46	0,69	0,70
chuva > p66	FAR	0,51	0,70	0,73	1,00
	SKILL	0,24	0,27	-0,15	0,00
	ICS	0,79	0,55	0,60	0,82
	BIAS	5,00	0,52	0,90	30,00
chuva < p33	PODD	0,00	0,00	0,46	0,00
	F	0,04	0,35	0,33	0,01
	FAR	1,00	1,00	0,59	1,00
	SKILL	-0,06	-0,25	0,12	-0,01
Hmse	ICS	0,47	0,34	0,67	0,13
	BIAS	1,42	4,37	-	2,79
	PODD	0,23	0,13	0,00	0,15
	F	0,36	0,21	0,00	1,00
Hmse	FAR	0,67	0,44	-	0,58
	SKILL	-0,13	-0,06	0,00	-0,38
	Hmse	47,34	50,13	30,72	68,50

A análise da Tabela 17, considerando os eventos encontrados com os percentis sazonais, mostrou para a bacia do Iguaçu mostrou que a previsão do modelo Coral foi melhor em MAM e JJA. Os melhores valores de ICS (0.80), POD (0.44) e F (0.17) foram encontrados em MAM. Em JJA foram encontrados os melhores valores de FAR (0.45) e SKILL (0.49). O BIAS foi menor que o valor na maioria do ano, indicando que a previsão do modelo tendeu a subestimar a ocorrência dos eventos de precipitação dentro da média no período analisado. O parâmetro *a* foi nulo em SON e o parâmetro *b* foi nulo em JJA e SON. Os eventos de chuva acima da média foram mais bem previstos pelo Coral em DJF e JJA. O parâmetro *a* foi nulo em DJF e MAM e o parâmetro *c* foi nulo em MAM e JJA. Para os eventos abaixo da média, o Coral teve um melhor desempenho em JJA, com ICS = 0.55 e SKILL = 0.09. O parâmetro *b* foi nulo em MAM e JJA.

A análise com os índices construídos a partir da definição do evento de chuva dentro da média utilizando-se os percentis mensais mostrou que a SKILL do modelo foi maior em SON (0.24). O ICS (0.60) e o BIAS (0.95) em JJA foram os valores mais próximos do ideal. Em MAM, a previsão do Coral superestimou a ocorrência dos eventos dentro da média, e nos demais períodos o modelo subestimou a ocorrência dos mesmos. Os valores de F (0.32) e FAR (0.41) foram mais próximos de zero em MAM e JJA, respectivamente. Para os eventos acima da média, a SKILL do modelo foi maior em JJA (0.36), bem como os valores de ICS (0.74), POD (0.81) e FAR (0.63), sendo que este último não é próximo do valor ideal (0.00). O parâmetro *a* foi nulo em todos os períodos, exceto JJA e o parâmetro *c* foi nulo em MAM. Nos eventos abaixo da média, o ICS foi melhor em JJA (0.57). O BIAS foi notavelmente grande em MAM (46.50), e o modelo Coral tendeu a superestimar a ocorrência desses eventos nos demais períodos. O menor valor de F (0.16) ocorreu em JJA e o menor valor de FAR (0.28) em SON. O parâmetro *a* foi nulo em JJA e o parâmetro *b* foi nulo em MAM

Tabela 17 Mesmo que a Tabela 14, mas para a bacia do Iguaçu.

Iguaçu – Análise Sazonal					
Evento	Índice	DJF	MAM	JJA	SON
p33 ≤ chuva ≤ p66	ICS	0,37	0,80	0,73	0,36
	BIAS	0,40	0,36	0,55	0,00
	POD	0,25	0,44	1,00	-
	F	0,60	0,17	0,41	0,64
chuva > p66	FAR	0,90	0,84	0,45	1,00
	SKILL	-0,23	0,15	0,49	0,00
	ICS	0,89	0,27	0,82	0,78
	BIAS	1,25	0,00	0,49	1,33
chuva < p33	POD	0,00	-	1,00	0,08
	F	0,05	0,73	0,21	0,11
	FAR	1,00	1,00	0,51	0,89
	SKILL	-0,05	0,00	0,56	-0,03
chuva < p33	ICS	0,33	0,15	0,55	0,37
	BIAS	1,71	11,18	11,25	3,37
	POD	0,34	0,09	0,09	0,28
	F	0,67	0,00	0,00	0,08
	FAR	0,42	0,00	0,00	0,05
	SKILL	-0,25	0,01	0,09	0,07
RMSE		76,46	106,77	60,14	75,50

Iguaçu – Análise Mensal					
Evento	Índice	DJF	MAM	JJA	SON
p33 ≤ chuva ≤ p66	ICS	0,45	0,50	0,60	0,60
	BIAS	0,07	1,18	0,95	0,34
	POD	0,33	0,08	0,63	0,87
	F	0,55	0,32	0,43	0,46
chuva > p66	FAR	0,98	0,91	0,41	0,70
	SKILL	-0,03	-0,26	0,20	0,24
	ICS	0,73	0,27	0,74	0,73
	BIAS	5,71	0,00	0,46	1,14
chuva < p33	POD	0,00	-	0,81	0,00
	F	0,05	0,73	0,28	0,14
	FAR	1,00	1,00	0,63	1,00
	SKILL	-0,07	0,00	0,36	-0,15
chuva < p33	ICS	0,33	0,31	0,57	0,48
	BIAS	1,74	46,50	3,16	1,97
	POD	0,33	0,02	0,00	0,37
	F	0,67	0,00	0,16	0,29
	FAR	0,43	0,00	1,00	0,28
	SKILL	-0,25	0,01	-0,19	0,06
RMSE		76,46	106,77	60,14	75,50

A análise da Tabela 18, considerando os eventos encontrados com os percentis sazonais, mostrou para a bacia do Uruguai em DJF o melhor desempenho do modelo Coral (ICS = 0.75, BIAS = 1.56, POD = 0.51, F = 0.09, FAR = 0.21 e SKILL = 0.45). Em JJA e SON, o modelo tendeu a subestimar a ocorrência da precipitação dentro da média, e em DJF e MAM, houve superestimativa. Em JJA o valor de FAR é 0.98, indicando uma previsão duvidosa para o evento. O parâmetro *c* foi nulo em SON. Para os eventos de chuva acima da média, o parâmetro *a* foi nulo em todos os períodos, exceto JJA, e o parâmetro *c* foi nulo em MAM. O ICS foi maior em SON (0.82) e o POD teve melhor valor (0.55) em JJA. O modelo tendeu a subestimar a ocorrência dos eventos em DJF e JJA, e em SON houve superestimativa. Os eventos de chuva abaixo da média foram superestimados em todos os períodos pela previsão do modelo Coral. O parâmetro *b* foi nulo em SON. O ICS foi maior em SON (0.89), bem como o POD (0.82).

A análise com os índices construídos a partir da definição do evento de chuva dentro da média utilizando-se os percentis mensais mostrou que o modelo Coral previu melhor os eventos dentro de DJF e SON. Em MAM a ocorrência dos eventos foi superestimada e nos períodos restantes, foi subestimada. Os parâmetros *a* e *c* foram nulos em SON. Para os eventos acima da média, os parâmetros *a* e *c* foram nulos em MAM, e o parâmetro *a* foi nulo em DJF. Para os eventos abaixo da média, o parâmetro *b* foi nulo em SON. O desempenho do modelo Coral foi melhor em SON para ambos os eventos.

Tabela 18: Mesmo que a Tabela 14, mas para a bacia do Uruguai.

Uruguai - Análise Sazonal					
Evento	Índice	DJF	MAM	JJA	SON
p33 ≤ chuva ≤ p66	ICS	0,75	0,49	0,62	0,71
	BIAS	1,56	3,22	0,73	0,38
	POD	0,51	0,14	0,03	1,00
	F	0,09	0,17	0,26	0,34
	FAR	0,21	0,56	0,96	0,63
SKILL	0,45	-0,03	-0,20	0,39	
chuva > p66	ICS	0,74	0,62	0,27	0,82
	BIAS	0,29	0,00	0,45	31,00
	POD	0,00	-	0,55	0,00
	F	0,22	0,38	0,88	0,01
	FAR	1,00	1,00	0,76	1,00
SKILL	-0,10	0,00	-0,25	-0,01	
chuva < p33	ICS	0,57	0,33	0,51	0,89
	BIAS	1,01	1,07	45,00	1,21
	POD	0,61	0,30	0,01	0,82
	F	0,47	0,64	0,01	0,00
	FAR	0,39	0,68	0,50	0,00
SKILL	0,14	-0,35	0,00	0,77	
RMSE	46,64	61,60	86,63	24,62	

Uruguai - Análise Mensal					
Evento	Índice	DJF	MAM	JJA	SON
p33 ≤ chuva ≤ p66	ICS	0,63	0,38	0,63	0,69
	BIAS	0,71	2,64	0,77	0,00
	POD	0,35	0,07	0,03	-
	F	0,29	0,31	0,25	0,31
	FAR	0,75	0,82	0,97	1,00
SKILL	0,05	-0,24	-0,19	0,00	
chuva > p66	ICS	0,71	0,67	0,27	0,82
	BIAS	0,26	0,00	0,44	6,20
	POD	0,00	-	0,56	0,06
	F	0,24	0,33	0,88	0,02
	FAR	1,00	1,00	0,75	0,60
SKILL	-0,10	0,00	-0,24	0,07	
chuva < p33	ICS	0,40	0,34	0,50	0,83
	BIAS	1,55	1,05	30,00	1,25
	POD	0,41	0,32	0,01	0,80
	F	0,62	0,64	0,02	0,00
	FAR	0,36	0,67	0,67	0,00
SKILL	-0,16	-0,33	-0,01	0,58	
RMSE	46,64	61,60	86,63	24,62	

A Tabela 19 abaixo mostra os valores encontrados para o RMSE nas bacias. Para as bacias do Iguaçu e Uruguai, o erro da previsão foi maior em MAM e JJA, respectivamente. Para as bacias do Paranaíba e Grande, o erro da previsão foi menor no período seco, o que pode ser justificado pelos baixos acumulados esperados para estas bacias, que tem a sazonalidade da precipitação bem definida. A bacia do Paranapanema tem o maior valor de RMSE em SON.

Tabela 19: Valores encontrados para o RMSE.

RMSE (mm)				
Bacia	DJF	MAM	JJA	SON
Paranaíba	52	34	7	49
Grande	54	43	17	55
Paranapanema	47	50	31	69
Iguaçu	76	107	60	75
Uruguai	47	62	89	25

As únicas situações em que nenhum dos parâmetros de contingência foram nulos foi na bacia do Paranaíba, na análise da chuva dentro da média com os percentis definidos sazonalmente e na bacia do Iguaçu, para os eventos de precipitação dentro da média, mas definidos com os percentis mensais. Assim, as conclusões sobre as qualidades e pontos de atenção da previsão do modelo Coral não puderam ser totalmente determinadas pelas metodologias aplicadas neste estudo. Um horizonte maior de previsão e um método alternativo de medida de qualidade de previsão podem ser uma alternativa para estudos futuros.

4. Conclusões

As previsões do modelo Coral LSTM 60 dias foram analisadas nas bacias dos rios Paranaíba, Grande, Paranapanema, Iguaçu e Uruguai. As bacias do Paranaíba e Grande apresentam uma sazonalidade bem definida, consistindo em um período chuvoso de dezembro a fevereiro e um período seco de maio a meados de setembro. As bacias do Iguaçu e Uruguai não possuem sazonalidade no regime de precipitação, podendo ser consideradas como bacias com climatologias *flat* ao longo do ano. A bacia do Paranapanema está localizada entre as bacias com sazonalidade bem definida e as bacias sem sazonalidade expressiva, e assim apresentou características das duas observações: sazonalidade mais suave que as bacias do Grande e Paranaíba, e mais marcante que as bacias do Iguaçu e Uruguai. As diferenças encontradas na distribuição das chuvas ao longo do ano nas bacias estudadas se devem aos diferentes sistemas meteorológicos atuantes, bem como suas frequências espaço-temporais.

A quantidade limitada de previsões do modelo Coral LSTM 60 dias tornou o estudo da qualidade da previsão deste modelo para eventos extremos secos/chuvosos, dentro da metodologia adotada neste estudo, inviável, sendo que um método distinto para definição de um evento extremo poderia ser uma solução para estudos futuros. A evolução da previsão do modelo para os eventos extremos identificados nos dados realizados de precipitação mostra que conforme a data de inicialização do modelo se aproxima do horizonte de previsão analisado, a qualidade da saída do modelo é melhor.

O estudo do evento de precipitação dentro, acima e abaixo da média também foi prejudicado pelo curto horizonte disponível de previsões operacionais do modelo Coral, na época de elaboração deste trabalho. A análise para todas as bacias teve muitos dos parâmetros da tabela de contingência zerados, por isso, os resultados dos qualificadores da previsão do Coral divergiram em grande proporção entre os períodos. Por esse motivo, as métricas encontradas para a avaliação da previsão do modelo ficaram limitadas e podem não refletir a verdadeira qualidade das previsões. De forma geral, o modelo Coral

tendeu a prever com maior qualidade os eventos escolhidos nos períodos de SON e MAM, e com menor qualidade os eventos no período de DJF.

Os erros da previsão em relação aos acumulados reais de precipitação são maiores nas bacias sul e são menores em JJA, que é o período seco das bacias do Paranaíba e Grande.

Referências bibliográficas

Alupar (2020): Alupar Institucional. Disponível em: <http://www.alupar.com.br/a-companhia/>. Acesso em: 18/08/2019

ANA (2014): Conjuntura dos Recursos Hídricos no Brasil – Regiões Hidrográficas Brasileiras, (2014). Disponível em: <http://www.snirh.gov.br/porta1/snirh/centrais-de-conteudos/conjuntura-dos-recursos-hidricos/regioeshidrograficas2014.pdf>. Acesso em: 19/07/2019.

ANA (2015): Nota Técnica/Agência Nacional de Águas – Qualidade da Água (2015). Disponível em: http://pirhgrande.ana.gov.br/Arquivos/2.Diagnostico_Preliminar/NT_Qualidade%20da%20Agua%20-%20Revisada.pdf. Acesso em: 16/07/2019.

ANA (2017): Mapas Regiões Hidrográficas. Disponível em: <https://www.ana.gov.br/todos-os-documentos-do-portal/documentos-spr/mapas-regioes-hidrograficas/>. Acesso em: 13/05/2019.

ANA (2019): Comitês de Bacias Hidrográficas por região. Disponível em: <https://www.ana.gov.br/aguas-no-brasil/sistema-de-gerenciamento-de-recursos-hidricos/comites-de-bacia-hidrografica/>. Acesso em: 11/02/2020.

ANA (2020): Panorama das águas. Disponível em: https://www.ana.gov.br/aguas-no-brasil/panorama-das-aguas/copy_of_divisoes-hidrograficas. Acesso em: 18/02/2020.

ANNEL (2004): Resolução Normativa ANEEL n. 109, de 26 de outubro de 2004 (Diário Oficial, de 10 nov. 2004, seção 1, p. 47). Disponível em: <http://www2.aneel.gov.br/cedoc/ren2004109.pdf>. Acesso em: 18/02/2020.

ANNEL (2019): Portaria n. 15, de 25 de setembro de 2019 (Diário Oficial, de 01 out. 2019, seção 1, p. 56). Disponível em: <http://www2.aneel.gov.br/cedoc/prt2019015se.pdf>. Acesso em: 21/02/2020.

Caderno RH Uruguai (2006): Caderno da Região Hidrográfica do Uruguai / Ministério do Meio Ambiente, Secretaria de Recursos Hídricos. – Brasília: MMA, 2006. 128 p. Disponível em:

https://www.mma.gov.br/estruturas/161/_publicacao/161_publicacao03032011023025.pdf. Acesso em: 22/04/2019.

CARVALHO, L. M. V.; JONES, C.; LIEBMANN, B. Extreme precipitation events in southeastern South America and large-scale convective patterns in the South Atlantic convergence zone. **Journal of Climate**, v. 15, n. 17, p. 2377–2394, 2002.

CARVALHO, L. M. V.; JONES, C.; LIEBMANN, B. The South Atlantic convergence zone: Intensity, form, persistence, and relationships with intraseasonal to interannual activity and extreme rainfall. **Journal of Climate**, v. 17, n. 1, p. 88–108, 2004.

CEMIG (2019): Companhia Energética de Minas Gerais – Rio Grande. Disponível em: http://www.cemig.com.br/ptbr/A_Cemig_e_o_Futuro/sustentabilidade/nossos_programas/ambientais/peixe_vivo/Paginas/rio_grande.aspx. Acesso em: 22/06/2019.

DOSS-GOLLIN, J.; MUÑOZ, Á. G.; MASON, S. J.; PASTÉN, M. Heavy rainfall in Paraguay during the 2015/16 austral summer: Causes and subseasonal-to-seasonal predictive skill. **Journal of Climate**, v. 31, n. 17, p. 6669–6695, 2018.

DOSWELL, C. A.; DAVIES-JONES, R.; KELLER, D. L. On Summary Measures of Skill in Rare Event Forecasting Based on Contingency Tables. **Weather and Forecasting**, 5(4), 576–585, 1990.

EPE (2020): Sistemas Isolados. Disponível em: <http://www.epe.gov.br/pt/publicacoes-dados-abertos/publicacoes/sistemas-isolados>. Acesso em: 17/01/2020.

FERRANTI, L.; PALMER, T. N.; MOLTENI, F.; KLINKER, E.E. Tropical–extratropical interaction associated with the 30–60-day oscillation and its impact on medium and extended range prediction. **J. Atmos. Sci.**, 47, 2177–2199, 1990.

FILHO, A. J. P.; VEMADO, F.; VEMADO, G.; et al. A step towards integrating CMORPH precipitation estimation with rain gauge measurements. **Advances in Meteorology**, v. 2018, 2018.

FUNK, C.; PETERSON, P.; LANDSFELD, M.; et al. The climate hazards infrared precipitation with stations - A new environmental record for monitoring extremes. **Scientific Data**, v. 2, p. 1–21, 2015.

GAN, M. A.; KOUSKY, V. E.; ROPELEWSKI, C. F. The South America Monsoon circulation and its relationship to rainfall over west-central Brazil. **Journal of Climate**, v. 17, n. 1, p. 47–66, 2004.

GARREAUD, R. D.; VUILLE, M.; COMPAGNUCCI, R.; MARENGO, J. Present-day South American climate. **Palaeogeography, Palaeoclimatology, Palaeoecology**, v. 281, n. 3–4, p. 180–195, 2009. Elsevier B.V. Disponível em: <<http://dx.doi.org/10.1016/j.palaeo.2007.10.032>>. .

GRIMM, A. M.; AMBRIZZI, T. **Teleconnections into South America from the Tropics and Extratropics on Interannual and Intraseasonal Timescales**. 2009.

GRIMM, A. M.; FERRAZ, S. E. T.; GOMES, J. Precipitation anomalies in southern Brazil associated with El Niño and La Niña events. **Journal of Climate**, v. 11, n. 11, p. 2863–2880, 1998.

GRIMM, A. M.; TEDESCHI, R. G. ENSO and extreme rainfall events in South America. **Journal of Climate**, v. 22, n. 7, p. 1589–1609, 2009.

GUETTER, A. K.; ZAIKOVSKI, M.B.; PILANTIR, J.O. Variabilidade Climática Interanual e Efeitos das Mudanças Climáticas Globais na Bacia do Rio Paraná, SIMEPAR / ANEEL / PNUD / MCT, 209 páginas, 2000.

HARTMANN, D. L.; MICHELSEN, M. L. Haartmann and Michelin.pdf. **Journal of Atmospheric Sciences**, 1989.

HAYLOCK, M. R.; PETERSON, T. C.; ALVES, L. M.; et al. Trends in total and extreme South American rainfall in 1960-2000 and links with sea surface temperature. **Journal of Climate**, v. 19, n. 8, p. 1490–1512, 2006.

HUFFMAN, G. J.; ADLER, R. F.; BOLVIN, D. T.; et al. The TRMM Multisatellite Precipitation Analysis (TMPA): Quasi-global, multiyear, combined-sensor precipitation estimates at fine scales. **Journal of Hydrometeorology**, v. 8, n. 1,

p. 38–55, 2007.

KESSLER, K. S.; MCPHADEN Oceanic equatorial waves and the 1991–93 El Niño. *J. Climate*, 8, 1757–1774, 1995.

KIDD, C.; LEVIZZANI, V. Status of satellite precipitation retrievals. **Hydrology and Earth System Sciences**, v. 15, n. 4, p. 1109–1116, 2011.

KOUSKY, V. E.; KAYANO, M. T. Principal modes of outgoing longwave radiation and 250-mb circulation for the South American sector. **J. Climate**, 7, 1131–1143, 1994.

LO, F.; HENDON, H. Empirical prediction of the Madden–Julian oscillation. **Mon. Wea. Rev.**, 128, 2528–2543, 2000.

MADDEN, R.A.; JULIAN, P.R. Detection of a 40–50 Day Oscillation in the Zonal Wind in the Tropical Pacific. **J. Atmos. Sci.**, 28, 702–708, 1971.

MADDEN, R.A.; JULIAN, P.R. Observations of the 40 – 50 day tropical oscillation: A review, **Mon. Weather Rev.**, 112, 814 – 837, 1994.

MADEIRA, P. D.; RAMOS, C.; NASCIMENTO, A. Influência da Oscilação Madden Julian no comportamento da energia armazenada nos reservatórios SIN. As questões climáticas e os impactos nos negócios de energia, rio de Janeiro: FGV Energia, 2018. p. 9-14.

MANTUA, N. J.; HARE, S. R.; ZHANG, Y.; WALLACE, J. M.; FRANCIS, R. C. A Pacific Interdecadal Climate Oscillation with Impacts on Salmon Production. **Bulletin of the American Meteorological Society**, v. 78, n. 6, p. 1069–1079, 1997.

MO, K. C.; HIGGINS, R. W. The Pacific-South American modes and tropical convection during the Southern Hemisphere winter. **Monthly Weather Review**, v. 126, n. 6, p. 1581–1596, 1998.

MO, K. C. Adaptive filtering and prediction of intraseasonal oscillations. **Monthly Weather Review**, v. 129, p. 802–817, 2001.

MURPHY, A. H.; WINKLER, R. L. A General Framework for Forecast Verification,

Monthly Weather Review, 115(7), 1330-1338, 1987.

NNAMCHI, H. C.; LI, J. Influence of the South Atlantic Ocean dipole on West African summer precipitation. **Journal of Climate**, v. 24, n. 4, p. 1184–1197, 2011.

ONS (2007): Novo modelo de previsões de vazões com informação de precipitação para a bacia do rio Iguaçu. Disponível em: https://www2.aneel.gov.br/aplicacoes/consulta_publica/documentos/NT_149_2007_Fuzzy_Igua%C3%A7u.pdf. Acesso em: 20/10/2019.

ONS (2008): Nota Técnica 139-2008, Revisão 1: Metodologia para a previsão de vazões uma semana à frente a Bacia do Alto/Médio Rio Grande, ONS. Disponível em: https://www2.aneel.gov.br/aplicacoes/consulta_publica/documentos/NT%20139-2008%20R1.pdf. Acesso em: 19/08/2019.

ONS (2020): O que é o SIN? Disponível em: <http://www.ons.org.br/paginas/sobre-o-sin/o-que-e-o-sin>. Acesso em: 12/12/2019.

ONS (2020): Energia Agora – Reservatórios. Disponível em: <http://www.ons.org.br/paginas/energia-agora/reservatorios>. Acesso em: 17/12/2019.

Paranaíba (2018): Boletim Mensal – ANA. Disponível em: https://www.ana.gov.br/sala-de-situacao/paranaiba/boletins/mensal/boletim_paranaiba_dez-2018.pdf/view. Acesso em: 13/01/2020.

PEDRON, I. T.; SILVA DIAS, M. A. F.; DE PAULA DIAS, S.; CARVALHO, L. M. V.; FREITAS, E. D. Trends and variability in extremes of precipitation in Curitiba – Southern Brazil. **International Journal of Climatology**, v. 37, n. 3, p. 1250–1264, 2017.

PEN (2019): Sumário Executivo do Plano da Operação Energética 2019-2023. Disponível em: http://www.ons.org.br/AcervoDigitalDocumentosEPublicacoes/PEN_Executivo_

2019-2023.pdf. Acesso em: 15/01/2020.

PENALBA, O. C.; ROBLEDO, F. A. Spatial and temporal variability of the frequency of extreme daily rainfall regime in the La Plata Basin during the 20th century. **Climatic Change**, v. 98, n. 3, p. 531–550, 2010.

PEREZ, G. M. P. Improving the quantitative precipitation forecast: a deep learning approach. Mestrado IAG, 2018.

PIRH (2016): Plano Integrado de Recursos Hídricos da Unidade de Gestão de Recursos Hídricos Paranapanema, 2016. Disponível em: <https://paranapanema.org/plano/admin/upload/documento/61.pdf>. Acesso em: 13/01/2020.

PMO (2020): Programação Mensal da Operação – Fevereiro/2020 – Apresentação de Médio Prazo. Disponível em: <https://sintegre.ons.org.br/sites/9/52/paginas/servicos/historico-de-produtos.aspx>. Acesso em: 16/02/2020.

PRH Paranaíba (2015): Plano de Recursos Hídricos e do Enquadramento dos Corpos Hídricos Superficiais da Bacia Hidrográfica do Rio Paranaíba, 2015. Disponível em: <http://arquivos.ana.gov.br/institucional/sge/CEDOC/Catalogo/2015/PRHDaBaciaHidrograficaDoRioParanaiba.pdf>. Acesso em: 13/01/2020.

RAO, V. B.; HADA, K. Characteristics of rainfall over Brazil: Annual variations and connections with the Southern Oscillation. **Theoretical and Applied Climatology**, v. 42, n. 2, p. 81–91, 1990.

ROPELEWSKI, C. F.; JONES, P. D. An Extension of the Tahiti–Darwin Southern Oscillation Index. **Monthly Weather Review**, 1987.

SENA, E. T.; DIAS, M. A. F. S.; CARVALHO, L. M. V.; DIAS, P. L. S. Reduced wet-season length detected by satellite retrievals of cloudiness over Brazilian Amazonia: A new methodology. **Journal of Climate**, v. 31, n. 24, p. 9941–9964, 2018.

SHIMIZU, M. H.; AMBRIZZI, T. MJO influence on ENSO effects in precipitation

and temperature over South America. **Theoretical and Applied Climatology**, v. 124, n. 1–2, p. 291–301, 2016.

SILVA DIAS, M. A. F.; CARVALHO, L. M. V.; Large-scale index for South America Monsoon (LISAM). **Atmos Sci Lett**, v. 8, p. 51–57, 2007.

SILVA DIAS, M. A. F.; DIAS, J.; CARVALHO, L. M. V.; FREITAS, E. D.; SILVA DIAS, P. L. Changes in extreme daily rainfall for São Paulo, Brazil. **Climatic Change**, v. 116, n. 3–4, p. 705–722, 2013.

SINDAT (2019): Sistema Interligado Nacional – Rede de Operação – Horizonte 2023. Disponível em: <http://sindat.ons.org.br/SINDAT/Home/ControleSistema>. Acesso em: 22/09/2019.

SON, S. W.; LIM, Y.; YOO, C.; HENDON, H. H.; KIM, J. Stratospheric control of the madden-julian oscillation. **Journal of Climate**, v. 30, n. 6, p. 1909–1922, 2017.

SOUZA, E. B.; AMBRIZZI, T. Modulation of the Intraseasonal rainfall over Tropical Brazil by the Madden-Julian Oscillation. **Int. J. Climatol.**, v. 26, p. 1759–1776, 2006.

TRENBERTH, K. E.; HURRELL, J. W. Decadal atmosphere-ocean variations in the Pacific. **Climate Dynamics**, v. 9, n. 6, p. 303–319, 1994.

VITART, F. Evolution of ECMWF sub-seasonal forecast skill scores. **Quarterly Journal of the Royal Meteorological Society**, v. 140, n. 683, p. 1889–1899, 2014.

WALISER, D. E.; JONES, C.; SCHEMM, J. K. E.; GRAHAM, N. E. A statistical extended-range tropical forecast model based on the slow evolution of the Madden-Julian oscillation. **Journal of Climate**, v. 12, n. 7, p. 1918–1939, 1999.

WANG, B.; HO, L. Rainy season of the Asian-Pacific summer monsoon. **Journal of Climate**, v. 15, n. 4, p. 386–398, 2002.

WHEELER, M.; WEICKMANN, K. M. Real-time monitoring and prediction of modes of coherent synoptic to intraseasonal tropical variability. **Monthly Weather Review**, v. 129, n. 11, p. 2677–2694, 2001.

WOLTER, K.; TIMLIN, M. S. How does 1997/1998 rank? events : **Weather**, v. 53, n. 9, p. 315–324, 1998.

ZHANG, C. MADDEN-JULIAN OSCILLATION. , , n. 2004, p. 1–36, 2005.

ZILLI, M. T.; CARVALHO, L. M. V.; LIEBMANN, B.; SILVA DIAS, M. A. A comprehensive analysis of trends in extreme precipitation over southeastern coast of Brazil. **International Journal of Climatology**, v. 37, n. 5, p. 2269–2279, 2017.