



UNIVERSIDADE FEDERAL DO RIO GRANDE DO SUL
INSTITUTO DE PESQUISAS HIDRÁULICAS
CURSO DE ENGENHARIA HÍDRICA



RAFAELA CRISTINA DE OLIVEIRA

**SPERS – SISTEMA DE PREVISÃO DE RECESSÃO EM
ESTIAGEM PARA O RIO GRANDE DO SUL**

Porto Alegre
Fevereiro de 2024

RAFAELA CRISTINA DE OLIVEIRA

SPERS – Sistema de previsão de recessão em estiagem para o Rio Grande do Sul

Trabalho de Conclusão de Curso em Engenharia Hídrica da Universidade Federal do Rio Grande do Sul, como parte dos requisitos para obtenção de Engenharia Hídrica

Orientador: Fernando Mainardi Fan

Coorientadora: Ingrid Petry

Porto Alegre

2024

CIP - Catalogação na Publicação

Cristina de Oliveira, Rafaela
SPERS - SISTEMA DE PREVISÃO DE RECESSÃO EM ESTIAGEM
PARA O RIO GRANDE DO SUL / Rafaela Cristina de
Oliveira. -- 2024.
93 f.
Orientador: Fernando Mainardi Fan.

Coorientadora: Ingrid Petry.

Trabalho de conclusão de curso (Graduação) --
Universidade Federal do Rio Grande do Sul, Instituto
de Pesquisas Hidráulicas, Curso de Engenharia Hidrica,
Porto Alegre, BR-RS, 2024.

1. seca. 2. níveis de rios. 3. previsão. I.
Mainardi Fan, Fernando, orient. II. Petry, Ingrid,
coorient. III. Título.

Folha de Aprovação

Rafaela Cristina de Oliveira

SPERS – Sistema de previsão de recessão em estiagem para o Rio Grande do Sul

Trabalho de Conclusão de Curso em Engenharia Hídrica da Universidade Federal do Rio Grande do Sul defendido e aprovado em 15/02/2024 pela Comissão Avaliadora constituída pelos por:

Banca Examinadora:

.....
Ingrid Petry – PPGRHSA/UFRGS

.....
Diego Polacchini Carrilo – DIMETEC/SEMA-RS

.....
Prof. Dr. Anderson Ruhoff – IPH/UFRGS

RESUMO

Secas são fenômenos complexos e não existe um consenso para a sua definição. Existem vários tipos de seca, classificadas de acordo com o impacto que causam na sociedade e na natureza. A seca hidrológica, objeto de estudo desse trabalho, gera anomalia do regime de vazões de rios, provocando a redução dos níveis, dos níveis de água subterrânea ou diminuição de áreas úmidas. Quando ocorre a seca hidrológica, os rios passam por períodos de recessão, ocasionando o rebaixamento dos níveis ao longo do tempo, aliados a falta de precipitação. O estado do Rio Grande do Sul passou recentemente por um período de seca, entre os anos de 2020 e 2023, trazendo inúmeros prejuízos econômicos e ambientais. Assim, a busca por alternativas capazes de prever os comportamentos futuros de recursos hídricos se faz necessária, buscando auxiliar na gestão de recursos hídricos para garantir a disponibilidade hídrica necessária a sociedade. Nesse sentido, o presente trabalho busca apresentar um sistema de previsão de níveis para recessão em estiagem para o estado do RS. O sistema foi programado em linguagem de programação python, e identifica os períodos de recessão, calcula os seus coeficientes de recessão e aplica esse coeficiente para a geração de vazões futuras, gerando assim previsões de níveis de rios. O sistema foi avaliado através do diagrama ROC, buscando verificar a sua eficiência nas taxas de detecção e de falsa detecção da ocorrência de limiares de atenção a estiagem. O sistema se mostrou uma ferramenta com potencial para auxiliar a gestão de recursos hídricos ao enfrentamento de períodos de estiagem.

Palavras-chave: seca, níveis de rios, previsão.

ABSTRACT

Droughts are complex phenomena and there is no consensus on their definition. There are several types of drought, classified according to the impact they have on society and nature. Hydrological drought, the object of study in this work, generates anomalies in the river flow regime, causing a reduction in levels, groundwater levels or a reduction in wetlands. When hydrological drought occurs, rivers go through periods of recession, causing levels to drop over time, combined with a lack of precipitation. The state of Rio Grande do Sul recently went through a period of drought, between 2020 and 2023, causing countless economic and environmental losses. Therefore, the search for alternatives capable of predicting the future behavior of water resources is necessary, seeking to assist in the management of water resources to guarantee the water availability necessary for society. In this sense, the present work seeks to present a level forecast system for recession during drought for the state of RS. The system was programmed in Python programming language, and identifies periods of recession, calculates their recession coefficients and applies this coefficient to generate future flows, thus generating forecasts of river levels. The system was evaluated using the ROC diagram, seeking to verify its efficiency in the detection and false detection rates of the occurrence of drought attention thresholds. The system proved to be a tool with the potential to help manage water resources in coping with periods of drought.

Keywords: drought, river levels, forecast.

LISTA DE FIGURAS

Figura 1. Plataforma de monitoramento de secas nos EUA.....	17
Figura 2. <i>European hydrology seasonal forecast explorer</i>	18
Figura 3. Sistema do <i>River Forecast Centre</i>	19
Figura 4. Monitor de secas do Brasil.	20
Figura 5. Plataforma do SARDIM.	22
Figura 6. Situação do nível dos rios no monitor de estiagem.	23
Figura 7. Curva de permanência.	26
Figura 8. Hidrograma do Rio dos Bois.	27
Figura 9. Estiagem do Rio dos Bois nas escalas normal (esquerda) e logarítmica (direita).	28
Figura 10. Apresentação da separação do escoamento por Linsley.	28
Figura 11. Separação do escoamento por filtros numéricos.....	29
Figura 12. Bacias hidrográficas do estado.	31
Figura 13. Distribuição espacial das chuvas no estado.....	32
Figura 14. Altitudes do RS.....	33
Figura 15. Unidades Geomorfológicas do RS.	34
Figura 16. Situação do Rio Gravataí no período de estiagem.....	36
Figura 17. Percentual de chuva ocorrido de novembro/2011 a maio/2012.....	37
Figura 18. Variações da temperatura do mar de 2018 a 2021.	38
Figura 19. Notícias sobre o período de seca do site GZH.....	39
Figura 20. Fluxograma da metodologia.	43
Figura 21. Tabela de contingência e diagrama ROC.....	48
Figura 22. Estações telemétrica selecionadas.	50
Figura 23. Cotagrama da estação 87380000.	54
Figura 24. Mapa da distribuição espacial dos coeficientes de recessão medianos...57	
Figura 25. Mapa da distribuição espacial dos coeficientes de recessão do percentil 25.	59
Figura 26. Mapa da distribuição espacial dos coeficientes de recessão do percentil 75.	60
Figura 27. Previsões para a estação 77150000 – parte 1.....	64
Figura 28. Previsões para a estação 77150000 – parte 2.....	66
Figura 29. Previsões para a estação 77150000 – parte 3.....	67
Figura 30. Previsões para a estação 87380000 – parte 1.....	68
Figura 31. Previsões para a estação 87380000 – parte 2.....	69
Figura 32. Previsões para a estação 87380000 – parte 3.....	70
Figura 33. Previsões para a estação 87399000 – parte 1.....	71
Figura 34. Previsões para a estação 87399000 – parte 2.....	72
Figura 35. Previsões para a estação 87399000 – parte 3.....	73
Figura 36. Diagrama ROC para a estação 77150000 – parte 1.....	76
Figura 37. Diagrama ROC para a estação 77150000 – parte 2.....	77
Figura 38. Diagrama ROC para a estação 77150000 – parte 3.....	78
Figura 39. Diagrama ROC para a estação 87830000 – parte 1.....	79
Figura 40 Diagrama ROC para a estação 87830000 – parte 2.....	80

Figura 41. Diagrama ROC para a estação 87830000 – parte 3.	81
Figura 42. Diagrama ROC para a estação 87399000 – parte 1.	82
Figura 43. Diagrama ROC para a estação 87399000 – parte 2.	83
Figura 44. Diagrama ROC para a estação 87399000 – parte 3.	84
Figura 45. Resumo dos resultados do diagrama ROC para todas as estações.	89
Figura 46. Webgis do sistema de previsão.	90
Figura 47. Dados das estações e previsão de níveis para a estação 77150000.	91

LISTA DE TABELAS

Tabela 1. Informações sobre as estações telemétricas selecionadas.	51
Tabela 2. Limiares calculados para cada uma das estações.....	55
Tabela 3. Coeficientes de recessão calculados.....	61
Tabela 4. Número de previsões para cada uma das estações.....	62
Tabela 5. Classificação dos resultados de POD e POFD.....	85
Tabela 6. Resultados de POD e POFD para os horizontes 1,3 e 5.....	85

SUMÁRIO

1. INTRODUÇÃO	11
2. OBJETIVOS	14
2.1 OBJETIVO GERAL	14
2.2 OBJETIVOS ESPECÍFICOS.....	14
3. REVISÃO BIBLIOGRÁFICA	14
3.1 Seca e estiagem	14
3.2 Métodos de previsão de estiagem – experiências em nível mundial	16
3.2.1 Estados Unidos.....	16
3.2.2 Países europeus.....	17
3.2.4 Canadá	18
3.3 Métodos de previsão de seca – experiências no Brasil	19
3.3.1 Monitor de Secas	19
3.3.2 SARDIM.....	21
3.3.3 Sala de Situação do estado do Rio Grande do Sul.....	22
3.4 Dados hidrológicos	24
3.5 Hidrologia estatística aplicada a determinação de vazões de referência baseadas na frequência	25
3.5.1 Comportamento de bacias hidrográficas durante a recessão	26
4. ÁREA DE ESTUDO	30
4.1 Hidrografia	30
4.2 Precipitação	31
4.3 Hipsometria e unidades geomorfológicas	32
4.4 Eventos recentes de estiagem no Rio Grande do Sul	34
4.4.1 Evento de 2004 – 2005.....	35
4.4.2 Evento de 2012.....	36
4.4.3 Evento de 2019 – 2020.....	37
4.4.4 Evento de 2020 – 2023.....	39
4.5 Projeções futuras	41
5. METODOLOGIA.....	43
5.1 Estações telemétricas.....	43
5.3 Detecção dos períodos de estiagem.....	44
5.5 Coeficientes de recessão.....	45

5.6 Geração de níveis.....	46
5.8 Validação do sistema	47
6. RESULTADOS.....	49
6.1 Estações selecionadas	49
6.2 Limiares	54
6.1 Coeficientes de recessão.....	56
6.2 Previsão de cotas	62
6.3 Diagramas ROC	74
7. DISPONIBILIDADE DO SOFTWARE.....	90
8. CONCLUSÃO.....	92
9. REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS	94

1. INTRODUÇÃO

A seca é um fenômeno complexo e sem definição consensual (LLOYD-HUGHES, 2014). A seca hidrológica é um fenômeno que gera anomalia nas vazões de rios, com diminuição de seus níveis, dos níveis de água subterrânea ou diminuição de áreas úmidas (THOMAS *et al.*, 2014). Ela é um fenômeno complexo, e resultado da combinação de processos atmosféricos e hidrológicos ocorrendo em diferentes escalas de tempo (CUARTAS *et al.*, 2022). Por ser um fenômeno complexo, suas causas também são complexas, e pois não depende somente de fatores atmosféricos, mas também dos processos hidrológicos que geram umidade para a atmosfera, que armazenam água e que geram escoamento (VAN LOON, 2015).

A seca pode ser dividida de acordo com os seus impactos nos diferentes setores da sociedade, sendo possível classificá-la em: meteorológica, agrícola, socioeconômica, subterrânea e ecológica. A ocorrência desses diferentes tipos de seca geralmente ocorre concomitantemente, onde uma gera a outra. Então, a ocorrência de um evento de seca em locais sem adequado planejamento hídrico pode trazer desabastecimento de água, prejuízos agrícolas, oscilação de preços de produção de energia hidrelétrica, entre outros.

Assim como as secas, a estiagem também ocorre a partir da diminuição significativa ou ausência de precipitação. Os eventos apresentam diferenças, intensidade, duração de ocorrência e impacto nas taxas de evapotranspiração. Assim, o fenômeno da estiagem pode ser definido como uma seca de menor impacto, ocorrendo em um período de tempo menor.

Segundo a Conjuntura de Recursos Hídricos do ano de 2022 (ANA, 2023) de 2019 a 2021 cerca de 44 milhões de pessoas foram afetadas por eventos relacionados a secas e estiagens no Brasil, registrando 5.437 eventos de seca relacionados a danos humanos. Analisando o ano de 2021, mais de 12 milhões de pessoas foram afetadas por secas e estiagens no país, somando 1.950 eventos, em 1.155 municípios. Nesse mesmo ano na região Sul ocorreram 17% dos eventos de seca, ficando atrás apenas da região Nordeste, que apresentou 67,4% dos eventos.

O plano “Supera Estiagem” do estado do Rio Grande do Sul apresenta que o estado enfrentou 5 grandes períodos de estiagem nos últimos 20 anos, em 2004, 2005, 2012, 2020 e 2022. Até 15 de fevereiro de 2023, 284 municípios se encontravam em situação de emergência, contabilizando 5,8 milhões de pessoas afetadas e R\$ 13

bilhões em prejuízos municipais. Além disso, no mesmo ano, o estado passou por reduções de 20,8% e 30,6% nas suas produções de soja e milho, segundo a Empresa de Assistência Técnica e Extensão rural (EMATER/RS).

O enfrentamento de situações de extremos climáticos pode ser feito através de ferramentas hidrológicas que auxiliem a sociedade a passar por esses períodos com redução de danos. Uma das ferramentas é a previsão hidrológica. A partir do momento em que a população e o Estado têm informações sobre as prováveis alterações dos níveis de rios, medidas como o remanejamento de outorgas, racionamento de água, planejamento do tráfego em hidrovias, entre outras, podem ser adotadas, principalmente quando os níveis já se aproximam a condições de alerta.

Assim, o presente trabalho busca desenvolver e analisar um sistema de previsão de recessão hidrológica durante períodos de estiagem. O sistema busca trazer previsões de níveis de rios para diferentes horizontes, com o objetivo de auxiliar na gestão de recursos hídricos. Com as previsões será possível tomar medidas de controle de disponibilidade hídrica antes que os níveis ultrapassem as cotas de atenção e alerta para estiagem.

A seguir serão apresentados os seguintes capítulos: objetivos, explicando os objetivos gerais e específicos do trabalho; a revisão bibliográfica, mostrando estudos já realizados na área; área de estudo, apresentando características do estado do Rio Grande do Sul; metodologia, explicando os passos realizados para a criação do sistema; resultados, contendo os resultados encontrados com a aplicação do sistema; conclusão do trabalho; e referências bibliográficas.

2. OBJETIVOS

A seguir serão apresentados o objetivo geral e os objetivos específicos do trabalho.

2.1 OBJETIVO GERAL

O objetivo geral do trabalho é desenvolver um sistema capaz prever os níveis de rios do Rio Grande do Sul para períodos de estiagem, sem previsão de chuva no horizonte, utilizando dados de estações hidrológicas telemétricas.

2.2 OBJETIVOS ESPECÍFICOS

Os objetivos específicos do trabalho são:

- Calcular os coeficientes de recessão diários para as estações.
- Fazer previsões de níveis utilizando diferentes percentis dos coeficientes de recessão.
- Avaliar o desempenho das previsões.
- Desenvolver um protótipo de apresentação dos dados.

3. REVISÃO BIBLIOGRÁFICA

O presente capítulo tem como objetivo apresentar os conceitos e teorias que embasaram o desenvolvimento deste trabalho. A intenção é introduzir ao leitor os conceitos de estiagem e seca, apresentar como é feita a previsão de estiagem no Brasil e em outros países, mostrar a aquisição de dados de níveis de estações meteorológicas, e por fim, explicar conceitos de hidrologia que compõem a metodologia.

3.1 Seca e estiagem

A seca é um fenômeno complexo e sem definição consensual (LLOYD-HUGHES, 2014). Segundo Wilhite *et al.* (2019), o fenômeno da seca por ter definições conceituais e operacionais. A escala de tempo de falta de precipitação é

extremamente importante para definir o tipo de seca. A seguir serão apresentadas as algumas classificações de tipos de secas. A seca meteorológica pode ser definida como a falta prolongada de precipitação de uma região. Já a seca agrícola acarreta a diminuição da umidade do solo, limitando o crescimento de uma cultura. A seca socioeconômica se refere a escassez de água, com impactos ecológicos ou de saúde (VAN LOON, 2015).

Recentemente, também foram propostas mais duas classificações de secas: a seca subterrânea e a seca ecológica. A seca subterrânea caracteriza-se por ocorrer em um período que pode ir de meses a anos, reduzindo a recarga de águas subterrâneas, seus níveis e vazões de descarga (MISHRA; SINGH, 2010). Já a seca ecológica leva os seus ecossistemas aos seus limites de vulnerabilidade, impactando serviços ecossistêmicos, enfatizando sistemas naturais e humanos (CRAUSBAY *et al.*, 2017).

A seca hidrológica (objeto de estudo nesse trabalho), é um fenômeno que gera anomalia nas vazões de rios, com diminuição de seus níveis, dos níveis de água subterrânea ou diminuição de áreas úmidas (THOMAS *et al.*, 2014). Ela é um fenômeno complexo, e resultado da combinação de processos atmosféricos e hidrológicos ocorrendo em diferentes escalas de tempo (CUARTAS *et al.*, 2022). Por ser um fenômeno complexo, suas causas também são complexas, e pois não depende somente de fatores atmosféricos, mas também dos processos hidrológicos que geram umidade para a atmosfera, que armazenam água e que geram escoamento (VAN LOON, 2015).

Tanto as anomalias de precipitação, quanto de temperatura podem estar associadas a fenômenos atmosféricos de grande escala, como padrões oceânicos El Niño Southern Oscillation (ENSO) e North ATLANTIC OSCILATION (NAO) e a alteração da temperatura de superfície dos mares (KINGSTON (2012) e KINGSTON (2014), apud VAN LOON, 2015).

Segundo Van Loon (2015), o déficit prolongado de precipitação leva a alterações no sistema hidrológico, diminuindo as vazões de escoamento, os níveis dos rios e o armazenamento de água subterrânea. Então, a ocorrência de um evento de seca sem planejamento hídrico pode trazer desabastecimento de água, prejuízos agrícolas, oscilação de preços de produção de energia hidrelétrica, entre outros.

Durante um evento de estiagem o escoamento superficial geralmente é baixo, porém, a evapotranspiração potencial pode aumentar, em função do aumento da radiação, velocidade do vento ou déficit de pressão de vapor. Conseqüentemente, pode ocorrer o aumento da evapotranspiração real, levando a perda de água pelo solo e por corpos de água. Em um evento extremo de seca, a falta de umidade no solo leva ao murchamento das plantas, podendo levar a limitação nas taxas de evapotranspiração, levando, possivelmente, ao esgotamento da umidade do solo. Esse esgotamento pode levar a diminuição da precipitação local, fazendo a manutenção das condições de seca (VAN LOON, 2015).

Assim como as secas, a estiagem ocorre a partir da diminuição significativa ou não ocorrência de precipitação. Os eventos apresentam diferenças, intensidade, duração de ocorrência e impacto nas taxas de evapotranspiração. Assim, o fenômeno da estiagem pode ser definido como uma seca de menor impacto, ocorrendo em um período de tempo menor.

3.2 Métodos de previsão de estiagem – experiências em nível mundial

A seguir serão apresentados alguns métodos selecionados de previsão de estiagem utilizados em diferentes países.

3.2.1 Estados Unidos

Nos Estados Unidos existe o “*National Oceanic and Atmospheric Administration*”¹ (NOAA), que disponibiliza dados observados e previstos de níveis de rios, chamado “*River conditions*”. A plataforma apresenta as estações em uma escala de cores de acordo com o limiar de nível em que a estação está. As previsões de níveis dos rios são geradas a partir de um sistema de modelagem hidrológica acoplado a um sistema de previsão. Dentro do NOAA existe um projeto de monitoramento de secas chamado U. S. Drought Monitor², onde é apresentada a situação atual da ocorrência de secas, com diferentes intensidades, nos Estados Unidos. A plataforma também apresenta informações sobre as secas, explica os seus graus de impacto e disponibiliza o download dos mapas contendo as informações. A Figura 1 apresenta uma imagem da plataforma:

¹ Mais informações em: <https://water.weather.gov/ahps/rfc/rfc.php>

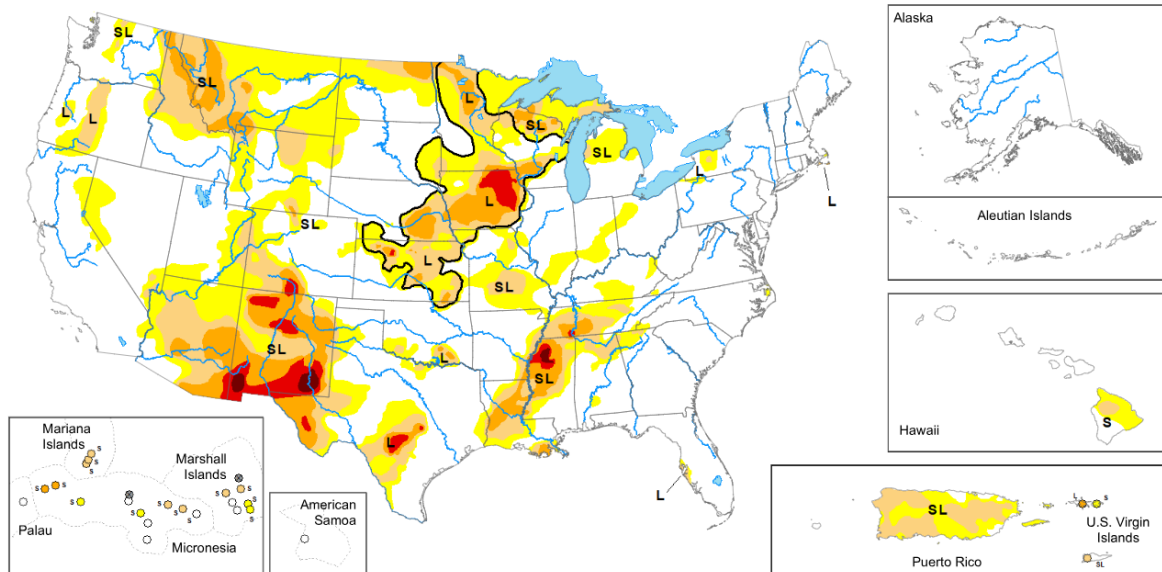
² Mais informações em: <https://droughtmonitor.unl.edu/>

Figura 1. Plataforma de monitoramento de secas nos EUA.

Map released: February 8, 2024

Data valid: February 6, 2024

View grayscale version of the map



Fonte: U. S. Drought Monitor, 2024.

3.2.2 Países europeus

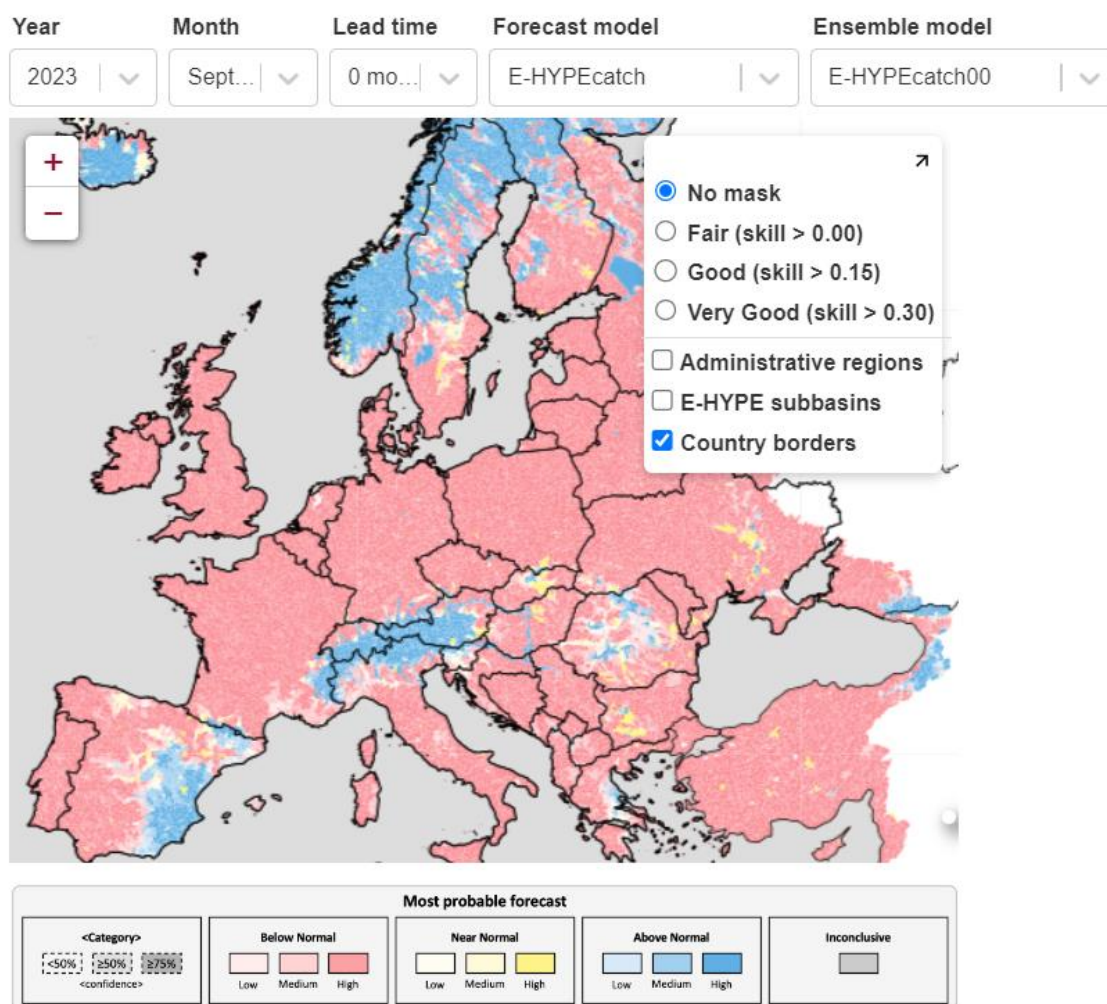
Para os países europeus está disponível uma plataforma chamada “*European hydrology seasonal forecast explorer*”³, que apresenta previsões sazonais de vazão média a partir de um conjunto de modelos hidrológicos (Figura 2). As previsões do modelo são baseadas nas previsões meteorológicas do SEAS5 do ECMWF e os modelos hidrológicos utilizados são: E-HYPE, EHYPEgrid, VIC-WUR e EFAS. O usuário pode escolher na plataforma um modelo hidrológico, a data de início da previsão, as antecedências e o modelos dos conjuntos. Os resultados são apresentados em três classificações: abaixo do normal, perto do normal e acima do normal.

Para cada uma das classes também são feitas três distinções: baixo, médio e alto. Assim, os resultados abaixo do normal são apresentados com as cores em tons de rosa, os resultados de perto do normal em tons de amarelo e os resultados acima do normal em tons de azul. Os resultados apresentados em cinza são inconclusivos. Também é possível visualizar mais resultados clicando em uma região no mapa

³ Mais informações em: <https://cds.climate.copernicus.eu/cdsapp#!/software/app-hydrology-seasonal-forecast-explorer?tab=app>

apresentado, onde será aberto um conjunto de *boxplots* com as suas distribuições de dados variando nas categorias de perto, acima e abaixo do normal.

Figura 2. *European hydrology seasonal forecast explorer*.



Fonte: *European hydrology seasonal forecast explorer*, 2023.

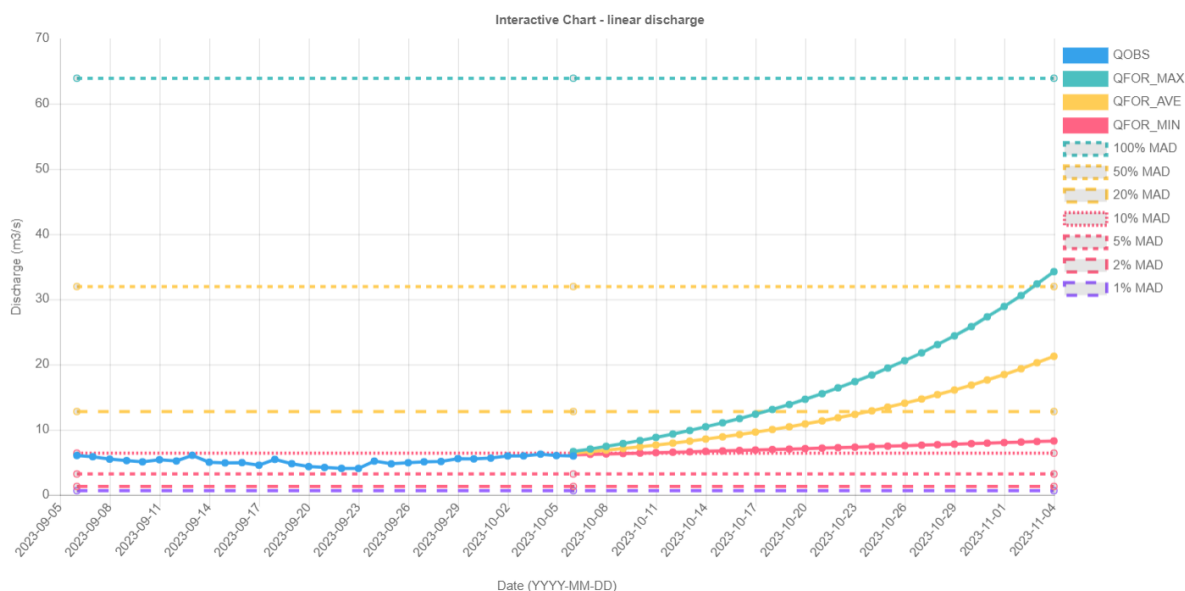
3.2.4 Canadá

Segundo o “*River Forecast Centre*”⁴, a Universidade de British Columbia, localizada no Canadá, desenvolveu um sistema de previsão de vazão e níveis matemático e empírico com o horizonte de 30 dias para os períodos secos do verão enfrentados pelo país. O nome do sistema é “*Extrapolating Logarithmic Flow*”, e ele foi aplicado em toda a região da Columbia Britânica do Canadá, utilizando dados de estações hidrometeorológicas da “*Water Survey of Canada*”. É importante ressaltar

⁴ Mais informações em: http://bcrcf.env.gov.bc.ca/lowflow/map_elf.html

que o sistema não utiliza fatores climáticos para a determinação da previsão de vazão. O mapa do aplicativo mostra uma série de pontos em diferentes cores (Figura 3). A escala de cores é apresentada abaixo do mapa, onde cada cor apresenta uma porcentagem de descarga anual média. Clicando em um dos pontos e escolhendo a opção “more info” no campo “Hydrograph_url”, será aberta uma janela de visualização dos seguintes dados: vazão observada, vazões previstas médias, máximas e mínimas (para os próximos 30 dias) e limiares de porcentagens de vazões anuais médias. Os mesmos resultados são apresentados para os dados de níveis.

Figura 3. Sistema do *River Forecast Centre*.



Fonte: *Extrapolating Logarithmic Flow*, 2023.

3.3 Métodos de previsão de seca – experiências no Brasil

A seguir serão apresentadas ferramentas que fazem a previsão, monitoramento ou auxiliam na divulgação de informações relevantes sobre períodos de seca no Brasil:

3.3.1 Monitor de Secas

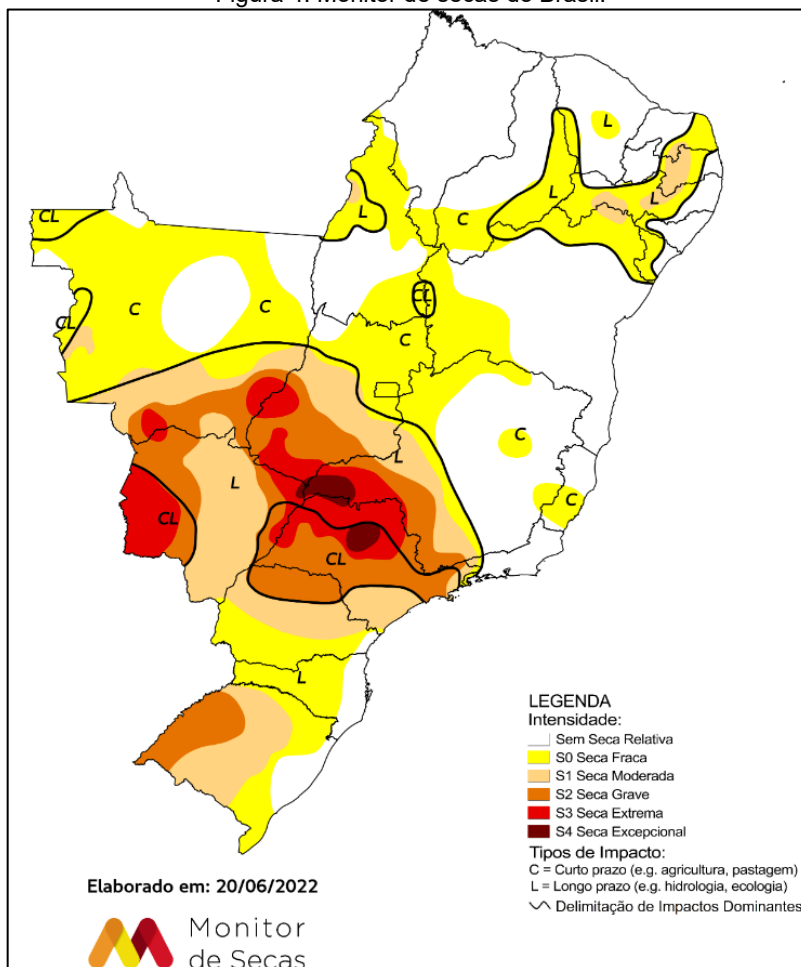
No Brasil também existem algumas ferramentas que tem como objetivo fazer o monitoramento de secas. Uma dessas ferramentas é o “Monitor de Secas do Brasil”⁵,

⁵ Mais informações em: <https://monitordesecas.ana.gov.br/mapa?mes=5&ano=2022>

que apresenta a situação atual de secas no país. O monitor está sendo desenvolvido com base em um projeto que vinha sendo desenvolvido para a região semiárida do país. A iniciativa conta com o Apoio do Banco Mundial e parcerias internacionais para a sua implementação. Atualmente, o monitor conta com a Agência Nacional de águas como instituição central, responsável pela coordenação do projeto em nível federal, com os estados e pela expansão do projeto.

Através de um mapa ele classifica os eventos ocorridos em 6 categorias, em uma escala de cores que varia do amarelo ao vermelho escuro, de acordo com a intensidade da seca, sendo elas: Sem Seca Relativa, S0 Seca Fraca, S1 Seca Moderada, S2 Seca Grave, S3 Seca extrema e S4 Seca excepcional. O monitor também avalia a duração dos eventos, classificando-os como: curto prazo (últimos 3, 4 e 6 meses), representado pela letra “C”, afetando a agricultura e a pastagem, e longo prazo (últimos 12, 18 e 24 meses), representado pela letra “L”, afetando a hidrologia e a ecologia. A Figura 4 apresenta a interface do monitor:

Figura 4. Monitor de secas do Brasil.



Fonte: Monitor de Secas, 2023.

As regiões classificadas como “Seca fraca” estão passando por um período de início de seca, apresentando veranico curto, menor prazo de plantio e crescimento de culturas e pastagens. Também são enquadradas nessa classificação regiões que estão saindo de períodos de déficits hídricos prolongados. As regiões classificadas em “Seca Moderada” já apresentam danos às suas culturas e pastagens, assim como córregos, reservatórios ou poços com níveis mais baixos. Outro ponto a ser observado é a ocorrência de restrições voluntárias de uso da água sendo solicitadas a população. Já as regiões classificadas como “Seca grave” apresentam perda de cultura ou pastagem, escassez de água e restrições de água impostas. A classificação de “Seca extrema” está presente em regiões com grandes perdas de culturas ou pastagens, escassez de água generalizada ou com restrições. A “Seca excepcional” é o evento de maior impacto classificado pelo monitor. Ela se caracteriza pela perda de culturas ou pastagens excepcionais e generalizadas, escassez de água nos reservatórios, córregos e poços de água, gerando situações de emergência.

O monitor é abastecido com dados provenientes de instituições parcerias, como umidade de solo, vazão e precipitação, que são validadas pelas pessoas que vivem e trabalham nas regiões de seca. Juntamente com o mapa é apresentado um boletim da situação atual das secas no país, mostrando as modificações ocorridas em cada mês. Destaca-se a expansão do monitor, partindo da região nordeste e avançando para os outros estados do país, com o acréscimo do estado do Rio Grande do Sul em agosto de 2020, apresentando grande parte do seu território já em estado de seca.

3.3.2 SARDIM

O grupo de pesquisa de “Hidrologia de Grande Escala” desenvolveu uma plataforma de monitoramento da vazão de rios da América do Sul – *South America River Discharge Monitor* (SARDIM)⁶ através de tecnologias de modelagem hidrológica em grande escala. A plataforma apresenta as permanências atual, sazonal atual, máx/mín nos últimos 30 dias, tempo de retorno atual e tempo de retorno máx/min nos últimos 30 dias, das vazões simuladas com o modelo MGB-AS com dados de chuva do sistema GPM. Mais informações podem ser acessadas na documentação do

⁶ Mais informações em: <https://www.ufrgs.br/sardim/>

modelo hidrológico proposto por (SIQUEIRA *et al.*, 2018). A escala de cores apresentada no mapa da América do Sul varia de vermelho (representando a estiagem) a azul (apresentando a cheia). A plataforma pode ser utilizada como uma ferramenta de gestão de recursos hídricos, já que apresenta dados do comportamento dos cursos hídricos no período de tempo atual. Para o enfrentando a estiagens, a plataforma apresenta as vazões de estiagem nas cores vermelhas, mostrando o impacto da estiagem nos cursos d'água. A Figura 5 apresenta a plataforma do SARDIM:

Figura 5. Plataforma do SARDIM.



Fonte: SARDIM, 2023.

3.3.3 Sala de Situação do estado do Rio Grande do Sul

No estado do Rio Grande do Sul, foi criada a Sala de Situação como uma parceria entre a ANA e a Secretaria Estadual de Meio Ambiente (SEMA), tornando-se referência no monitoramento das condições hidrometeorológicas do estado do Rio Grande do Sul. Além disso, a Sala de Situação também é responsável por aplicar modelos numéricos meteorológicos, analisar imagens de satélite e realizar previsões de cheia. A sala também tem articulações com a Defesa Civil do estado, emitindo avisos de condições de tempo, e também boletins mensais, semanais e diários, fornecendo subsídios técnicos para o estado e para a população geral. A sala apresenta um portal onde são disponibilizadas as informações de previsão e monitoramento.

Outro produto desenvolvido para o estado do Rio Grande do Sul foi o “Monitor de Estiagem”⁷. A plataforma apresenta os municípios que noticiaram situação de emergência devido à estiagem, a estimativa da população afetada, prejuízos municipais, entre outros. Além disso, também é apresentada a situação do nível dos rios (em pontos de monitoramento), através de uma classificação em 6 divisões: “Seguro”, abrangendo as permanências de 10 a 75%, “Atenção Estiagem”, abrangendo as permanências de 85 a 90%, “Crítico”, apresentando permanências superiores a permanência de 95%, “Intermediário”, nas permanências de 75 a 85%, “Alerta de estiagem”, variando de 85 a 90% e “Sem dados”, em estações que não apresentam dados. Lembrando que as permanências citadas são calculadas com base na curva de permanência dos níveis dos rios.

Figura 6. Situação do nível dos rios no monitor de estiagem.



Fonte: Monitor de estiagem, 2023.

Destaca-se também a presença de outros dados, como: Sistemas de abastecimento de água potável, Agricultura, Perdas de Produtividade, Reservatórios de geração de energia e chuvas observadas e previstas. Dentro do contexto da sala

⁷ Mais informações em:

<https://codexremote.com.br/monitorestiagem/?page=Situa%C3%A7%C3%A3o&views=Situa%C3%A7%C3%A3o-do-n%C3%ADvel-dos-rios%2CExibir-17>

de situação foi desenvolvido um trabalho com o objetivo de determinar limiares de estiagem, indicadores de baixa disponibilidade hídrica, elaborado por Giacomelli et al, 2021. O trabalho tem como objetivo avaliar e apresentar propostas para a definição de limiares de estiagem, utilizando dados da Sala de Situação e da Defesa Civil do Rio Grande do Sul. O estudo também buscar subsidiar ações para garantir a segurança hídrica e minimizar os impactos negativos causados por eventos de estiagem.

3.4 Dados hidrológicos

A ocorrência de um evento de seca pode ser percebida através do monitoramento de corpos hídricos. A Agência Nacional de Águas e Saneamento Básico (ANA) faz o monitoramento de corpos hídricos em todo o Brasil através de estações hidrometeorológicas, através da “Rede Hidrometeorológica Nacional (RHN)”. Nas estações são medidos níveis de rios, vazão, precipitação, seção transversal, qualidade da água, entre outros. Segundo o levantamento de 2018, existem 4.641 pontos de monitoramento em 1.874 rios ao longo do território brasileiro. Para o monitoramento de todos esses pontos a agência conta com o apoio de parceiros, como a Companhia de Pesquisa de Recursos Minerais (CPRM), entre outros. Esses dados são muito importantes, já que para a realização de estudos hidrológicos é essencial conhecer o corpo hídrico de estudo a longo prazo. Os dados podem ser obtidos através de duas fontes: as estações convencionais e as estações telemétricas. As estações convencionais apresentam as séries históricas diárias ao longo dos anos para todo o Brasil, e passam por um processo de consistência de dados. Já as estações telemétricas fornecem dados geralmente a cada 15 minutos, pelo sistema de telemetria, e não possuem correção.

Os dados históricos das estações convencionais são disponibilizados na plataforma “Hidroweb”, que pode ser acessada através do link: <https://www.snirh.gov.br/hidroweb/mapa>. Na plataforma o usuário pode pesquisar pelo número da estação, através do campo “Séries históricas” ou escolhendo uma estação de interesse na sua área de estudo através do campo “Mapa”. Já os dados das estações telemétricas, ou “automáticas”, que realizam as medições de chuva, nível e vazão dos rios de maneira automatizada, enviando os dados diretamente ao sistema da ANA, sem a necessidade de um técnico ir até o local realizar as medições, estão

disponíveis no “Sistema HIDRO – Telemetria”, disponível em: <https://www.snirh.gov.br/hidrotelemetria>.

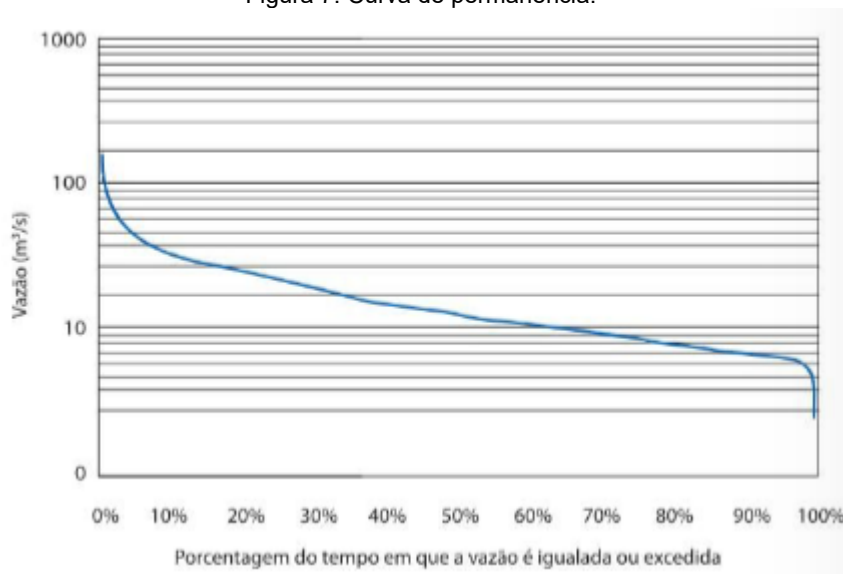
3.5 Hidrologia estatística aplicada a determinação de vazões de referência baseadas na frequência

Com os dados obtidos através do monitoramento hidrológico é possível realizar análises estatísticas e extrair informações hidrológicas relevantes. Segundo Collischonn e Dornelles (2015), uma das questões mais importantes na área da hidrologia é realizar a estimativa da probabilidade de ocorrência de eventos de uma determinada magnitude no futuro, a partir de eventos que ocorreram no passado. Para responder a essas questões são utilizadas ferramentas de probabilidade, considerando as variáveis hidrológicas como sendo variáveis aleatórias.

Sendo assim, para a análise de um evento de seca é preciso aplicar ferramentas de probabilidade para entender o seu tempo de recorrência, magnitude e intensidade. Para aprofundar a análise estatística, podem ser realizadas análises exploratórias, como a criação de curvas de permanência. As curvas de permanência podem ser relacionadas a variáveis hidrológicas como vazões e níveis de rios. Segundo Collischonn e Dornelles (2015), a curva de permanência é equivalente a um histograma de frequências cumuladas relativas de vazões de um rio, por exemplo.

Assim, ela expressa a relação entre a vazão e a frequência (estimada empiricamente) com que a vazão de um rio é igualada ou superada. Ela pode ser elaborada em planilha eletrônica, calculando os valores de quantis de 1% a 99%, com a função Percentil. Assim, o percentil de 1% corresponde a vazão que é igualada ou superada em 99% do tempo. Como foi apresentado nos capítulos anteriores, com o exemplo do monitor de estiagem do RS, consideram-se permanências acima de 85% para avaliar a estiagem em corpos hídricos. A Figura 7 apresenta um exemplo de curva de permanência.

Figura 7. Curva de permanência.



Fonte: Collischonn e Dornelles, 2015.

3.5.1 Comportamento de bacias hidrográficas durante a recessão

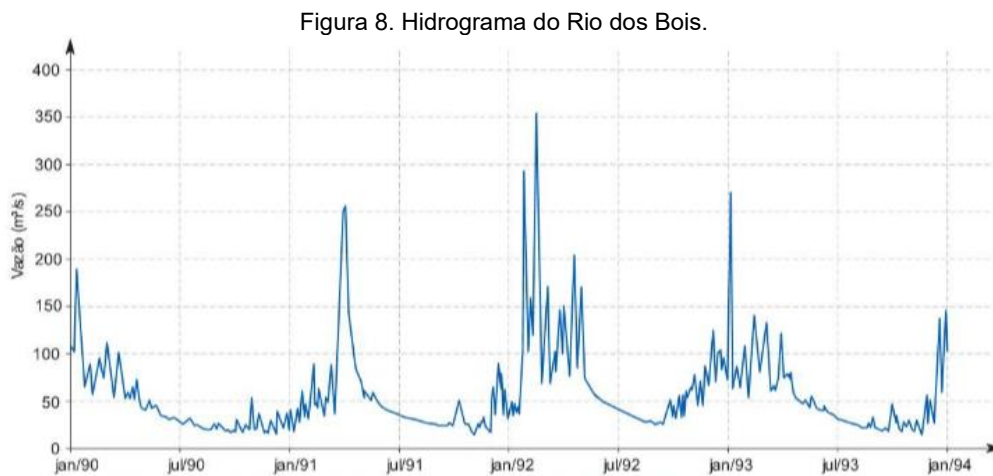
No capítulo anterior foi apresentada a curva de permanência como uma forma estatística de extrair valor de dados hidrológicos. Nesse capítulo será apresentado o comportamento de hidrogramas durante períodos de estiagem, a partir de um resumo do capítulo “Escoamento de Base” do Livro “Hidrologia para engenharia e ciências ambientais” de Collischonn e Dornelles (2015). Segundo os autores, é fundamental conhecer o comportamento hidrológico da vazão de um rio durante um período de estiagem para lidar com diversos problemas hidrológicos, com ressalva para a gestão de recursos hídricos. Durante esses períodos ocorrem situações críticas do ponto de vista ambiental, e os conflitos sobre o uso da água tendem a ser mais intensos.

Durante períodos de estiagem o escoamento de um rio é denominado, geralmente, como escoamento de base. O escoamento de base é recarregado pelas águas subterrâneas e varia muito menos do que o escoamento gerado durante períodos chuvosos. A água subterrânea tem a sua principal fonte de recarga na infiltração da chuva no solo. Em período chuvosos, os aquíferos são recarregados pela chuva e tendem a aumentar os seus níveis, e conseqüentemente, o seu volume de armazenamento de água. Em períodos de estiagem a água subterrânea fornece recarga para nascentes e corpos hídricos, diminuindo os seus níveis.

Nos hidrogramas, a diminuição do nível de um rio após um evento de chuva pode ser vista nas regiões descendentes. O momento em que se pode dizer que toda

a vazão de um rio tem origem da água subterrânea corresponde aproximadamente ao final da chuva mais o período de tempo correspondente ao tempo de concentração da bacia hidrográfica.

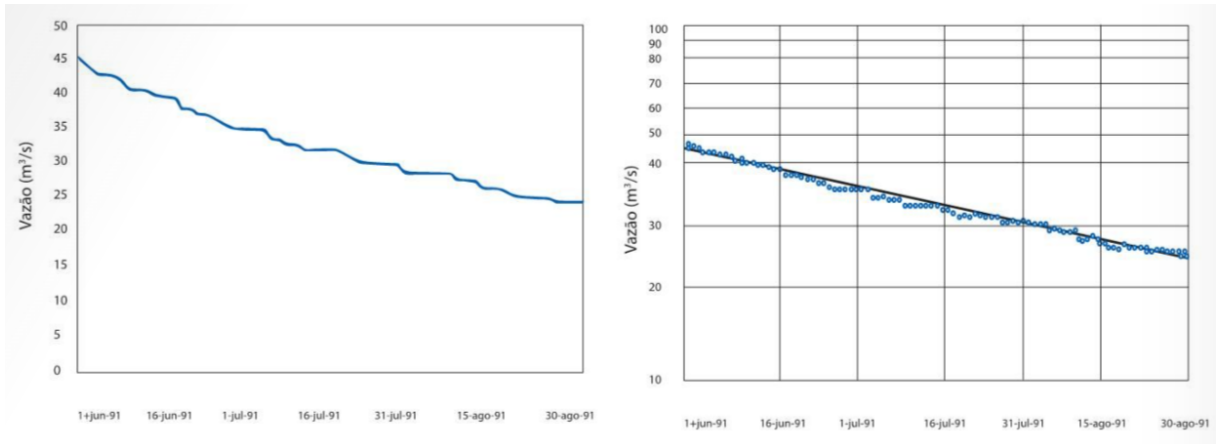
A Figura 8 apresenta um hidrograma do Rio dos Bois, localizado no estado de Goiás, do período de 1990 a 1993, em resposta as chuvas de verão e recessões durante os meses de junho a setembro. O gráfico da recessão de um hidrograma geralmente é tem a forma de uma função exponencial decrescente.



Fonte: Collischonn e Dornelles, 2015.

A seguir serão apresentados alguns métodos para analisar o escoamento de base em uma bacia hidrográfica. Ao examinar detalhadamente um período de seca em um hidrograma e aplicando uma escala logarítmica, observa-se que ele se assemelha a uma linha reta (conforme ilustrado na Figura 9). Portanto, sugere-se que tal comportamento possa ser descrito por uma fórmula, que calcula a vazão futura para um período de tempo desejado, a partir de um coeficiente de recessão, que depende das características físicas da bacia.

Figura 9. Estiagem do Rio dos Bois nas escalas normal (esquerda) e logarítmica (direita).

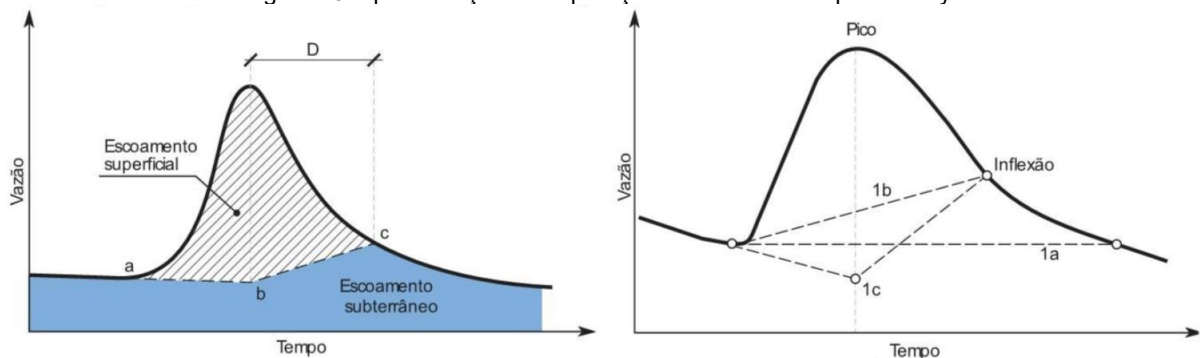


Fonte: Collischonn e Dornelles, 2015.

Destaca-se também a ideia de reservatório linear simples, que se baseia no conceito de balanço hídrico de uma bacia hidrográfica, através do volume de água armazenado no aquífero da bacia hidrográfica, o tempo, a percolação de água do solo para o aquífero, a evapotranspiração e o escoamento. A ideia considera que a relação entre armazenamento de água subterrânea e descarga do aquífero para o rio é linear para períodos de estiagem, resultando assim, na solução de uma equação diferencial.

A separação do escoamento pode ser outra forma de analisar e determinar a parcela de escoamento superficial e a parcela de escoamento proveniente de água subterrânea. O método proposto por Linsley determina o número de dias após o pico de vazão em uma bacia hidrográfica em que terminará o escoamento superficial, como mostra a Figura 10.

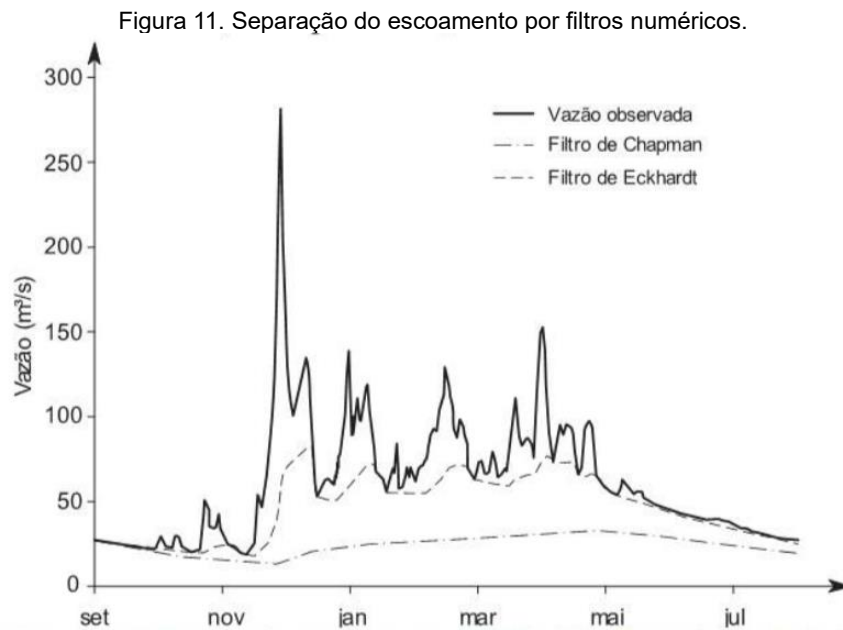
Figura 10. Apresentação da separação do escoamento por Linsley.



Fonte: Collischonn e Dornelles, 2015.

A separação do escoamento em superficial e subterrâneo também pode ser feita a partir da aplicação de filtros numéricos ou digitais. A Figura 11 apresenta a

aplicação de dois métodos numéricos de separação de escoamento para o Rio dos Bois durante um período chuvoso entre duas estações secas. O filtro de Champam resulta em um escoamento de base muito afastado do hidrograma real, o que é incorreto. O filtro de Eckhardt resulta em um escoamento de base mais próximo do hidrograma observado, apresentando boa concordância para o período de recessão.



Fonte: Collischonn e Dornelles, 2015.

4. ÁREA DE ESTUDO

A área de estudo desse trabalho será o estado do Rio Grande do Sul. Nesse capítulo serão abordados os tópicos sobre características gerais do estado, como hidrografia, geologia, taxas de precipitação. Além disso, será apresentada uma revisão sobre os eventos de estiagem ocorridos nos últimos 20 anos.

Segundo o Atlas Socioeconômico do RS⁸, atualizado em setembro de 2022, o estado possui uma área total de 281.707,15 km² e uma população estimada em aproximadamente 11.422.973 habitantes, contando com 497 municípios. O clima do estado é Temperado do tipo Subtropical, com baixas temperaturas nos meses de inverno e vegetação diversificada, apresentando áreas importantes e remanescentes de Mata Atlântica. Apresenta dois grandes principais biomas, o Pampa e a Mata Atlântica.

4.1 Hidrografia

Para o presente trabalho, será muito importante conhecer e apresentar como é a hidrografia do estado, já que ela será o objeto de análise. O estado apresenta 3 grandes regiões hidrográficas⁹: a da Bacia do Rio Uruguai, a da Bacia do Guaíba e a das Bacias Litorâneas. A Região Hidrográfica da Bacia do Rio Uruguai abrange cerca de 57% do estado e faz parte da bacia do Rio da Prata. O uso do solo da bacia está relacionado a atividades agrícolas, pecuárias e agroindustriais. A Região Hidrográfica da Bacia do Guaíba abrange cerca de 30% do território do estado, e apresenta uma grande concentração industrial e urbana (sendo a mais densamente povoada do estado), sediando um grande número de atividades diversas, como atividades relacionadas a pecuária, agrícola, agroindústria, indústria, comércio e serviços. A Região Hidrográfica das Bacias Litorâneas abrange cerca de 13% do estado e o seu uso do solo está vinculado principalmente a atividades agropecuárias, agroindustriais e industriais.

Dentro dessa classificação, foram delimitadas bacias hidrográficas menores ao longo do estado, a partir de rios importantes. Segundo a Secretaria Estadual de Meio

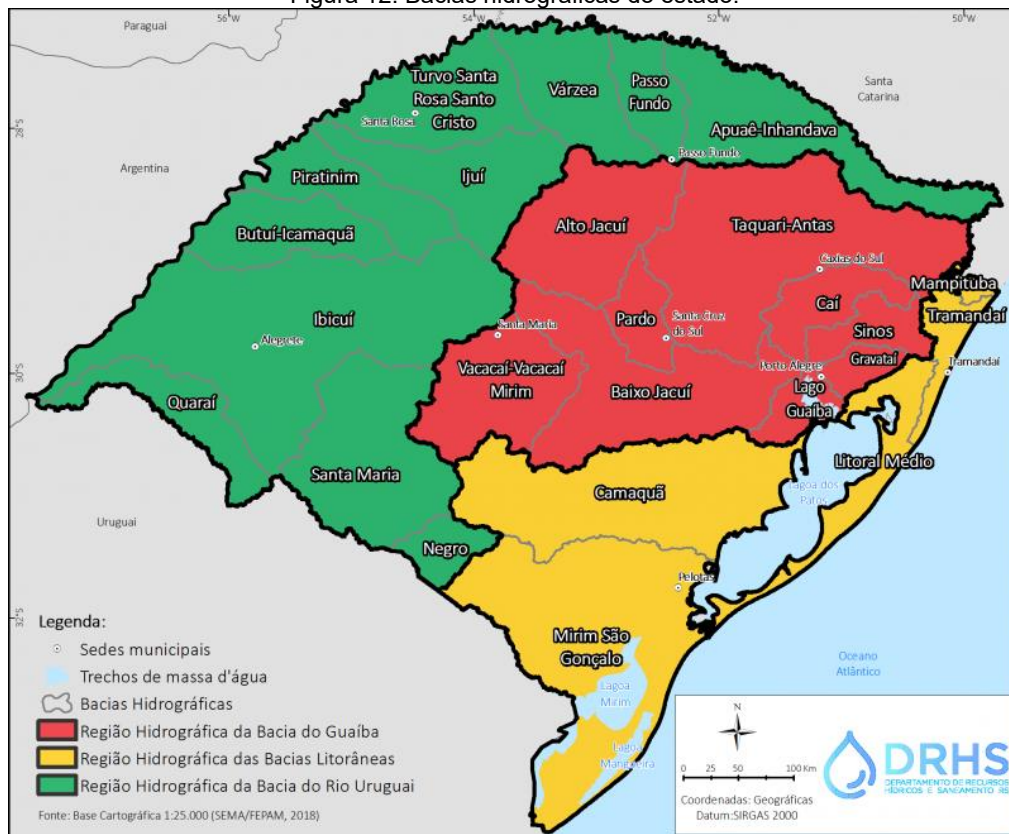
⁸ Mais informações em: <https://atlassocioeconomico.rs.gov.br/inicial>

⁹ Mais informações em: <https://atlassocioeconomico.rs.gov.br/bacias-e-sub-bacias-hidrograficas>

Ambiente (SEMA), o estado é composto pelas seguintes bacias hidrográficas: Gravataí, Sinos, Caí, Taquari-Antas, Alto Jacuí, Vacacaí-Vacacaí Mirim, Baixo Jacuí, Lago Guaíba, Pardo, Tramandaí, Litoral Médio, Camaquã, mirim São Gonçalo, Mampituba, Apuaê-Inhandava, Passo Fundo, Turvo Santa Rosa Santo Cristo, Piratinim, Ibicuí, Quaraí, Santa Maria, Negro, Ijuí, Várzea e Butuí-Icamaquã. A Figura 12 apresenta a delimitação das bacias no estado. Observa-se também outras duas grandes massas d'água presentes no estado, a Lagoa Mirim e a Lagoa dos Patos.

Poderia acrescentar aqui uma breve noção da vazão dos principais rios, pra dar uma ideia de magnitude. Também quais são as bacias mais importantes em termos econômicos, quais bacias têm mais população. Isso influencia na importância de disponibilidade hídrica em determinadas regiões.

Figura 12. Bacias hidrográficas do estado.



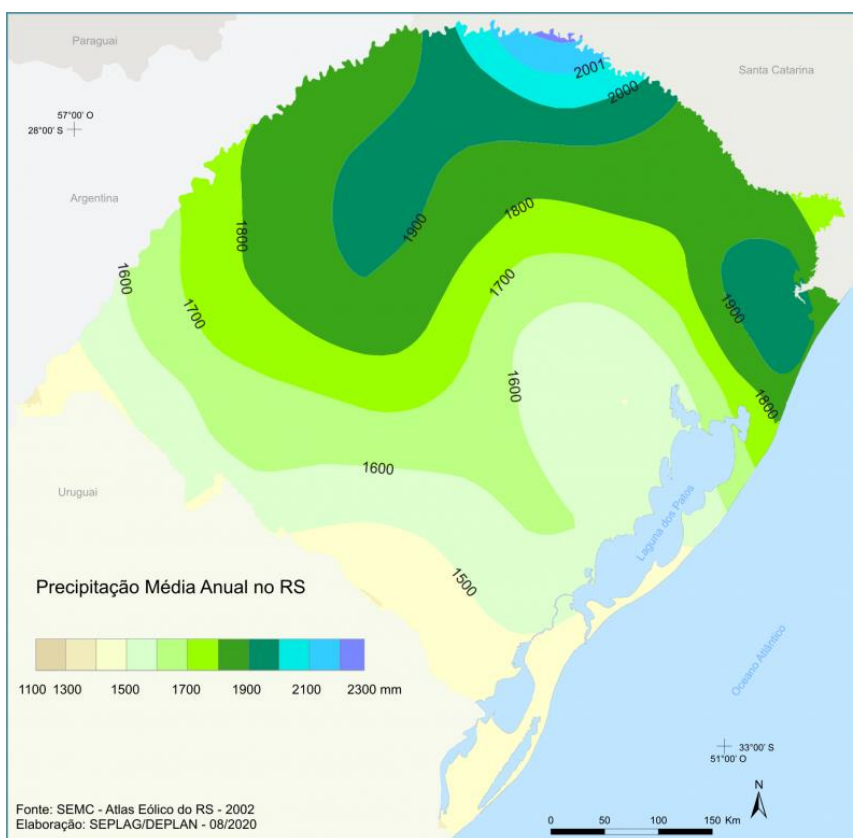
Fonte: SEMA, RS (2018).

4.2 Precipitação

A precipitação impacta diretamente no volume e no comportamento dos rios. A partir de um grande evento de precipitação pode ocorrer o transbordamento da calha

de um rio, levando a inundação das regiões ribeirinhas, mas também a falta de precipitação pode levar a períodos de estiagem, mudando a gestão de recursos hídricos de uma bacia hidrográfica, por exemplo. Segundo o Atlas Socioeconômico do Rio Grande do Sul (2022), o estado apresenta uma boa distribuição de chuvas ao longo do ano, principalmente pelas massas de ar oceânicas que passam pelo estado. A distribuição espacial das taxas de precipitação anuais médias varia, a região sul do estado apresenta taxas de entre 1.299 mm e 1.500 mm e a região norte apresenta taxas entre 1.500 mm e 1.800 mm. As regiões com maiores médias de chuva são as regiões norte e nordeste. A Figura 13 apresenta a distribuição espacial de chuvas anuais médias no estado.

Figura 13. Distribuição espacial das chuvas no estado.



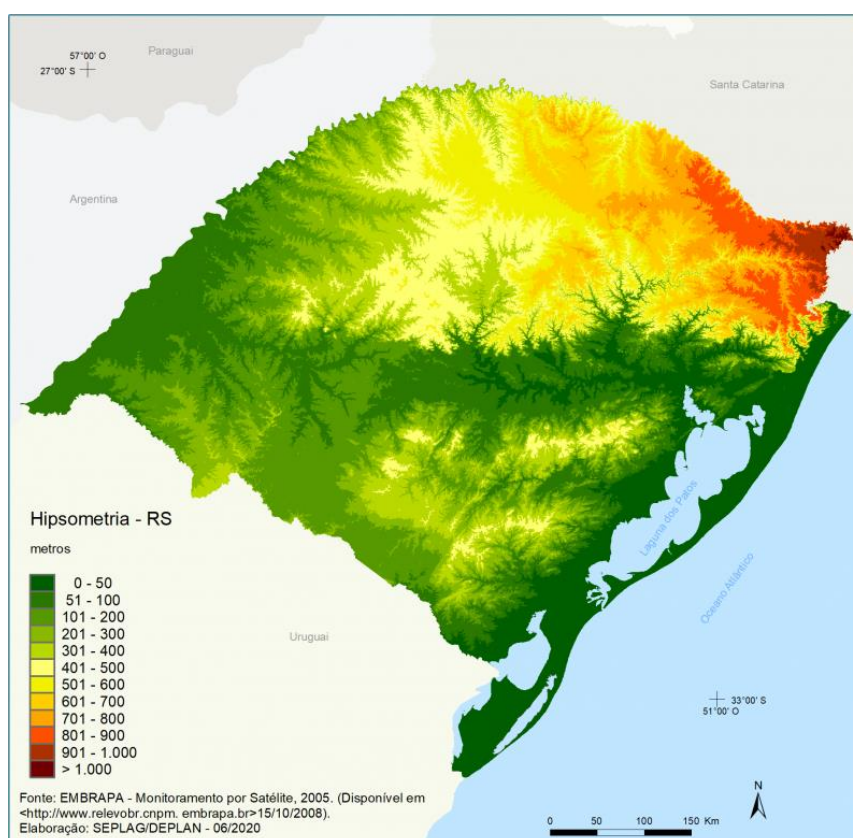
Fonte: SEPLAG/DEPLAN (2018).

4.3 Hipsometria e unidades geomorfológicas

A altitude e o relevo de uma região determinam características importantes sobre os cursos d'água e bacias hidrográficas. O relevo determina a região de drenagem de um curso hídrico e o formato da sua bacia hidrográfica. O formato da

bacia hidrográfica impacta o seu tempo de concentração, que é o tempo necessário para uma partícula se deslocar da nascente da bacia hidrográfica até a sua foz. Bacias mais alongadas apresentam um tempo de concentração maior, enquanto bacias menos alongadas apresentam um tempo de concentração menor. Segundo o Atlas Socioeconômico do estado (2022), as maiores altitudes estão localizadas na região norte do estado, apresentando altitudes máximas na região nordeste, onde está o Pico Monte Negro, o ponto mais alto do estado, com 1403 m. A Figura 14 apresenta o mapa de altitudes do estado.

Figura 14. Altitudes do RS.

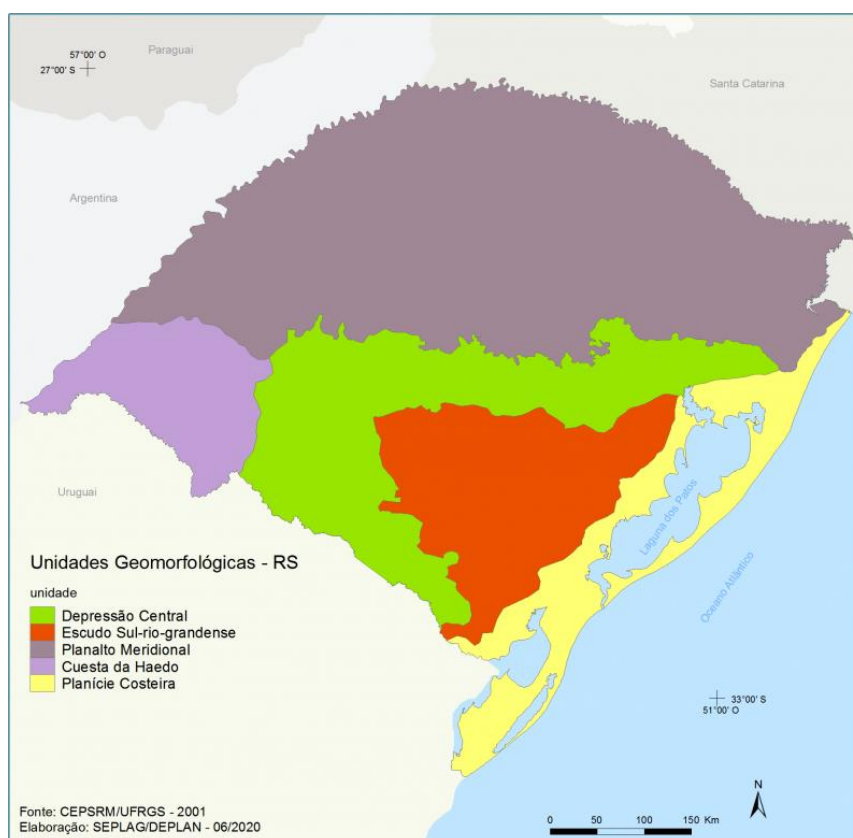


Fonte: SEPLAG/DEPLAN (2018).

O estado apresenta 5 grandes unidades geomorfológicas. Ao norte está localizado o Planalto Meridional, formado por rochas basálticas, no centro está a Depressão Central, formada por rochas sedimentares, dando origem a uma região de baixas altitudes, ao sul está o Escudo cristalino Sul-Riograndense, formado por rochas ígneas e desgastadas pela erosão, com altitudes máximas de 600 m. Por fim, a

Planície Costeira está localizada em uma faixa arenosa ao longo de todo o litoral do estado, apresentando lagoas e lagunas ao longo de sua extensão. A Figura 15 apresenta os domínios geomorfológicos do estado.

Figura 15. Unidades Geomorfológicas do RS.



Fonte: SEPLAG/DEPLAN (2018).

4.4 Eventos recentes de estiagem no Rio Grande do Sul

A agropecuária representa 11,2% do PIB (Produto Interno Bruto) do estado do Rio Grande do Sul, com destaque para as produções de soja, milho, arroz e a criação de bovinos. Segundo o “Programa de mitigação e superação da estiagem no RS - ações implementadas, de curto, médio e longo prazo”, denominado “Supera estiagem”, lançado no ano de 2023, o RS já passou por 5 grandes estiagens em 20 anos. As estiagens ocorreram nos anos de 2004, 2005, 2012, 2020 e 2022, além da última estiagem, ocorrida no ano de 2023. Então, eventos de estiagem afetam diretamente a economia gaúcha, trazendo prejuízos econômicos e afetando milhões

de pessoas. A seguir serão apresentados os eventos dos últimos 20 anos, com o objetivo de caracterizá-los através das causas e consequências dos eventos.

4.4.1 Evento de 2004 – 2005

O evento de seca de 2004 a 2005 será apresentado com base no trabalho de Reckziegel (2007), intitulado “Levantamento dos desastres desencadeados por eventos naturais adversos no estado do Rio Grande do Sul no período de 1980 a 2005”. Em 2004 foram homologados 389 decretos de Situação de Emergência no Rio Grande do Sul, com 402 municípios apresentando danos por estiagem. A estiagem ocorreu em dois períodos, o primeiro nos meses de janeiro a maio, atingindo todos os municípios do estado, com diminuição dos volumes de chuva, e o segundo no mês de agosto, atingindo 4 municípios. Foram registradas quebras de safra, redução do nível de corpos hídricos e problemas de abastecimento de água, caracterizando, então, a ocorrência de 4 secas, sendo elas: meteorológica, agrícola, hidrológica e socioeconômica.

Em novembro de 2004 iniciou outro período de estiagem que se estendeu até março de 2005, sendo homologados 448 decretos de Situação de Emergência. O autor também destaca que esse evento de seca foi o que registrou o maior volume de danos dentre os 26 anos (1980 -2005) analisados pelo seu trabalho. Como consequência, houve reduções no nível de rios, quebra da safra de verão em 80%, falta de água para o abastecimento humano, falta de água para a dessedentação animal, seca das matas nativas, abastecimento de água em cidades do interior por caminhões pipa, entre outros. A Figura 16 apresenta uma imagem da situação do Rio Gravataí em 2005.

Figura 16. Situação do Rio Gravataí no período de estiagem.



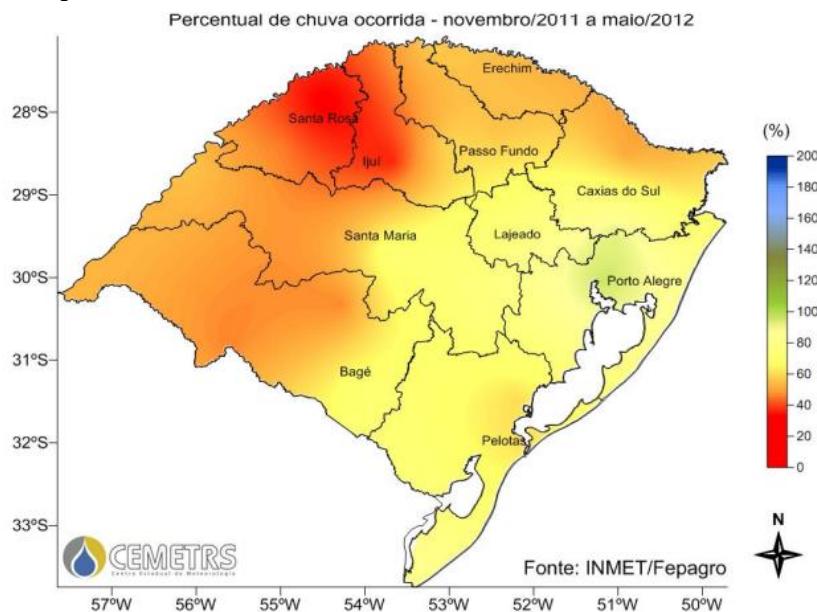
Figura 6.24 - Rio Gravataí, no município de Gravataí, com o seu nível reduzido devido a estiagem.
Fonte: Banco de dados do Jornal Zero Hora. Fotógrafo: Júlio Cordeiro.

Fonte: RECKZIEGEL (2007).

4.4.2 Evento de 2012

Segundo a Nota Técnica nº 10 (06/06/2012), intitulada “A estiagem de 2011/2012 e a sua influência na produção agropecuária do Rio Grande do Sul” entre os meses de novembro de 2011 e maio de 2012 todas as regiões do estado apresentaram volumes de chuva acumulados inferiores à normal climatológica do período, consequência da ocorrência do fenômeno La Niña. Os municípios de Cruz Alta e Santa Rosa registraram os menores volumes de chuva. Em Cruz Alta foi registrado 311 mm, onde a normal para o período é de 865 mm, e em Santa Rosa foi registrado 317 mm, sendo que a normal é de 1025 mm para o total acumulado dos sete meses. A Figura 17 apresenta a distribuição do percentual de chuva ocorrida no estado ao longo do período de novembro de 2011 a maio de 2012.

Figura 17. Percentual de chuva ocorrido de novembro/2011 a maio/2012.



Fonte: RECKZIEGEL (2007).

Observa-se que a redução significativa dos índices de chuvas provavelmente levou a ocorrência de uma seca hidrológica em grande parte do estado, salvo a capital do estado e a sua região metropolitana. Também existem indícios da ocorrência de uma seca agrícola, já que foi observada a redução significativa da produção das principais culturas do estado. Segundo a EMATER/RS a produção de milho apresentou uma produção de 47,3% menor em relação à safra de 2010/2011, e a redução também ocorreu na safra de soja, sendo em 50% quando comparada com a produção da safra de 2010/2011. As consequências do período de estiagem também foram sentidas no setor pecuário, que teve diminuição na produção de leite devido ao baixo crescimento das pastagens.

4.4.3 Evento de 2019 – 2020

O evento de seca entre os anos 2019 e 2020 foi explorado por Pelinson (2023). A seca iniciada em 2019 tem como principal fator desencadeador a precipitação. Em 2019 os meses de junho, julho, agosto e setembro apresentaram chuvas abaixo da normal climatológica, apresentando, em média, uma redução de 77% quando comparadas com as médias normais, gerando uma recessão de vazões em todo o estado. Nos meses de outubro e novembro ocorreram chuvas acima do normal, e nos meses posteriores, de verão (segundo para o ano de 2020), os volumes de

precipitação diminuíram novamente, com destaque para o mês de março de 2020, que registrou cerca de 20% da chuva esperada para o mês. Assim as vazões no estado voltaram a apresentar recessões.

O autor apresenta as variações na temperatura da superfície do mar ao longo dos meses dos anos de 2018, 2019, 2020 e 2021 (Figura 18). Os valores em azul representam as anomalias causadas pelos eventos de La Niña, na cor vermelha são apresentadas as anomalias de El Niño e em preto estão as anomalias de períodos neutros.

Figura 18. Variações da temperatura do mar de 2018 a 2021.

ANO	DJF	JFM	FMA	MAM	AMJ	MJJ	JJA	JAS	ASO	SON	OND	NDJ
2018	-0,9	-0,9	-0,7	-0,5	-0,2	0,0	0,1	0,2	0,5	0,8	0,9	0,8
2019	0,7	0,7	0,7	0,7	0,5	0,5	0,3	0,1	0,2	0,3	0,5	0,5
2020	0,5	0,5	0,4	0,2	-0,1	-0,3	-0,4	-0,6	-0,9	-1,2	-1,3	-1,2
2021	-1,0	-0,9	-0,8	-0,7	-0,5	-0,4	-0,4	-0,5	-0,7	-0,8	-1,0	-1,0

Fonte: PELINSON (2023).

Observa-se que no ano de 2019 ocorreu o fenômeno de El Niño, iniciado em 2018, e ocorreu La Niña nos anos de 2020 e 2021. Esses dados foram muito relevantes para o autor concluir que o evento La Niña iniciado no segundo semestre de 2020 pode explicar a continuidade do período de seca iniciado em 2019, tendo em vista que o fenômeno climático tem como característica a redução nos volumes de chuva no estado.

O autor também produziu uma tabela (Figura 19), contendo informações relevantes para o entendimento do período de seca através de notícias do site GZH, filtrando pela tag “seca no RS”. Observa-se que a tabela inicia com a notícia da colheita do milho adiantada para diminuir perdas, passar pela diminuição do nível dos reservatórios, oito bacias em situação de alerta no estado, níveis críticos em barragens de hidrelétricas, 346 municípios com decretos e perdas no PIB devido as consequências do período de estiagem.

Figura 19. Notícias sobre o período de seca do site GZH.

Fonte	Data	Informação
GZH	06/01/2020	Colheita do milho adiantada para diminuir as perdas.
	07/01/2020	Nove (9) municípios decretam situação de emergência no estado.
	08/01/2020	Estiagem afeta reservatórios de usinas de energia no RS.
	09/01/2020	Impactos na produção de leite e carne no estado.
	12/01/2020	Açudes secos e falta d'água para o gado no RS.
	18/01/2020	Falta de alimentos devido à seca.
	31/01/2020	Busca por sistemas de irrigação crescem 20%.
	31/01/2020	Noventa e nove (99) municípios com decretos de emergência.
	19/02/2020	Caminhões-pipa utilizados no abastecimento de água no norte do estado.
	20/02/2020	Racionamento na Campanha Gaúcha.
	03/03/2020	Aumento do número de municípios com uso de caminhão-pipa.
	05/03/2020	Cento e vinte e nove (129) municípios com decretos de emergência.
	31/03/2020	46% (231) dos municípios gaúchos com decretos.
	03/04/2020	Duzentos e cinquenta e três (253) municípios com decreto no RS.
	06/04/2020	Oito bacias hidrográficas em situação de alerta no estado.
	07/04/2020	Distribuição de cestas básicas e caixas d'água no RS.
	08/04/2020	Problemas no porto de Porto Alegre devido à estiagem.
	30/04/2020	Ampliação na construção de novos açudes no estado e trezentos e trinta e quatro (334) municípios com decretos.
	30/04/2020	Níveis críticos em barragens de hidrelétricas.
	03/05/2020	Trezentos e quarenta e seis (346) municípios com decretos.
	12/05/2020	Safra de soja de 2020 é 40% menor no estado.
	15/05/2020	Perdas de 15,5 bilhões em lavouras de soja e milho no RS.
10/06/2020	PIB do RS cai 3,3% no primeiro trimestre de 2020.	

Fonte: PELINSON (2023).

O autor discorre também sobre as classificações de secas do período. Ele apresenta que no evento de 2019 e 2020 ocorreram várias secas: meteorológica, hidrológica, agrícola e socioeconômica. A seca meteorológica iniciou em dezembro de 2019, com a diminuição dos volumes de precipitação, a seca hidrológica iniciou em janeiro de 2020, onde os reservatórios de usinas hidrelétricas já apresentaram redução de volumes devido à estiagem, e em fevereiro de 2020 ocorreu a seca agrícola, trazendo prejuízos aos produtores rurais. A combinação desses diferentes tipos de seca leva a seca socioeconômica, trazendo desabastecimento de água a população, perdas agrícolas, aumento nos preços dos alimentos, entre outros.

4.4.4 Evento de 2020 – 2023

O evento de seca dos anos de 2020 a 2023 pode ser visto de duas formas: como um evento isolado ou como a continuação do evento de seca iniciado em 2019. Com o objetivo de apresentar mais características sobre os eventos de seca, nesse trabalho a seca de 2019 a 2023 será dividida em dois eventos, assim como Pellinson (2023) fez em seu trabalho. Até o dia 15 de fevereiro de 2023, 284 municípios estavam

em situação de emergência, contabilizando 5,8 milhões de pessoas afetadas e R\$ 13 bilhões em prejuízos municipais, segundo o plano “Supera Estiagem”, lançado pelo governo do Estado do Rio Grande do Sul em 2023. O documento também cita que segundo a Empresa de Assistência Técnica e Extensão rural (EMATER/RS) estima-se que as produções de soja e milho sofreram reduções de 20,8% e 30,6%, respectivamente, no ano de 2023. As causas da ocorrência do evento de estiagem prolongado no RS, levando a ocorrência de uma seca hidrológica, e posteriormente a uma seca subterrânea estão relacionados com a ocorrência do fenômeno climático La Niña (que faz parte do ENOS) que ocorreu em dois períodos, seguidos, entre os anos de 2020 e 2023.

O fenômeno El Niño Oscilação Sul (ENOS) é caracterizado pela alteração nos padrões normais da temperatura da superfície do mar (TSM) e dos ventos alísios na região do Pacífico Equatorial (BERLATO, FONTANA, 2003). Essas alterações mudam o clima e os padrões de vento em escala mundial, e conseqüentemente, alterando as taxas de precipitação em regiões tropicais e de latitudes médias. O fenômeno normalmente é dividido em duas fases, o El Niño e a La Niña. A La Niña gera o resfriamento das águas do Oceano Pacífico e a diminuição dos ventos alísios, com duração variando aproximadamente entre 12 e 18 meses, atingindo a sua máxima intensidade nos meses de novembro e dezembro. O El Niño pode ser caracterizado como sendo o oposto da La Niña, com o aquecimento das águas do Pacífico e o aumento dos ventos alísios (BERLATO, FONTANA, 2003).

Jacóbsen *et al.* (2004) demonstrou que em anos de ocorrência de El Niño no RS as taxas de precipitação aumentam ao longo do ano, especialmente de outubro a janeiro. Já para os anos de ocorrência de La Niña, diminuem as taxas de precipitação na maior parte do estado ao longo do ano, especialmente nos meses de novembro, dezembro, maio e junho. Puchalski (2000) apresenta que nos anos de La Niña há o aumento significativo de risco de ocorrência de déficit hídrico, no final da primavera e no início do verão. Já nos anos de El Niño a probabilidade de ocorrência de eventos de déficit hídrico diminui drasticamente.

O estado executou ações de enfrentamento as conseqüências dos eventos de seca, contando com medidas de disponibilidade e acesso a água, segundo o plano “Supera estiagem”. Entre as ações executadas no ano de 2023, estão a ampliação

dos sistemas de irrigação do estado, a perfuração de poços artesianos, com o objetivo de garantir o abastecimento de água a população, a construção de açudes e microaçudes para reservação de água, criação de programas de manejo e conservação do solo e da água, projetos de revitalização de bacias hidrográficas, aumentando a disponibilidade hídrica em quantidade e qualidade, a renaturalização do Rio Gravataí e a criação de um programa estadual de regularização de poços.

Como ações a curto prazo estão a transferência de recursos (cisternas comunitárias, reservatórios de água, caminhões pipa), a aquisição de caixas d'água para famílias de agricultoras, obras na barragem do Arroio Jaguari e manutenção rural de açudes, estradas, solos e etc. A médio prazo estão a aquisição de reservatórios para transporte de água, programas de abastecimento de água para uso humano e animal, as obras na barragem Taquarembó e o financiamento de irrigação com o objetivo de aumentar em 20% a área irrigada de culturas de sequeiro. A longo prazo planeja-se a construção do Conjunto de Canais de Distribuição das barragens dos arroios Jaguari e Taquarembó.

4.5 Projeções futuras

Dados os cenários apresentados no capítulo 3, com as definições e os impactos das secas e estiagens, e a apresentação de como são feitas atualmente as previsões de níveis de rios com foco em períodos de seca e estiagem, verificou-se a relevância de desenvolver um sistema de previsão de níveis de rios para períodos de seca no RS. Somada a isso, o capítulo 4 apresentou os eventos recentes de ocorrência de estiagens e secas no estado, mostrando o impacto desses eventos em todos os setores da sociedade, levando a prejuízos econômicos e ambientais imensos. Atrelado a isso, as projeções de mudanças climáticas já devem ser levadas em conta, criando sistemas que busquem estar preparados para a ocorrência de eventos críticos.

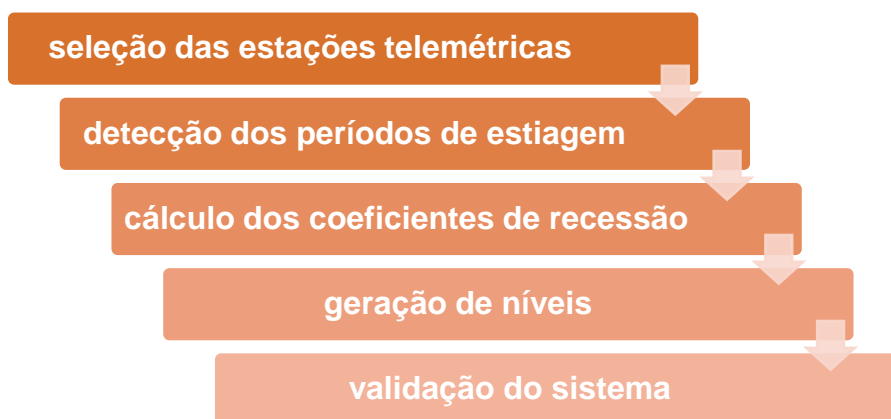
O relatório “Impacto da Mudança Climática nos Recursos Hídricos do Brasil”, publicado pela ANA em janeiro de 2024, destacou que haverá maior disponibilidade hídrica no estado, porém, atrelada a amplitude da imprevisibilidade climática, podendo resultar no aumento de eventos críticos, como cheias e secas. Esse resultado ressalta a importância de o estado estar preparado para a ocorrência de eventos críticos de

seca. Sendo assim, o sistema proposto nesse trabalho será inovador e diferente das ferramentas e trabalhos já existentes no estado, auxiliando ao enfrentamento de períodos de seca.

5. METODOLOGIA

No capítulo da metodologia serão abordados os passos utilizados para o desenvolvimento do sistema de previsão de recessão para estiagem. O capítulo inicia apresentando as estações telemétricas selecionadas, das quais foram extraídos os dados de nível utilizados para o trabalho. Após isso é apresentada a metodologia de detecção dos períodos de estiagem, seguida pelo cálculo dos coeficientes de recessão. Por fim, são apresentadas as metodologias de geração de níveis de rios e a validação do sistema. Salienta-se que o modelo será aplicado para períodos de estiagem, sem a ocorrência de chuva, quando ocorre o decaimento do nível dos rios. Por fim, todos os passos descritos a seguir foram desenvolvidos em um código de programação na linguagem python. A Figura 20 apresenta um esquema da metodologia que será utilizada nesse trabalho:

Figura 20. Fluxograma da metodologia.



Fonte: a autora (2024).

5.1 Estações telemétricas

O primeiro passo da metodologia foi a aquisição dos dados de nível dos rios, através do download dos dados de estações automáticas cadastrados na ANA, utilizando um código programado na linguagem python. Foram utilizadas somente estações automáticas devido a disponibilidade de dados horária proveniente desse tipo de estação, diferente das estações convencionais, que podem levar dias para disponibilizar seus dados. Além disso, para a implementação do sistema da previsão de níveis de rios para a estiagem será essencial ter os dados oriundos do dia anterior

a data de início da previsão, sendo isso possível somente com os dados das estações automáticas.

As estações foram escolhidas pelo critério de quantidade de dados disponíveis, obtendo medições de níveis, no mínimo, para o período de 2021 a 2023. A escolha foi feita visando ter uma quantidade amostral suficiente para a realização dos cálculos que serão apresentados a seguir, e por conseguinte, representar o comportamento dos níveis de recessão. Com as estações escolhidas, o código realiza o download dos níveis e calcula as médias diárias dos dados, iniciando na data de início de operação de cada uma das estações telemétricas. Também foram feitas remoções pontuais de dados espúrios de níveis que apresentavam discrepância em relação a série temporal.

5.3 Detecção dos períodos de estiagem

O trabalho de Giacomelli et. al, (2021) apresenta em seus resultados uma tabela com os limiares de atenção e alerta de estiagem para as principais estações de monitoramento da Sala de Situação da Defesa Civil do Estado do Rio Grande do Sul. Os limiares de atenção têm como objetivo fornecer aos órgãos gestores níveis críticos, aos quais devem ser elaborados e executados planos de ação visando a garantia da disponibilidade hídrica no corpo hídrico. Assim também funciona para os níveis de alerta, cuja diferença entre os níveis de atenção é a gravidade, onde os rios já se encontram em patamares de escassez hídrica.

Os limiares de atenção apresentados no trabalho variam entre as cotas com permanência de 70% e 90% do tempo nos rios, enquanto os limiares de alerta variam entre as cotas com permanência entre 77% e 95% do tempo. O sistema de previsão considera como estiagem, limiar de atenção e limiar de alerta os níveis que estão abaixo, respectivamente dos níveis com permanência em 70, 85 e 90% do tempo.

Com a definição da cota de estiagem de cada estação, ou gatilho do modelo, como sendo a cota com permanência em 70% do tempo, foram identificados os períodos de estiagem como sendo onde ocorre o decréscimo dos níveis de cota, já que se busca estudar os períodos em que o nível do rio é mantido através do escoamento de base oriundo da reserva do aquífero da região. Na análise do decréscimo dos níveis de rios foi considerado um erro de 10% atrelado a leitura do

instrumento, visando garantir que pequenas oscilações do nível de água entrassem dentro do período de estiagem.

A quantidade de dados utilizados para a determinação dos períodos de estiagem e o cálculo dos limiares de atenção e alerta variou de acordo com a disponibilidade de dados de cada uma das estações, iniciando no primeiro dia de medição de cada estação e terminando no dia 31 de agosto de 2022. A escolha desse período buscou utilizar a maior parte do período de dados disponível para cada estação para o cálculo dos coeficientes de recessão, deixando o período de setembro de 2022 a dezembro de 2023 para a validação do modelo.

Assim, foram determinados períodos de estiagem em diferentes anos e com diferentes durações, sendo a duração mínima 8 dias, com o objetivo de conter o dia de início da previsão e os 7 dias seguintes de previsão.

5.5 Coeficientes de recessão

Com a definição dos períodos de estiagem, foram calculados os coeficientes de recessão diários para cada uma das estações. A metodologia utilizada para o cálculo dos coeficientes de recessão para os níveis dos rios foi adaptada da metodologia apresentada no capítulo “Escoamento de Base” do Livro “Hidrologia para engenharia e ciências ambientais” de Collischonn e Dornelles (2015), onde o cálculo dos coeficientes de recessão são aplicados em dados de vazão. A estimativa do coeficiente pode ser feita através da Equação 1, conhecendo dois valores de cota para um determinado intervalo de tempo, e rearranjando a equação exponencial:

$$k = \frac{-\Delta t}{\ln\left(\frac{C_{(t+\Delta t)}}{C_{(t)}}\right)} \quad \text{Equação 1}$$

Onde: Δt é o intervalo de tempo; $C_{(t+\Delta t)}$ é a cota em um instante futuro ($t + \Delta t$); $C(t)$ é a cota em um instante t e k é uma constante (com a unidade de t).

Assim, foram calculados valores de k para cada um dos períodos de estiagem, criando assim uma lista com vários valores de k para cada uma das estações. Como os dados utilizados estão em escala diária, a unidade correspondente aos coeficientes de recessão também foi calculada na unidade de tempo de dias. Para criar uma faixa

de variabilidade de resultados foram escolhidos o k mediano, o k de percentil 25 e o k de percentil 75, resultando em três valores de k por estação.

5.6 Geração de níveis

Com os três coeficientes e recessão calculados para cada uma das estações, foi feita a validação do sistema para o período de seca enfrentado pelo estado entre os meses de setembro de 2002 a dezembro de 2023. Assim como foi explicado nos capítulos anteriores, para o período de validação, ou seja, aplicação dos coeficientes de recessão, também foram determinados os períodos de estiagem, mas agora com o objetivo de aplicar os coeficientes de recessão para gerar previsões de cotas, considerando uma condição operacional do sistema de previsão de cotas.

Quando um período de estiagem é observado de perto através de um hidrograma, com utilização de uma escala logarítmica ele tem um comportamento semelhante a uma linha reta. Sendo assim, sugere-se que o decaimento das vazões ou níveis de um rio podem ser representados por uma equação semelhante a Equação 2:

$$C_{(t)} = C_0 \cdot e^{\frac{-t}{k}} \quad \text{Equação 2}$$

Onde: t é o tempo; C0 é a cota em um instante t0; Ct é a cota em um instante t e k é uma constante (com a unidade de t).

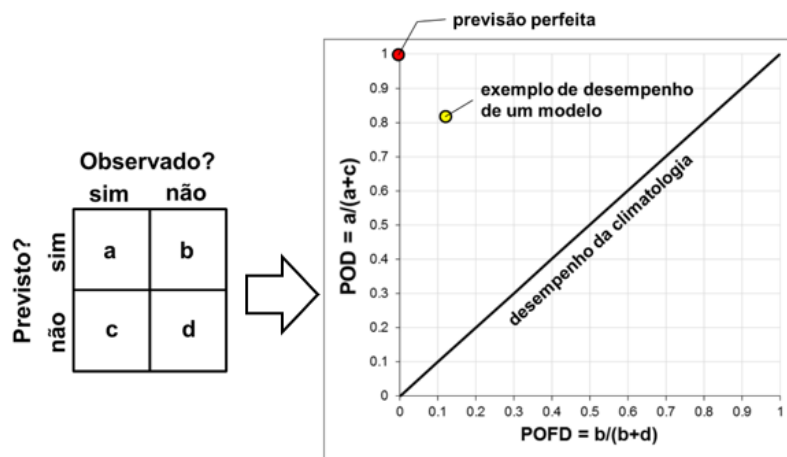
As previsões geradas têm inicialização diária e fazem previsões para 7 dias a frente para cada um dos períodos de recessão identificados, que são períodos em que ocorre o decaimento do nível dos rios. Assim, um período de recessão de 8 dias, sendo o primeiro dia considerado o dia de emissão da previsão e os outros 8 dias como sendo os dias de previsão de cota, resultou em 8 outras previsões (uma para cada um dos dias do período de recessão), cada uma com um horizonte de 7 dias. Para gerar as previsões o “t” foi modificado de 1 a 7, para que pudessem ser feitas previsões de 1 a 7 dias. O conceito de horizonte é utilizado em na literatura de previsão para contar o número de passos de tempo ao qual está sendo gerada a previsão. Sendo assim, a previsão para daqui a 7 dias significa um horizonte de 7 dias.

5.8 Validação do sistema

Com as projeções de cota para cada uma das estações foi realizada a validação do sistema através do cálculo do diagrama ROC. O diagrama ROC é usado para avaliar a capacidade de um sistema de previsão emitir alertas verdadeiros ou falsos em relação a ocorrência de um evento (Brown et al., 2010). A aplicação do diagrama ROC inicia com a classificação das previsões em uma tabela de contingência, que é dividida em quatro quadrantes: a, b, c e d. O quadrante “a” representa a quantidade de vezes em que o evento foi observado e previsto, o quadrante “b” representa a quantidade de vezes que o evento não foi observado, mas foi previsto, o quadrante “c” representa a quantidade de vezes que o evento de seca foi observado e não foi previsto e o quadrante “d” representa a quantidade de vezes que o evento não foi observado e nem previsto. Os eventos de seca foram considerados como sendo os eventos cujas cotas estão abaixo do limiar de atenção, que corresponde a cota com permanência em 85% do tempo no rio.

Com os dados da tabela de contingência, foram montados diagramas ROC (*receiver operator characteristic curve*) para todas as estações, através do cálculo dos pontos POD (*probability of detection*) e POFD (*probability of false detection*). O POD corresponde a capacidade do sistema de previsão em determinar corretamente a ocorrência de um limiar, ou seja, ele é a porcentagem de vezes em que um evento foi corretamente previsto pelo sistema em relação a todas as vezes onde o limiar de análise foi ultrapassado. Já o POFD corresponde a quantidade de falsas detecções que foram realizadas pelo sistema de previsão, ou seja, é a porcentagem de vezes em que a previsão disse que iria ocorrer um evento e ele não ocorreu, em relação a todos os eventos ocorridos. Então, o cálculo do POD é dado pela expressão $POD = a/(a+c)$ e o cálculo do POFD é dado pela expressão $POFD = b/(b+d)$. A Figura 21 apresenta um exemplo de tabela de contingência e de um diagrama ROC:

Figura 21. Tabela de contingência e diagrama ROC.



Fonte: adaptado de Meller, 2012.

Em um diagrama ROC, quanto mais o sistema de previsão se aproximar do ponto (0,1), melhor será a sua capacidade de prever corretamente eventos. Quando um ponto de POFD, POD localiza-se abaixo da linha formada pelo desempenho da climatologia, significa que o seu desempenho é inferior a uma previsão gerada a partir de dados climatológicos observados (Meller, 2012).

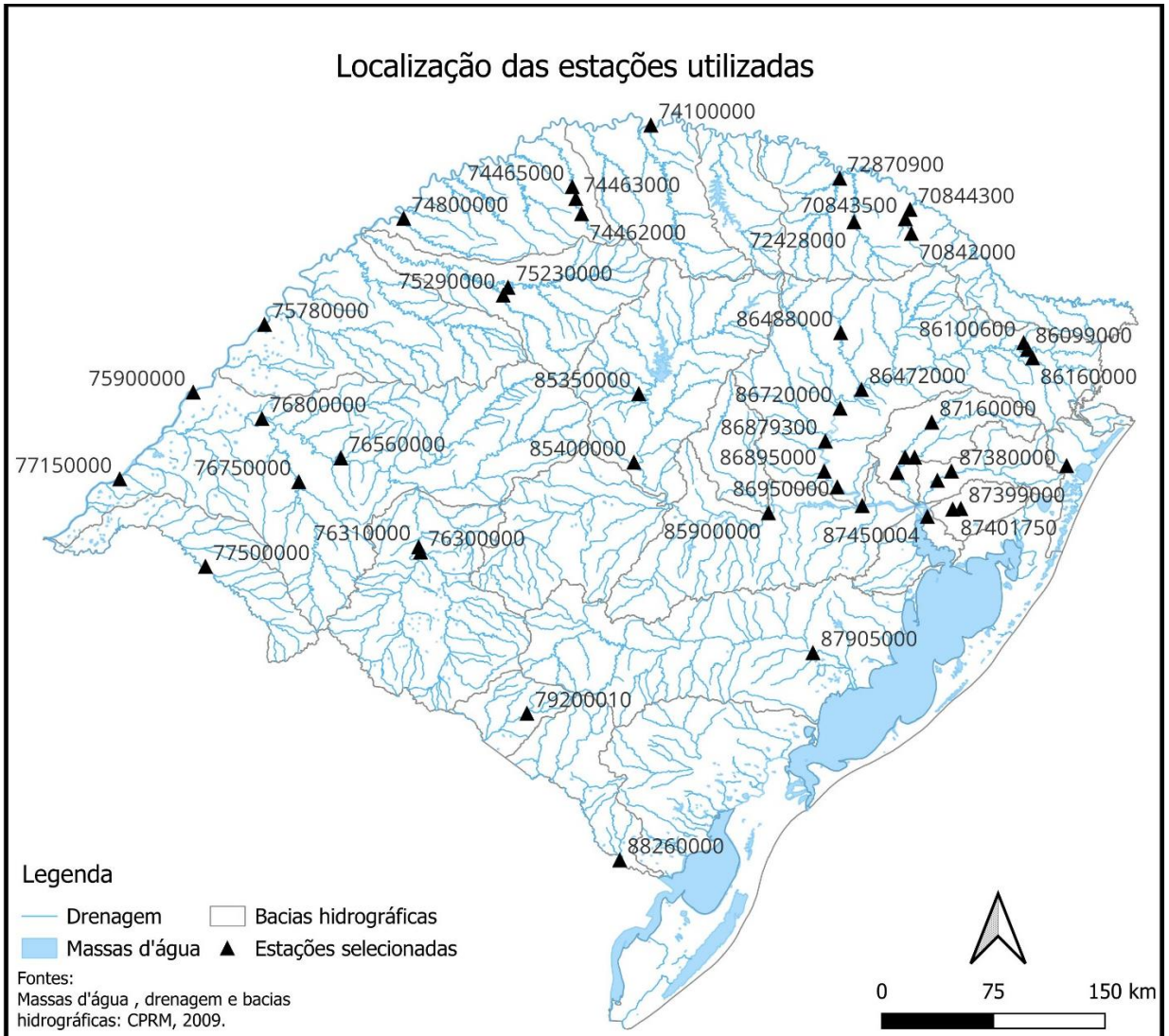
6. RESULTADOS

Nesse capítulo serão apresentados os resultados gerados a partir da metodologia apresentada no capítulo anterior. Iniciando o capítulo são apresentadas as estações selecionadas para o estudo, seguida pelos limiares de diferentes permanências calculados para cada estação. Em sequência são apresentados os coeficientes de recessão calculados, e as previsões de cotas realizadas com os coeficientes. Por fim, é apresentado o diagrama ROC, métrica utilizada para avaliar as previsões geradas.

6.1 Estações selecionadas

A Tabela 1 apresenta os dados de todas as estações utilizadas, contendo nome, código, suas coordenadas geográficas, município de localização, nome do rio, operadora e data de início das medições. A Figura 22 apresenta um mapa com a localização de todas as estações utilizadas, com ênfase para o nome do rio onde elas se encontram. Destaca-se que não foram utilizadas todas as estações, além da falta de disponibilidade de dados, em função de algumas não se adaptarem a primeira versão do sistema de previsão, precisando de ajustes individuais, como a mudança dos limiares de gatilho do modelo, alerta e atenção, por exemplo.

Figura 22. Estações telemétrica selecionadas.



Fonte: a autora (2024).

Tabela 1. Informações sobre as estações telemétricas selecionadas.

Nome da estação	Código da estação	Latitude	Longitude	Município	Nome do rio	Operadora	Data de início das medições
PCH ESMERALDA MONTANTE 2	70842000	-27.9631	-51.3375	ESMERALDA	RIO BERNARDO JOSÉ	Esmeralda S. A	18/01/2015
PCH ESMERALDA ARROIO SÃO JOAQUIM	70843500	-27.8572	-51.3814	LAGOA VERMELHA	ARROIO SÃO JOAQUIM	Esmeralda S. A	01/01/2015
UHE MACHADINHO RIO FORQUILHA	72428000	-27.8786	-51.7542	SANANDUVA	RIO FORQUILHA OU INHANDUVA	Consórcio UHE Machadinho	25/02/2015
UHE ITÁ RIO APUAÍ	72870900	-27.5619	-51.8578	MARCELINO RAMOS	RIO APUAE-MIRIM	Consórcio UHE Itá	18/01/2016
IRAÍ	74100000	-27.1756	-53.2297	IRAÍ	RIO URUGUAI	CPRM	29/06/2005
PCH CARLOS GONZATTO PONTE TURVO	74462000	-27.8203	-53.7328	SANTO AUGUSTO	RIO TURVO	CN Energia S. A	27/02/2015
PCH CARLOS GONZATTO VILA TURVO	74463000	-27.7089	-53.775	CAMPO NOVO	RIO TURVO	CN Energia S. A	24/02/2015
PCH CARLOS GONZATTO JUSANTE	74465000	-27.6231	-53.8008	CAMPO NOVO	RIO TURVO	CN Energia S. A	24/02/2015
PORTO LUCENA	74800000	-27.8525	-55.0256	PORTO LUCENA	RIO URUGUAI	CPRM	29/06/2005
SANTO ANGELO	75230000	-28.3553	-54.2675	ENTRE-IJUIS	RIO IJUÍ	CPRM	01/02/2014
PCH IJUIZINHO CERMISSÕES MONTANTE	75290000	-28.4122	-54.3025	ENTRE-IJUIS	RIO IJUIZINHO	Cermissões	05/02/2015
PASSO SÃO BORJA	75780000	-28.6244	-56.0369	SÃO BORJA	RIO URUGUAI	CPRM	07/11/2006
ITAQUI	75900000	-29.1175	-56.5544	ITAQUI	RIO URUGUAI	CPRM	04/09/2011
PONTE IBICUI DA ARMADA	76300000	-30.2808	-54.9031	ROSÁRIO DO SUL	RIO IBICUÍ DA ARMADA	CPRM	31/07/2019
ROSÁRIO DO SUL	76310000	-30.2428	-54.9169	ROSÁRIO DO SUL	RIO SANTA MARIA	CPRM	29/06/2005
MANOEL VIANA	76560000	-29.5958	-55.4814	MANOEL VIANA	RIO IBICUÍ	CPRM	29/06/2005
ALEGRETE	76750000	-29.7683	-55.7875	ALEGRETE	RIO IBIRAPUITA	CPRM	29/06/2005
PASSO MARIANO PINTO	76800000	-29.3092	-56.0553	ITAQUI	RIO IBICUÍ	CPRM	02/04/2019
URUGUAIANA	77150000	-29.7486	-57.0886	URUGUAIANA	RIO URUGUAI	CPRM	29/06/2005
QUARAÍ	77500000	-30.3844	-56.4656	QUARAÍ	RIO QUARAÍ	CPRM	14/08/2005

FAZENDA SÃO JORGE / BAGÉ	79200010	-31.4533	-54.13	BAGÉ	RIO NEGRO	SEMA	04/05/2020
PCH ENGENHEIRO HENRIQUE KOTZIAN JUSANTE	85350000	-29.1289	-53.3178	JÚLIO DE CASTILHOS	RIO IVAÍ	BME Energia S.A.	15/12/2000
DONA FRANCISCA	85400000	-29.6269	-53.3528	DONA FRANCISCA	RIO JACUÍ	CPRM	29/06/2005
RIO PARDO	85900000	-29.995	-52.3756	RIO PARDO	RIO JACUÍ	CPRM	06/11/2017
PCH PEZZI MONTANTE	86099000	-28.8047	-50.4936	BOM JESUS	RIO DAS ANTAS	Pezzi Energética S. A.	29/09/2015
PCH PEZZI ARROIO PINHEIRO ALTO	86100600	-28.7575	-50.5211	BOM JESUS	ARROIO DO JUNCO	Pezzi Energética S. A.	30/09/2015
PASSO TAINHAS	86160000	-28.8681	-50.4561	JAQUIRANA	RIO TAINHAS	CPRM	05/11/2019
LINHA JOSÉ JÚLIO	86472000	-29.0978	-51.6997	SANTA TEREZA	RIO DAS ANTAS	CPRM	14/09/2015
PCH CAÇADOR MONTANTE	86488000	-28.6847	-51.8506	SERAFINA CORRÊA	RIO CARREIRO	Caçador Energética	24/02/2015
ENCANTADO	86720000	-29.2344	-51.855	ENCANTADO	RIO TAQUARI	CPRM	03/06/2009
ESTRELA	86879300	-29.4733	-51.9622	ESTRELA	RIO TAQUARI	CPRM	25/11/2020
PORTO MARIANTE	86895000	-29.6922	-51.97	VENANCIO AIRES	RIO TAQUARI	CPRM	25/08/2014
TAQUARI	86950000	-29.8069	-51.8758	TAQUARI	RIO TAQUARI	CPRM	26/11/2021
TRIUNFO	87010000	-29.9419	-51.6942	TRIUNFO	RIO JACUÍ	SEMA	30/10/2014
NOVA PALMIRA	87160000	-29.3356	-51.1889	CAXIAS DO SUL	RIO CAÍ	CPRM	24/11/2017
BARCA DO CAÍ	87170000	-29.59	-51.3833	SÃO SEBASTIÃO DO CAÍ	RIO CAÍ	CPRM	27/03/2018
COSTA DO RIO CADEIA - MONTANTE	87230000	-29.5906	-51.3136	SÃO SEBASTIÃO DO CAÍ	RIO CADEIA	CPRM	31/10/2017
PASSO MONTENEGRO	87270000	-29.7011	-51.4411	MONTENEGRO	RIO CAÍ	CPRM	01/09/2014
MAQUINÉ	87317030	-29.6519	-50.2092	MAQUINÉ	RIO MAQUINÉ	CPRM	22/11/2019
CAMPO BOM	87380000	-29.6917	-51.0461	CAMPO BOM	RIO DOS SINOS	CPRM	13/12/2013
SÃO LEOPOLDO	87382000	-29.7589	-51.1483	SÃO LEOPOLDO	RIO DOS SINOS	CPRM	01/08/2018
PASSO DAS CANOAS - AUXILIAR	87399000	-29.9644	-50.9778	GRAVATAÍ	RIO GRAVATAÍ	CPRM	01/08/2018
CORSAN ALVORADA	87401750	-29.9683	-51.0367	ALVORADA	RIO GRAVATAÍ	SEMA	07/11/2017
CAIS MAUÁ C6	87450004	-30.0211	-51.2211	PORTO ALEGRE-RS	RIO GUÁIBA	SEMA	29/07/2014

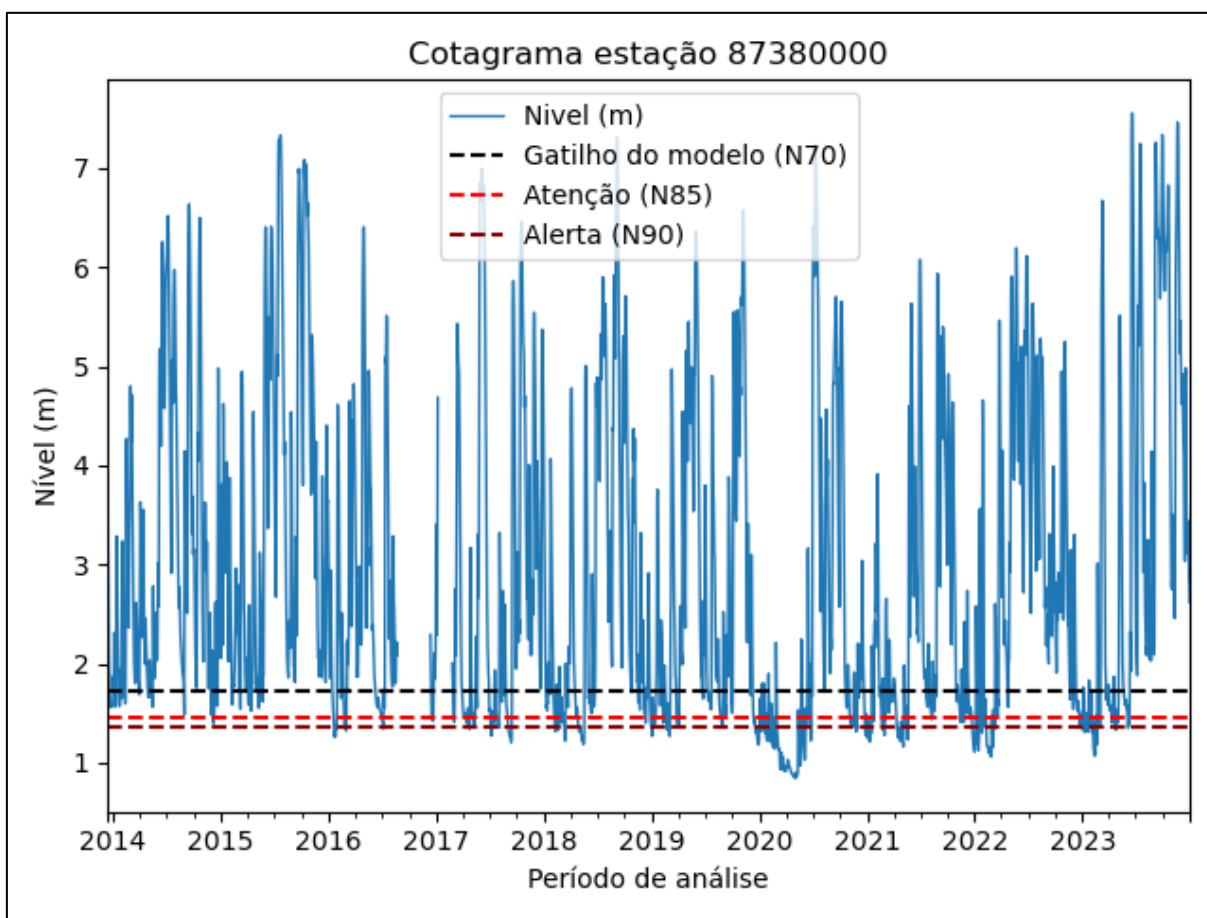
PASSO DO MENDONÇA	87905000	-31.0119	-52.0525	CRISTAL-RS	RIO CAMAQUÃ	CPRM	10/02/2015
PASSO DAS PEDRAS	88260000	-32.5194	-53.4558	JAGUARÃO-RS	RIO JAGUARÃO	CPRM	04/07/2014

Fonte: a autora (2024).

6.2 Limiares

A Figura 23 apresenta o cotagrama para a estação 87830000 para os anos de 2014 a 2023. Na imagem são observados os limiares de gatilho do modelo, atenção e alerta, representados pelas linhas tracejadas nas cores preto, vermelho e vermelho escuro, respectivamente. O cotagrama buscar representar o funcionamento do modelo quanto a detecção dos seus limiares de funcionamento.

Figura 23. Cotagrama da estação 87380000.



Fonte: a autora (2024).

Para o acionamento do modelo foram definidas as cotas com a permanência em 70% do tempo, representando que todas as cotas abaixo desse limiar estão presentes dentro do período considerado como estiagem no rio. Também foram calculados os limiares de cota com permanência em 85% do tempo representando o limiar de atenção (para o qual foram calculadas as métricas de análise) e o limiar de alerta, como sendo a cota com permanência em 90% do tempo no rio. As métricas

foram calculadas para o limiar de atenção buscando projetar um sistema de previsão de níveis de rios que possa informar aos órgãos gestores quando ainda há tempo para iniciar um programa de ações para evitar danos maiores aos usos da água do corpo hídrico, como apresentar falta de água para o abastecimento de uma cidade.

O limiar de alerta foi calculado e representado com o objetivo de apresentar ao leitor um panorama dos eventos críticos de escassez hídrica, onde muitas vezes o nível do rio baixa ao longo de 7 dias, partindo da cota de atenção para a cota de alerta. Todos os limiares foram calculados para o período de início das medições da estação até agosto de 2022. A Tabela 2 apresenta as três cotas utilizadas no modelo para cada uma das estações.

Tabela 2. Limiares calculados para cada uma das estações.

Número da Estação	N70 (gatilho)	N85 (atenção)	N90 (alerta)
70842000	2,36	2,28	2,24
70843500	1,44	1,37	1,35
72428000	0,99	0,86	0,80
72870900	0,88	0,70	0,60
74100000	1,79	1,51	1,41
74462000	1,12	0,87	0,73
74463000	1,57	1,48	1,41
74465000	1,36	1,14	1,06
74800000	0,93	0,63	0,55
75230000	1,36	1,17	1,08
75290000	0,61	0,49	0,01
75780000	2,29	1,53	1,24
75900000	1,94	1,17	0,75
76300000	0,34	0,15	0,10
76310000	0,57	0,35	0,29
76560000	2,27	1,68	1,49
76750000	1,27	0,99	0,91
76800000	1,21	0,96	0,79
77150000	2,70	1,95	1,69
77500000	0,70	0,53	0,48
79200010	1,79	1,65	1,54
85350000	0,49	0,21	0,01
85400000	1,55	1,11	1,00
85900000	2,17	1,55	1,25
86099000	0,58	0,49	0,45
86100600	0,31	0,23	0,18
86160000	0,62	0,50	0,44
86472000	2,49	2,20	2,01

86488000	1,64	1,55	1,50
86720000	1,90	1,60	1,46
86879300	12,89	12,84	12,82
86895000	1,67	1,38	1,29
86950000	2,34	2,20	2,13
87010000	1,26	1,07	0,96
87160000	0,12	0,06	0,04
87170000	1,69	1,46	1,35
87230000	1,05	0,82	0,71
87270000	0,94	0,78	0,72
87317030	1,19	1,15	1,12
87380000	1,72	1,46	1,37
87382000	1,11	0,88	0,81
87399000	1,50	1,17	1,08
87401750	1,79	1,45	1,36
87450004	0,77	0,62	0,55
87905000	0,80	0,49	0,40
88260000	1,41	1,13	1,04

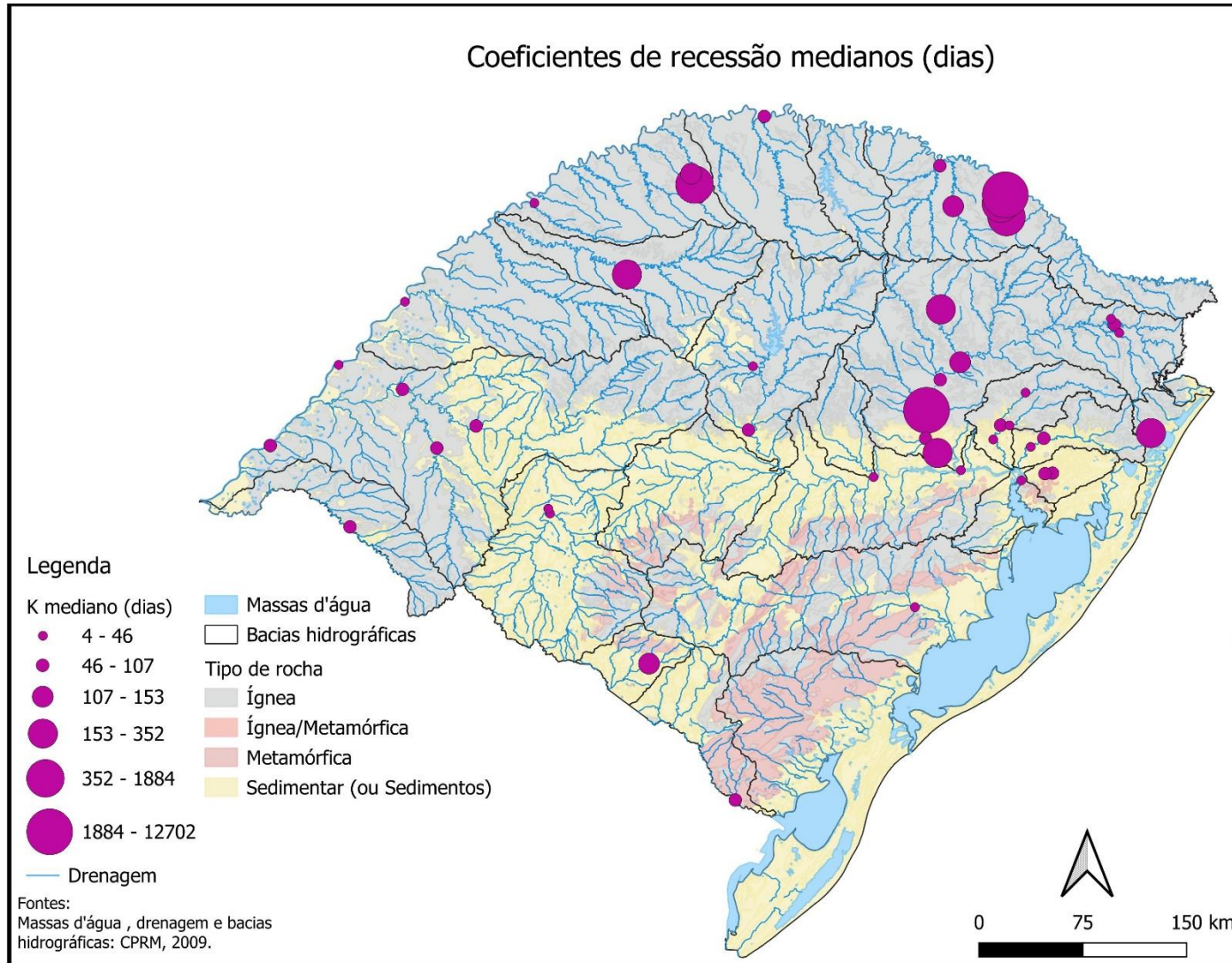
Fonte: a autora (2024).

Observa-se que os limiares de gatilho do modelo (N70), os limiares de atenção (N85) e os limiares de alerta (N90) ficaram abaixo de 3 metros em todas as estações, salvo a estação número 86950000.

6.1 Coeficientes de recessão

Após a definição dos limiares foi aplicada a metodologia de definição dos períodos de estiagem como sendo os períodos com as cotas abaixo do limiar de gatilho do modelo e estando em decréscimo dos níveis dos rios. Definidos esses períodos foi possível calcular os três coeficientes de recessão para cada uma das estações utilizadas, sendo eles o coeficiente de recessão mediano, de percentil 25 e de percentil 75 dentro da lista dos coeficientes calculados. Foi utilizada uma escala de valores de coeficiente de recessão variando de 4 até 12.702 para os três coeficientes. A Figura 24 apresenta um mapa com a distribuição espacial dos coeficientes de recessão medianos.

Figura 24. Mapa da distribuição espacial dos coeficientes de recessão medianos.



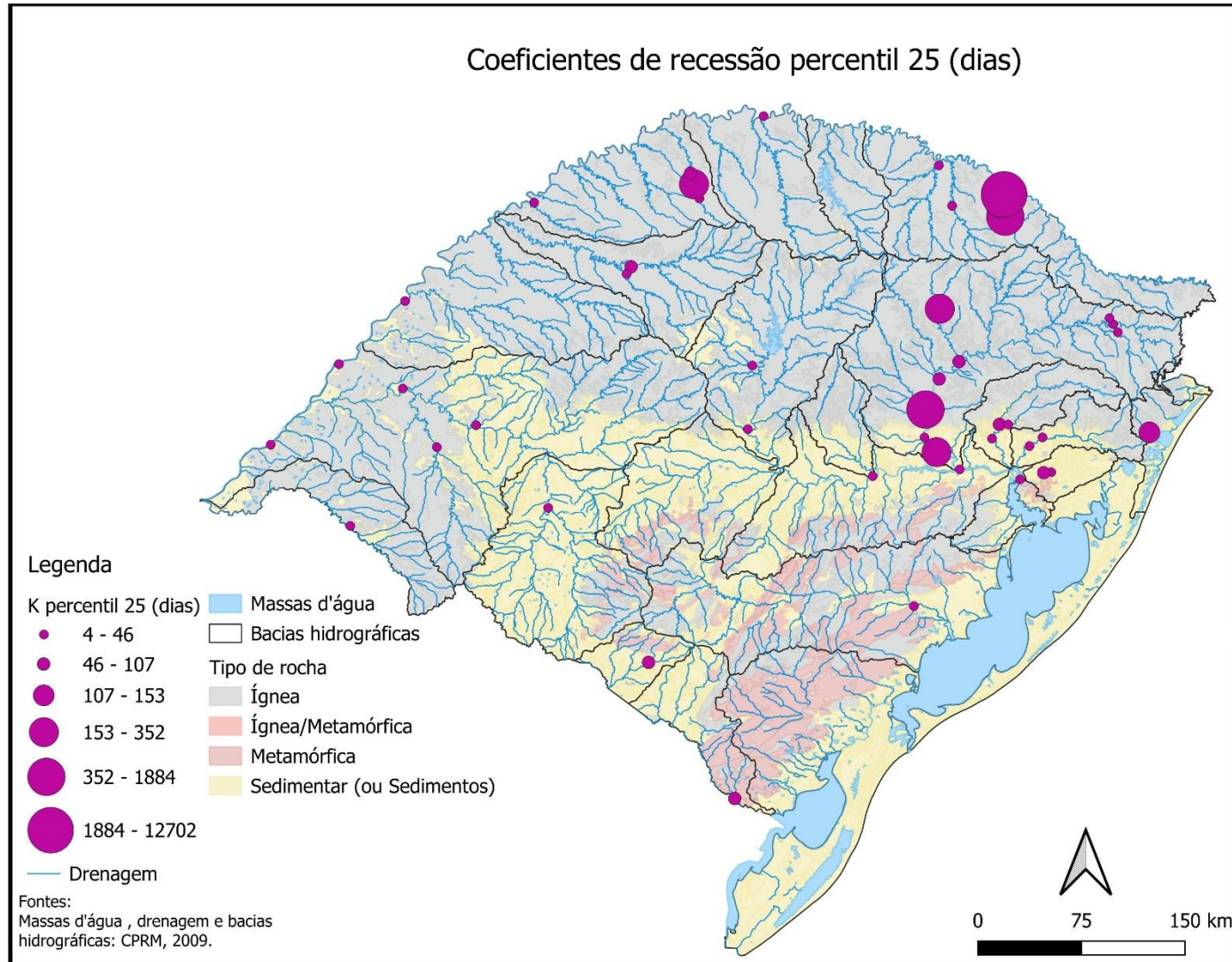
Fonte: a autora (2024).

Observa-se no mapa que estão presentes as variações de tipo de rocha presentes no estado, variando entre ígnea, ígnea/metamórfica, metamórfica e sedimentar. Segundo Collischonn e Dornelles (2015), o coeficiente de recessão depende das várias características físicas da bacia e está muito relacionado com a geologia do local. Segundo os autores, valores mais altos dos coeficientes são encontrados em regiões de rochas sedimentares, devida a maior capacidade de armazenamento de água subterrânea. Já os valores mais baixos são encontrados em regiões de rochas pouco porosas, como as rochas basálticas.

Avaliando a posição dos coeficientes nos tipos e rocha presentes observou-se que os valores mais altos de coeficiente de recessão estão localizados nas regiões de rochas menos porosas, e os coeficientes de valores mais baixos estão distribuídos entre os três tipos de rocha. Durante o cálculo dos coeficientes foi observado que existe uma tendência aos rios com variações muito baixas de nível, como nos casos de controle de vazão por hidrelétricas, apresentarem valores mais altos de coeficientes de recessão. Já nas regiões com maior variação dos níveis dos rios, os coeficientes tendem a ter valores mais baixos, devido a essa variação. Destaca-se também que o valor numérico dos coeficientes está intimamente ligado a vários fatores presentes no conjunto de bacia hidrográfica com o aquífero, indo além somente da predominância no tipo de rocha.

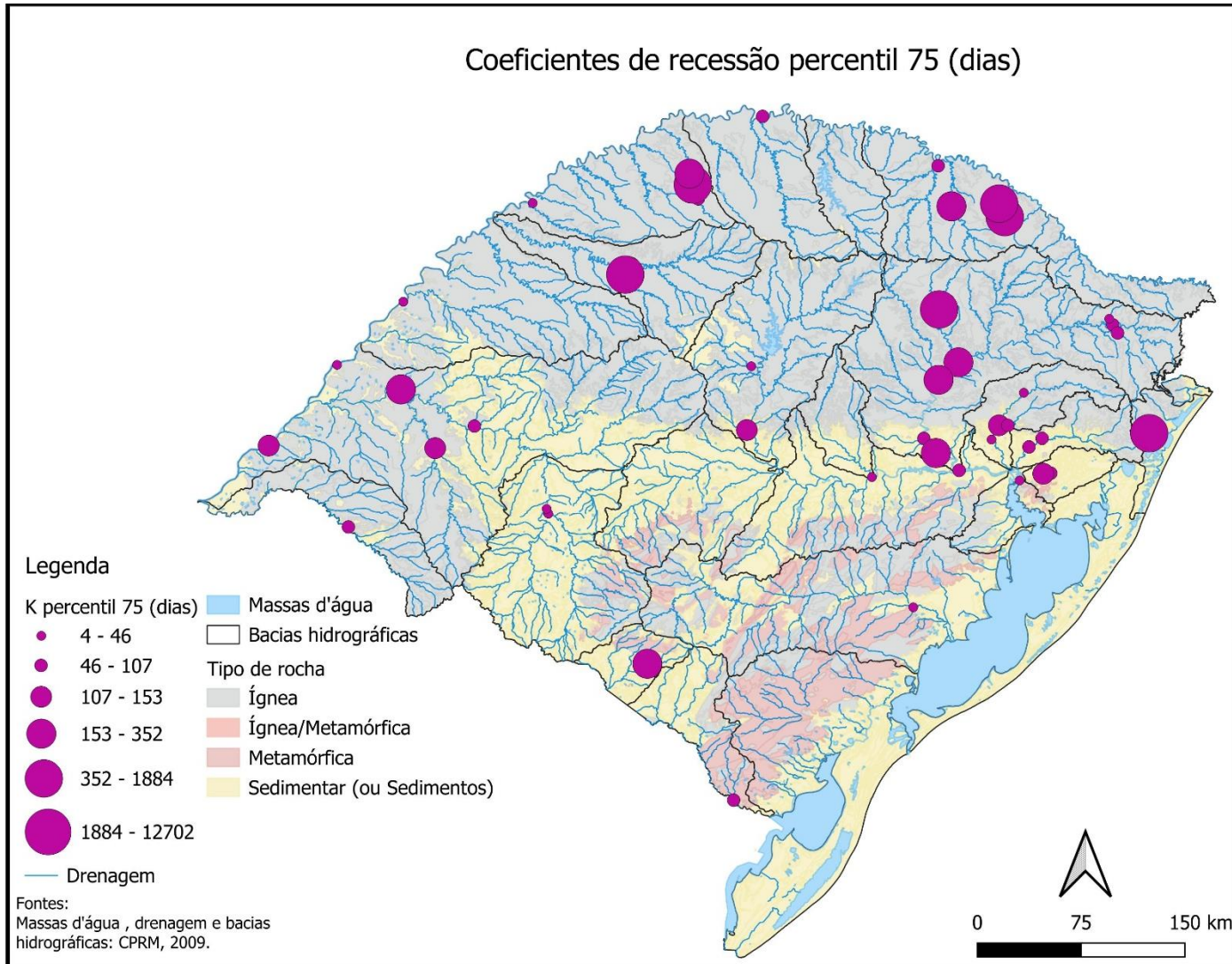
A Figura 25 e a Figura 26 mostram a seguir a distribuição espacial dos coeficientes de recessão dos percentis 25 e 75:

Figura 25. Mapa da distribuição espacial dos coeficientes de recessão do percentil 25.



Fonte: a autora (2024).

Figura 26. Mapa da distribuição espacial dos coeficientes de recessão do percentil 75.



Fonte: a autora (2024).

Como esperado, observou-se uma redução dos coeficientes para o percentil 25 e aumento para o percentil 75. A Tabela 3 apresenta todos os valores dos coeficientes:

Tabela 3. Coeficientes de recessão calculados.

Número da Estação	K mediano	K percentil 25	K percentil 75
70842000	547,3	398,8	852
70843500	707,5	333,5	1092
72428000	140,2	40,3	208
72870900	62,2	43,1	82
74100000	77	40,9	106
74462000	44,3	32,1	87
74463000	443,6	291,1	586
74465000	133,3	63	163
74800000	22,7	15,3	32
75230000	103,9	69,1	149
75290000	221	44,1	703
75780000	16,9	13,4	27
75900000	11,5	7,1	24
76300000	6,9	4	10
76310000	16,5	7,9	26
76560000	58,5	38,1	106
76750000	66,3	33,4	120
76800000	78,5	37,2	250
77150000	52,4	32,7	136
77500000	56,1	38,8	95
79200010	124,3	61,4	183
85350000	24,9	21,5	33
85400000	47,3	30,2	108
85900000	26,2	20,3	31
86099000	51,1	40,6	64
86100600	23,7	14,6	40
86160000	42,4	34	50
86472000	112,4	53,4	194
86488000	272,9	185,1	399
86720000	76,7	51,1	212
86879300	1884,7	858,4	12834
86895000	48,1	29,8	66
86950000	345,5	345,5	346
87010000	27	24,9	49
87160000	4,4	3,7	7
87170000	89,5	58	127
87230000	38,9	27,8	86
87270000	21,4	16	35
87317030	178,4	108,1	623
87380000	62	40,4	96

87382000	19,1	17,2	51
87399000	51,2	40,1	93
87401750	72,9	59,5	109
87450004	14,1	12,8	17
87905000	26,4	17	42
88260000	66,7	55,2	91

Fonte: a autora (2024).

6.2 Previsão de cotas

Com os coeficientes de recessão definidos, foi possível gerar previsões de cota retrospectivas utilizando previsões de até 7 dias. Para reproduzir como o sistema de previsão funcionaria em tempo real diante de uma situação de crise hídrica, foram geradas previsões diárias, utilizando o dado de cota do dia anterior como ponto de partida e gerando previsões de cotas para os próximos 7 dias. A Tabela 4 apresenta a quantidade de previsões avaliadas para cada uma das estações.

Tabela 4. Número de previsões para cada uma das estações.

Número da estação	Número de previsões
70842000	105
70843500	91
72428000	140
72870900	70
74100000	21
74462000	112
74463000	245
74465000	35
74800000	35
75230000	203
75290000	7
75780000	84
75900000	98
76300000	154
76310000	280
76560000	203
76750000	161
76800000	140
77150000	147
77500000	161
79200010	112
85350000	7
85400000	175

85900000	175
86099000	35
86100600	35
86160000	7
86472000	21
86488000	98
86720000	56
86879300	56
86895000	56
86950000	70
87010000	77
87160000	56
87170000	112
87230000	84
87270000	42
87317030	119
87380000	84
87382000	35
87399000	70
87401750	70
87450004	28
87905000	70
88260000	196

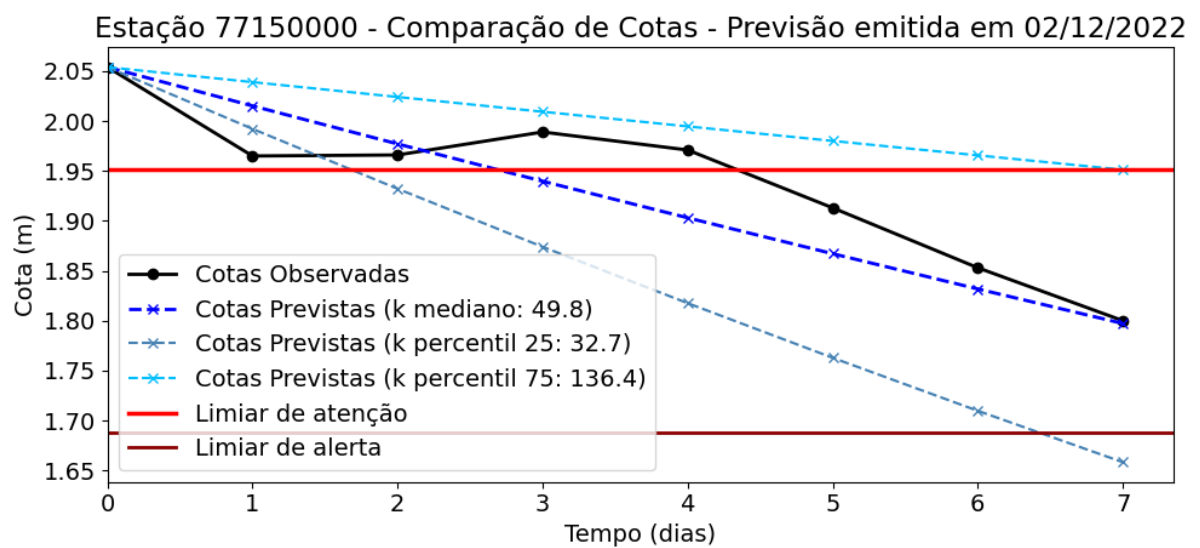
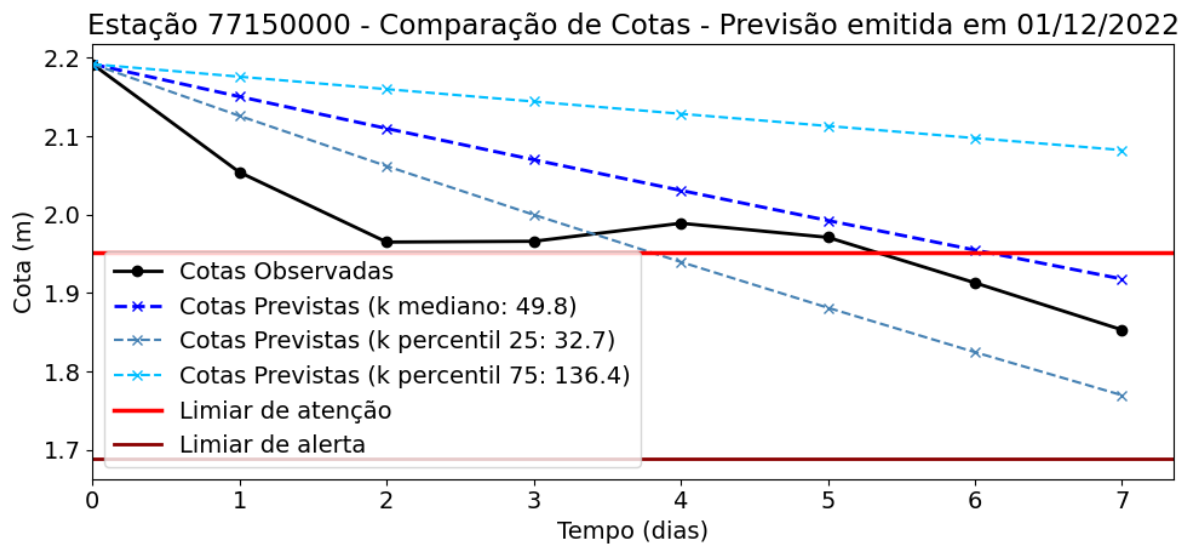
Fonte: a autora (2024).

É possível observar na Tabela 4 que algumas estações apresentaram poucas previsões, e algumas somente 7 previsões. Isso deve-se, principalmente, por dois motivos. O primeiro são os limiares escolhidos para gatilho do modelo, atenção e alerta não estarem ajustados com as características da área de drenagem relativa a estação, fazendo com que sejam detectados poucos períodos de estiagem, resultando em poucas previsões. O segundo motivo é pelo controle do nível dos rios, como em estações próximas a hidrelétricas, que fazem com que seja mantida uma vazão ecológica em períodos de estiagem. Nesses casos o modelo também acaba detectando poucos períodos de estiagem, e assim faz poucas previsões.

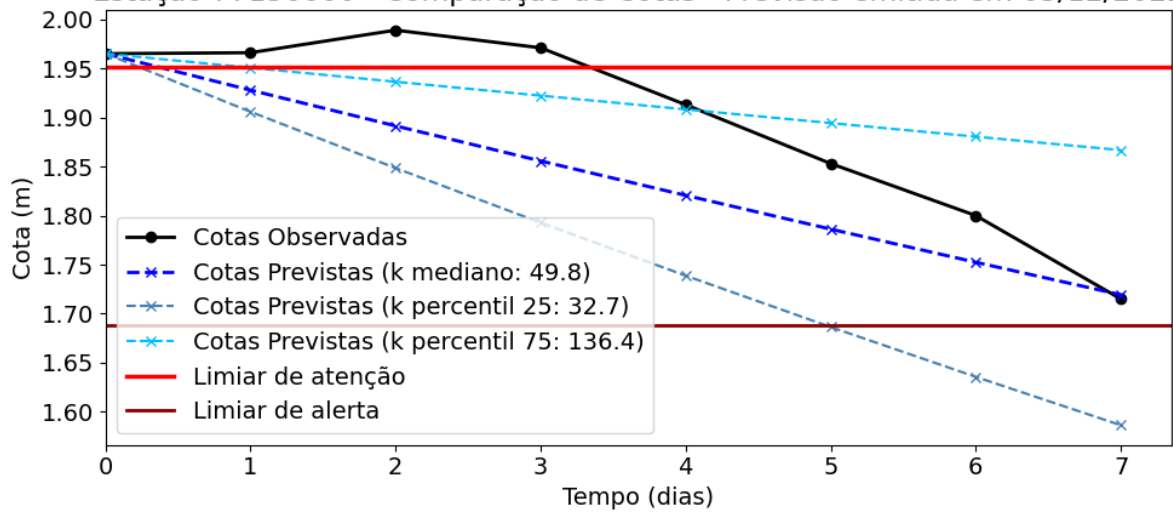
As cotas observadas são apresentadas pela linha preta, enquanto as previsões com os coeficientes de recessão mediano, de percentil 25 e de percentil 75 são apresentadas, respectivamente, pelas seguintes cores: azul royal, azul acinzentado e azul fluorescente. O limiar de atenção é apresentado pela linha contínua vermelha e o limiar de alerta é apresentado pela linha contínua vermelho escuro.

A Figura 27 a Figura 35 a seguir apresentam como seria realizado o acompanhamento dos níveis dos rios e previsões ao longo de 8 dias, com 7 dias de horizonte em cada previsão, para as estações 77150000, 87380000 e 87399000.

Figura 27. Previsões para a estação 77150000 – parte 1.

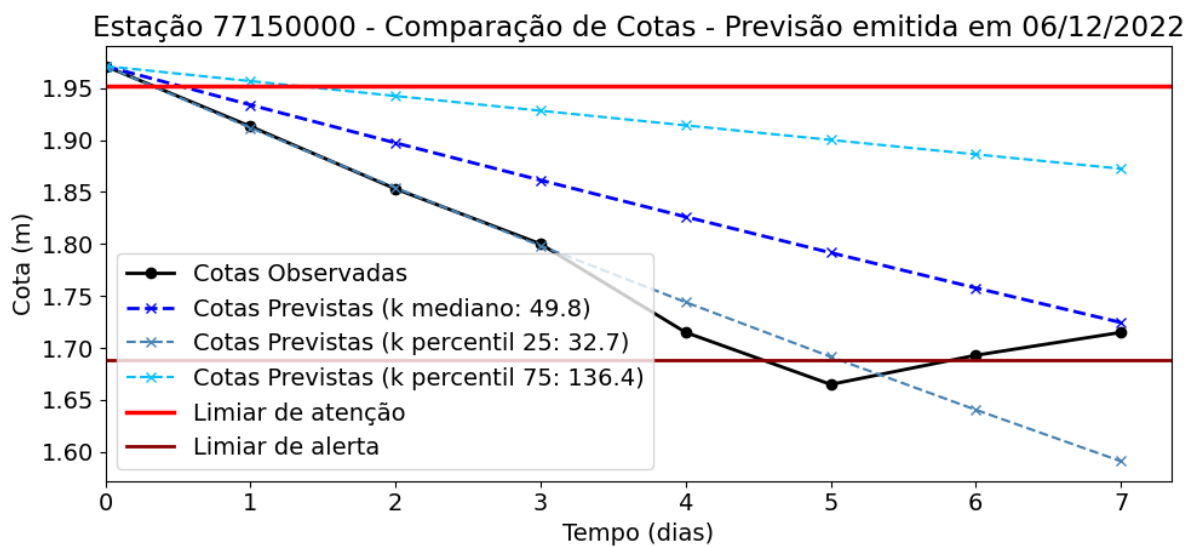
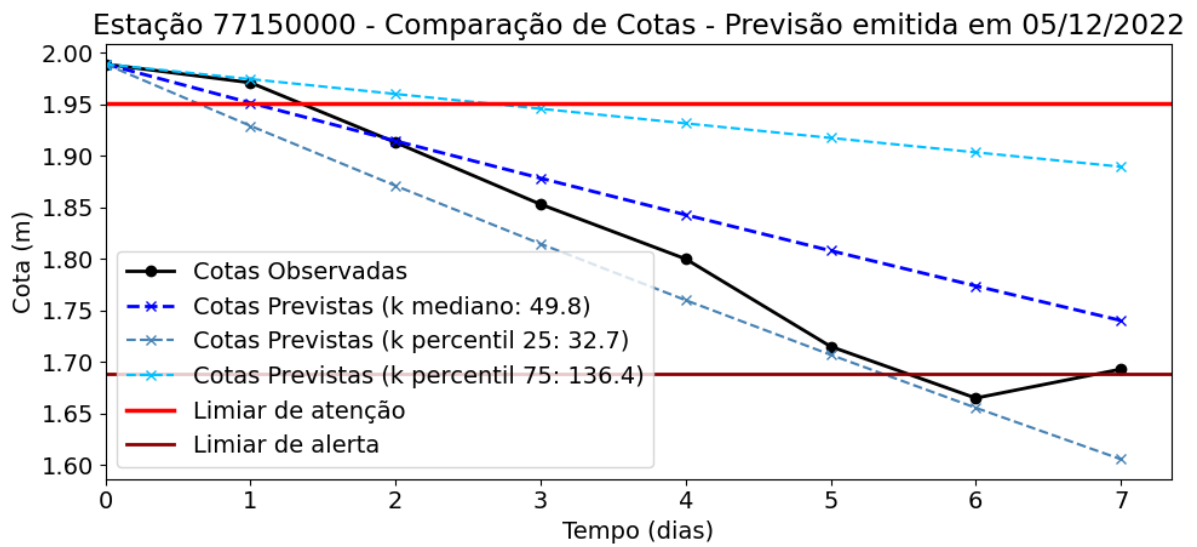
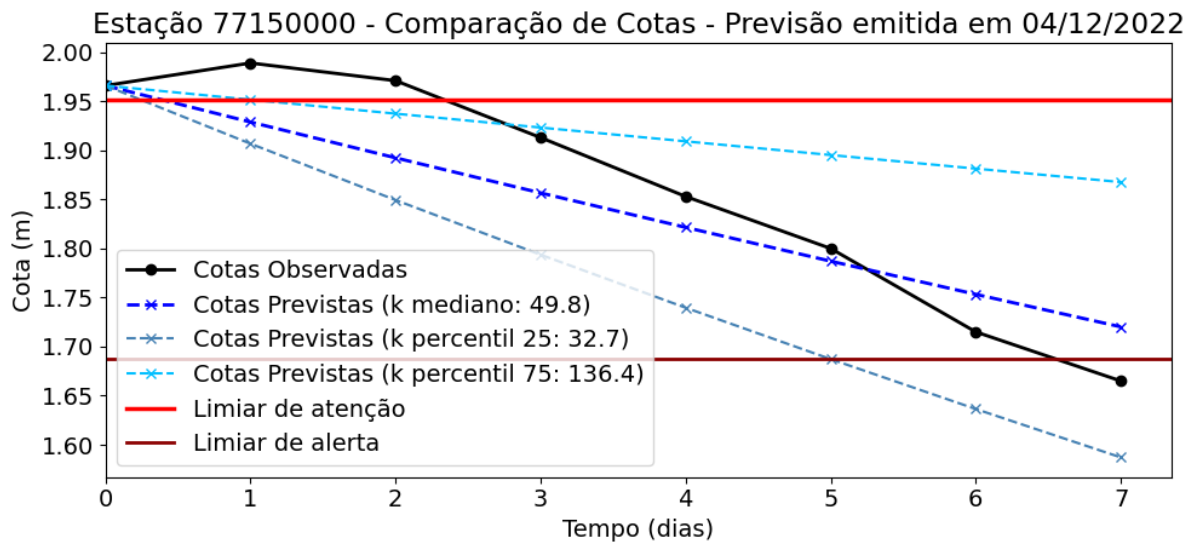


Estação 77150000 - Comparação de Cotas - Previsão emitida em 03/12/2022



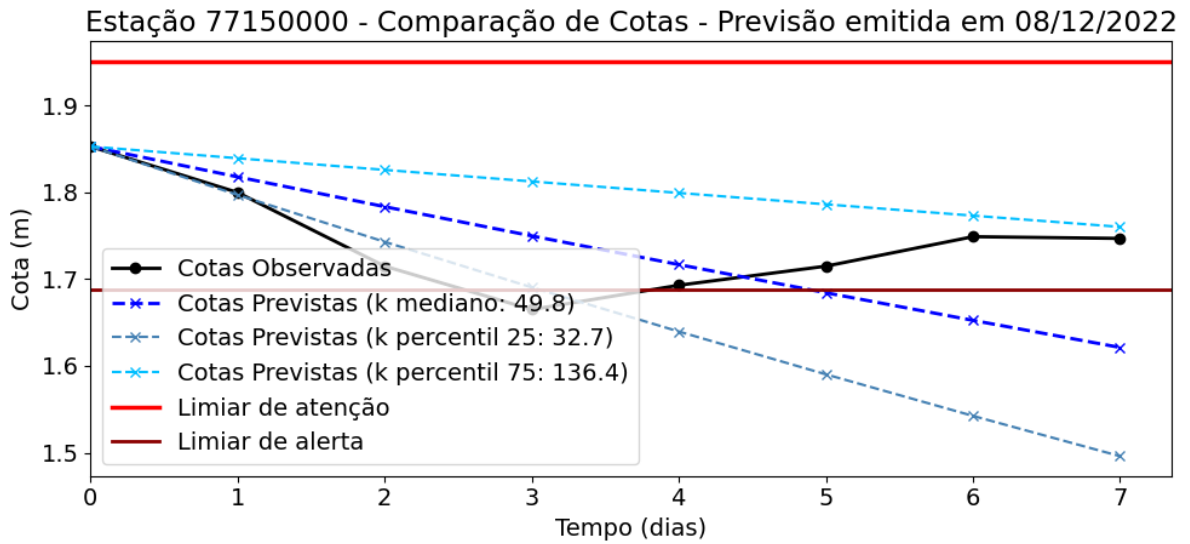
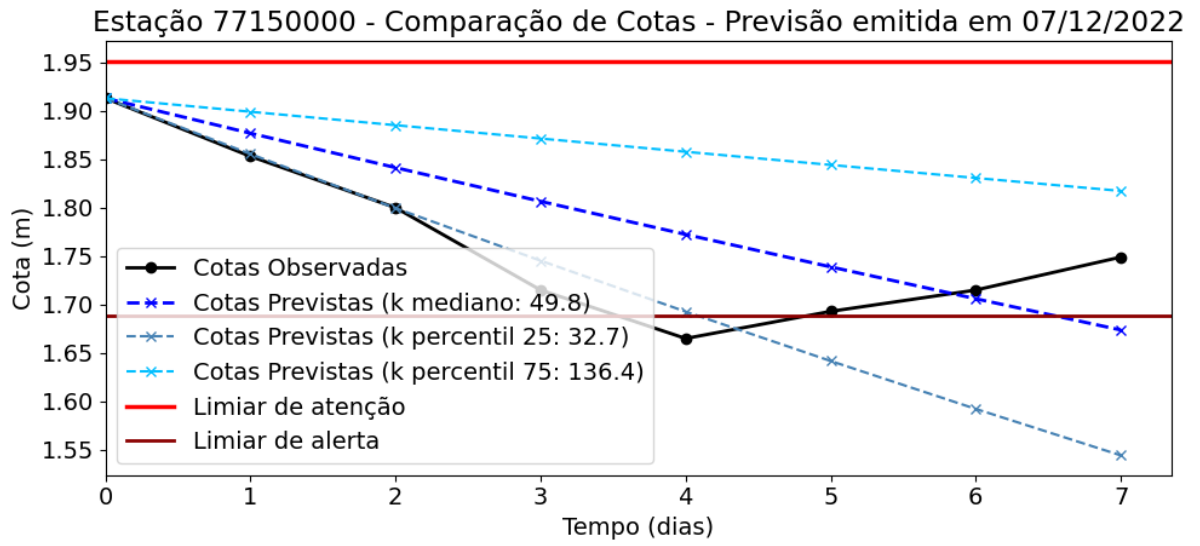
Fonte: a autora (2024).

Figura 28. Previsões para a estação 77150000 – parte 2.



Fonte: a autora (2024).

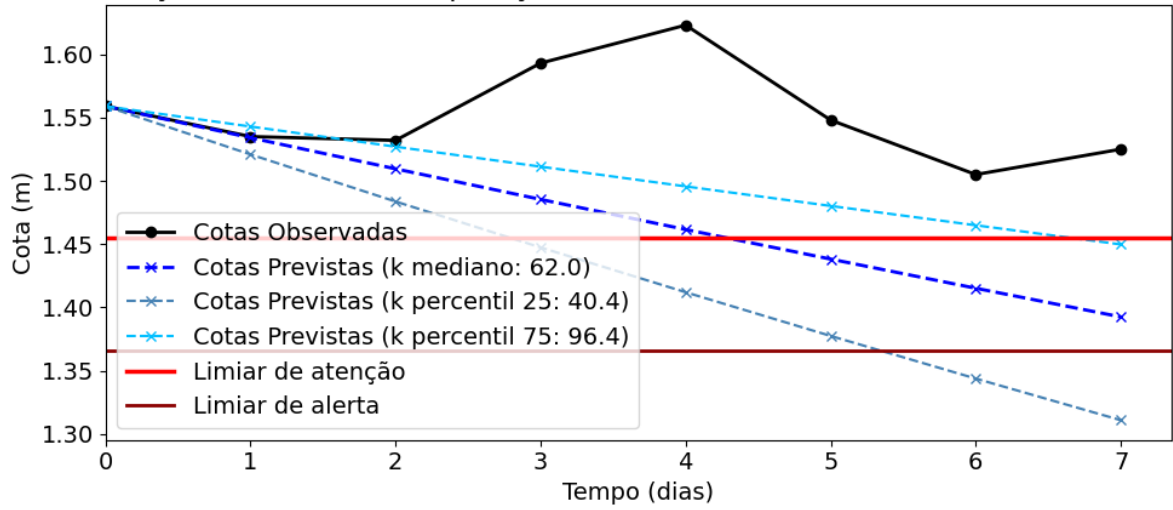
Figura 29. Previsões para a estação 77150000 – parte 3.



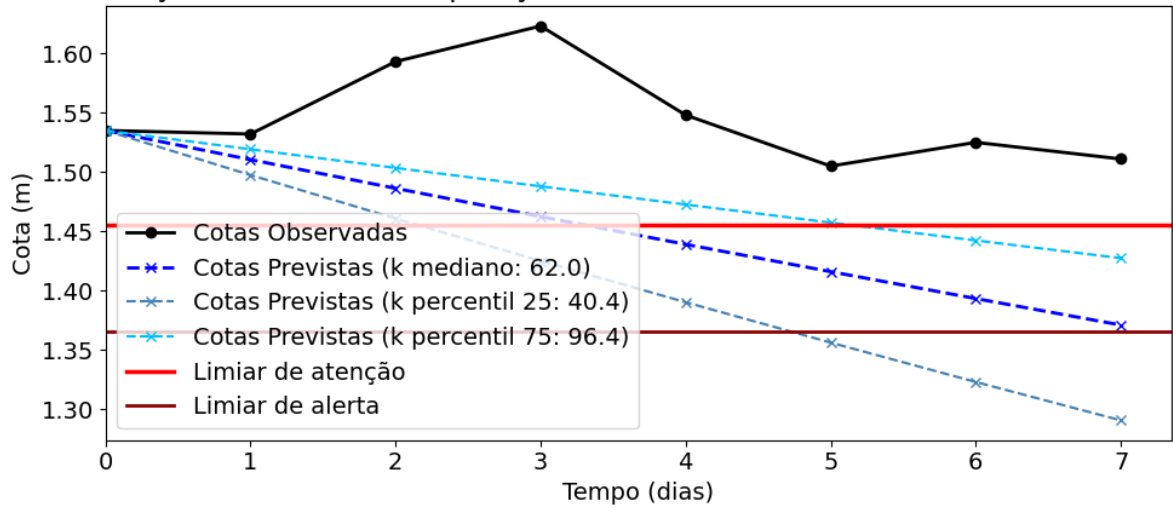
Fonte: a autora (2024).

Figura 30. Previsões para a estação 87380000 – parte 1.

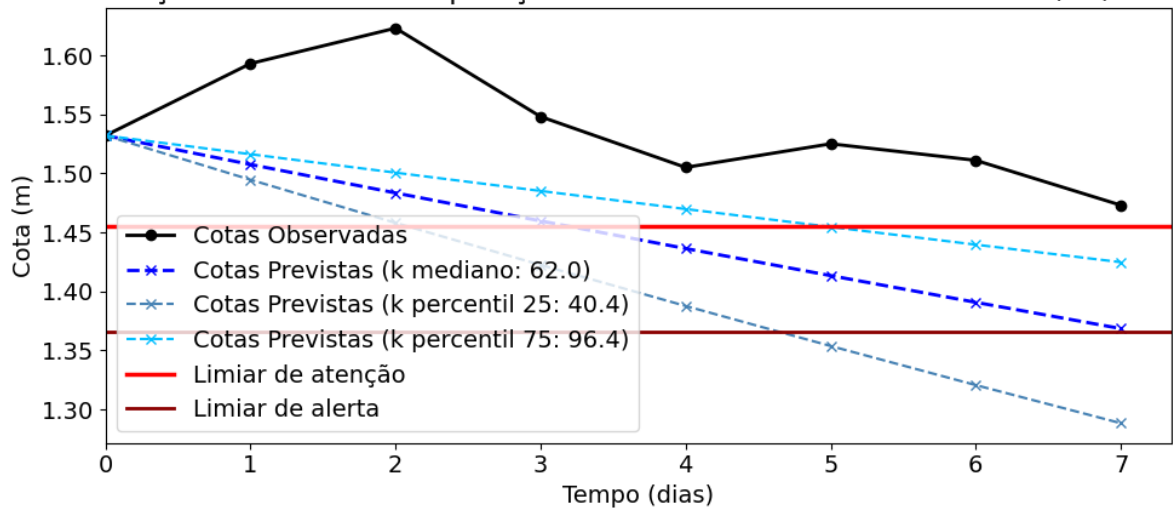
Estação 87380000 - Comparação de Cotas - Previsão emitida em 14/12/2022



Estação 87380000 - Comparação de Cotas - Previsão emitida em 15/12/2022



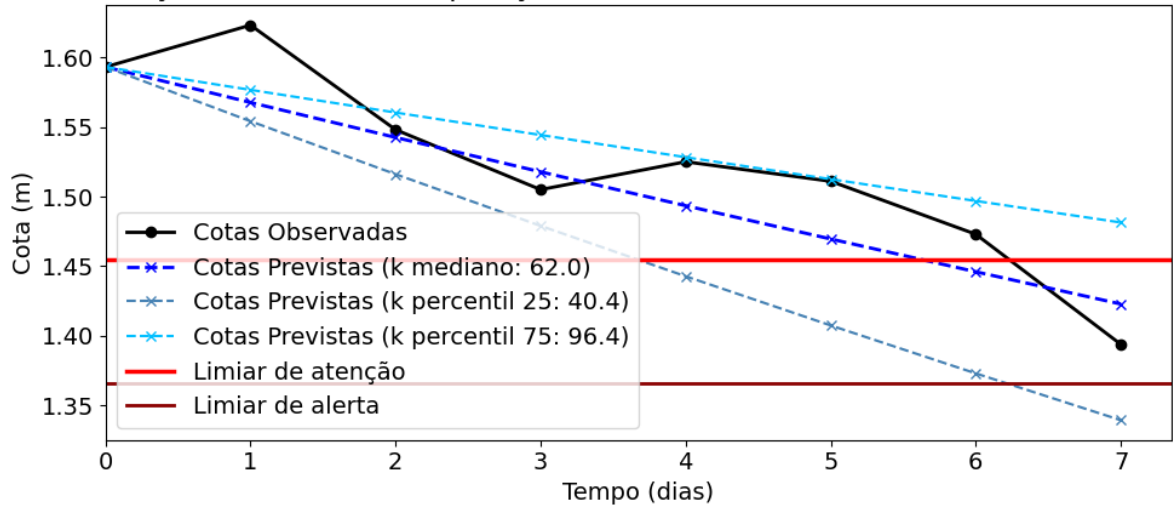
Estação 87380000 - Comparação de Cotas - Previsão emitida em 16/12/2022



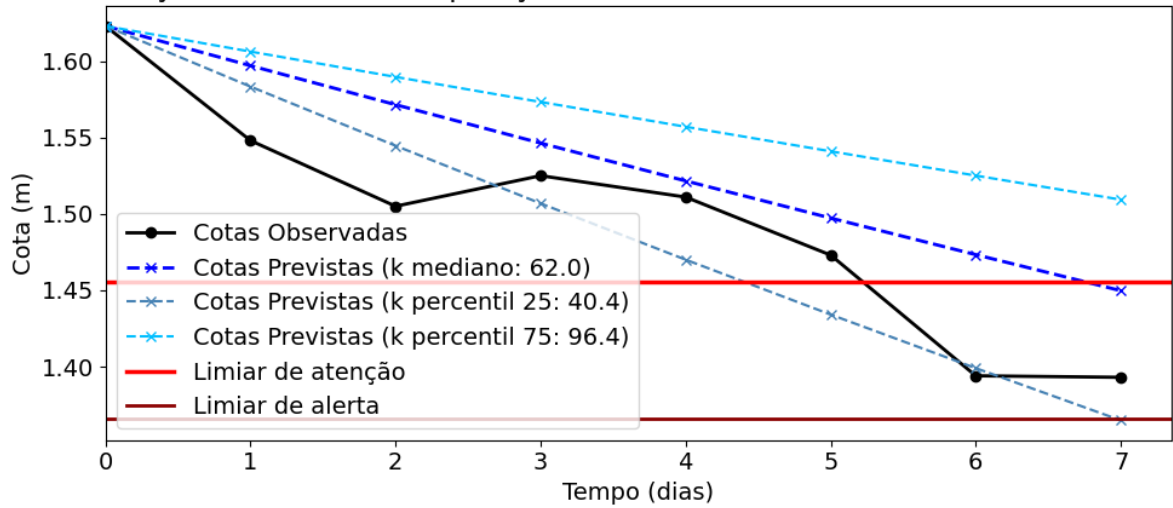
Fonte: a autora (2024).

Figura 31. Previsões para a estação 87380000 – parte 2.

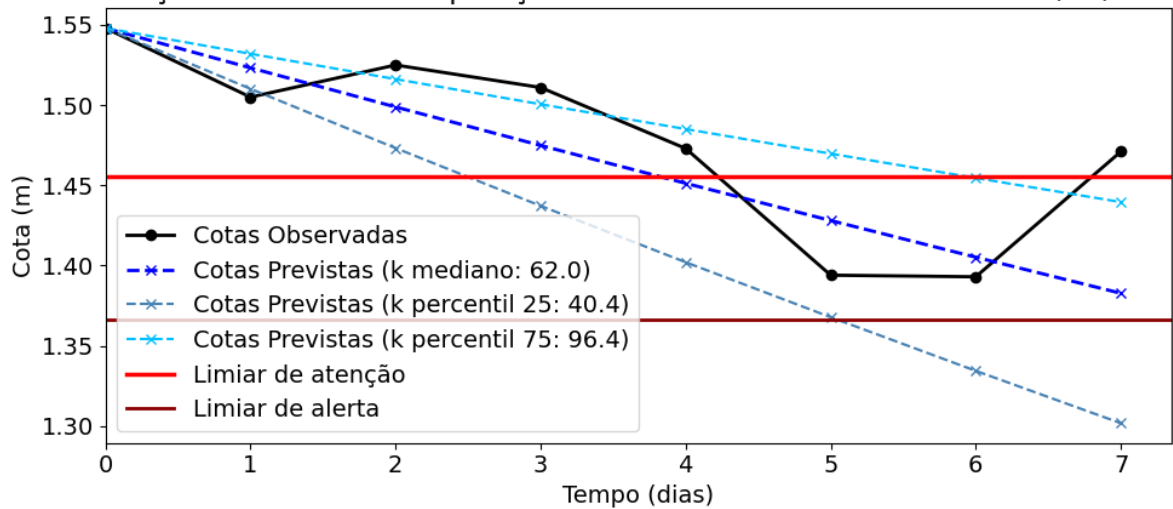
Estação 87380000 - Comparação de Cotas - Previsão emitida em 17/12/2022



Estação 87380000 - Comparação de Cotas - Previsão emitida em 18/12/2022



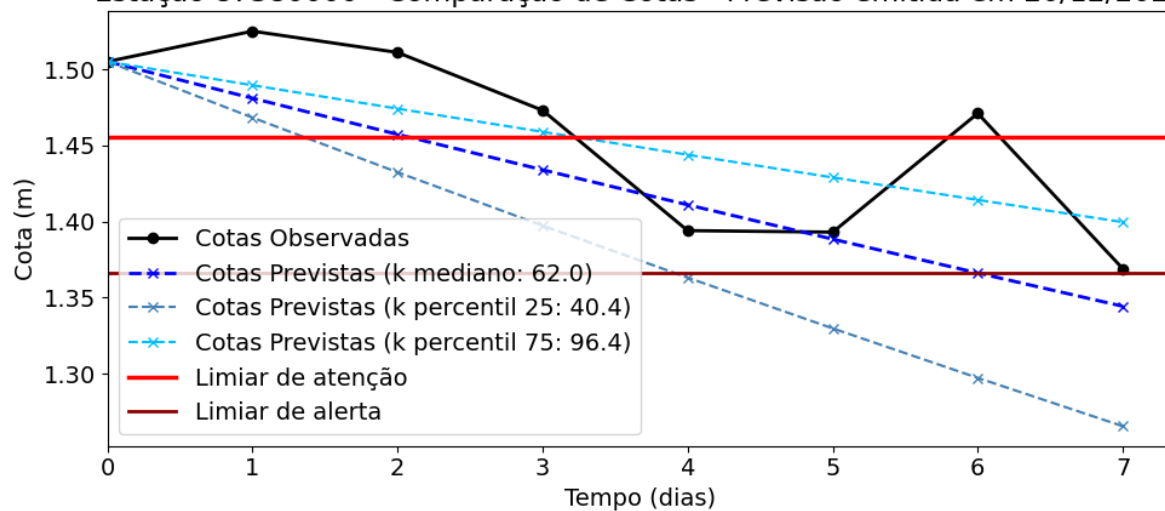
Estação 87380000 - Comparação de Cotas - Previsão emitida em 19/12/2022



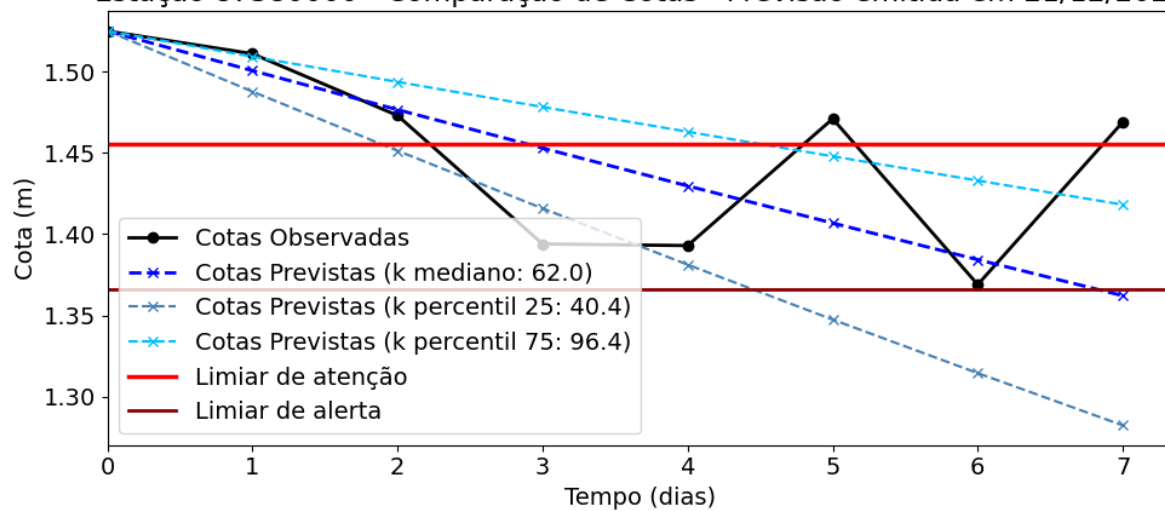
Fonte: a autora (2024).

Figura 32. Previsões para a estação 87380000 – parte 3.

Estação 87380000 - Comparação de Cotas - Previsão emitida em 20/12/2022

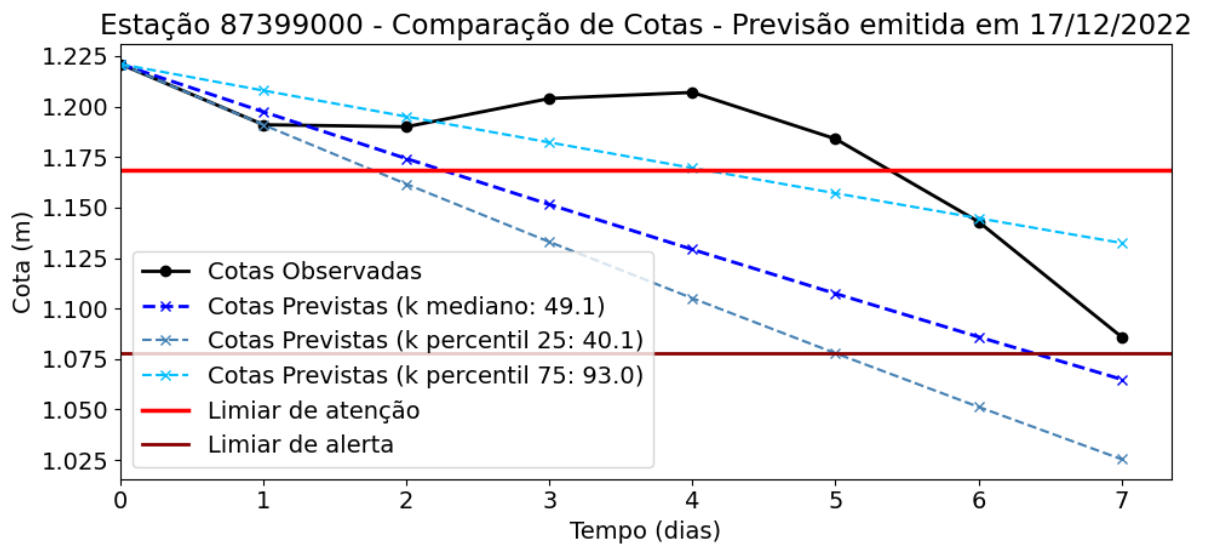
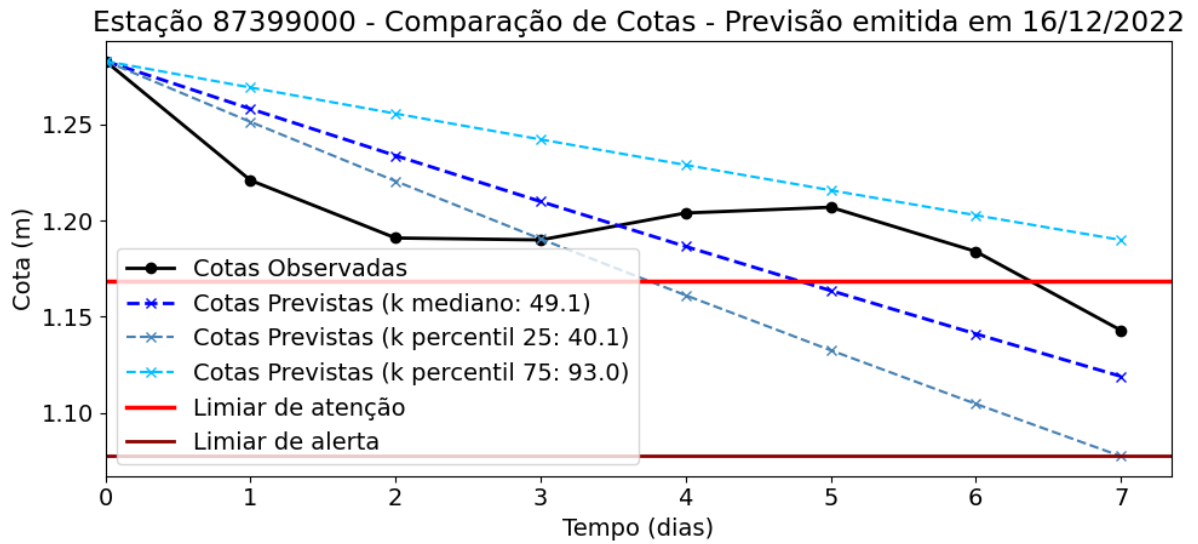
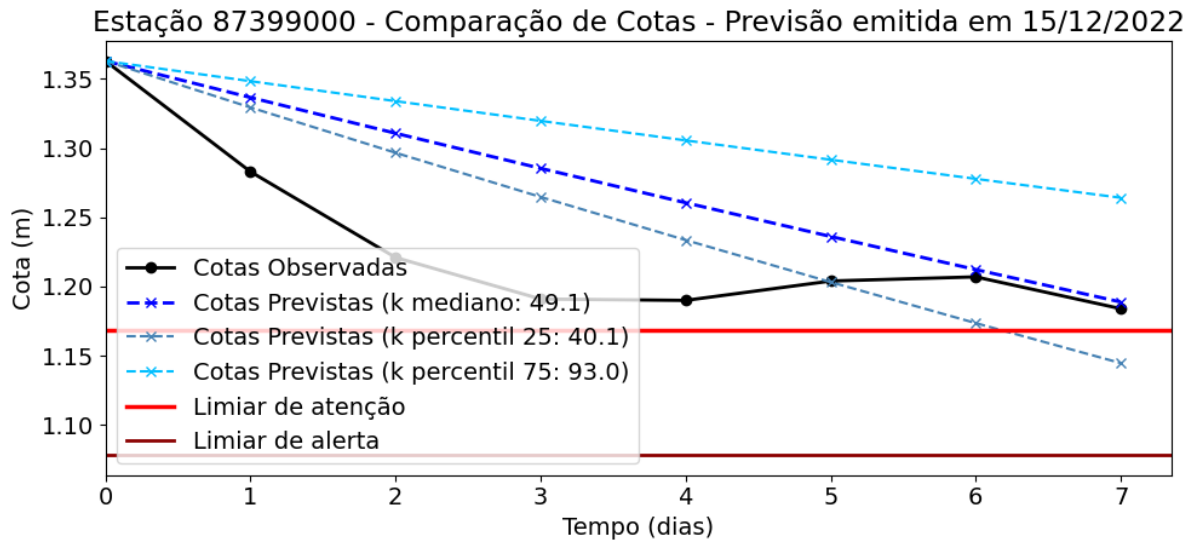


Estação 87380000 - Comparação de Cotas - Previsão emitida em 21/12/2022



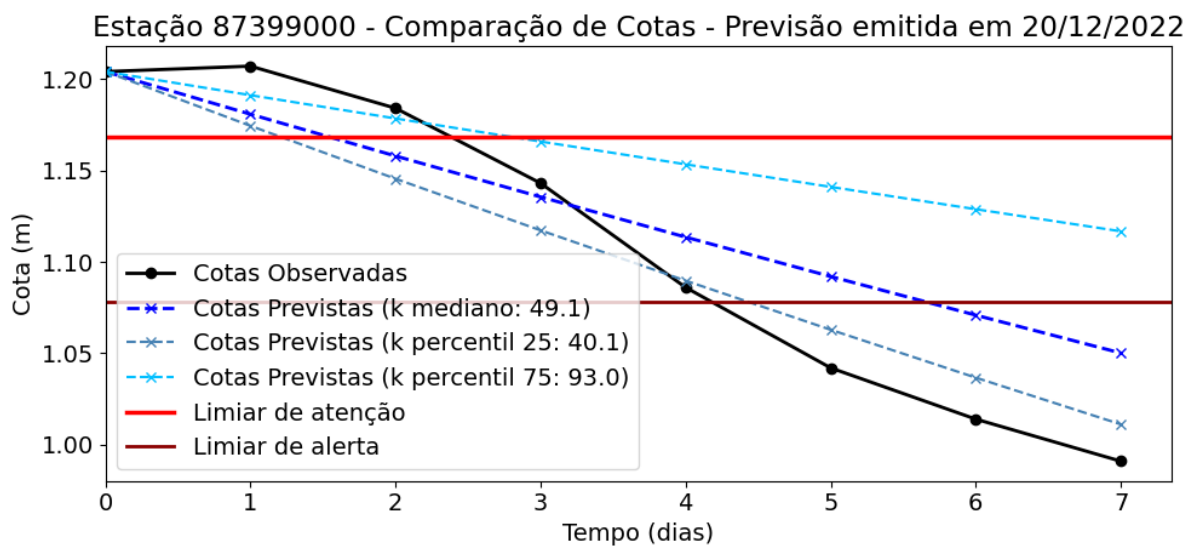
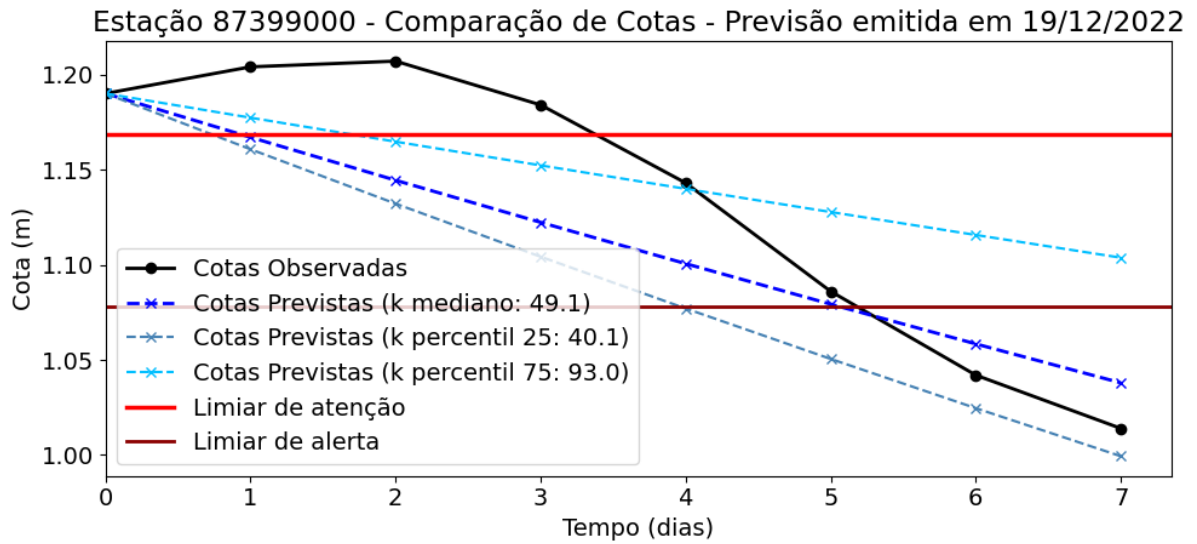
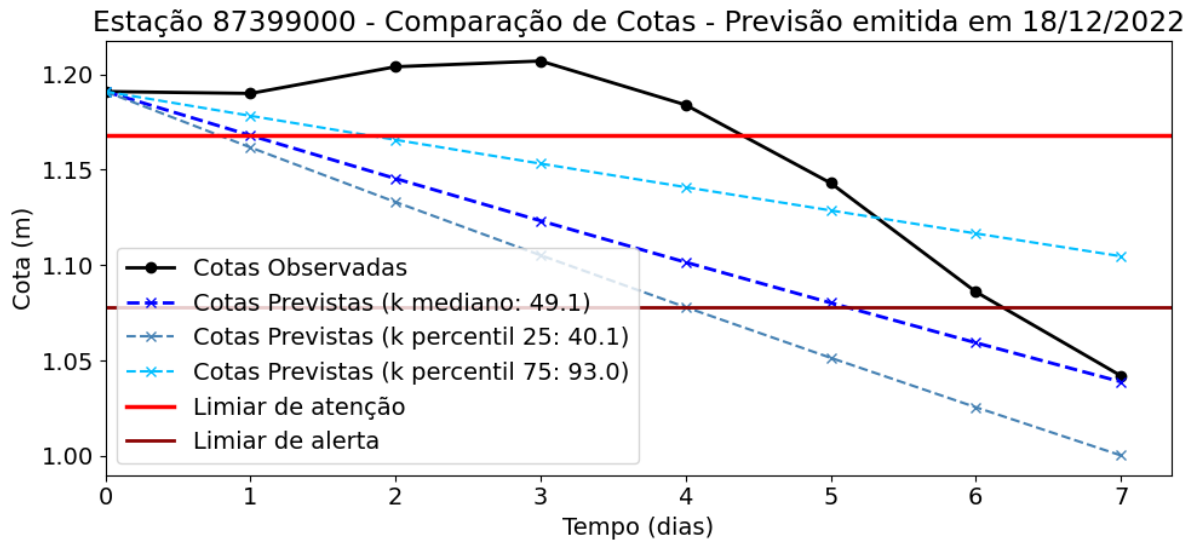
Fonte: a autora (2024).

Figura 33. Previsões para a estação 87399000 – parte 1.



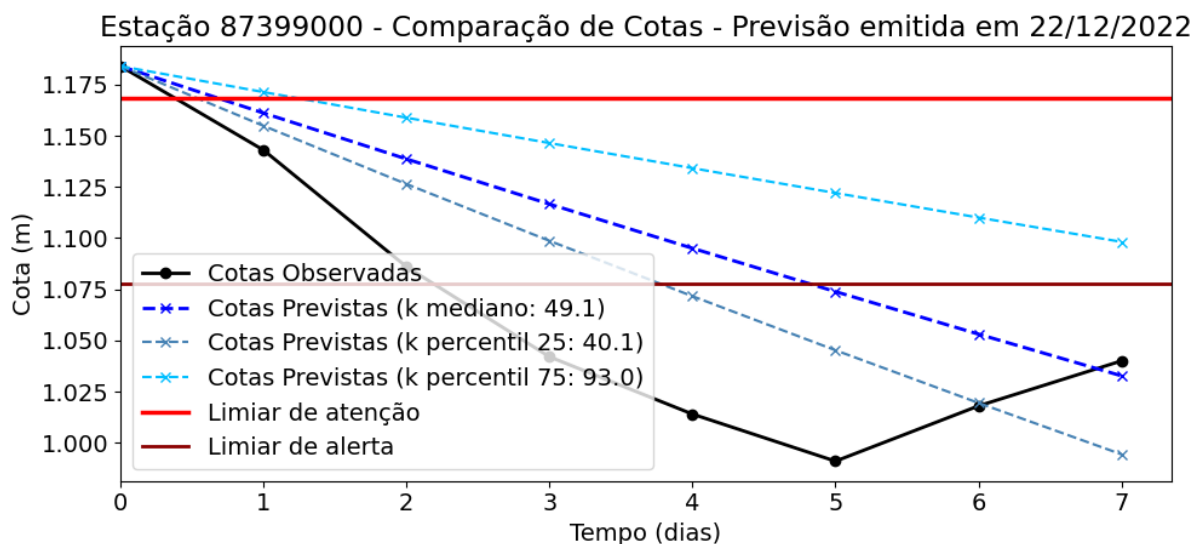
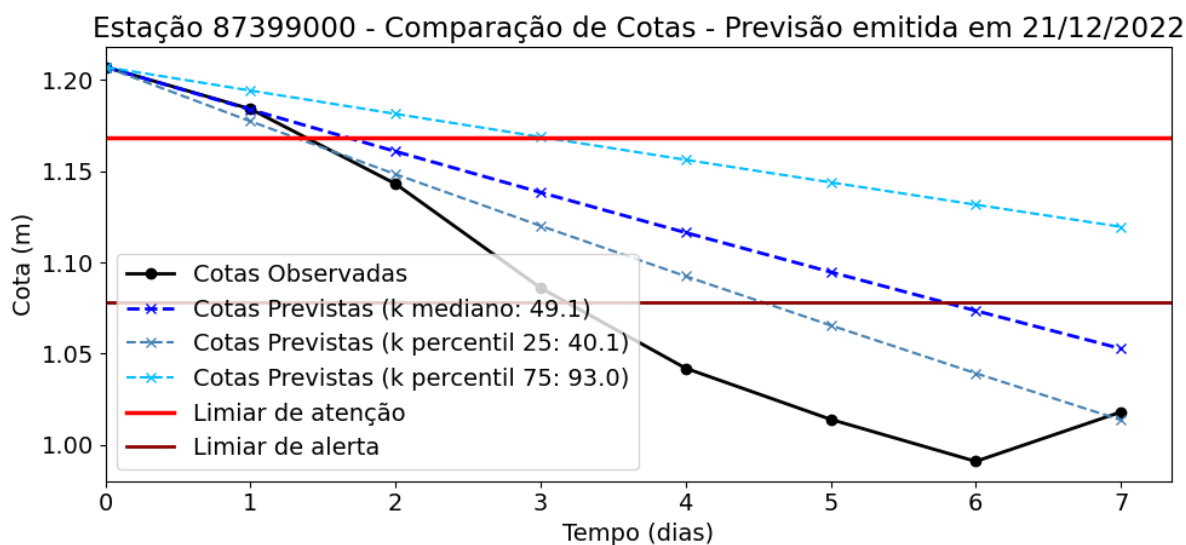
Fonte: a autora (2024).

Figura 34. Previsões para a estação 87399000 – parte 2.



Fonte: a autora (2024).

Figura 35. Previsões para a estação 87399000 – parte 3.



Fonte: a autora (2024).

Observou-se que para esse período de estiagem da estação 77150000 a estação começou com níveis abaixo da cota e gatilho do modelo, mas acima da cota de atenção. Ao longo dos dias do horizonte de previsão os níveis foram baixando e atingindo a cota de atenção. As três previsões conseguiram demonstrar o decaimento futuro das cotas observadas, projetando desde o primeiro dia de previsão que as cotas futuras estariam abaixo do limiar de atenção. Esse ponto é muito positivo para o sistema, já que a partir de projeções de níveis abaixo da cota de atenção antes que eles aconteçam permite que sejam tomadas medidas de controle para evitar o agravamento da escassez hídrica.

Os níveis da estação 87380000 iniciam acima da cota de atenção. No dia 14/12/2022, as previsões ao longo dos dias apontavam que os níveis iriam ultrapassar as cotas de atenção. Isso realmente ocorreu no horizonte 7 da previsão emitida em 17/12/2022, resultando em níveis abaixo da cota de atenção no dia 24/12/2022. Assim, houve um acompanhamento de cerca de 10 dias dos níveis dos rios, possibilitando ao sistema de gestão tempo para tomar medidas buscando a garantia da disponibilidade hídrica.

Os cotogramas da estação 87399000 iniciam no dia 15/12/2022, mostrando que para o horizonte de 7 dias, ou seja, no dia 22/12/2022 os níveis estariam abaixo da cota de atenção. Na previsão do dia 22/12/2022 os níveis estão muito próximos ao limiar de atenção e os 7 horizontes de previsão abaixo do limiar de atenção, chegando a ultrapassar o limiar de alerta. Essa análise mostra que o sistema conseguiu fazer as previsões e passar a mensagem de que em poucos dias aquele corpo hídrico entraria em um processo de escassez hídrica. Observa-se também que as previsões já apontavam que os níveis estariam perto da cota de atenção no horizonte 5, ou seja, dia 20, o que também poderia ser utilizado como uma forma de garantir a segurança hídrica, visando que a partir do momento em que os níveis estão muito próximos da cota de atenção, já é o momento de iniciar medidas visando garantir a disponibilidade hídrica.

É possível observar que com o aumento dos horizontes, as três previsões (k mediano, k percentil 25 e k percentil 75) tendem a se distanciar dos dados observados. Essa tendência é natural e esperada, já que quanto maior o horizonte, menores são as condições de controle para estimá-lo. Em contrapartida é observado que para os primeiros horizontes de previsão, horizontes de 1 a 3, os valores previstos e observados são muito próximos.

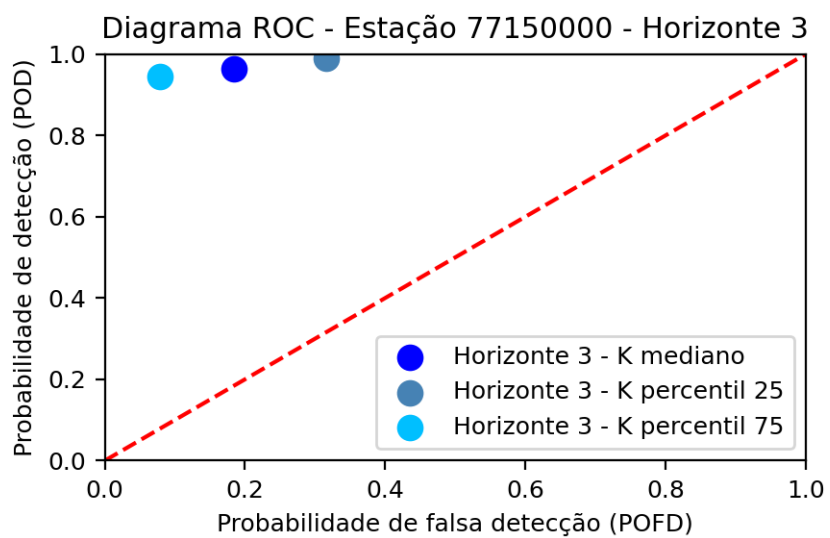
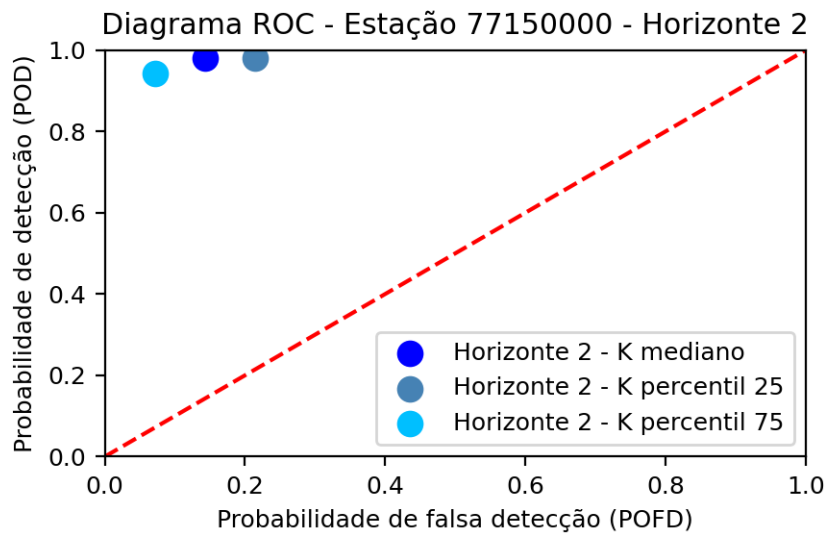
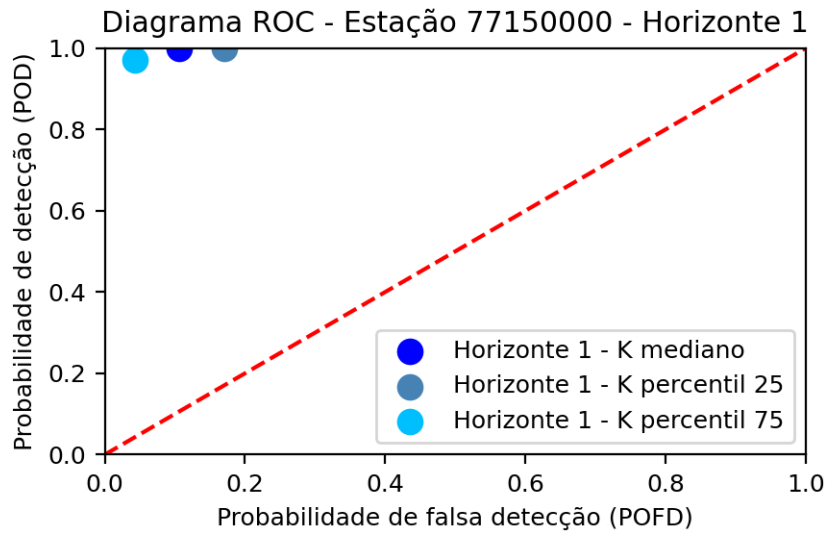
6.3 Diagramas ROC

Após gerar as previsões, se fez necessário avaliar a qualidade delas para detectar eventos de ocorrência de cotas abaixo do limiar de atenção. Para isso, foi utilizado o Diagrama ROC e calculados os pares de pontos (POFD e POD) para os horizontes de 1 a 7, com o objetivo de entender a eficiência do modelo ao longo das

previsões. A linha tracejada em vermelho apresenta uma divisão do diagrama, chamada de linha da climatologia.

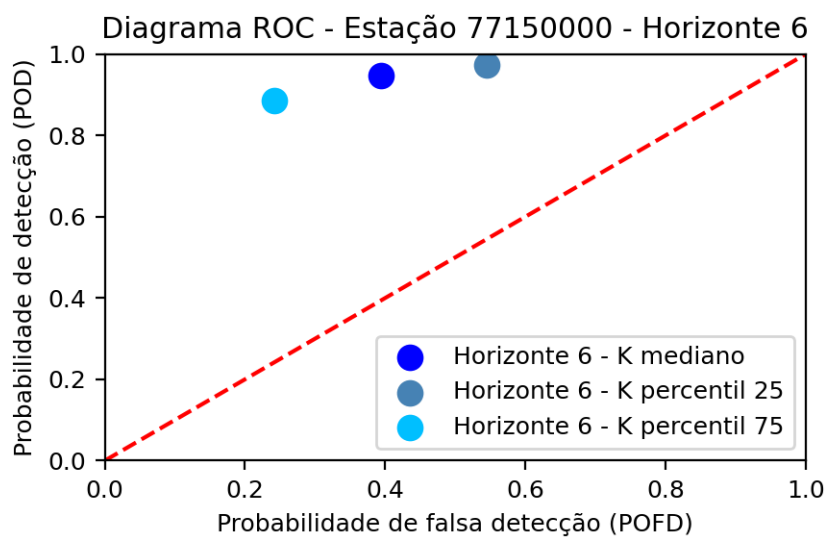
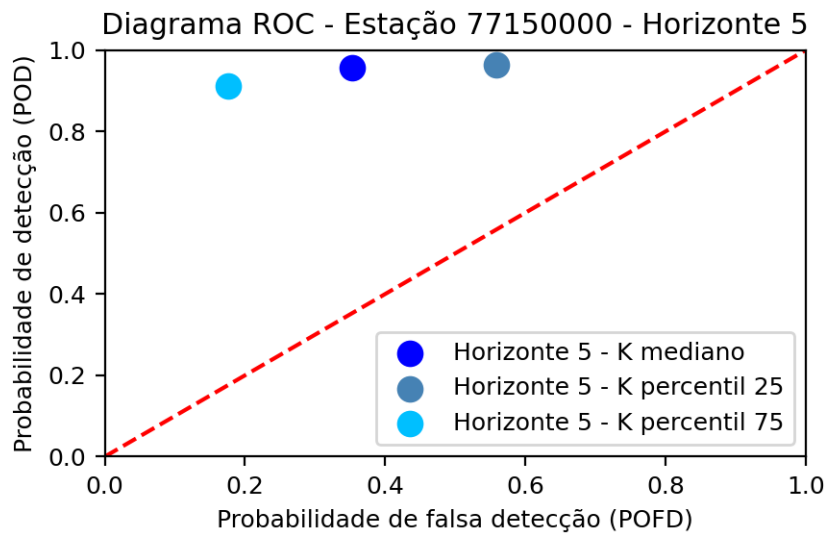
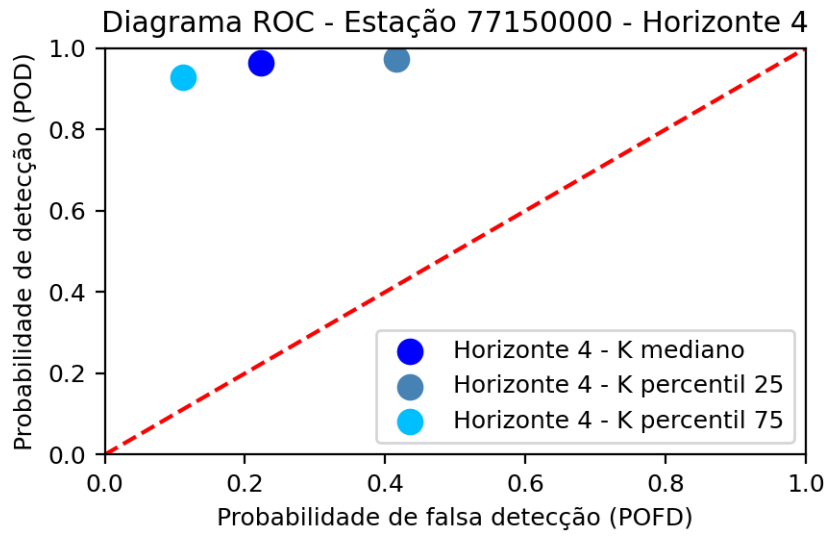
Os pontos acima da linha apresentam valores de POD e POFD desejáveis para um sistema de previsão, enquanto os valores abaixo não são desejáveis e informam que o sistema de previsão poderia ser substituído pelas previsões climáticas disponíveis. A seguir serão apresentados os resultados do diagrama ROC para a estação 77150000 (Figura 36 a Figura 29):

Figura 36. Diagrama ROC para a estação 77150000 – parte 1.



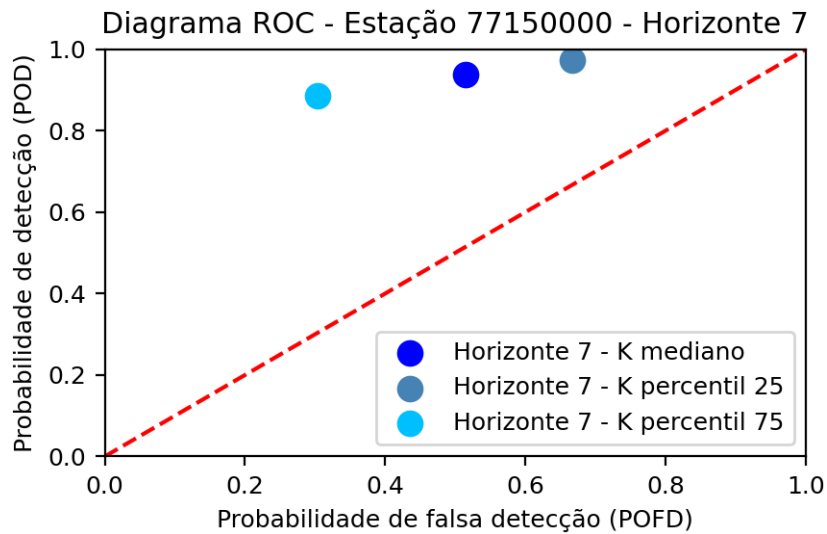
Fonte: a autora (2024).

Figura 37. Diagrama ROC para a estação 77150000 – parte 2.



Fonte: a autora (2024).

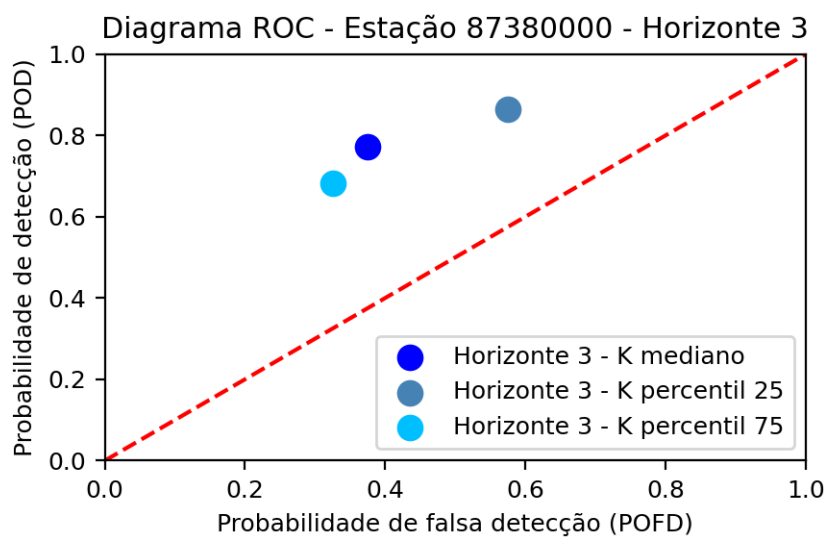
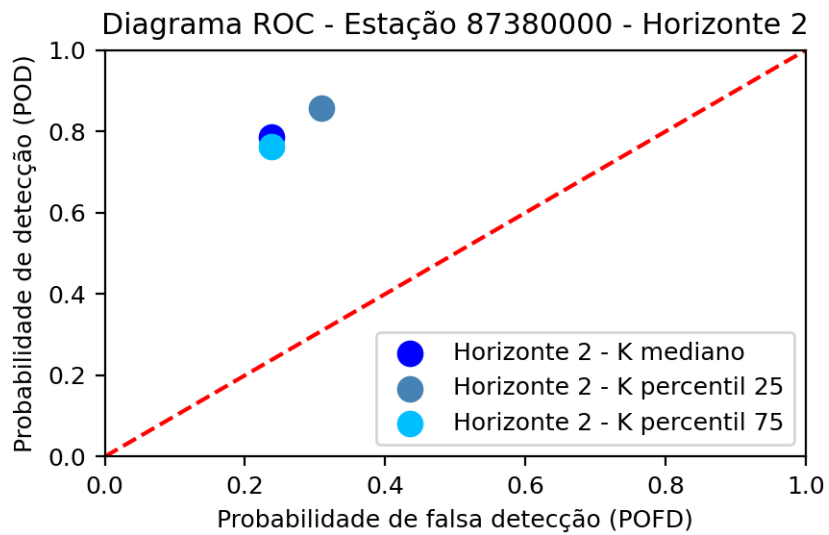
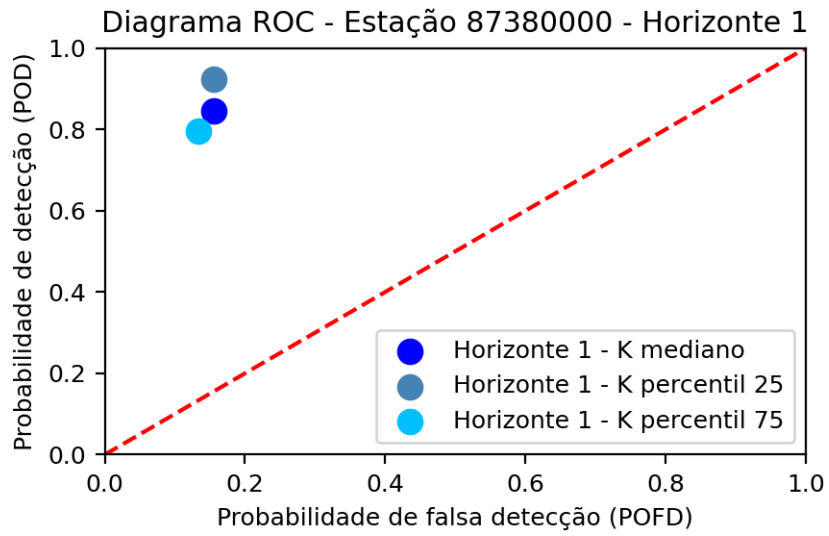
Figura 38. Diagrama ROC para a estação 77150000 – parte 3.



Fonte: a autora (2024).

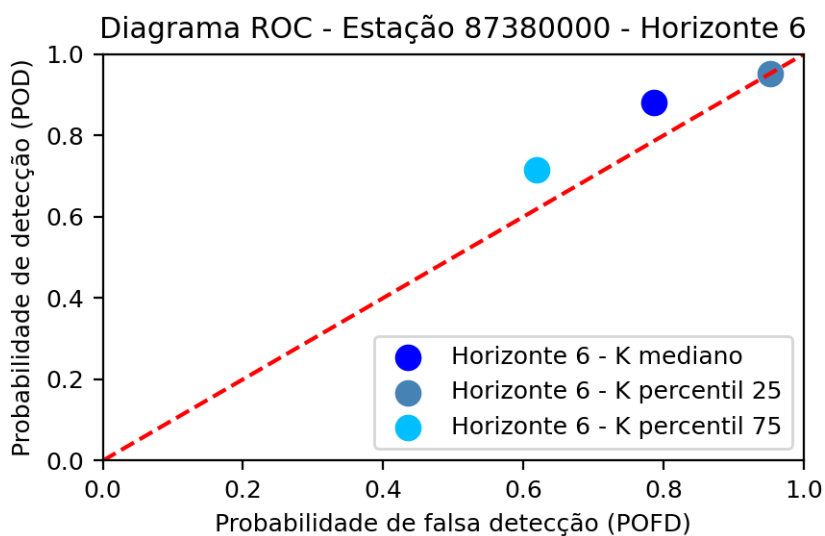
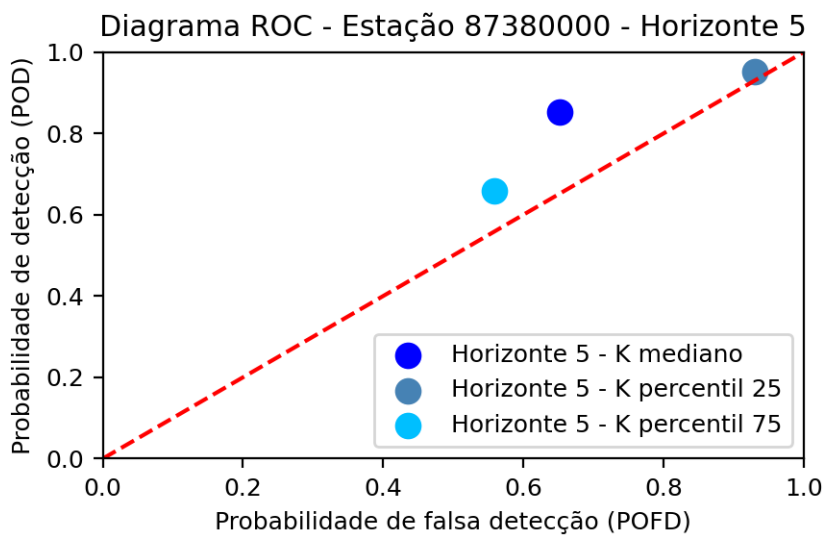
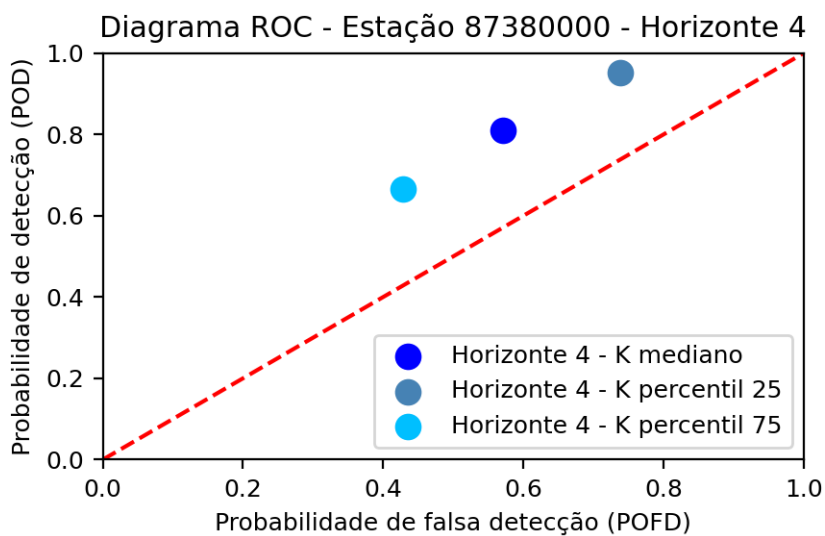
O Diagrama ROC da estação 77150000 mostrou que ao longo dos horizontes os valores de POD e POFD foram piorando, o que é naturalmente esperado em sistemas de previsão. Para o horizonte 1, que seria a previsão com o horizonte de um dia, os resultados de POD e POFD foram os melhores, apresentando POD próximo a 1 e POFD inferior a 0,2, indicando uma alta probabilidade de detecção e uma baixa taxa de falsa detecção. Observa-se que em todos os horizontes o coeficiente de recessão “k” de percentil 75 apresentou os resultados mais baixos para a probabilidade de falsa detecção e probabilidades de detecção altas, e muito próximas aos outros coeficientes. Assim, pode-se dizer que a aplicação do coeficiente de recessão de percentil 75 para essa estação irá gerar as previsões de melhor qualidade.

Figura 39. Diagrama ROC para a estação 87380000 – parte 1.



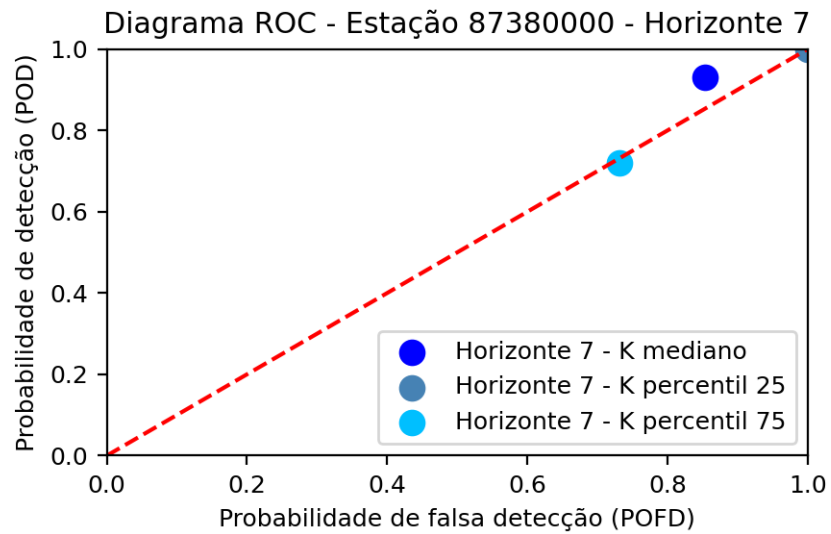
Fonte: a autora (2024).

Figura 40 Diagrama ROC para a estação 87830000 – parte 2.



Fonte: a autora (2024).

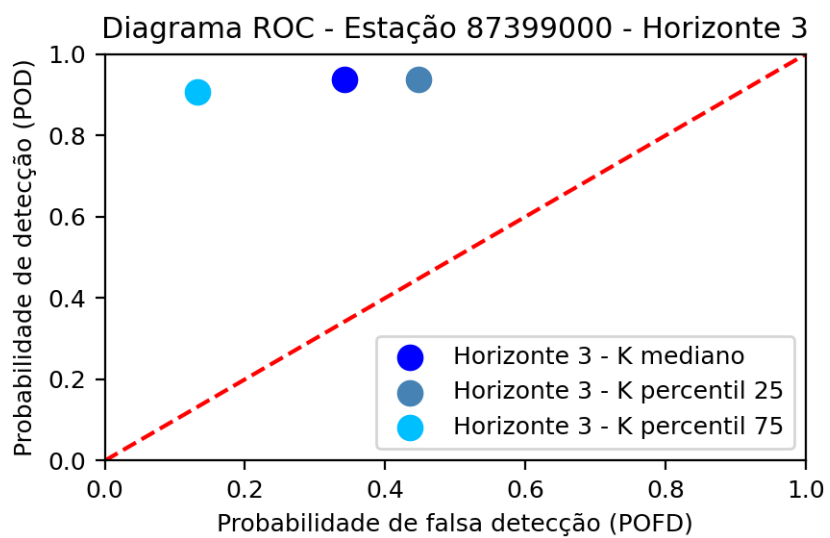
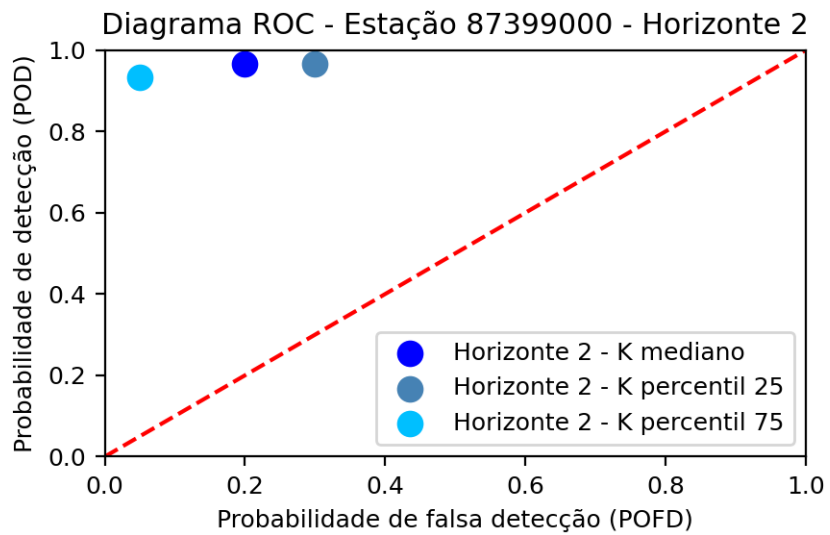
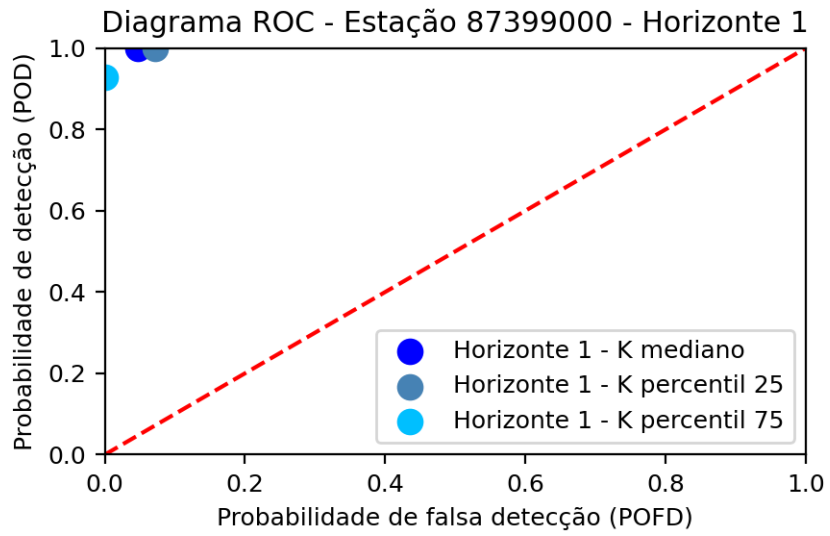
Figura 41. Diagrama ROC para a estação 87830000 – parte 3.



Fonte: a autora (2024).

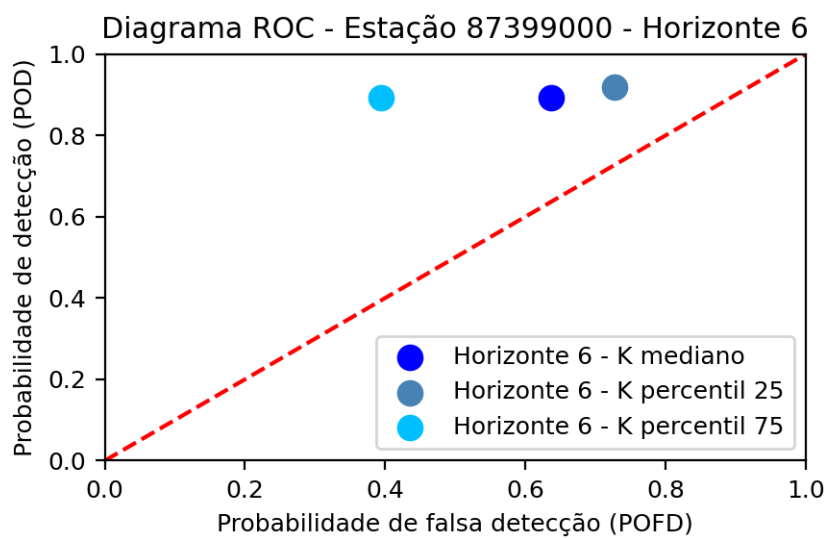
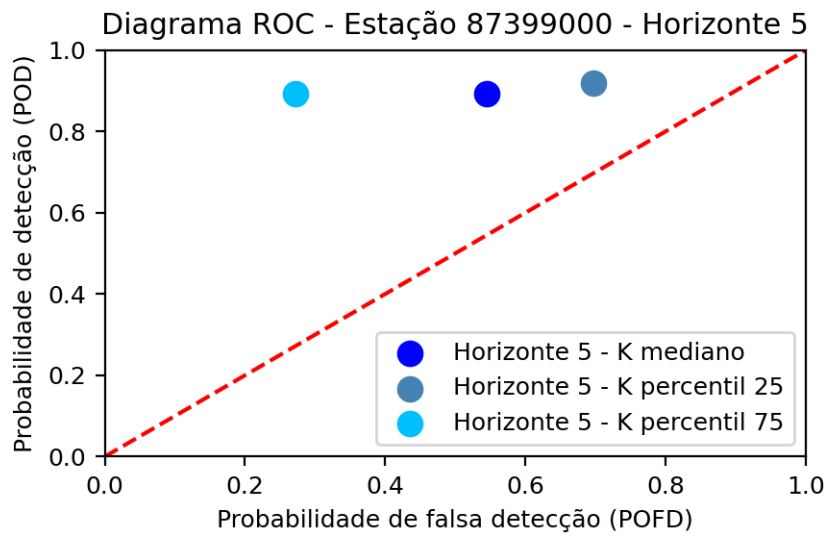
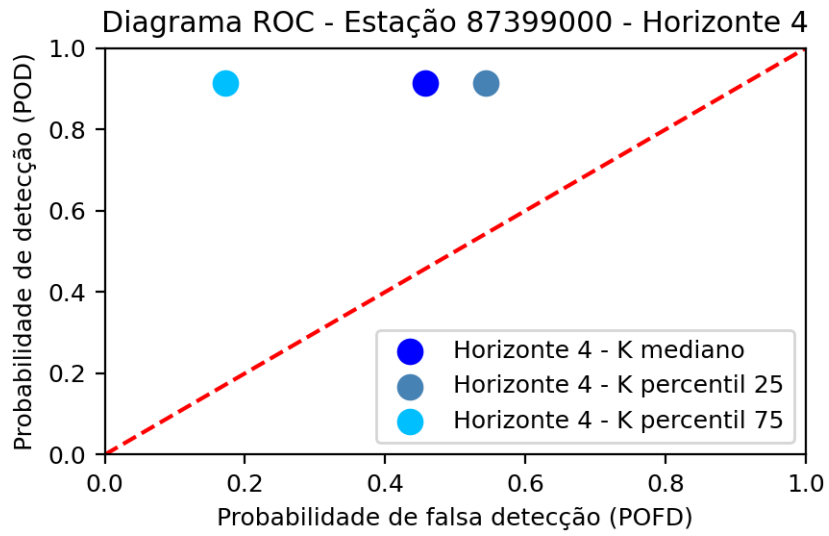
Já na estação 87380000, no primeiro horizonte o k de percentil 25 apresentou a melhor combinação de pontos POD e POFD. Já no horizonte 2 o k mediano apresentou os melhores resultados. Nos próximos horizontes o k percentil 75 apresentou as melhores combinações de POD e POFD, apresentando valores mais baixos de POFD.

Figura 42. Diagrama ROC para a estação 87399000 – parte 1.



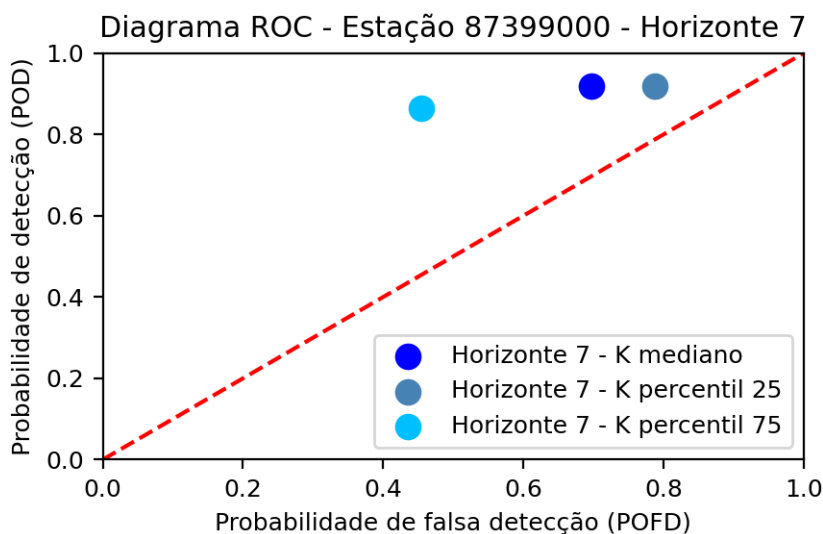
Fonte: a autora (2024).

Figura 43. Diagrama ROC para a estação 87399000 – parte 2.



Fonte: a autora (2024).

Figura 44. Diagrama ROC para a estação 87399000 – parte 3.



Fonte: a autora (2024).

Para a estação 87399000 o diagrama ROC apresentou um comportamento muito parecido com o da estação 7715000, onde o coeficiente de recessão de percentil 75 se destacou em relação aos outros.

As análises dos coeficientes de recessão de percentil 25 e 75 possibilitam gerar zonas de variação dos resultados em torno dos coeficientes medianos. Além disso, observou-se que os coeficientes de recessão de percentil 25 apresentam os valores de POD e POFD mais alto ao longo dos horizontes. É interessante observar que dependendo do objetivo das previsões podem ser avaliados diferentes coeficientes. Se o objetivo for identificar o coeficiente de melhor taxa de probabilidade de detecção ao longo dos horizontes, o coeficiente de percentil 25 poderia ser escolhido, porém, ele também apresenta as maiores taxas de falsa detecção, que dependendo do objetivo, não é interessante usá-lo.

Em razão das projeções exponenciais para a determinação das cotas do futuro, os coeficientes de percentil 75 tendem a apresentar melhores resultados, principalmente de falsa detecção, já que apresentam valores mais altos quando comparados com os outros dois e assim representam curvas de decaimento de níveis dos rios mais lenta do que os outros dois coeficientes.

A Tabela 6 apresenta os valores de POD e POFD para cada estação para os horizontes 1,3 e 5. Foi feita uma classificação nos valores de POD e POFD e um sistema de divisão de cores, apresentado na Tabela 5 a seguir:

Tabela 5. Classificação dos resultados de POD e POFD.

	Valores	Classificação	Cor
POD	$\geq 0,8$	Bom	Verde
	$< 0,8$ e $> 0,5$	Médio	Amarelo
	$\leq 0,5$	Ruim	Laranja
POFD	$\leq 0,2$	Bom	Verde
	$> 0,2$ e $< 0,5$	Médio	Amarelo
	$\geq 0,5$	Ruim	Laranja

Fonte: a autora (2024).

Tabela 6. Resultados de POD e POFD para os horizontes 1,3 e 5.

Número da Estação	K	POD	POFD	POD	POFD	POD	POFD
		Horizonte 1		Horizonte 3		Horizonte 5	
70842000	K mediano	0,92	0,15	0,84	0,27	0,89	0,41
	K percentil 25	0,92	0,15	0,89	0,30	0,91	0,49
	K percentil 75	0,92	0,15	0,82	0,24	0,83	0,33
70843500	K mediano	0,82	0,07	0,67	0,14	0,65	0,14
	K percentil 25	0,83	0,10	0,74	0,14	0,85	0,22
	K percentil 75	0,79	0,07	0,67	0,14	0,65	0,14
72428000	K mediano	0,96	0,10	0,88	0,31	0,89	0,43
	K percentil 25	0,99	0,25	0,99	0,60	1,00	0,95
	K percentil 75	0,96	0,10	0,85	0,25	0,85	0,37
72870900	K mediano	0,90	0,06	0,82	0,27	0,76	0,46
	K percentil 25	0,95	0,06	0,84	0,28	0,85	0,58
	K percentil 75	0,87	0,06	0,80	0,23	0,73	0,42
74100000	K mediano	0,75	0,06	0,67	0,20	0,80	0,31
	K percentil 25	0,75	0,12	0,83	0,33	1,00	0,94
	K percentil 75	0,75	0,06	0,50	0,20	0,60	0,31
74462000	K mediano	0,97	0	0,96	0,25	0,97	0,47
	K percentil 25	0,97	0,06	0,97	0,31	0,98	0,58
	K percentil 75	0,97	0	0,95	0,19	0,96	0,37
74463000	K mediano	0,99	0,06	0,96	0,28	0,93	0,45
	K percentil 25	0,99	0,06	0,96	0,28	0,95	0,48
	K percentil 75	0,99	0,06	0,95	0,28	0,93	0,43
74465000	K mediano	0,86	0	0,80	0	0,80	0
	K percentil 25	0,86	0	0,87	0,10	0,87	0,25
	K percentil 75	0,86	0	0,80	0	0,80	0
74800000	K mediano	0,85	0,18	0,72	0,63	0,95	0,79
	K percentil 25	0,92	0,24	0,89	0,69	1,00	0,86
	K percentil 75	0,85	0,14	0,68	0,50	0,86	0,64
75230000	K mediano	0,98	0,07	0,96	0,20	0,95	0,44
	K percentil 25	0,98	0,07	0,97	0,24	0,97	0,52
	K percentil 75	0,98	0,07	0,95	0,16	0,93	0,40
75290000	K mediano	0	0	0	0	0	0

	K percentil 25	0	0	0	0	0	0
	K percentil 75	0	0	0	0	0	0
75780000	K mediano	0,97	0,12	0,96	0,29	0,97	0,69
	K percentil 25	0,97	0,12	0,96	0,41	0,99	0,92
	K percentil 75	0,97	0,08	0,93	0,06	0,94	0,23
75900000	K mediano	0,98	0,16	0,97	0,33	0,99	0,90
	K percentil 25	1,00	0,28	1,00	0,83	1,00	1,00
	K percentil 75	0,95	0,13	0,92	0,29	0,91	0,43
76300000	K mediano	0,97	0	0,97	0,50	0,99	1,00
	K percentil 25	0,99	0,09	1,00	1,00	1,00	1,00
	K percentil 75	0,97	0	0,95	0	0,97	1,00
76310000	K mediano	0,99	0	0,99	0	0,99	0
	K percentil 25	1,00	0	0,99	0	1,00	0
	K percentil 75	0,99	0	0,99	0	0,99	0
76560000	K mediano	1,00	0,03	0,99	0,15	1,00	0,26
	K percentil 25	1,00	0,06	1,00	0,24	1,00	0,47
	K percentil 75	1,00	0,03	0,98	0,09	0,98	0,19
76750000	K mediano	0,95	0,18	0,91	0,42	0,93	0,59
	K percentil 25	0,98	0,26	0,99	0,59	0,99	0,75
	K percentil 75	0,94	0,12	0,87	0,30	0,87	0,41
76800000	K mediano	0,98	0	0,95	0,03	0,94	0,08
	K percentil 25	0,99	0	0,98	0,27	1,00	0,64
	K percentil 75	0,98	0	0,94	0	0,90	0
77150000	K mediano	1,00	0,11	0,96	0,18	0,96	0,35
	K percentil 25	1,00	0,17	0,99	0,32	0,96	0,56
	K percentil 75	0,97	0,04	0,94	0,08	0,91	0,18
77500000	K mediano	0,99	0	0,97	0,10	0,95	0,25
	K percentil 25	0,99	0	1,00	0,14	0,98	0,36
	K percentil 75	0,99	0	0,94	0,07	0,92	0,21
79200010	K mediano	0,91	0,08	0,85	0,39	0,86	0,61
	K percentil 25	0,93	0,17	0,91	0,58	1,00	1,00
	K percentil 75	0,89	0,08	0,83	0,32	0,82	0,48
85350000	K mediano	0,80	0,50	0,86	0	0,83	1,00
	K percentil 25	0,80	0,50	0,86	0	0,83	1,00
	K percentil 75	0,80	0,50	0,86	0	0,83	1,00
85400000	K mediano	0,98	0,25	0,97	0,40	0,96	1,00
	K percentil 25	0,99	0,25	0,98	0,60	0,98	1,00
	K percentil 75	0,98	0,25	0,96	0,40	0,96	0,60
85900000	K mediano	0,99	0,11	0,98	0,59	0,97	0,79
	K percentil 25	0,99	0,16	0,99	0,59	0,99	0,84
	K percentil 75	0,99	0,05	0,98	0,47	0,97	0,74
86099000	K mediano	0,95	0,13	0,86	0,46	0,91	0,77
	K percentil 25	1,00	0,13	0,91	0,54	1,00	0,92
	K percentil 75	0,90	0,13	0,86	0,46	0,81	0,77
86100600	K mediano	0,96	0,17	0,96	0,50	0,97	0,75
	K percentil 25	0,96	0,42	1,00	0,75	1,00	1,00

	K percentil 75	0,91	0,08	0,89	0,38	0,90	0,50
86160000	K mediano	0	0	0	0	0	0,29
	K percentil 25	0	0	0	0	0	0,43
	K percentil 75	0	0	0	0	0	0,14
86472000	K mediano	0	0	0	0,10	0	0,24
	K percentil 25	0	0	0	0,62	0	0,86
	K percentil 75	0	0	0	0	0	0,10
86488000	K mediano	0,93	0,13	0,86	0,41	0,92	0,38
	K percentil 25	0,94	0,16	0,88	0,41	0,96	0,52
	K percentil 75	0,93	0,13	0,83	0,27	0,88	0,33
86720000	K mediano	0,77	0,20	0,76	0,48	0,75	0,54
	K percentil 25	0,85	0,23	0,83	0,48	0,84	0,79
	K percentil 75	0,77	0,17	0,66	0,26	0,59	0,42
86879300	K mediano	0,54	0,52	0,72	0,81	0,96	0,92
	K percentil 25	0,68	0,62	1,00	1,00	1,00	1,00
	K percentil 75	0,42	0,46	0,38	0,62	0,50	0,52
86895000	K mediano	0,96	0	0,91	0	0,91	0
	K percentil 25	0,98	0	0,93	0	0,98	0
	K percentil 75	0,96	0	0,91	0	0,89	0
86950000	K mediano	0,74	0,29	0,68	0,55	0,63	0,77
	K percentil 25	0,74	0,29	0,68	0,55	0,63	0,77
	K percentil 75	0,74	0,29	0,68	0,55	0,63	0,77
87010000	K mediano	0,90	0,38	0,94	0,88	1,00	1,00
	K percentil 25	0,90	0,44	0,94	1,00	1,00	1,00
	K percentil 75	0,87	0,31	0,90	0,63	0,97	0,43
87160000	K mediano	0,96	0	1,00	0	1,00	1,00
	K percentil 25	0,96	0	1,00	0	1,00	1,00
	K percentil 75	0,93	0	0,93	0	1,00	1,00
87170000	K mediano	0,92	0,08	0,83	0,42	0,84	0,64
	K percentil 25	0,93	0,08	0,90	0,42	0,91	0,76
	K percentil 75	0,91	0,08	0,80	0,35	0,79	0,56
87230000	K mediano	0,93	0,18	0,92	0,71	0,90	1,00
	K percentil 25	0,95	0,18	0,94	0,71	0,96	1,00
	K percentil 75	0,93	0,09	0,84	0,71	0,86	1,00
87270000	K mediano	0,93	0,31	0,94	0,83	1,00	1,00
	K percentil 25	0,93	0,38	1,00	1,00	1,00	1,00
	K percentil 75	0,93	0,15	0,83	0,50	0,97	0,67
87317030	K mediano	0,94	0,33	0,91	1,00	0,97	1,00
	K percentil 25	0,96	0,33	0,96	1,00	1,00	1,00
	K percentil 75	0,92	0,22	0,88	1,00	0,88	0,96
87380000	K mediano	0,85	0,16	0,77	0,38	0,85	0,65
	K percentil 25	0,92	0,16	0,86	0,58	0,95	0,93
	K percentil 75	0,79	0,13	0,68	0,33	0,66	0,56
87382000	K mediano	0,91	0,33	0,96	0,75	1,00	1,00
	K percentil 25	0,91	0,38	0,96	0,88	1,00	1,00
	K percentil 75	0,82	0,08	0,81	0,38	0,96	0,43

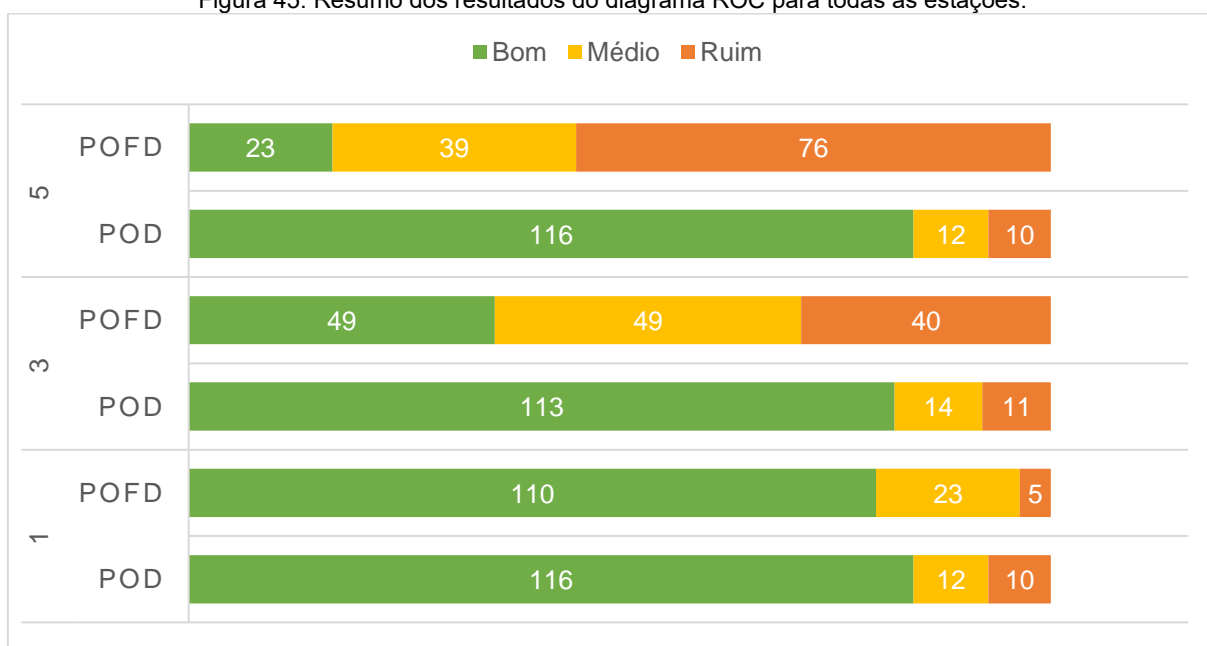
87399000	K mediano	1,00	0,05	0,94	0,34	0,89	0,55
	K percentil 25	1,00	0,07	0,94	0,45	0,92	0,70
	K percentil 75	0,93	0	0,91	0,13	0,89	0,27
87401750	K mediano	0,96	0	0,90	0	0,89	0,17
	K percentil 25	0,98	0	0,92	0	0,92	0,17
	K percentil 75	0,96	0	0,89	0	0,86	0,17
87450004	K mediano	0,89	0,20	1,00	1,00	1,00	1,00
	K percentil 25	0,94	0,20	1,00	1,00	1,00	1,00
	K percentil 75	0,89	0,20	0,95	0,83	1,00	1,00
87905000	K mediano	0,96	0	0,94	0	0,95	0,21
	K percentil 25	0,96	0	0,98	0,19	0,96	0,50
	K percentil 75	0,96	0	0,89	0	0,91	0
88260000	K mediano	0,99	0,07	0,97	0,33	0,96	0,54
	K percentil 25	0,99	0,08	0,98	0,36	0,97	0,56
	K percentil 75	0,99	0,07	0,84	0,27	0,96	0,42

Fonte: a autora (2024).

Observou-se na tabela que ao longo dos horizontes as taxas de detecção tendem a ficar mais baixas, enquanto as taxas de falsa detecção tendem a ficar mais altas, como já era esperado. As análises de POD e POFD foram feitas separadamente, com o objetivo de mostrar em algumas estações elas podem não convergir para as mesmas classificações, como POD bom e POFD médio. Nesses casos, deve-se avaliar o que tem mais importância no momento, as taxas de acerto ou as taxas de falsa detecção.

Por fim, a Figura 45 apresenta um gráfico com um resumo dos resultados da Tabela 6. O gráfico mostra para todos os k, de todas as estações, um resumo das classificações de POD e POFD para os horizontes 1, 3 e 5. Observa-se que as taxas de detecção se mantêm na classificação de “boa” ao longo dos horizontes, enquanto as taxas de falsa detecção vão se classificando como “média” e “ruim” com o aumento do horizonte. Esse comportamento é esperado, já que quanto mais longe das condições de contorno, mais baixa é a capacidade de previsão do modelo.

Figura 45. Resumo dos resultados do diagrama ROC para todas as estações.

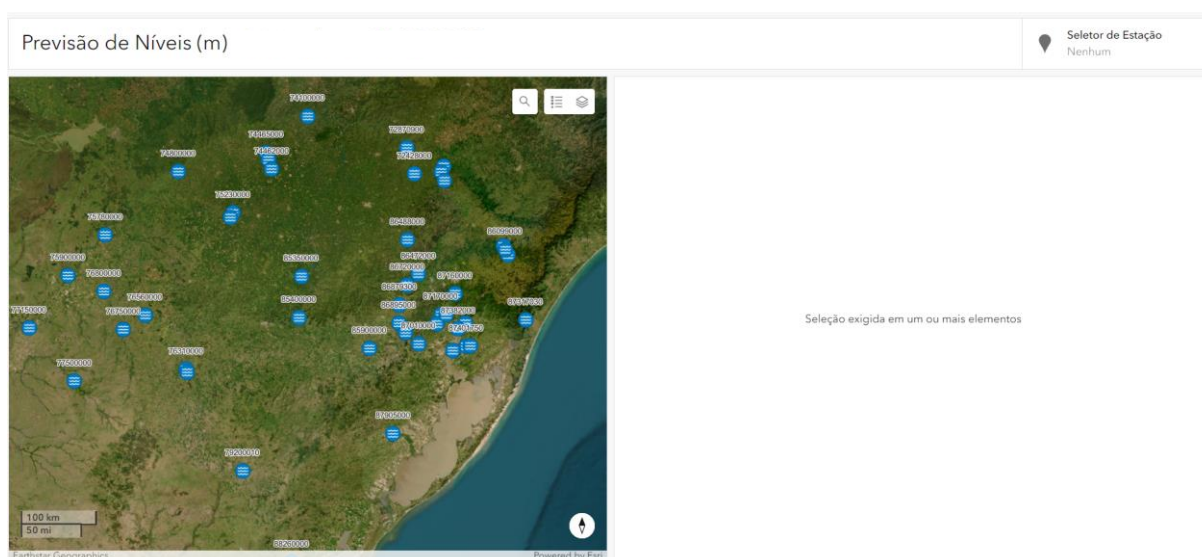


Fonte: a autora (2024).

7. DISPONIBILIDADE DO SOFTWARE

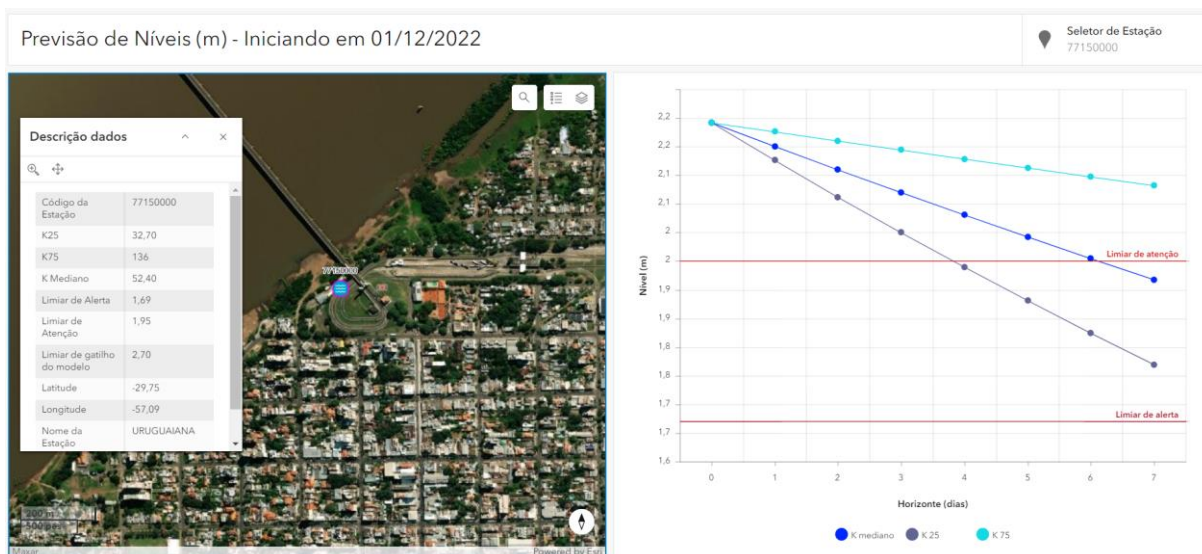
A disponibilidade do sistema de previsão está sendo desenvolvida através de um webgis, cujo objetivo é que o sistema possa ser utilizado futuramente, fazendo as previsões de níveis em períodos de estiagem, utilizando os dados disponíveis pelas estações telemétricas. Abrindo o site, usuário terá acesso ao mapa do estado do RS com as estações utilizadas, representadas pelos pontos em azul (Figura 46). Clicando em uma estação serão apresentadas as informações sobre a estação selecionada, seus limiares, coeficientes de recessão e previsão de cotas. Selecionando no canto superior direito a estação desejada será apresentada a previsão de níveis da estação 77150000 (Figura 47). Inicialmente o sistema conta com previsões de níveis realizadas para o período de validação do sistema, que vai de setembro de 2022 a dezembro de 2023.

Figura 46. Webgis do sistema de previsão.



Fonte: a autora (2024).

Figura 47. Dados das estações e previsão de níveis para a estação 77150000.



Fonte: a autora (2024).

8. CONCLUSÃO

O objetivo proposto por esse trabalho foi desenvolver e testar uma ferramenta capaz de prever os níveis de rios para o estado do Rio Grande do Sul durante períodos de estiagem. O objetivo foi atendido, e a ferramenta programada em python foi capaz de prever os níveis dos rios para o estado através dos dados de estações telemétricas. Observou-se com os resultados do diagrama ROC que a ferramenta consegue realizar a previsão dos níveis de rios para os sete horizontes, atuando de maneira mais eficaz nos primeiros três horizontes de previsão.

Os três coeficientes de recessão utilizados, com os valores mediano, percentil 25 e percentil 75 proporcionaram uma análise mais ampliada, criando uma faixa de valores possíveis para as previsões de níveis. Os resultados do diagrama ROC mostraram que os coeficientes se apresentaram melhores ou piores para cada estação, podendo assim ser escolhido o coeficiente mais adequado para cada estação. Além disso, também foi observado que dependendo do objetivo de aplicação da previsão, pode ser variado o coeficiente de análise, como a utilização do coeficiente de percentil 75 buscando resultados com maiores taxas de detecção, porém também as maiores taxas de falsa detecção.

Salienta-se que o modelo somente deve ser aplicado para períodos de estiagem, sem a ocorrência de chuva, quando ocorre o decaimento do nível dos rios. Quanto a suas limitações, está o seu uso para períodos fora do gatilho do modelo e em locais sem a presença de estações telemétricas, já que atualmente ele funciona somente a partir de dados das estações telemétricas.

Como projeções futuras, espera-se a utilização da ferramenta, no webgis, no próximo período de seca enfrentado pelo estado para auxiliar na gestão de recursos hídricos. Salienta-se que a ferramenta pode ser adaptada e testada para outros limiares, diminuindo o gatilho do modelo, para o nível com permanência em 50% do tempo no corpo hídrico, os limiares de atenção e alerta, visando criar um sistema de gestão de recursos hídricos mais rigoroso.

Em complemento, sugere-se fortemente a adaptação da ferramenta para utilizar limiares de atenção e alerta que supram as necessidades reais de cada uma das estações, visando deixar suas previsões alinhadas com os objetivos dos órgãos de gestão de recursos hídricos.

Outro ponto importante é a validação do sistema para horizontes de previsão mais longos, como 15 ou 30 dias, buscando entender se o sistema de previsão também agregaria á gestão de recursos hídricos para esses horizontes.

9. REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS

Agência Nacional de Águas e Saneamento Básico (Brasil). Conjuntura dos recursos hídricos no Brasil 2022. Brasília: ANA, 2023.

Atlas Socioeconômico do Estado do Rio Grande do Sul. Clima, Temperatura e Precipitação. Disponível em: <<https://atlassocioeconomico.rs.gov.br/clima-temperatura-e-precipitacao>>. Acesso em: 22 ago. 2023.

Atlas Socioeconômico do Estado do Rio Grande do Sul. Hipsometria e Unidades geomorfológicas. Disponível em: <<https://atlassocioeconomico.rs.gov.br/hipsometria-e-unidades-geomorfológicas>>. Acesso em: 22 ago. 2023.

Atlas Socioeconômico do Estado do Rio Grande do Sul. Disponível em: <<https://atlassocioeconomico.rs.gov.br/inicial>>. Acesso em: 22 ago. 2023.

BERLATO, M.A.; FONTANA, D.C. El Niño e La Niña Impactos no Clima, na Vegetação e na Agricultura do Rio Grande do Sul, Aplicações de Previsões Climáticas na Agricultura. Porto Alegre: Editora: UFRGS, 2003.

BROWN, J.D; DEMARGNE, J.; DONG-JUN SEO & LIU, Y. (2010). The Ensemble Verification System (EVS): A software tool for verifying ensemble forecasts of hydrometeorological and hydrologic variables at discrete locations. **Environmental Modelling & Software**, v. 25, issue 7, p.854–872.

Centro Estadual de Meteorologia. A estiagem de 2011/2012 e a sua influência na produção agropecuária do Rio Grande do Sul. Disponível em: <http://www.cemet.rs.gov.br/upload/20120606155033nota_tecnica_10_06_06_2012_final.pdf>. Acesso em: 20 de jul. 2023.

COLLISCHONN, Walter; DORNELLES, Fernando. Hidrologia para engenharia e ciências ambientais. Porto Alegre: **Associação Brasileira de Recursos Hídricos**, v. 1, 2015.

CRAUSBAY, Shelley D. *et al.* Defining ecological drought for the twenty-first century. **Bulletin of the American Meteorological Society**, [s. l.], v. 98, n. 12, p. 2543–2550, 2017.

CUARTAS, Luz Adriana *et al.* Recent Hydrological Droughts in Brazil and Their Impact on Hydropower Generation. **Water (Switzerland)**, [s. l.], v. 14, n. 4, 2022.

Impacto da Mudança Climática nos Recursos Hídricos no Brasil / Agência Nacional de Águas e Saneamento Básico. -- Brasília: ANA, 2024

JACÓBSEN, Lo. Efeitos associados a El Niño e La Niña na vegetação do estado do Rio Grande do Sul, observados através do NDVI/NOAA. **Revista Brasileira de Meteorologia**, [s. l.], v. 19, n. 2, p. 129–140, 2004. Disponível em: <http://www.lume.ufrgs.br/handle/10183/20224>.

LLOYD-HUGHES, Benjamin. The impracticality of a universal drought definition. **Theoretical and Applied Climatology**, [s. l.], v. 117, n. 3–4, p. 607–611, 2014.

MELLER, A. (2012). Previsão de cheias por conjunto em curto prazo. Tese de Doutorado. Instituto de Pesquisas Hidráulicas. Universidade Federal do Rio Grande do Sul.

MISHRA, Ashok K.; SINGH, Vijay P. A review of drought concepts. **Journal of Hydrology**, [s. l.], v. 391, n. 1–2, p. 202–216, 2010. Disponível em: <http://dx.doi.org/10.1016/j.jhydrol.2010.07.012>.

Monitor de Secas. Agência Nacional de Águas e Saneamento Básico. Disponível em: <<https://monitordesecas.ana.gov.br/mapa?mes=6&ano=2022> >. Acesso em: 27 ago. 2023.

Monitor de estiagem. Governo do Estado do Rio Grande do Sul. Disponível em: <<https://codexremote.com.br/monitorestiagem/?page=Situa%C3%A7%C3%A3o&views=Situa%C3%A7%C3%A3o-do-n%C3%ADvel-dos-rios%2CExibir-17>>. Acesso em: 27 ago. 2023.

Plataforma de Monitoramento de Vazão dos Rios da América do Sul - South America River Discharge Monitor (SARDIM). Universidade Federal do Rio Grande do Sul. Disponível em: <<https://www.ufrgs.br/sardim/>>. Acesso em 29 ago. 2023.

PELINSON, Dieyson. Diagnóstico da seca 2019/2020 no Estado do Rio Grande do Sul. 2023.

PUCHALSKI, L. A. Efeitos Associados ao El Niño e La Niña na Temperatura Média, Precipitação Pluvial e no Déficit Hídrico no Estado do Rio Grande do Sul. Dissertação de Mestrado. Universidade Federal do Rio Grande do Sul – RS. 2000.

RECKZIEGEL, Bernadete Weber; MARIA, Santa. Volume I Bernadete Weber Reckziegel Santa Maria, Rio Grande do Sul, Brasil 2007. [s. l.], v. I, 2007.

SIQUEIRA, Vinicius A. *et al.* Toward continental hydrologic-hydrodynamic modeling in South America. **Hydrology and Earth System Sciences**, [s. l.], v. 22, n. 9, p. 4815–4842, 2018.

VAN LOON, Anne F. Hydrological drought explained. **Wiley Interdisciplinary Reviews: Water**, [s. l.], v. 2, n. 4, p. 359–392, 2015.