Operador Nacional do Sistema Elétrico

III WorkEta

Aplicações em Recursos Hídricos

Operador Nacional do Sistema Elétrico – ONS

Marcio Cataldi
cataldi@ons.org.br

Sumário

- **Apresentação do ONS;**

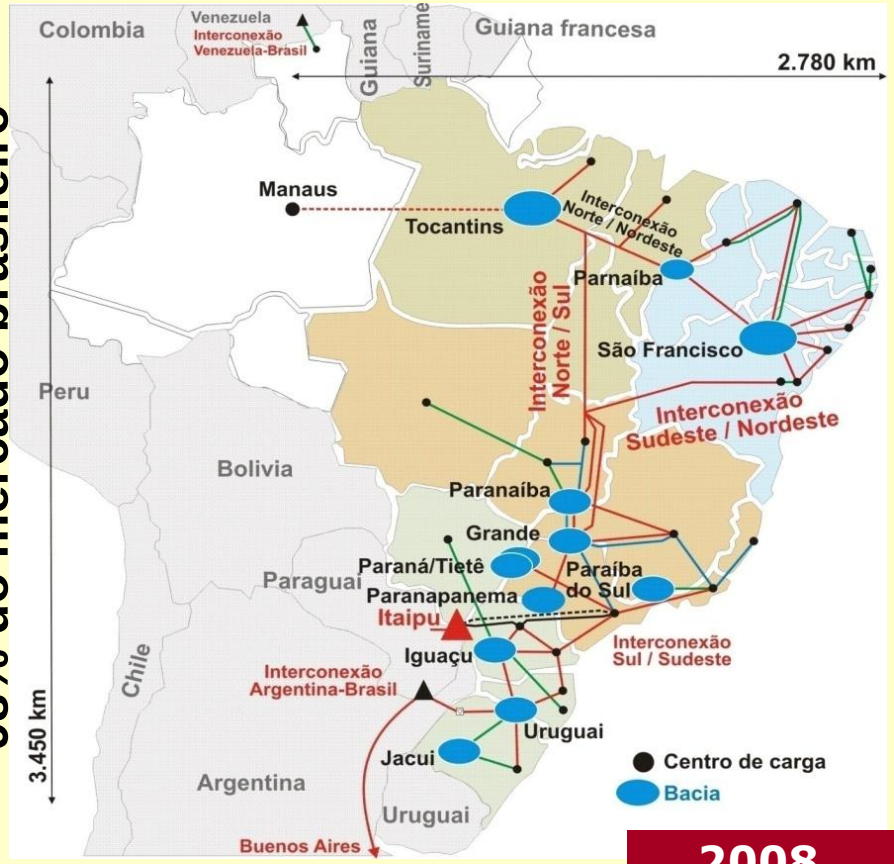
- **Utilização dos campos de modelagem numérica do CPTEC/INPE na elaboração os produtos de rotina do ONS;**

- **Projetos desenvolvidos pelo ONS no aprimoramento de algumas variáveis provenientes da modelagem numérica disponibilizada pelo CPTEC/INPE;**

- **Projetos futuros do ONS relacionados com os produtos de modelagem numérica do CPTEC/INPE.**

Sistema Interligado Nacional

98% do mercado brasileiro



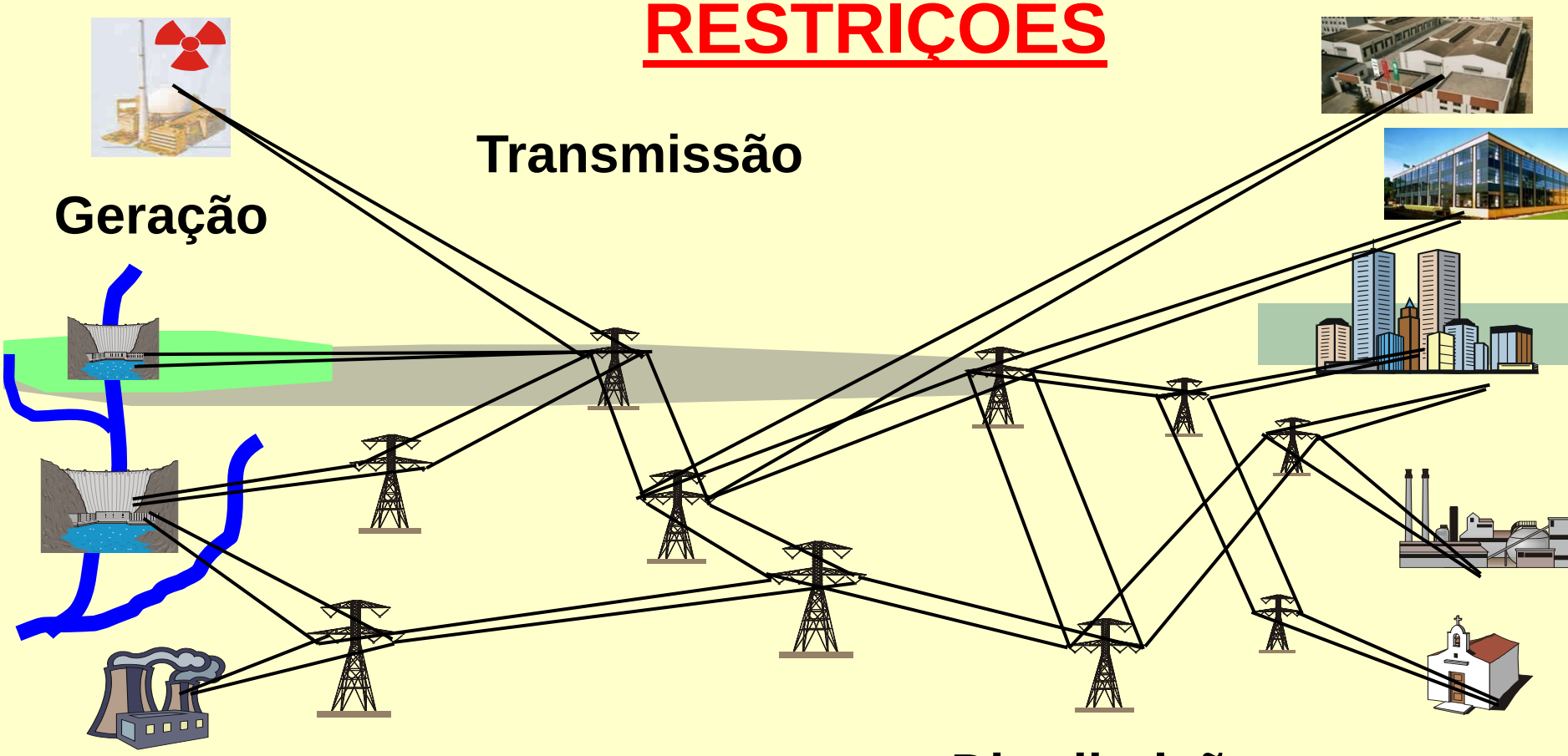
	2008	2013
Cap. Instalada – MW	**89.075**	**120.800**
Hidro	**74.370**	**81.552**
Termo-convencional	**12.270**	**26.664**
Termo-nuclear	**2.007**	**2.007**
Outras	**428**	**10.577**
Participação Hidro	**83%**	**68%**

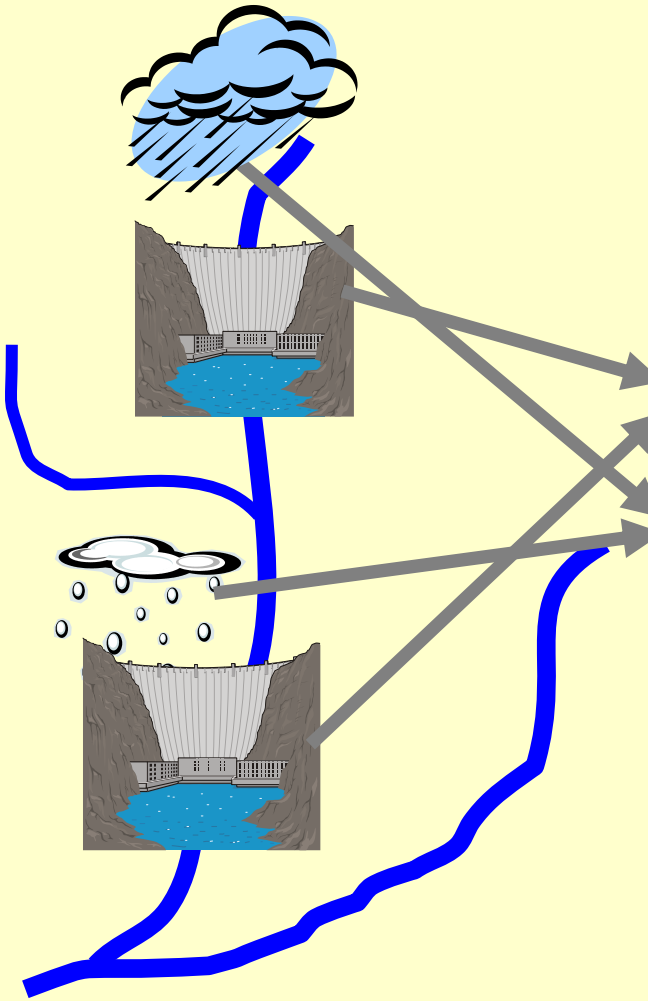
Sistema Interligado Nacional

RECURSOS

REQUISITOS

RESTRIÇÕES





RECURSOS

ENERGIA ARMAZENADA NOS RESERVATÓRIOS

ENERGIA NATURAL AFLUENTE AOS RESERVATÓRIOS

PRESENTE

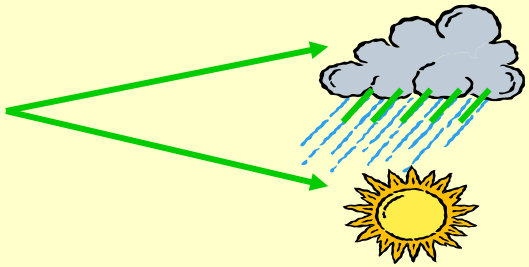
FUTURO

Decisão

Energia Afluente Futura

Resultado

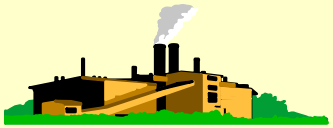
Usar água

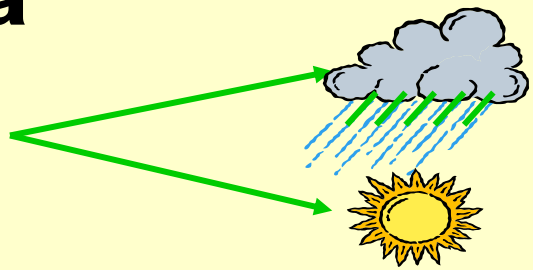


OK

déficit

Economizar água

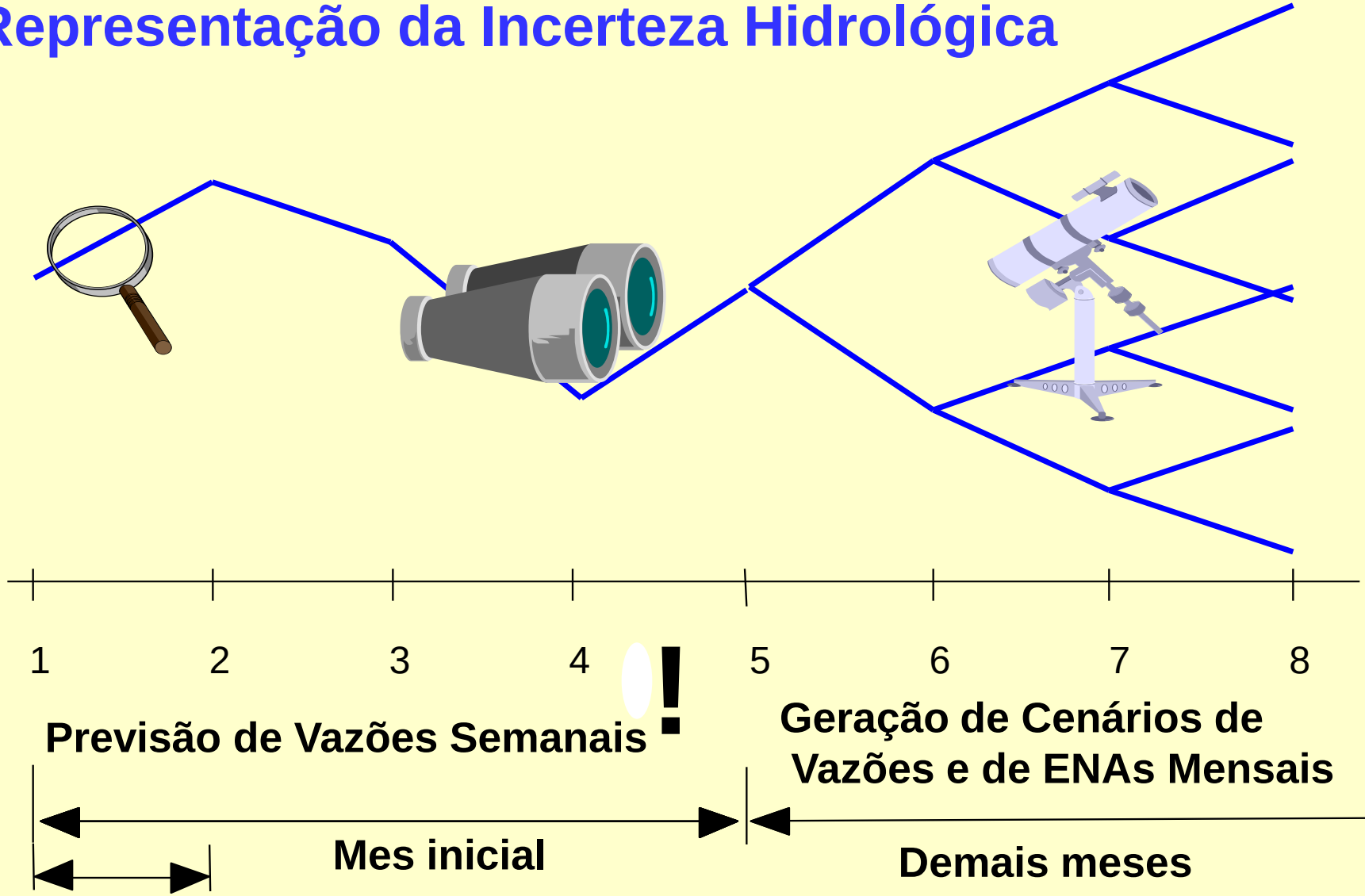




vertimento

OK

Representação da Incerteza Hidrológica

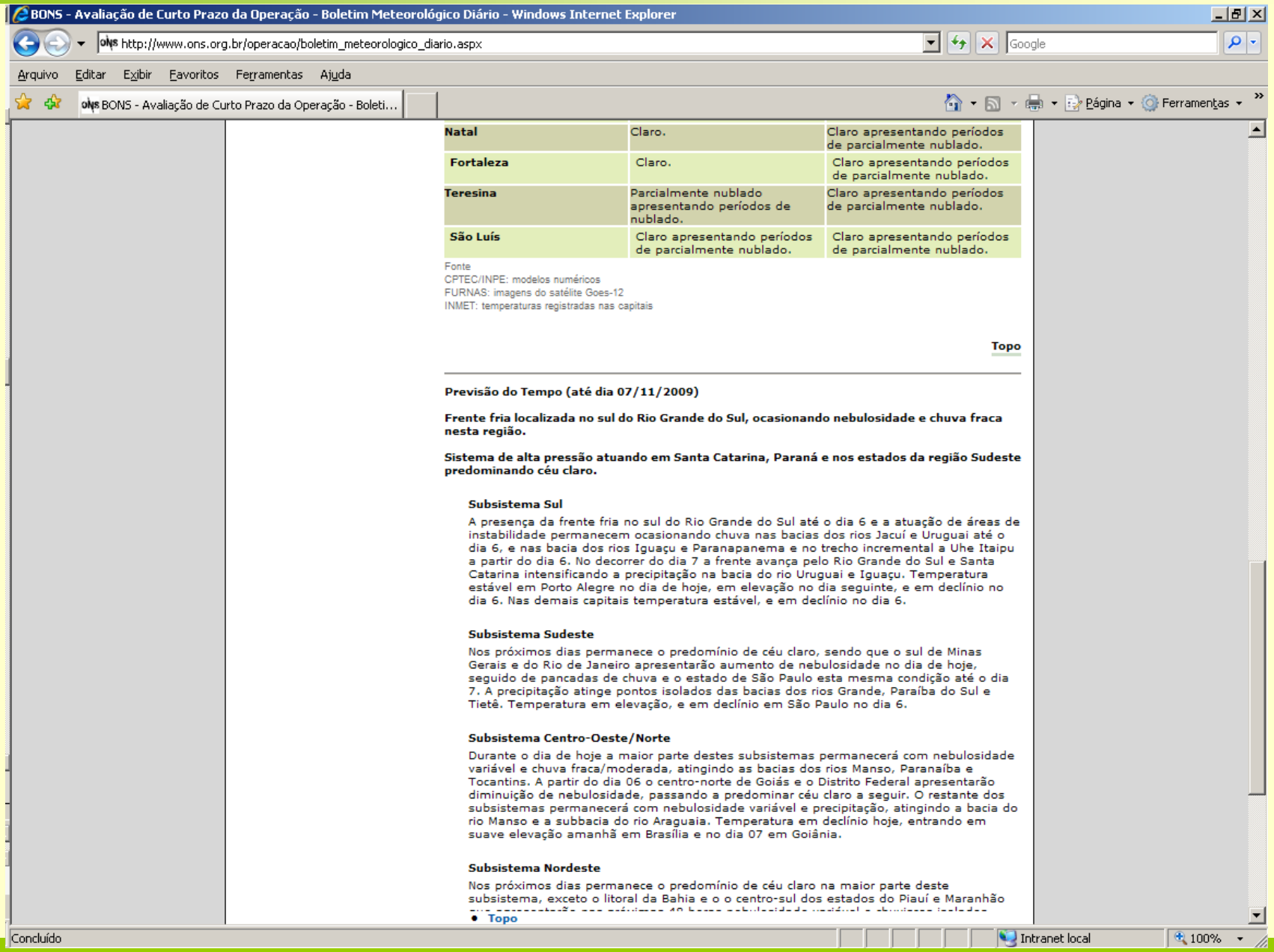


Produtos de Rotina

- **Atualmente o ONS utiliza de forma subjetiva as previsões dos modelo ETA e Global para:**
  - **a elaboração de Boletins Meteorológicos para os subsistemas integrantes do SIN, em um horizonte de 3 a 5 idas;**
  - **a quantificação da previsão de chuva nas bacias do SIN, para um horizonte de 3 dias.**

- **A previsão climática de consenso é um dos insumos utilizados para a elaboração de um boletim climático mensal.**

Produtos de Rotina



BONS - Avaliação de Curto Prazo da Operação - Boletim Meteorológico Diário - Windows Internet Explorer

http://www.ons.org.br/operacao/boletim_meteorologico_diario.aspx

Arquivo Editar Exibir Favoritos Ferramentas Ajuda

BONS - Avaliação de Curto Prazo da Operação - Boleti...

Página Ferramentas

Natal	Claro.	Claro apresentando períodos de parcialmente nublado.
Fortaleza	Claro.	Claro apresentando períodos de parcialmente nublado.
Teresina	Parcialmente nublado apresentando períodos de nublado.	Claro apresentando períodos de parcialmente nublado.
São Luís	Claro apresentando períodos de parcialmente nublado.	Claro apresentando períodos de parcialmente nublado.

Fonte
CPTEC/INPE: modelos numéricos
FURNAS: imagens do satélite Goes-12
INMET: temperaturas registradas nas capitais

Topo

Previsão do Tempo (até dia 07/11/2009)

Frente fria localizada no sul do Rio Grande do Sul, ocasionando nebulosidade e chuva fraca nesta região.

Sistema de alta pressão atuando em Santa Catarina, Paraná e nos estados da região Sudeste predominando céu claro.

Subsistema Sul

A presença da frente fria no sul do Rio Grande do Sul até o dia 6 e a atuação de áreas de instabilidade permanecem ocasionando chuva nas bacias dos rios Jacuí e Uruguai até o dia 6, e nas bacia dos rios Iguaçu e Paranapanema e no trecho incremental a Uhe Itaipu a partir do dia 6. No decorrer do dia 7 a frente avança pelo Rio Grande do Sul e Santa Catarina intensificando a precipitação na bacia do rio Uruguai e Iguaçu. Temperatura estável em Porto Alegre no dia de hoje, em elevação no dia seguinte, e em declínio no dia 6. Nas demais capitais temperatura estável, e em declínio no dia 6.

Subsistema Sudeste

Nos próximos dias permanece o predomínio de céu claro, sendo que o sul de Minas Gerais e do Rio de Janeiro apresentarão aumento de nebulosidade no dia de hoje, seguido de pancadas de chuva e o estado de São Paulo esta mesma condição até o dia 7. A precipitação atinge pontos isolados das bacias dos rios Grande, Paraíba do Sul e Tietê. Temperatura em elevação, e em declínio em São Paulo no dia 6.

Subsistema Centro-Oeste/Norte

Durante o dia de hoje a maior parte destes subsistemas permanecerá com nebulosidade variável e chuva fraca/moderada, atingindo as bacias dos rios Manso, Paranaíba e Tocantins. A partir do dia 06 o centro-norte de Goiás e o Distrito Federal apresentarão diminuição de nebulosidade, passando a predominar céu claro a seguir. O restante dos subsistemas permanecerá com nebulosidade variável e precipitação, atingindo a bacia do rio Manso e a subbacia do rio Araguaia. Temperatura em declínio hoje, entrando em suave elevação amanhã em Brasília e no dia 07 em Goiânia.

Subsistema Nordeste

Nos próximos dias permanece o predomínio de céu claro na maior parte deste subsistema, exceto o litoral da Bahia e o o centro-sul dos estados do Piauí e Maranhão

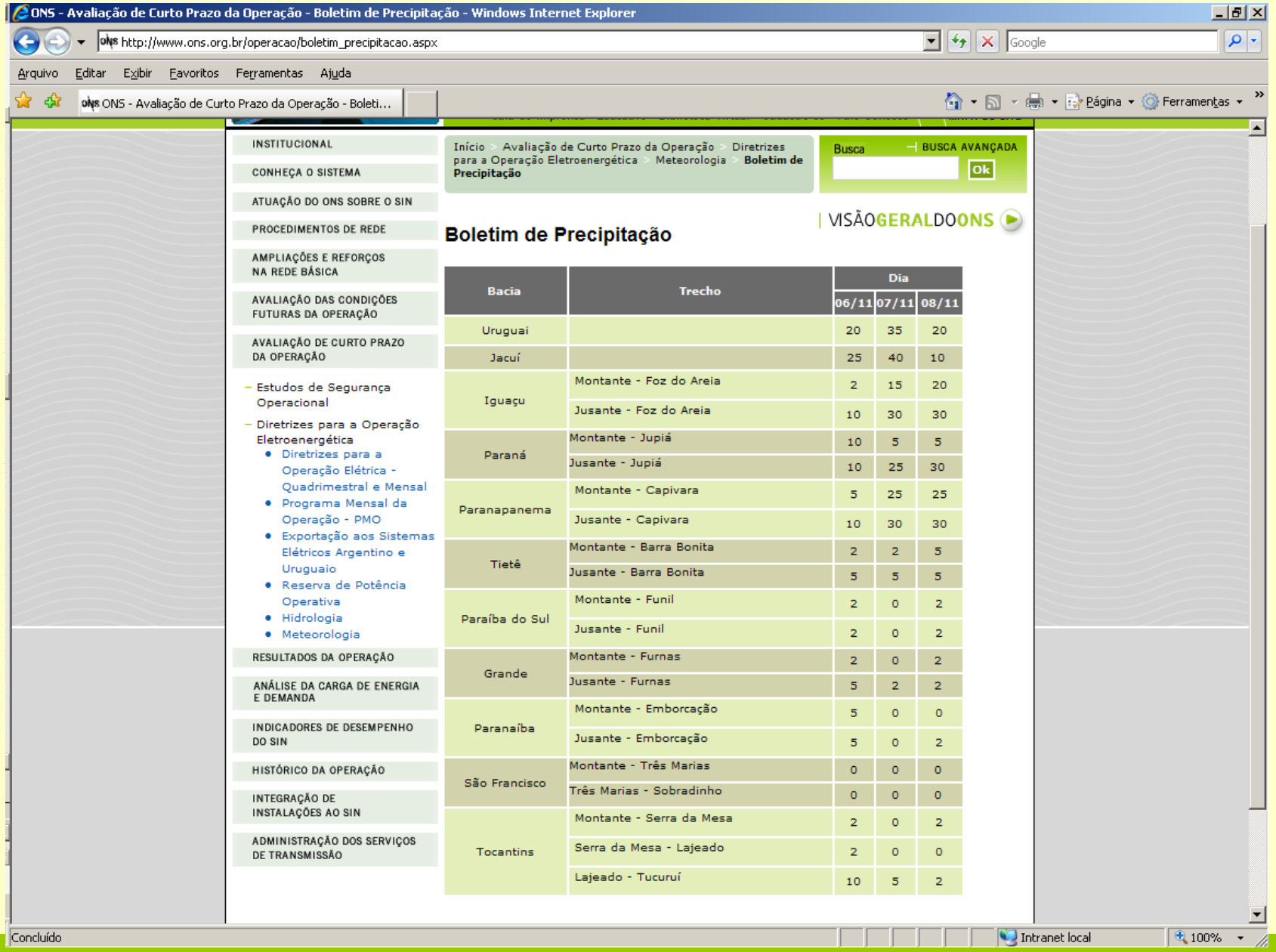
• Topo

Concluído

Intranet local

100%

Produtos de Rotina



Bacia	Trecho	Dia		
		06/11	07/11	08/11
Uruguai		20	35	20
Jacuí		25	40	10
Iguaçu	Montante - Foz do Areia	2	15	20
	Jusante - Foz do Areia	10	30	30
Paraná	Montante - Jupiá	10	5	5
	Jusante - Jupiá	10	25	30
Paranapanema	Montante - Capivara	5	25	25
	Jusante - Capivara	10	30	30
Tietê	Montante - Barra Bonita	2	2	5
	Jusante - Barra Bonita	5	5	5
Paraíba do Sul	Montante - Funil	2	0	2
	Jusante - Funil	2	0	2
Grande	Montante - Furnas	2	0	2
	Jusante - Furnas	5	2	2
Paranaíba	Montante - Emborcação	5	0	0
	Jusante - Emborcação	5	0	2
São Francisco	Montante - Três Marias	0	0	0
	Três Marias - Sobradinho	0	0	0
Tocantins	Montante - Serra da Mesa	2	0	2
	Serra da Mesa - Lajeado	2	0	0
	Lajeado - Tucuruí	10	5	2

Produtos de Rotina

ONS - Avaliação de Curto Prazo da Operação - Boletim Climático Mensal - Windows Internet Explorer

http://www.ons.org.br/operacao/boletim_climatico_mensal.aspx

Arquivo Editar Exibir Favoritos Ferramentas Ajuda

ONS - Avaliação de Curto Prazo da Operação - Boleti...

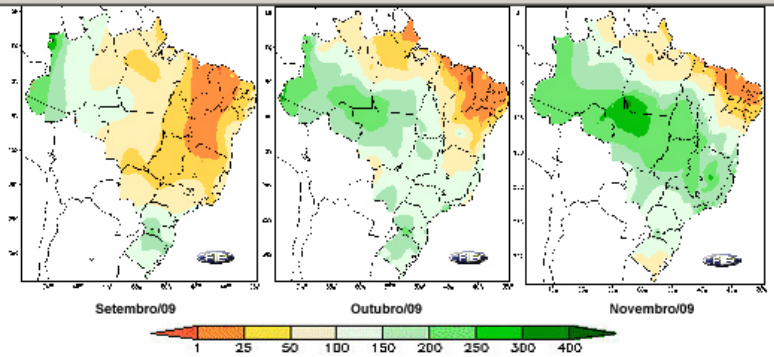


Figura 3.2: Climatologia de precipitação (mm). Fonte: INMET – 1961/1990

A previsão climática de consenso para o trimestre outubro, novembro e dezembro de 2009, elaborada a partir das previsões realizadas pelo modelo Global do CPTEC e pelos modelos dos centros Americanos e Europeus, indica maior probabilidade de chuvas variando entre a média e acima da média na região Sul, nos estados de São Paulo e Mato Grosso do Sul e no sul do Rio de Janeiro, de Minas Gerais, de Goiás e do Mato Grosso. Na Bacia do Rio Parnaíba, no trecho da bacia do rio São Francisco a jusante da Uhe Sobradinho e no trecho da bacia do rio Tocantins próximo a Uhe Tucuruí a previsão indica precipitação variando entre a média e abaixo da média. Nas demais áreas do SIN, a distribuição de probabilidades indica totais pluviométricos sazonais em torno da normal climatológica.

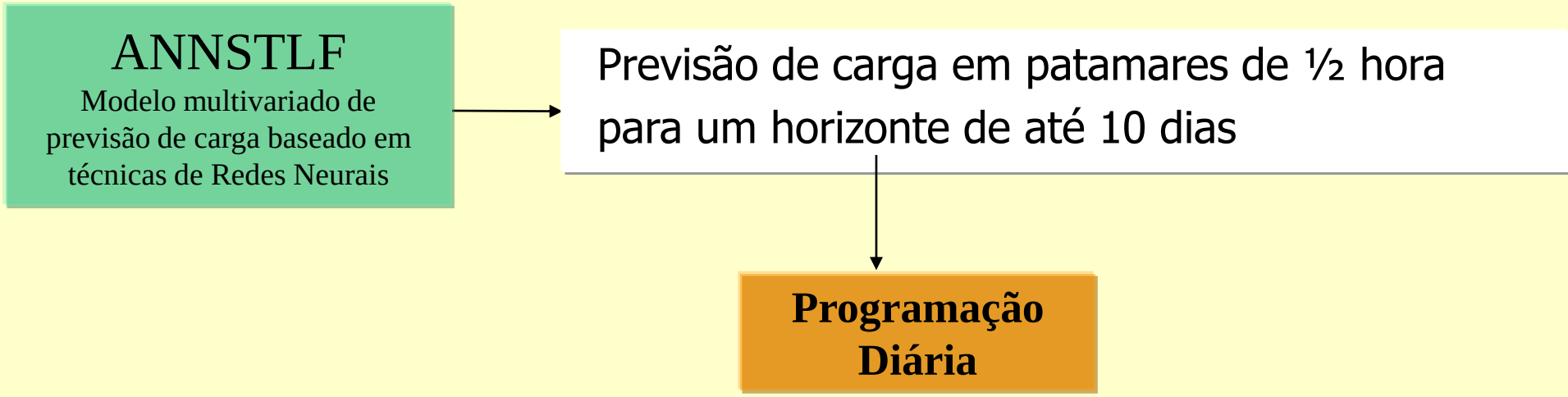
Neste trimestre, os valores de temperatura estão previstos na categoria próxima da normal climatológica nas Regiões Sul, Centro-Oeste e Sudeste e no sul das regiões Norte e Nordeste, com temperaturas variando entre a média e acima da média climatológica sobre o norte das regiões Nordeste e Norte.

BACIAS HIDROGRÁFICAS	PREVISÃO
PARANAÍBA	**Precipitação:** entre a média e acima da média histórica no trecho a jusante da UHE Itumbiara. Próxima da média nos demais trechos.
GRANDE	**Precipitação:** entre a média e acima da média histórica.
TOCANTINS	**Precipitação:** entre a média e abaixo da média histórica no trecho próximo a UHE Tucuruí. Próxima da média nos demais trechos.

Concluído Intranet local 100%

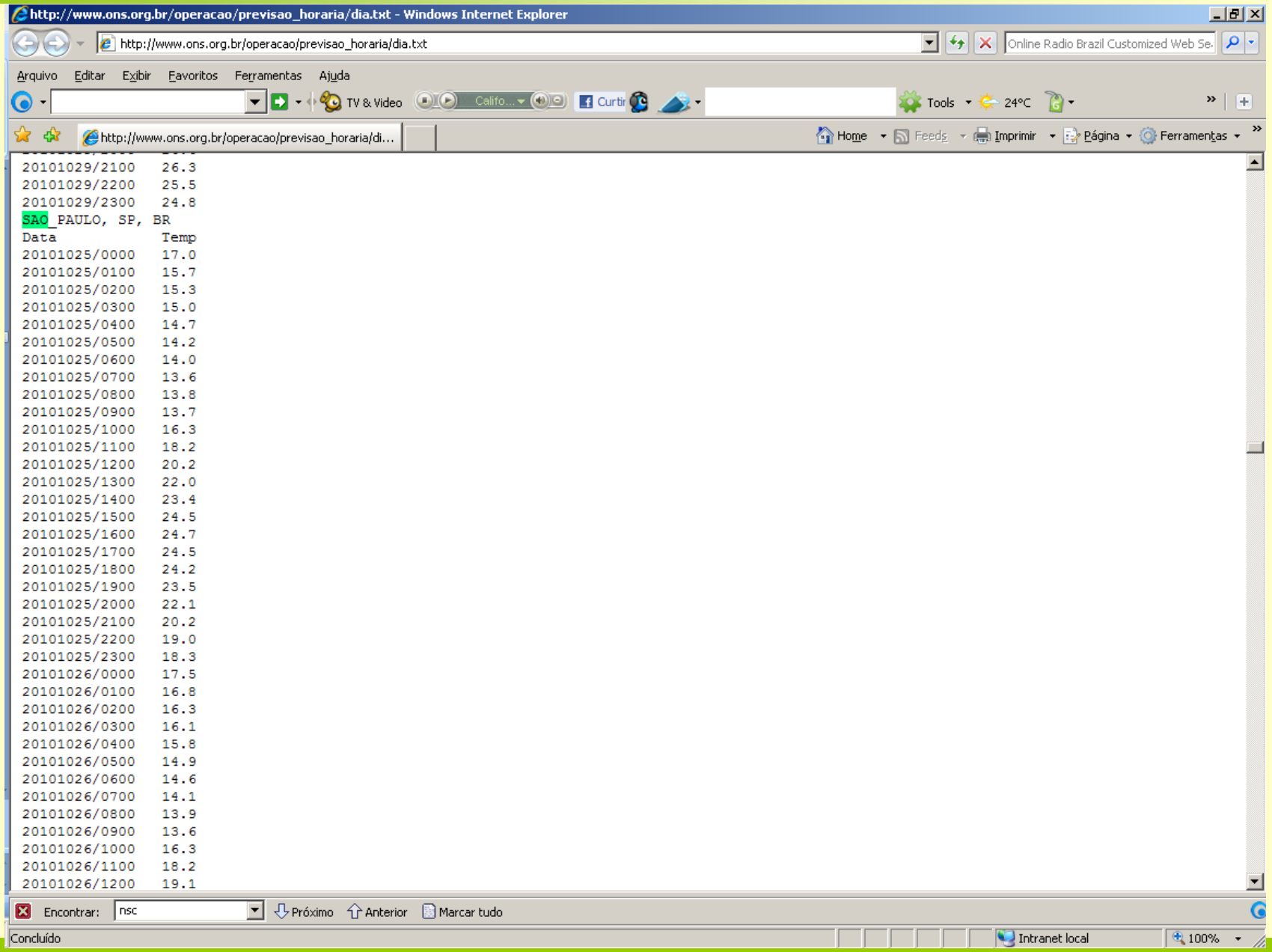
Produtos de Rotina

➢**A previsão horária de temperatura é utilizada com insumo na previsão de carga, em conjunto com outras variáveis, a partir de um modelo matemático baseado em redes Neurais.**



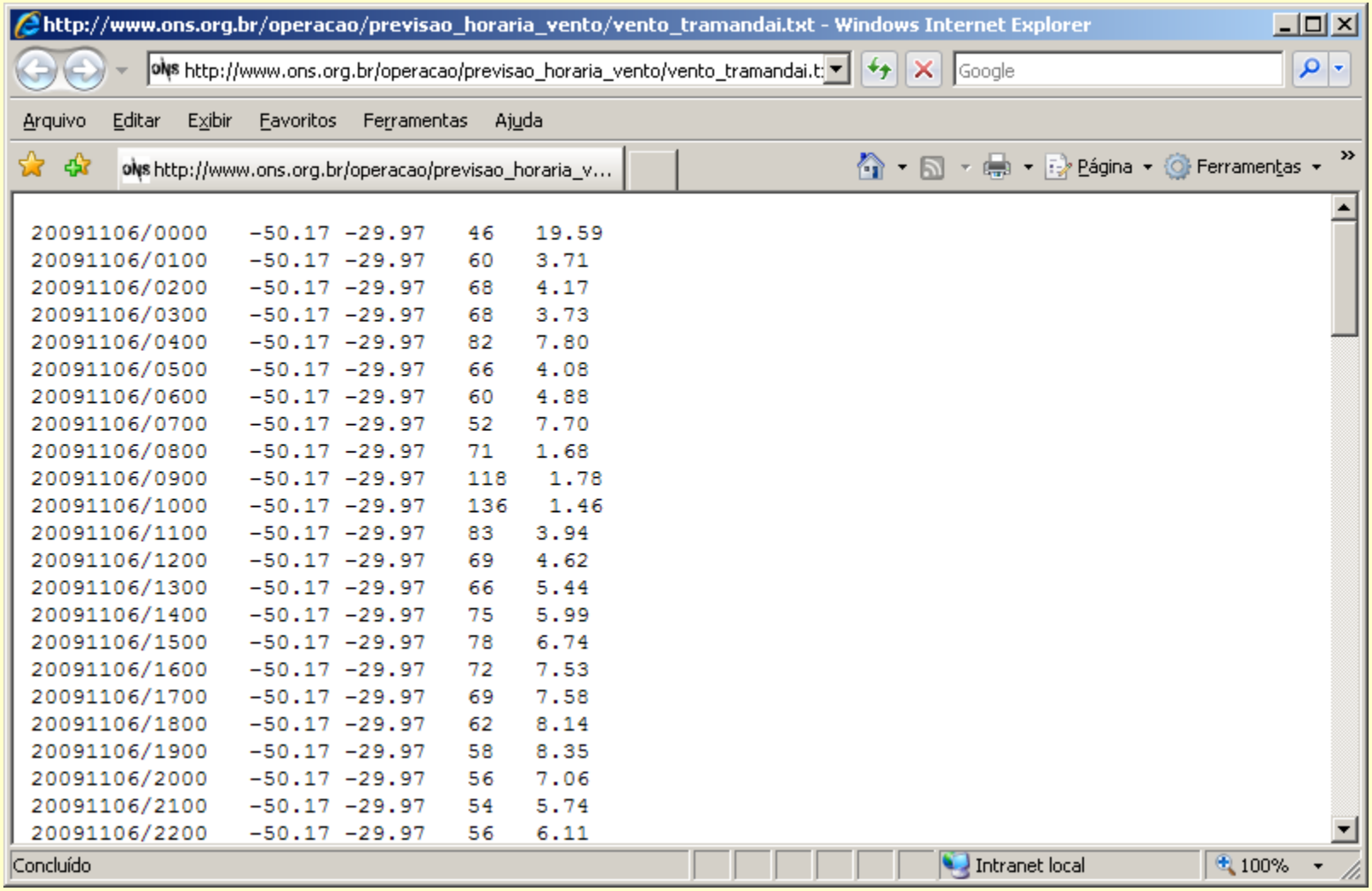
➡ Utilização de informações de **temperatura (verificadas e previstas – até 15 dias a frente) – Modelos ETA e Global do CPTEC**

Produtos de Rotina



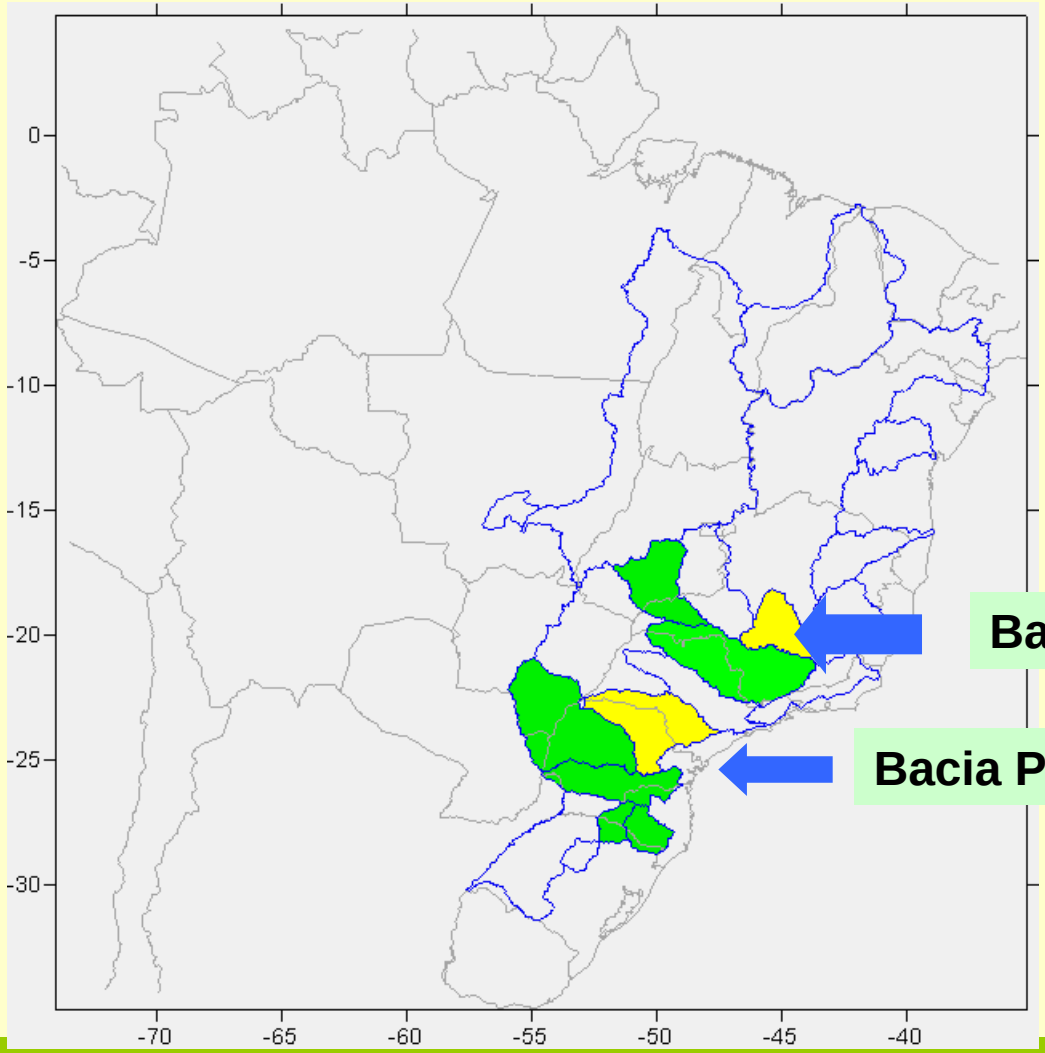
Produtos de Rotina

➢**Utilização da previsão de vento para o parque eólico de Tramandai - RS**



Produtos de Rotina

➢ **Utilização da Previsão quantitativa de precipitação do modelo ETA para 10 dias a frente.**



operacional

em desenvolvimento

Bacia S.Francisco (T.Marias)

Bacia Paranapanema

Produtos de Rotina

➢ **Utilização da Previsão de precipitação do modelo ETA para 10 dias a frente.**

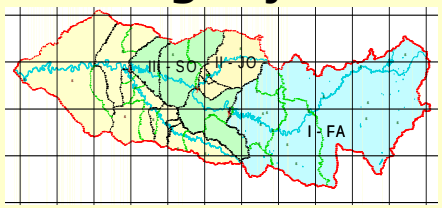
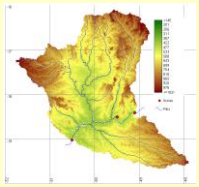
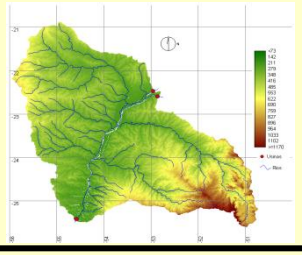
32% da energia coberta por modelagem chuva-vazão

41% da energia coberta por modelagem chuva-vazão (perspectiva 2010)

90% da energia coberta por modelagem chuva-vazão

Produtos de Rotina

- Concorrência de Modelos - 2004

BACIA / TRECHO	EMPRESAS	NOME DO MODELO	METODOLOGIA
Iguaçu 	**UFF** **LACTEC** **PUC-Rio**	Fuzzy Recorrente SMAP Redes Neurais	Inteligência Artificial Físico Concentrado Inteligência artificial
Itumbiara - São Simão 	**RHAMA** **PUC-Rio**	MGB-IPH Regressão Dinâmica	Físico Distribuído Estocástico
Rosana - Porto Primavera - Itaipu 	**FCTH** **RHAMA** **PUC-Rio**	SMAP-MEL MGB-IPH Regressão Dinâmica	Físico Concentrado & Estocástico Físico Distribuído Estocástico

Produtos de Rotina

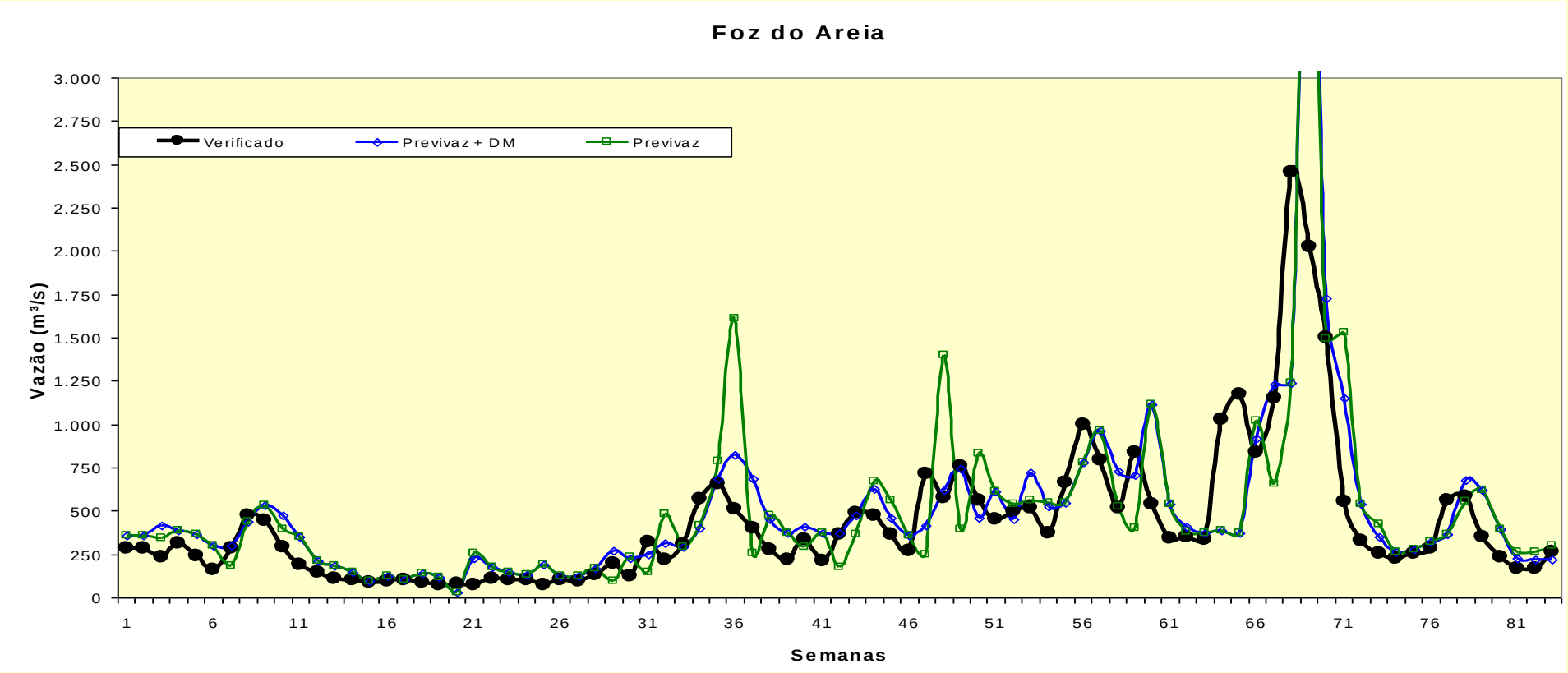
- **Modelo MPCV – Combinação de Redes Neurais, Data Mining e modelagem Estocástica (Previvaz/CEPEL) aplicado à Bacia do rio Uruguai (desenvolvimento interno)**

- **Modelo SMAP – Aplicação para as bacias dos rios Grande e Paranapanema (desenvolvimento interno)**

- **Modelo Neuro3M – Modelo de Redes Neurais aplicadao a cabeceira do rio São Francisco (trecho a montante da UHE Três Marias) – desenvolvimento interno**

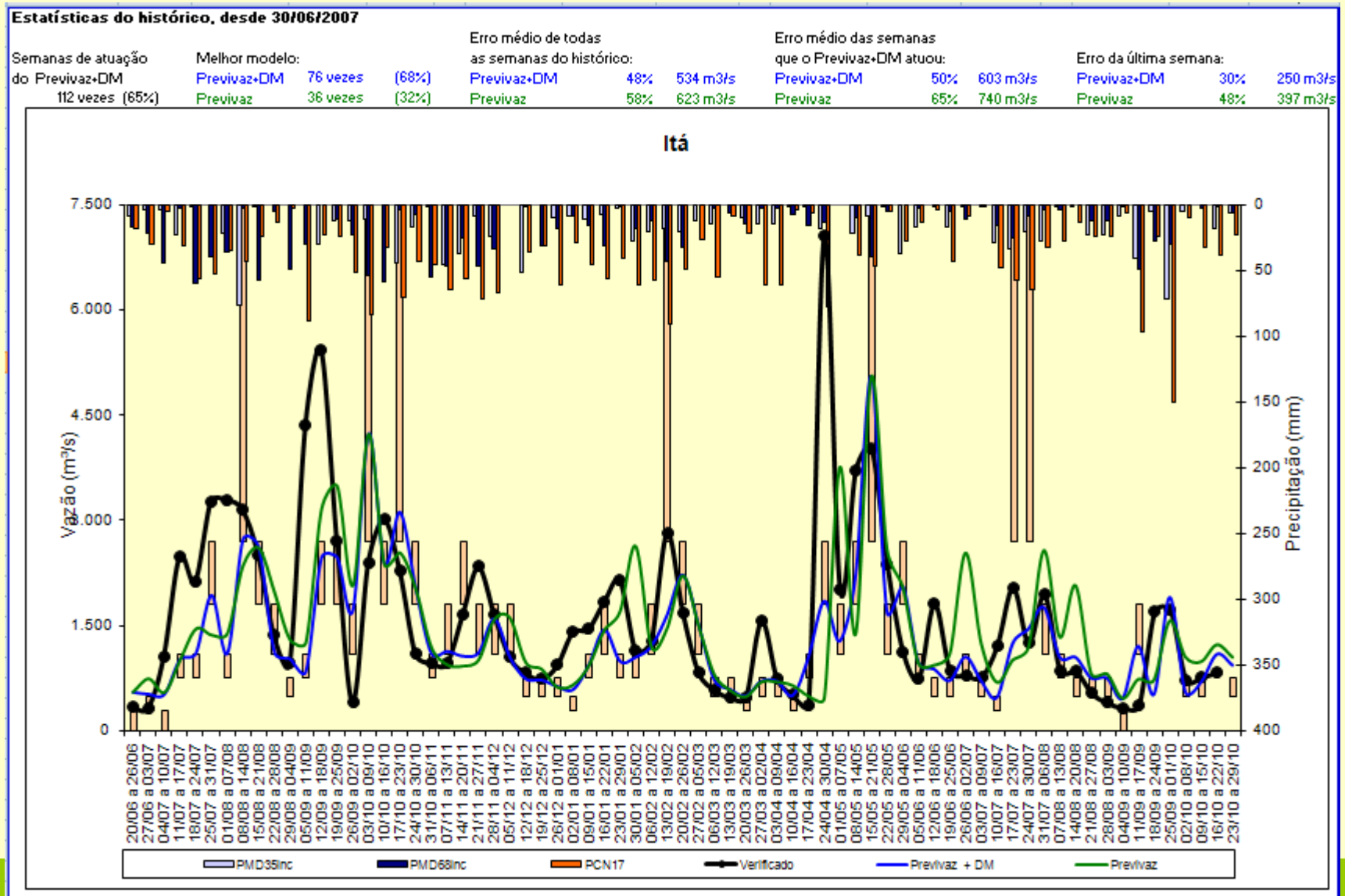
Produtos de Rotina

➢ **Exemplo de melhoria na qualidade da modelagem chuva-vazão com a inclusão da precipitação**



Produtos de Rotina

➢ **Exemplo de melhoria na qualidade da modelagem chuva-vazão com a inclusão da precipitação**



Estudos realizados pelo ONS

➢ Artigo publicado na Revista Brasileira de Hidrologia pelo ONS em parceria com o CPTEC sobre a identificação de erros sistemáticos na previsão de precipitação do modelo ETA. Tendência de superestimar valores baixos de precipitação e subestimar valores muito altos.

- Bacia do rio Grande

➢ Previsão de precipitação Realizada pelo modelo numérico de previsão de tempo ETA.

➢ Chuva média diária em cada sub-bacia calculada a partir de média aritmética.

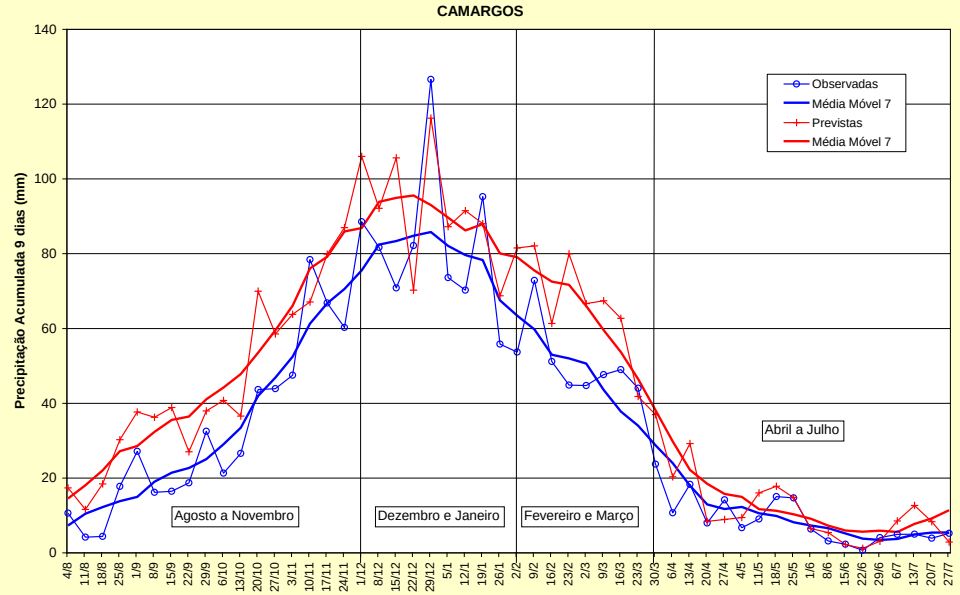
➢ Precipitação diária prevista para 10 dias à frente, no período de 1996 a 2003, com previsões efetuadas sempre com início às quartas-feiras.

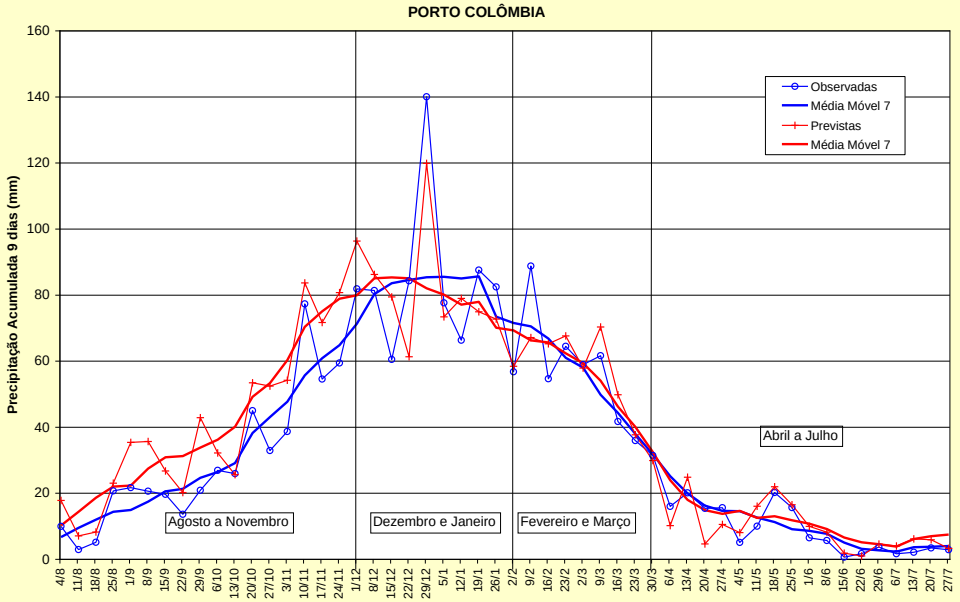
Verifica-se, em todas as sete sub-bacias, uma tendência de superestimativa dos valores de precipitação prevista (viés da previsão).

Estudos realizados pelo ONS

- Bacia do rio Grande

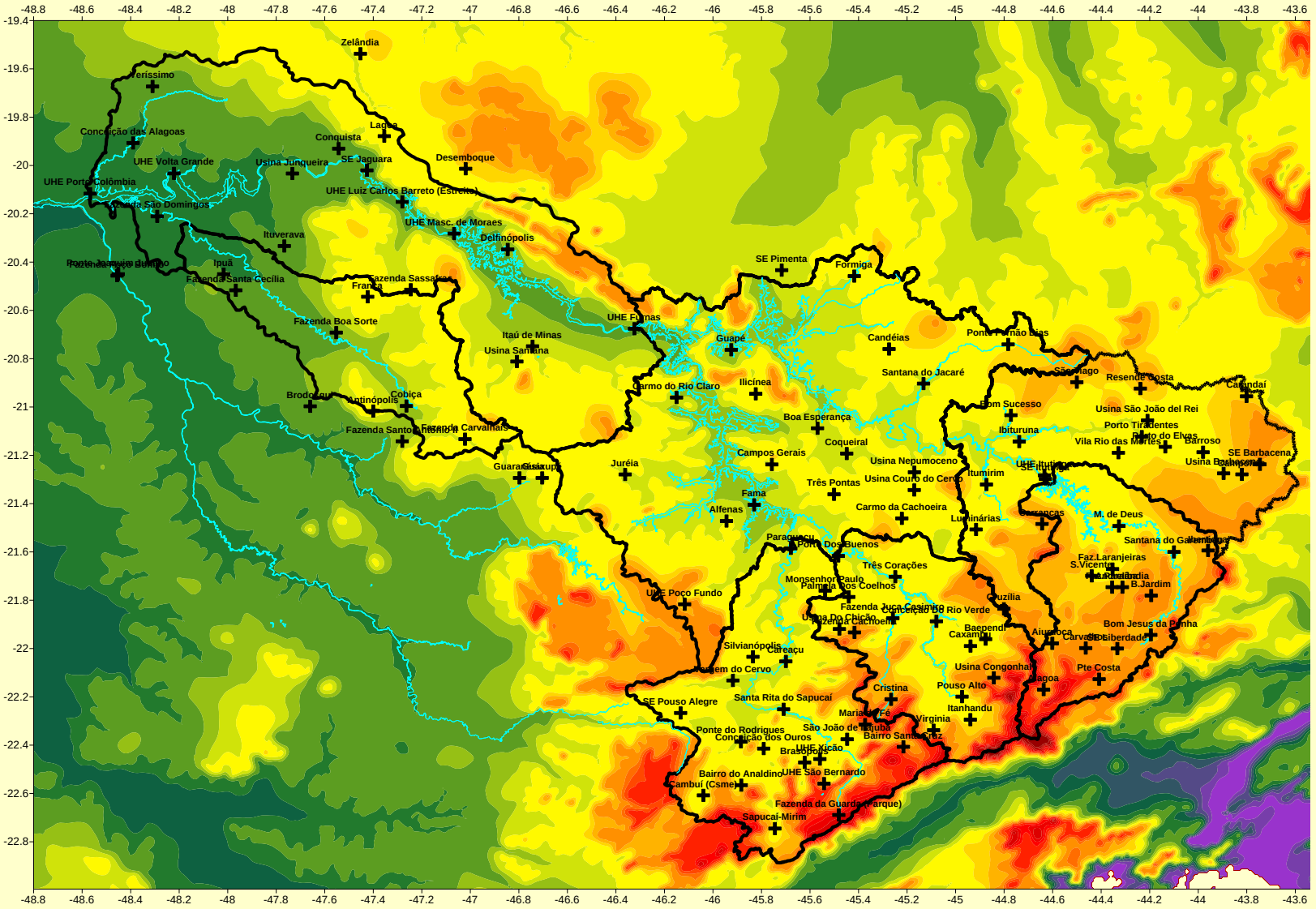
Sub-bacia	Precipitação Média Anual (mm)		Pprev/Pobs
	Observada	Prevista	
1 - Camargos	1.434,6	1.820,3	1,27
2 - Funil	1.400,4	1.774,8	1,27
3 - Porto dos Buenos	1.499,5	2.154,4	1,44
4 - Paraguaçu	1.435,6	1.838,3	1,28
5 - Furnas	1.333,9	2.013,3	1,51
6 - Fazenda Capão Escuro	1.532,1	1.716,6	1,12
7 - Porto Colômbia	1.476,6	1.614,8	1,09





Estudos realizados pelo ONS

- Bacia do rio Grande – Densidade dos postos pluviométricos



Estudos realizados pelo ONS

- Bacia do rio Grande – Densidade dos postos pluviométricos

Com vistas à identificação e remoção deste viés, foram realizados estudos, para cada uma das sete sub-bacias consideradas no modelo. Para isso, foram adotadas as seguintes premissas:

➢ Considera-se o total de precipitação prevista acumulada no período e não apenas seus valores diários (o modelo ETA, de forma geral, consegue prever, com razoável qualidade, a ocorrência ou não de chuvas nos próximos dias, porém, além da tendência a superestimar os totais, em diversas vezes há uma defasagem entre a previsão e a observação dos dias de chuva com maior intensidade).

➢ Consideraram-se períodos distintos do ano na identificação e remoção do viés, já que o viés e os sistemas meteorológicos que ocasionam precipitação não têm o mesmo padrão ao longo dos meses.

✓ agosto a novembro.

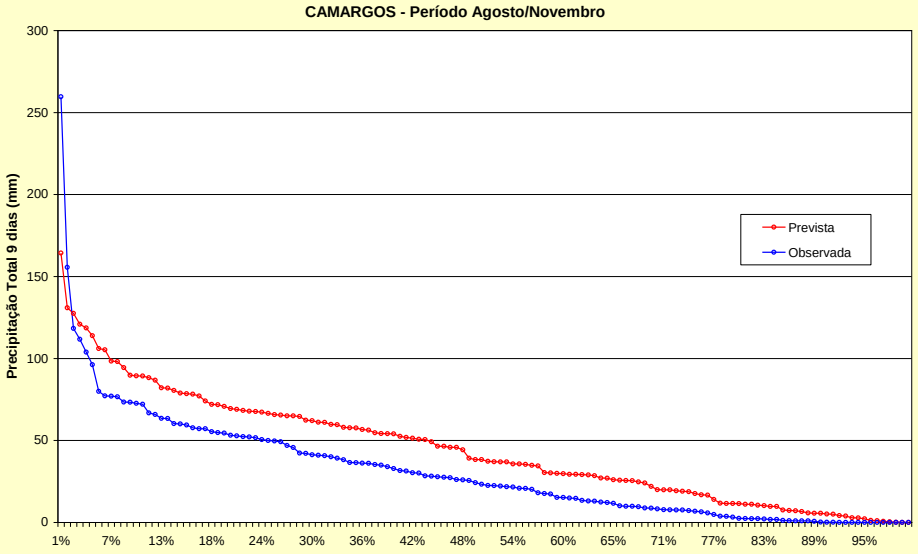
✓ dezembro e janeiro.

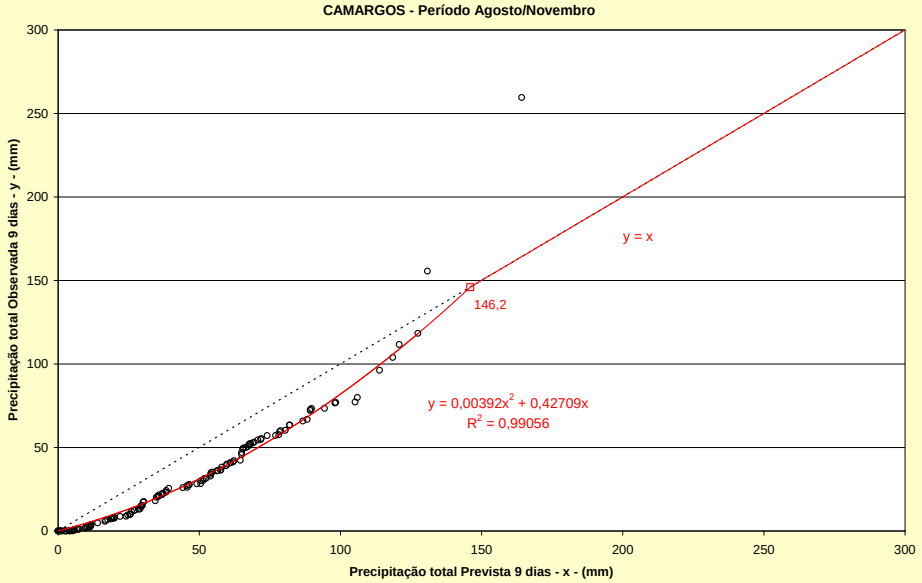
✓ fevereiro e março.

✓abril a julho.

Estudos realizados pelo ONS

- Bacia do rio Grande – Densidade dos postos pluviométricos

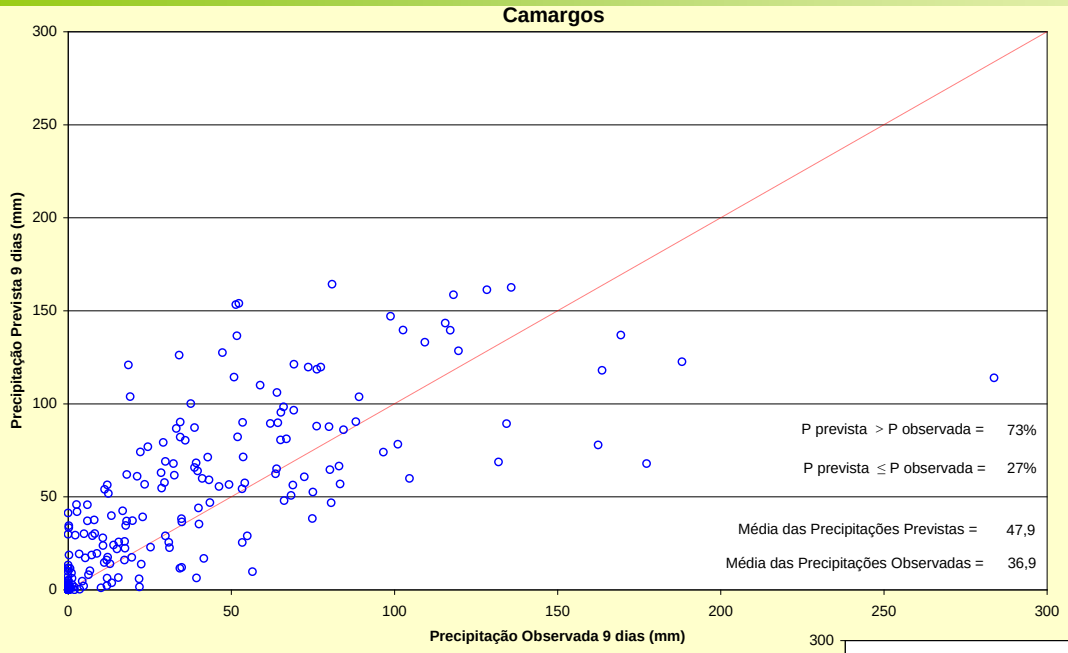


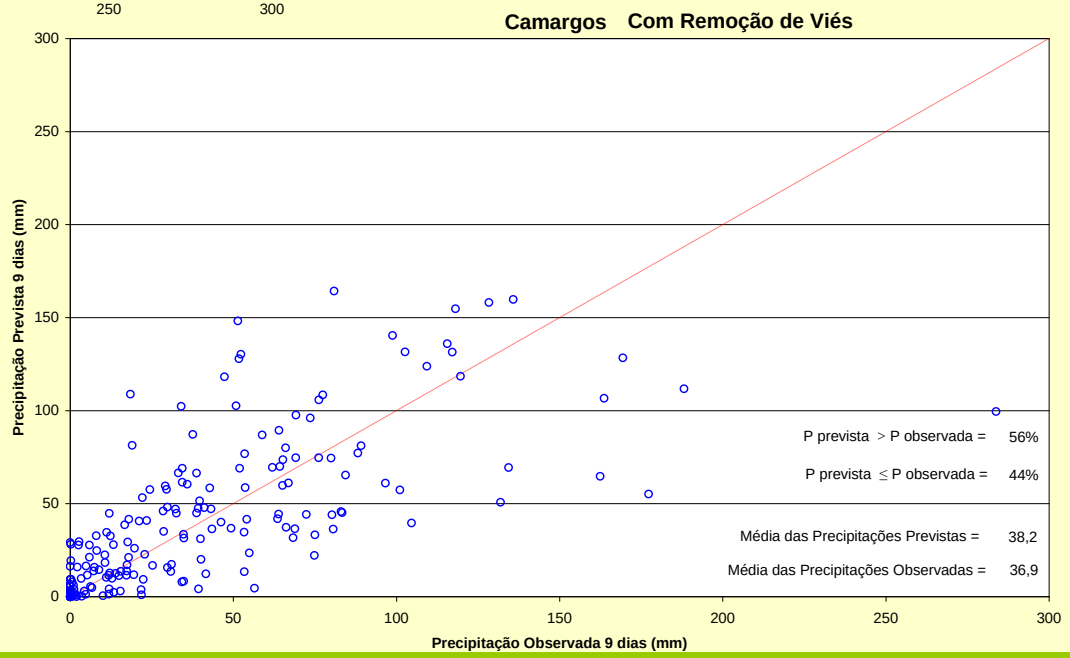


Constantes a e b e limites de aplicação das equações obtidas para remoção do viés da previsão de precipitação

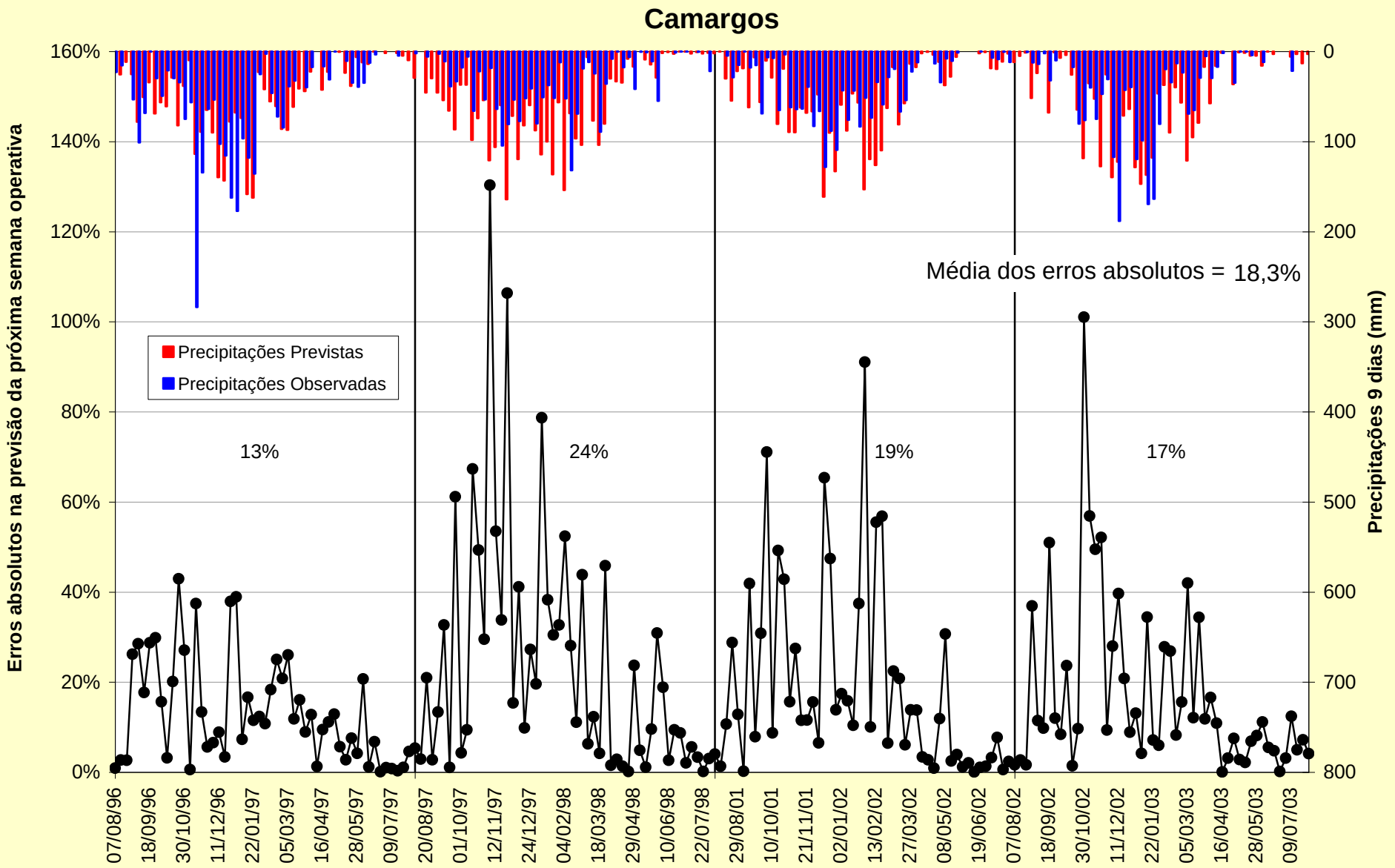
Sub-bacia	Período			Período			Período			Período		
	Agosto/Novembro			Dezembro/Janeiro			Fevereiro/Março			Abril/Julho		
	a	b	Limite (mm)	a	b	Limite (mm)	a	b	Limite (mm)	a	b	Limite (mm)
1 - Camargos	0,00392	0,42709	146,2	0,00179	0,69219	172,0	0,00127	0,65057	275,1	0,00725	0,59979	55,2
2 - Funil	0,00443	0,44497	125,3	0,00072	0,80994	264,0	0,00225	0,57288	189,8	0,01544	0,26893	47,3
3 - Porto dos Buenos	0,00351	0,35244	184,5	0,00238	0,47241	221,7	0,00155	0,49249	327,4	0,00814	0,39126	74,8
4 - Paraguaçu	0,00341	0,47233	154,7	0,00203	0,63334	180,6	0,00308	0,52903	152,9	0,00795	0,48164	65,2
5 - Furnas	0,00119	0,52182	401,8	0,00204	0,47112	259,3	0,00152	0,51448	319,4	0,00745	0,44803	74,1
6 - Fazenda Capão Escuro	0,00487	0,43763	115,5	-	-	-	-	-	-	-	-	-
7 - Porto Colômbia	0,00037	0,74494	689,4	-	-	-	-	-	-	-	-	-

Estudos realizados pelo ONS

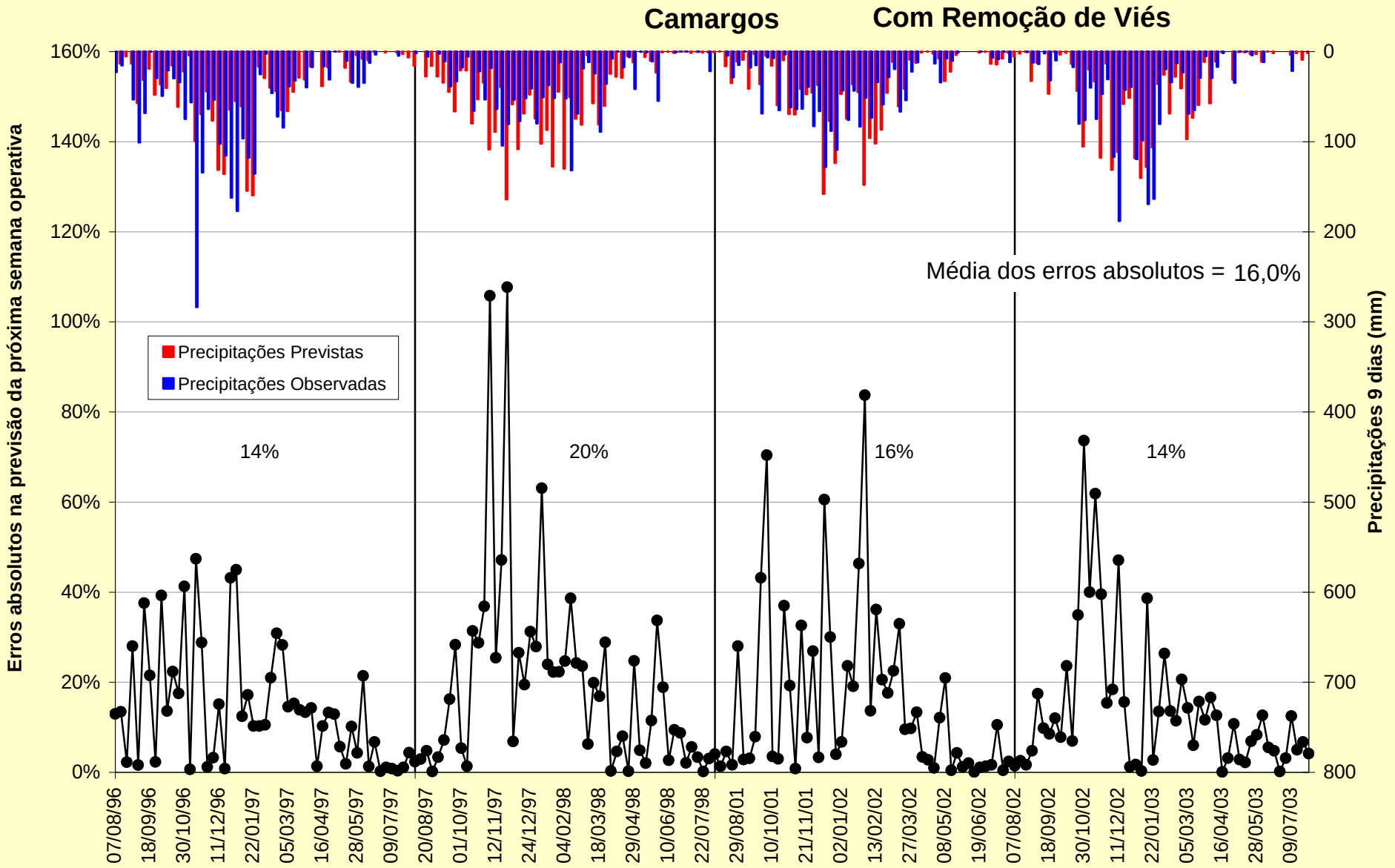




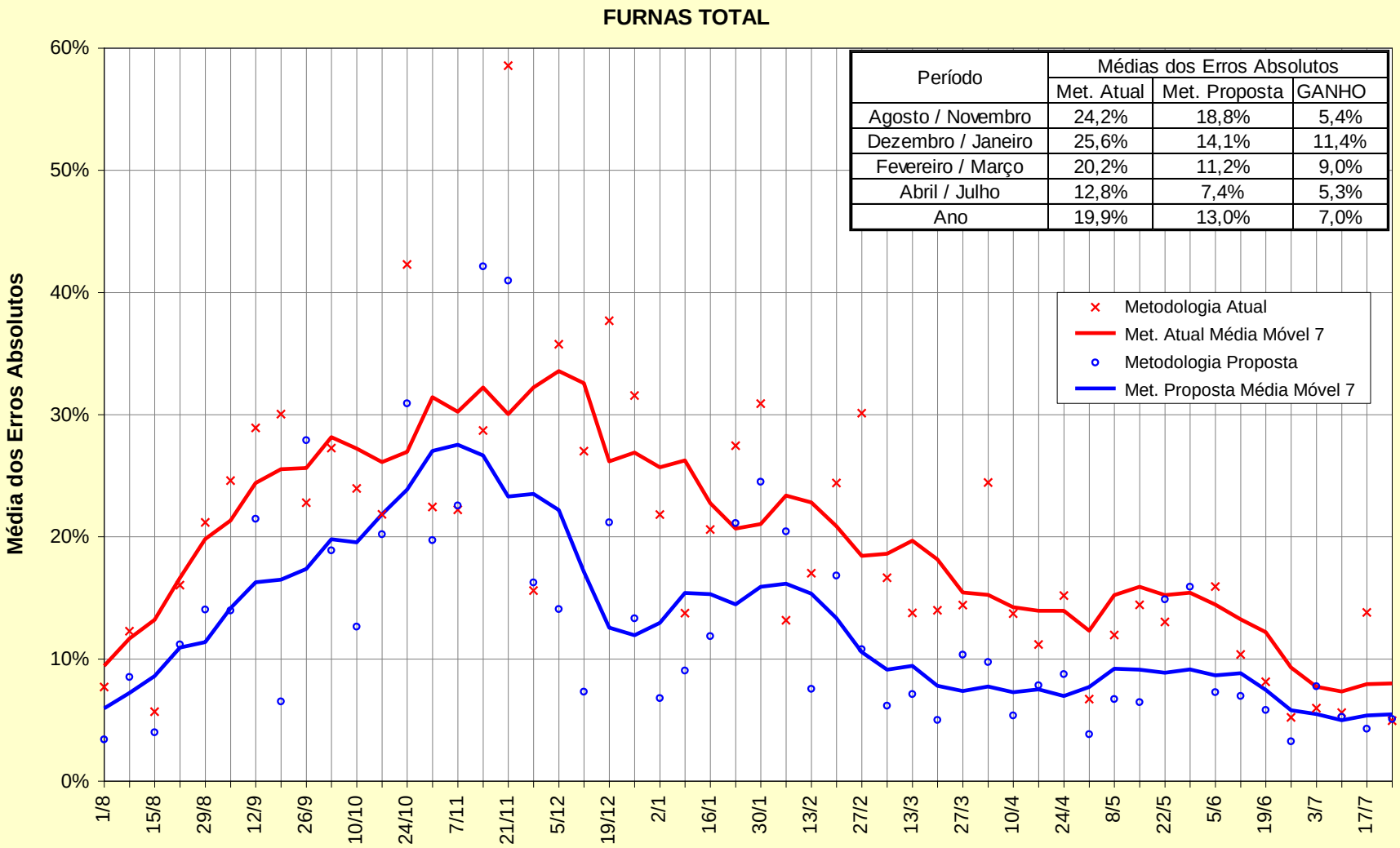
Estudos realizados pelo ONS



Estudos realizados pelo ONS



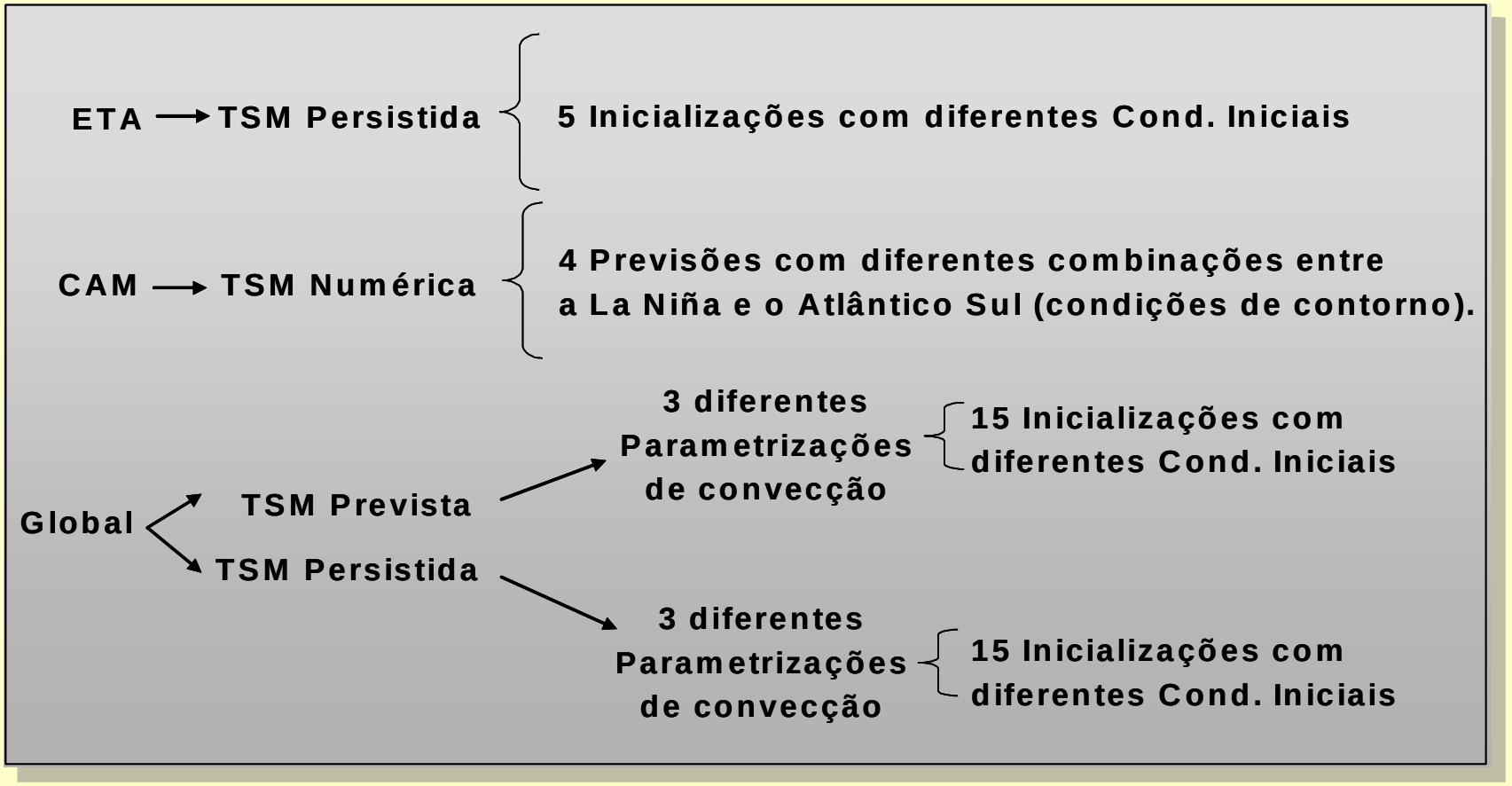
Estudos realizados pelo ONS



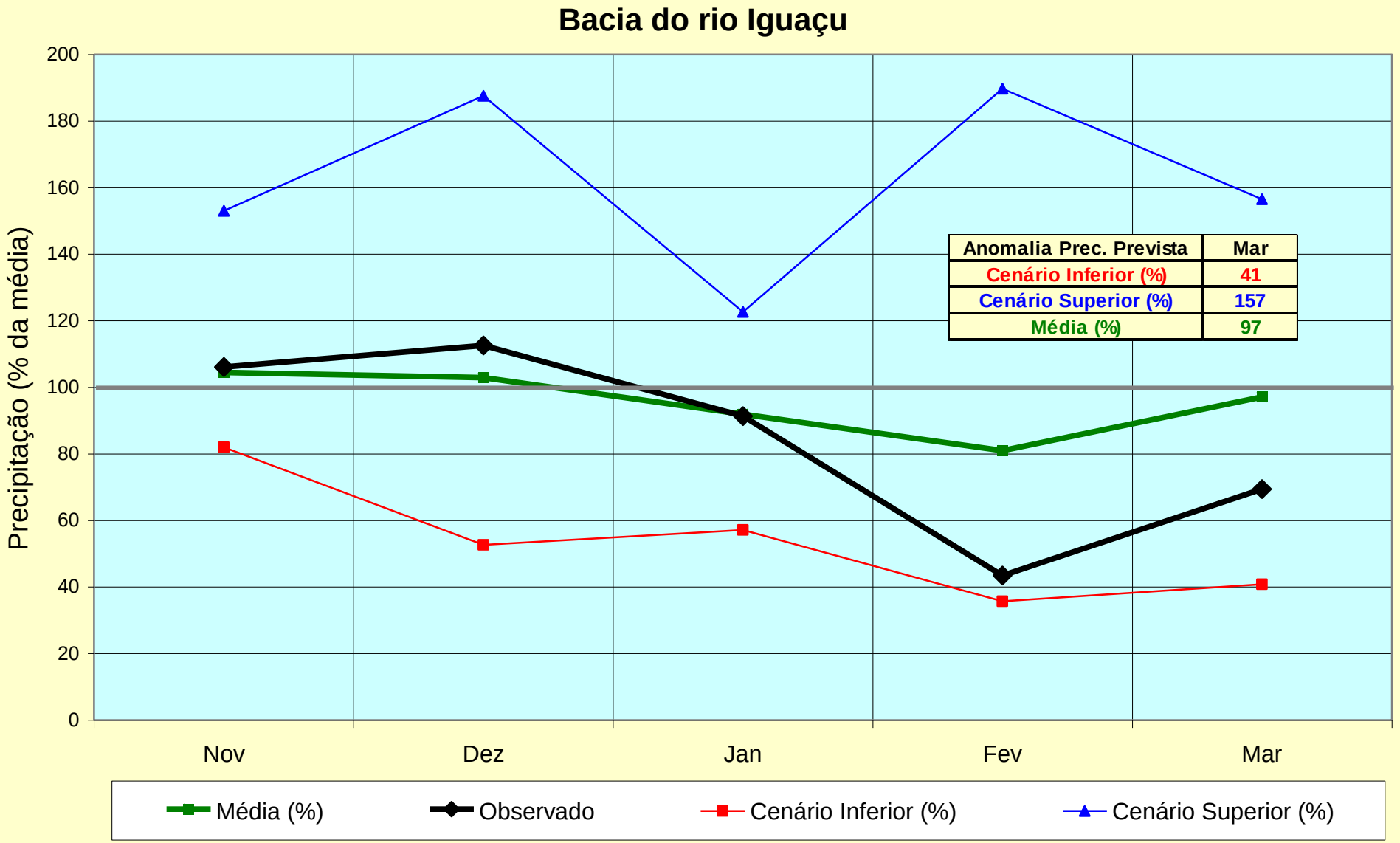
Período	Médias dos Erros Absolutos		
	Met. Atual	Met. Proposta	GANHO
Agosto / Novembro	24,2%	18,8%	5,4%
Dezembro / Janeiro	25,6%	14,1%	11,4%
Fevereiro / Março	20,2%	11,2%	9,0%
Abril / Julho	12,8%	7,4%	5,3%
Ano	19,9%	13,0%	7,0%

Estudos realizados pelo ONS

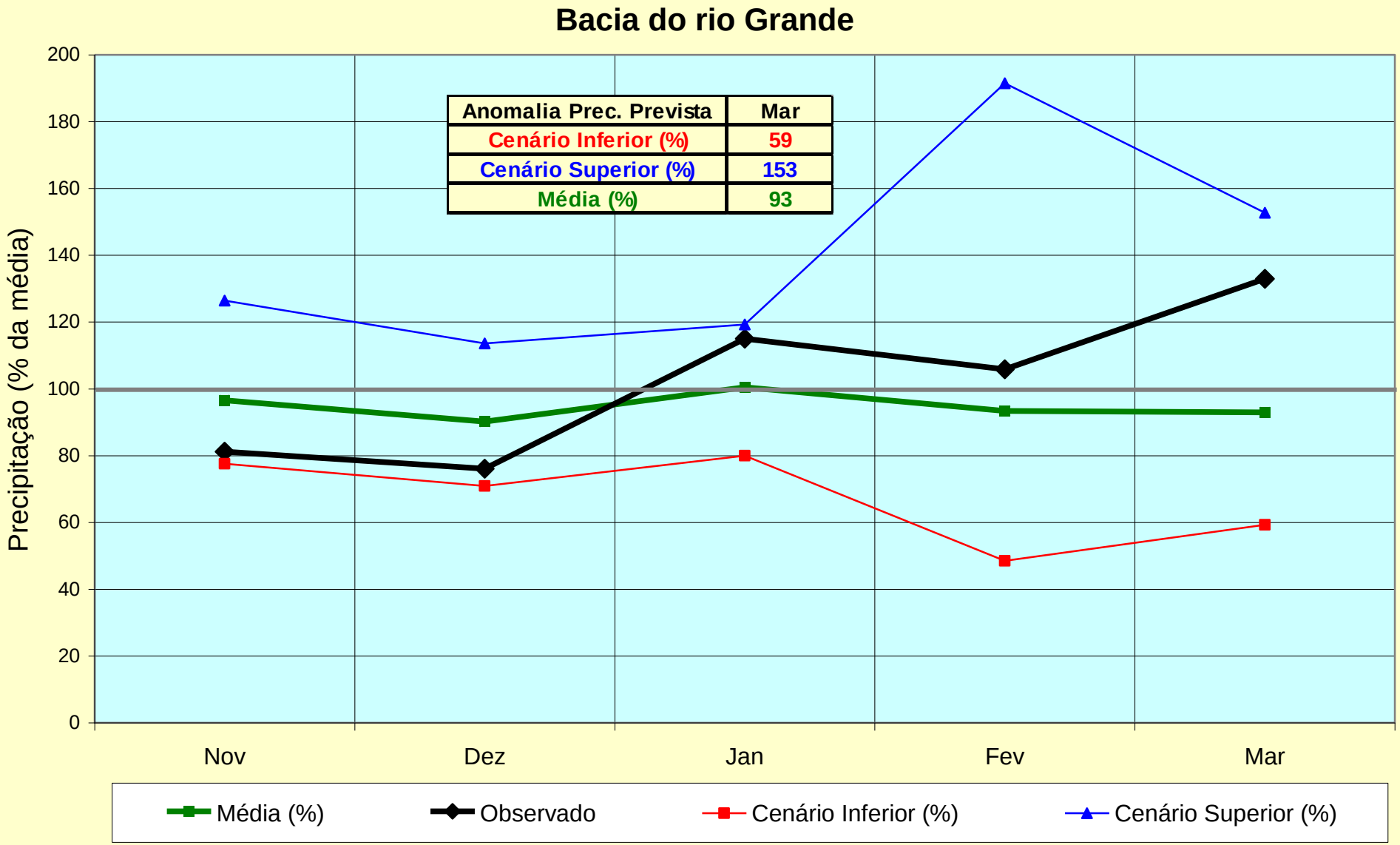
- Ensemble Multi-Model para as previsões climáticas do verão de 2007



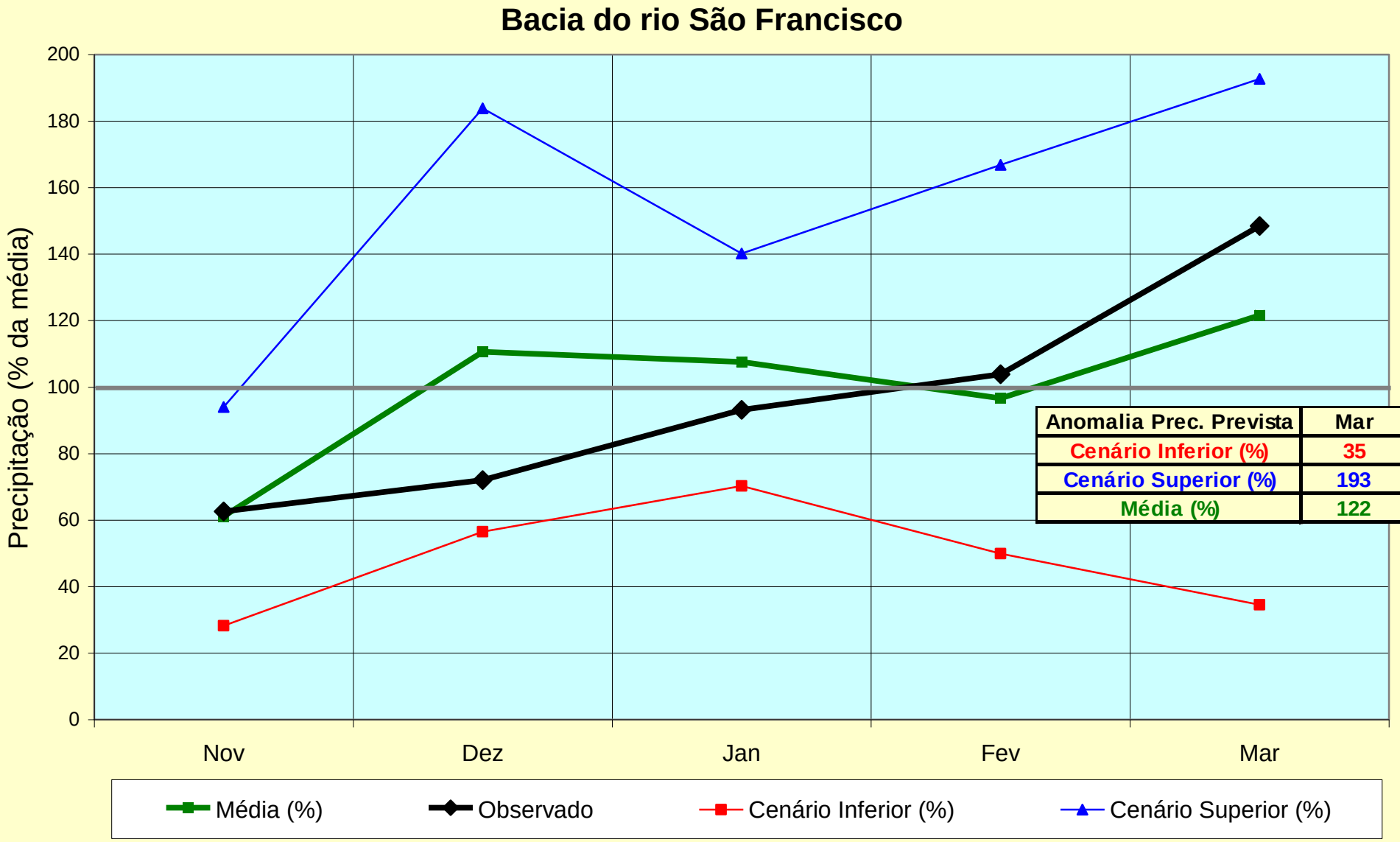
Estudos realizados pelo ONS



Estudos realizados pelo ONS



Estudos realizados pelo ONS



Projetos em andamento

• Correção da previsão de precipitação utilizando redes Neurais e as outras variáveis prognósticas do modelo ETA

- Premissa: a precipitação é um dos piores campos prognósticos dos modelos de previsão numérica de tempo, devido, principalmente, ao grande número de parametrizações envolvidas neste processo.

- Utilização de Redes Neurais do tipo Multi Layer Perceptron (MLP) com treinamento Bayesiano para a correção da previsão de chuva do modelo ETA, utilizando outras variáveis prognósticas do próprio modelo ETA.

- O desempenho dos modelos é medido em termos do erro médio quadrático, do inglês mean squared error (MSE), obtido para o conjunto de teste. Matematicamente, esta estatística é dada por:

$$MSE = \frac{1}{N}\sum_{i=1}^{N}\left(P_i^{est} - P_i^{real}\right)^2$$

Projetos em andamento

- Correção da previsão de precipitação utilizando redes Neurais e as outras variáveis prognósticas do modelo ETA – Resultados bacia do rio Grande

Tabela 59 – Resumo dos Resultados para a bacia do Rio Grande – Modelos corretores para 1 até 6 dias à frente

Período Úmido												
Passos a Frente	1		2		3		4		5		6	
Estatisticas	NN	ETA	NN	ETA	NN	ETA	NN	ETA	NN	ETA	NN	ETA
MSE	0.83	0.97	6.48	15.11	5.08	6.42	3.69	7.77	2.71	0.97	2.64	1.44
Período Seco												
Passos a Frente	1		2		3		4		5		6	
Estatisticas	NN	ETA	NN	ETA	NN	ETA	NN	ETA	NN	ETA	NN	ETA
MSE	0.81	0.57	7.34	12.95	4.13	11.91	2.66	5.88	2.79	0.90	4.27	1.15
Período de Transição Seco-Úmido												
Passos a Frente	1		2		3		4		5		6	
Estatisticas	NN	ETA	NN	ETA	NN	ETA	NN	ETA	NN	ETA	NN	ETA
MSE	13.28	103.32	29.27	52.20	14.85	21.48	9.43	93.90	15.00	32.72	16.02	41.04
Período de Transição Úmido-Seco												
Passos a Frente	1		2		3		4		5		6	
Estatisticas	NN	ETA	NN	ETA	NN	ETA	NN	ETA	NN	ETA	NN	ETA
MSE	26.79	14.61	23.79	18.96	28.90	37.25	2.91	2.03	5.03	3.85	35.53	20.79

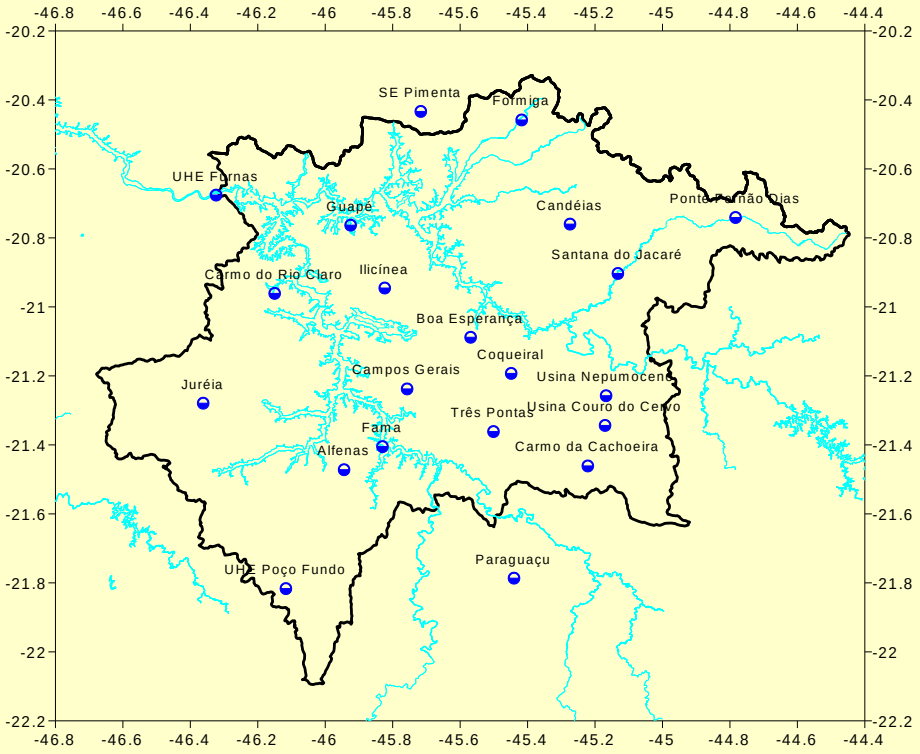
Tabela 60 – Resumo dos Resultados para a bacia do Rio Grande – Modelos corretores para 7 até 10 dias à frente e resultados globais

Período Úmido											
Passos a Frente	7		8		9		10		Total		Ganho (%)
Estatisticas	NN	ETA	NN	ETA	NN	ETA	NN	ETA	NN	ETA	
MSE	2.32	4.98	1.66	1.52	4.29	7.67	4.92	10.92	3.46	5.78	40.07
Período Seco											
Passos a Frente	7		8		9		10		Total		Ganho (%)
Estatisticas	NN	ETA	NN	ETA	NN	ETA	NN	ETA	NN	ETA	
MSE	3.31	3.56	2.61	3.59	6.42	5.82	3.67	8.96	3.80	5.53	31.31
Período de Transição Seco-Úmido											
Passos a Frente	7		8		9		10		Total		Ganho (%)
Estatisticas	NN	ETA	NN	ETA	NN	ETA	NN	ETA	NN	ETA	
MSE	12.15	8.32	15.84	41.78	70.80	54.96	12.83	24.15	20.95	47.39	55.79
Período de Transição Úmido-Seco											
Passos a Frente	7		8		9		10		Total		Ganho (%)
Estatisticas	NN	ETA	NN	ETA	NN	ETA	NN	ETA	NN	ETA	
MSE	6.49	5.42	34.32	10.43	30.02	8.18	13.09	19.52	20.69	14.10	-31.82
TOTAL - TODOS OS PERÍODOS E TODAS SUB-BACIAS									12.22	18.20	32.83

Projetos em andamento

• Correção da previsão de precipitação utilizando redes Neurais e as outras variáveis prognósticas do modelo ETA – Resultados bacia do rio Grande

Precipitação observada

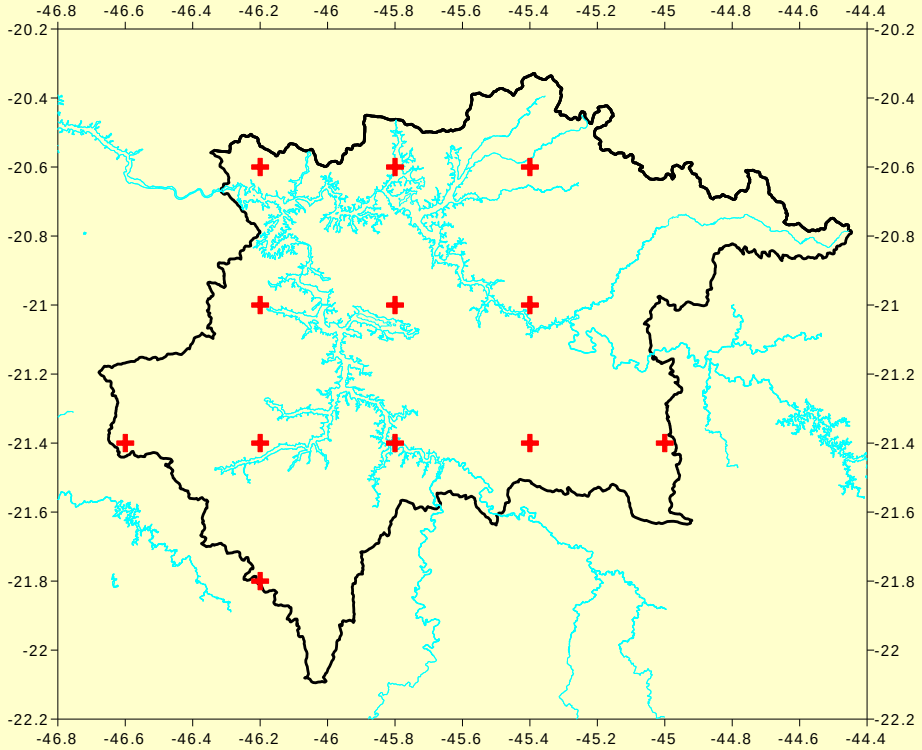


Código	Posto	Longitude	Latitude
2145042	Alfenas	-45,94417	-21,47194
2145030	Boa Esperança	-45,56889	-21,08806
2145041	Campos Gerais	-45,75722	-21,23778
2045020	Candéias	-45,27417	-20,76
2145044	Carmo da Cachoeira	-45,22139	-21,46111
2046028	Carmo do Rio Claro	-46,15	-20,96083
2145032	Coqueiral	-45,44861	-21,19278
2145047	Fama	-45,83028	-21,405
2045021	Formiga	-45,4175	-20,45806
2045028	Guapé	-45,92472	-20,76306
2045026	Ilicínea	-45,82361	-20,94528
2146027	Juréia	-46,36194	-21,27917
2145022	Paraguaçu	-45,44028	-21,78639
2044027	Ponte Fernão Dias	-44,78333	-20,74083
2045004	Santana do Jacaré	-45,13222	-20,90306
2045031	SE Pimenta	-45,71667	-20,43333
2145043	Três Pontas	-45,50111	-21,36139
2046027	UHE Furnas	-46,32361	-20,67583
2146084	UHE Poço Fundo	-46,11667	-21,81667
2145007	Usina Couro do Cervo	-45,17028	-21,34361
2145021	Usina Nepumoceno	-45,16722	-21,2575

Projetos em andamento

• Correção da previsão de precipitação utilizando redes Neurais e as outras variáveis prognósticas do modelo ETA – Resultados bacia do rio Grande

Precipitação Prevista



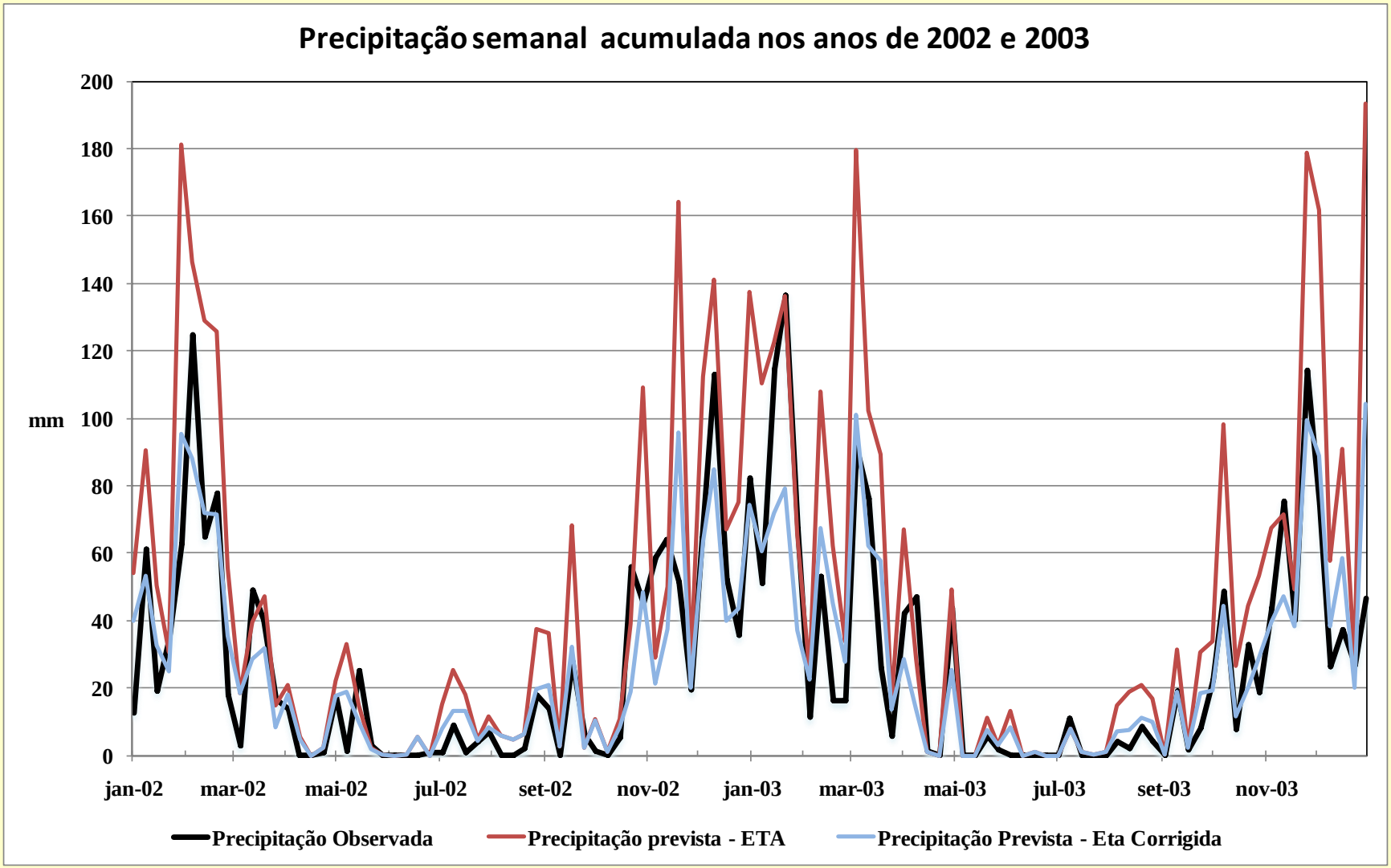
Projetos em andamento

Variáveis utilizadas para a correção

Variável	***Unidade***
Pressão atmosférica reduzida ao nível do mar	*hPa*
Temperatura do ar a 2 m	*K*
Temperatura do ponto de orvalho a 2m	*K*
Componente zonal do vento a 10m	*m/s*
Componente meridional do vento a 10m	*m/s*
Fluxo de calor latente médio na superfície	*w/m^2*
Temperatura do solo a 0,1 m de profundidade	*K*
Temperatura do solo a 2 m de profundidade	*K*
Evaporação potencial na superfície	*m*
Albedo na superfície	*Adimensional variando entre 0 e 1*
Componente zonal do vento no nível de 850 hPa	*m/s*
Componente zonal do vento no nível de 500 hPa	*m/s*
Componente zonal do vento no nível de 200 hPa	*m/s*

- Umidade integrada entre 1000 hPa e 850hPa;
- Saturação (temperatura do ar – temperatura do ponto de orvalho);
- Instabilidade estática [temperatura do ar (2m) – temperatura do ar (850 hPa)];
- Variação do vento com a altura (200 hPa – 500 hPa);
- Variação do vento com a altura (500 hP - 850 hPa).

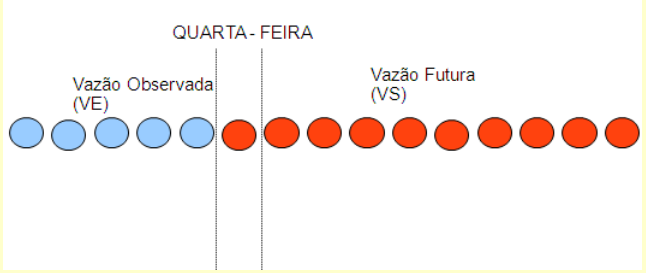
Projetos em andamento



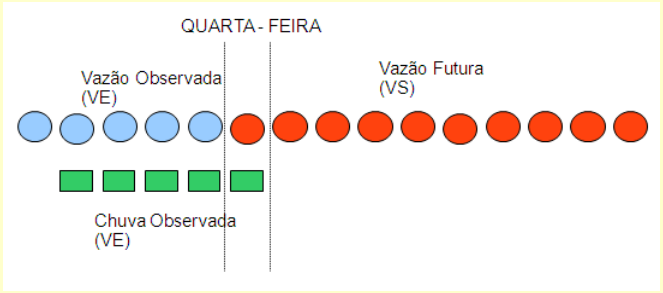
Projetos em andamento

Previsão de vazões utilizando técnicas de RN para a bacia do rio Grande

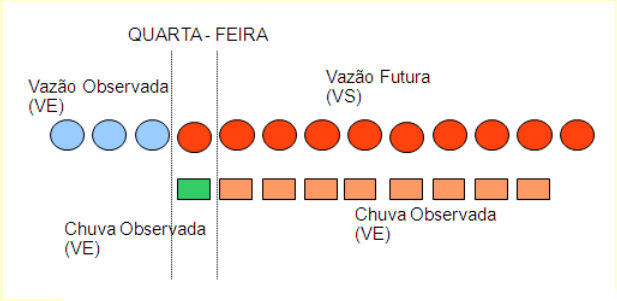
- Experimento 1



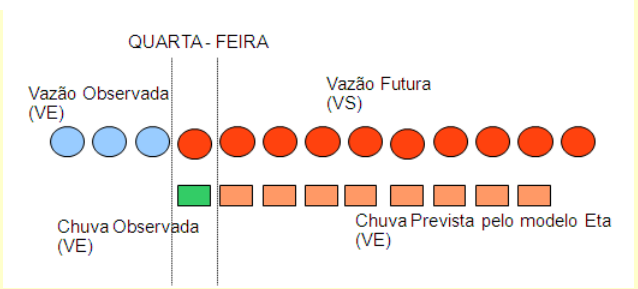
- Experimento 2

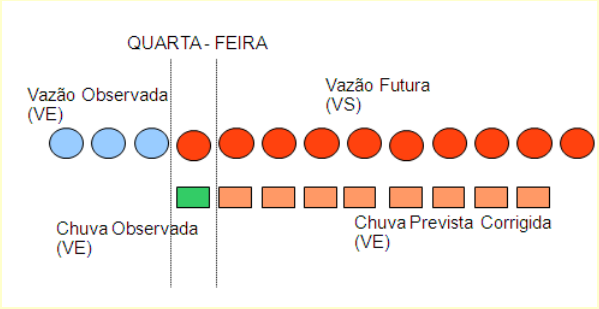


- Experimento 3A



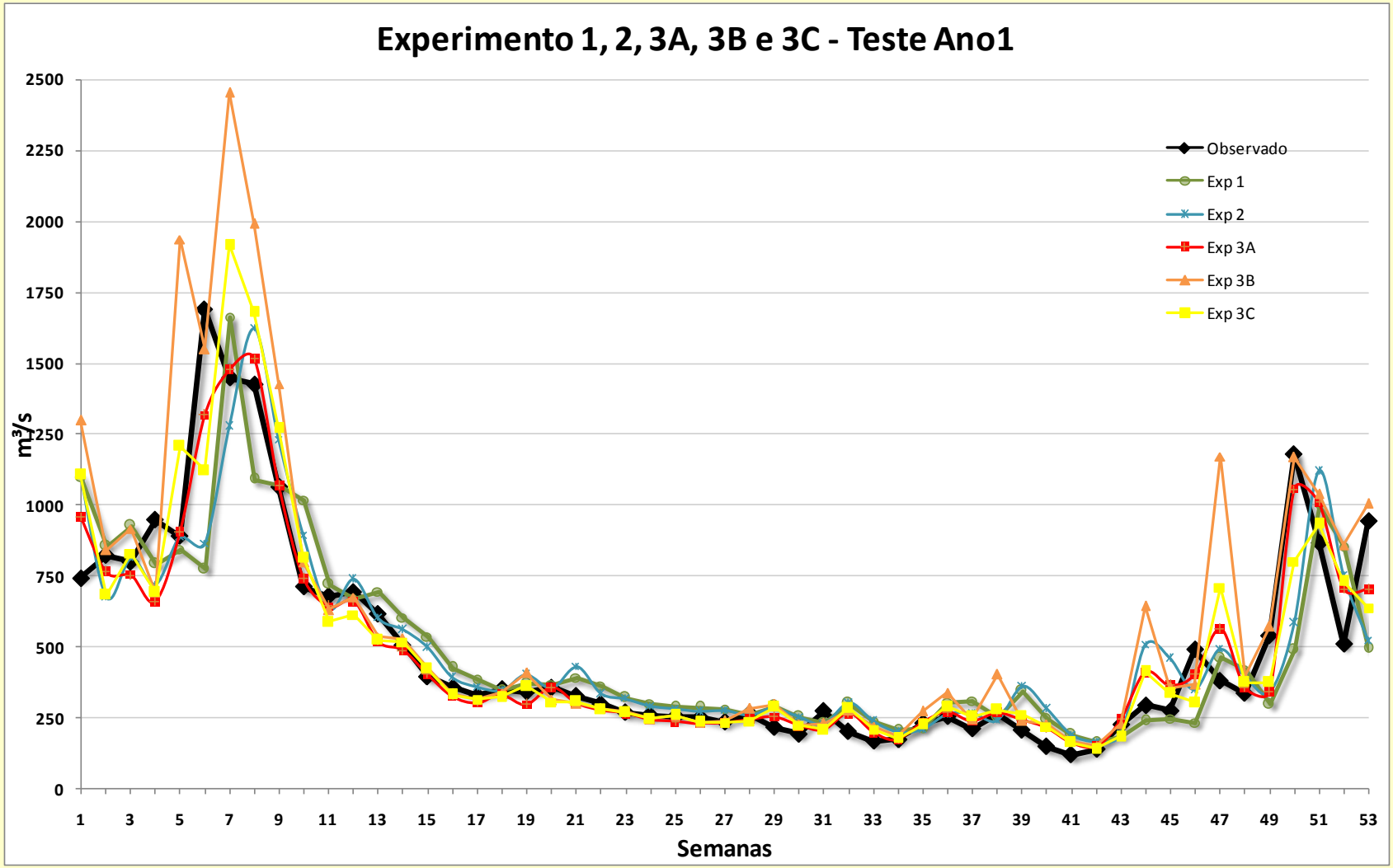
- Experimento 3B e 3C





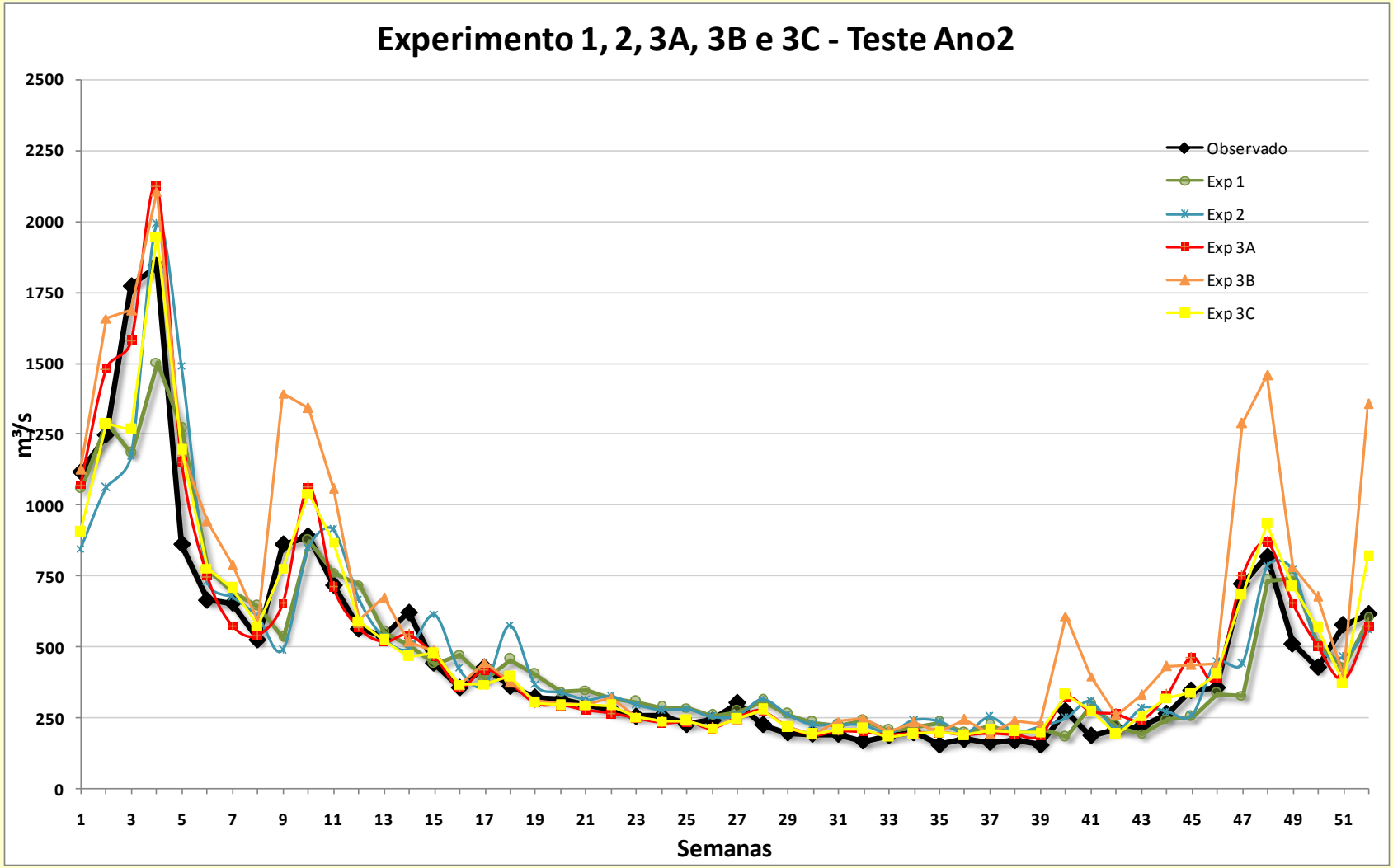
Projetos em andamento

Previsão de vazões utilizando técnicas de RN para a bacia do rio Grande



Projetos em andamento

Previsão de vazões utilizando técnicas de RN para a bacia do rio Grande



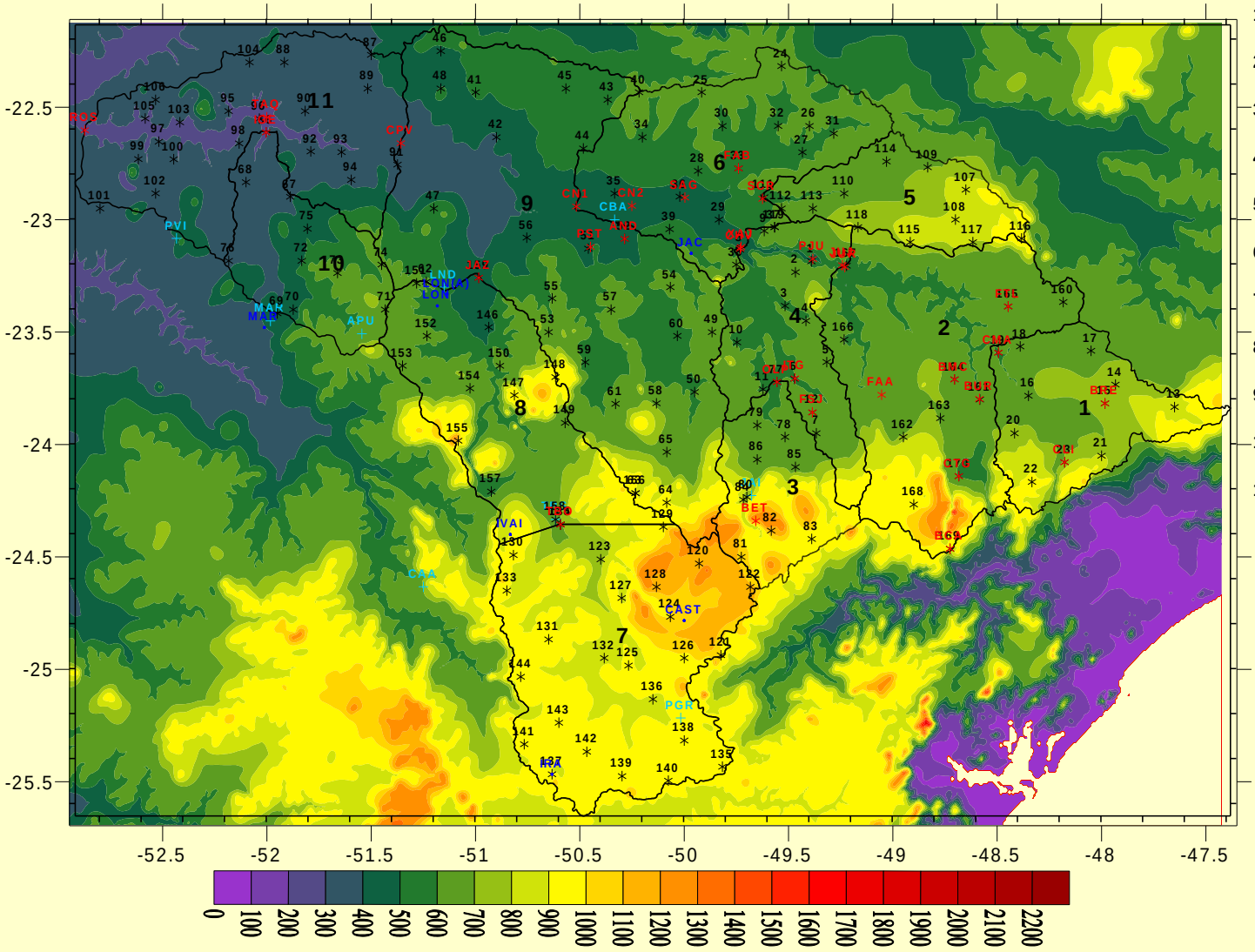
Projetos em andamento

Previsão de vazões utilizando técnicas de RN para a bacia do rio Grande

Erros relativos médios na semana operativa (%)			
	Treinamento	***Validação***	***Teste***
Experimento 1	20,6	28,8	***23,0***
Experimento 2	20,4	29,3	***23,1***
Experimento 3A	11,9	18,3	***13,3***
Experimento 3B	11,9	18,3	***28,5***
Experimento 3C	11,9	18,3	***17,2***

Projetos em andamento

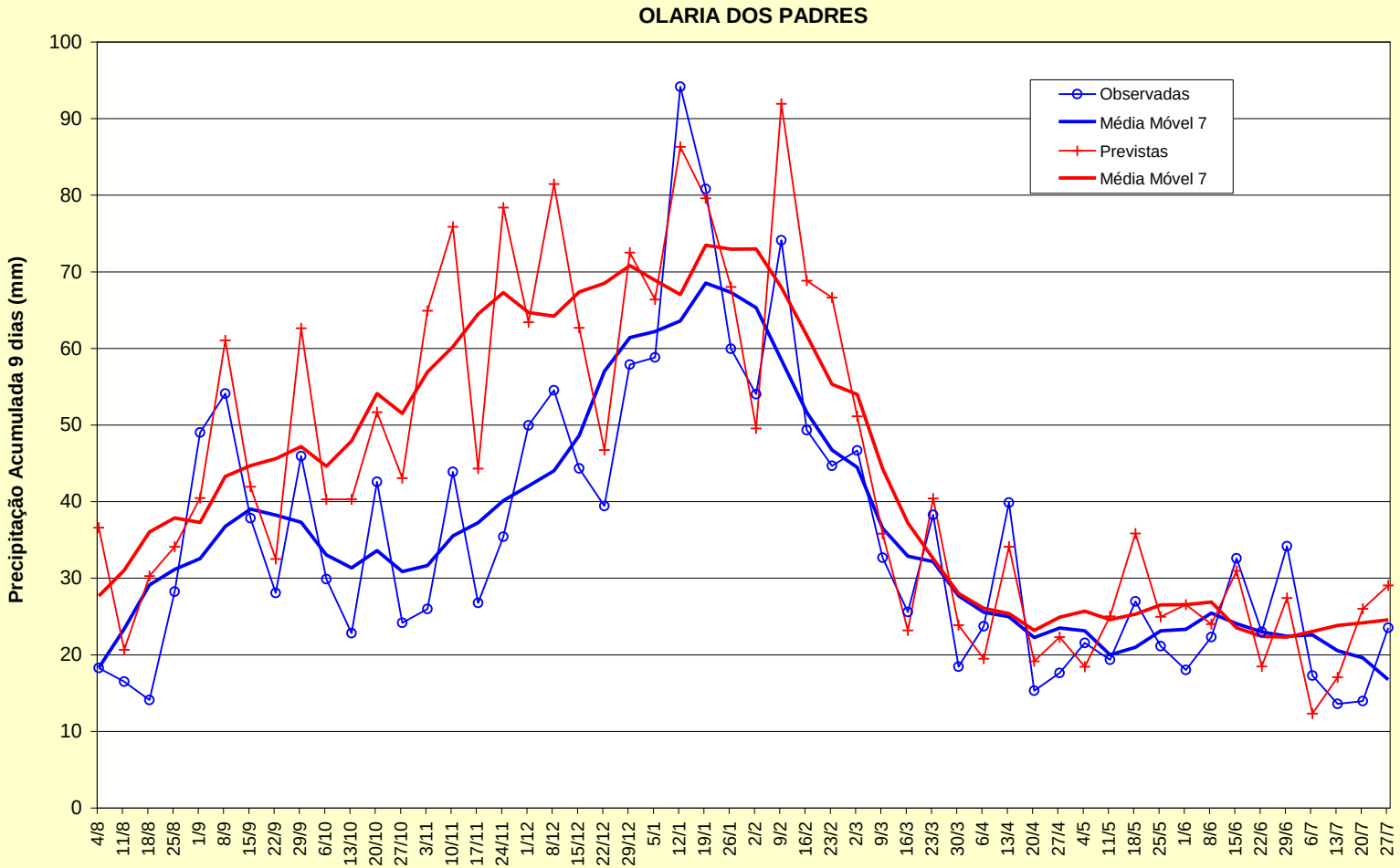
Correção de viés para a bacia do rio Paranapanema



Projetos em andamento

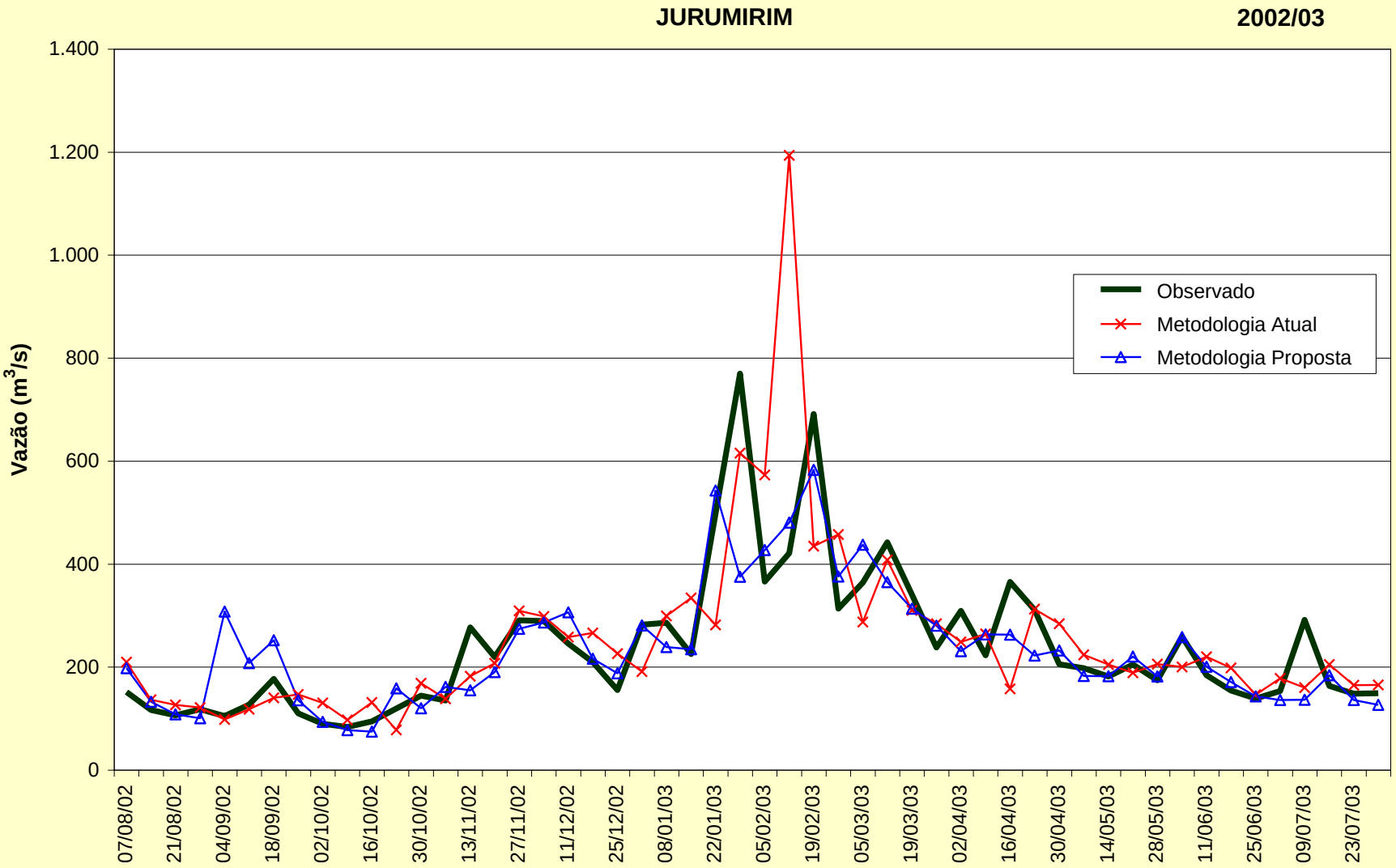
Correção de viés para a bacia do rio Paranapanema

Para esta bacia não foi observado um viés nas previsões de precipitação em todas as subbacias e nem em todos os períodos do ano



Projetos em andamento

Modelo Chuva-vazão para a bacia do rio Paranapanema



Discussões

- A previsões de precipitação do modelo ETA para um horizonte de 10 dias, mesmo sem a correção de viés, trouxeram melhorias nas previsões de vazão, em relação àquelas obtidas com modelos estocásticos "vazão-vazão", em todos os locais onde a metodologia chuva-vazão foi aplicada;

- No entanto, em algumas situações, para que estes resultados fossem melhores, houve a necessidade de se remover o viés da previsão de precipitação do modelo Eta;

- Esta remoção não pôde ser aplicada para todas as bacias do SIN, já que em alguns casos, ou em algumas épocas do ano, não foi observado nenhum tipo de erro sistemático;

Discussões

- As aplicações feitas pelo ONS dos resultados obtidos com as simulações do modelo Eta, sugerem a necessidade de se estabelecer determinados conjuntos de parâmetros para cada região do país, de modo a se criar previsões “regionais”;

- Tal necessidade se faz pelo fato do ONS utilizar esta previsão para todo o país, sabendo que os sistemas atmosféricos que ocasionam precipitação se diferem de uma região para outra;

- Outros pontos que poderiam ser investigados para a melhoria do desempenho das previsões chuva-vazão seriam, por exemplo, o aumento da resolução espacial horizontal, uma melhor representação do tipo e uso do solo e a previsão por conjuntos.