

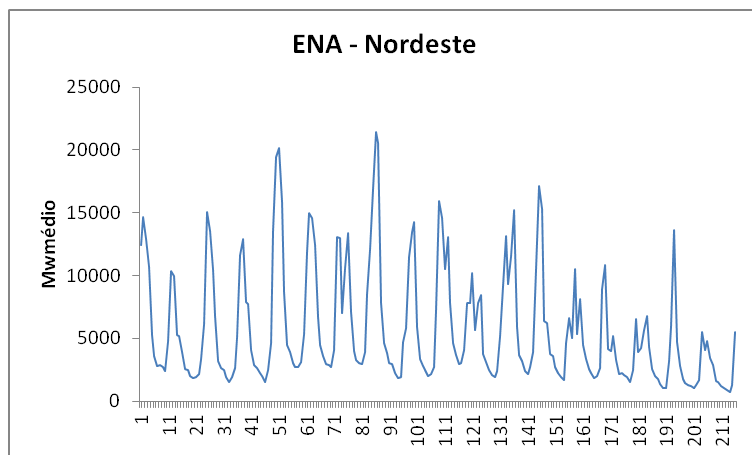


# MODELOS DE SIMULAÇÃO ESTOCÁSTICA DE CENÁRIOS DE VAZÃO COM INCORPORAÇÃO DE VARIÁVEIS CLIMÁTICAS

Paula Maçaira  
Fernando Cyrino

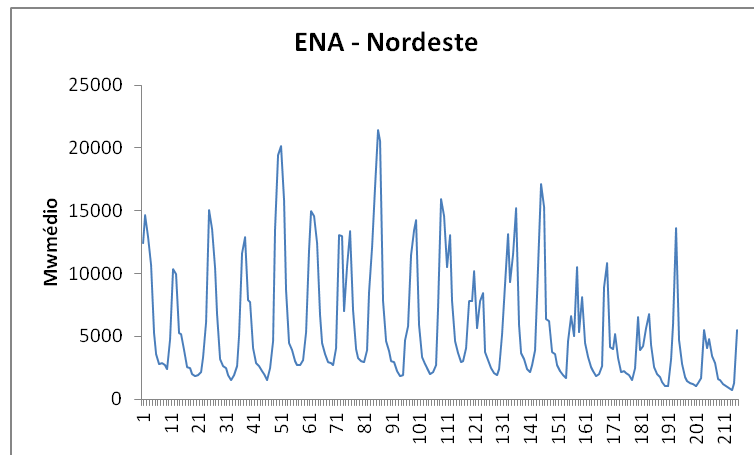
# MOTIVAÇÃO

- Relembrando...

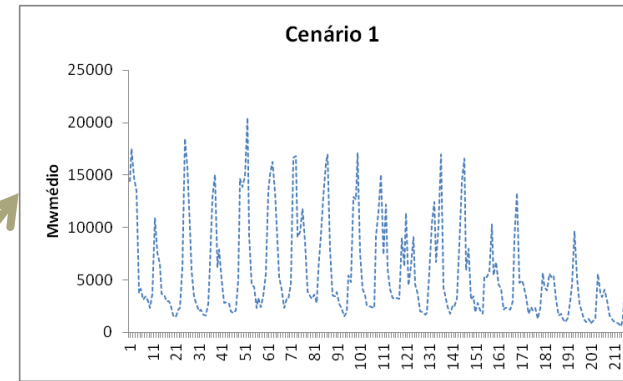


# MOTIVAÇÃO

- Relembrando...

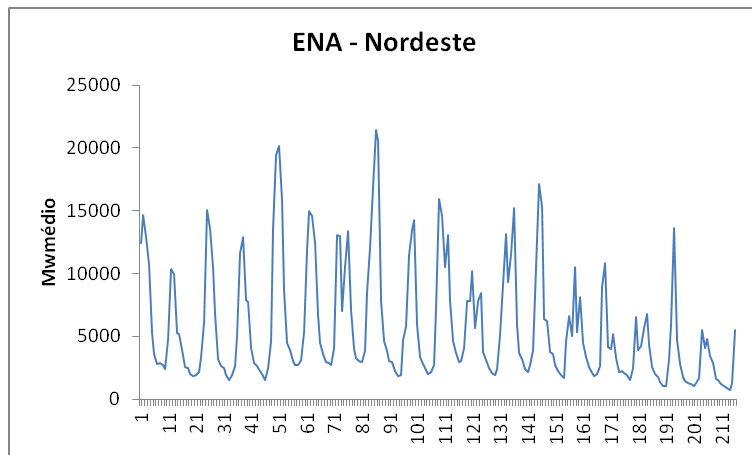


PAR(p)

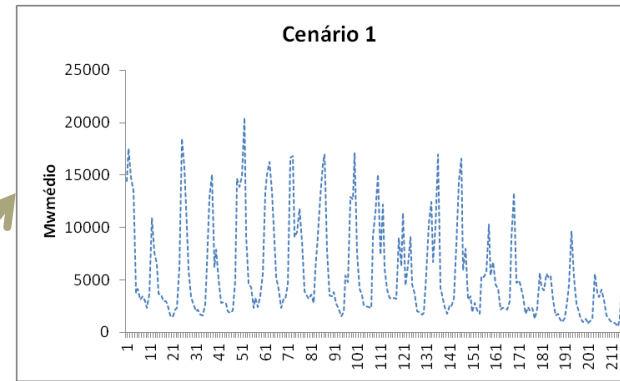


# MOTIVAÇÃO

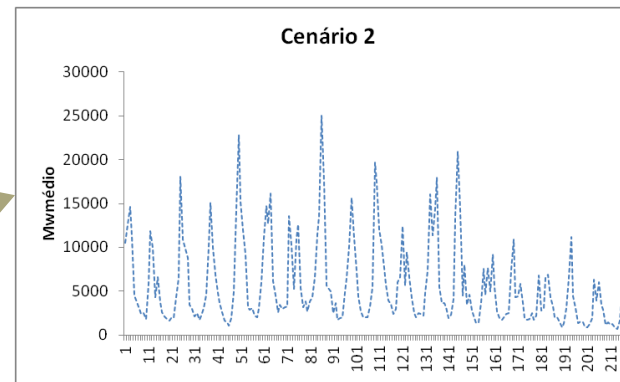
- Relembrando...



PAR(p)

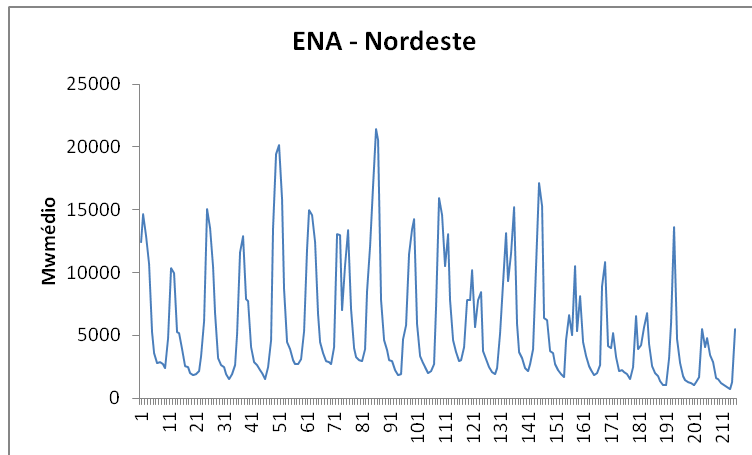


PAR(p)

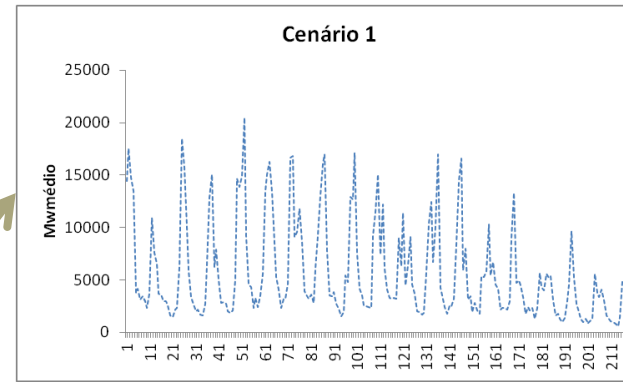


# MOTIVAÇÃO

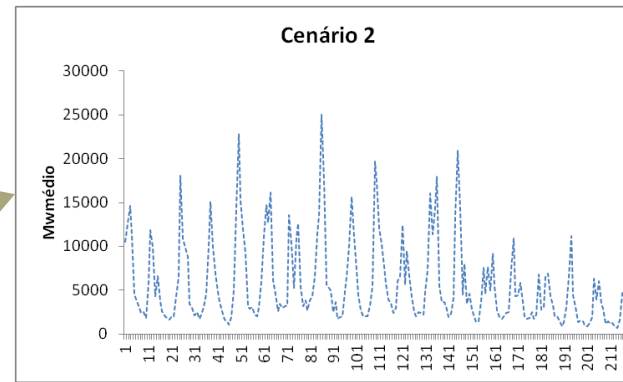
- Relembrando...



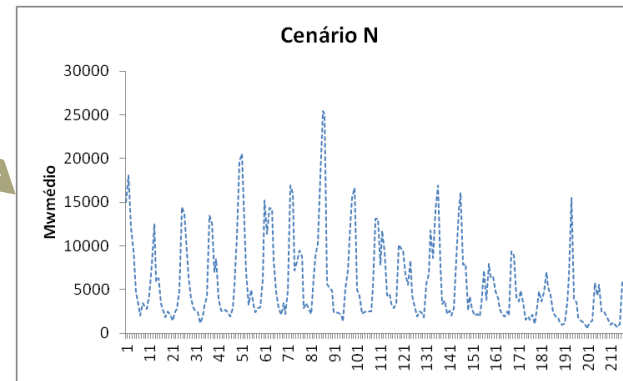
PAR(p)



PAR(p)



PAR(p)



# MOTIVAÇÃO



Mas será que nenhum fator externo influencia as séries hidrológicas (e de energia)?

# MOTIVAÇÃO



ELSEVIER

Journal of Hydrology 200 (1997) 24–39

Journal  
of  
**Hydrology**

## ENSO and the natural variability in the flow of tropical rivers

Kishan N. Amarasekera, Robert F. Lee, Earle R. Williams, Elfatih A.B. Eltahir\*

Stochastic Environmental Research and Risk Assessment 14 (2000) 123–138 © Springer-Verlag 2000

## El Niño influence on streamflow forecasting

J. Kelman, A. de M. Vieira, J. E. Rodriguez-Amaya

GLOBAL BIOGEOCHEMICAL CYCLES, VOL. 16, NO. 4, 1132, doi:10.1029/2002GB001872, 2002

## El Niño–Southern oscillation and the climate, ecosystems and rivers of Amazonia

Jonathan A. Foley, Aurélie Botta, and Michael T. Coe

Center for Sustainability and the Global Environment (SAGE), Gaylord Nelson Institute for Environmental Studies, University of Wisconsin-Madison, Madison, Wisconsin, USA

Marcos Heil Costa

Department of Agricultural and Environmental Engineering, Federal University of Viçosa, Viçosa, Brazil

Advances in Geosciences, 6, 189–193, 2006  
SRef-ID: 1680-7359/adgeo/2006-6-189  
European Geosciences Union  
© 2006 Author(s). This work is licensed  
under a Creative Commons License.



Advances in  
Geosciences



PUC  
RIO

## The relationship between ENSO and Paraná River flow

A. O. Cardoso and P. L. Silva Dias

Journal of Hydrology 380 (2010) 438–449



ELSEVIER

Contents lists available at ScienceDirect

Journal of Hydrology

journal homepage: [www.elsevier.com/locate/jhydrol](http://www.elsevier.com/locate/jhydrol)



## Climate informed monthly streamflow forecasts for the Brazilian hydropower network using a periodic ridge regression model

Carlos H.R. Lima\*, Upmanu Lall

Journal of Hydrology 519 (2014) 1130–1140



ELSEVIER

Contents lists available at ScienceDirect

Journal of Hydrology

journal homepage: [www.elsevier.com/locate/jhydrol](http://www.elsevier.com/locate/jhydrol)



## Forecasts of seasonal streamflow in West-Central Florida using multiple climate predictors

Susan L. Risko, Christopher J. Martinez\*



# MOTIVAÇÃO



Alguns autores também identificaram que um pré-processamento também é benéfico para a modelagem das séries hidrológicas



# MOTIVAÇÃO

HYDROLOGICAL PROCESSES  
*Hydrol. Process.* **22**, 4877–4891 (2008)  
Published online 10 September 2008 in Wiley InterScience  
(www.interscience.wiley.com) DOI: 10.1002/hyp.7107

## River flow forecasting using wavelet and cross-wavelet transform models

Jan F. Adamowski\*



ELSEVIER

Available online at [www.sciencedirect.com](http://www.sciencedirect.com)



Physics and Chemistry of the Earth 31 (2006) 1172–1179

PHYSICS  
and CHEMISTRY  
of the EARTH

[www.elsevier.com/locate/pce](http://www.elsevier.com/locate/pce)

## Singular spectrum analysis and forecasting of hydrological time series

C.A.F. Marques\*, J.A. Ferreira, A. Rocha, J.M. Castanheira,  
P. Melo-Gonçalves, N. Vaz, J.M. Dias



ELSEVIER

Available online at [www.sciencedirect.com](http://www.sciencedirect.com)



Journal of Hydrology 324 (2006) 383–399

Journal  
of  
Hydrology

[www.elsevier.com/locate/jhydrol](http://www.elsevier.com/locate/jhydrol)

## Forecasting daily streamflow using hybrid ANN models

Wen Wang<sup>a,b,\*</sup>, Pieter H.A.J.M. Van Gelder<sup>b</sup>, J.K. Vrijling<sup>b</sup>, Jun Ma<sup>c</sup>

WATER RESOURCES RESEARCH, VOL. 45, W08432, doi:10.1029/2007WR006737, 2009

## Predicting monthly streamflow using data-driven models coupled with data-preprocessing techniques

C. L. Wu,<sup>1</sup> K. W. Chau,<sup>1</sup> and Y. S. Li<sup>1</sup>

Journal of Hydrology 530 (2015) 137–152



ELSEVIER

Contents lists available at ScienceDirect

Journal of Hydrology

journal homepage: [www.elsevier.com/locate/jhydrol](http://www.elsevier.com/locate/jhydrol)



Are hybrid models integrated with data preprocessing techniques suitable for monthly streamflow forecasting? Some experiment evidences

Xiaoli Zhang, Yong Peng\*, Chi Zhang, Bende Wang



# OBJETIVO



Propor uma nova abordagem metodológica para a geração de séries sintéticas que seja capaz de capturar as características particulares das séries de vazão e também incorporar variáveis climáticas

# METODOLOGIA

Métodos de  
Séries  
Temporais

PAR(p)

PARX

GAM

Métodos de  
Decomposição

SSA

MSSA

Modelos  
Híbridos

SSA+PAR(p)

MSSA+PAR(p)

SSA+PARX

SSA+GAM

# METODOLOGIA

- PAR(p) → já foi apresentado anteriormente



# METODOLOGIA

- PAR(p) → já foi apresentado anteriormente
- PAR with one exogenous variable (PARX)

$$\left( \frac{z_{(t,m)} - \mu_m}{\sigma_m} \right) = \sum_{i=1}^{p_m} \varphi_i^{(m)} \left( \frac{z_{(t,m-i)} - \mu_{m-i}}{\sigma_{m-i}} \right) + \sum_{j=1}^{v_m} \theta_j^{(m)} x_{(t,m-j)} + a_{t,m}$$

# METODOLOGIA

- PAR(p) → já foi apresentado anteriormente
- PAR with one exogenous variable (PARX)

$$\left( \frac{z_{(t,m)} - \mu_m}{\sigma_m} \right) = \sum_{i=1}^{p_m} \varphi_i^{(m)} \left( \frac{z_{(t,m-i)} - \mu_{m-i}}{\sigma_{m-i}} \right) + \sum_{j=1}^{v_m} \theta_j^{(m)} x_{(t,m-j)} + a_{t,m}$$

# METODOLOGIA

- PAR(p) → já foi apresentado anteriormente
- PAR with one exogenous variable (PARX)

$$\left( \frac{z_{(t,m)} - \mu_m}{\sigma_m} \right) = \sum_{i=1}^{p_m} \varphi_i^{(m)} \left( \frac{z_{(t,m-i)} - \mu_{m-i}}{\sigma_{m-i}} \right) + \sum_{j=1}^{v_m} \theta_j^{(m)} x_{(t,m-j)} + a_{t,m}$$

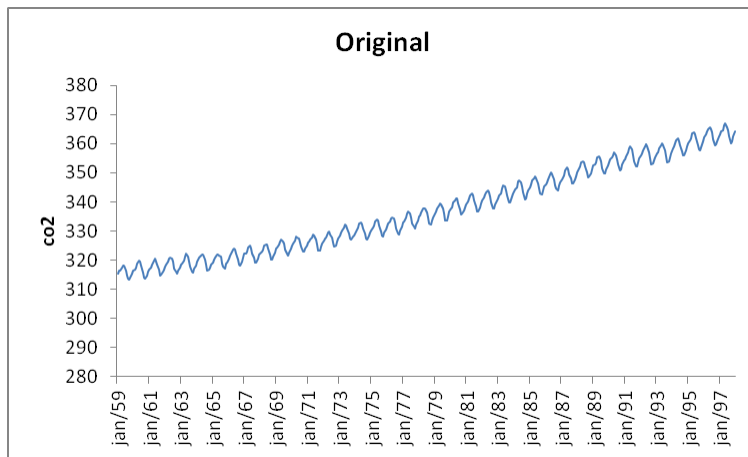
- Generalized Additive Model (GAM)

$$g[E(Y|X_1, \dots, X_p)] = \alpha + f_1(X_1) + \dots + f_p(X_p)$$

# METODOLOGIA



- Singular Spectrum Analysis (SSA)

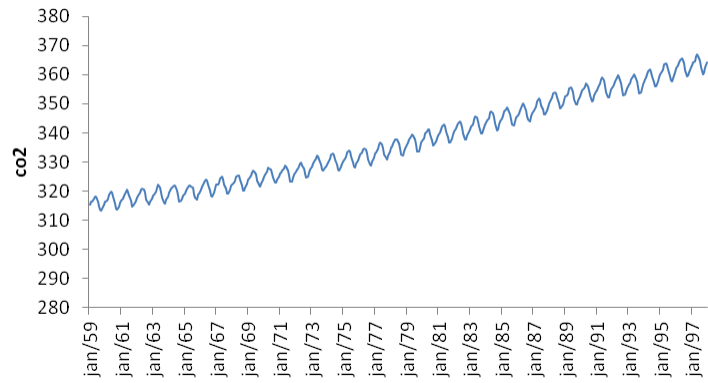




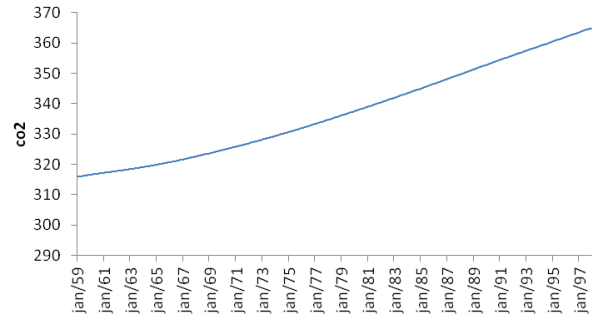
# METODOLOGIA

- Singular Spectrum Analysis (SSA)

Original



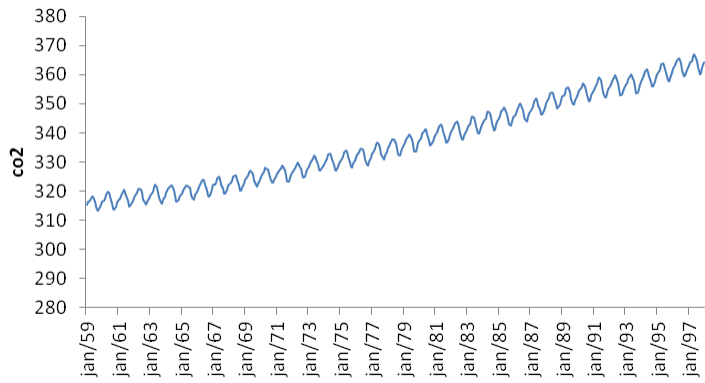
Componente 1



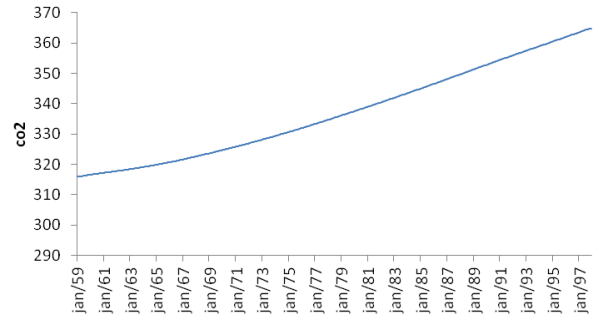
# METODOLOGIA

- Singular Spectrum Analysis (SSA)

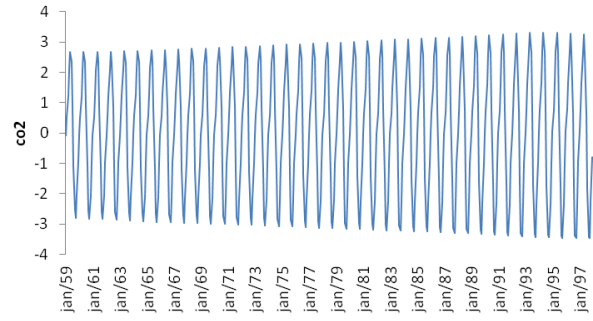
Original



Componente 1



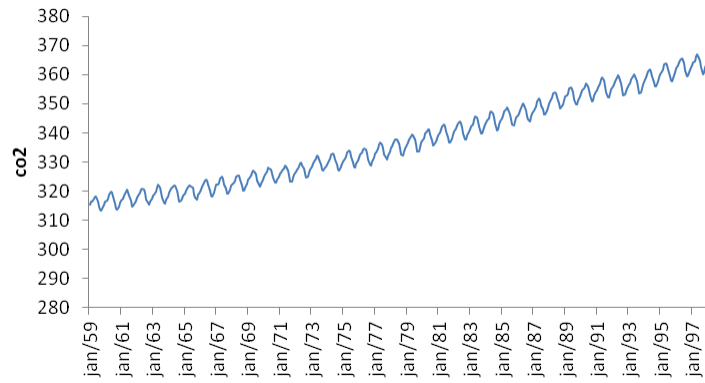
Componente 2



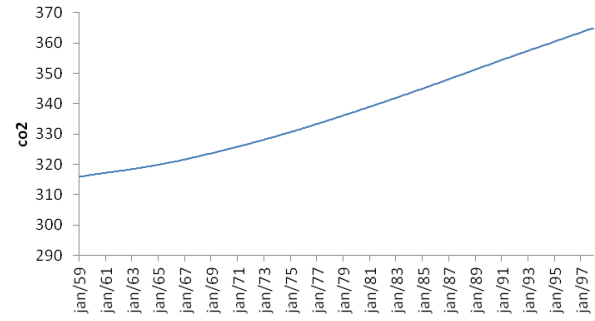
# METODOLOGIA

- Singular Spectrum Analysis (SSA)

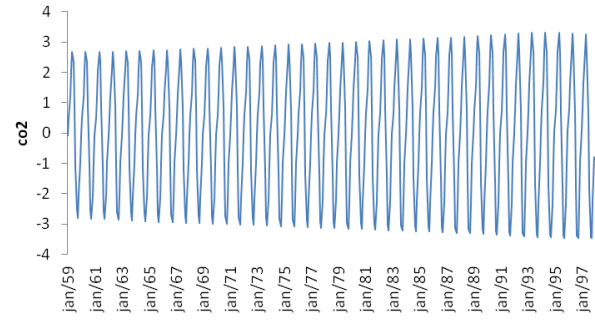
Original



Componente 1

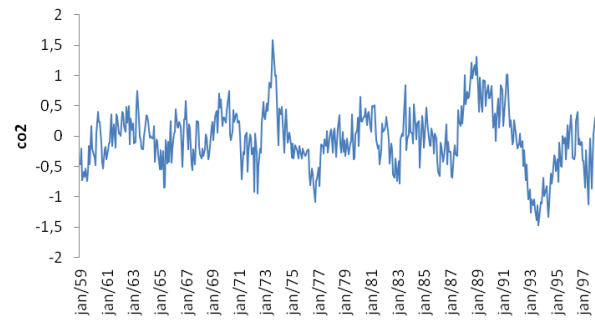


Componente 2



•  
•  
•

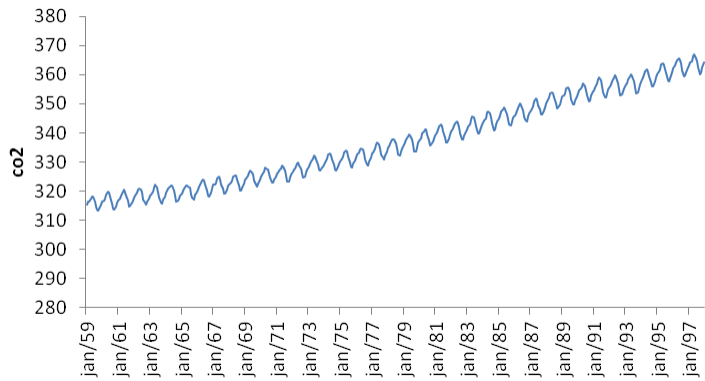
Componente K



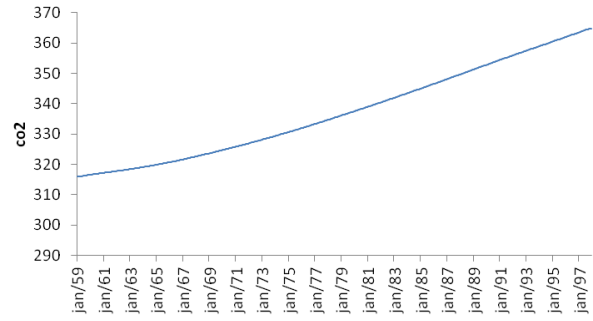
# METODOLOGIA

- Singular Spectrum Analysis (SSA)

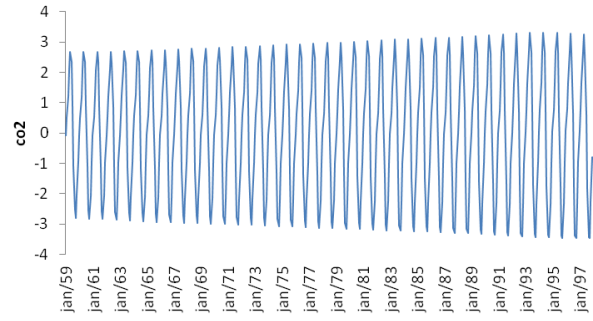
Original



Componente 1

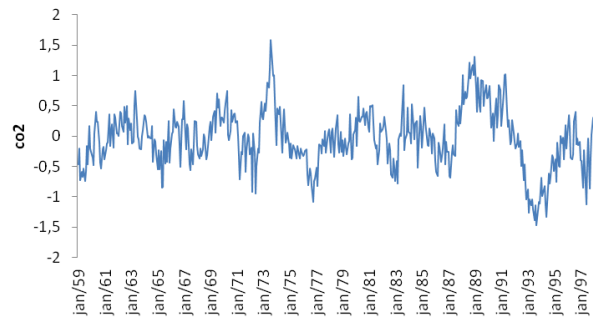


Componente 2



•  
•  
•

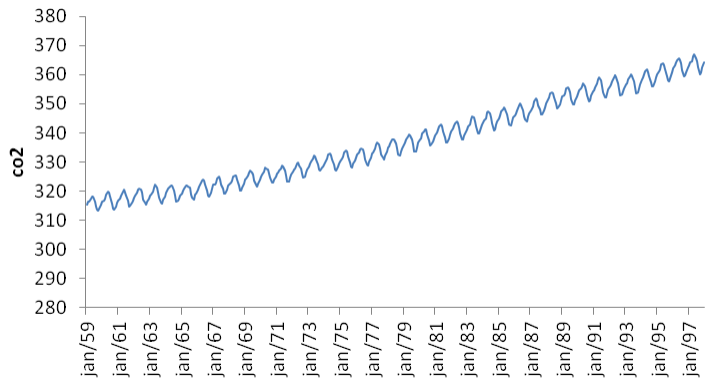
Componente K



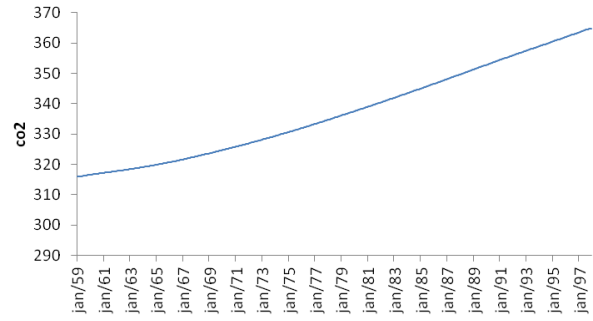
# METODOLOGIA

- Singular Spectrum Analysis (SSA)

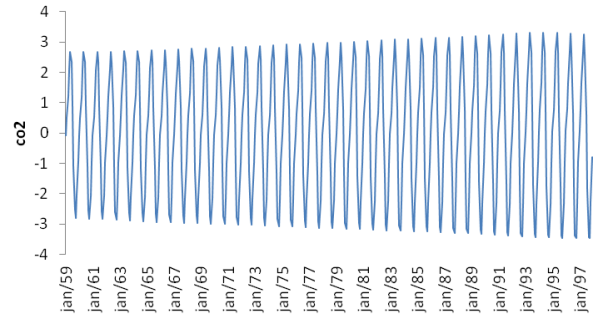
Original



Componente 1

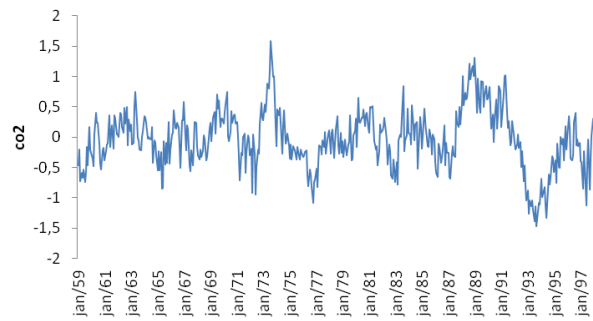


Componente 2



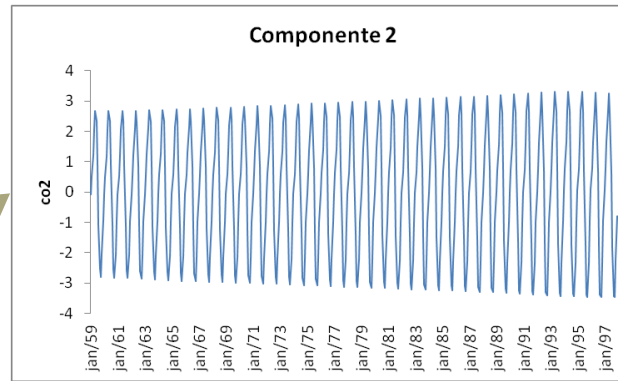
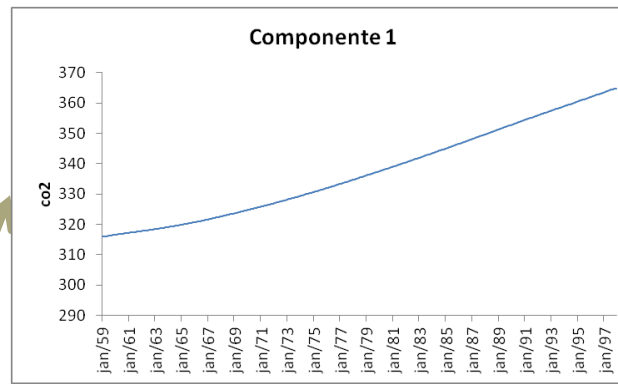
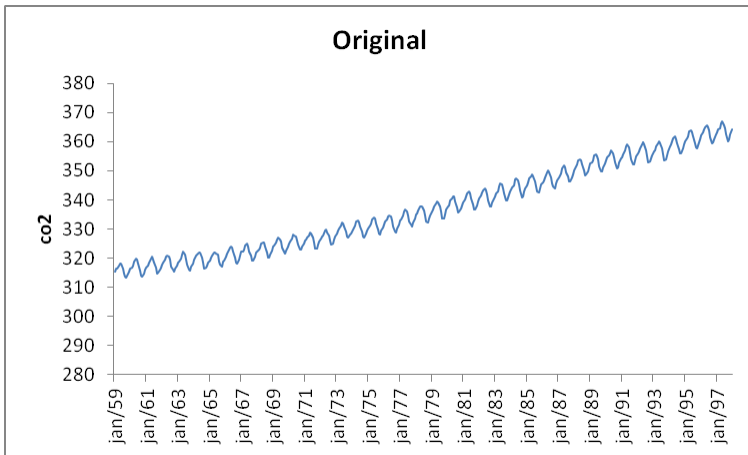
•  
•  
•

Componente K

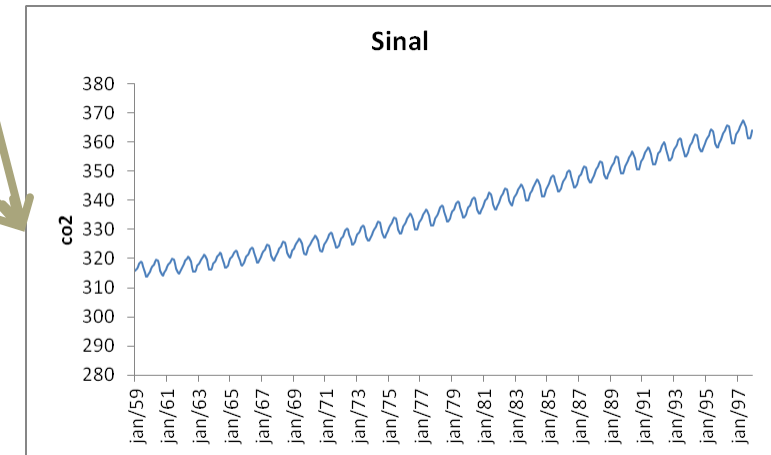
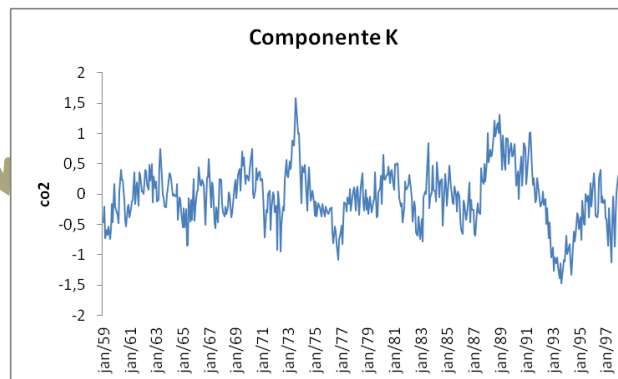


# METODOLOGIA

- Singular Spectrum Analysis (SSA)

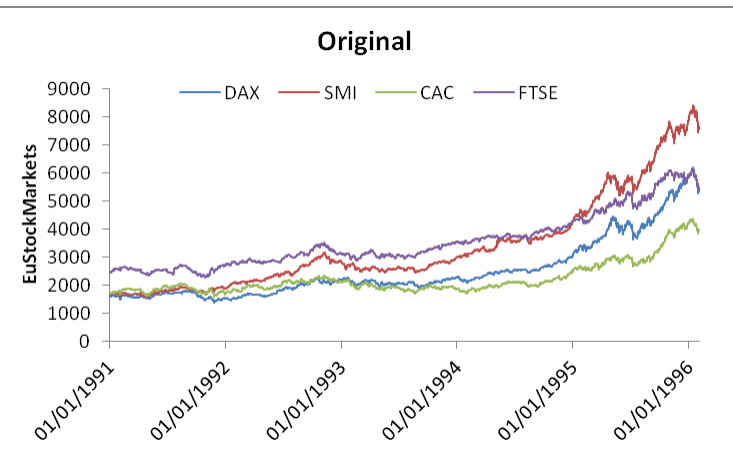


•  
•  
•



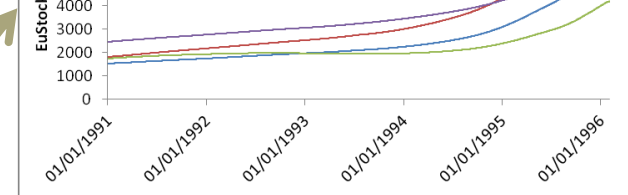
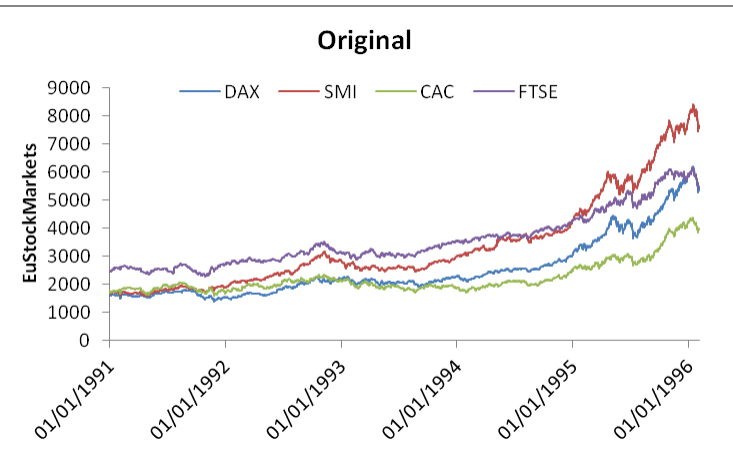
# METODOLOGIA

- Multichannel-Singular Spectrum Analysis (MSSA)



# METODOLOGIA

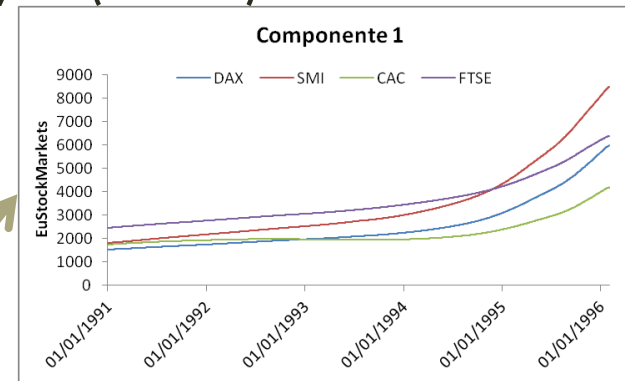
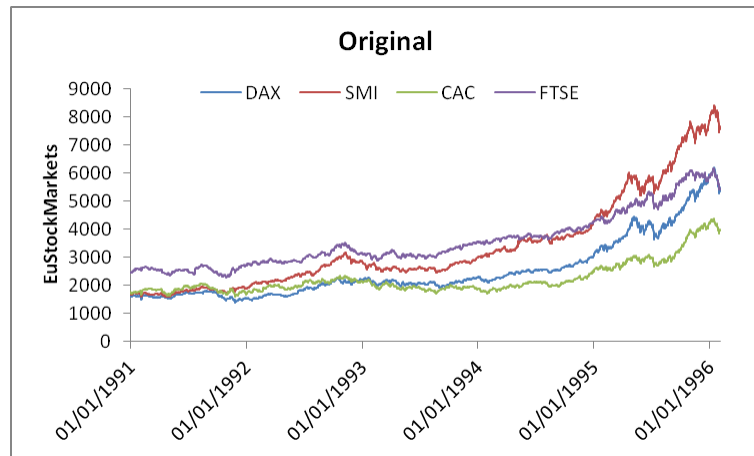
- Multichannel-Singular Spectrum Analysis (MSSA)



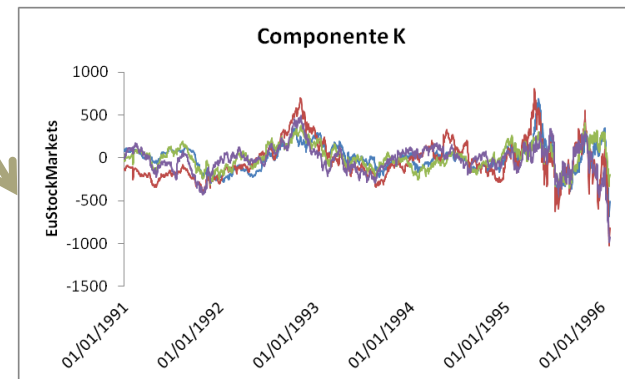


# METODOLOGIA

- Multichannel-Singular Spectrum Analysis (MSSA)



•  
•  
•



# ANÁLISE DESCRITIVA DOS DADOS



- A ENA é uma transformação de água em energia e depende da configuração do sistema;

## Problema

- Pode ocultar correlações existentes com as variáveis climáticas

## Solução

- Utilizar as séries de vazão natural

# ANÁLISE DESCRITIVA DOS DADOS

## Bacias Hidrográficas

Amazonas	
Atlântico NE Ocidental	
Atlântico NE Oriental	
Parnaíba	
Tocantins-Araguaia	
São Francisco	
Atlântico Leste	
Atlântico Sudeste	
Atlântico Sul	
Paraguai	
Paraná	
Uruguai	

Código de cores das usinas



- 12 grandes bacias
- 163 geradores
  - 70 com reservatório
  - 89 a fio d'água
  - 4 com bombeamento
- 5 geradores entrarão em operação até 2021
- Total de 103 MW de capacidade de geração
- Bacia do Paraná → 42 MW (41%)

# ANÁLISE DESCRITIVA DOS DADOS

Número	Bacia	Capacidade Instalada [MW]	% do Total
1	Paranaíba	8.34	8.07%
2	Grande	6.52	6.30%
3	Tietê	5.88	5.69%
4	Paraná	14.00	13.54%
5	Paranapanema	4.22	4.08%
6	Iguaçu	4.35	4.21%
7	Paraguai	0.66	0.64%
8	Uruguai	5.75	5.56%
9	Atlântico Sul	1.51	1.47%
10	Atlântico Sudeste	3.79	3.67%
11	Atlântico Leste	1.08	1.05%
12	São Francisco	10.56	10.21%
13	Parnaíba	0.24	0.23%
14	Tocantins-Araguaia	12.83	12.41%
15	Amazonas	23.64	22.87%
Total		103.36	100%

• Bacia do Paraná foi separada em outras seis bacias:

- Paranaíba
- Grande
- Tietê
- Paraná
- Paranapanema
- Iguaçu

# ANÁLISE DESCRITIVA DOS DADOS

- Após pesquisa na literatura...

## Variáveis Climáticas

Precipitação

El Niño Southern Oscillation (ENSO)

SOI

Equatorial  
SOI

Niño 1+2

Niño 3

Niño 4

Niño 3.4

ONI

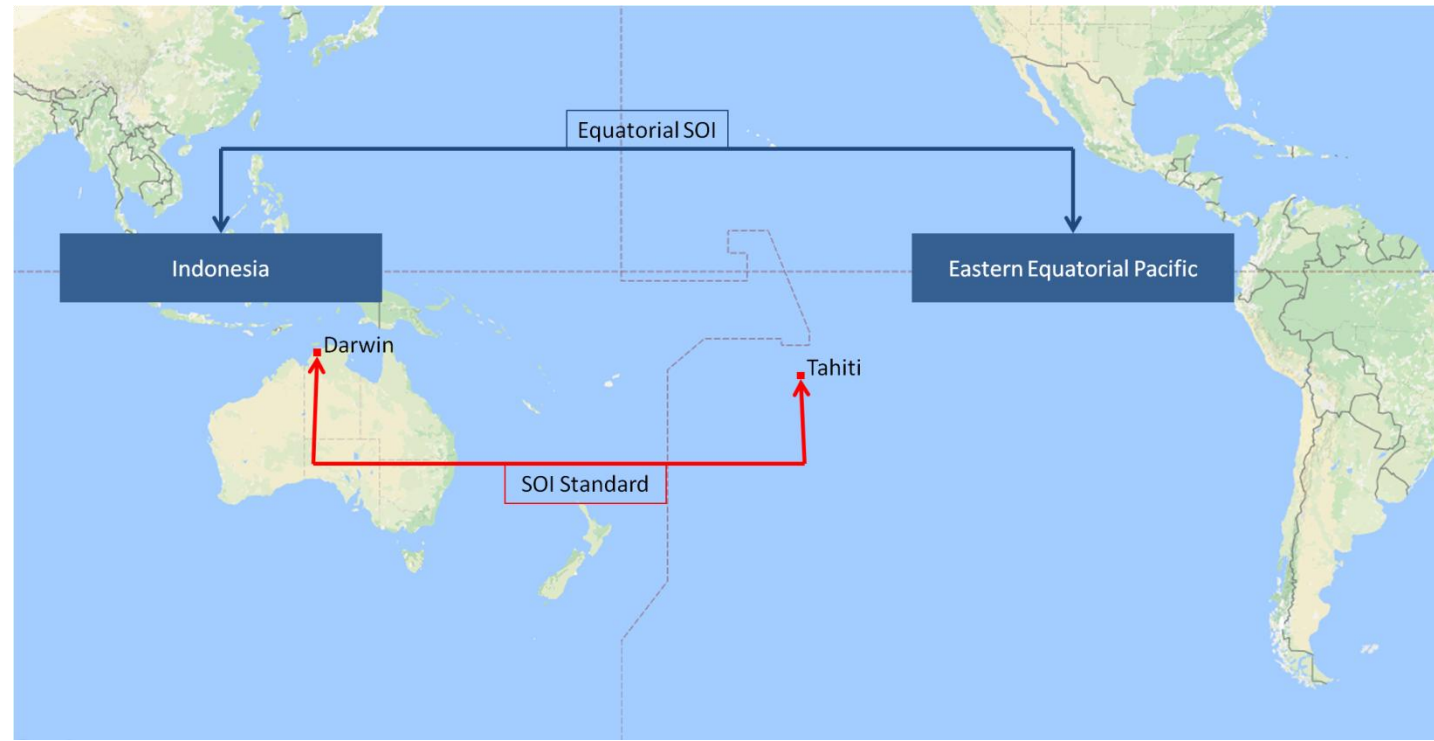
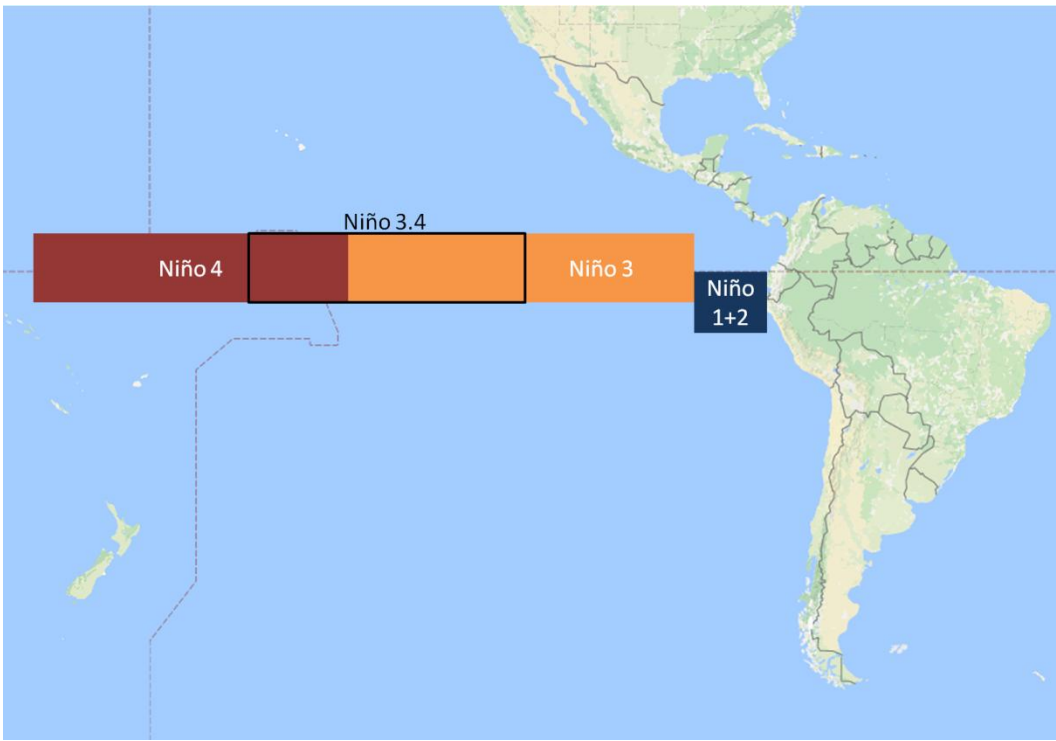
# ANÁLISE DESCRITIVA DOS DADOS

- Precipitação → taxa de precipitação total média na área de cada bacia
  - Referência: Climate Forecast System Reanalysis (CFSR), NASA



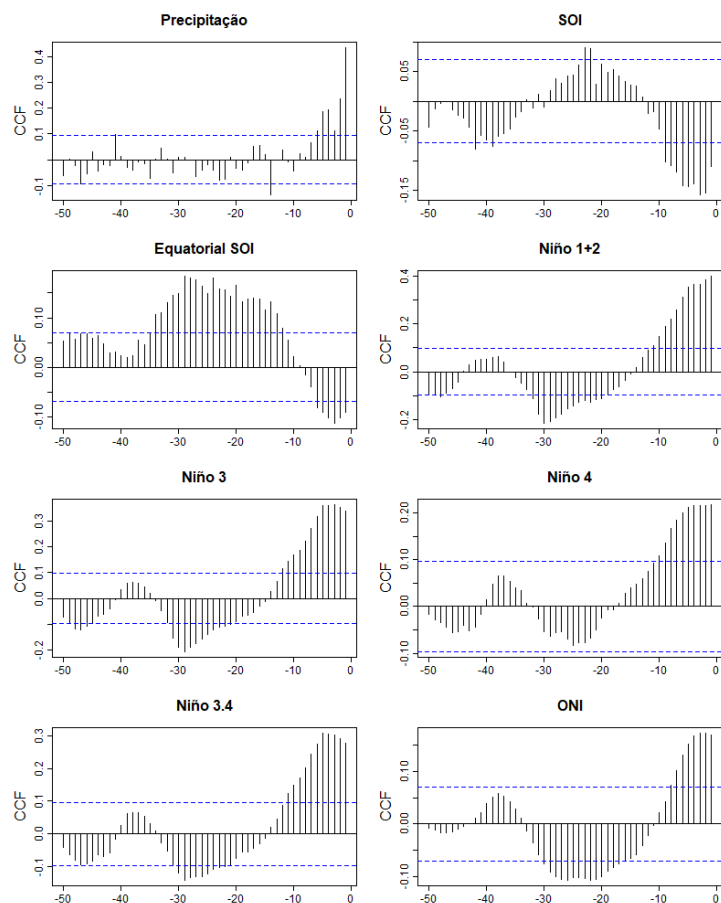
# ANÁLISE DESCRITIVA DOS DADOS

- El Niño Southern Oscillation (ENSO)



# ANÁLISE DESCRITIVA DOS DADOS

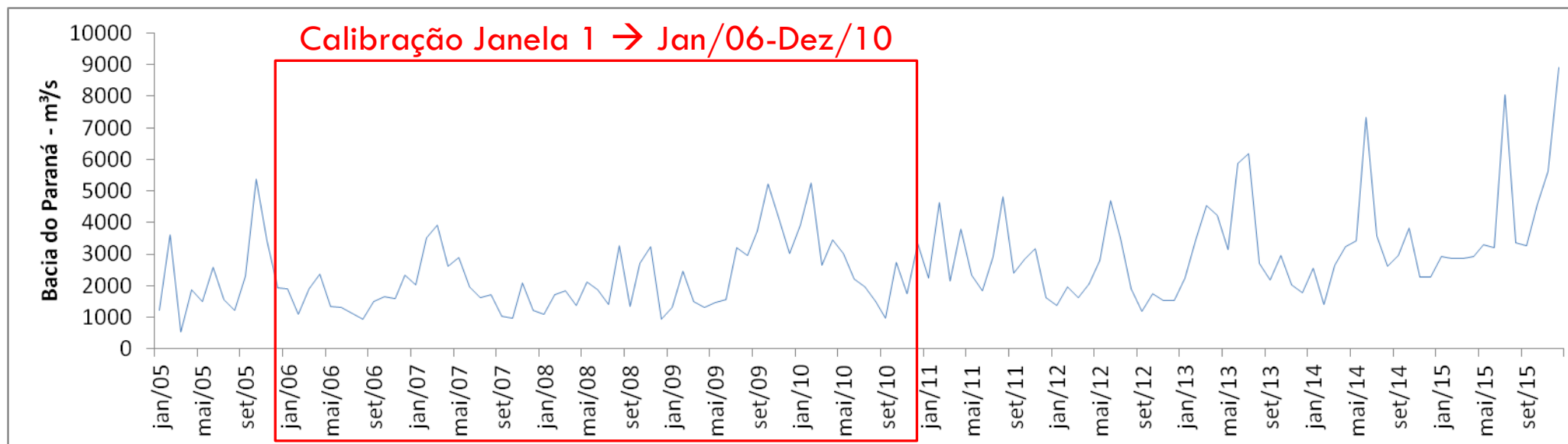
- Análise das correlações cruzadas entre as vazões mensais de cada bacia e cada variável climática...



Bacia	Variável Climática							
	Prec.	SOI	Eq. SOI	Niño 1+2	Niño 3	Niño 4	Niño 3.4	ONI
Paranaíba	X	X	X					X
Grande	X	X						
Tietê	X		X					
Paraná	X	X	X	X	X	X	X	X
Parapanema	X	X	X	X	X		X	X
Iguaçu	X	X	X	X	X	X	X	X
Paraguai	X	X	X					
Uruguai	X	X	X	X	X	X	X	X
Atlântico Sul	X	X	X	X	X	X	X	X
Atlântico Sudeste	X	X	X					
Atlântico Leste	X	X	X					X
São Francisco	X	X	X		X	X	X	X
Parnaíba	X		X	X	X	X	X	
Tocantins-Araguaia	X							
Amazonas	X							

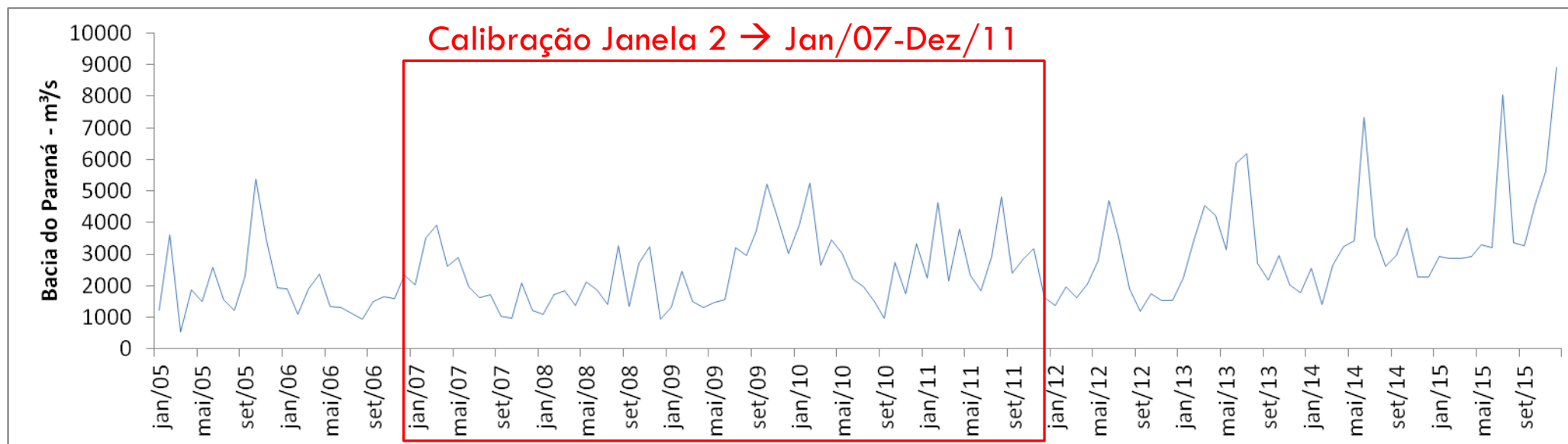


# RESULTADOS ALCANÇADOS



- Treinamento Janela 1 → Jan/31-Dez/2005
- Utilizada somente para otimização dos parâmetros no SSA e MSSA;

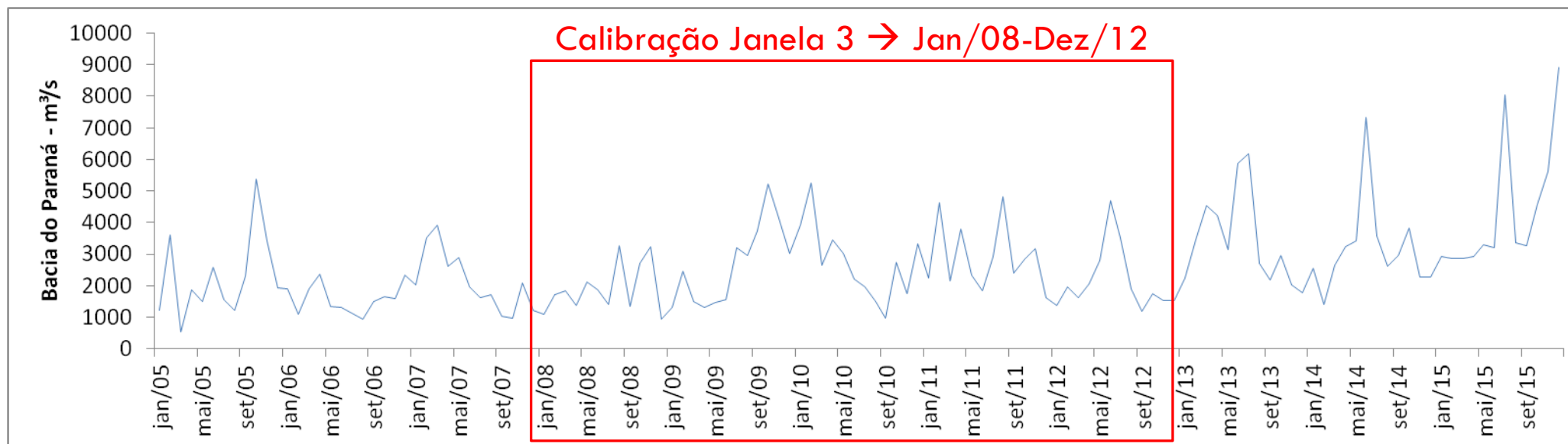
# RESULTADOS ALCANÇADOS



- Treinamento Janela 2 → Jan/31-Dez/2006
- Janelas 2 a 6 utilizadas para o cálculo das métricas de erro MSRE, MARE e NSC.

$$MSRE = \frac{1}{T} \sum_{t=1}^T \left( \frac{f_t - y_t}{y_t} \right)^2 \quad MARE = \frac{1}{T} \sum_{t=1}^T \left| \frac{f_t - y_t}{y_t} \right| \quad NSC = 1 - \frac{\sum_{t=1}^T (f_t - y_t)^2}{\sum_{t=1}^T (f_t - \bar{y})^2}$$

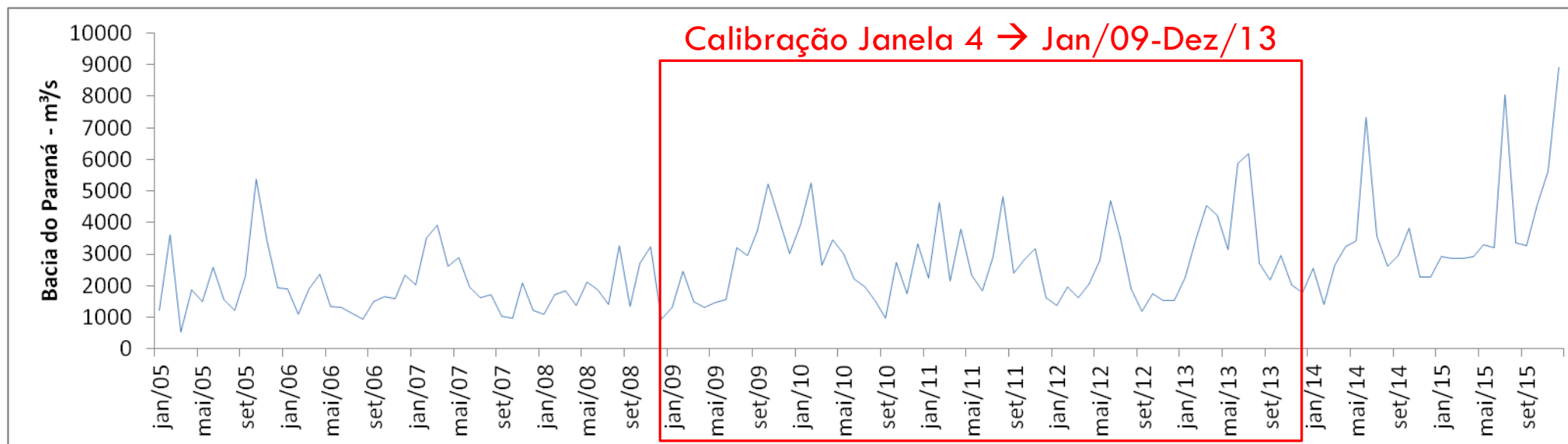
# RESULTADOS ALCANÇADOS



- Treinamento Janela 3 → Jan/31-Dez/2007
- Janelas 2 a 6 utilizadas para o cálculo das métricas de erro MSRE, MARE e NSC.

$$MSRE = \frac{1}{T} \sum_{t=1}^T \left( \frac{f_t - y_t}{y_t} \right)^2 \quad MARE = \frac{1}{T} \sum_{t=1}^T \left| \frac{f_t - y_t}{y_t} \right| \quad NSC = 1 - \frac{\sum_{t=1}^T (f_t - y_t)^2}{\sum_{t=1}^T (f_t - \bar{y})^2}$$

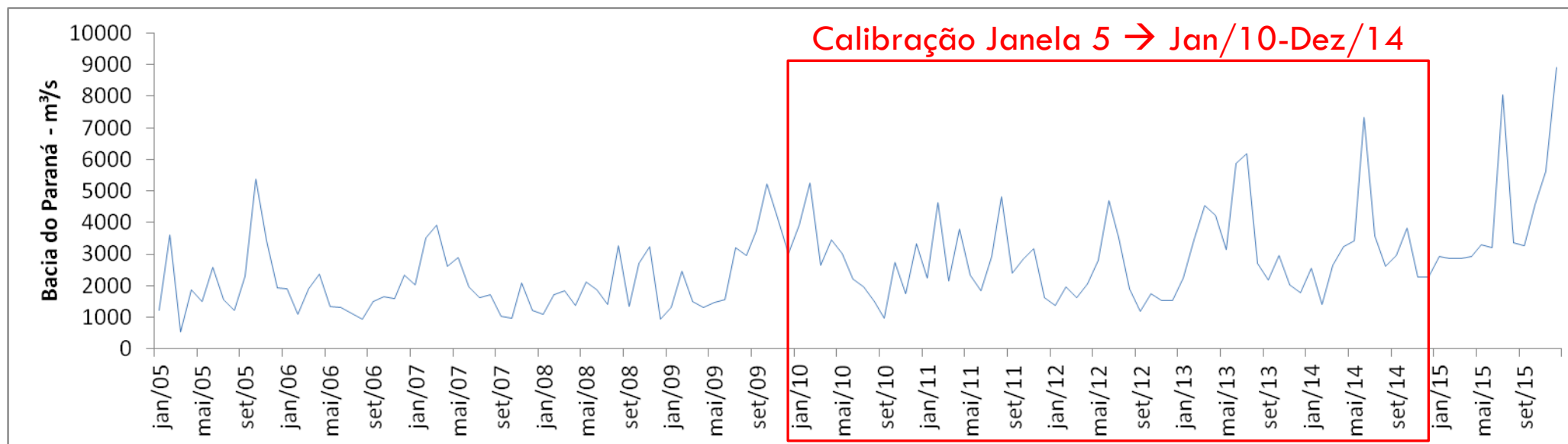
# RESULTADOS ALCANÇADOS



- Treinamento Janela 4 → Jan/31-Dez/2008
- Janelas 2 a 6 utilizadas para o cálculo das métricas de erro MSRE, MARE e NSC.

$$MSRE = \frac{1}{T} \sum_{t=1}^T \left( \frac{f_t - y_t}{y_t} \right)^2 \quad MARE = \frac{1}{T} \sum_{t=1}^T \left| \frac{f_t - y_t}{y_t} \right| \quad NSC = 1 - \frac{\sum_{t=1}^T (f_t - y_t)^2}{\sum_{t=1}^T (f_t - \bar{y})^2}$$

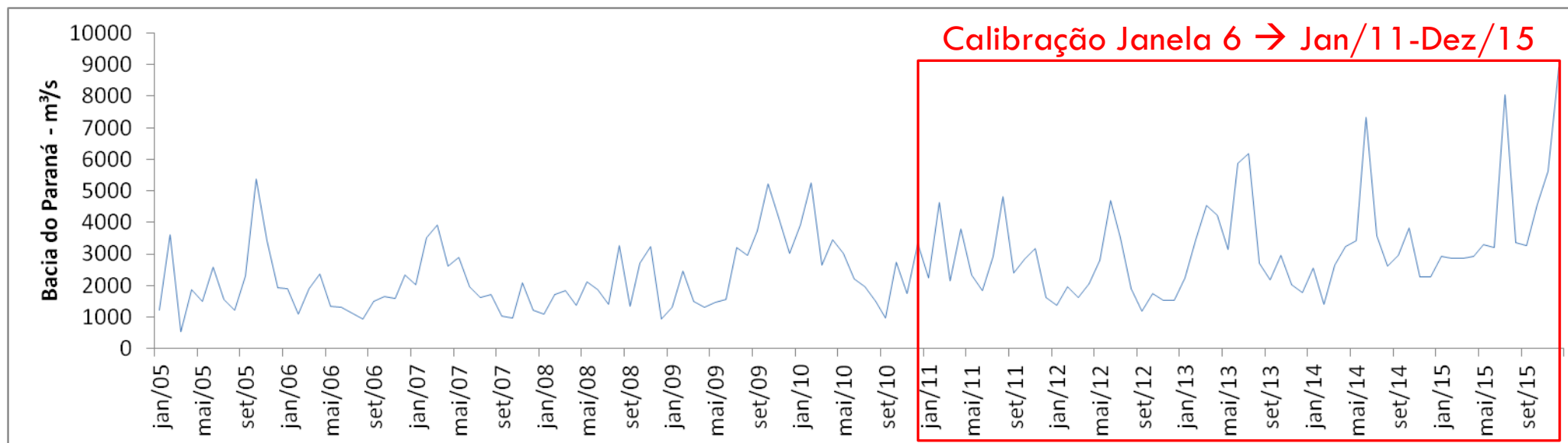
# RESULTADOS ALCANÇADOS



- Treinamento Janela 5 → Jan/31-Dez/2009
- Janelas 2 a 6 utilizadas para o cálculo das métricas de erro MSRE, MARE e NSC.

$$MSRE = \frac{1}{T} \sum_{t=1}^T \left( \frac{f_t - y_t}{y_t} \right)^2 \quad MARE = \frac{1}{T} \sum_{t=1}^T \left| \frac{f_t - y_t}{y_t} \right| \quad NSC = 1 - \frac{\sum_{t=1}^T (f_t - y_t)^2}{\sum_{t=1}^T (f_t - \bar{y})^2}$$

# RESULTADOS ALCANÇADOS



- Treinamento Janela 6 → Jan/31-Dez/2010
- Janelas 2 a 6 utilizadas para o cálculo das métricas de erro MSRE, MARE e NSC.

$$MSRE = \frac{1}{T} \sum_{t=1}^T \left( \frac{f_t - y_t}{y_t} \right)^2 \quad MARE = \frac{1}{T} \sum_{t=1}^T \left| \frac{f_t - y_t}{y_t} \right| \quad NSC = 1 - \frac{\sum_{t=1}^T (f_t - y_t)^2}{\sum_{t=1}^T (f_t - \bar{y})^2}$$

# RESULTADOS ALCANÇADOS

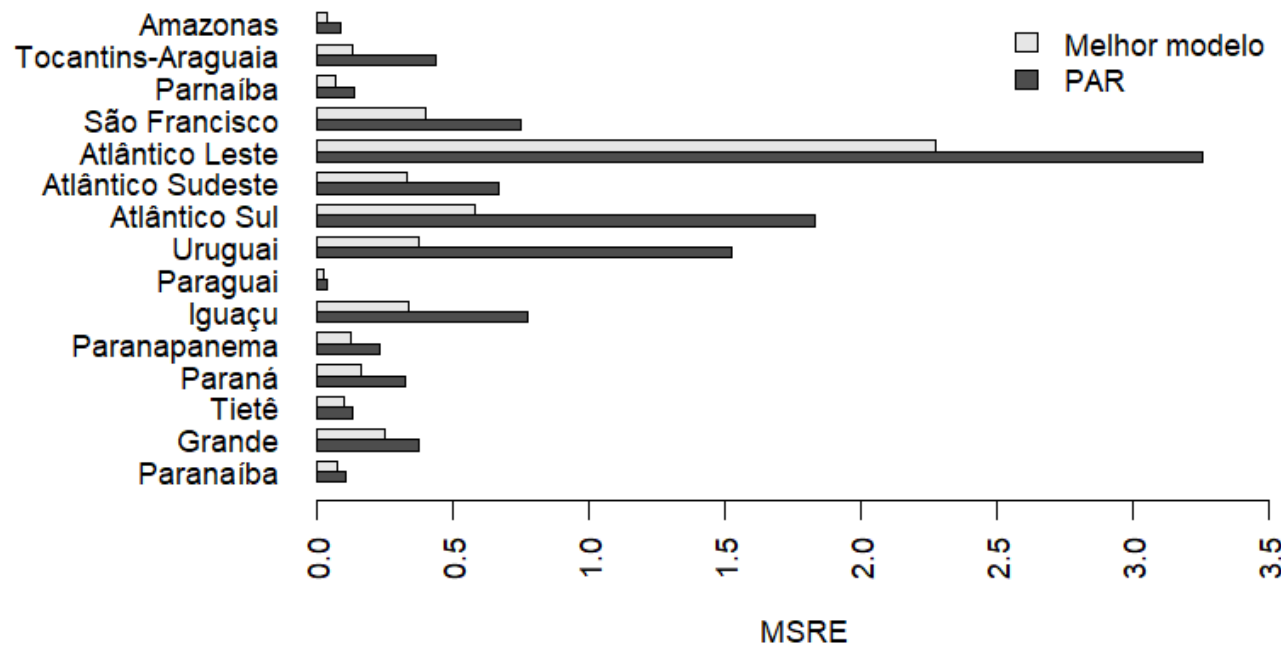


- Vários modelos foram testados...

Modelo	PAR	PARX	SSA	MSSA	Precipitação	ENSO
1	X					
2	X		X			
3	X			X		
4	X			X	X	
5 a 11	X			X		X
12 a 18	X			X	X	X
19		X			X	
20 a 26		X				X
27		X	X		X	
28 a 34		X	X			X

# RESULTADOS ALCANÇADOS

- Segundo o critério MSRE...

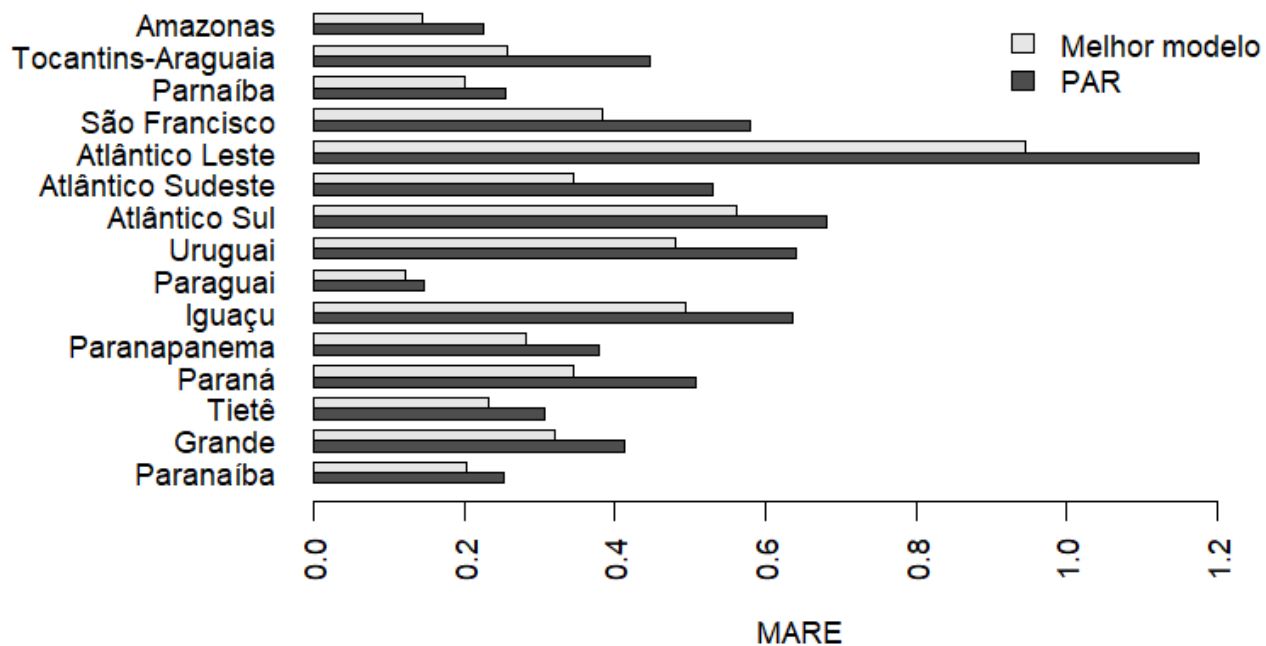


Bacia	Melhor modelo	Melhoria	Modelo
Paranaíba	Modelo 2	0,03	SSA+PAR
Grande	Modelo 4	0,12	MSSA+PAR+Prec.
Tietê	Modelo 21	0,03	PARX+Eq.SOI
Paraná	Modelo 34	0,16	SSA+PARX+ONI
Paranapanema	Modelo 20	0,11	PARX+SOI
Iguaçu	Modelo 9	0,44	MSSA+PAR+Niño4
Paraguai	Modelo 3	0,01	MSSA+PAR
Uruguai	Modelo 3	1,15	MSSA+PAR
Atlântico Sul	Modelo 3	1,25	MSSA+PAR
Atlântico Sudeste	Modelo 28	0,34	SSA+PARX+SOI
Atlântico Leste	Modelo 3	0,98	MSSA+PAR
São Francisco	Modelo 4	0,35	MSSA+PAR+Prec.
Parnaíba	Modelo 21	0,07	PARX+Eq.SOI
Tocantins-Araguaia	Modelo 2	0,31	SSA+PAR
Amazonas	Modelo 19	0,05	PARX+Prec.



# RESULTADOS ALCANÇADOS

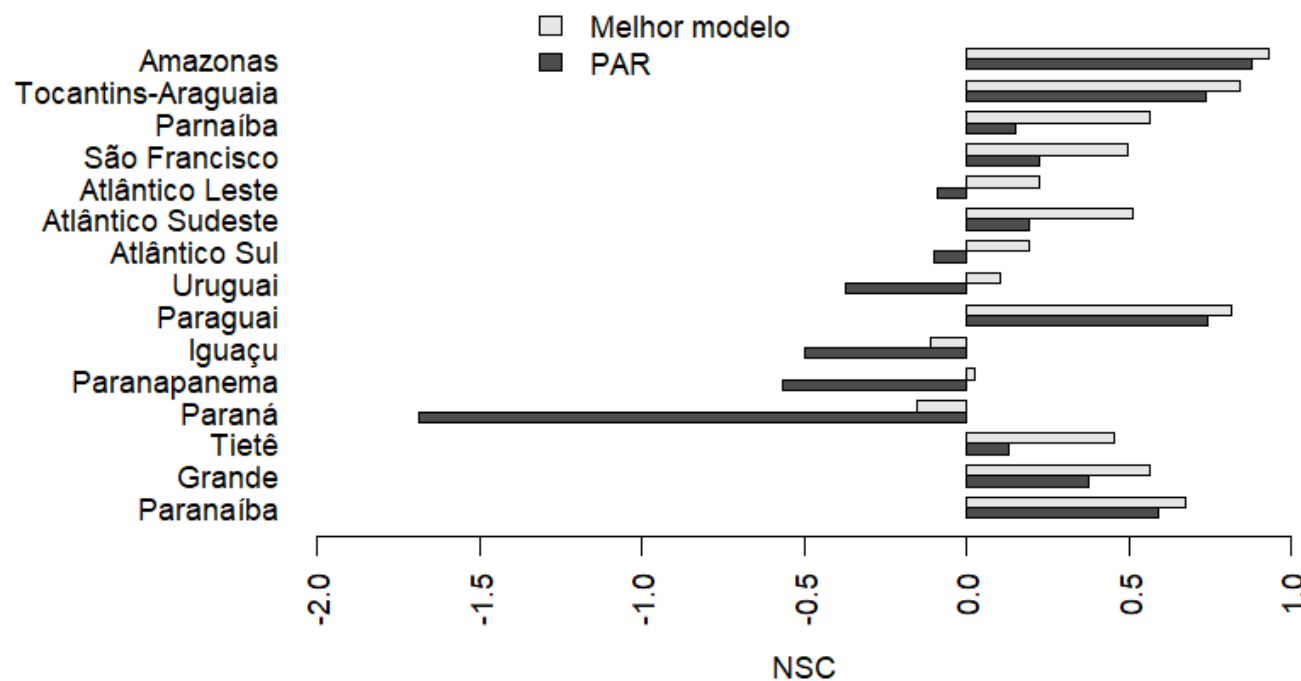
- Segundo o critério MARE...



Bacia	Melhor modelo	Melhoria	Modelo
Paranaíba	Modelo 7	0,05	MSSA+PAR+Niño 1+2
Grande	Modelo 3	0,09	MSSA+PAR
Tietê	Modelo 19	0,08	PARX+Prec.
Paraná	Modelo 34	0,16	SSA+PARX+ONI
Paranapanema	Modelo 20	0,10	PARX+SOI
Iguaçu	Modelo 9	0,14	MSSA+PAR+Niño4
Paraguai	Modelo 28	0,03	SSA+PARX+SOI
Uruguai	Modelo 3	0,16	MSSA+PAR
Atlântico Sul	Modelo 21	0,12	PARX+Eq.SOI
Atlântico Sudeste	Modelo 28	0,19	SSA+PARX+SOI
Atlântico Leste	Modelo 3	0,23	MSSA+PAR
São Francisco	Modelo 4	0,20	MSSA+PAR+Prec.
Parnaíba	Modelo 21	0,05	PARX+Eq.SOI
Tocantins-Araguaia	Modelo 2	0,19	SSA+PAR
Amazonas	Modelo 19	0,08	PARX+Prec.

# RESULTADOS ALCANÇADOS

- Segundo o critério NSC...



Bacia	Melhor modelo	Melhoria	Modelo
Paranaíba	Modelo 3	0,08	MSSA+PAR
Grande	Modelo 31	0,19	SSA+PARX+Niño3
Tietê	Modelo 19	0,33	PARX+Prec.
Paraná	Modelo 30	1,53	SSA+PARX+Niño1+2
Parapanema	Modelo 32	0,59	SSA+PARX+Niño4
Iguaçu	Modelo 26	0,39	PARX+ONI
Paraguai	Modelo 20	0,07	PARX+SOI
Uruguai	Modelo 19	0,47	PARX+Prec.
Atlântico Sul	Modelo 26	0,30	PARX+ONI
Atlântico Sudeste	Modelo 26	0,32	PARX+ONI
Atlântico Leste	Modelo 3	0,31	MSSA+PAR
São Francisco	Modelo 9	0,27	MSSA+PAR+Niño4
Parnaíba	Modelo 3	0,41	MSSA+PAR
Tocantins-Araguaia	Modelo 3	0,10	MSSA+PAR
Amazonas	Modelo 4	0,05	MSSA+PAR+Prec.

# RESULTADOS ALCANÇADOS

Resumindo...

- 1º lugar → Modelo 3 (MSSA+PAR)
- 2º lugar → Modelo 19 (PARX+Prec.)
- 3º lugar → Modelo 4 (MSSA+PAR+Prec.)  
→ Modelo 21 (PARX+Eq.SOI)



# CONCLUSÕES PRELIMINARES



- Todos os modelos testados obtiveram melhor desempenho do que o PAR(p);
- Os modelos que obtiveram os melhores resultados incluem variável climática e/ou pré-processamento dos dados;
- Para as bacias do Iguaçu e do Paraná, o modelo que utiliza a média como previsão ainda é o mais eficiente;

## Conclusão

- Os modelos aplicados mostraram-se eficientes para os objetivos propostos, porém ainda há espaço para melhoria.

# PERSPECTIVAS DE PESQUISA

Para alcançar essas melhorias pretende-se...

- Aplica o GAM de forma periódica, similar ao PARX
- Estimar de forma ótima os parâmetros do SSA quando o PARX é utilizado

## Objetivo final

- Gerar cenários de vazão com os melhores modelos encontrados para cada bacia
- Avaliar o desempenho dos cenários no MDDH

# PUBLICAÇÕES



Pesquisa Operacional (2017) 37(1): 107-128  
© 2017 Brazilian Operations Research Society  
Printed version ISSN 0101-7438 / Online version ISSN 1678-5142  
www.scielo.br/pope  
doi: 10.1590/0101-7438.2017.037.01.0107

## **INTRODUCING A CAUSAL PAR( $p$ ) MODEL TO EVALUATE THE INFLUENCE OF CLIMATE VARIABLES IN RESERVOIR INFLOWS: A BRAZILIAN CASE**

Paula Medina Maçaira<sup>1\*</sup>, Fernando Luiz Cyrino Oliveira<sup>1</sup>,  
Pedro Guilherme Costa Ferreira<sup>2</sup>, Fernanda Villa Nova de Almeida<sup>1</sup>  
and Reinaldo Castro Souza<sup>3</sup>

Received June 10, 2016 / Accepted March 16, 2017

# WORKING PAPERS



- Título

- Time Series Analysis with Explanatory Variables: a Systematic Literature Review

- Periódico

- Environmental Modelling & Software (Elsevier)

- Fase

- R1

- Título

- Comparative Causality Analyses between Natural Inflow and Climate Variables in Brazil

- Periódico

- A decidit

- Fase

- Em redação

# Obrigada pela atenção!

[paulamacaira@aluno.puc-rio.br](mailto:paulamacaira@aluno.puc-rio.br)