



Previsão da Emissão de CO_2 de Estados Brasileiros utilizando Combinação de Previsões

Letícia Menegotto¹ e Cleber Bisognin¹

¹Departamento de Estatística - Universidade Federal do Rio grande do Sul - UFRGS

RESUMO

O objetivo deste trabalho é analisar e prever o nível de emissões anuais de CO_2 , por processos industriais, dos estados do Paraná, Rio Grande do Sul e São Paulo no período de 1971 a 2016. Foram calculadas as predições utilizando os modelos ARIMA e de suavização exponencial de cada série. Com base nas predições destes modelos foram aplicadas as técnicas de combinação (variância mínima, média e regressão). A verificação da acurácia da técnica/ modelo a ser escolhido para realizar as previsões, ocorreu por meio do MAPE. Para a série do estado do Paraná, a combinação de previsões por média obteve menor medida de acurácia. Para o estado do Rio Grande do Sul, a menor medida de acurácia foi obtida através da combinação de previsões por variância mínima. A menor medida de acurácia, para o estado de São Paulo, foi obtida pelo método de combinação de previsões por regressão. Em todos os estados, as emissões de CO_2 apresentam tendência de crescimento. Isso indica que todos os estados devem rever suas políticas para a diminuição das emissões de CO_2 .

Palavras chave: Dióxido de Carbono, Modelagem Estatística, Combinações de Previsão, Séries Temporais.

1 INTRODUÇÃO

Os gases do efeito estufa são necessários para a manutenção da temperatura e da vida na terra, mas o excesso destes gases pode trazer muitos danos ao nosso planeta. O efeito estufa é um processo da Terra para estabilizar a temperatura. Uma parte da energia solar que chega ao planeta é refletida de volta ao espaço, o restante é absorvida pela superfície terrestre e pelos oceanos com a ajuda de gases como o metano (CH_4), o gás carbônico (CO_2) e o vapor d'água (H_2O). Em fevereiro de 2005 entrou em vigor o Protocolo de Kyoto, cujo objetivo é a redução da emissão de gases do efeito estufa na atmosfera. Mesmo que muitos países tenham assinado tal protocolo é necessário todos implementem políticas para redução da emissão destes gases.

Segundo EMPRABA (2017) os maiores emissores de gases responsáveis pelo efeito estufa são: Estados Unidos, China, Índia, Japão, Rússia e União Europeia. Mesmo o Brasil emitindo uma pequena parcela destes gases, deve adotar políticas para reduzir suas emissões. Segundo UOL (2015) o Brasil emite apenas 3,83% do total de toneladas de gases de efeito estufa emitidas por todos os países. Uma pequena parte, dado que 10 países emitem quase 70% destes gases.

O CO_2 é considerado o principal responsável pelo efeito estufa, e é emitido por vários setores da economia, a citar: agropecuária, agricultura, geração de eletricidade, combustíveis fósseis, processos industriais, resíduos, entre muitos outros. Considerando dados do SEEG - Sistema de Estimativas de Emissões e Remoções de Gases de Efeito Estufa, em 2016, os processos industriais foram responsáveis por uma boa parte da emissão de CO_2 no Brasil. Neste sentido desejamos estudar o comportamento da emissão de CO_2 , por processos industriais, dos estados do Paraná, Rio Grande do Sul e São Paulo. Com base nisto, o objetivo do artigo é prever o nível de emissões de dióxido de carbono (em toneladas) para os estados do Paraná, Rio Grande do Sul e São Paulo, utilizando combinações de previsões.

2 METODOLOGIA

Nesta seção apresentamos os modelos utilizados para análise e previsão das séries temporais da Emissão de CO_2 dos estados do Paraná, Rio Grande do Sul e São Paulo, a saber, os modelos ARIMA(p, d, q) e Suavização Exponencial, além de três métodos para realizar combinações de previsões, a saber: variância mínima, regressão e média aritmética.

Os dados históricos da emissão anual de CO_2 , em toneladas (t), dos estados do Paraná, Rio Grande do Sul e São Paulo, resultantes de Processos Industriais são provenientes do SEEG - Sistema de Estimativas de Emissões e Remoções de Gases de Efeito Estufa (<http://seeg.eco.br/>). O SEEG avalia os cinco setores que são fontes de emissões – Agropecuária, Energia, Mudanças de Uso da Terra, Processos Industriais e Resíduos. Dos processos industriais, as emissões são da indústria química, produtos minerais e produção de metais. Neste trabalho optamos por estudar as emissões provenientes de Processos Industriais. Maiores detalhes sobre os dados analisados podem ser encontrados no site do SEEG. Serão utilizadas as 46 observações anuais disponíveis, de 1971 a 2016. Os dados foram acessados em 06/09/2017. O uso deste período se deve ao fato de o período de dados mais completo disponíveis na internet e que foram encontrados pelos autores para os três estados.

A seguir definimos os processos ARIMA(p, d, q). Maiores detalhes sobre estes processo podem ser encontrados em Morettin; Toloi (2006).

Definição 1. Seja $\{X_t\}_{t \in \mathbb{Z}}$ um processo estocástico satisfazendo a equação

$$\phi(\mathcal{B})(1 - \mathcal{B})^d(X_t - \mu) = \theta(\mathcal{B})\varepsilon_t, \quad (1)$$

onde μ é a média do processo, $\{\varepsilon_t\}_{t \in \mathbb{Z}}$ é o processo ruído branco, \mathcal{B} é o operador de *defasagem* ou de *retardo*, isto é, $\mathcal{B}^j(X_t) = X_{t-j}$, para todo $j \in \mathbb{N}$, $\phi(\cdot)$ e $\theta(\cdot)$ são os polinômios de ordem p e q , respectivamente, definidos por

$$\phi(z) = \sum_{\ell=0}^p (-\phi_\ell) z^\ell, \quad \theta(z) = \sum_{m=0}^q (-\theta_m) z^m, \quad (2)$$

onde ϕ_ℓ , $1 \leq \ell \leq p$ e θ_m , $1 \leq m \leq q$, são constantes reais e $\phi_0 = -1 = \theta_0$. Então, $\{X_t\}_{t \in \mathbb{Z}}$ é um *processo auto-regressivo integrado de média móvel de ordem* (p, d, q) com média μ , denotado por ARIMA(p, d, q), onde d é o grau de diferenciação.

Na Definição 1 acima, quando $d = 0$, temos os processos ARMA (p, q).

A seguir definimos os modelos de Suavização exponencial, mais especificamente os modelos lineares de Holt. Maiores detalhes sobre estes modelos podem ser encontrados em Makridakis et al. (1998) e em Morettin; Toloi (2006).

Definição 2. Para os modelos lineares de Holt, consideramos que as observações de uma série temporal $\{X_t\}_{t=1}^n$ são formadas pela soma, do nível, tendência e um erro aleatório, como segue:

$$X_t = L_t + T_t + \varepsilon_t, \quad \text{para } t = 1, \dots, n. \quad (3)$$

As estimativas do nível da série no tempo t , denotado por L_t e da tendência, denotada por T_t , são dadas, respectivamente por

$$L_t = \alpha X_t + (1 - \alpha)(L_{t-1} + T_{t-1}) \quad (4)$$

$$T_t = \beta(L_t - L_{t-1}) + (1 - \beta)T_{t-1}, \quad (5)$$

onde α é o coeficiente de ponderação exponencial do nível ($0 \leq \alpha \leq 1$) e β é o coeficiente de ponderação exponencial da tendência ($0 \leq \beta \leq 1$).

As previsões h passos a frente são dadas por $\hat{X}_t(h) = L_t + hT_t$. A notação $\hat{X}_t(h)$ indica a previsão de origem t e horizonte $h \geq 1$.

Além dos modelos, um método comumente utilizado para melhorar a acurácia das previsões é a combinação de previsões. Segundo Costantini; Pappalardo (2010), este método consiste em utilizar um mecanismo para captar os diversos fatores que afetam cada técnica de previsão individual usada como base na obtenção da previsão combinada.

Proposto por Bates; Granger (1969), O método da variância mínima consiste em realizar a combinação linear de duas previsões com diferentes pesos. A equação (6) a seguir apresenta a expressão da combinação por variância mínima.

$$\hat{F}_c = w\hat{F}_1 + (1 - w)\hat{F}_2 \quad (6)$$

onde w é o peso atribuído a previsão de menor variância e \hat{F}_1 e \hat{F}_2 são as previsões individuais a serem combinadas.

Segundo Bates; Granger (1969), o menor peso deve ser atribuído às previsões de maior variabilidade nos erros de previsão. O peso para a previsão com menor variabilidade nos erros é obtido conforme equação (7).

$$\hat{w} = \frac{\hat{\sigma}_2^2 - \hat{\rho}\hat{\sigma}_1\hat{\sigma}_2}{\hat{\sigma}_1^2 + \hat{\sigma}_2^2 - 2\hat{\rho}\hat{\sigma}_1\hat{\sigma}_2}. \quad (7)$$

onde $\hat{\rho}$ é o valor da correlação linear entre os erros das previsões obtidas em \hat{F}_1 e \hat{F}_2 , $\hat{\sigma}_1^2$ é a variância dos erros de previsão de \hat{F}_1 e $\hat{\sigma}_2^2$ é a variância dos erros de previsão de \hat{F}_2 .

Outros métodos de combinação de previsão são o da média aritmética, pois além de ser um dos métodos mais conhecidos é fácil de calcular, e o método de regressão, utilizando o Método dos Mínimos Quadrados Ordinários (MQO).

Porém verificar qual técnica de previsão - individual ou combinação - é a mais adequada, faz-se necessário obter medidas de acurácia. Neste trabalho iremos utilizar o erro percentual médio absoluto (MAPE).

3 RESULTADOS E DISCUSSÕES

Uma vez que estamos buscando técnicas adequadas para prever a emissão anual de CO_2 nos estados do Paraná, Rio grande do Sul e São Paulo, obtivemos as previsões utilizando os modelos de Suavização Exponencial (modelos lineares de Holt) e ARIMA (p, d, q) e suas respectivas combinações.

A Figura 1 apresenta o gráfico das séries temporais. Podemos perceber, pelo gráfico, que nenhuma série apresenta sazonalidade. Foi aplicado o teste de Dickey-Fuller, cuja hipótese nula é de que a série temporal analisada é não estacionária. Para a série do Estado do Paraná, o p -valor = 0.03121, ou seja a série é estacionária. Para as séries das emissões de CO_2 , dos estados do Rio Grande do Sul e São Paulo, os p-valores obtidos, respectivamente, foram 0.4925 e 0.7498, ou seja, ambas as séries são não estacionárias.

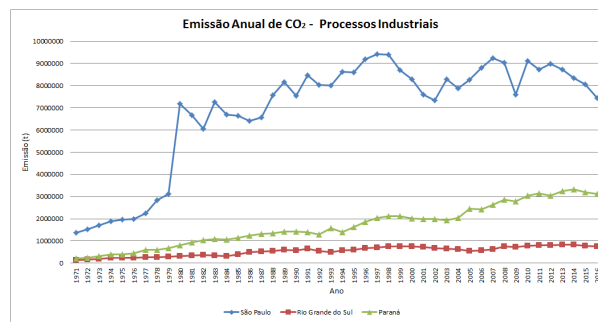


Figura 1: Emissão Anual de CO_2 resultantes de Processos Industriais, em toneladas, no período de 1971 - 2016, dos estados do Paraná, Rio Grande do Sul e São Paulo.

Fonte: Autores.

Tabela 1: Modelos e Estimativas dos Parâmetros.

Modelo	Paraná	Rio Grande do Sul	São Paulo
ARIMA(p, d, q)	$\hat{d} = 0, \hat{\phi}_1 = 0.9860,$ $\hat{\theta}_1 = -0.0658, \hat{\theta}_2 = 0.3307$ e $\hat{\theta}_3 = 0.0.4863$	$\hat{d} = 1$ $\hat{\phi}_1 = 0.3005$	$\hat{d} = 1$
Holt	$\hat{\alpha} = 0.8872 \hat{\beta} = 0.0234$	$\hat{\alpha} = 1 \hat{\beta} = 0.0481$	$\hat{\alpha} = 0.8340 \hat{\beta} = 0$

Fonte: Autores.

Tabela 2: P-valores do Teste de Resíduos de Box-Pierce.

Estado	Paraná	Rio Grande do Sul	São Paulo
ARIMA	0,6882	0,6346	0,2851
Holt	0,7976	0,1713	0,9938

Fonte: Autores.

Na Tabela 1 encontram-se os modelos e as estimativas dos seus respectivos parâmetros.

Conforme a Tabela 2, podemos perceber que todos os modelos apresentam resíduos significativos quando analisado o teste de resíduos de Box-Pierce, ou seja, os resíduos são não correlacionados.

Após a obtenção dos modelos descritos acima para cada estado do estudo, foram obtidas previsões para os seguintes métodos de combinação de previsões: variância mínima, média simples (aritmética) e regressão. Na Tabela 3 são apresentados os pesos obtidos na combinação por variância mínima e os coeficientes da regressão e o R^2 ajustado, para as séries dos três estados.

Na Tabela 4, podemos verificar as medidas de acurácia obtidas para cada modelo e para a os três métodos de combinação de previsões. Para a série do estado do Paraná, obtivemos o menor MAPE com a combinação de previsões por média. Para o estado do Rio Grande do Sul, a menor medida de acurácia foi obtida através da combinação de previsões por variância mínima. As previsões que apresentaram menor MAPE para a série do estado de São Paulo foram obtidas através da combinação de previsões por regressão. Na Figura 2 apresentamos os gráficos das séries temporais com suas previsões obtidas através da técnica de previsão com menor medida de acurácia.

Tabela 3: Modelos de combinação de previsão: valores obtidos para o peso w pelo método de variância mínima; coeficientes $\hat{\beta}_1$, $\hat{\beta}_2$ e R^2 ajustado pelo método de regressão.

Estado	\hat{w}	$\hat{\beta}_1$	$\hat{\beta}_2$	R^2 ajustado
Rio Grande do Sul	0,5295888	0,5729	0,4248	0,9948
Paraná	0,6513	0,8363	0,1763	0,9964
São Paulo	0,8179	0,5729	0,4248	0,9877

Fonte: Autores.

Tabela 4: Média dos Erros Percentuais Absolutos (MAPE) dos modelos e das combinações de previsão.

Técnica de Previsão	Paraná	Rio Grande do Sul	São Paulo
ARIMA	7,5468	6,0438	7,9908
Holt	6,2295	6,1867	7,5938
Variância Mínima	5,9269	5,8304	7,9308
Média Aritmética	5,9040	5,8321	7,7149
Regressão Linear	5,9457	5,8700	7,4180

Fonte: Autores.

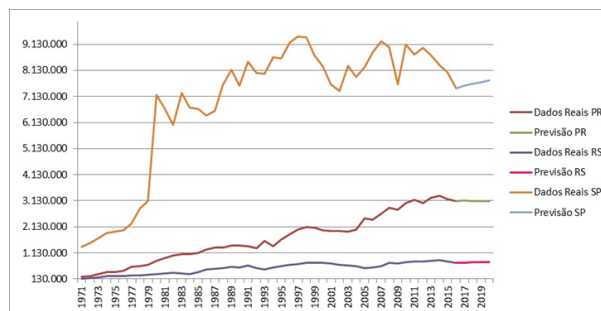


Figura 2: Previsão da emissão Anual de CO_2 resultantes de Processos Industriais, em toneladas, dos estados do Paraná, Rio Grande do Sul e São Paulo, período 2017 a 2020.

Fonte: Autores.

4 CONCLUSÃO

O principal objetivo de trabalharmos com as séries temporais de emissões anuais de CO_2 resultantes de Processos Industriais, em toneladas, dos estados do Paraná, Rio Grande do Sul e São Paulo é encontrar uma técnica/modelo, com menor medida de acurácia MAPE, para prever seus futuros valores. Comparamos as predições obtidas pelos modelos ARIMA e Suavização Exponencial e três combinações de previsão. Analisando os resultados, as combinações de previsão obtiveram menores medidas de acurácia sendo assim melhores para a previsão das séries temporais. Desta forma, as técnicas de combinações de previsão são ótimas alternativas para melhorar ainda mais a capacidade preditiva dos modelos propostos. Além disso, podemos perceber pela Figura 2, que as emissões de CO_2 , de todos os estados irão aumentar com o passar dos anos se não for instalada nenhuma política visando a sua redução. Este resultado é corroborado por Clima Tempo (2017).

Referências

- [1] BATES, J. M.; GRANGER, C. W. J. The combination of forecasts. **Operational Research**, p. 451-468, 1969.
- [2] CLIMA TEMPO, 2017. Disponível em: <https://www.climatempo.com.br/noticia/2017/11/13/emissoes-de-co2-voltam-a-subir-pela-primeira-vez-em-anos-2728>. Acesso: 13/11/2017.
- [3] COSTANTINI, M.; PAPPALARDO, C. A hierarchical procedure for the combination of forecasts. **International Journal of Forecasting**, v. 26 n.4, p.725-743, 2010.
- [4] MAKRIDAKIS, S.; WHEELWRIGHT, S. C.; HYNDMAN, R. J. **Forecasting: methods and applications**. John Wiley & Sons, 3rd edition, 1998.
- [5] MORETTIN, P. A.; TOLOI, C. **Análise de séries temporais**. São Paulo, Ed. Blucher, 2006.
- [6] UOL, 2015. Disponível em: <https://noticias.uol.com.br/ciencia/infograficos/2015/12/06/dez-paises-emitem-quase-70-dos-gases-do-efeito-estufa-do-mundo.htm>. Acesso: 17/10/2017.