

MODELO DE TERMO DE REFERÊNCIA DE PESSOA JURÍDICA - SBQC

**MINISTÉRIO DE MINAS E ENERGIA – MME
OPERADOR NACIONAL DO SISTEMA ELÉTRICO - ONS**

PROJETO META

Projeto de Assistência Técnica dos Setores de Energia e Mineral

BANCO MUNDIAL

**BANCO INTERNACIONAL PARA A RECONSTRUÇÃO E DESENVOLVIMENTO –
BIRD**

Loan: **8095 - BR**

Anexo 1

Termo de Referência

Desenvolvimento de pesquisas para identificação de mudanças no regime de vazões e das principais variáveis meteorológicas de interesse para operação do SIN e investigação de suas causas, quanto a padrões associados à variabilidade climática e/ou mudança do clima/uso do solo

Outubro/2021

ANEXO 1
TERMO DE REFERÊNCIA - TDR

Desenvolvimento de pesquisas para identificação de mudanças no regime de vazões e das principais variáveis meteorológicas de interesse para operação do SIN e investigação de suas causas, quanto a padrões associados à variabilidade climática e/ou mudança do clima/uso do solo

O sistema climático é um sistema complexo e não linear, composto de várias componentes como por exemplo oceano, atmosfera e criosfera entre outros. Desconsiderando fatores associados a fatores externos como erupções vulcânicas, insolação ou relacionados a mudanças (climáticas ou não) devido a fatores antropogênicos, o próprio sistema tem sua variabilidade natural. De interesse particular desse estudo está a variabilidade de baixa frequência que está, de uma maneira geral, associada a fenômenos de grande escala e de origem remota (geralmente via oceano), de variação lenta e recorrente temporalmente (teleconexões) e que influencia o regime de variáveis meteorológicas em um horizonte além da escala sub-sazonal.

Especificamente sobre a América do Sul, o exemplo mais conhecido é o El Niño Oscilação Sul (ENOS) que modula a variabilidade climática na escala interanual (2 a 5 anos). No sudeste da América do Sul, os efeitos mais conhecidos do ENSO canônico ocorrem durante a primavera, com aumento (diminuição) da precipitação em eventos quentes (frios) (Barreiro, 2009). Resultados similares foram encontrados por Yulaeva and Wallace (1994), Grimm et al. (2000) e Silvestri (2004). Durante o verão, embora os mecanismos de formação da precipitação sejam menos intensos, anomalias positivas de precipitação ainda podem ser observadas na região (Camilloni and Barros 2003). Entretanto, Tedeschi e Collins (2016b), mostraram que a influência do local de máximo aquecimento/resfriamento (ENSO canônico x ENSO Modoki x ENSO canônico+Modoki) no Pacífico pode mudar a circulação de forma a afetar de maneira significativamente diferente as várias estações e regiões no Brasil. Barros et al 2000 identificaram tendência de aumento da precipitação que contribuiu para expansão de áreas agrícolas na região na segunda metade do século 20 no norte da Argentina. Agosta e Compagnucci (2012) e Jacques-Copper and Garread (2015) detectaram mudança na variabilidade da precipitação no oeste da Argentina durante o verão nos períodos anteriores e posteriores a 1976/1977 relacionados a mudança de fase da Oscilação Decadal do Pacífico (PDO). Na região central da Argentina, estudos com dados de sedimentos Piovano et al. (2002) concluíram que condições mais secas foram dominantes entre 1945 e 1975 acompanhado de aumento na precipitação até o final da década de 90 aproximadamente. Especificamente sobre o sul do Brasil, Liebmann et al. (2004) demonstrou aumento de precipitação na segunda metade do século 20. Mais uma evidência na redução de precipitação

no século 20 foram mostrados por Le Quesne et al. (2006), que analisaram anéis de árvores e concluíram que o século 19 foi mais chuvoso que o século 20 na região central do Chile e que o decréscimo da precipitação influenciou o recuo das geleiras do rio Cipreses desde 1842. Os resultados desses estudos são qualitativamente comparáveis aos obtidos pelo ONS, que diagnosticou a relação do Oceano Pacífico nas vazões da região Sul do Brasil utilizando o Multivariate ENSO Index (MEI) (Wolter and Timlin, 2011). A mudança no padrão da precipitação e consequentemente da vazão em meados da década de 70, compatível com as publicações citadas acima, também foi observado no estudo do ONS.

Dentre os mecanismos que explicam parcialmente ou de maneira complementar as tendências citadas acima, estão:

- a redução da concentração de ozônio na estratosfera associada ao aumento de gases de efeito estufa contribuindo para a variação na espessura da célula de Hadley nos 2 hemisférios, alterando a intensidade e localização dos anticiclones subtropicais (Hu et al., 2011; Liu et al., 2012; Choi et al. 2014);
- diminuição na intensidade da subsidência devido a célula de Hadley associado ao aumento da advecção de umidade em baixos níveis (Saurral et. al 2016);
- a intensificação do modo de variabilidade responsável pelo transporte da umidade da Amazônia para o sudeste da América do Sul (Doyle e Barros 2002, Barros et al. 2008);
- dipolo de anomalia de TSM centrados em aproximadamente 15 e 35S relacionados a intensificação e posicionamento do anticiclone subtropical do Atlântico Sul na região central da América do sul favorecendo condições mais secas na região (Woodruff et al., 1987) e mais chuvosas no norte da Argentina e sul do Brasil (Doyle e Barros 2002);

Reboita et al. (2021) estudaram alguns padrões de teleconexão através de índices que representam as várias regiões remotas que influenciam no clima da América do Sul através de composites: El Niño Oscilação Sul (ENSO), Oscilação Decadal do Pacífico (PDO), Oscilação Multidecadal do Atlântico (AMO), Dipolo do Atlântico (TAD), Dipolo do Atlântico Sul (SAD), Modo Anular Sul (SAM), Oscilação Madden-Julian (MJO) e dipolo do Oceano Índico (IOD). De uma maneira geral, há um padrão de dipolo na resposta da precipitação (anomalias positivas x anomalias negativas) entre o sudeste da América do Sul e as regiões mais ao norte, em especial as regiões norte e nordeste do Brasil, a diferentes padrões de teleconexões.

Em um estudo mais abrangente, Rao et al. (2015) definiram estações seca e chuvosa para todo o território brasileiro utilizando reanálise de precipitação. Utilizando o período entre 1979 e 2011, comparando períodos chuvosos consecutivos, concluíram que no setor mais ao norte do país (trimestre Abril-Maio-Junho – AMJ), o período chuvoso ocorre mais tarde (Maio-Junho-Julho: MJJ). Na maior parte da área central do país, não houve deslocamento nas estações seca e chuvosa, mas ao sul de 10S, aproximadamente entre 50W e 40W, a

estação chuvosa que anteriormente ocorria no trimestre Dezembro-Janeiro-Fevereiro (DJF) antecipou em um mês e mais recentemente ocorre no trimestre Novembro-Dezembro-Janeiro (NDJ). A detecção de mudanças na região sul é dificultada pela alta variabilidade interanual da precipitação. Nesse mesmo estudo, análise de tendência mostra que há diminuição considerável e estatisticamente significativa da precipitação nas estações seca e chuvosa no sudeste do Brasil onde está localizada a bacia do rio Grande. Estudos como por exemplo de Blain (2009) não observou tendência ao sul dessa região, sobre o estado de São Paulo.

Qualitativamente, os estudos apresentados acima também concordam com a região de transição entre regime de vazões com tendência positiva no sul do Brasil, uma região de transição na área da bacia do rio Tietê e tendência negativa nas vazões na região Nordeste da América do Sul. Em outras regiões como no Mato Grosso e no norte da Amazônia, foi observado aumento no ciclo anual da precipitação.

Especificamente sobre parte do período crítico mais recente diagnosticado pelos estudos realizados pelo ONS (2013-2020), Coelho et al. (2015) propuseram um mecanismo com origem em uma fonte de calor na região equatorial a norte/nordeste da Austrália, que via teleconexões, é associada localmente (sudeste da América do Sul) a uma circulação anormalmente anticiclônica que se estendeu sobre o sudeste do Brasil desfavorecendo transporte de umidade para a região no trimestre Janeiro-Fevereiro-Março (JFM) de 2014. Essa configuração desfavorece a formação de Zona de Convergência do Atlântico Sul (ZCAS), ocasionando anomalia negativa de precipitação. Esse mecanismo difere da tradicional diminuição do fluxo de umidade oriundo da Amazônia. Para o mesmo período, Rodrigues et al. (2019) também relacionou a seca extrema a dificuldade de formação de episódios de ZCAS e consequentemente da precipitação associada a uma onda de calor marítima no Atlântico Sul, nas adjacências da América do Sul. O mecanismo proposto tem início remoto através da convecção nos oceanos Índico e Pacífico e pode causar seca, altas temperaturas sobre o continente e bloqueio atmosférico e explica por volta de 60% das ondas de calor marítimas no setor oeste do oceano Atlântico Sul. No mesmo estudo foi identificado aumento em frequência, duração e intensidade dessa configuração do Atlântico no período 1982-2016.

Cunha et al (2019) usaram o IDI (Integrated Drought Index) para complementar estudos que haviam sido realizados utilizando o SPI (Standardized Precipitation Index). Os resultados desses estudos indicam que excluindo a região Sul, o período entre 2011 e 2019 tiveram episódios mais intensos de seca dos últimos 60 anos, sendo que a maioria dos eventos ocorreram na região Nordeste e as mais severas ocorreram na região Sudeste. Porém, especialmente nos últimos 3 anos, a região Sul também vem experimentando uma sequência de meses com chuva abaixo da média. O trimestre Fevereiro-Março-Abril (MAM) de 2020 apresentou os valores mais baixos de anomalia negativa de precipitação do histórico do trimestre. De fato, MAM tem apresentado anomalias negativas de precipitação desde o final

da década de 90. Uma combinação de fases de 2 tipos de oscilação de baixa frequência AMO+ e Oscilação Interdecadal do Pacífico (IPO-) podem ter contribuído para esse comportamento sistemático. O episódio El Niño central em 2020 ou a La Niña de 2009 e 2012 são oscilações na escala interanual que amplificam o background desfavorável de oscilações de baixa frequência (Grimm et al. 2020).

Embora eventos extremos específicos não possam ser diretamente associados a efeitos antropogênicos, eles podem estar associados a mudança em intensidade e frequência de eventos extremos (Skansi et al. 2013). Feedbacks como o desflorestamento afetando evapotranspiração na Amazônia que por sua vez influencia na reciclagem de umidade local e assim sucessivamente. Isso afeta o transporte de umidade do Oceano Atlântico que passa pela Amazônia e é direcionado a região central ou ao sul do país. Dessa forma é possível que o desflorestamento esteja conectado a eventos anômalos (positivos ou negativos) de precipitação. Entretanto, em que pese a dificuldade de obtermos séries históricas confiáveis, são raros estudos **diagnósticos** que indiquem de maneira robusta se a sequência de anomalias dos últimos anos são fruto de variabilidade climática, de mudança climática ou de uma combinação de fatores naturais e antropogênicos. A Quarta Comunicação Nacional (4CN) do Brasil à Convenção-Quadro das Nações Unidas sobre Mudança do Clima (UNFCCC) foi submetida pelo governo brasileiro à comunidade internacional no final de 2000. O documento relata de forma sucinta para todo o Brasil, mudanças em índices climáticos entre 1980 e 2018, porém não são suficientes para diagnosticar a origem das tendências observadas.

Estudos como o de Rosier et al. (2021) que diagnosticaram a presença de tipping points na cobertura de gelo marítimo que afetam o nível médio do mar são importantes para definir o “novo normal” do clima e conseqüentemente tentar mensurar o impacto socio-econômico dos efeitos causados.

Além disso, é fundamental o entendimento e/ou das limitações no que se referem à previsibilidade desses índices. De uma maneira geral, a performance de modelos de previsão é limitada em escalas temporais superiores a escala de previsão de tempo (além de 14 dias) devido à natureza caótica e não linear do sistema climático. Nesse horizonte, e principalmente nos horizontes de previsão estendida, sazonal e projeções climáticas, o conceito de ensemble auxilia na medida da incerteza das previsões.

A previsibilidade do ENSO que é o principal modo de variabilidade na escala intrassazonal e interanual é de aproximadamente uma estação, e é limitada pela barreira de previsibilidade. Porém, a previsibilidade do ENSO diminuiu ainda mais no século XXI principalmente devido ao impacto da atmosfera extratropical na área tropical, que se intensificou nas últimas 2 décadas. Através do acoplamento de condições favoráveis para a formação de ENSO nos trópicos com precursores na atmosfera extratropical, a performance das previsões de ENSO

se estendem para além da barreira da previsibilidade (aproximadamente duas estações). (Chen et al., 2020). Barreiro (2009) sugeriu que a previsibilidade mostra variações interdecadais: entre 1950 e 1977, a temperatura superficial mostra alta previsibilidade entre o final do outono e início do inverno. Por outro lado, entre 1978 e 2006, a previsibilidade é menor durante o inverno, enquanto a precipitação mostra alguma previsibilidade nas estações de transição.

Na escala decadal, embora haja debate sobre os mecanismos responsáveis pela variabilidade da Oscilação Multidecadal do Atlântico (AMO) e da diferença na representação das anomalias de TSM no Atlântico Norte dependendo do modelo utilizado, há alguma previsibilidade na escala temporal de 3 a 5 anos (Zanna, 2012). A previsibilidade desse setor do Atlântico tem origem no acoplamento com AMOC: Atlantic Meridional Overturning Circulation. Incluindo a AMOC em modelos de autorregressão pode aumentar a previsibilidade de AMO de 2 a 9 anos quando comparados aos resultados de modelos da mesma origem sem considerá-la (Trenary e DelSole, 2016). Mais recentemente, métodos de inteligência artificial vêm sendo utilizados em Meteorologia nas várias escalas temporais. Mercer (2020) tentou quantificar a previsibilidade das diferentes fases de alguns índices de teleconexão para o inverno do hemisfério norte através da utilização de vários métodos de machine learning. Na escala sub-sazonal, Gronquist et al. propuseram uma combinação entre previsões numéricas e pós processamento de variáveis meteorológicas utilizando redes neurais. Resultados indicam que há potencial de melhoria nas previsões nessa escala temporal através de menor custo computacional pelo uso de técnicas de inteligência artificial. A Oscilação Madden e Julian (MJO), a umidade do solo (van den Hurk et al, 2010) e vórtices na estratosfera (Domelsen et al. 2019) também são fontes de previsibilidade na escala sub-sazonal.

Na pequena revisão feita para o propósito deste TDR, a multidisciplinaridade (meteorologia, oceanografia, hidrologia, clima, paleoclimatologia, estatística entre outros) de possíveis fontes ou indicadores de oscilações de baixa frequência que influenciam o clima remotamente é necessária para o entendimento dos mecanismos que, sozinhos ou em conjunto, atuam na tentativa de explicar anomalias climáticas. O Sistema Interligado Nacional (SIN) está passando pelo período mais crítico da história. Tal entendimento é imprescindível para possíveis aplicações dos resultados deste projeto na cadeia de modelos utilizados pelo ONS.

REFERÊNCIAS

Agosta EA, Compagnucci RH. 2012. Central-west Argentina summer precipitation variability and atmospheric teleconnections. *J. Clim.* 25: 1657–1677.

Barreiro M. 2009. Influence of ENSO and the South Atlantic Ocean on climate predictability over southeastern South America. *Clim. Dyn.* 35: 1493–1508.

Barros VR, Castañeda ME, Doyle ME. 2000. Recent precipitation trends in Southern South America east of the Andes: an indication of climatic variability. In *Southern Hemisphere Paleo- and Neoclimates. Key Sites, Methods, Data and Models*, Smolka P, Volkheimer V (eds). Springer: Berlin, 187–206.

Blain GC. 2009. Statistical considerations regarding the eight series of rainfall the secretary of agriculture and supply of São Paulo (in Portuguese: Considerações estatísticas relativas à oito séries de precipitação pluvial da secretaria de agricultura e abastecimento do estado de São Paulo). *Rev. Bras. Meteorol.* 24: 12–23.

Camilloni I, Barros V (2003) Extreme discharge events in the Parana River and their climate forcing. *J Hydrol* 278:94–106

Choi J, Son SW, Lu J, Min SK. 2014. Further observational evidence of Hadley cell widening in the Southern Hemisphere. *Geophys. Res. Lett.* 41: 2590–2597.

Coelho CAS, Oliveira CP, Ambrizzi T, Reboita MS, Carpenedo CB, Silveira campos JL, Tomaziello ACN, Pampuch LA, Custodio MS, Dutra LMM, Rocha RP, Rehbein A, 2015, The 2014 southeast Brazil austral summer drought: regional scale mechanisms and teleconnections, *Clim Dyn*, DOI 10.1007/s00382-015-2800-1

Cunha APMA, Zeri M, Leal KD, Costa L, Cuartas LA, Marengo JA, Tomasella J, Viaira RM, Barbosa AA, Cunningham C, Garcia JVC, Boroedel E, Alvala R, Ribeiro-Neto G, 2019, Extreme Drought Events over Brazil from 2011 to 2019, *Atmosphere*, DOI: 10.3390/atmos10110642

Domelsen D, Garfinkel CI, Butler AH, The Teleconnection of El Niño Southern Oscillation to the Stratosphere, 2019, *Rev. Of Geoph*, <https://doi.org/10.1029/2018RG000596>

Doyle ME, Barros VR. 2002. Midsummer low-level circulation and precipitation in subtropical South America and related sea surface temperature anomalies in the South Atlantic. *J. Clim.* 15: 3394–3410.

Grimm AM, Almeida AS, Beneti CAA, Leite EA, 2019, The combined effect of climate oscillations in producing extremes: the 2020 drought in Southern Brazil, *RBRH*, v. 25, e48, 2020, <https://doi.org/10.1590/2318-0331.252020200116>

Grimm AM, Barros VR, Doyle ME (2000) Climate variability in Southern South America associated with El Niño and La Niña events. *J Clim* 13:35–58

Gronquist P, Yao C, Bem-Num T, Dryden N, Deuben P, Li S, Hoefler T, Deep learning for post processing ensemble weather forecasts, 2020, Deep learning for post-processing ensemble weather forecasts, *Phil. Trans. R. Soc. A* 379: 20200092. <https://doi.org/10.1098/rsta.2020.0092>

Hu Y, Zhou C, Liu J. 2011. Observational evidence for poleward expansion of the Hadley circulation. *Adv. Atmos. Sci.* 28: 33–44.

Jacques-Copper M, Garreaud RD. 2015. Characterization of the 1970s climate shift in South America. *Int. J. Climatol.* 35: 2164–2179.

Le Quesne C, Stahle D, Cleaveland M, Therrell M, Aravena JC, Barichivich J. 2006. Ancient *Austrocedrus* tree-ring chronologies used to reconstruct central Chile precipitation variability from A.D. 1200 to 2000. *J. Clim.* 19: 5731–5744.

Liebmann B, Vera CS, Carvalho LMV, Camilloni IA, Hoerling MP, Allured D, Barros VR, Báez J, Bidegain M. 2004. An observed trend in central South American precipitation. *J. Clim.* 17: 4357–4367.

Liu J, Song M, Hu Y, Ren X. 2012. Changes in the strength and width of the Hadley circulation since 1871. *Clim. Past* 8: 1169–1175.

Mercer A, Predictability of Common Atmospheric Teleconnection Indices Using Machine Learning, 2020, *Procedia Computer Science* 168 (2020) 11–18

Piovano EL, Ariztegui D, Damatto MS. 2002. Recent environmental changes in Laguna Mar Chiquita (central Argentina): a sedimentary model for a highly variable saline lake. *Sedimentology* 49: 1371–1384.

Quarta Comunicação Nacional do Brasil à Convenção-Quadro das Nações Unidas sobre Mudança do Clima, 2020,

Rao VB, Franchito SH, Santo CME, Gan MA. 2016. An update on the rainfall characteristics of Brazil: seasonal variations and trends in 1979–2011. *Int. J. Climatol.* 36: 291–302.

Reboita MA, Ambrizzi T, Crespo, NM, Dutra LMM, Ferreira GWS, Rehbein A, Drumond A, Rocha RP and Souza CA, 2021, Impacts of teleconnection patterns on South America Climate, *ANN NY Acad Sci* (2021) 1-38, doi: 10.1111/nyas.14592

Rodrigues RR, Taschetto AS, Gupta AS and Flotz GR, 2019, Common cause for severe droughts in South America and marine heatwaves in the South Atlantic, *Nature Geosc.* Vol. 12, 620 2019, 620–626, DOI <https://doi.org/10.1038/s41561-019-0393-8>

Rosier SHR, Reese R, GONGES JF, De Rydt JD, Gudmundsson GH, Winkelmann R, 2021, The tipping points and early warning indicators for Pine Island Glacier, West Antarctica, *The Cryosphere*, 15, 1501–1516, 2021, DOI: <https://doi.org/10.5194/tc-15-1501-2021>

Saurral RI, Camilloni IA, Barros VR, Low-frequency variability and trends in centennial precipitation stations in southern South America, *Int. J. Climatol.* 37: 1774–1793 (2017), DOI: 10.1002/joc.4810

Silvestri GE (2004) El Niño signal variability in the precipitation over southeastern South America during austral summer. *Geophys Res Lett* 31. doi:10.1029/2004GL020590

Skansi, M. M., Brunet, M., Sigró, J., Aguilar, E., Arevalo Groening, J. A., Bentancur, O. J., Castellón Geier, Y. R., Correa Amaya, R. L., Jácome, H., Malheiros Ramos, A., Oria Rojas, C., Pasten, A. M., Sallons Mitro, S., Villaroel Jiménez, C., Martínez, R., Alexander, L. V., & Jones, P. D. (2013). Warming and wetting signals emerging from analysis of changes in climate extreme indices over South America. *Global and Planetary Change*, 100, 295–307. <http://dx.doi.org/10.1016/j.gloplacha.2012.11.004>.

Tedeschi R. Collins, M, (2016b). The influence of ENSO on South American precipitation: simulation and projection in CMIP5 models, *Int. J. Climatol*, DOI: 10.1002/joc.4919

Trenary L, DelSole T, Does the Atlantic Multidecadal Oscillation Get Its Predictability from the Atlantic Meridional Overturning Circulation?, 2016, *J. Clim*, 29: 5267–5280, DOI: 10.1175/JCLI-D-16-0030.1

van den Hurk B, Doblas-Reyes F, Balsamo G, Koster R, Seneviratne S, Camargo Jr H, Soil moisture effects on seasonal temperature and precipitation forecast scores in Europe, 2010, *Clim Dyn*, 38, 349–362 (2012)

Wolter, K., and M. S. Timlin, 2011: El Niño/Southern Oscillation behaviour since 1871 as diagnosed in an extended multivariate ENSO index (MEI.ext). *Intl. J. Climatology*, 31, 14pp., 1074–1087. DOI: 10.1002/joc.2336.

Woodruff DS, Slutz RJ, Jenne RL, Steurer PM. 1987. A comprehensive ocean–atmosphere data set. *Bull. Am. Meteorol. Soc.* 68: 521–527.

Yulaeva E, Wallace JM (1994) The signature of ENSO in global temperature and precipitation fields derived from the Microwave Sounding Unit. *J Clim* 7:1719–1736

Zanna, L., 2012: Forecast skill and predictability of observed North Atlantic sea surface temperatures. *J. Climate*, 25, 5047–5056, doi:10.1175/JCLI-D-11-00539.1.