

PREVISÕES DE ANOMALIAS DE TEMPERATURA DA SUPERFÍCIE DO MAR NO ATLÂNTICO TROPICAL USANDO ANÁLISES DE CORRELAÇÕES CANÔNICAS

RITA VALÉRIA ANDREOLI^(*) E MARY TOSHIE KAYANO^(*)

^(*) Instituto Nacional de Pesquisas Espaciais/Centro de Previsão de Tempo e Estudos Climáticos
Avenida dos Astronautas, 1758, 12227-010, Jardim da Granja, São José dos Campos – SP
¹Correspondência: Tel.: (12) 3945-6658, Fax: (12) 3945-6666, E-mail: mary@cptec.inpe.br

Recebido Novembro 2003 - Aceito Outubro 2004

RESUMO

Modelos estatísticos para a previsão de Anomalias de Temperatura da Superfície do Mar (ATSM) no Atlântico Tropical (AT) foram construídos usando análises por correlações canônicas e campos de ATSM do AT e Pacífico Equatorial (PE) como preditores. Os preditores foram considerados de cada mês individual e as previsões foram feitas para 1 a 6 meses de antecedência. Verificações das previsões foram feitas contra as ATSM observadas e persistidas, através de correlações lineares para cada ponto de grade mediadas em área para o Atlântico tropical norte, sul e equatorial (ATN, ATS e AEQ). As previsões de ATSM de março a junho foram melhores no ATN do que as para o ATS e AEQ, com os preditores do AT e PE. Para o ATS e AEQ, as maiores correlações ocorreram para antecedência de 1 mês e a contribuição dos preditores do PE nas previsões de ATSM nessas regiões foi pequena. Os resultados sugerem que o ENOS no Pacífico tem maior influência nas ATSM do ATN e que a variabilidade de TSM no ATS e AEQ está relacionada principalmente às variações atmosféricas locais ou à própria dinâmica oceânica na escala sazonal. Um aspecto explorado neste trabalho refere-se à defasagem entre os preditores do PE e AT. As previsões no ATN são melhores quando os preditores do PE estão adiantados em relação aos do AT. A defasagem entre preditores do PE e AT não havia sido tratada em trabalhos anteriores e os resultados mostram um potencial de uso prático, que poderia ser explorado em rotinas operacionais.

Palavras-chave: Previsão, Temperatura da Superfície do Mar, Atlântico Tropical, Análise por Correlações Canônicas.

ABSTRACT: PREDICTION OF TROPICAL ATLANTIC SEA SURFACE TEMPERATURE ANOMALIES USING CANONICAL CORRELATION ANALYSIS

To predict the sea surface temperature anomalies (SSTA) in the Tropical Atlantic (TA), statistical models were constructed using the canonical correlation analysis and the SSTA in the TA and equatorial Pacific (EP) as predictors. Predictors were for each individual month and the predictions have been done with 1 to 6 months lags. Prediction verifications were done against the observed and persisted SSTA, through linear correlation analysis for each grid point, area averaged for the north, south and equatorial Atlantic (TNA, TSA and EQA). The SSTA predictions for March to June with predictors of the TA and EP were better for the TNA than those for the TSA and EQA. For the TSA and EQA were noted the largest correlations for 1 month lag and small contribution of the EP predictors in predicting SSTA in these regions. The results suggest that ENSO in the Pacific has more influence in the TNA SSTA and the SST variability in the TSA and EQA is related mainly to local atmospheric variations or to seasonal scale ocean dynamics. An aspect explored in this paper refers to put out of phase the EP and TA predictors. The predictions in the TNA are better when the EP predictors lead the TA predictors. The out of phase relation between predictors in the TA and EP was not dealt before and the results show a potential for practical use that should be explored in operational routines.

Key words: Prediction, Sea Surface Temperature, Tropical Atlantic, Canonical Correlation Analysis

1. INTRODUÇÃO

As grandes anomalias de precipitação observadas nas regiões Nordeste e Sul/Sudeste do Brasil, que se refletem em eventos extremos de secas ou inundações, estão associadas a processos de interação oceano-atmosfera em escala global e regional, em particular na Bacia do Atlântico. De fato, numerosas pesquisas têm indicado existir uma forte relação entre

as variações climáticas observadas nos continentes vizinhos ao Atlântico tropical (AT) e as anomalias de Temperatura da Superfície do Mar (TSM) nesta bacia (Enfield, 1996; Nobre e Shukla, 1996). Mais especificamente, sobre o continente sul americano, um exemplo clássico do efeito das variações de TSM no AT no clima regional são as bem conhecidas secas extremas do Nordeste do Brasil (Hastenrath e Heller, 1977; Moura e Shukla, 1981, Enfield, 1996). Estes autores

demonstraram que a variabilidade de precipitação nessa região é altamente correlacionada com as Anomalias de TSM (ATSM) no AT. Este fato implica que uma maior precisão na previsão de ATSM no AT pode ser crucialmente importante para melhorar as previsões climáticas nas regiões continentais adjacentes.

Dois modos de variabilidade climática têm sido observados no AT: um equatorial zonal e outro meridional. O primeiro modo, com flutuações sazonais e interanuais ocorre no setor leste da Bacia do Atlântico e é mais pronunciado no período de junho a agosto (Zebiak, 1993; Carton e Huang, 1994). O outro modo, conhecido como padrão de dipolo, envolve variações de TSM centradas na região dos alísios de nordeste e sudeste, em escalas de tempo sazonal, interanual e decadal (Moura e Shukla, 1981; Servain, 1991). Embora as ATSM referentes a esse modo usualmente apresentem sinais opostos em cada hemisfério, o desenvolvimento destas anomalias não é sempre simultâneo. Devido a essa defasagem, vários autores sugeriram que não existe um acoplamento dinâmico entre as componentes norte e sul do dipolo (Houghton e Tourre, 1992; Enfield e Mayer, 1997; Dommenges e Latif, 2000).

Outro fato a ser considerado é que as flutuações de TSM no AT nas escalas de tempo sazonais a interanuais sofrem influências remotas, sendo o El Niño-Oscilação Sul (ENOS) no Pacífico uma possível fonte de forçantes externas. Essa relação tem sido demonstrada em diversos trabalhos (Delecluse et al., 1994; Enfield e Mayer, 1997). Delecluse et al. (1994) mostraram que condições anômalas no Pacífico durante 1982-83 criaram condições favoráveis para o desenvolvimento de anomalias no AT, através dos distúrbios na circulação atmosférica. No mesmo contexto, Enfield e Mayer (1997) mostraram que a variabilidade de TSM no Pacífico Equatorial é mais fortemente correlacionada com a variabilidade da TSM no Atlântico Tropical Norte (ATN), com aquecimento nesta região ocorrendo 4 a 5 meses após a fase madura do evento quente no Pacífico. Assim, os desenvolvimentos dos padrões de dipolo e equatorial no AT podem estar associados com o ENOS.

Estudos anteriores mostraram que as previsões de ATSM no ATN, com antecedência de alguns meses a um ano, são melhores se os preditores forem as ATSM da região tropical global em vez de ATSM somente do AT. Essa dependência da localização do preditores não foi notável no caso das previsões de ATSM das regiões equatorial e do Atlântico Tropical Sul (ATS). Para essas áreas a persistência tem bom desempenho (Penland e Matrosova, 1998; Repelli e Nobre, 1996; Ruiz de Elvira et al., 2000). Embora esses estudos mostrem resultados promissores para a previsão de ATSM, principalmente na região do ATN, a previsibilidade de TSM no AT precisa ser melhor investigada, especialmente no que diz respeito à importância das influências remotas versus influências locais, bem como a capacidade dos modelos estatísticos em prever mudanças dos padrões de variabilidade de TSM. Assim o presente trabalho investigará os desempenhos de modelos estatísticos lineares para previsão de ATSM do AT, considerando um período de 47 anos, comparando as previsões com as observações e com as ATSM persistidas. Serão usados modelos mensais ao invés de um modelo considerando todos os meses do ano, e preditores

de diferentes regiões selecionados simultaneamente e com defasagem entre eles, que são aspectos que diferenciam este trabalho dos anteriores.

2. DADOS E METODOLOGIA

Os dados utilizados são de TSM do “Comprehensive Ocean Atmosphere Data Set” (COADS). Esses dados encontram-se documentados em da Silva et al. (1994) e consistem de campos globais médios mensais com uma resolução horizontal de 1° em latitude por 1° em longitude, para o período de janeiro de 1945 a dezembro de 1993. Os dados do COADS contêm informações de navios mercantes e nos últimos anos incluem informações de satélite. A densidade de informações de navios no ATN é maior do que no ATS. No entanto, antes da disponibilização desse conjunto de dados à comunidade científica, sua qualidade foi avaliada por métodos estatísticos, o que garante sua confiabilidade (Wolter, 1997). Além disso, não se espera que a qualidade dos dados possa influir na qualidade da previsão. Para redução do tempo computacional, os dados originais foram selecionados para uma grade de 4° em latitude por 4° em longitude o que não compromete a representação dos padrões de grande escala.

Modelos de previsão de ATSM no AT são construídos com a técnica de Análise de Correlações Canônicas (ACC) frequentemente usada como uma técnica de previsão (Barnett e Preisendorfer, 1987; Barnston e Ropelewski, 1992, Landman e Mason, 2001). Uma descrição detalhada dessa técnica e do procedimento utilizado para prever ATSM no AT pode ser encontrada em Graham et al. (1987a e b).

2.1. Procedimento para construção dos modelos estatísticos

As ATSM na região do AT são previstas utilizando a técnica de ACC. Os campos preditando são de ATSM no AT (66,5°W e 17,5°E; 30°N e 30°S) e os preditores são os campos de ATSM em regiões selecionadas do Atlântico e Pacífico. Inicialmente, para comparar os efeitos de influências locais ou remotas na previsibilidade de ATSM no AT, dois conjuntos de preditores foram considerados: preditor 1, ATSM do AT e Pacífico Equatorial (PE - 157,5°E e 84,5°W; 5,5°N e 6,5°S); preditor 2, ATSM somente do AT. Pré-ortogonalizações usando análises de Funções Ortogonais Empíricas (FOE) (Barnston, 1994) foram realizadas, separadamente, nos campos dos preditores e preditando, por causa do grande número de variáveis altamente correlacionadas e poucas observações contidas nesses campos. Essa pré-ortogonalização faz com que a ACC focalize-se nos modos de variabilidade dominantes dentro de cada conjunto de dados de entrada, e em princípio os ruídos de pequena escala são filtrados.

O propósito de considerar dois domínios é para comparar a importância relativa das regiões preditoras; ainda assim, é difícil fazer uma clara comparação. Se truncarmos o número de modos da FOE tal que a mesma quantidade de variância (por ex., 80%) é retida nos preditores 1 e 2, mais

variância na região do predictando (AT) é retida no predictor 2 (somente AT) do que no predictor 1 (AT e PE). Além disso, o número de modos retidos para os preditores é diferente. Se for requerido igual número de modos para os preditores, a quantidade de variância retida na região do predictando é diferente nos dois conjuntos. Optou-se por escolher igual número de modos de preditores (10 modos) em cada domínio do predictor. O mesmo número de modos foi selecionado para o campo predictando. Os 10 modos para os preditores 1 e 2 explicam (75-80%) e (67-72%) da variância, respectivamente. As séries temporais obtidas nas análises de FOE são então utilizadas nos cálculos da ACC. As previsões são realizadas considerando os 10 modos canônicos.

Para cada experimento, predictor 1 e predictor 2, são considerados os campos de ATSM dos meses de janeiro a dezembro, individualmente, como preditores e os campos predictandos são de ATSM selecionados até seis meses seguintes. Isso permite identificar a(s) área(s) e a máxima antecedência com a qual se podem conseguir as melhores previsões com os modelos estatísticos.

O procedimento escolhido para testar o desempenho dos modelos estatísticos é o método de validação cruzada (Barnett e Preisendorfer, 1987; Landman e Mason, 1999). Para cada tempo η , onde $1 \leq \eta \leq n$, o η -ésimo par de campos do predictor e predictando é excluído, e os $n-1$ campos restantes, são usados para construir um modelo. A previsão do predictando no tempo η é então realizada com esse modelo. Esse procedimento é repetido n vezes, seqüencialmente omitindo-se um único par de campos do predictor e predictando. Isso resulta em séries de n previsões. No caso em questão, com observações de 1945 a 1993 (49 anos) um ano entre 1945 e 1993, bem como estes anos limítrofes são excluídos e a ACC é usada para desenvolver um modelo de previsão com os 46 anos restantes. Assim, sucessivamente, são construídos 47 modelos. Os modelos excluindo-se o primeiro e último anos não são construídos em vista das antecedências usadas nas previsões. Os dados do predictor, previamente reconstruídos com base nos autovetores retidos para a construção do modelo de cada ano excluído, são então utilizados para gerar os campos dos predictandos para o respectivo ano excluído.

Vale salientar que os campos previstos pelos modelos representam 70-80% da variância total dos dados e que nenhum fator de ajuste é utilizado para a correção da magnitude das anomalias previstas. Assim, opta-se em fazer a comparação considerando os campos observados reconstruídos a partir dos autovetores e autovalores utilizados nas construções dos modelos. A verificação das previsões é feita para cada mês, e em cada ponto de grade do campo do predictando calculando-se o coeficiente de correlação linear entre a série observada reconstruída e a prevista pelo modelo. De fato, o coeficiente de correlação é uma medida da variância-ajustada da performance do modelo (Ward e Folland, 1991). Os resultados são apresentados como médias do coeficiente de correlação sobre as áreas do ATN (5,5°N e 17,5°N; 60°W e 20°W), ATS (18,5°S e 6,5°S; 30°W e 10°E) e Atlântico Equatorial (AEQ, 6,5°S e 5,5°N; 30°W e 10°E). Essas regiões correspondem àquelas

utilizadas por Penland e Matrosova (1998). A Figura 1 ilustra as regiões utilizadas como campos preditores (PE e AT) e predictando (AT), juntamente com as três regiões selecionadas para as análises dos resultados.

Para testar a significância estatística dos coeficientes de correlação encontrados, nos experimentos, o número de graus de liberdade é o número de anos utilizados para verificação (47 anos). Assim, utilizando o teste t de Student, somente correlações superiores a 0,3 e 0,4 são significativas ao nível de 95% e 99%, respectivamente (Panofsky e Brier, 1968). Para finalizar, as previsões obtidas com os modelos estatísticos são comparadas com as previsões obtidas pela persistência das ATSM no AT.

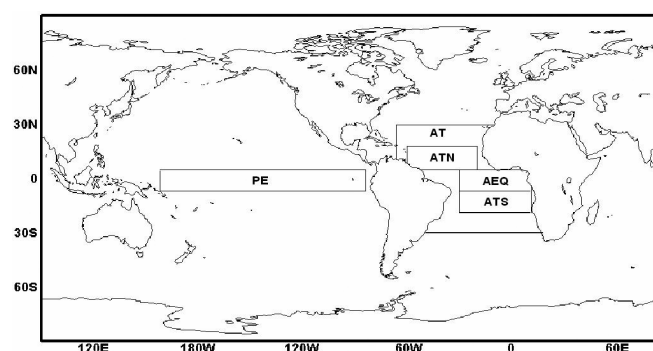


Figura 1: Localização geográfica das duas regiões predictoras, Pacífico Equatorial (PE) e Atlântico Tropical (AT) e das quatro regiões dos predictandos, AT, Atlântico tropical norte (ATN), Atlântico tropical sul (ATS) e Atlântico equatorial (AEQ).

3. RESULTADOS

3.1. Previsões de anomalias de TSM para as regiões do ATN, ATS e AEQ

Médias para o ATN das ATSM mensais previstas (com os preditores 1 e 2) e observadas para cada mês do período 1946 a 1992, são mostradas na Figura 2. As previsões mostradas são para antecedência de 3 e 6 meses. As correlações lineares entre as séries de ATSM médias do ATN observadas e previstas com o predictor 1 são de 0,57 e 0,50, e com o predictor 2 são de 0,49 e 0,29, para as antecedências de 3 e 6 meses, respectivamente. Esses valores de correlação indicam uma melhor previsibilidade quando as ATSM do PE além das do AT são incluídas como predictoras. Neste caso, as previsões reproduzem uma porção significativa da variabilidade de TSM no AT, como confirma a consistência entre as previsões e as observações principalmente na escala de tempo decadal, a partir da década de 70. Também, uma boa concordância é notável durante os períodos de 1957-58, 1965-66, 1968-71, 1974-76, 1982-83, 1987-90.

A Figura 3 mostra os ciclos anuais para o ATN das correlações entre as ATSM previstas e observadas, bem como entre ATSM persistidas e observadas, para antecedência de 1 a 6 meses. As previsões com o predictor 1 são em geral melhores do que as com o predictor 2 e a persistência, para

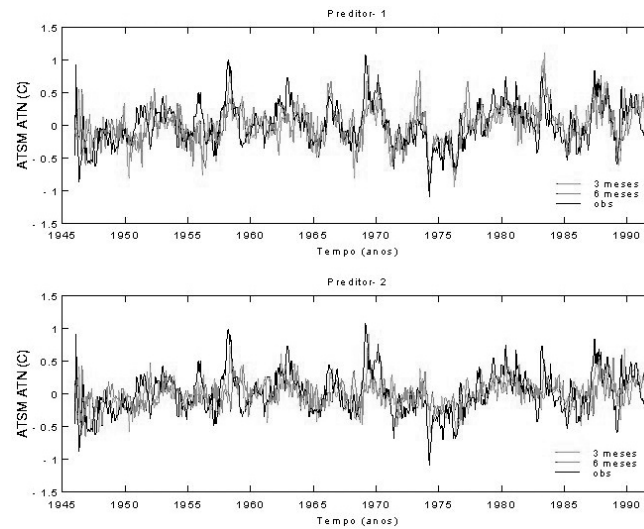


Figura 2: Médias para o ATN das ATSM (°C) mensais previstas e observadas para cada mês do período de 1946 a 1992, para: preditor 1 e preditor 2.

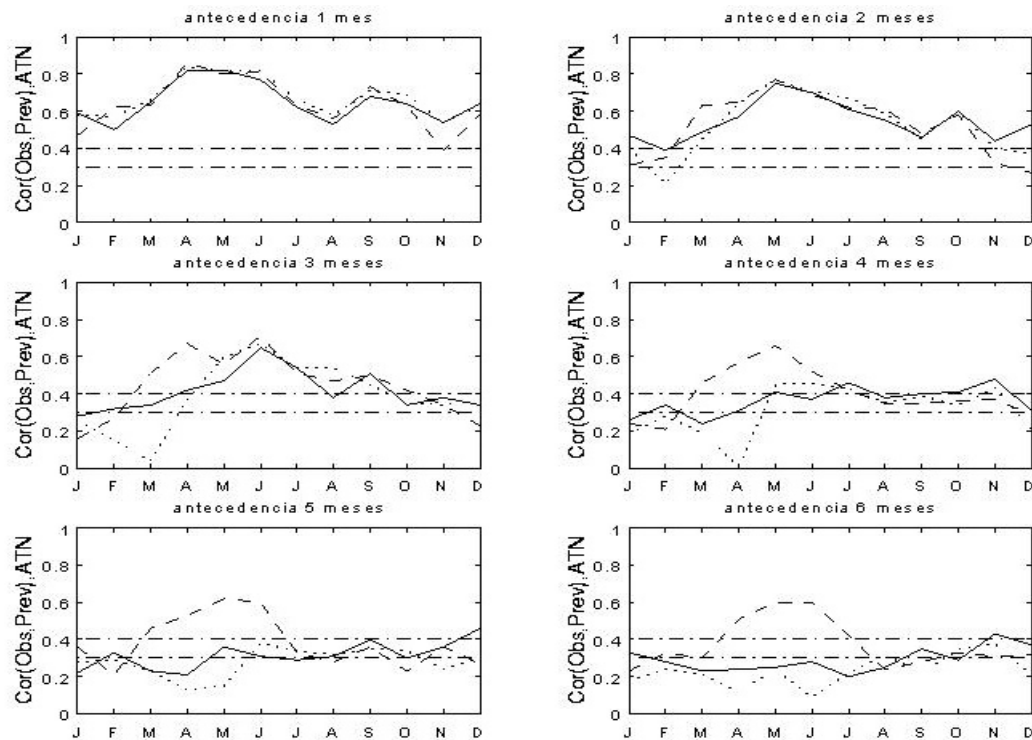


Figura 3: Correlações entre ATSM previstas pela ACC para os preditores 1 e 2 e observadas (linhas tracejadas e pontilhadas, respectivamente), e ATSM persistidas e observadas (linha contínua) no ATN, para antecedências de 1 a 6 meses. As linhas horizontais (tracejadas com traços e pontos) indicam valores limites para as correlações serem significativas nos níveis de confiança de 95% e 99%, respectivamente.

os meses de março a junho e antecedência maior que 3 meses. Isso é particularmente notável em maio ou junho, dependendo da antecedência. As melhores previsões com 1 a 2 meses de antecedência ocorrem de março a junho, não sendo destacado o melhor desempenho dos modelos do preditor 1 em relação aos do preditor 2 e persistência. As previsões de março e abril com

3 meses de antecedência com o preditor 1 são melhores do que as com o preditor 2 e persistência. As melhores previsões de março a junho indicam que os preditores de novembro a março são bons. Boas previsões de abril a junho também são obtidas com o preditor 2 de março. O pior desempenho dos modelos do preditor 2 ocorre de fevereiro a abril com o preditor de

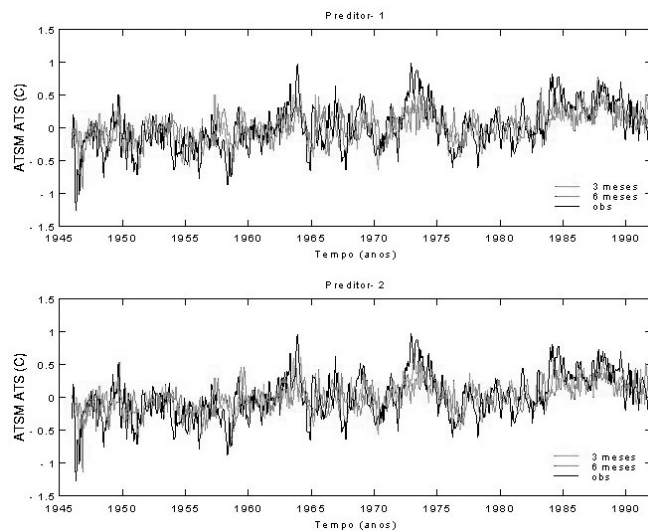


Figura 4: Idem Figura 2, exceto para o ATS.

dezembro e para 2 a 4 meses de antecedência. Por outro lado, as piores previsões do preditor 1 não ocorrem em um período definido, mas com o preditor de outubro e preditandos de novembro, dezembro, janeiro e fevereiro.

Médias para o ATS das ATSM mensais previstas (com os preditores 1 e 2) e observadas para cada mês do período 1946 a 1992 são mostradas na Figura 4. As previsões mostradas são para 3 e 6 meses de antecedência. Neste caso, as correlações lineares entre as séries de ATSM médias do ATS observadas e previstas são de 0,58 (0,40) tanto para o preditor 1 quanto para o preditor 2 e antecedência de 3 (6) meses. Portanto, em contraste ao ATN, a previsibilidade de TSM no ATS parece não ser dependente de influências remotas. Nota-se ainda nessa figura uma tendência linear de aumento de ATSM no ATS. Essa tendência pode estar relacionada à ocorrência de uma mudança climática significativa sobre o clima global em meados da década de 70 (Mantua et al., 1997).

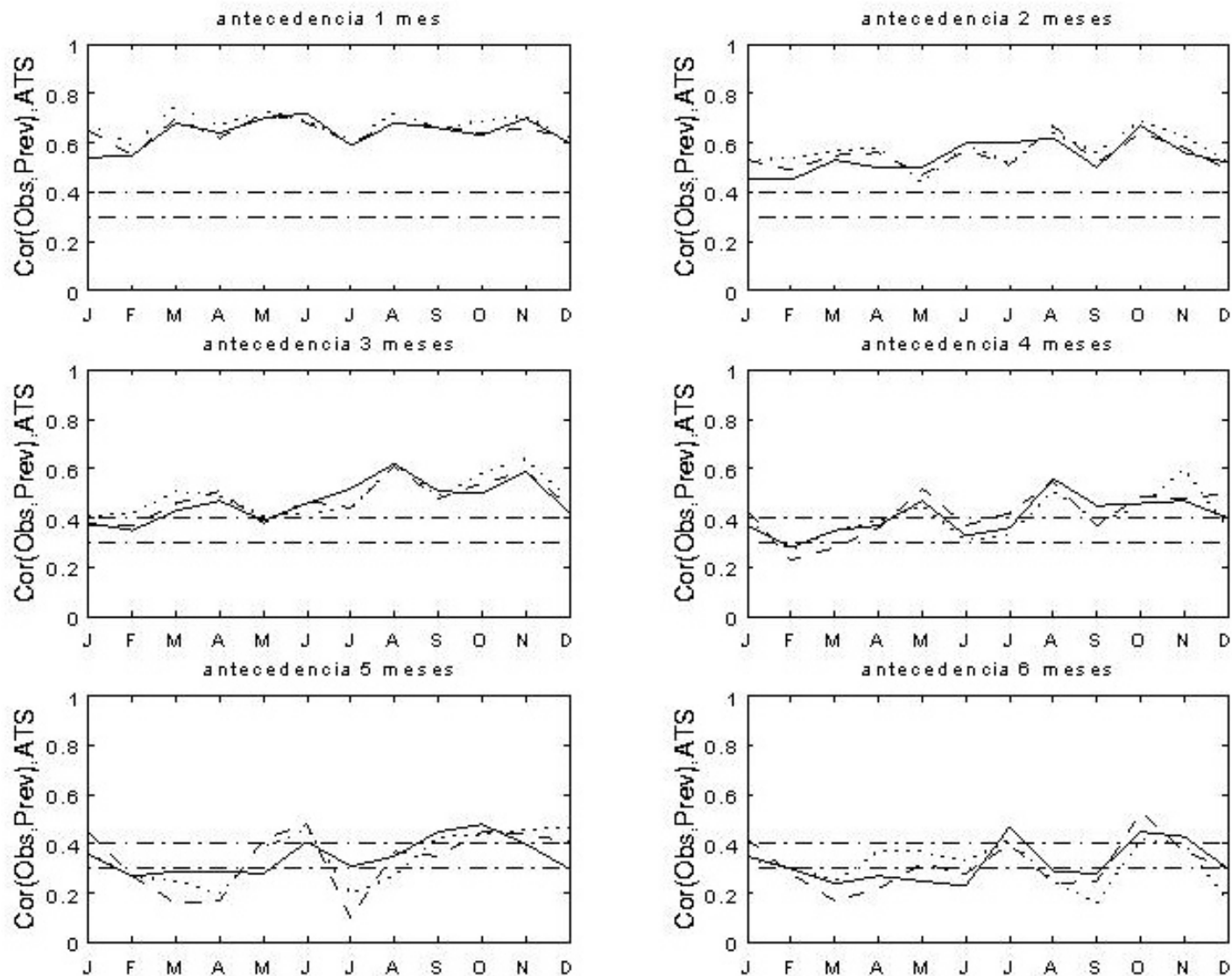


Figura 5: Idem Figura 3, exceto para o ATS.

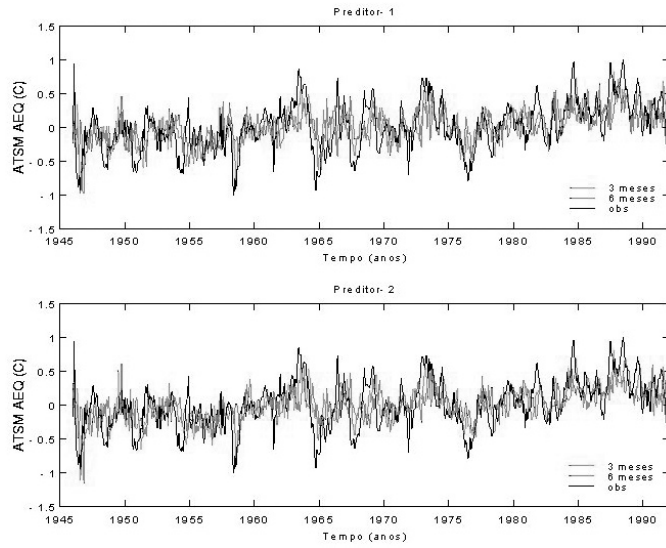


Figura 6: Idem Figura 2, exceto para o AEQ.

Os ciclos anuais para o ATS das correlações entre as ATSM previstas e observadas, bem como entre ATSM persistidas e observadas, para 1 a 6 meses de antecedência são mostrados na Figura 5. As maiores correlações ocorrem para previsões com 1 mês de antecedência com máximos de 0,75 em março e 0,72 em maio para os preditores 1 e 2, respectivamente. Previsões com maior antecedência mostram uma redução nos valores das correlações. Em geral, as correlações do preditor 2 são maiores que as do preditor 1, para todas as antecedências. Em relação à persistência, os modelos do preditor 2 são ligeiramente melhores em alguns casos. Esses resultados indicam que a previsibilidade do ATS pode estar relacionada mais aos efeitos locais do que a influências remotas.

Médias para o AEQ das ATSM mensais previstas (com os preditores 1 e 2) e observadas para cada mês do período 1946 a 1992 são mostradas na Figura 6. As previsões ilustradas são para 3 e 6 meses de antecedência. As correlações entre as séries observadas e previstas são de 0,62 (0,39) tanto para o preditor 1 quanto para o preditor 2 com antecedência de 3 (6) meses. Como para o ATS, a previsibilidade de TSM nessa região está relacionada mais aos efeitos locais do que a influências remotas.

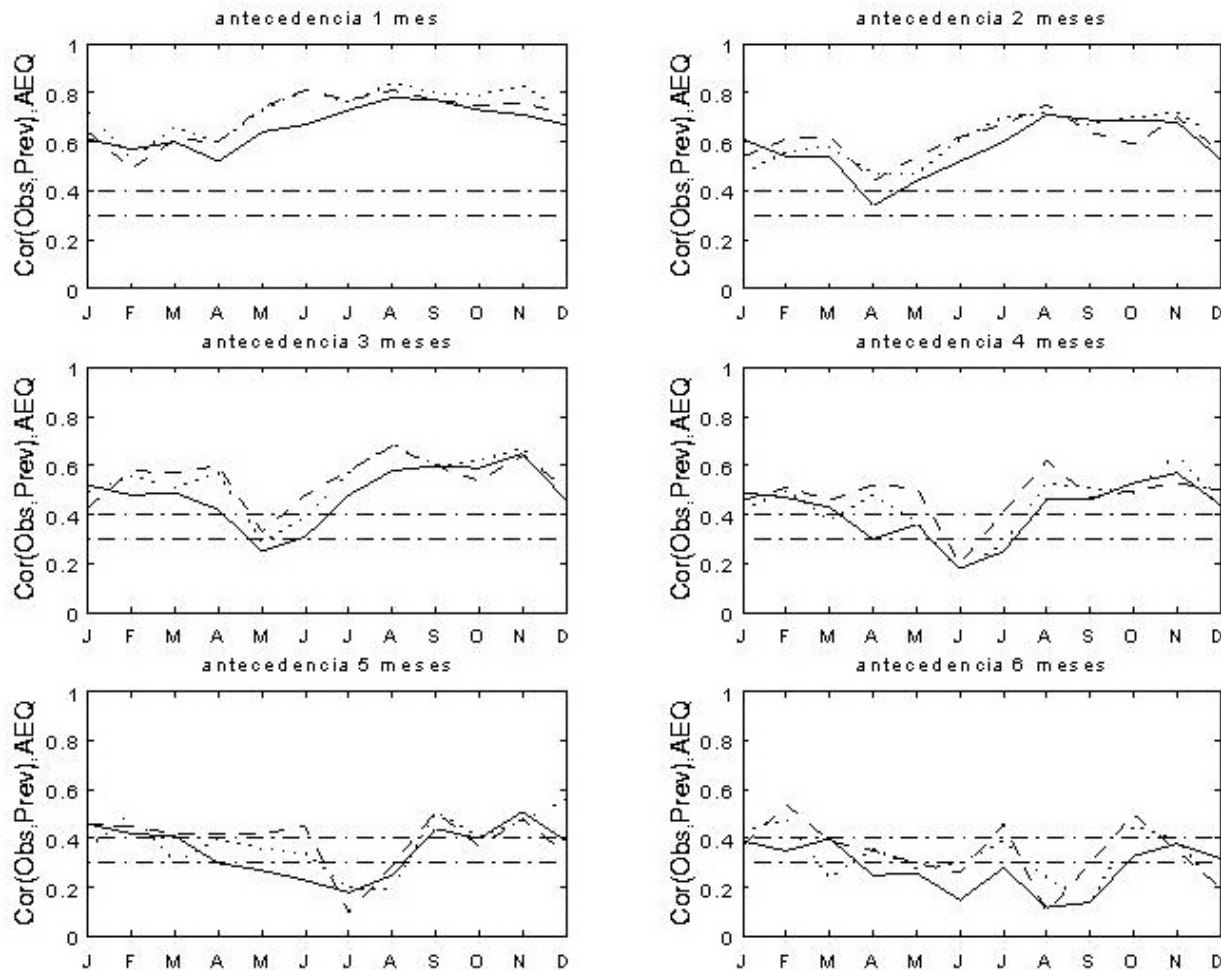


Figura 7: Idem Figura 3, exceto para o AEQ.

Os ciclos anuais para o AEQ, das correlações entre as ATSM previstas e observadas e entre ATSM persistidas e observadas, para antecedência de 1 a 6 meses são mostrados na Figura 7. Para previsões com 1 mês de antecedência, os coeficientes de correlação para o preditor 2 atingem valores maiores que 0,6, exceto em fevereiro, e as melhores previsões ocorrem nos meses de agosto e novembro. Para essa mesma antecedência, as correlações médias para as previsões de junho a dezembro com o preditor 2 são maiores do que aquelas com o preditor 1. Para antecedências maiores, os coeficientes de correlação dos modelos do preditor 1 são maiores que os do preditor 2 em muitos casos. Em relação à persistência, os modelos dos preditor 2 e preditor 1 apresentam melhor desempenho em muitos casos.

Comparando as Figuras 2, 4 e 6 algumas características na previsão de ATSM podem ser notadas. O ATN apresenta melhor previsibilidade com os modelos do preditor 1, para 6 meses de antecedência. Em vista do preditor 1 incluir as TSM do PE, este resultado reforça a importância do ENOS nas TSM do ATN. Por outro lado, o AEQ e ATS apresentam melhor previsibilidade para antecedências menores e com os modelos do preditor 2, que incluem as TSM somente do AT, o que indica que os efeitos locais são mais importantes do que os remotos.

As correlações entre as previsões com alguns meses de antecedência e observações para a ATN são maiores do que as para o ATS e AEQ quando usados os modelos do preditor 1, e os meses previstos são de março a junho. Esse resultado reforça a importância de se usar os preditores do PE além do AT. Embora nesta análise não seja considerada a natureza da influência do PE, esse resultado é consistente com os de trabalhos anteriores. De fato, a tendência do ATN ser melhor previsto ao se incluir os preditores do PE além do AT (preditor 1), também foi notada por Penland e Matrosova (1998) e Ruiz de Elvira et al. (2000). Isso sugere que os fenômenos como o ENOS, que modulam as variações de TSM no PE, têm maior influência nas variações da TSM do ATN do que nas do ATS e AEQ. A melhor previsibilidade das TSM do ATN, de março a junho e antecedência de 3 a 6 meses, indica que os preditores são de novembro a março, que corresponde ao período em que geralmente ocorre a fase madura dos extremos do ENOS no PE. A inclusão do preditor do PE não melhora o desempenho dos modelos para previsões dos meses de julho a janeiro.

As maiores correlações entre previsões e observações no ATS e AEQ ocorrem com antecedência de 1 mês para os preditores 1 e 2. No caso do ATS, em geral, as correlações para o preditor 2 (preditor no AT) são maiores do que as para o preditor 1 (preditores no AT e PE), para todas as antecedências. Isso sugere que a variabilidade de TSM no ATS está relacionada, principalmente, a variações atmosféricas e oceânicas locais. Em relação à persistência, o preditor 2 é melhor para os meses de março a agosto no ATS, para antecedência de 1 mês. Para maiores antecedências, o desempenho da persistência é comparável, ou melhor, do que o dos modelos do preditor 2. Por outro lado, para o AEQ, em geral, as correlações para o preditor 1 são maiores que as para o preditor 2 e as da persistência, para todas as antecedências.

3.2. Defasagens entre os preditores do Pacífico e do Atlântico

Como visto anteriormente, a previsibilidade na região do ATN aumenta quando se incluem como preditores as TSM do PE além das do AT. Nesta seção é investigada a previsibilidade de ATSM no AT quando se consideram defasagens entre os preditores do PE e do AT. Neste caso os campos preditores são obtidos considerando os preditores do PE simultâneos e adiantados em 1 mês, 3 meses e 5 meses em relação aos do AT. Os meses de março a agosto são discutidos em detalhes porque, de forma geral, apresentam melhor desempenho dos modelos e correspondem aos meses nos quais os padrões de dipolo e equatorial são melhor definidos.

A Figura 8 mostra os coeficientes de correlações entre ATSM prevista e observada para o ATN. As comparações que se seguem são feitas em relação aos coeficientes de correlação entre ATSM prevista e observada com os preditores simultâneos no AT e PE. Notam-se maiores correlações de março a julho e com respectiva antecedência de 1 a 5 meses, quando os preditores do PE estão adiantados em um mês em relação aos do AT. Maiores correlações são encontradas em maio, para 2 e 3 meses de antecedência, e em junho e julho para antecedências menores que 4 meses, quando os preditores do PE estão adiantados em 3 meses em relação aos do AT. O aumento dos valores de correlação quando se considera o PE adiantado em 3 meses em relação ao AT também é notado para o mês de maio para as regiões do ATS e AEQ. Para os outros meses um ligeiro acréscimo nos valores de correlações ocorre de forma aleatória para essas regiões (figuras não mostradas). Nos casos do ATS e AEQ, o fato de a previsibilidade de TSM nessas regiões ser mais dependente de fatores locais justifica a pequena variação nos coeficientes de correlação quando se inclui defasagem nos preditores do AT e PE em relação a preditores simultâneos.

3.3. Padrões espaciais de anomalias da TMS previstas sobre o AT

Foi demonstrado acima que os modelos estatísticos com os preditores 1 e 2 têm potencial para fornecer previsões úteis. No entanto, em muitos casos o desempenho da persistência é comparável aos (ou melhor do que os) modelos. Porém, uma vantagem de se utilizar o modelo estatístico em relação à persistência está relacionada à capacidade dos modelos para detectar mudanças dos padrões. Com o intuito de explorar melhor essa questão, as previsões para alguns meses do ano de 1989 são apresentadas. A escolha desse ano deve-se ao fato de ter sido observada uma evolução do padrão de dipolo para um monopolo de março a agosto. De fato, o padrão de dipolo, evidente nos meses de março a maio evolui para um padrão de ATSM com mesmo sinal nos três meses subsequentes (Figura 9).

As previsões de ATSM para março a agosto de 1989 com os modelos do preditor 1 e a persistência para 1, 3 e 5 meses de antecedência são mostradas na Figuras 10, 11 e 12,

respectivamente. Para 1 mês de antecedência, tanto os modelos estatísticos quanto a persistência detectam a evolução do padrão de dipolo para monopolo e reproduzem razoavelmente bem os campos observados de março a junho. Já para os meses de julho e agosto, as previsões apresentam melhor desempenho ao sul do equador (Figura 10).

Para 3 meses de antecedência é evidente o melhor desempenho dos modelos estatísticos em relação à persistência,

para os meses de março a junho, enquanto os campos de ATSM de julho e agosto não são bem previstos pelos modelos estatísticos ou pela persistência (Figura 11). Para 5 meses de antecedência (Figura 12), o modelo estatístico reproduz o padrão de ATSM na região do ATN em março e abril, o que não é notado para os campos persistidos. Esses resultados confirmam a tendência da região do ATN ser melhor prevista para os períodos de março a junho, para antecedências maiores que dois meses e os preditores nas regiões do AT e PE.

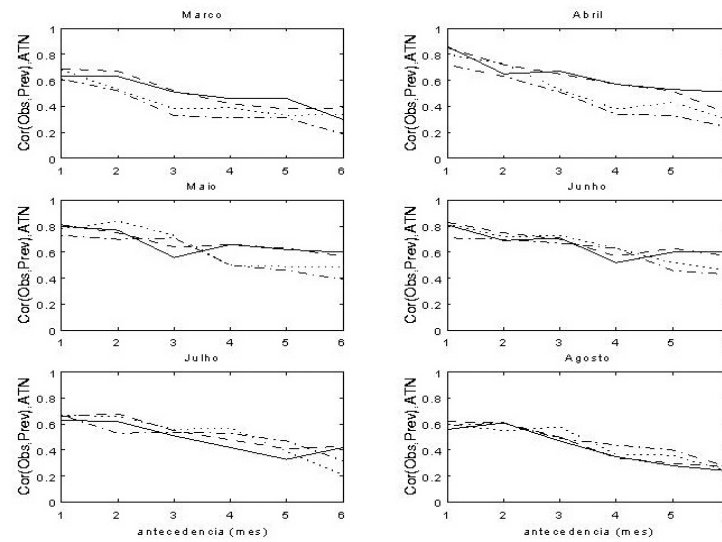


Figura 8: Correlações entre ATSM previstas pela ACC para o preditor 1 e observadas, para antecedências de 1 a 6 meses, considerando: preditores do AT e PE simultâneos (linha contínua), preditores do PE adiantados 1 mês em relação aos do AT (linha tracejada), preditores do PE adiantados 3 meses em relação aos do AT (linha pontilhada) e preditores do PE adiantados 5 meses em relação aos do AT (linha com traço e ponto).

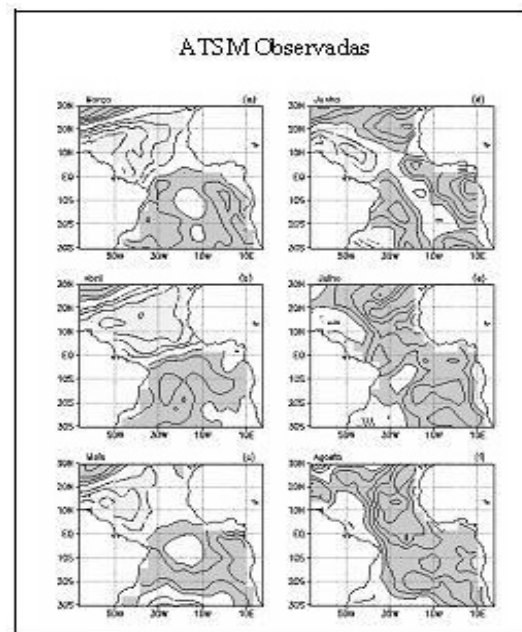


Figura 9: ATSM observadas ($^{\circ}\text{C}$) no AT em 1989 para os meses: (a) março, (b) abril, (c) maio, (d) junho, (e) julho e (f) agosto. Intervalo de contorno é de 0,2. Sombreado escuro (claro) indica valores maiores (menores) que 0,2 (-0,2).

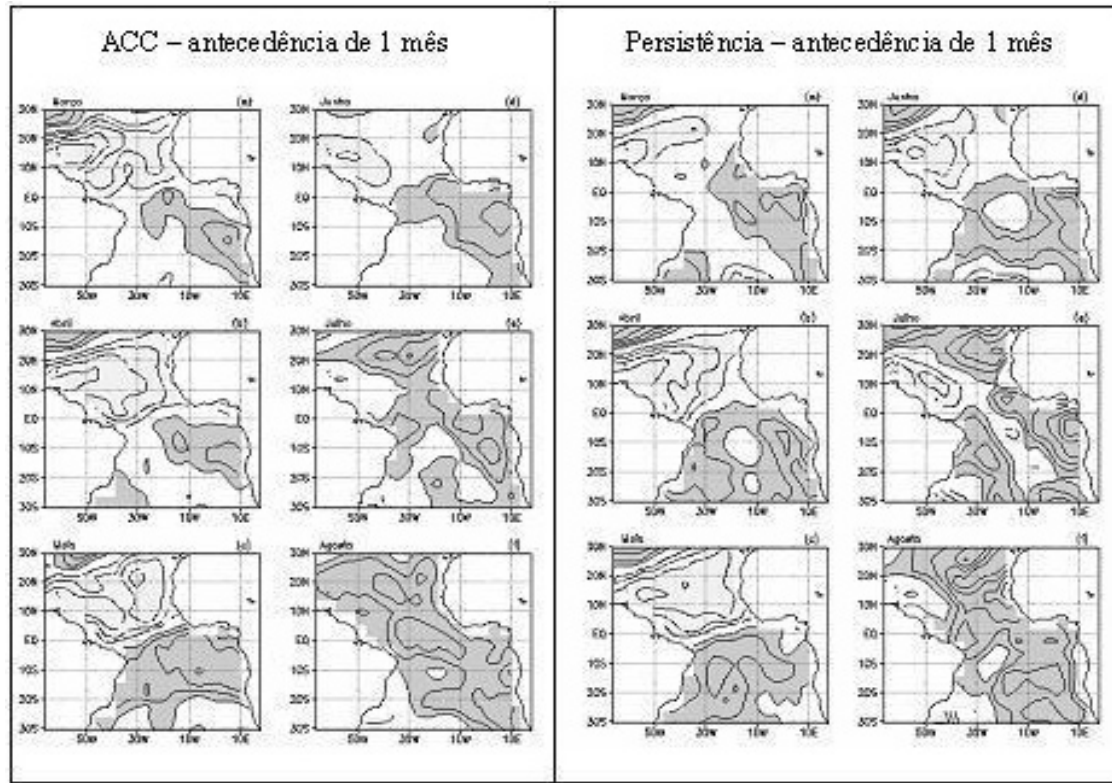


Figura 10: ATSM previstas (°C) pela ACC e o preditor-2 e as previstas pela persistência, em 1989, com antecedência de 1 mês, para os meses de: (a) março, (b) abril, (c) maio, (d) junho, (e) julho e (f) agosto. Intervalo de contorno é de 0,2. Sombreado escuro (claro) indica valores maiores (menores) que 0,2 (-0,2).

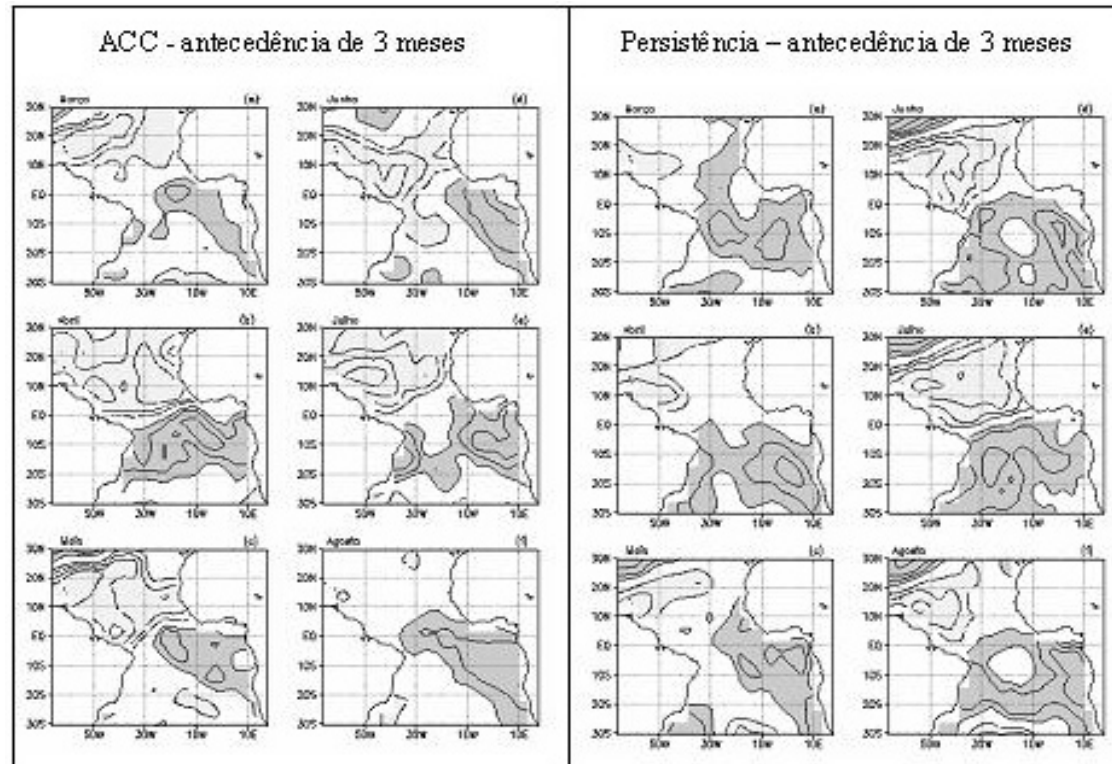


Figura 11: Idem a Figura 10, mas para antecedência de 3 meses.

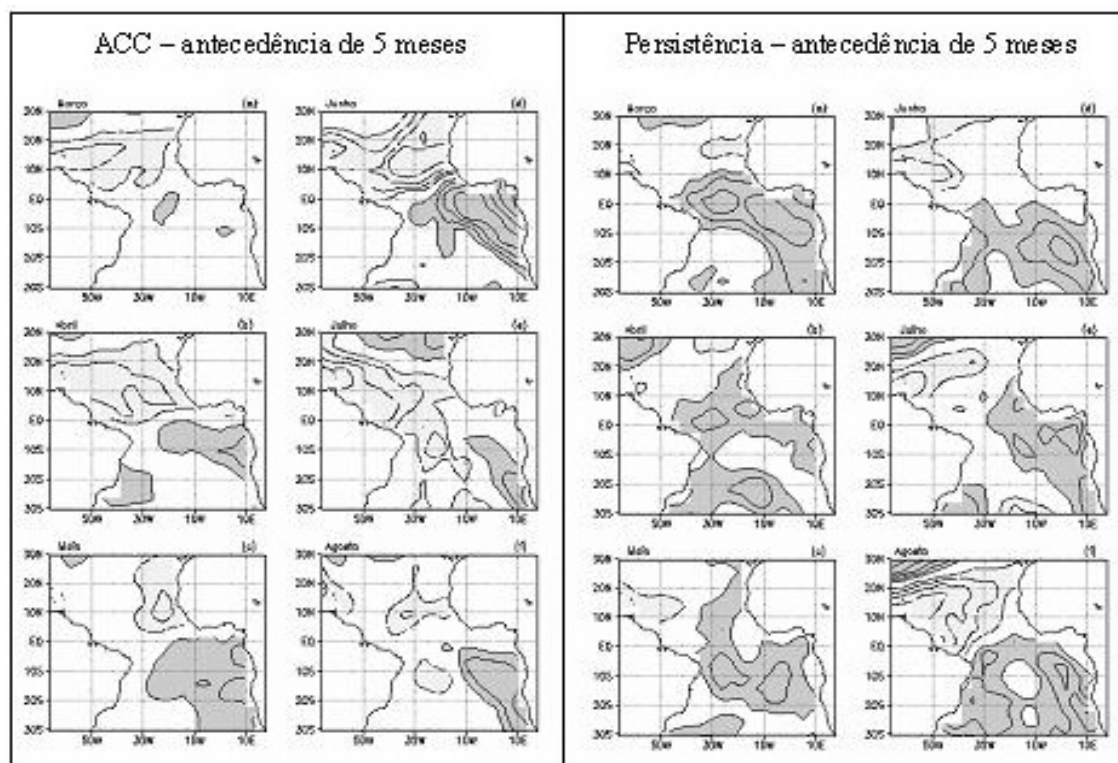


Figura 12: Idem a Figura 10, mas para antecedência de 5 meses.

4. CONCLUSÕES

Modelos estatísticos para a previsão de ATSM do AT foram construídos usando análises por correlações canônicas e campos de ATSM do AT e PE como preditores. Os modelos foram construídos considerando individualmente cada mês de janeiro a dezembro como preditores e as previsões foram feitas para 1 a 6 meses de antecedência. Verificações dessas previsões foram feitas contra as ATSM observadas e persistidas, através de correlações lineares para cada ponto de grade que foram mediadas em área para o ATN, ATS e AEQ separadamente.

Essas verificações indicaram melhores previsões de TSM, de março a junho, no ATN do que as para o ATS e AEQ, com os preditores do AT e PE. A tendência para o ATN ser melhor previsto ao se incluir os preditores do PE além do AT, também notada em trabalhos anteriores (Penland e Matrosova, 1998), sugere que o ENOS no Pacífico tem maior influência nas ATSM do ATN. Por outro lado, este trabalho mostrou que a previsibilidade no ATN aumenta quando se considera os preditores de março a junho e antecedências de 3 a 6 meses. Isso implica que os preditores são dos meses de novembro a março. Para previsões feitas para os preditores de julho a janeiro a inclusão dos preditores do PE além do AT não melhorou o desempenho dos modelos. Assim, tal inclusão pode ser restrita aos meses de novembro a março, para antecedências de 1 a 6 meses. Para os demais meses, pode ser considerado somente o preditor no AT.

Para o ATS e AEQ as maiores correlações ocorreram

para antecedência de 1 mês e a contribuição dos preditores do PE nas previsões de ATSM nessas duas regiões foi pequena. Esses resultados sugerem que a variabilidade de TSM nessas regiões está relacionada principalmente às variações atmosféricas locais ou à própria dinâmica oceânica na escala de tempo sazonal.

Assim, pode-se inferir que as ATSM podem ser melhor previstas no ATN e com uma antecedência maior que aquela dos ATS e AEQ, somente para o período de março a junho, quando se utiliza os preditores do PE e do AT. Para os outros meses as previsões não são influenciadas pelos preditores do PE e os modelos estatísticos que utilizam somente os preditores do AT prevêm razoavelmente os campos de ATSM.

No que se refere à defasagem entre os preditores do PE e AT, as previsões no ATN são melhores, quando os preditores do PE estão adiantados em relação aos do AT. Para defasagem de 1 mês entre os preditores do PE e os do AT, há uma melhora nas previsões para os meses de março a julho e com respectiva antecedência de 1 a 5 meses. Para defasagem de 3 meses, melhores previsões ocorrem para o mês de maio para 2 e 3 meses de antecedência, e para os meses de junho e julho para antecedências menores que 4 meses. A defasagem entre preditores do PE e AT não havia sido tratada em trabalhos anteriores e os resultados aqui apresentados mostram um potencial de uso prático, que poderia ser explorado em rotinas operacionais.

Um outro aspecto explorado no presente trabalho

se refere à capacidade dos modelos estatísticos para detectar mudanças dos padrões de ATSM, principalmente para antecedências maiores que três meses. Vale ressaltar, que a persistência não captura estas mudanças.

5. REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS

- BARNETT, T. P.; PREISENDOFER, R. Origins and levels of monthly and seasonal forecast skill for United States surface air temperatures determined by canonical correlation analysis. **Mon. Wea. Rev.**, v. 115, n. 9, p. 1825-1850, 1987.
- BARNSTON, A. G. Linear statistical short-term climate predictive skill in the Northern Hemisphere. **J. Clim.**, v.7, p. 1513-1564, 1994.
- BARNSTON, A. G.; ROPELEWSKI, C. F. Prediction of ENSO episodes using canonical correlation analysis. **J. Clim.**, v. 5, n. 11, p. 1316-1345, 1992.
- CARTON, X.A.; HUANG B. Warm events in the tropical Atlantic. **J. Phys. Oceanogr.**, v. 24, n. 5, p. 888-903, 1994.
- DA SILVA, A M.; YOUNG, C. C.; LEVITUS, S. **Atlas on Surface Marine Data. Vol. 1: Algorithms and Procedure.** Nesdis: NOAA, 1994. 83 p. (NOAA Atlas NESDIS 6).
- DELECLUSE, P.; SERVAIN J.; LEVY C.; ARPE K.; BENGTTSSON L. On the connection between the 1984 Atlantic warm event and the 1982-83 ENSO. **Tellus A**, v. 46, n. 4, p. 448-464, 1994.
- DOMMENGET, D.; LATIF M. Interannual to Decadal variability in the Tropical Atlantic. **J. Clim.**, v. 13, n. 4, p. 777-792, 2000.
- ENFIELD, D.B. Relationships of inter-American rainfall to tropical Atlantic and Pacific SST variability. **Geophys. Res. Lett.**, v. 23, n. 23, p. 3305-3308, 1996.
- ENFIELD, D. B.; MAYER D. A. Tropical Atlantic SST variability and its relation to El Niño-Southern Oscillation. **J. Geophys. Res.**, v. 102, n. C1, p. 929-945, 1997.
- GRAHAM, N. E.; MICHAELSEN, J.; BARNETT, T. P. An investigation of El Niño - Oscillation Cycle with statistical models 1. Predictor field characteristics. **J. Geophys. Res.**, v. 92, n. C13, p. 14,251-14,270, 1987a.
- GRAHAM, N. E.; MICHAELSEN, J.; BARNETT, T. P. An investigation of El Niño - Oscillation Cycle with statistical models 2. Model results. **J. Geophys. Res.**, v. 92, n. C13, p. 14,271-14,289, 1987b.
- HASTENRATH, S.; HELLER, L. Dynamics of climate hazards in northeast Brazil, **Quart. J. R. Met. Soc.**, v.103, n.435, p.77-92, 1977.
- HOUGHTON, R.W.; TOURRE Y. M. Characteristics of low-frequency sea surface temperature fluctuations in the tropical Atlantic. **J. Clim.**, v. 5, n.7, p. 765-771, 1992.
- LANDMAN, W. A; MASON, S. J. Operational long-lead prediction of south African rainfall using canonical correlation analysis. **Int. J. Climatol.**, v. 19, n. 10, p. 1073-1090, 1999.
- LANDMAN, W. A; MASON, S. J. Forecasts of near-global sea surface temperature using canonical correlation analysis. **J. Clim.**, v. 15, n. 18, p. 3819-3833, 2001.
- MANTUA, N.J.; HARE, S.R.; ZHANG, Y.; WALLACE, J.M.; FRANCIS, R.C. A Pacific interdecadal climate oscillation with impacts on salmon production, **Bull. Amer. Meteor. Soc.**, v. 78, p. 1069-1079, 1997.
- MOURA, A. D.; SHUKLA, J. On the dynamics of droughts in Northeast Brazil: observations, theory, and numerical experiments with a general circulation model, **J. Atmos. Sci.**, v.38, n.12, p.2653-2675, 1981.
- NOBRE, P.; SHUKLA, J. Variations of sea surface temperature, wind stress, and rainfall over the tropical Atlantic and South America, **J. Clim.**, v.9, n.19, p.2464-2479, 1996.
- PANOSFKY, H. A.; BRIER, G.W. **Some applications of Statistics to Meteorology.** Pennsylvania University Park. College of Mineral Industries, Cap 6, p. 126-161, 1968.
- PENLAND C.; MATROSOVA L. Prediction of Tropical Atlantic sea surface temperatures using linear inverse modeling. **J. Clim.**, v. 11, n. 5, p. 483-496, 1998.
- REPELLI, C. A.; NOBRE, P. Modelagem estatística das anomalias de temperatura da superfície do mar do oceano Atlântico Tropical. **Climanálise Edição Especial de Outubro/96**, 6, CPTEC/INPE, 1996.
- RUIZ DE ELVIRA, A.; ORTIZ BEVIÁ, M. J.; NARVAEZ, W. C. Empirical forecasts of Tropical Atlantic sea surface temperature anomalies. **Quart. J. R. Met. Soc - Part B**, v. 126, n. 567, p. 2199-2210, 2000.
- SERVAIN, J. Simple climatic indices for the tropical Atlantic Ocean and some applications, **J. Geophys. Res.**, v.96, n.C8, p.15,137-15,146, 1991.
- WARD, M. N.; FOLLAND, C. K. Prediction of seasonal rainfall in the north Nordeste of Brazil using eigenvectors of sea surface temperature. **Int. J. Climatol.**, v.11, p. 711-743, 1991.

WOLTER, K. Trimming problems and remedies in COADS.
J. Clim., v.10, n.8, p. 1980-1997, 1997.

ZEBIAK, S.E. Air-sea interaction in the equatorial Atlantic region. **J. Clim.**, v.6, n.8, p.1567-1586, 1993.