




Article

O Tradicional ou o Moderno? Uma Visão da Informação da Rede de Estações Meteorológicas Brasileiras

Paolo Ramoni Perazzi^{1,2} , Marcelo Passamani¹ , Dirk Thielen³ , Carlos Padovani⁴ ¹*Laboratório de Ecologia e Conservação de Mamíferos, Universidade Federal de Lavras, Lavras, MG, Brasil.*²*Centro de Simulación y Modelos, Facultad de Ingeniería, Universidad de los Andes, Mérida, Venezuela.*³*Laboratorio de Ecología del Paisaje y Clima, Centro de Ecología, Instituto Venezolano de Investigaciones Científicas, Miranda, Venezuela.*⁴*Centro de Pesquisa Agropecuária do Pantanal, Empresa Brasileira de Pesquisa Agropecuária, MS, Brasil.*

Recebido em: 23 de Julho de 2020 - Aceito em: 16 de Março de 2021

Resumo

Apresenta-se uma análise comparativa com base em dados médios mensais de precipitação acumulada e temperaturas máximas e mínimas registradas durante o período 2000-2019 pelas estações meteorológicas convencionais e automáticas existentes no Brasil. Foi avaliada a exatidão da localização das estações (coordenadas geográficas) fornecida pelo Instituto Nacional de Meteorologia (INMET), foi comparada gráfica e estatisticamente a informação fornecida por estações homônimas, foi correlacionada esta informação com variáveis independentes (elevação e latitude no caso das temperaturas e informação de satélite da Tropical Rainfall Measuring Mission -TRMM 3B43- no caso da precipitação), e foi avaliada a consistência da informação fornecida pelas estações comparada com os dados das cinco estações geograficamente mais próximas, através de interpolações espaciais baseadas em distâncias inversas ponderadas sob um esquema de Jaccknife. Ainda que a informação fornecida ambos os tipos de estações podem ter boa concordância em muitos casos, existem incongruências que em alguns casos podem ser muito marcadas. Tais diferenças podem ser atribuídas tanto a erros sistemáticos como aleatórios, de origem indeterminada. Ambos conjuntos de dados tem problemas, mas a evidência avaliada sugere que as estações convencionais fornecem dados de precipitação um pouco mais confiáveis, enquanto que as automáticas são mais consistentes em relação a informação de temperaturas.

Palavras-chave: estação meteorológica, clima, parâmetros meteorológicos, Brasil.

The Traditional or the Modern? A Vision of the Information from the Brazilian Weather Stations Network

Abstract

A comparative analysis is presented based, on one side, mean monthly accumulated precipitation and, on the other, maximum and minimum monthly mean temperatures, recorded during the period 2000-2019 by conventional and automatic weather stations existing in Brazil. The accuracy of the location of the stations (geographic coordinates) provided by the National Institute of Meteorology (INMET) was evaluated, comparing graphically and statistically the information provided by homonymous stations, this information was correlated with independent variables (elevation and latitude in the case of temperatures, and satellite information from the Tropical Rainfall Measuring Mission -TRMM 3B43-, in the case of precipitation), and evaluate the consistency of the information provided by the stations compared with data from the five stations geographically closest through spatial interpolations based on inverse-distance weighted under a Jaccknife scheme. Although the information provided by both types of stations may have good agreement in many cases, there are incongruities that in some cases can be very marked. Such differences can be attributed to both systematic and random errors, of indeterminate origin. Both data sets have problems, but the evidence evaluated sug-

gests that conventional stations provide slightly more reliable precipitation data, while automatic ones are more consistent with regards to temperature information.

Keywords: weather stations, climate, meteorological parameters, Brazil.

1. Introdução

O Brasil é o quinto maior país em superfície do mundo, abrangendo condições climáticas contrastantes como consequência dos grandes gradientes de altitude, latitude, sazonalidade, entre outros. Num país com tais características o estudo da variabilidade espacial dos parâmetros climáticos é essencial para o conhecimento, planejamento e ação de uma grande variedade de aspetos. Entre estes, destacam a agricultura e pecuária, biodiversidade, saúde pública, ou desenvolvimento sustentável. Por exemplo, esta informação é fundamental na tomada de decisões por parte de órgãos dos governos ou empresas, tanto nacionais como estrangeiras, podem ser usados pelas famílias ou pelas gerações futuras como bens de consumo pessoal para o seu dia-a-dia, podem ser usados pelos cientistas como entradas em modelos para explicar ou prever melhor eventos naturais ou induzidos pelo homem, ou podem indicar o tipo de culturas adequadas para uma região determinando o sucesso no desenvolvimento da economia agrária de um país (Das *et al.*, 2003).

O conceito de clima refere-se ao conjunto de condições atmosféricas médias, normalmente medidas durante um período de 30 anos segundo a Organização Meteorológica Mundial (WMO; pelas suas siglas no inglês; Plan-ton, 2013), as quais caracterizam uma região e influenciam marcadamente os ecossistemas (Köppen, 1900). Nas últimas décadas, a informação climática tem sido obtida através de sensoriamento remoto, incluindo aquela informação gerada espacialmente, mas tradicionalmente tem sido obtida pelo meio de medidas feitas *in situ* usando estações meteorológicas (WMO, 2018). Uma estação meteorológica é uma instalação dotada com instrumentos e sensores para medir as variáveis atmosféricas, particularmente temperatura, pressão atmosférica, umidade, velocidade do vento, direção do vento e precipitação. Nas estações meteorológicas convencionais (EMCs), as medições são feitas por observadores humanos pelo menos uma vez por dia, enquanto que nas estações meteorológicas automatizadas (EMAs) o observador humano é substituído por aparelhos autônomos e as medições são normalmente feitas e transmitidas pelo menos uma vez por hora automaticamente (WMO, 2018).

Por ter sido as primeiras em ter sido utilizadas, as EMCs normalmente contam com series de dados temporalmente mais prolongadas, mas a dependência diária do elemento humano tem limitado geograficamente as possibilidades de sua instalação, além de incrementar as probabilidades de erros na leitura/transcrição das medições. A partir do ano 2000, o Instituto Nacional de Meteorologia (INMET) adicionou a tecnologia de 450 estações auto-

máticas (EMAs) às 293 EMCs do sistema brasileiro de estações meteorológicas (Lucas *et al.*, 2010). A adoção de EMAs apresenta certas vantagens, que segundo Ahmad *et al.* (2017) incluem: (1) a possibilidade de observação contínua; (2) os dados podem ser obtidos mesmo quando não há pessoal presente; (3) em consequência podem ser instaladas em locais inacessíveis; (4) reduz o número de observadores e os custos operacionais; (5) uma vez que os dados meteorológicos são tomados como sinais elétricos, erros de observadores em leitura são eliminados; (6) as técnicas de observação padronizadas permitem a homogeneização dos dados observados em regiões aonde a observação meteorológica automática é adotada; (7) novos elementos de observação podem ser adicionados com relativa facilidade instalando novos instrumentos; (8) permite escolher instrumentos de medição ideais com o nível adequado de precisão na medição; e (9) a necessidade de treinamento de observadores é eliminada. Naturalmente, a sua adoção não está isenta de desvantagens ou fragilidades, por exemplo: (a) na ausência de observadores, pode ocorrer vandalismo e roubo de equipamentos; (b) requerem um programa de manutenção com técnicos especializados para defeitos mecânicos, elétricos e eletrônicos intrínsecos; (c) problemas provocados por intempéries naturais (insetos, aves, roedores, poeira, objetos que podem ser atirados contra as estações em tempestades com ventos fortes); (d) problemas relacionados com a manutenção do local onde estão as estações, com controle da vegetação; (e) proteção com cercamento para evitar problemas com animais grandes como o gado ou animais grandes selvagens; (f) exigem um período inicial de calibração comparativa com as estações convencionais o que nem sempre é possível; (g) exigem calibrações regulares.

Afim de avaliar as limitações inerentes à geração de dados meteorológicos, subsidiar possíveis melhorias e para alertar aos usuários qual fonte de informação deveria ser selecionada preferencialmente para a aplicação desses dados nas mais diversas áreas de conhecimento, comparamos os dados das redes de EMCs e de EMAs, particularmente dos parâmetros precipitação, e temperaturas mínima e máxima mensais.

2. Material e Métodos

Neste estudo, foram analisados 19 anos de informação climática, pois, segundo a informação disponível, as primeiras EMAs iniciaram operar no dia primeiro de junho do 2000, e para este estudo foi incluída a informação obtida até 30 de setembro do 2019.

As informações correspondentes às EMCs foram obtidas diretamente via *on line* na sessão de dados históricos do portal web do INMET, sob formato de valores diários. No caso das EMAs, as informações foram fornecidas pela equipe da Seção de Armazenamento de Dados Meteorológicos do INMET através de um disco digital versátil (DVD) com os dados horários em formato compatível com o software usado neste estudo. Para realizar as comparações, foram analisadas apenas as informações das EMCs disponíveis para o mesmo período de tempo das EMAs. Todas as comparações e cálculos foram feitos usando a linguagem de programação R versão 3.6.1 (R Core Team, 2019). Toda a informação geográfica foi projetada segundo o Sistema de Referência Geocêntrico para as Américas (SIRGAS2000; IBGE, 2005).

2.1. Avaliação da localização geográfica das estações

O crescente desenvolvimento de ferramentas de modelagem espacial, além do incremento na resolução espacial de dados usados em climatologia e meteorologia, aumentou a necessidade do conhecimento da exatidão (concordância entre as coordenadas disponíveis e a potencial localidade) e precisão (quantidade de posições decimais) das coordenadas geográficas das estações meteorológicas (Carrega, 2013). Consequentemente, exploramos a precisão e exatidão das coordenadas geográficas fornecidas pelo INMET conjuntamente com os dados para cada estação. Primeiro, já que normalmente o nome das estações corresponde ao nome do município, verificou-se se as coordenadas da estação concordam com aquelas do município homônimo através da malha municipal fornecida *on line* sob formato *shapefile* pelo Instituto Brasileiro de Geografia e Estatística (IBGE, 2018; acessado no 10 de maio do 2020), como uma primeira avaliação de quantas e quais estações poderiam ter inconsistências. Segundo, as coordenadas de cada estação foram exploradas usando recursos *on line*, tais como Google Earth®, prestando atenção se as mesmas correspondiam a locações homônimas e inclusive a estações meteorológicas ou estruturas aonde estas poderiam estar localizadas, tais como aeroportos, etc.

Para as análises seguintes, as coordenadas das EMCs foram corrigidas com as coordenadas atualizadas que o INMET fornece em outra parte separada do seu site web (acessado no 10 de maio do 2020), quando estas estiverem disponíveis.

2.2. Grau de adequação da informação climática segundo critérios internacionais

A Organização Meteorológica Mundial é uma organização intergovernamental que fornece liderança mundial e expertise em cooperação internacional na entrega e utilização de serviços climáticos, hidrológicos e afins por seus Estados membros, incluindo o avanço na standardização

de dados meteorológicos, publicando uma ampla variedade de manuais.

Consequentemente, o presente estudo está baseado em “normais provisionais”, tais como foram definidas pela WMO (1989), ou seja, como os valores médios calculados com base em observações que se estendem por um período curto de pelo menos dez anos. Mais ainda, adotou-se o critério 4/10 recomendado pela WMO (2011) segundo o qual um valor mensal, ou a média dos valores diários daquele mês, não deve ser calculado se num mês faltam observações para (a) cinco ou mais dias consecutivos ou (b) onze ou mais dias dispersos.

Os números de meses nominalmente disponíveis foram determinados para cada estação, como o total de meses contabilizados entre o primeiro de junho do 2000 e o 30 de setembro do 2019. Não obstante, estas datas variaram, dependendo se uma estação dada foi colocada em serviço após a data inicial indicada, ou parou de funcionar antes da data final indicada, em cujos casos os meses foram contados a partir do primeiro ou até o último registro climatológico disponível, segundo o caso. Adicionalmente, foi contada a quantidade de meses efetivamente disponíveis para cada estação, entendidos como aqueles que seguem os critérios da WMO previamente indicados. Finalmente, para cada um dos parâmetros considerados neste estudo foram criados diagramas de *boxplot* mensais, e testes de *t* de Student foram aplicados comparando tanto a quantidade de anos totais operativos, quantidade de anos totais efetivos e a proporção de gaps na informação climática mensal. Os entalhes dos *boxplot* mostram o intervalo de confiança ao redor da mediana e, ainda que não se constitua num teste formal, se os entalhes das duas caixas não se sobrepõem, existe uma “forte evidência” (95% de confiança) que as suas medianas diferem (Chambers *et al.*, 1983).

Aquelas estações que cumpriram os critérios estabelecidos pelo WMO previamente mencionados foram usadas nas análises remanescentes, após completar a informação diária faltante, estimada de duas maneiras complementares. Primeiro, transversalmente (cada dia por vez) para todas as estações com dados faltantes, diante interpolações espaciais, naqueles casos quando dados de 20 ou mais estações estiveram disponíveis. As interpolações são predições de valores em pontos de interesse dentro do âmbito do estudo, e no caso das interpolações espaciais atualmente existem muitas técnicas disponíveis, com diferentes capacidades e desempenhos (Li e Heap, 2011; Kresse e Danko, 2012; Raju, 2016; Zhou *et al.*, 2017), entre as quais foi escolhida a distância inversa ponderada (IDW, pelas suas siglas no inglês), inicialmente proposta por Shepard (1968), usando o pacote *gstat* (Pebesma, 2004; Gräler *et al.*, 2016) na qual o peso das cinco estações com informação e geograficamente mais próximas foi assumido como inversamente proporcional à distância geográfica até a estação alvo, usando um valor da

potência igual a 0,5. Esta escolha foi baseada no fato de que a IDW: (1) constitui uma técnica determinística matematicamente simples, cuja demanda computacional é pouca; e (2) tem sido amplamente usada com resultados satisfatórios (Chen e Liu, 2012; Bagheri, 2016). Segundo, longitudinalmente (cada estação por separado) no caso daqueles dados faltantes que não puderam ser estimados diante interpolações espaciais, diante interpolações temporais baseadas em modelos de estado-espaco inicialmente proposto por Kálmán (1960), implementado no pacote imputeTS (Moritz e Bartz-Beielstein, 2017). A esta escolha foi baseada no fato que a representação do estado-espaco e as equações recursivas que caracterizam o filtro de Kalman são ideais para analisar series com dados faltantes (Brockwell e Davis, 1991), tendo sido particularmente recomendado para o seu uso em dados meteorológicos (Joyce e Xie, 2011; Sivagami *et al.*, 2019).

2.3. Comparação da informação fornecida por estações homônimas

Foi calculada e comparada a informação média mensal fornecida por aquelas EMCs e EMAs que tinham nomes semelhantes e coordenadas geográficas próximas (afastadas até por de 25 km). Para cada parâmetro, foram criados diagramas de boxplot mensais, e foram aplicados testes pareados de t de Student.

Além disso, para cada parâmetro foram comparadas as magnitudes das diferenças entre os valores fornecidos pelas EMCs em relação às respectivas EMAs, através de subtração simples. Representou-se espacialmente os resultados destas subtrações por meio de mapas de bolhas, usando as coordenadas geográficas das EMAs, o que permitiu explorar visualmente a existência de possíveis padrões espaciais por meio de agregação das diferenças, além de histogramas para visualizar a distribuição das frequências de tais diferenças.

2.4. Correlação com outros parâmetros

É bem sabido que a distribuição da temperatura é determinada por diferentes fatores, particularmente pela latitude e a altitude (Trapasso, 2008; Hartmann, 2016; Collier, 2016). Assim, foi explorado o grau de correlação entre as temperaturas mínimas e máximas reportadas pelo conjunto de EMCs e EMAs homônimas e as latitudes fornecidas pelas estações e com as altitudes correspondentes a tais coordenadas segundo o modelo digital de elevação GMTED2010 (Danielson e Gesch, 2011), com resolução de 30 arcossegundos (aproximadamente 90 m no Equador). Estas correlações foram parciais, ou seja, controlando o efeito da elevação ou da latitude enquanto se avaliou a correlação das temperaturas com a latitude ou a elevação, usando o pacote ppcor (Kim, 2015).

O padrão de distribuição espacial da precipitação é consideravelmente mais complexo que a temperatura, porque vem influenciada por fatores envolvidos tanto no

movimento vertical da atmosfera, quanto na natureza da mesma, a estabilidade/instabilidade atmosférica, ou as suas características de umidade e termais (Granger, 2008; Hartmann, 2016; Collier, 2016). Assim, a precipitação normalmente está pouco correlacionada com características topográficas (Daly *et al.*, 1994, 2008; Ramoni-Perazzi *et al.*, 2016), um dos motivos pelos quais o sensoriamento remoto, especialmente aquele baseado no uso do satélite, tornou-se a principal fonte de dados precisos e espacialmente contínuos para fazer estimativas alternativas ou suplementares da precipitação (Javanmard *et al.*, 2010; Shrivastava *et al.*, 2014; Manta *et al.*, 2015). Por estes motivos, foi explorada a correlação entre as precipitações médias mensais registradas pelas EMCs e EMAs homônimas respeito à informação fornecida pela Tropical Rainfall Measuring Mission TRMM 3B43. Trata-se de um satélite cujo radar mediu a precipitação espacialmente durante mais de 17 anos a partir do 1997, baseado nos sensores de radiação infravermelha e micro-ondas (em mm/h) e estimativas do erro na precipitação respeito as estações meteorológicas (Kummerow *et al.*, 2000). Esta combinação utiliza as medições do sensor na região espectral das micro-ondas, as quais tem melhor relação entre as taxas de chuva e a microfísica das nuvens, para calibrar imagens do canal infravermelho, as quais tem resolução espacial e temporal suficientes para monitorar sistemas convectivos (Levizzani, 2000). Os dados da TRMM, tem encontrado aplicabilidade nas ciências agrárias (Cashion *et al.*, 2005; Arvor *et al.*, 2014), modelagem hidrológica (Meng *et al.*, 2014) e seca meteorológica (Sahoo *et al.*, 2015), mostrando um bom desempenho (Dinku *et al.*, 2007; Cao *et al.*, 2018).

Em cada caso, as informações climáticas fornecidas pelas EMCs e as EMAs foram comparadas em quanto ao seu grau de correlação com os parâmetros independentes respectivos antes indicados, através de transformações de Fisher (1915, 1921). Estas transformações, usadas para encontrar intervalos de confiança tanto para o valor da correlação quanto para diferenças entre correlações, têm sido mais comumente usadas para testar a significância da diferença entre dois coeficientes de correlação.

2.5. Avaliação da consistência dos dados

Foi examinada a coerência dos dados de temperaturas medias mensais e dos totais mensais de precipitação entre cada uma das estações EMCs e EMAs homônimas a partir de interpolações espaciais. Usamos as distancias inversas ponderadas já mencionadas, afim de estimar o valor esperado para cada estação, usando a informação das estações remanescentes do mesmo tipo, sob um esquema de Jackknife (Efron, 1982). O pressuposto é de que a coerência entre valores observados e interpolados é um bom indicativo da qualidade da informação. Estes valores interpolados foram comparados com os valores medidos usando a raiz quadrática média dos erros relativos

(RRMSE pelas suas siglas no inglês), uma das medidas de desempenho das interpolações proposta por Li e Heap (2011), que subtrai o efeito da unidade/escala, que por ser quadrática mostra que as diferenças extremas têm maior peso, e cuja fórmula é:

$$RRMSE = \left[\frac{1}{n} \sum_{i=1}^n \left(\frac{[p_i - o_i]}{o_i} \right)^2 \right]^{1/2} * 100 \quad (1)$$

onde n é o número de estações, o é o valor medido do parâmetro e p corresponde aos valores interpolados.

3. Resultados

3.1. Avaliação da localização geográfica das estações

Foram avaliados um total de 265 EMCs e 423 EMAs, no Brasil. Uma comparação das coordenadas geográficas atribuídas às estações mostrou claramente uma maior exatidão no caso das EMAs. Efetivamente, o INMET fornece as coordenadas em formato de grau decimal, que no caso das EMCs consiste de apenas duas posições decimais (pouca exatidão), indicativo de uma localidade que pode estar próxima à localização real, mas imprecisa, e não se ajusta aos requerimentos estabelecidos pela WMO (2018), uma vez que as coordenadas tem que estar em graus, minutos e segundos inteiros, ou seja, pelo menos quatro posições decimais. Em contrapartida, as coordenadas das EMAs contêm um maior número de posições decimais (seis), que em muitas ocasiões correspondem com estruturas nas quais é comum o estabelecimento de estações climatológicas (aeroporos, institutos de ensino, etc.), ou nas quais inclusive foi possível observar instalações similares àquelas das estações climatológicas típicas através dos aplicativos usados (Google Earth®). Isso sugere que no caso das EMCs, a informação fornecida em muitos casos é antiga e pode não ter sido atualizada com GPS de precisão.

No caso das EMCs, 17 delas têm atribuídas coordenadas geográficas que claramente ficam fora dos limites dos municípios homônimos (afastadas até 79,7 km; Tabela 1) ou, inclusive, em estados vizinhos. Ainda que, como já foi indicado, em alguns casos o INMET forneça as coordenadas atualizadas em outra parte da sua plataforma web, a disponibilização das informações da maneira atual pode gerar erros.

Em contrapartida, a única inconsistência que encontramos na informação associada às EMAs foi um erro no nome da estação “Novo Mundo” (código WMO: 86643), que corresponde à comunidade “Mundo Novo”, município Brasnorte, Mato Grosso.

Tabela 1 - Algumas imprecisões detectadas na localidade das estações climáticas convencionais segundo as coordenadas geográficas disponibilizadas pelo INMET junto com a informação climática.

Nome da estação	Município das coordenadas	Distância (km)
(83582) Bambuí - MG	Divinópolis - MG	79,7
(83687) Lavras - MG	São Thomé das Letras - MG	39,3
(83386) Janaúria - MG	Itacarambira - MG	20,5
(82693) Cruzeta - RN	Acari - RN	18,4
(83446) Guaratinga - BA	Itabela - BA	13,4
(82596) Ceará-Mirim - RN	Poço Branco - RN	12,0
(82975) Bom Jesus do Piauí - PI	Santa Luz - PI	6,7
(82487) Guaramiranga - CE	Mulungu - CE	5,3
(82296) Luzilândia Lag. do Piauí - PI	São Bernardo - MA	3,8
(83195) Itabaianinha - SE	Riachão do Dantas - SE	3,1
(82598) Natal - RN	Parnamirim - RN	2,5
(83985) Pelotas - RS	Capão do Leão - RS	1,7
(82789) Triunfo - PE	São José de Princesa - PB	1,4
(83395) Janaúba - MG	Nova Porteirinha - MG	1,2
(83037) Coronel Pacheco - MG	Goianá - MG	0,1
(82863) Pedro Afonso - TO	Tupirama - TO	0,1
(82797) Surubim - PE	Casinhas - PE	0,1

3.2. Grau de adequação da informação climática segundo critérios internacionais

As EMCs já estavam ativas para a data inicial considerada neste estudo (o primeiro de junho do 2000), enquanto que as EMAs foram-se agregando depois paulatinamente, o que ficou evidenciado no fato que as primeiras contam com um período de operatividade significativamente maior (média geral 18,4 anos; Fig. 1), do que as segundas (média geral 12,5 anos), durante o período considerado neste estudo. Similarmente, as quantidades de anos disponíveis cuja informação concorda com os critérios da WMO (pelo menos 10 anos de dados sob o critério de quatro dias consecutivos ou 11 dias não consecutivos por mês) é maior nas EMCs (média geral 17,7 anos; Fig. 2) que nas EMAs (média geral 11,3 anos). As EMAs mostraram uma proporção significativamente maior de lacunas na informação (médias gerais: 0,15 no caso da precipitação, e 0,12 no caso das temperaturas; Fig. 3) do que nas EMCs (médias gerais: 0,03 na precipitação, e 0,06 e 0,05 no caso das temperaturas máximas e mínimas respectivamente).

Das 265 EMCs avaliadas, 257 (97,0%) forneceram dados de precipitação de acordo com os critérios da WMO para todos os meses, 255 (96,2% do total) no caso da temperatura máxima e 249 (94,0%) no caso da temperatura mínima. Em contraste, das 423 EMAs selecionadas, ape-

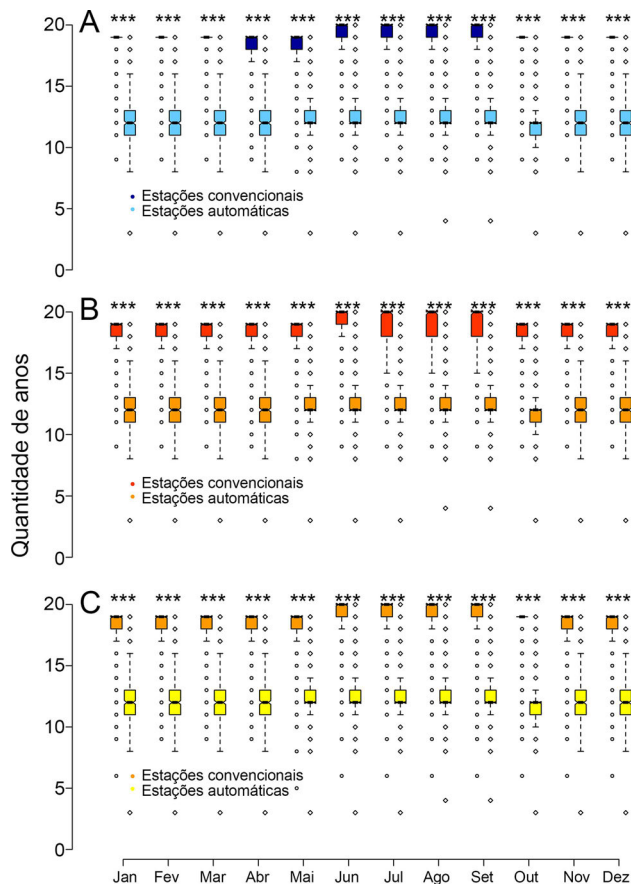


Figura 1 - Comparação da quantidade de anos totais operativos, contabilizados dentro do período de 19 anos entre o primeiro de junho de 2000 e 30 de setembro de 2019, para cada mês e para cada tipo de estação no caso de: (A) precipitação; (B) temperatura máxima; e (C) temperatura mínima.

nas 191 (45,2%) forneceram informação adequada no caso da precipitação, e 251 (59,3%) no caso das temperaturas. Uma lista completa, com detalhes adicionais, das estações que cumpriram ou não com os critérios da WMO é fornecida na Tabela S1.

3.3. Comparação da informação fornecida por EMCs e EMAs homônimas

Após excluir as estações “São Simão” (EMCs WMO: 83669 - SP e EMAs WMO: 86773 - GO), um total de 76 pares de estações no caso da precipitação, 89 no caso da temperatura máxima e 85 no caso da temperatura mínima, tiveram nomes iguais ou semelhantes e coordenadas geográficas próximas, com distâncias entre coordenadas variando entre 0,0 e 20,9 km (mediana 0,57 km no caso da precipitação e 0,79 km no caso das temperaturas). Mais ainda, estas distâncias não necessariamente significam que ambas as estações estejam de fato afastadas: pode simplesmente ser um artefato originado em erros nas coordenadas ou pela baixa exatidão nas coordenadas fornecidas pelo INMET para as EMCs.

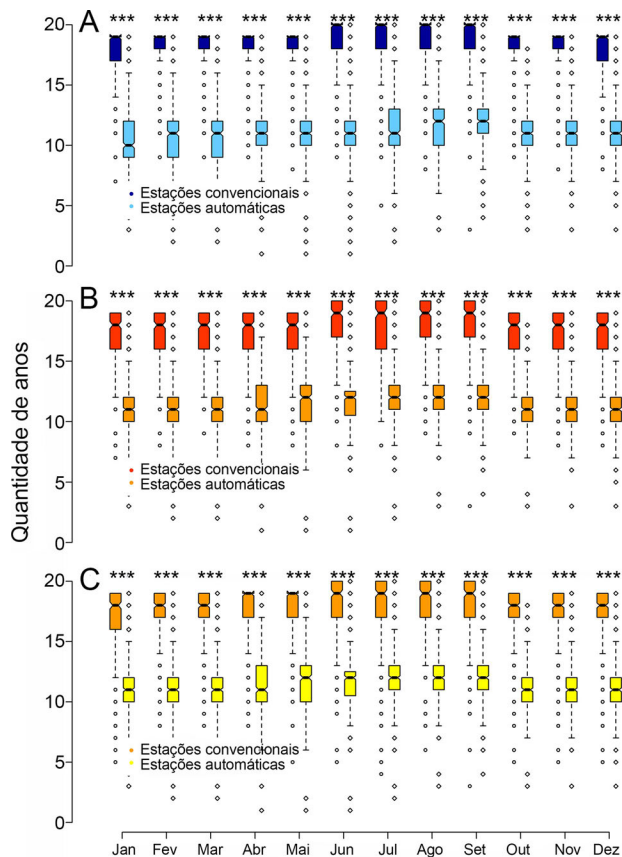


Figura 2 - Comparação da quantidade de anos totais efetivos, ou seja, com informação acorde aos critérios da WMO (2017), contabilizados dentro do período de 19 anos entre o primeiro de junho de 2000 e 30 de setembro de 2019, para cada mês e para cada tipo de estação no caso de: (A) precipitação; (B) temperatura máxima; e (C) temperatura mínima.

O previamente indicado reforça a validade das comparações a seguir.

Foi observado que, no caso da precipitação acumulada mensal, ainda que para todos os meses, os boxplot mostram sobreposição nas distribuições e, mais ainda, nos entalhes, os testes pareados *t* de Student indicam que existem diferenças estatisticamente significativas ao longo de todo o ano exceto em agosto e outubro (Fig. 4A). Estas diferenças não seguem um padrão geográfico evidente (Fig. 5), para as subestimativas ou sobreestimativas das EMAs em relação as EMCs, pois não é possível observar agregamentos geográficos, o que poderia sugerir problemas sistemáticos à nível estadual ou regional. Mais ainda, subestimativas e sobreestimativas podem alternar num mesmo local de um mês para o seguinte. Os casos extremos foram aqueles das estações Guarimiranga - CE (com diferenças de 63,9 mm para janeiro), Cuiabá - MT (56,4 mm para fevereiro), Alto Parnaíba - MA (64,2 mm para março), Fortaleza - CE (102,9 mm para abril), Turiaçu - MA (57,8 mm para maio), Recife - PE (com diferenças de 74,1 mm para junho, 51,6 mm para

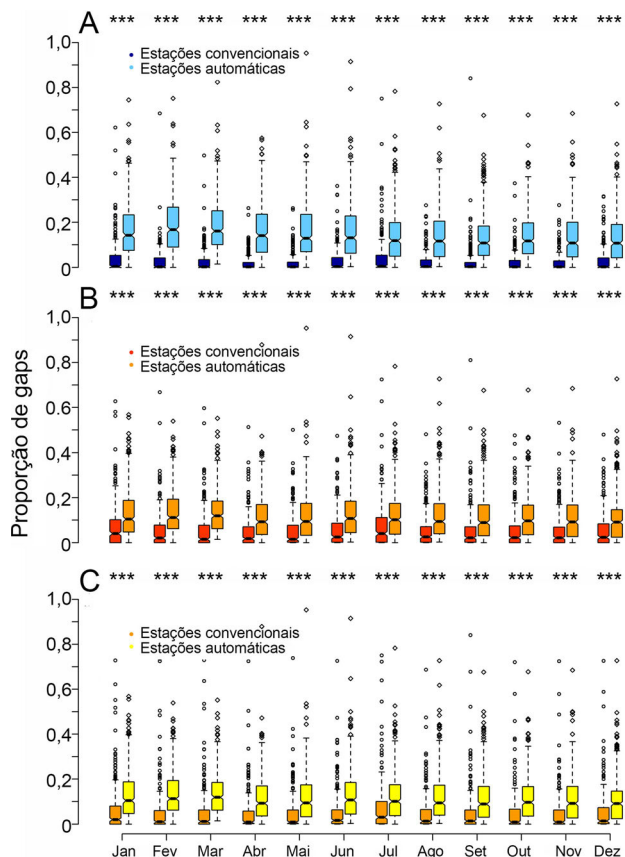


Figura 3 - Proporção de gaps na informação climática mensal para cada tipo de estação no caso de: (A) precipitação; (B) temperatura máxima; e (C) temperatura mínima.

julho, e 34,3 mm para agosto), São Joaquim - SC (34,9 mm para setembro), Cruz Alta - RS (57,8 mm para outubro), Rio Verde - GO (45,6 mm para novembro), e Itumbiara - GO (62,6 mm para dezembro), sendo que em todas elas as EMCs registraram precipitações maiores que as EMAs.

As temperaturas máximas médias mensais mostraram diferenças significativas nos meses de dezembro até fevereiro, o que aproximadamente coincide com o verão austral, além de setembro (Fig. 4B), quando algumas das EMAs registraram as menores temperaturas máximas médias em comparação às EMCs (histogramas da Fig. 6). Novamente, diferenças individuais podem ser encontradas ao longo de todo o ano (Fig. 6), ainda que de um modo mais estável se comparado ao caso das precipitações: as EMAs que sobre ou subestimaram, tenderam a fazer isso em todos os meses. Os casos extremos foram aqueles das estações Guarimiranga - CE, aonde a automática registrou na média 3,1 °C menos que a convencional para janeiro e fevereiro e 2,8 °C menos para março e, especialmente, Ibirité - MG, onde a EMA registrou na média temperaturas máximas menores para abril (2,8 °C), maio (2,6 °C), junho (2,3 °C), julho (2,4 °C), agosto e setembro

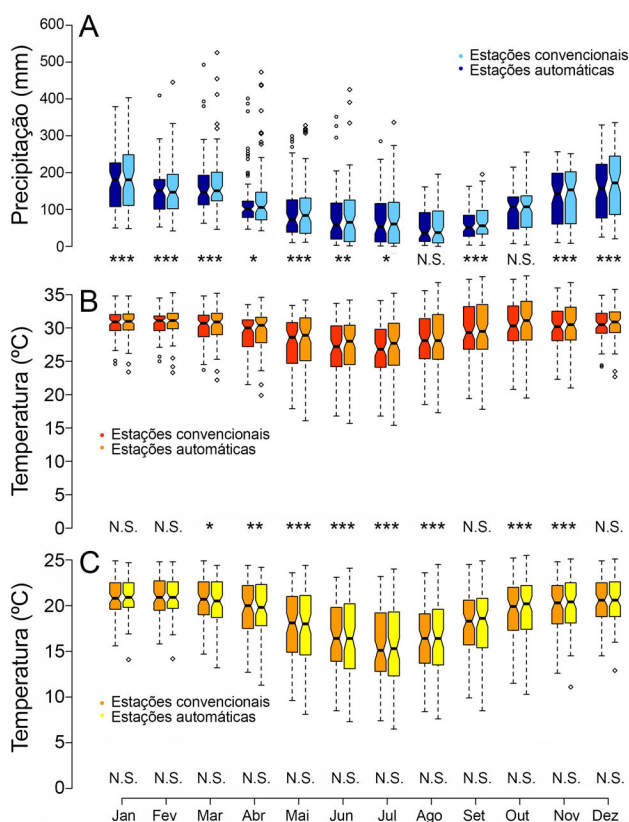


Figura 4 - Comparação da informação fornecida pelas estações convencionais e automáticas homônimas em relação a: (A) precipitação; (B) temperatura máxima; e (C) temperatura mínima. Na base de cada gráfico encontra-se o resumo do teste bicaudal pareado t de Student: (N.S.) não significativo; (*) $p < 0,05$; (**) $p < 0,01$; (***) $p < 0,001$.

(2,5 °C), outubro e novembro (2,9 °C), e dezembro (2,8 °C).

As temperaturas mínimas médias não mostraram diferenças estatisticamente significativas para nenhum mês (Fig. 4C), ainda que diferenças individuais foram detectadas ao longo do ano (histogramas da Fig. 7), sem um padrão geográfico evidente, mas com uma tendência a sobre ou subestimar as medidas em cada localidade foi ainda mais estável do que no caso das temperaturas máximas médias. Por exemplo, no caso de Itaberaba (BA) a EMA registrou temperaturas médias mínimas na média 2,5 °C (variação: 2,2 e 2,8 °C) superiores que a EMC homônima, ao longo de todo o ano.

3.4. Correlação com outras variáveis

Em todos os casos, os valores de precipitação média mensal estiveram altamente correlacionados, acima de 0,9, com os correspondentes valores de precipitação média mensal fornecidos pelo TRMM (Tabela 2). Estas correlações não mostraram diferenças estatisticamente significativas, exceto para outubro, quando a correlação das EMCs e a precipitação média mensal do TRMM foi maior.

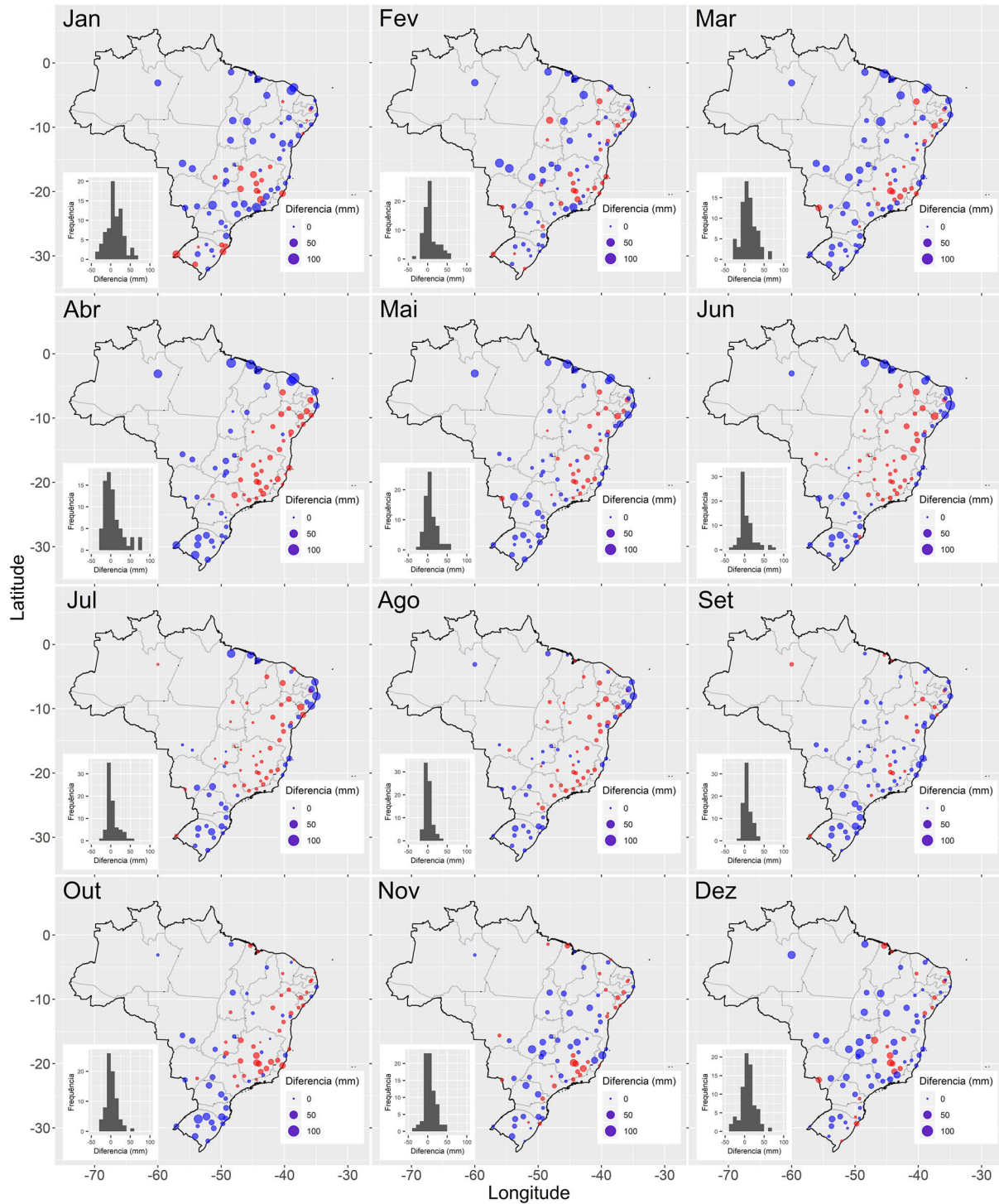


Figura 5 - Diferenças resultantes de subtrair a precipitação média mensal registrada por cada estação convencional menos a registrada pela automática homônima. Em azul aqueles casos em que a estação convencional > estação automática; em vermelho quando estação convencional < estação automática. Os histogramas mostram a frequência dessas diferenças.

As temperaturas máximas médias mensais estiveram inversamente correlacionadas com a elevação, sob $-0,5$ em todos os meses exceto no período desde maio até outubro, coincidindo aproximadamente com o outono-inverno austral, sem diferenças estatística-

mente significativas entre EMCs e EMAs (Tabela 3). Entretanto, as temperaturas máximas médias mensais mostraram uma correlação maior com a latitude, acima de $0,5$ em todos os meses exceto durante janeiro-março, ou seja, durante o verão austral no

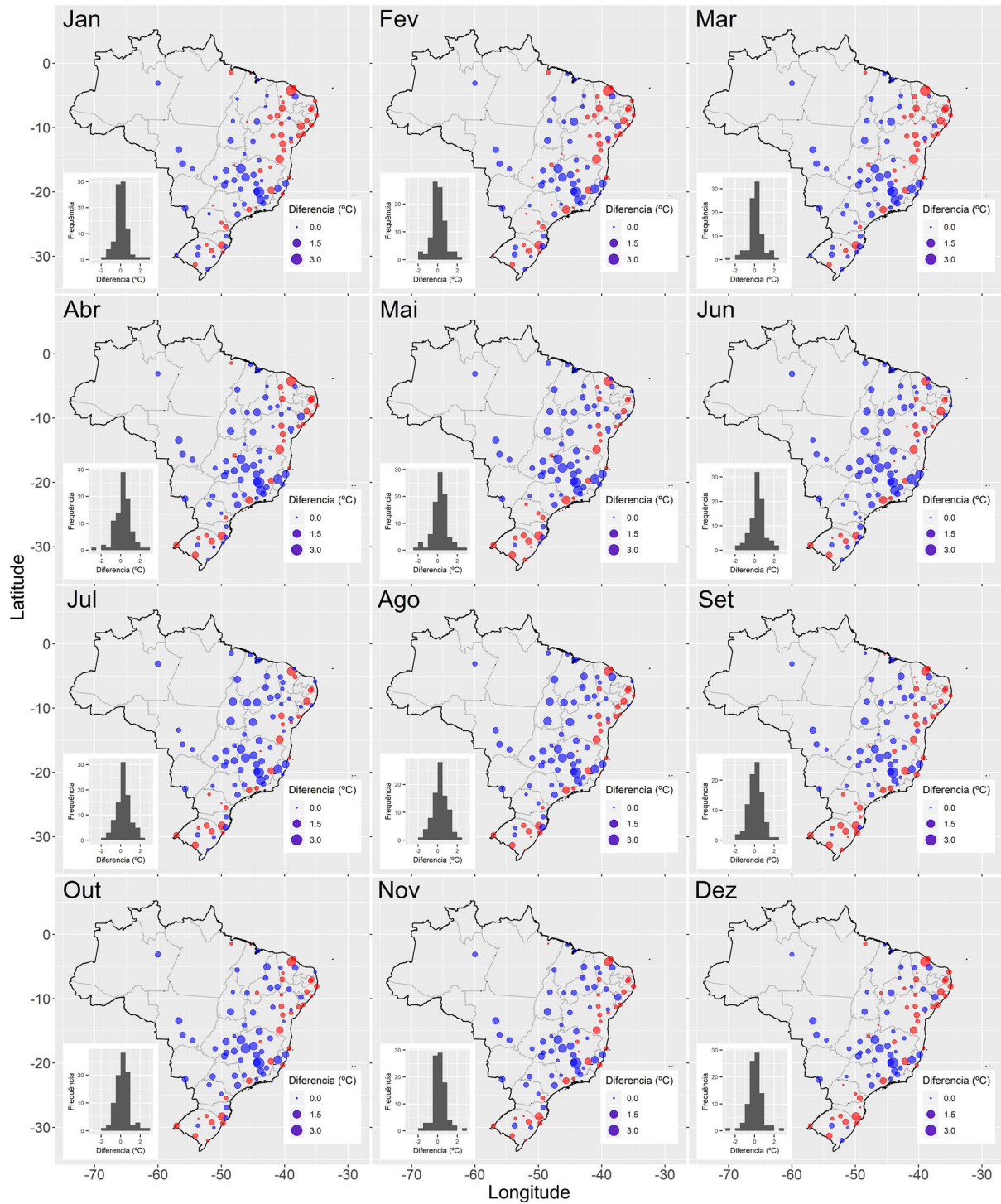


Figura 6 - Diferenças resultantes de subtrair a temperatura máxima média mensal registrada por cada estação convencional menos a registrada pela automática homônima. Em azul aqueles casos aonde a estação convencional > estação automática; em vermelho quando estação convencional < estação automática. Os histogramas mostram a frequências dessas diferenças.

caso das EMCs, e fevereiro durante EMAs, com diferenças estatisticamente significativas entre EMCs e EMAs no período de dezembro até abril, quando as EMAs mostraram uma correlação significativamente maior.

As temperaturas mínimas médias mensais mostraram correlações ainda mais fortes com a elevação, sob -0,6 na maioria dos casos, sem diferenças significativas entre EMCs e EMAs (Tabela 4). Complementarmente, as correlações das temperaturas

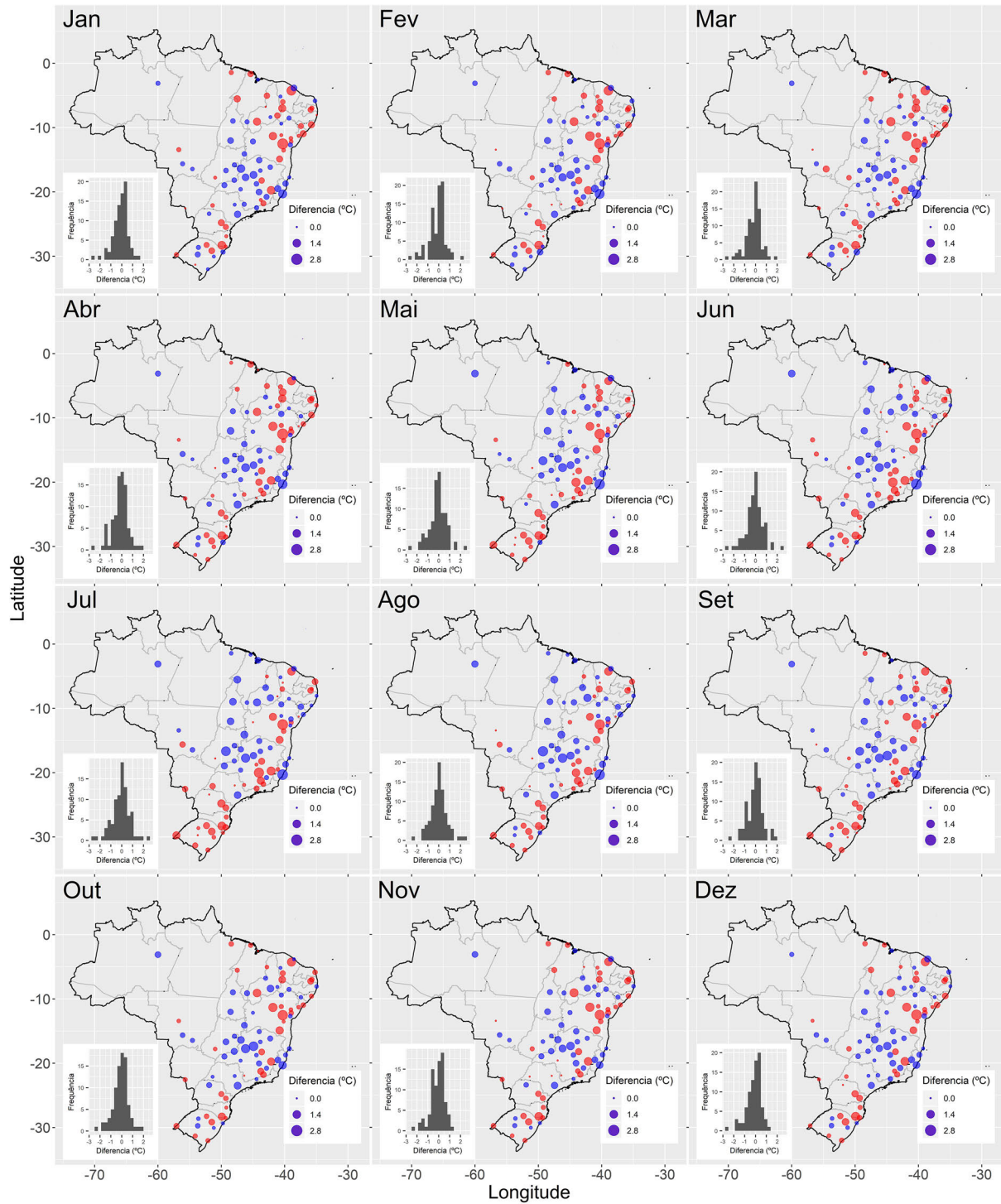


Figura 7 - Diferências resultantes de subtrair a temperatura mínima média mensal registrada por cada estação convencional menos a registrada pela automática homônima. Em cinza escuro aqueles casos aonde a estação convencional > estação automática; em cinza médio quando estação convencional < estação automática. Os histogramas mostram a frequências dessas diferenças.

mínimas médias mensais estiveram altamente correlacionadas com a latitude, acima de 0,6, no caso das EMCs e 0,8 no caso das EMAs, com diferenças significativas ao longo de todo o ano exceto durante junho-agosto.

3.5. Avaliação da consistência dos dados

Ao comparar os valores das RRMSE resultantes das interpolações, os testes *t* de Student não sugerem diferenças entre EMCs e EMAs no caso da precipitação

Tabela 2 - Correlação entre as precipitações médias mensais de cada tipo de estação climatológica e os respectivos valores de precipitação médias mensais fornecidos pelo Tropical Rainfall Measuring Mission 3B43: (r_c) correlação no caso das estações convencionais, com $p < 0,001$ para todos os casos; (r_a) correlação no caso das estações automáticas com $p < 0,001$ para todos os casos; (p_{c-a}) probabilidade resultante da comparação das correlações acima mencionadas através das transformações de Fisher (1915, 1921). Em negrito o valor estatisticamente significativo da comparação das correlações com $\alpha = 0,05$.

Mes	Elevação			Latitude		
	r_c	r_a	p_{c-a}	r_c	r_a	p_{c-a}
Jan	0,959	0,953	0,347			
Fev	0,950	0,941	0,314			
Mar	0,952	0,946	0,372			
Abr	0,957	0,927	0,055			
Mai	0,949	0,936	0,236			
Jun	0,919	0,905	0,308			
Jul	0,932	0,919	0,285			
Ago	0,931	0,943	0,277			
Set	0,969	0,961	0,261			
Out	0,974	0,953	0,037			
Nov	0,973	0,967	0,263			
Dec	0,976	0,970	0,246			

Tabela 3 - Correlações entre as temperaturas máximas mensais de cada tipo de estação climatológica, e as elevação e a latitude respectivas. (r_c) correlação no caso das estações convencionais; (r_a) correlação no caso das estações automáticas; (p_{c-a}) probabilidade resultante da comparação das correlações acima mencionadas através das transformações de Fisher (1915, 1921). Todas as correlações com $p < 0,001$.

Mes	Elevação			Latitude		
	r_c	r_a	p_{c-a}	r_c	r_a	p_{c-a}
Jan	-0,714	-0,733	0,398	0,353	0,570	0,035
Fev	-0,678	-0,695	0,417	0,224	0,490	0,023
Mar	-0,637	-0,629	0,466	0,406	0,633	0,020
Abr	-0,515	-0,569	0,310	0,591	0,754	0,024
Mai	-0,427	-0,459	0,398	0,769	0,851	0,058
Jun	-0,348	-0,340	0,477	0,753	0,834	0,076
Jul	-0,279	-0,276	0,492	0,735	0,807	0,123
Ago	-0,232	-0,204	0,424	0,656	0,743	0,133
Set	-0,151	-0,129	0,442	0,653	0,718	0,212
Out	-0,237	-0,241	0,489	0,653	0,751	0,103
Nov	-0,557	-0,592	0,367	0,689	0,789	0,074
Dec	-0,682	-0,727	0,281	0,561	0,717	0,042

(Fig. 8A). No caso das temperaturas, esta análise sugere que, em geral, as EMAs tenderam mostrar um melhor ajuste (maior concordância entre temperaturas interpoladas e observadas), com diferenças estatisticamente significativas em fevereiro, no caso das temperaturas máximas, e entre fevereiro e abril, no caso das temperaturas mínimas (Fig. 8B-C).

Tabela 4 - Correlações parciais entre as temperaturas mínimas mensais de cada tipo de estação climatológica, e a elevação e a latitude correspondentes. (r_c) correlação no caso das estações convencionais; (p_c) probabilidade da correlação das estações convencionais; (r_a) correlação no caso das estações automáticas; (p_a) probabilidade da correlação das estações automáticas; (p_{c-a}) probabilidade resultante da comparação das correlações acima mencionadas através das transformações de Fisher (1915, 1921). Todas as correlações com $p < 0,001$.

Mes	Elevação			Latitude		
	r_c	r_a	p_{c-a}	r_c	r_a	p_{c-a}
Jan	-0,844	-0,893	0,101	0,681	0,851	0,003
Fev	-0,854	-0,854	0,133	0,686	0,872	0,001
Mar	-0,793	-0,835	0,215	0,769	0,899	0,002
Abr	-0,740	-0,792	0,212	0,858	0,934	0,005
Mai	-0,783	-0,807	0,440	0,937	0,961	0,060
Jun	-0,739	-0,725	0,424	0,933	0,954	0,111
Jul	-0,699	-0,687	0,442	0,932	0,947	0,208
Ago	-0,662	-0,687	0,386	0,911	0,945	0,057
Set	-0,558	-0,603	0,334	0,873	0,925	0,040
Out	-0,562	-0,621	0,283	0,823	0,911	0,010
Nov	-0,685	-0,752	0,190	0,835	0,919	0,008
Dec	-0,785	-0,848	0,114	0,781	0,895	0,005

4. Discussão e Conclusões

Do ponto de vista da abrangência geográfica, este é o maior estudo comparativo da informação climática fornecida pelas EMCs e as EMAs brasileiras feito até o momento. Cristaldo *et al.* (2017), concluíram que, no caso do Pantanal, embora que o número de estações em operação seja satisfatório segundo o estabelecido pela WMO, a densidade da rede não é satisfatória nas estações de operação por falta de manutenção, criando assim a necessidade de estações adicionais. Esta conclusão pode ser extrapolada para o resto do Brasil, especialmente considerando que muitas das EMAs ainda não estão fornecendo informação concordante aos critérios da WMO.

Em geral, os resultados deste estudo mostram o que já tem sido reportado na literatura para casos particulares: que o grau de semelhança da informação fornecida por ambos os tipos de estações meteorológicas pode ser muito congruente. Efetivamente, enquanto alguns autores já reportaram boa concordância entre a informação meteorológica proveniente de ambos os tipos de estações (Souza *et al.*, 2003; Pereira *et al.*, 2008; Strassburger *et al.*, 2011; Funari e Pereira, 2012; Almeida e Hermenegidio, 2013), outros reportaram discrepâncias, em ocasiões marcadas, entre EMCs e EMAs tanto em outros países (Kusmierek-Tomaszewska *et al.*, 2012; Karatarakis *et al.*, 2013; Urban, 2015; Kaya, 2017) quanto a nível local no Brasil (Pinto *et al.*, 2006; Oliveira *et al.*, 2010; Lucas *et al.*, 2010; Campos *et al.*, 2016; Ribeiro *et al.*, 2017).

Similarmente, neste estudo, as distribuições centradas em zero e marcadamente leptocúrticas dos histo-

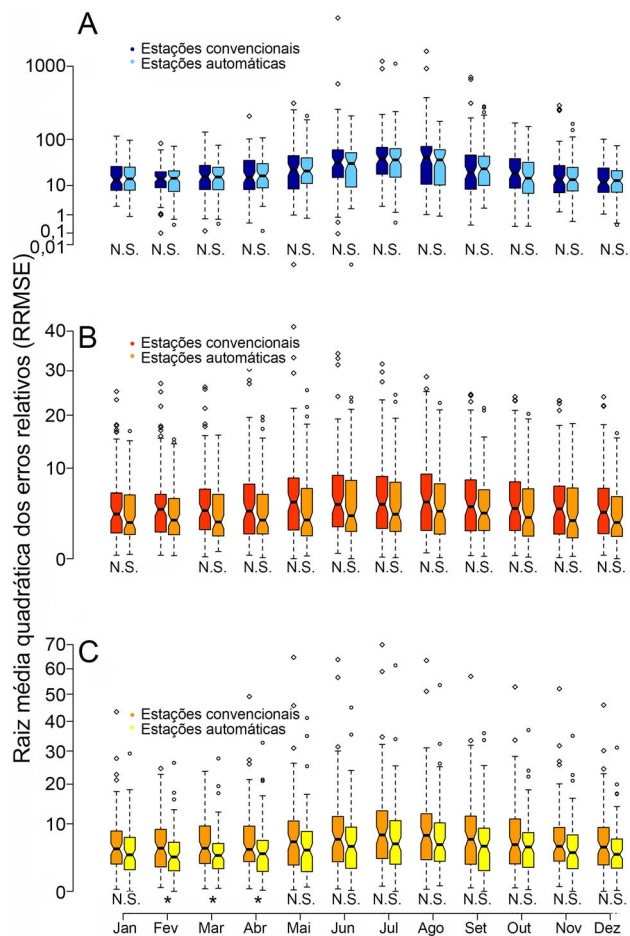


Figura 8 - Comparação entre as estações convencionais e as automáticas homônimas dos valores mensais da raiz média quadrática dos erros relativos (RRMSE pelas suas siglas no inglês), calculados com os valores observados e interpolados para cada estação. (A) precipitação; (B) temperatura máxima; e (C) temperatura mínima. Na base de cada gráfica encontra-se o resumo do teste bicaudal pareado t de Student: (N.S.) não significativo; (*) $p < 0,05$; (**) $p < 0,01$; (***) $p < 0,001$. Os eixos das ordenadas estão em escala logarítmica.

gramas correspondentes as diferenças simples (calculadas como os valores das EMCs menos os valores das EMAs), representados nas Figs. 5-7, além de comparações resumidas nos boxplot das Figs. 1 e 8, indicam boa concordância na informação climática fornecida por ambos os tipos de estações. Mas também encontramos evidências sólidas de divergências, que em alguns casos podem ser dramáticas. De acordo com Linacre (2005), a existência destas incongruências é própria de toda medição meteorológica e pode ter diferentes origens. Primeiro, a forma de observação, sendo um exemplo o fator humano, ou os erros tanto na leitura das medidas oferecidas pelos instrumentos como na sua transcrição por parte dos observadores no caso das EMCs. Segundo, os erros dos próprios dos instrumentos, os quais podem ser tanto sistemáticos como ao acaso. Os erros sistemáticos (ou viés) podem ser consequência de

problemas na calibração ou na velocidade de resposta do instrumento às mudanças rápidas do elemento meteorológico medido: as EMCs estão normalmente dotadas de sensores analógicos cuja velocidade de resposta é menor que aquela dos sensores eletrônicos das EMAs. Estas diferenças sistemáticas tendem ser consistentes e podem ser compensadas aplicando fatores de correção. Os erros ao acaso são produzidos por defeitos nos instrumentos, ou pelo efeito combinado de fatores seguindo um padrão quase aleatório. Por exemplo, Sevruk e Chvíla (2005) encontraram erros na medição da precipitação por parte das EMAs na Eslováquia, especialmente quando as quantidades de precipitação líquida foram sob os 0,05 mm, quando os intervalos de medição foram maiores que três minutos, quando as temperaturas estavam acima dos 15 °C, e por problemas do software usado para corrigir o efeito das batidas pelo vento, vibrações e mudanças súbitas do peso no detector. Fatores semelhantes poderiam explicar o desempenho ligeiramente melhor das EMCs na medição da precipitação, segundo os indicadores considerados neste estudo. Terceiro, o local exato da estação meteorológica, ou "exposição", tem que garantir a representatividade do elemento meteorológico que está sendo medido na área aonde a estação foi instalada, já que mudanças menores nas condições exatas do local das estações podem resultar em discrepâncias entre as medições. E, finalmente, as diferenças no produto da amostragem também podem resultar em divergências nas medições, que no presente estudo podem incluir diferenças na quantidade e sobreposição temporal das séries de dados usados.

Aqueles casos aonde as EMAs consistentemente registraram médias mensais substancialmente diferentes do que as EMCs, merecem estudos mais profundos a fim de detectar as causas, que neste caso há existência de uns erros sistemáticos que poderiam ser facilmente retificáveis através da aplicação de algum fator de correção. E essa correção é necessária, porque tais diferenças poderiam ser interpretadas como mudanças decorrentes de variações climáticas que, de fato, não ocorreram (Lucas *et al.*, 2010), e que poderiam ter impactos substanciais em políticas públicas, planos de manejo, etc. Por exemplo, voltando para o caso das estações localizadas na Itaberaba (BA), aonde a EMA registrou temperaturas médias mínimas de 2,5 °C acima da EMC homônima, estes registros poderiam erroneamente indicar um incremento substancial das temperaturas, provavelmente acima das metas propostas no Acordo de Paris, que propôs reduzir as emissões de gases de efeito estufa para manter o aumento da temperatura global bem abaixo de 2,0 °C e buscar esforços para limitar o aquecimento a 1,5 °C acima dos níveis pré-industriais (CQNUMC, 2015). Infelizmente, estas correções em muitos casos vão se limitar para aquelas localidades aonde existam os dois tipos de estações, pelo que seria desejável que a instalação das EMAs passe por um período de cali-

bração com EMCs, no mesmo local, seguido de testes de calibração periódicos.

Não obstante, a maioria dos erros detectados são aleatórios, com algumas EMAs em alguns meses subestimando, e outros sobrestimando, os valores das EMCs. A origem desses erros é mais difícil de determinar e ainda mais difícil de corrigir. Por exemplo, no caso da precipitação estas discrepâncias podem estar associadas à intensidade das chuvas, flutuações sazonais e lacunas nos registros para determinados períodos, ou ao tipo de medidores utilizados e as suas características, tais como a área de captação e facilidade de entupimento (Tanner, 1990; Torre, 1995; Lucas *et al.*, 2010), além do fato que grande parte da precipitação no Brasil é de origem convectiva, ou seja, localizada (Reboita *et al.*, 2010) e que o TRMM faz a avaliação em áreas e não em pontos como os pluviômetros em superfície.

Assim, o Brasil conta com dois conjuntos de dados climáticos cada um dos quais tem alguns problemas. Por exemplo, as EMCs são menos numerosas, as suas coordenadas geográficas são menos exatas e precisas (veja o problema que já foi mencionado por Vianna *et al.* (2017) para Santa Catarina), e provavelmente, tem erros provenientes do fator humano. As EMAs são mais numerosas, mas muitas ainda não fornecem informação congruente aos critérios da WMO, e podem estar afetadas por problemas na calibração dos instrumentos, e muitas delas estão instaladas em locais novos, aonde não existe informação prévia que possa servir de base de comparação para quantificar a confiabilidade da informação fornecida. Assim, é natural que surge a pergunta: Diante de um cenário de caracterização climática em escala macro, qual fonte de informação tem que ser usada preferencialmente?

Mesmo sendo um procedimento que tem recebido críticas (Stegenga e Menon, 2017), é comum considerar que quando uma variedade de evidências independentes sustenta uma hipótese, essa hipótese é mais provável que seja verdadeira, o que às vezes chamamos de "robustez". Isso pode ser usado como apoio para várias formas de distinguir artefatos de entidades reais para nos ajudar na nossa procura de objetividade. Assim, as recorrentes correlações maiores entre precipitação e TRMM (apesar do grau de circularidade, pois no TRMM as estações são consideradas como dados de referência), no caso das EMCs, que coincide com comparações mais locais feitas no Brasil (Collischonn *et al.*, 2007), e das temperaturas com a latitude no caso das EMAs, sugere que a informação de cada tipo de estação tem um grau de confiabilidade um pouco maior segundo a parâmetro a serem explorado. Isso, apesar dos problemas já comentados sobre as coordenadas geográficas e que vários autores afirmarem que em alguns casos o TRMM pode sobrestimar a precipitação no Brasil (Franchito *et al.*, 2009; Pereira *et al.*, 2013). Uma possível explicação é que a topografia do Brasil não é tão abrupta, por conseguinte carente daqueles gradientes climáticos

altamente contrastantes como pode ser observar por exemplo nos Andes (Ramoni Perazzi, 2016), e as imprecisões nas localizações das estações não tem um impacto significativo. Ainda assim, todos os dados, tanto das EMCs como das EMAs, exigem um controle de qualidade prévio para serem usados.

Recomenda-se realizar análises similares no futuro, quando as EMAs tenham mais tempo operativas e incrementando o número de variáveis a serem consideradas. Adicionalmente, o Brasil conta com um conjunto ainda maior de estações meteorológicas, como indicado no portal do sistema de monitoramento agrometeorológico, muitas das quais estão sob a responsabilidade de outras instituições diferentes ao INMET, e inclusive por parte de particulares. Tal heterogeneidade, potencialmente acrescenta outras fontes de discrepância nas medições, e futuros esforços teriam que incluir a avaliação destas estações também.

Agradecimentos

Os dados das estações automáticas foram gentilmente fornecidos pela Seção de Armazenamento de Dados Meteorológicos do INMET. PRP agradece a bolsa da Organização dos Estados Americanos por meio de seu Programa de Alianças para a Educação e a Capacitação (Bolsas Brasil - PAEC OEA-GCUB).

Bibliografia

- AHMAD, L.; HABIB KANTH, R.; PARVAZE, S.; SHERAZ MAHDI, S. Automatic weather station. In: **Experimental Agrometeorology: A Practical Manual**. Cham: Springer, p. 83-87, 2017.
- ALMEIDA, H.A. DE.; HERMENEGIDIO, G.M. DOS S. Comparação de dados meteorológicos obtidos por estações meteorológicas convencional e automática. **Revista Brasileira de Climatologia**, v. 12, p. 33-47, 2013.
- ARVOR, D.; DUBREUIL, V.; RONCHAIL, J.; SIMÕES, M.; FUNATSU, B.M. Spatial patterns of rainfall regimes related to levels of double cropping agriculture systems in Mato Grosso (Brazil). **International Journal of Climatology**, v. 34, n. 8, p. 2622-2633, 2014.
- BAGHERI, F. Mapping drought hazard using SPI index and GIS (A case study: Fars province, Iran). **International Journal of Environment and Geoinformatics**, v. 3, n. 1, p. 22-28, 2016.
- BROCKWELL, P.J.; DAVIS, R.A. **Time Series: Theory and Methods**. Nova York: Springer-Verlag, p. 580, 1991.
- CAMPOS, R.B.; SAKIYAMA, N.R.M.; OLIVEIRA, C.C. Análise de dados climáticos das estações convencional e automática em Teófilo Otoni - MG - Estratégias bioclimáticas para a construção civil. **Revista Científica Multidisciplinar Núcleo do conhecimento**, v. 1, n. 9, p. 914-937, 2016.

- CAO, Y.; ZHANG, W.; WANG, W. Evaluation of TRMM 3B43 data over the Yangtze River Delta of China. **Scientific Reports**, v. 8, p. 5290, 2018.
- CARREGA, P. Basics of climatological and meteorological observations for GIS applications. In: **Geographical Information and Climatology**. Londres: ISTE Group, p. 1-27, 2013.
- CASHION, J.; LAKSHMI, V.; BOSCH, D.; JACKSON, T.J. Microwave remote sensing of soil moisture: evaluation of the TRMM microwave imager (TMI) satellite for the Little River Watershed Tifton, Georgia. **Journal of Hydrology**, v. 307, n. 1-4, p. 242-253, 2005.
- CHAMBERS, J.M.; CLEVELAND, W.S.; KLEINER, B.; TUCKEY, P.A. **Graphical Methods for Data Analysis**. Boca Raton: Chapman and Hall/Cole Publishing Company, p. 395, 1983.
- CHEN, F.W.; LIU, C.W. Estimation of the spatial rainfall distribution using inverse distance weighting (IDW) in the Middle of Taiwan. **Paddy and Water Environment**, v. 10, p. 209-222, 2012.
- COLLIER, C.G. **Hydrometeorology**. Oxford: John Wiley & Sons, Ltd, p. 376, 2016.
- COLLISCHONN, B.; ALLASIA, D.; COLLISCHONN, W.; TUCCI, C.E.M. Desempenho do satélite TRMM na estimativa de precipitação sobre a Bacia do Paraguai Superior. **Revista Brasileira de Cartografia**, v. 59, n. 1, p. 93-99, 2007.
- CRISTALDO, M.F.; SOUZA, C.C. DE; LEANDRO, J. DE; PADOVANI, C.R. *et al.* Analysis and distribution of the rainfall monitoring network in a Brazilian Pantanal region. **Revista Brasileira de Meteorologia**, v. 32, n. 2, p. 199-205, 2017.
- CQNUMC - Convenção-Quadro das Nações Unidas sobre a Mudança do Clima. **Adoption of the Paris Agreement**. Paris: Conference of the Parties, p. 32, 2015.
- DALY, C.; HALBLEIB, M.; SMITH, J.I.; GIBSON, W.P.; DOGGETT, M.K. *et al.* Physiographically sensitive mapping of climatological temperature and precipitation across the conterminous United States. **International Journal of Climatology**, v. 28, p. 2031-2064, 2008.
- DALY, C.; NEILSON, R.P.; PHILLIPS, D.L. A statistical-topographic model for mapping climatological precipitation over mountainous terrain. **Journal of Applied Meteorology**, v. 33, n. 2, p. 140-158, 1994.
- DANIELSON, J.J.; GESCH, D.B. **Global Multi-Resolution Terrain Elevation Data 2010 (GMTED2010)**. Sioux Falls: U.S. Geological Survey Earth Resources Observation and Science, p. 26, 2011.
- DAS, H.P.; ADAMENKO, T.I.; ANAMAN, K.A.; GOMMES, R.G.; JOHNSON, G. **Agrometeorology Related to Extreme Events**. Geneva: Secretariat of the World Meteorological Organization No. 943, p.138, 2003.
- DINKU, T.; CECCATO, P.; GROVER-KOPEC, E.; LEMMA, M.; CONNOR, S.J. *et al.* Validation of satellite rainfall products over East Africa's complex topography. **International Journal of Remote Sensing**, v. 28, n. 7, p. 1503-1526, 2007.
- EFRON, B. **The Jackknife, the Bootstrap and Other Resampling Plans**. CBMS-NSF Regional Conference Series in **Applied Mathematics**. Philadelphia: Society for Industrial and Applied Mathematics, p. 100, 1982.
- FISHER, R.A. Frequency distribution of the values of the correlation coefficient in samples of an indefinitely large population. **Biometrika**, v.10, n. 4, p. 507-521, 1915.
- FISHER, R.A. On the 'probable error' of a coefficient of correlation deduced from a small sample. **Metron**, v. 1, p. 3-32, 1921.
- FRANCHITO, S.H.; RAO, V.B.; VASQUES, A.C.; SANTO, C.M.E.; CONFORTE, J.C. Validation of TRMM precipitation radar monthly rainfall estimates over Brazil. **Journal of Geophysical Research: Atmospheres**, v. 114, n. D2, p. 1-9, 2009.
- FUNARI, F.L.; PEREIRA, A.J. FILHO. 2012. Análise comparativa de medições de variáveis meteorológicas realizadas por estações meteorológicas convencional e automática instaladas no Parque Estadual das Fontes do Ipiranga - São Paulo -SP. **Revista Brasileira de Climatologia**, v. 7, p. 159-168, 2010.
- GRÄLER, B.; PEBESMA, E.; HEUVELINK, G. Spatio-temporal interpolation using gstat. **The R Journal**, v. 8, n. 1, p. 204-218, 2016.
- GRANGER, O.E. Precipitation distribution. In: OLIVER, J.E. **Encyclopedia of World Climatology**. Dordrecht: Springer Science & Business Media, p. 576-582, 2008.
- HARTMANN, D. L. **Global Physical Climatology**. Amsterdam: Elsevier Inc., p. 498, 2016.
- IBGE - Instituto Brasileiro de Geografia e Estatística. **Projeto Mudança do Referencial Geodésico - PMRG**. Disponível em: <https://www.ibge.gov.br/geociencias/informacoes-sobre-posicionamento-geodesico/sirgas/16691-projeto-mudanca-do-referencial-geodesico-pmrg.html?=&t=o-queue#3>. Acessado em: 29 mar. 2020, 2005.
- IBGE - Instituto Brasileiro de Geografia e Estatística. **Malha Municipal**. Disponível em: <https://www.ibge.gov.br/geociencias/organizacao-do-territorio/estrutura-territorial/15774-malhas.html>. Acessado em: 20 mar. 2020, 2018.
- JAVANMARD, S.; YATAGAI, A.; NODZU, M.; BODAGHMAL, J.; KAWAMOTO, H. Comparing high-resolution gridded precipitation data with satellite rainfall estimates of TRMM_3B42 over Iran. **Advances in Geosciences**, v. 25, p. 119-125, 2010.
- JOYCE, R.J.; XIE, P. Kalman filter-based CMORPH. **Journal of Hydrometeorology**, v.12, n. 6, p. 1547-1563, 2011.
- KÁLMÁN, R. A new approach to linear filtering and prediction problems. **Journal of Basic Engineering**, v. 82, n. 1, p. 35-45, 1960.
- KARATARAKIS, N.; SARANTOPOULOS, A.; CHARANTONIS, T.; NASTOS, P.T.; LIANOS, K. *et al.* A first comparative analysis of temperature data collected from automatic and conventional weather stations in Greece. In: HELMIS C.; NASTOS P. **Advances in Meteorology, Climatology and Atmospheric Physics**. Berlin: Springer, p. 169-174, 2013.
- KAYA, S. Konvansiyonel ve otomatik meteoroloji istasyon verilerinden hesaplanan referans evapotranspirasyon degerlerinin kiyaslanmasi. **Türk Doga ve Fen Dergisi**, v. 6, n. 2, p. 83-87, 2017.
- KIM, S. ppcor: An R Package for a fast calculation to semi-partial correlation coefficients. **Communications for Statis-**

- tical Applications and Methods**, v. 22, n. 6, p. 665-674, 2015.
- KÖPPEN, W. Versuch einer Klassifikation der Klimate, vorzugsweise nach ihren Beziehungen zur Pflanzenwelt. **Geographische Zeitschrift**, v. 6, p. 593-611, 1900.
- KRESSE, W.; DANKO D.M. **Springer Handbook of Geographic Information**. Dordrecht: Springer, p. 619, 2012.
- KUMMEROW, C.; SIMPSON, J.; THIELE, O.; BARNES, W.; CHANG, A.T.C. *et al.* The status of the Tropical Rainfall Measuring Mission (TRMM) after two years in orbit. **Journal of Applied Meteorology**, v. 39, n. 12, p. 1965-1982, 2000.
- KUSMIEREK-TOMASZEWSKA, R.; ZARSKI, J.; DUDEK, S. Meteorological automated weather station data application for plant water requirements estimation. **Computers and Electronics in Agriculture**, v. 88, p. 44-51, 2012.
- LEVIZZANI, V. Satellite rainfall estimates: a look back and a perspective. In: PROCEEDINGS OF THE EUMETSAT METEOROLOGICAL SATELLITE DATA USERS CONFERENCE, Italia. **Resumos Expandidos**: Bolonha, European Organisation for the Exploitation of Meteorological Satellites, 2000.
- LI, J.; HEAP, A.D. A review of comparative studies of spatial interpolation methods in environmental sciences: performance and impact factors. **Ecological Informatics**, v. 6, n. 3-4, p. 228-241, 2011.
- LINACRE, E. **Climate Data and Resources: A Reference and Guide**. Londres: Taylor & Francis, p. 366, 2005.
- LUCAS, E.W.M.; RODRIGUES, J.E.; REZENDE, J.M.; ABREU, S.F.; BRAGA A.P. Comparative analysis of observed meteorological data in the conventional and surface automatic station at Brazilian National Institute of Meteorology. In: WMO TECHNICAL CONFERENCE ON METEOROLOGICAL AND ENVIRONMENTAL INSTRUMENTS AND METHODS OF OBSERVATION, Helsinki. **Resumos Expandidos**. Helsinki: Organização Meteorológica Mundial, 2010.
- MANTAS, V.; LIU, Z.; CARO, C.; PEREIRA, A. Validation of TRMM multi-satellite precipitation analysis (TMPA) products in the Peruvian Andes. **Atmospheric Research**, v. 163, p. 132-145, 2015.
- MENG, J.; LI, L.; HAO, Z.; WANG, J.; SHAO, Q. Suitability of TRMM satellite rainfall in driving a distributed hydrological model in the source region of Yellow River. **Journal of Hydrology**, v. 509, p. 320-332, 2014.
- MORITZ, S.; BARTZ-BEIELSTEIN, T. imputeTS: time series missing value imputation in R. **The R Journal**, v. 9, n. 1, p. 207-218, 2017.
- OLIVEIRA, A.D. DE; ALMEIDA, B.M. DE; CAVALCANTE, E.G.; SOBRINHO, J.E.; VIEIRA, R.Y.M. Comparação de dados meteorológicos obtidos por estação convencional e automática em Jaboticabal - SP. **Revista Caatinga**, v. 23, n. 4, p. 108-114, 2010.
- PEBESMA, E.J. Multivariable geostatistics in S: the gstat package. **Computers & Geosciences**, v. 30, n. 7, p. 683-691, 2004.
- PEREIRA, G.; SILVA, M.E.S.; MORAES, E.C.; CARDOZO, F.S. Avaliação dos dados de precipitação estimados pelo satélite TRMM para o Brasil. **Revista Brasileira de Recursos Hídricos**, v. 18, n. 3, p. 139-148, 2013.
- PEREIRA, L.M.P.; CARAMORI, P.H.; RICCE W. DA S.; CAVIGLIONE, J.H. Análise comparativa de dados meteorológicos obtidos por estação convencional e automática em Londrina - PR. **Semina: Ciências Agrárias**, v. 29, n. 2, p. 299-305, 2008.
- PINTO, H.S.; PELLEGRINO, G.Q.; FONSECHI, D.B.; CORRAL, G.; CARAMORI, P.H. *et al.* Comparison between daily meteorological data collected by automatic and conventional stations. In: INTERNATIONAL CONFERENCE ON EXPERIENCES WITH AUTOMATIC WEATHER STATIONS, 4, 2006, Lisboa. **Resumos Expandidos**. Lisboa: Instituto de Meteorologia, p. 1-9, 2006.
- PLANTON, S. **Annex III. Glossary: IPCC - Intergovernmental Panel on Climate Change**. Cambridge: IPCC Fifth Assessment Report, p.1465, 2013.
- R CORE TEAM. **R: A Language and Environment for Statistical Computing**. Versão 3.6.1. Vienna: R Foundation for Statistical Computing, 2019.
- RAJU, N.J. **Geostatistical and Geospatial Approaches for the Characterization of Natural Resources in the Environment**. Cham: Springer, p. 969, 2016.
- RAMONI PERAZZI, P. **Modelado de la Distribución Espacial de la Precipitación Media Mensual de los Andes Venezolanos**. Mérida. Tese de Mestrado em modelagem e simulação, Facultad de Ingeniería, Universidad de Los Andes, p. 76, 2016.
- RAMONI-PERAZZI, P.; ABLAN-BORTONE, M.; THIELEN, D.R. A geographic analysis on the mean monthly precipitation information available for the Venezuelan Andes. **Revista Geográfica Venezolana**, v. 58, n. 1, p. 86-10, 2016.
- REBOITA, M.S.; GAN, M.A.; ROCHA, R.P. DA; AMBRIZZI, T. Regimes de precipitação na América do Sul: uma revisão bibliográfica **Revista Brasileira de Meteorologia**, v. 25, n. 2, p.185-204, 2010.
- RIBEIRO, A. DE A.; ANDRADE, A.S. DE; SILVA, E.M. DA; SIMEÃO, M.; BASTOS, E.A. Comparação entre dados meteorológicos obtidos por estações convencionais e automáticas no Estado do Piauí, Brasil. **Irriga**, v. 22, n. 2, p. 220-235, 2017.
- SAHOO, A.K.; SHEFFIELD, J.; PAN, M.; WOOD, E.F. Evaluation of the tropical rainfall measuring mission multi-satellite precipitation analysis (TMPA) for assessment of large-scale meteorological drought. **Remote Sensing of Environment**, v. 159, p. 181-193, 2015.
- SEVRUK, B.; CHVÍLA, B. Error sources of precipitation measurements using electronic weight systems. **Atmospheric Research**, v. 77, n. 1-4, p. 39-47, 2005.
- SHEPARD, D. A two-dimensional interpolation function for irregularly-spaced data. In: PROCEEDINGS OF THE 1968 ACM NATIONAL CONFERENCE, Nova York. **Resumos Expandidos**. Nova York: Association for Computing Machinery, p. 517-524, 1968.
- SHRIVASTAVA, R.; DASH, S.; HEGDE, M.; PRADEEPMAR, K.; SHARMA, D. Validation of the TRMM Multi Satellite Rainfall Product 3B42 and estimation of scavenging coefficients for 131 I and 137 Cs using TRMM 3B42 rainfall data. **Journal of Environmental Radioactivity**, v. 138, p. 132-136, 2014.

- SIVAGAMI, M.; VAISHALI, A.; RAMAKRISHNAN, R.; SUBASINI, A. Weather prediction model using Savitzky-Golay and Kalman Filters. **Procedia Computer Science**, v. 165, p. 449-455, 2019.
- SOUZA, I. DE A.; GALVANI, E.; ASSUNÇÃO, H.F. DA. Estudo comparativo entre elementos meteorológicos monitorados por estações convencional e automática na região de Maringá, Estado do Paraná. **Acta Scientiarum Technology**, v. 25, n. 2, p. 203-207, 2003.
- STEGENGA, J.; MENON, T. Robustness and independent evidence. **Philosophy of Science**, v. 84, n. 3, p. 414-435, 2017.
- STRASSBURGER, A.S.; MENEZES, A.J.E.A. DE; PERLEBERG, T.D.; EICHOLZ, E.D.; MENDEZ, M.E.G. *et al.* Comparação da temperatura do ar obtida por estação meteorológica convencional e automática. **Revista Brasileira de Meteorologia**, v. 26, n. 2, p. 273-278, 2011.
- TANNER, B.D. Automated weather station. **Remote Sensing Reviews**, v. 5, n. 1, p. 73-98, 1990.
- TORRE, A. NETO. **Estudo de Implementação de um Sistema de Monitoramento Remoto de Variáveis Edaf Ambientais**. São Carlos, Tese (Doutorado) - Instituto de Física e Química, Universidade de São Carlos. p. 146, 1995.
- TRAPASSO, L.M. Temperature distribution. In: OLIVER, J.E. **Encyclopedia of World Climatology**. Dordrecht: Springer Science & Business Media, p. 711-715, 2008.
- URBAN, G. An attempt to assess the results of air temperature measurements from automatic weather stations in comparison to glass thermometer measurements in the context of weather types, **Bulletin of Geography. Physical Geography Series**, v. 9, n. 1, p. 67-79, 2015.
- VIANNA, L.F. DE N.; PERIN, E.B.; RICCE, W. DA S.; MASHIGNAN, A.M.; PANDOLFO, C. Bancos de dados meteorológicos: análise dos metadados das estações meteorológicas no Estado de Santa Catarina, Brasil. **Revista Brasileira de Meteorologia**, v. 32, n. 1, p. 53-64, 2017.
- WMO - WORLD METEOROLOGICAL ORGANIZATION. **Calculation of Monthly and Annual 30-Year Standard Normals**. Genebra: WMO - Organização Meteorológica Mundial, n. 341, 12 p., 1989.
- WMO - WORLD METEOROLOGICAL ORGANIZATION. **Guide to Climatological Practices**. Genebra: WMO - Organização Meteorológica Mundial, n. 100, p. 12, 2011.
- WMO - WORLD METEOROLOGICAL ORGANIZATION. **Guide to Meteorological Instruments and Methods of Observation**. Genebra: Organização Meteorológica Mundial, n. 8, p. 548, 2018.
- ZHOU, C.; SU, F.; HARVEY, F.; XU, J. **Spatial Data Handling in Big Data Era**. Singapura: Select papers from the 17th IGU Spatial Data Handling Symposium, p.252, 2017.

Endereços de Internet

- IBGE: ftp://geoftp.ibge.gov.br/organizacao_do_territorio/malhas_territoriais/malhas_municipais/municipio_2018/Brasil/BR/br_municipios.zip
- INMET: <http://www.inmet.gov.br/>
- http://www.inmet.gov.br/portal/index.php?r=estacoes/estacoes_Convencionais
- Monitoramento agrometeorológico: <https://www.agritempo.gov.br/>
- Tropical Rainfall Measuring Mission TRMM: <https://gpm.nasa.gov/data-access/downloads/trmm>

Material Suplementar

- Tabela S1 - Lista das estações meteorológicas do Instituto Nacional de Meteorologia analisadas neste estudo.

License information: This is an open-access article distributed under the terms of the Creative Commons Attribution License (type CC-BY), which permits unrestricted use, distribution and reproduction in any medium, provided the original article is properly cited.