

XXIV SIMPÓSIO BRASILEIRO DE RECURSOS HÍDRICOS

ANÁLISE DA CORRELAÇÃO DA PRECIPITAÇÃO ENTRE PLUVIÓGRAFOS EM DIFERENTES ESCALAS TEMPORAIS

Emerson da Silva Freitas¹; Filipe Carvalho Lemos²; Cristiano das Neves Almeida³; Victor Hugo Rabelo Coelho⁴; Geraldo Moura Ramos Filho⁵; Marcela Antunes Meira⁶; Abner Lins Silva⁷

RESUMO

A precipitação, na forma de chuva, constitui uma variável de papel relevante no ciclo hidrológico global, influenciando a dinâmica geomorfológica e ambiental. O objetivo é avaliar a correlação entre estações pluviométricas relacionando a várias resoluções temporais (mês, semana, dia, 3 horas, 1 hora e 10 min). A metodologia consistiu em avaliar as correlações para sugerir uma distância entre estações que garantissem uma boa cobertura da distribuição espacial da chuva. Um dos principais resultados é a recomendação da quantidade de pluviômetro é de um para cada área com raio de 20 km, 10 km, 5 km e 2,5 km considerando as resoluções diária, 3 horas, 1 hora e 10 min, respectivamente. Outro resultado é que essas distâncias podem variar com o clima, como no tropical e semiárido pode ser de 14Km e 8 Km respectivamente para a resolução temporal diária.

Palavras-Chave – Monitoramento pluviométrico, eficiência, distância entre estações

INTRODUÇÃO

A precipitação, na forma de chuva, constitui uma variável de papel relevante no ciclo hidrológico global, influenciando a dinâmica geomorfológica e ambiental. A quantificação precisa e melhor entendimento de sua distribuição espaço-temporal são essenciais para garantir a confiabilidade do planejamento e gerenciamento dos recursos hídricos, abastecimento hídrico, estudos de validação de modelos numéricos de previsão de tempo, balanço hídrico, diversas atividades produtivas, projetos de prevenção de desastres naturais e diversos outros estudos na qual esta variável é empregada (FREITAS, 2010).

Há grandes desafios nessa área no que concerne ao monitoramento e à previsão de dados de chuva, uma vez que os eventos têm elevada variabilidade espaço-temporal (Futrell *et al.* 2005). Segundo Costa *et al.* (2012), para o aumento da confiabilidade dos resultados nas análises temporais dos estudos de precipitação, é necessária boa qualidade dos dados estimados, assim como boa disponibilidade e distribuição espacial.

Um dos órgãos responsáveis pelo monitoramento da chuva no Brasil é o Centro Nacional de Monitoramento e Alerta de Desastres Naturais (CEMADEN). Em 2020, a rede de pluviômetros automáticos possuía 3.829 estações distribuídas pelo país, todavia, o arranjo de distribuição é irregular. As regiões Sul, Sudeste e litoral concentram a maior parte das estações, enquanto no interior

1) Instituto Federal do Pernambuco, IFPE, Campus Pesqueira- PE, e-mail: emerson.freitas@pesqueira.ifpe.edu.br

2) Laboratório de Recursos Hídricos e Engenharia Ambiental, UFPB, João Pessoa – PB, e-mail: filipe_carvalho_l@hotmail.com

3) Laboratório de Recursos Hídricos e Engenharia Ambiental, UFPB, João Pessoa – PB, e-mail: almeida74br@yahoo.com.br

4) Departamento de Geociências, UFPB, João Pessoa – PB, e-mail: victor-coelho@hotmail.com

5) Laboratório de Recursos Hídricos e Engenharia Ambiental, UFPB, João Pessoa – PB, e-mail: geraldo0511@hotmail.com

6) Laboratório de Recursos Hídricos e Engenharia Ambiental, UFPB, João Pessoa – PB, e-mail: marcelameira.ufcg@gmail.com

7) Laboratório de Recursos Hídricos e Engenharia Ambiental, UFPB, João Pessoa – PB, e-mail: abner.lins.silva@gmail.com

e Norte do País, a quantidade de estações é consideravelmente menor. Collischonn *et al.* (2008) afirmam que nas regiões tropicais, particularmente, a variabilidade espaço-temporal das chuvas é mal representada e os resultados dos modelos chuva-vazão são frequentemente insatisfatórios.

Os pluviômetros são instrumentos que medem a chuva diretamente no solo de maneira direta e pontual. Entretanto, se considerarmos uma rede de pluviômetros, a distribuição espacial da chuva é apenas parcialmente conhecida, já que entre dois pluviômetros não há informações coletadas.

O custo de instalação, manutenção e operação de uma rede de monitoramento de chuva é elevado, por isso, encontrar um parâmetro de instalação “ideal”, em termos de distância entre estações e intervalos de medição, é uma solução plausível para abranger de forma mais eficiente o monitoramento em territórios continentais como o Brasil. Uma mesma quantidade de equipamento possibilitaria um acompanhamento mais amplo dos eventos de precipitação se instalados com uma distribuição adequada à resolução de monitoramento almejada.

Ademais, outro viés envolvendo o conhecimento da relação distância/correlação, é a possibilidade de preenchimento de falhas nas medições, permitindo aumentar a quantidade de anos de dados sem que se perca a confiabilidade e qualidade dos dados.

Mishra (2013) avaliou, com base em 8 pluviômetros em uma área de 50x50 km, a variação na precipitação diária em função do espaçamento das estações. O autor constatou que os coeficientes de correlação diminuem de 82% para 21% conforme o espaçamento do medidor aumenta de 5 km para 40 km, enquanto o erro quadrático médio aumenta de 8,29 mm para 51,27 mm. Pequenos erros são relatados ao considerar 4 a 7 equipamentos para representar a área. No entanto, a redução para 3 ou menos resultou em erro significativo. Resultados semelhantes foram encontrados por Bega (2004), ao analisar pluviômetros na Unidade de Pesquisa e Desenvolvimento de Pindorama (UPD), em São Paulo.

A correlação entre estações de monitoramento para determinadas distâncias pode impactar diretamente a distribuição dos pluviômetros. A depender da escala a qual se quer medir a precipitação, é necessária uma diferente quantidade de pluviômetros por quilometro quadrado. Quanto mais grosseira a escala temporal, menos pluviômetros são necessários para medir as diferentes distribuições de precipitação em uma área.

Neste contexto, o presente trabalho objetiva avaliar a correlação entre as estações do CEMADEN, relacionando as medições a intervalos de tempo (mês, semana, dia, 3 horas, 1 hora e 10 min) e distância euclidiana entre as estações. Para tanto, serão levadas em conta as divisões climáticas sugeridas por Köppen, atualizada por Alvares *et al.* (2013). Por fim, baseado nos valores encontrados de correlação, serão apresentados gráficos que indicam, por região climática, a distância máxima entre as estações para realizar um monitoramento eficiente em detrimento da resolução temporal de monitoramento desejada.

METODOLOGIA

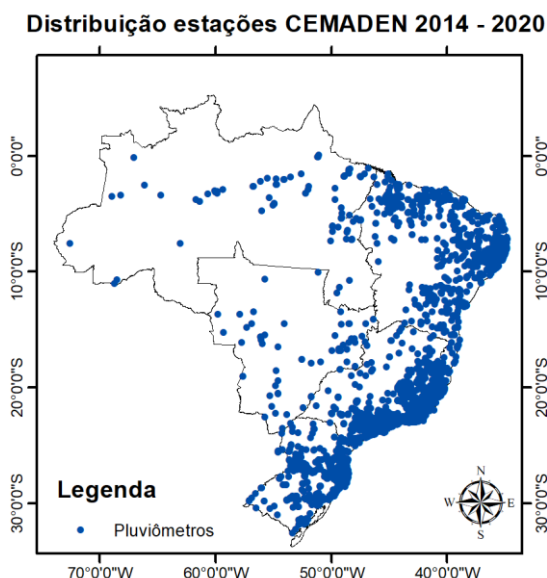
Essa seção foi subdividida em cinco tópicos, a saber: a área de estudo, dados de precipitação do CEMADEN, controle de qualidade dos dados, correlação entre as séries de dados das estações e avaliação da correlação entre as estações.

Área de Estudo

A área de estudo escolhida para realização da pesquisa foi Brasil (Figura 1), um país de dimensões continental, que cobre aproximadamente 8,5 milhões de km² entre as latitudes 5° 16'N e 33° 45'S e longitudes 34° 47'W e 73° 59'W. Segundo Alvares *et al.* (2013), o território brasileiro possui doze tipos climáticos de Köppen divididos em três zonas principais (Tropical, Semiárido e Subtropical Úmido), com temperatura média anual do ar variando aproximadamente de 10° C a 26°

C. A precipitação anual no Brasil é caracterizada por alta variabilidade espacial, variando de 380 a 4.000 mm (Gadelha *et al.*, 2019).

Figura 1-Todas as estações (2.921) entre os anos analisados.



Dados do CEMADEN

Os dados utilizados neste estudo estão disponibilizados gratuitamente no site do Centro Nacional de Monitoramento e Alerta de Desastres Naturais (CEMADEN). A rede de monitoramento da chuva foi criada em 2013, para monitorar eventos extremos de precipitação e auxiliar na prevenção de desastres relacionados às chuvas, inundações e deslizamentos de terra. A rede de monitoramento do CEMADEN possui atualmente mais de 3 mil pluviômetros automáticos, que registram a precipitação em tempo real com uma resolução de 10 minutos quando há chuva. Quando não há chuva registrada, essa resolução passa a ser de 60 minutos. Os dados são disponibilizados mensalmente na página do órgão ao início de cada mês e possuem as seguintes informações: código, cidade, nome da estação, latitude, longitude, elevação, data (formato “dd/mm/aaaa”) e valor precipitado em milímetros.

Controle de qualidade dos dados de precipitação

Os dados de precipitação do CEMADEN foram submetidos a um rigoroso controle de qualidade, passando pelos seguintes procedimentos:

- Foram excluídas as estações com mais de 60 dias sem dados registrados;
- Cada estação foi comparada com as suas 5 vizinhas mais próximas;
- Foram analisadas as séries de precipitação mensal e sub-horárias (resolução temporal de 10 minutos), a fim de identificar inconsistência nos dados medidos;
- As estações que apresentavam diferenças com relação as suas vizinhas eram excluídas;
- Foi realizado o teste duplo cego, ou seja, dois pesquisadores avaliavam a mesma estação individualmente e ao fim as classificações eram confrontadas e analisadas por uma terceira pessoa, para identificar e eliminar as possíveis divergências;

Correlação entre as séries de dados das estações de monitoramento

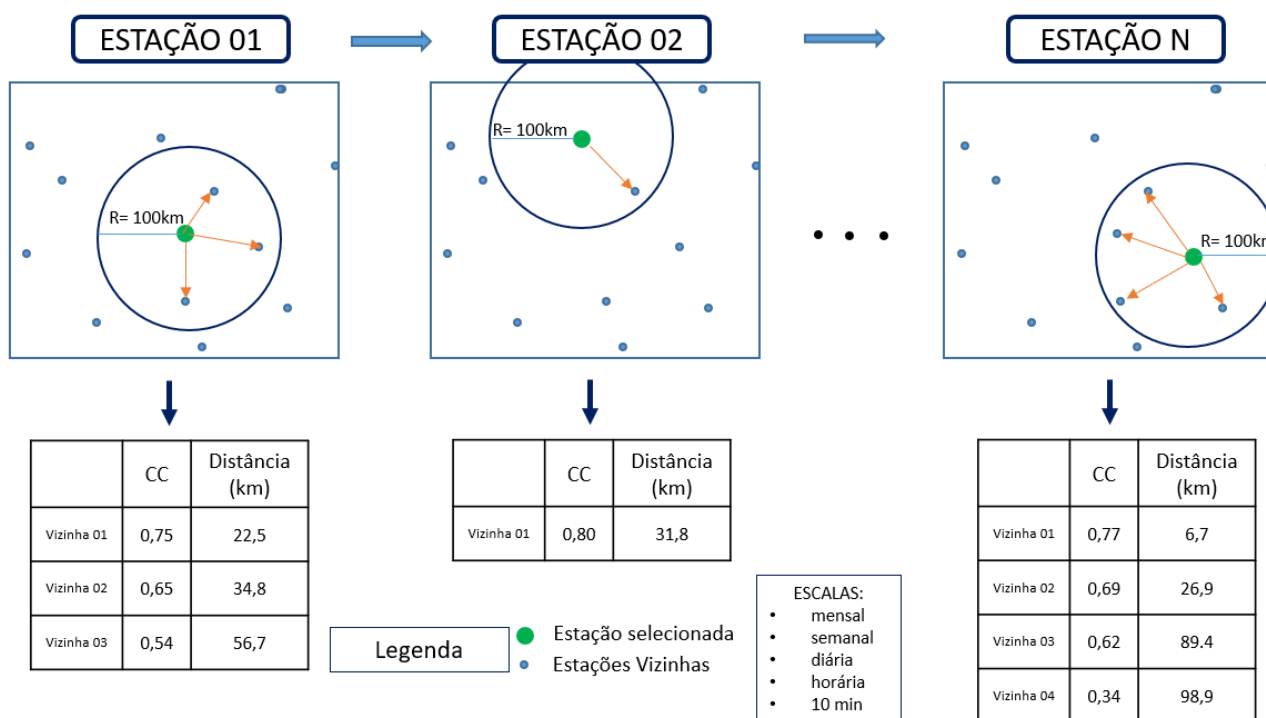
Para a análise comparativa, foram utilizados dados das estações de 2014 a 2020. Para essa análise, os valores de lâmina precipitada foram agregados, quando necessário, em diferentes resoluções (mensal, semanal, diária, horária e 10 minutos).

Para comparar e avaliar semelhança entre séries de duas estações pluviométricas para uma determinada resolução temporal, foi utilizado o Coeficiente de Correlação – CC (Eq. 1), em que “EstProx” é a n estação próxima à estação de referência (“EstRef”) e “ σ_{EstProx} ”, “ σ_{EstRef} ” os respectivos desvios. Esse coeficiente foi calculado para as diferentes resoluções temporais.

$$CC = \frac{\frac{1}{n} \times \sum_i^N \left[\left(\text{EstProx}_i - \overline{\text{EstProx}} \right) \times \left(\text{EstRef}_i - \overline{\text{EstRef}} \right) \right]}{\sigma_{\text{EstProx}} \times \sigma_{\text{EstRef}}} \quad (1)$$

A correlação foi calculada entre as estações vizinhas dentro de um raio de vizinhança, ou seja, quando uma estação era selecionada (“EstRef”), todas as estações que estavam dentro desse raio (“EstProx”) eram utilizadas para o cálculo da correlação, uma a uma, conforme Figura 1. O raio de vizinhança adotado foi de 100 km. Para realizar esse procedimento, foi desenvolvida uma rotina em *Python* para todo o processamento e análise dos dados. A metodologia resumida encontra-se na Figura 2.

Figura 2 – Cálculo das correlações entre as estações para as diferentes escalas temporais.



Avaliação da correlação entre as estações de monitoramento

As correlações entre as estações pluviométricas são dependentes da escala temporal utilizada e pela distância entre as estações. Para essa análise, foram divididas classes de distâncias de 1 em 1 km (0-1, 1-2, 2-3, ..., 99-100) e foi calculada a média das correlações para cada classe, a fim de avaliar a influência da distância entre as estações na correlação. Isso foi feito para cada uma das séries temporais definidas.

Como o Brasil é um país de dimensões continentais, com vários climas e regimes de precipitação, essa análise também foi realizada para os diferentes climas (Tropical, Semiárido e Subtropical Úmido), a fim de avaliar se esses também influenciam nas correlações entre as precipitações das estações.

RESULTADOS

Neste estudo, avaliou-se, a partir de precipitação monitorada pelo CEMADEN, a relação entre a correlação e a distância entre os pluviômetros para diferentes resoluções temporais e diferentes climas. Com isso tem-se o objetivo de avaliar a distância média entre pluviômetros para realizar uma boa leitura da distribuição espacial da precipitação e quantidade de pluviômetros por área.

Análise da correlação na escala nacional

Nesta etapa, foram utilizadas 2.921 estações do CEMADEN entre os anos de 2014 e 2020. A quantidade de pluviômetros por ano pode ser vista na Tabela 1. A distribuição de todos os postos utilizados pode-se ser vista na Figura 1.

Tabela 1 – Postos pluviométricos utilizados neste estudo

Ano	2014	2015	2016	2017	2018	2019	2020
Nº Estações	368	727	1.185	1.098	1.439	1.222	1.334

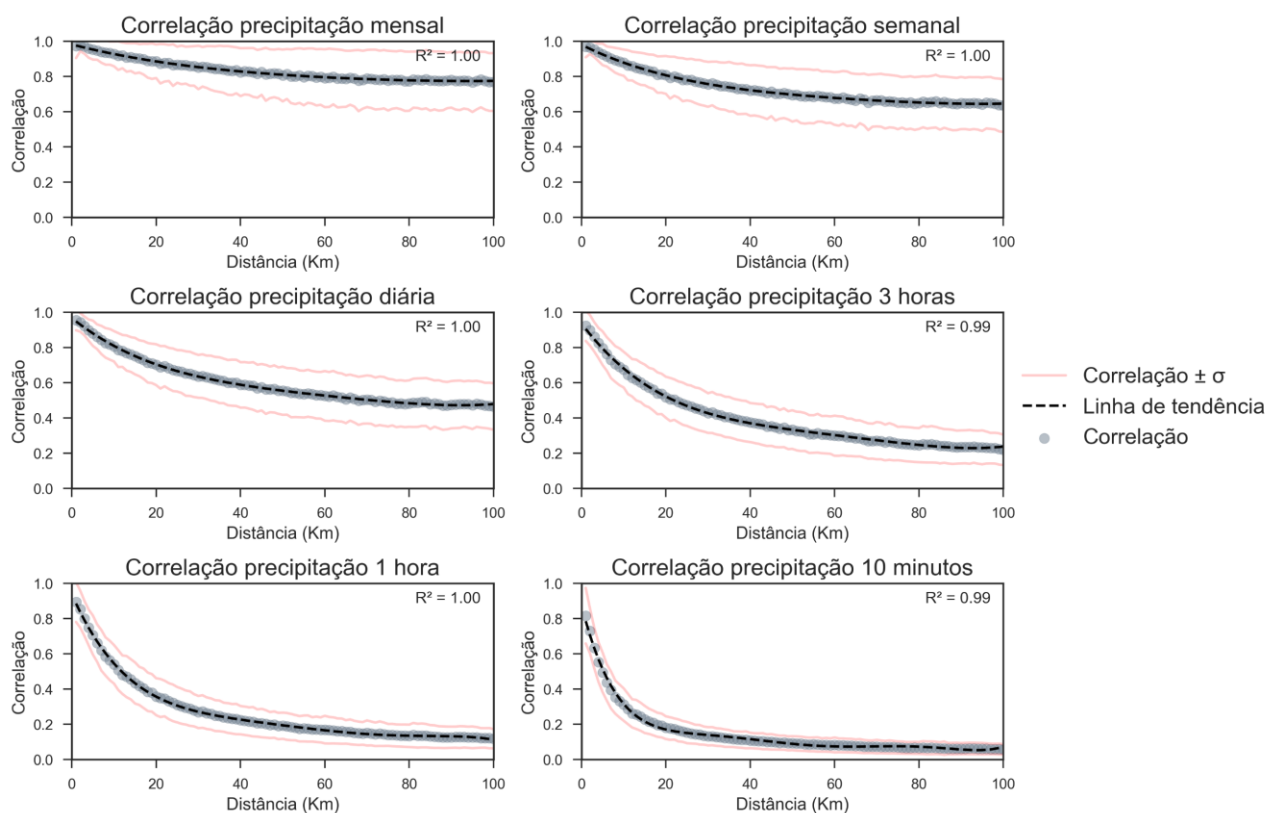
Baseado na Figura 3, é possível perceber que a correlação entre estações vizinhas diminui à medida que diminui o tempo de agregação das chuvas, ficando ainda mais visível quanto maior a distância entre as estações. Isso deve-se ao fato de que a distribuição da precipitação se dá continuamente no tempo, portanto estações distantes podem registrar a mesma precipitação, porém, em diferentes horários. Por outro lado, analisando períodos de agregação maiores, há uma maior probabilidade de a precipitação registrada no mesmo período de análise mesmo para estações mais distantes.

Constata-se que, a tendência de declinação da correlação com a distância é vista em todas as resoluções temporais, sendo uma queda maior para os passos de tempos subdiários. Percebe-se ainda que na resolução mensal e semanal, a correlação permanece constante a partir de uma certa distância. A correlação assume o valor de cerca de 0,8 e 0,7 para distâncias acima de 50 km para as resoluções mensais e semanais respectivamente.

Sabe-se também que o monitoramento da precipitação se dá mediante várias demandas, dependendo de cada tipo demanda a resolução tempo necessária. Um exemplo pode ser a medição para acompanhamento de alertas de desastres naturais, que necessita de intervalos de monitoramento mais curtos que a medição para gestão hídrica de um reservatório. Levando em conta a variabilidade espaço-temporal da precipitação, considera-se que uma correlação de 0,7 seja aceitável para a maioria dessas demandas.

Com isso, nota-se que quanto menor o intervalo de tempo, menor a distância aceitável entre as estações. Para as resoluções diária, 3 horas, 1 hora e 10 min são aceitáveis as distâncias de cerca de 20 km, 10 km, 5 km e 2,5 km respectivamente. Considerando essa distância como um raio de uma área, pode-se aferir que a precipitação medida por um pluviômetro pode ser representativa para essa área de forma adequada. Logo, seria necessário, para as resoluções diárias, 3h, 1h e 10 min cerca de 1256,64 km², 314,16 km², 78,54 km², 19,63 km² para cada equipamento respectivamente.

Figura 3 - Correlação pela distância para diferentes resoluções temporais no Brasil



Análise da correlação por clima

Nesta etapa, a análise foi feita agrupando as estações por clima: Tropical, Semiárido e Subtropical Úmido, objetivando entender como o clima poderia influenciar na correlação entre os pluviômetros.

Foi constatado que a tendência de declinação da correlação com a distância é vista em todas as resoluções temporais, sendo identificada uma maior redução para as escalas subdiárias. Além disso, na resolução mensal e semanal, a correlação permanece constante a partir de uma certa distância. A correlação assume o valor de cerca de 0,78 e 0,63 para distâncias acima de 80 km e 70 km para as resoluções mensais e semanais, respectivamente.

Nas Figura 4, Figura 5 e Figura 6 são apresentadas as relações de distância x correlação para os três grupos de climáticos existentes no Brasil. É importante destacar que os grupos Af, Am e As foram representados pelo Aw, por terem apresentado comportamentos semelhantes. Da mesma maneira, Cfa, Csa, Cwa, e Cwb foram representados por Cwb. De maneira geral, nota-se na Figura 4 que quanto menor o passo de tempo analisado, menor a distância aceitável entre as estações em todos os climas.

Figura 4 - Correlação pela distância para o clima Tropical (Aw)

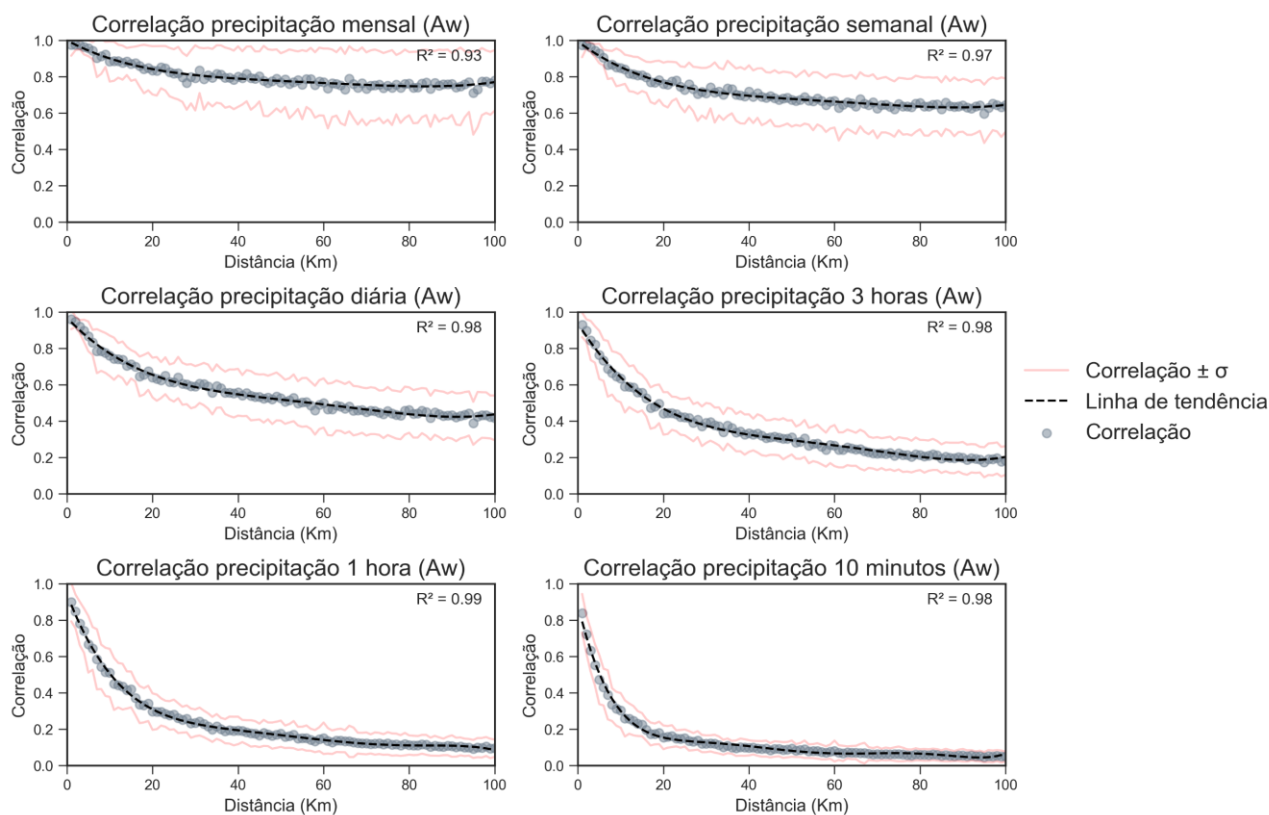


Figura 5 - Correlação pela distância para o clima Semiárido (BSH)

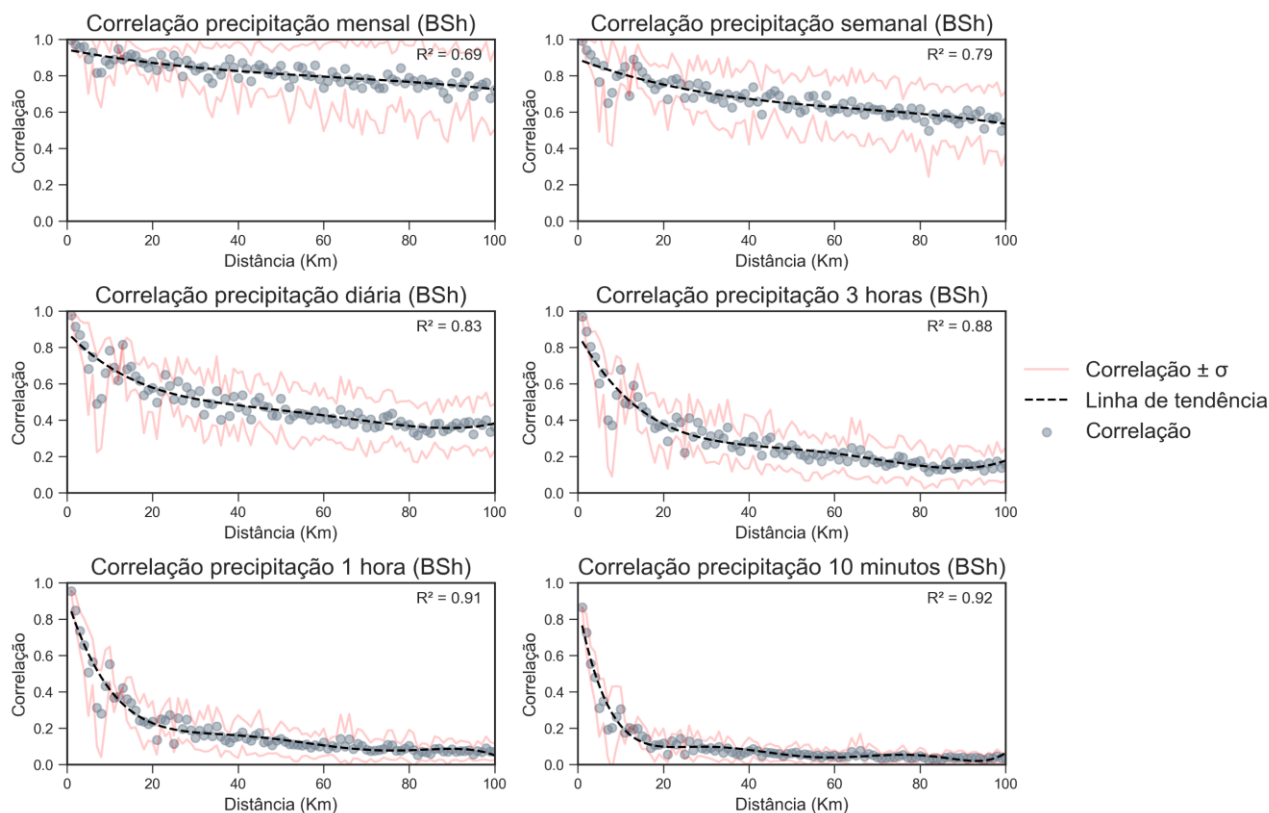
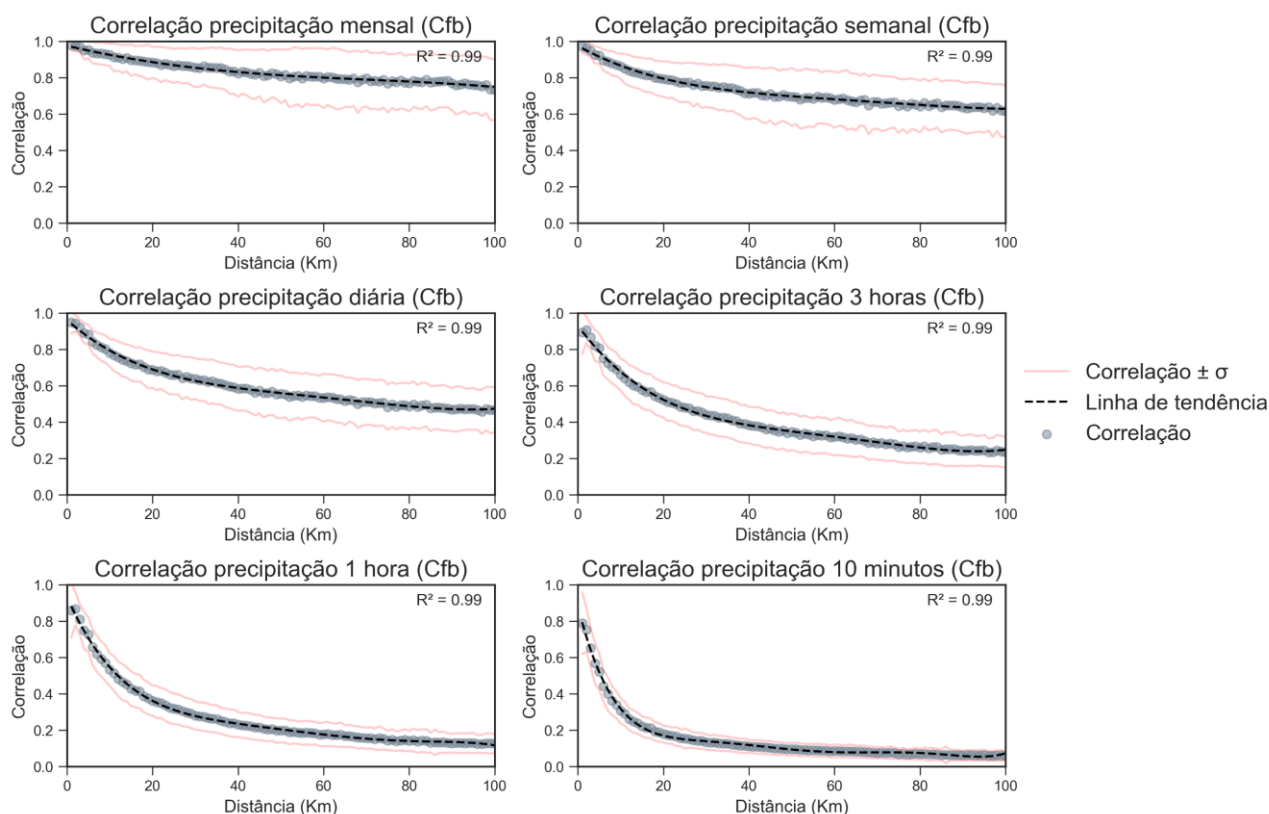


Figura 6 - Correlação pela distância para o clima Subtropical Úmido (Cfb).



Na tabela 2 é possível verificar as distâncias entre as estações que possibilitam uma correlação de 70% entre os dados.

Tabela 2 – Distâncias aceitáveis para garantir 70% de correlação entre estações em diferentes climas.

Clima/Resolução	Diária	3 horas	1 hora	10 minutos
Tropical	14 km	7 km	4 km	2 km
Semiárido	8 km	4,5 km	3 km	2 km
Subtropical Úmido	18 km	8 km	5 km	2,5 km

Considerando essa distância como um raio de uma área, pode-se aferir que a precipitação medida por cada pluviômetro pode ser representativa para essa área de forma adequada. A Tabela 3 mostra a área representativa de cada estação considerando o seu raio de abrangência.

Tabela 3 – Área representativa de cada estação com base no raio.

Clima/Resolução	Diária	3 horas	1 hora	10 minutos
Tropical	615,75 km ²	153,94 km ²	50,27 km ²	12,57 km ²
Semiárido	201,06 km ²	63,62 km ²	28,27 km ²	12,57 km ²
Subtropical Úmido	1017,88 km ²	201,06 km ²	78,54 km ²	19,63 km ²

CONCLUSÕES E RECOMENDAÇÕES

Diante do que foi exposto, antes das conclusões do estudo, é fundamental enaltecer a relevância da geração de informações e dados relacionados à precipitação que o CEMADEN tem produzido. Diante dessa importância, vale ressaltar a relevância de estudos que visem otimizar a medição dessa variável com eficiência. Isso pode acarretar uma melhor medição da distribuição espacial da precipitação, bem como redução de custos de instalação e operação das redes de monitoramento.

Ao avaliar a influência da distância na correlação dos dados de precipitação para diferentes escalas de tempo, foi possível concluir que independente de resolução temporal ou clima, à medida que aumentamos as distâncias as correlações diminuem.

Observou-se ainda que, quanto menor o intervalo de medição, menor é a correlação para uma mesma distância. Considerando 100 km, para as menores resoluções e independente de clima, chega um ponto onde a distância não afeta a correlação entre as estações, permanecendo constante.

De maneira geral, a recomendação da quantidade de pluviômetro é de um para cada área com raio de 20 km, 10 km, 5 km e 2,5 km considerando as resoluções diária, 3 horas, 1 hora e 10 min, respectivamente.

Já em termos de divisão climática, considerando sempre as resoluções diária, 3 horas, 1 hora e 10 min, temos, respectivamente:

- Tropical: uma estação para cada área de raio 14 km, 7 km, 4 km e 2 km
- Semiárido: uma estação para cada área de raio 8 km, 4,5 km, 3 km e 2 km
- Subtropical Úmido: uma estação para cada área de raio 18 km, 8 km, 5 km e 2,5 km

Foi constatado ainda que os grupos Af, Am, As e Aw (climas tropicais ou equatoriais) e Cfa, Csa, Cwa, Cwb (climas temperados quentes) apresentaram, dentro de cada grupo, comportamento semelhante em todas as resoluções. Recomenda-se para trabalhos futuros que sejam avaliadas se alguma variável Físico-Climática pode influenciar nessas distâncias.

AGRADECIMENTOS Os autores deste artigo agradecem aos seguintes órgãos: CNPq (bolsa PQ) e recursos do edital Universal MCTI/CNPq No. 28/2018 (Grant REF: 433801/2018-2); CAPES (bolsas de mestrado e doutorado); CEMADEN (Centro Nacional de Monitoramento e Alerta a Desastres Naturais) pela disponibilização dos dados de precipitação.

REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS

Alvares, C.A., Stape, J.L., Sentelhas, P.C., De Moraes Gonçalves, J.L., Sparovek, G., 2013. Köppen's climate classification map for Brazil. Meteorol. Zeitschrift 22, 711–728. <https://doi.org/10.1127/0941-2948/2013/0507>

Bega, Rodrigo Merighi et al. Variabilidade espacial das precipitações pluviais diárias em uma estação experimental, em Pindorama, SP. **Bragantia**, Campinas, v. 64, n. 1, p. 149-156, 2005.

Costa, H. C.; Marcuzzo, F. F. N.; Ferreira, O. M.; Andrade, L. R.; Espacialização e Sazonalidade da Precipitação Pluviométrica do Estado de Goiás e Distrito Federal. Revista Brasileira de Geografia Física. Recife, v.5, n.1, p.87- 10, 2012.

Collischonn, B., Collischonn, W., Tucci, CEM, 2008. **Daily hydrological modeling in the Amazon basin using TRMM rainfall estimates.** J. Hydrol. 360 (1–4), 207-216.

Freitas, E. S.; Coelho, V. H. R.; Xuan, Y.; Melo, D. C. D.; Gadelha, A. N.; Santos, E. A.; Galvão, C. O.; Ramos, G. M.; Barbosa, L. R.; Huffman, G. J.; Petersent, W. A.; Almeida, C. N. (2020). “The performance of the IMERG satellite-based product in identifying sub-daily rainfall events and their properties” Journal of Hydrology, 589, pp. 125128.

Futrell, J.H., Gephart, R.E., Kabat-Lensch, E., Mcknight, D.M., Pyrtle, A., Schimel, J.P., Smyth, R.L., Skole, D.L. e Gephart, J.M., 2005. Water: Challenges at the intersection of human and natural systems (No. PNWD-3597). PNNL (Pacific Northwest National Laboratory (PNNL), Richland, WA (United States).

Gadelha, A.N., Coelho, V.H.R., Xavier, A.C., Barbosa, L.R., Melo, D.C.D., Xuan, Y., Huffman, G.J., Petersen, W.A., Almeida, C.N., 2018. Grid box-level evaluation of IMERG over Brazil at various space and time scales. Atmos. Res. <https://doi.org/10.1016/j.atmosres.2018.12.001>

Mishra, A.K. Effect of Rain Gauge Density Over the Accuracy of Rainfall: A Case Study over Bangalore, India; SpringerPlus: Berlin, Germany, 2013; Volume 2, p. 311.