LIV Simpósio Brasileiro de Pesquisa Operacional
Juiz de Fora, MG - 8 a 11 de novembro de 2022

IDENTIFICANDO ANTECIPADAMENTE SURTOS DE DENGUE ATRAVÉS DA EVOLUÇÃO PLUVIOMÉTRICA E CASOS HUMANOS EM FORTALEZA-CE

Leonardo Neves, Marcos Negreiros
Universidade Estadual do Ceará
Curso de Bacharelado em Ciências da Computação
LCC – Laboratório de Computação Científica
Av Silas Munguba, 1700 – Campus do Itaperi
Fortaleza – CE – CEP: 60.714-903
leonardoneves@uece.br , marcos.negreiros@uece.br

RESUMO

Este artigo apresenta uma avaliação analítica do comportamento da dengue na cidade de Fortaleza/CE, ao longo de todas as semanas epidemiológicas do período de 2007-2021, considerando apenas a influência das quantidades de chuvas no crescimento da doença no município. Mostra-se a alta correlação existente entre os dois eventos através de gráficos dos percentuais globais no tempo e correlação cruzada, que implicam no aparecimento de surtos de dengue a partir da 13ª semana epidemiológica para dois anos seguidos (2012 e 2013) tomados como exemplo de investigação. Além disto, o estudo mostra que as quantidades de chuvas que caírem entre a 5ª e 9ª semana epidemiológica indicam o início do surto da dengue com maior ou menor intensidade.

PALAVRAS CHAVE. Previsão Analítica, Controle da Dengue, Correlação Cruzada.

Tópicos (BDA, AS, EST&MP)

ABSTRACT

This article presents an analytical evaluation of the behavior of dengue in the city of Fortaleza/CE, throughout all the epidemiological weeks of the years 2007 to 2021, considering only the influence of rainfall on the growth of dengue in the municipality. The high correlation between the two events is shown through graphs of the global percentages over time and cross correlation, which imply the emergence of dengue outbreaks from the 13th epidemiological week on for two consecutive years (2012 and 2013) taken as an example of investigation. In addition, the study shows that the amounts of rain that fall between the 5th and 9th epidemiological week indicate the beginning of the dengue outbreak with greater or lesser intensity.

KEYWORDS. Analytical Prediction, Dengue Control, Cross Correlation.

Paper topics (BDA, AS, EST&MP)

1. Introdução

Um dos grandes problemas de saúde pública enfrentado atualmente por grande parte da sociedade mundial – em especial aquelas da América e África meridionais – é a epidemia de dengue. Este fenômeno permanece há cerca de 50 anos (OPAS/OMS, 2019).

Vacinas contra a dengue vem sendo estudadas há décadas, mas ainda não há uma vacina eficiente, nem economicamente viável (GLOBO, 2022). O Instituto Butantan tem envidado esforços nesse sentido, mas só a partir de 2024 é esperado que a pesquisa avance da fase de ensaios clínicos para a produção industrial. Mesmo assim, os próprios pesquisadores do Butantan afirmam que a vacina não deve ser a única estratégia de combate à dengue (BUTANTAN, 2021).

Devido a isso, atualmente no Brasil, as ações de combate à Dengue e outras arboviroses – conduzidas principalmente pelas secretarias municipais de combate às endemias – tem se concentrado em tentar interromper o ciclo de proliferação do mosquito vetor destas doenças – o *Aedes aegypti* – através principalmente de ações preventivas no sentido de eliminar a acumulação de água parada, que favorece o ciclo de vida do mosquito.

Entretanto há fatores agravantes que podem dificultar esta tarefa, tais como: desorganização dos espaços urbanos, falta ou precariedade de infraestruturas de saneamento básico, falta de educação e conscientização da população. Outro fator agravante – este de ordem natural – que vem sendo estudado e cogitado como facilitador da proliferação do Aedes são as chuvas, que principalmente quando se precipitam de forma irregular, aumentam os focos de água parada, sobretudo nos meios urbanos. A compreensão acerca das estruturas de dependência deste último fator pode contribuir para um combate mais eficaz ao ciclo de vida do Aedes aegypti.

De acordo com a WHO (2022), um surto de doença ("Disease Outbreak") é a ocorrência de casos de doença além do que seria normalmente esperado em uma comunidade, área geográfica ou região específica. Os surtos são mantidos por agentes infecciosos que se espalham diretamente de pessoa para pessoa, da exposição a um reservatório animal ou outra fonte ambiental, ou por meio de um inseto ou vetor animal. Os comportamentos humanos quase sempre contribuem para tal disseminação. A detecção precoce e a notificação de tais eventos são cruciais para minimizar seu impacto social e econômico negativos. Os surtos são emergências urgentes acompanhadas de esforços rápidos do sistema de saúde para salvar vidas e prevenir novos casos. No entanto, a palavra "surto" geralmente é usada quando as doenças ocorrem em uma área geográfica mais limitada. Se um surto de uma doença se espalhar rapidamente para mais pessoas do que os especialistas esperariam e se deslocar para uma grande área geográfica, muitas vezes denomina-se como epidemia.

O problema de identificação de "outbreaks" em doenças endêmicas refere-se a encontrar o momento que favorece o crescimento vertiginoso da doença numa dada população de uma região geográfica. A detecção automática de "outbreaks" vem sendo estudada como uma forma de antever os fatos que viriam a causar enorme perigo à população. Em geral, as detecções ocorrem em função de diferentes fatores que levam à identificação de um comportamento anormal que provoca o aumento súbito de uma doença. O estudo de elementos ou eventos altamente correlacionados em causa e efeito pode levar a uma antevisão de um problema de surto de doença; em especial a Dengue, por ser causada pela presença do mosquito Aedes aegypti, seu crescimento está relacionado a fatores climáticos como a incidência de chuvas (aumento de umidade e/ou temperatura). Estes fatores têm se mostrado altamente relevantes para gatilho do crescimento da doença. Mas como isto ocorre de fato? A princípio cada local nos trópicos do mundo tem sua própria história, como se vê em alguns exemplos a seguir.

Trabalhos recentes que relacionam precipitações com a dengue foram investigados por Chien & Yu (2014). Os autores avaliaram o impacto na saúde das mudanças climáticas, entendendo as associações clima-doença para a dengue. O estudo investigou o impacto atrasado não linear das condições meteorológicas nas variações espaço-temporais da dengue no sul de

Taiwan durante o período de 1998-2011. O estudo também identificou as medidas meteorológicas mais significativas às variações da dengue, ou seja, temperatura mínima semanal e precipitação máxima semanal de 24 horas, obtendo o risco relativo (RR) em relação ao número de casos humanos e um tempo defasado contínuo de 20 semanas. Os resultados mostraram que o RR aumentou à medida que a temperatura mínima aumentou, especialmente para o período defasado de 5 a 18 semanas. Os autores também sugeriram que o tempo para altos riscos de doença podem ser diminuído. Uma vez que a ocorrência de precipitação máxima de 24 horas era superior a 50mm, um RR aumentado associado durou até 15 semanas. Uma redução temporária de um mês no RR de dengue foi observada após a chuva extrema. Além disso, o risco de incidência elevado foi identificado em áreas bastante povoadas. Os resultados destacaram a alta não linearidade dos efeitos defasados temporais e magnitudes da temperatura e chuvas nas epidemias de dengue, os quais podem ser uma referência prática para o alerta precoce da dengue.

Chen et al (2018) consideram que as associações entre eventos de chuva e incidência de dengue não são consistentes, e poucos estudos abordaram o papel da magnitude e frequência dos eventos de chuva na transmissão da dengue. Portanto, o objetivo deste estudo foi diferenciar os efeitos de longo e curto prazo da variação da chuva sobre a dengue. Os autores buscaram investigar esses efeitos em diferentes contextos socioecológicos no sul de Taiwan, que costuma ser uma região tropical de alta epidemia. Um modelo multinível binomial negativo com correlação serial gaussiana foi usado neste estudo para investigar a variabilidade pluviométrica intra e interanual para determinar os efeitos das chuvas sobre a ocorrência de dengue nas estações pré-epidêmica e epidêmica. Os resultados significativos que obtiveram indicam que a curto prazo a precipitação e ocorrência de dengue mostram uma relação não linear em que a precipitação média durante o período de temporada de dengue representa o risco mais significativo. Também, descobriu-se que os efeitos da chuva são interativos com a porcentagem de residências. Os resultados mostraram fortes interações sinérgicas entre baixa frequência de chuva e porcentagem de residências antigas, e entre a precipitação acumulada e o percentual de residências antigas, contribuindo para os surtos de dengue. Também se diferenciaram os efeitos das chuvas de curto e longo prazo em construções antigas na ocorrência de dengue. Isso implica que durante os períodos de chuva, os bairros mais antigos podem exigir mais atenção do público e privados para melhorar a qualidade ambiental e promover a saúde dos residentes.

Estudos analíticos usando dados secundários retrospectivos do estado de Querala, sul da Índia foram propostos por Nayak & Narayan (2020), a partir de dados obtidos dos relatórios anuais da vigilância integrada de doenças de casos de dengue, dados de precipitação pluviométrica e temperaturas médias mensais para um período de doze anos desde 2006 a 2017 (144 meses). Cinco modelos diferentes foram desenvolvidos usando o software R para previsão de casos de dengue entre eles, o modelo mais ajustado incluindo combinação ótima de variáveis meteorológicas e transição recente e de longo prazo da dengue foi o selecionado. Das previsões de 84 meses no período de treinamento, a previsão de 68 meses obteve correlação negativa, a previsão de 5 meses obteve correlação positiva, a previsão de 2 meses foi incorretamente negativa e a previsão de 9 meses foi incorretamente positiva. Como conclusão obtiveram um melhor modelo aditivo generalizado preditivo que pode ser desenvolvido usando a combinação ideal de preditores meteorológicos e os números de casos de dengue.

Xavier et al (2021) consideraram que clima é um fator importante na distribuição temporal e espacial de doenças transmitidas por vetores, como a dengue. Assim, a precipitação e a temperatura são consideradas macro fatores determinantes para a dengue, pois influenciam diretamente na densidade populacional do *Aedes aegypti*, que está sujeito a flutuações sazonais, principalmente devido a essas variáveis. Nesse estudo foi examinada a incidência de dengue relacionada à influência do clima usando dados de variáveis de temperatura e precipitação obtidos por sensoriamento remoto através de satélites artificiais na região metropolitana do Rio de Janeiro, Brasil. O modelo matemático que melhor se adaptou aos dados foram os baseados em

uma média móvel autorregressiva com entradas exógenas (ARMAX). O modelo conseguiu reproduzir os valores das taxas de incidência no período estudado e conseguiu realizar com boa precisão a previsão dos casos humanos de dengue no horizonte de um ano.

Micanaldo et al (2021) consideraram dados entomológicos, epidemiológicos e de vegetação da estação chuvosa (julho-dezembro). Os dados foram obtidos do Centro Nacional de Epidemiologia, Departamento de Saúde, Manila, Filipinas, de 2012 a 2014. Os dados de temperatura, precipitação e vegetação foram obtidos por meio de sensoriamento remoto. Os autores implementaram seu modelo usando o software R usando o pacote "ggpubr". O desenvolvimento do modelo foi feito em duas etapas, a primeira (RF) usou um conjunto de algoritmos de aprendizado de máquina ("Machine Learning") em "bagging" que gera grande número de árvores "bootstraping" sobre pequenos subconjuntos aleatórios de dados. O RF foi usado, pois resolve uma variedade de problemas de classificação e regressão devido a sua habilidade conhecida de tratar grande número de variáveis de previsão mesmo na presença de interações complexas. Este modelo foi usado para selecionar as variáveis de vegetação e clima. Depois, usando as variáveis-chave identificadas, foi aplicado o segundo modelo baseado em particionamento recursivo (MOB), o qual foi implementado para testar as influências combinadas de fatores paisagísticos e climáticos no índice de ovitrampa (armadilhas de ovos de Aedes) e na incidência de dengue. Como resultados, o particionamento recursivo MOB para o índice de ovitrampa indicou uma alta sensibilidade da ocorrência do mosquito vetor em condições ambientais geradas por uma combinação de áreas de alta densidade residencial com baixa precipitação. Além disso, a partição recursiva MOB indicou alta sensibilidade da incidência de dengue aos efeitos da precipitação em áreas com altas proporções de densidade residencial e áreas comerciais. Os autores concluíram que a dinâmica da dengue não é influenciada apenas por efeitos individuais do clima ou da paisagem, mas sim por seus efeitos sinérgicos ou combinados. Este trabalho focou na identificação pela vigilância vetorial das áreas adequadas para a ocorrência do mosquito em condições climáticas específicas e que podem ser relevantes como parte das estratégias de planejamento urbano para o controle da dengue.

Buczak et al (2018) usaram modelos de *Machine Learning* ("ensemble") criados pela combinação de três tipos diferentes de componentes: 1) Modelos bidimensionais do Método de Análogos incorporando dados de dengue e dados climáticos; 2) modelos de Holt-Winters sazonais aditivos com e sem suavização *wavelet*; e 3) modelos históricos simples. Dos modelos de componentes individuais criados, aqueles com melhor desempenho nos quatro anos anteriores de dados foram incorporados aos modelos de conjunto. Havia conjuntos separados para prever cada um dos três alvos em cada um dos dois locais. Os modelos de conjuntos ("Machine Learning") obtiveram a melhor pontuação sobre os resultados de altura de pico e números totais de casos de dengue relatados em uma temporada de transmissão para a cidade de Iquitos, Peru, do que todos os demais modelos de previsão submetidos ao Desafio Dengue ("Dengue Challenge") promovido por cinco agências Norte Americanas em 2015. Apesar deste resultado, os modelos de *Machine Learning* propostos pelos autores não se saíram tão bem ao prever a semana de pico.

Edussuriya et al (2021) consideram que as epidemias são imprevisíveis e sem precedentes. Quando ocorrem epidemias, os serviços de saúde são sobrecarregados, levando à superlotação dos hospitais. Os autores sustentam que no momento não há evidências que epidemias de dengue podem ser previstas. Desde que o crescimento do mosquito da dengue é diretamente influenciado por fatores ambientais, é plausível que epidemias possam ser previstas usando dados meteorológicos. Os autores hipotetizaram que existe uma relação matemática entre incidência de dengue e fatores ambientais e se tal relação existe, novos casos de dengue nos próximos meses podem ser previstos usando dados climáticos recentes. Foi desenvolvido um modelo matemático usando também as técnicas de aprendizado de máquina. Para avaliá-lo, foram usados dados públicos relativos a toda a ilha de Sri Lanka, da unidade de epidemiologia do

ministério da saúde do Sri Lanka, tais como: incidência de dengue, precipitação média, umidade, velocidade do vento, temperatura e densidade populacional de cada distrito. Descobriram que o modelo é capaz de prever a incidência de dengue de um determinado mês em um determinado distrito com precisão do valor médio da raiz quadrada – RMSE, entre 18-35,3. Além disso, usando dados meteorológicos de um dado mês, o número de casos de dengue nos meses seguintes também pode ser previsto com precisão de RMSE entre 10,4-30, ficando apenas 6 dos 19 municípios avaliados abaixo de 15.

Este artigo contém parte do estudo do comportamento das médias de chuvas e de casos de dengue da cidade de Fortaleza/CE, referente ao período completo de 2007-2021. Neste estudo, pretende-se corroborar a relação direta entre a evolução das chuvas com a dengue na cidade, conforme proposto por Negreiros et al (2011), identificando-se os momentos de "outbreak" da doença a partir do conhecimento básico extraído desta análise de comportamento através de gráficos analíticos.

Os dados de casos de dengue foram retirados do site mantido pela Prefeitura Municipal de Fortaleza, Secretaria de Vigilância da Saúde - SIMDA (Sistema de Monitoramento Diário de Agravos) (PMF, 2022), e os dados pluviométricos foram coletados do site da FUNCEME - Fundação Cearense de Meteorologia e Recursos Hídricos (GCE, 2022).

A metodologia utilizada foi, num primeiro momento, baseada em análises empíricas e visuais de gráficos conjuntos das duas séries temporais compostas pelos dados em estudo, e num segundo momento, a partir de medidas das correlações cruzadas existentes entre as duas variáveis aleatórias que representam os processos estocásticos subjacentes, Através das conclusões advindas desta dupla análise, buscou-se encontrar os indícios de dois momentos: o momento inicial a partir do qual o acúmulo de chuvas determina crescimentos contínuos nos casos de dengue, e consequentemente, o momento de início dos "outbreaks" (surtos) de arboviroses, os quais representam um momento de crescimento populacional desenfreado dos vetores da dengue, causando um descontrole no crescimento de casos a ponto de comprometer seriamente a capacidade instalada de hospitais e emergências da rede de saúde local, ou mesmo levar este sistema de saúde a um colapso temporário.

Este artigo está organizado em 4 seções, onde na seção 2 expomos a metodologia empregada, enquanto na seção 3 apresentamos os resultados computacionais através do uso da ferramenta R (R DEVELOPMENT CORE TEAM, 2022) e os gráficos produzidos sobre a compilação dos dados. Na seção 4 apresentamos as conclusões e trabalhos futuros decorrentes dos resultados aqui expostos.

2. Metodologia

A partir dos dados de pluviometria obtidos dos 7 pluviômetros dispersos na cidade de Fortaleza (nos postos[1]: Fuceme, Parquelância, Mondubim, Água Fria, Castelão, Pici e Messejana), colhidos diariamente e acumulados por média dos pluviômetros em semanas conforme as semanas epidemiológicas[2] do controle da dengue de Fortaleza/CE, e dos dados referentes ao número de casos confirmados de dengue da cidade por semana epidemiológica, esta pesquisa compõe duas séries temporais, que são analisadas, objetivando construir dois valores de referências causais,

[1] Destes postos listados, os quatro primeiros encontram-se hoje desativados, tendo contribuído com dados para esta pesquisa apenas nos anos de 2007 e 2008.

[2]As semanas epidemiológicas começam sempre aos domingos e terminam aos sábados; A primeira semana epidemiológica do ano termina, por definição, no primeiro sábado de janeiro, desde que caia pelo menos quatro dias no mês, mesmo que isso signifique que essa primeira semana comece em dezembro, de forma que podemos ter anos com 52 ou com 53 semanas epidemiológicas. Por uma questão de simplificação, e visando uma melhor homogeneidade entre os períodos anuais das séries temporais, nesta pesquisa todos os anos foram considerados como tendo 52 semanas, sendo acumulados na semana 52 os eventuais dados pertencentes à semana 53.

que visam estabelecer um modelo de compreensão e conhecimento tácito do processo de evolução da dengue em Fortaleza/CE.

O primeiro modelo causal nos apresenta por semana epidemiológica, o percentual de chuvas acumuladas em relação à quantidade de chuvas médias total da cidade. Já no segundo é apresentado o percentual de dengue acumulado em relação à quantidade de dengue total ocorrida no município de Fortaleza. Para corroborar as observações oriundas destes modelos, são calculadas as correlações cruzadas existentes entre as séries temporais representadas nos gráficos – mais especificamente, entre as duas variáveis aleatórias que representam os processos estocásticos subjacentes às séries temporais estudadas,

A técnica de correlação cruzada é bastante semelhante à estimação da correlação comum (coeficiente de Pearson). Entretanto, em se tratando de séries temporais, faz-se necessário isolar as correlações decorrentes dos efeitos tendência e sazonalidade; pois do contrário, introduziriam correlações espúrias no cálculo da correlação cruzada. Ou seja: é indispensável para a correta aplicação da correlação cruzada que esta seja aplicada às séries temporais estacionárias. Para tanto, faz-se uso da técnica conhecida como "pré-*whitening*" (COSTA, 2020), que consiste em modelar as séries temporais envolvidas através da metodologia Box e Jenkins (1976, apud MORETTIN; TOLOI, 2006), e feito isto, utiliza-se no cálculo da correlação cruzada os resíduos dos respectivos modelos, pois estes são estacionários, e representativos dos processos estocásticos das séries temporais originais.

Correlações significativas e positivas, ora existentes num dado momento (lag x), indicam o número x de semanas que separam a variável aleatória líder, ou causal – aquela que determina a causa do fenômeno, e a variável aleatória dependente – aquela que sofre o efeito (FAGUNDES et al., 2021). No caso presente, a variável aleatória causal é dada pelos resíduos estacionários da série temporal de chuvas, e a variável aleatória dependente é dada pelos resíduos estacionários da série temporal de casos de dengue. O fenômeno em estudo é o "outbreak' de casos de dengue, determinado pela magnitude, significância e positividade das correlações x semanas anteriores a esse evento, entre as duas variáveis aleatórias citadas.

Foi utilizado o software estatístico R para realizar os cálculos das correlações cruzadas e a plotagem gráfica dos resultados de visualização de cada observação aqui conduzida, as quais refletem o modelo causa e efeito em investigação.

A equiparação destes modelos em uma visualização única nos mostra o tempo médio para acontecer eventos de dengue simultâneos ao mesmo percentual de chuvas, repetindo-se assim a avaliação de Negreiros et al (2011) sobre o comportamento sistemático da dengue em relação às quantidades de chuvas, e a identificação clara dos momentos de "outbreak" da doença na cidade, que podem ser mitigados pela ação coordenada dos agentes de endemias do controle da dengue.

3. Resultados Analíticos

Para iniciar esta apresentação de dados, seguem nos gráficos 1 e 2, os valores absolutos das duas séries temporais estudadas nesta pesquisa: médias de chuvas em milímetros, e unidades de casos de dengue, na cidade de Fortaleza/CE, referente ao período de 2007-2021. O valor médio do período de cada série temporal foi destacado com uma linha horizontal. No gráfico 1 já é possível perceber uma importante característica pluviométrica da cidade de Fortaleza: o período do ano onde ocorrem as maiores precipitações é aquele composto pelos meses de fevereiro a maio. Este período é conhecido como "quadra chuvosa de Fortaleza", e corresponde na nossa escala temporal ao período que vai aproximadamente da semana epidemiológica 5 à semana 22 em cada ano.

Interessante observar no gráfico 2, que o período do ano onde ocorre maior número de casos de dengue é aproximadamente coincidente com a referida quadra chuvosa, de forma que

nestes dois primeiros gráficos já é possível perceber que as duas séries temporais estudadas têm uma sazonalidade bastante semelhante.

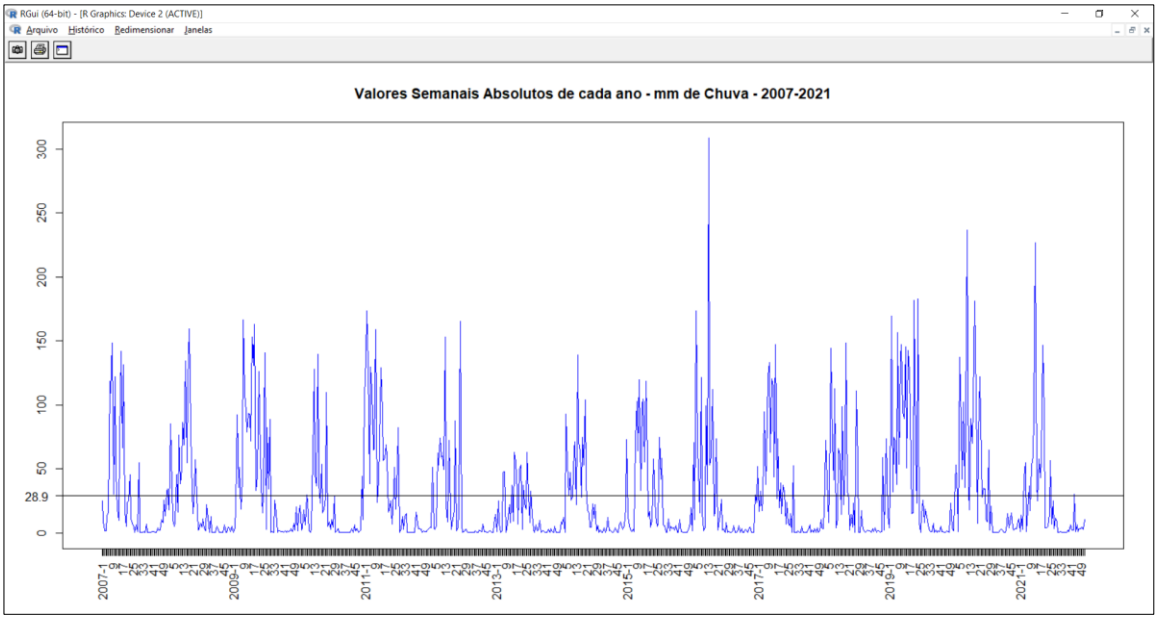

Gráfico 1: Valores Absolutos de Chuva em milímetros, na cidade de Fortaleza/CE - 2007-2021

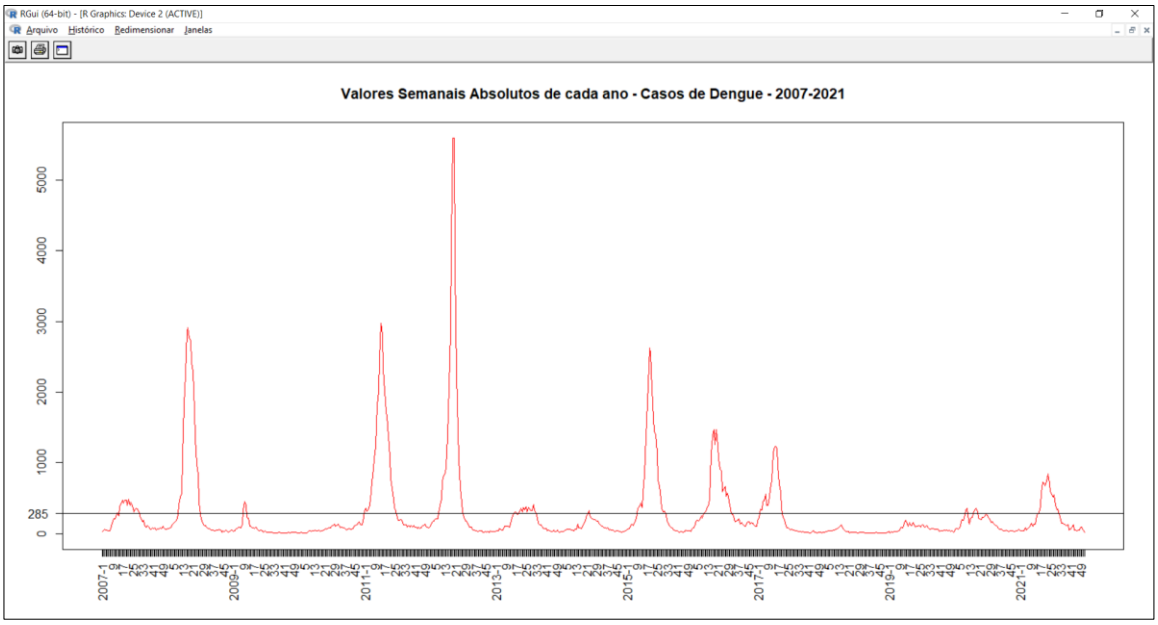

Gráfico 2: Valores Absolutos de Casos de Dengue em unidades, na cidade de Fortaleza/CE - 2007-2021

A seguir apresentamos os gráficos percentuais (Gráficos 3 e 4) das médias de chuvas e de casos de dengue sem acumulação para a cidade de Fortaleza/CE, referente ao período de 2007-2021. Neste gráfico, e no restante deste trabalho, apresentamos as duas séries temporais em estudo plotadas juntas, proporcionando uma visualização mais adequada à análise dos gráficos. Podemos perceber – ratificando aquilo já dito anteriormente – que também percentualmente, às semanas onde chove mais na cidade de Fortaleza/CE são aquelas pertencentes à quadra chuvosa,

havendo, na maioria dos anos, dentro deste período, uma ou mais semanas subsequentes nas quais chove – individualmente – em cada uma destas semanas – aproximadamente o equivalente a 5% de todas as chuvas observadas durante o ano[3]. Esta característica enfatiza ainda mais a irregularidade das chuvas na cidade – irregularidade esta observada na quadra chuvosa em relação ao período anual, mas igualmente observada dentro da própria quadra chuvosa. Além disso, chamamos a atenção para o fato de que os percentuais semanais de casos de dengue (em vermelho) parecem acompanhar de perto as variações de percentuais de chuva (em azul), embora com certa defasagem temporal, como vemos melhor nos próximos gráficos.

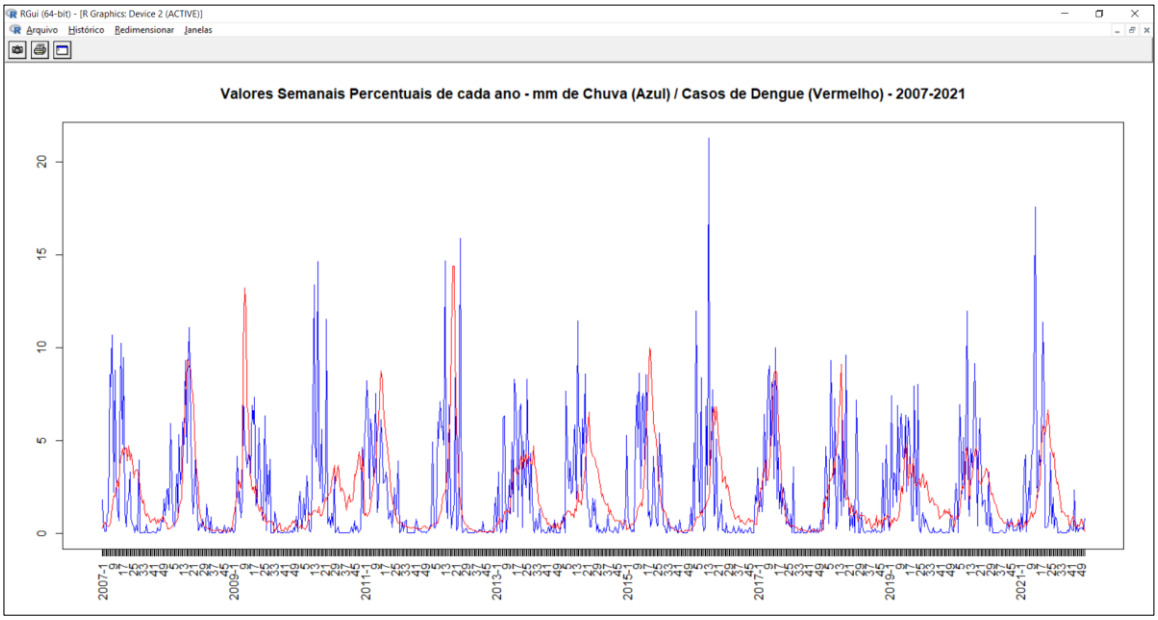

Gráfico 3: Percentual Semanal Chuva(Azul) / Dengue(Vermelho) 2007-2021

Para avaliar mais de perto, traçamos agora no gráfico 4, as mesmas curvas já plotadas no gráfico 3, porém agora plotando apenas os anos de 2012 e 2013, para ter uma visão local ampliada. Notemos que após a primeira semana com índice pluviométrico acima de 5% do total de chuvas do ano (curva azul) – que é seguida por outras de mesma característica – começa-se a observar, após um certo período de defasagem, um aumento na inclinação da curva de casos de dengue (curva vermelha), revelando o início do movimento de "outbreak". Pelo que pudemos observar, este período de defasagem pode variar de 2 a 6 semanas.

No ano de 2012 – um ano de chuvas bem acima da média – este período de defasagem foi de 2 a 3 semanas: a primeira semana com chuvas acima de 5% foi a semana 7, e já na semana 10 é possível perceber uma mudança sutil na inclinação dos casos de dengue. Um pouco depois, podemos observar que na semana 13, choveu quase 15% das chuvas do ano; e já na semana 15 é possível perceber que a inclinação da curva de casos de dengue praticamente dobrou – uma defasagem de apenas 2 semanas.

Já para o ano de 2013 – um ano de chuvas pouco abaixo da média – o período de defasagem foi de 4 a 6 semanas: a primeira semana com chuvas acima de 5% foi de novo a semana 7, mas só da semana 12 para a semana 13 é possível perceber uma mudança na inclinação

[3] Podemos observar também em alguns anos a ocorrência de semanas que chove – em uma única semana – mais de 10% de todas as chuvas ocorridas no ano. Entretanto esta situação é bem mais rara, e parece ocorrer apenas naqueles anos em que o volume de chuvas é acima dos valores médios históricos, e portanto, quando a irregularidade de chuva é maior que a "normal".

dos casos de dengue. Um pouco depois, na semana 16, quando voltou a chover acima de 5%, a defasagem observada foi de cerca de 4 semanas, ocorrendo uma nova mudança da inclinação da curva de casos de dengue da semana 19 para a 20.

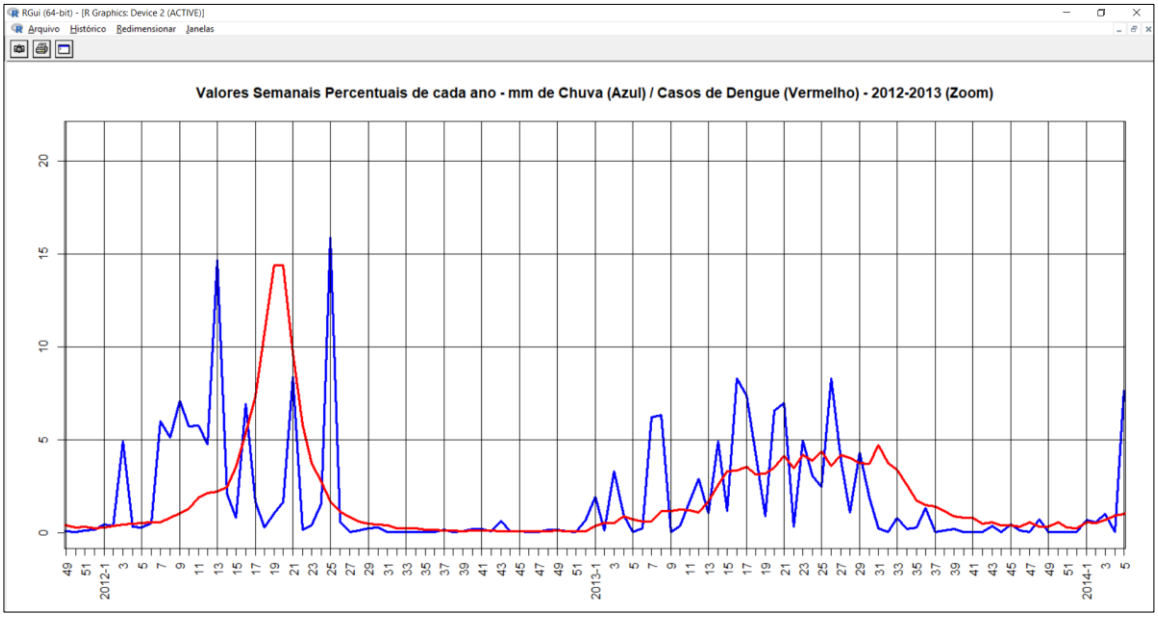

Gráfico 4: Percentual Semanal Chuva(Azul) / Dengue(Vermelho) 2012-2013 (ampliação local)

Ainda sobre o Gráfico 4, podemos ver que uma semana em que chove cerca de 5% do observado no ano todo pode ser classificada como uma semana de chuvas intensas. Parece-nos razoável inferir que após uma semana de chuvas intensas, a probabilidade de água parada, nas residências e locais públicos da cidade tende a aumentar. Esta inferência aliada ao fato já conhecido de que o período de desenvolvimento do mosquito *Aedes aegypti* até a fase adulta varia de 7 a 10 dias (FIOCRUZ, 2019) – ou seja: de uma a menos de duas semanas, parece sugerir que o atraso observado no parágrafo anterior (de 2 a 6 semanas) é ao mesmo tempo conciso, e suficientemente abrangente para explicar o desenvolvimento e maturação dos primeiros mosquitos, seguido de suas primeiras picadas (de uma a duas semanas), e o aparecimento dos primeiros sintomas de dengue – período que, segundo a Secretaria de Saúde do Estado do Rio de Janeiro (2021), dura uma semana em média, mas que pode chegar a duas semanas.

Parece razoável também inferir a partir destes dados, que nos anos em que chove acima da média – como 2012, por exemplo – há uma tendência de diminuição na defasagem das curvas, sugerindo que chuvas mais torrenciais promovem condições mais favoráveis ao desenvolvimento do *Aedes aegypti* – com maior incidência de regiões com água parada.

No Gráfico 5 visualizamos o comportamento acumulado do percentual da média de chuvas e de casos de dengue ao longo dos anos 2007-2021.

Agora, tomando-se a mesma visão nos anos de 2012 e 2013 relativamente ao comportamento acumulado percentual, podemos ver bem de perto a diferença de casos de dengue entre dois anos com volumes de chuvas bastante desiguais – como foi o caso destes dois anos.

De forma geral o Gráfico 6 nos fornece – mais uma vez – um retrato da irregularidade das chuvas na cidade de Fortaleza/CE: podemos notar que tanto em anos de chuvas acima da média (como foi 2012), quanto em anos de chuva abaixo da média (como foi 2013), aproximadamente 80% de todas as chuvas do ano caem dentro da quadra chuvosa. Entretanto

uma diferença importante entre estes dois anos parece estar na velocidade com que as precipitações se acumulam dentro da quadra chuvosa.

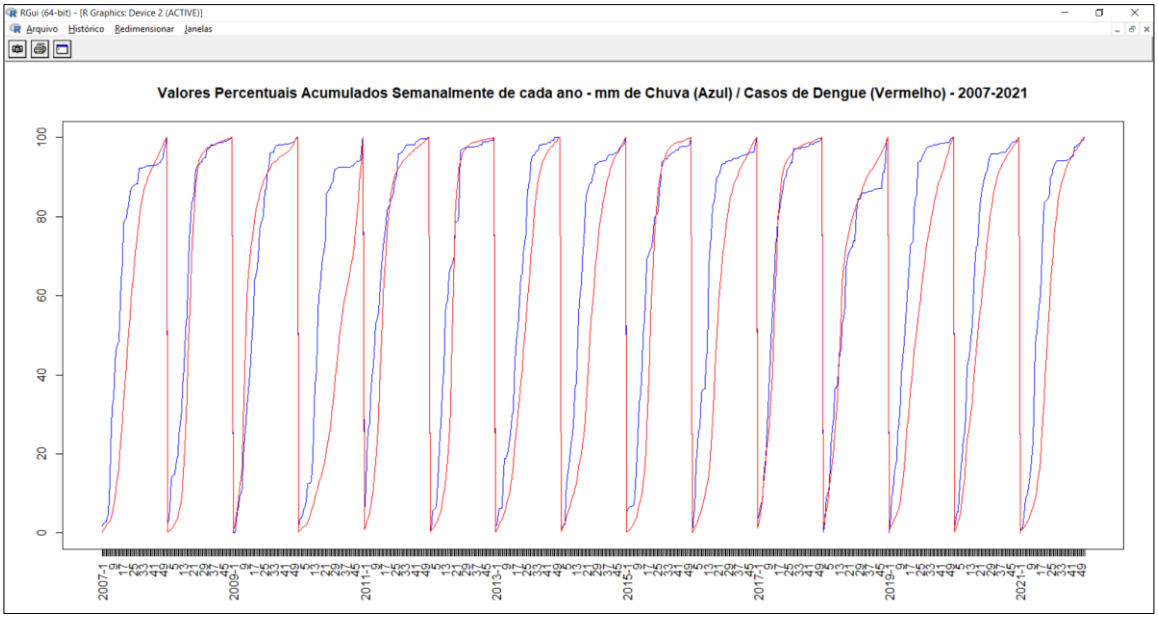

Gráfico 5: Percentual Semanal Acumulado Anualmente Chuva(Azul) / Dengue(Vermelho) 2007-2021

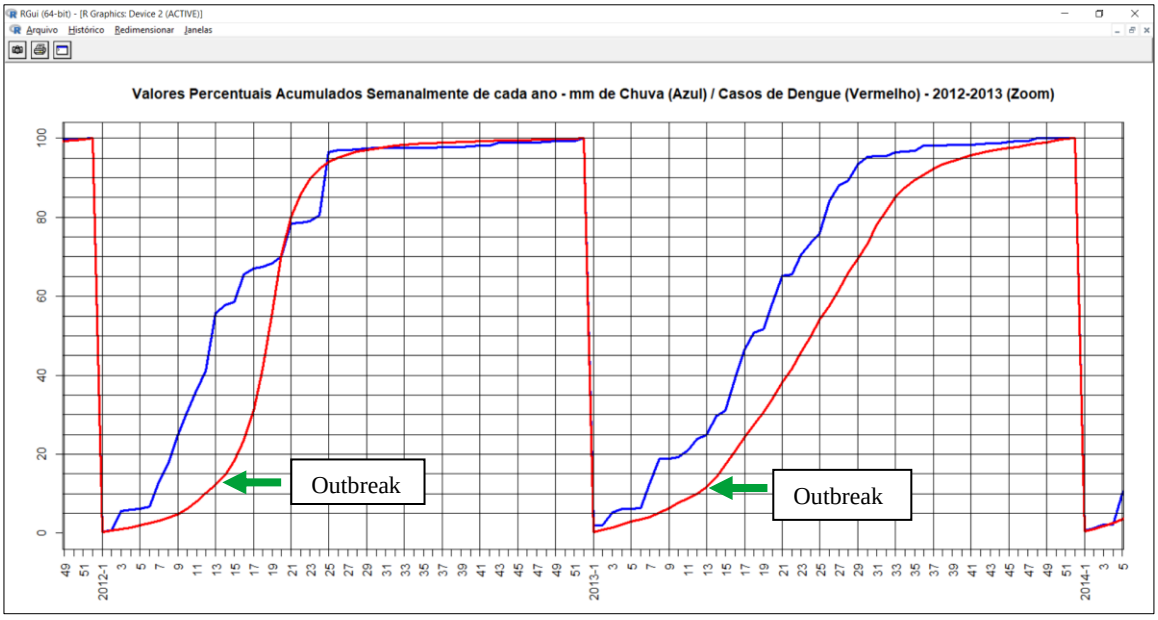

Gráfico 6: Percentual Semanal Acumulado Anualmente Chuva(Azul) / Dengue(Vermelho) 2012-2013 (ampliação local)

No ano de 2012, o acúmulo de chuva ultrapassa os 50% já na semana 13, e é justamente a partir deste ponto que a curva de casos de dengue ganha inclinação exponencial, caracterizando um notável “outbreak” que leva o acúmulo de casos de dengue deste ano de modestos 20% na semana 15 para impressionantes 80% na semana 21 – ou seja: em apenas um mês e meio.

Já no ano de 2013, o acúmulo de chuva foi mais suave, ou seja, a irregularidade – caracterizada por chuvas torrenciais – dentro da quadra chuvosa foi menor. Na semana 13 – quando em 2012 já havia caído metade das águas do ano – só havia chovido 25% das chuvas de 2013. E a metade das chuvas do ano de 2013 só caiu cumulativamente na semana 18 – mais de um mês atrasado em relação a 2012. Estas características parecem apontar que 2013 foi um ano menos irregular que 2012. Podemos perceber que coincidentemente, na semana 15, o percentual de casos de dengue acumulados de 2013 estava – assim como em 2012 – por volta dos 20%. Mas diferentemente do que ocorreu em 2012, o percentual acumulado de casos de dengue de 2013 só atingiu os 80% de casos do ano na semana 32, ou seja, demorou cerca de 17 semanas – cerca de 4 meses – enquanto em 2012 esta variação de acúmulo dos 20% aos 80% só demorou um mês e meio – mais de duas vezes mais rápido. Nota-se que o ponto de "outbreak" ocorre na variação máxima

Deixando agora a comparação entre os anos, e olhando apenas para a comparação entre as curvas, podemos também observar semelhanças e diferenças. No ano de 2012, por exemplo, vemos que a curva de chuva atinge os 10% de acumulação percentual na semana 7, enquanto que a curva de casos de dengue atinge este percentual apenas na semana 12 – 5 semanas depois. E podemos observar que esta defasagem temporal de cerca de 5 semanas se mantém praticamente constante até que as curvas atinjam seus 60% de percentual acumulado. Até este ponto, ou seja, até a semana 19, os casos de dengue têm um crescimento vertiginoso, mas em tudo semelhante ao das chuvas a menos da defasagem temporal de cerca de 5 semanas. Mas após a semana 19, apesar da curva das chuvas dar uma certa amenizada na sua ascensão, a curva da dengue prossegue na sua escalada exponencial, caracterizando o "outbreak" – um momento de descontrole dos casos de dengue, ao mesmo tempo em que representa um momento de independência da curva de casos de dengue em relação à curva de chuvas. Tão impressionante é este momento, que em apenas uma semana – da semana 19 para a semana 20 – os casos acumulados de dengue sobem de 60 para 70%; e apenas mais uma semana é suficiente para que os casos acumulados atinjam 80% de todos os casos de dengue de 2012, na semana 21.

Dessa forma, podemos mais uma vez inferir que durante um certo período dentro da quadra chuvosa, as condições ambientais favoráveis à expansão populacional de *Aedes aegypti* vão gradativamente sendo desenvolvidas e acumuladas, especialmente pelas chuvas, na forma de águas paradas por toda a cidade. Este período, supostamente de "incubação", vai aproximadamente da semana 5 (quando começa a quadra chuvosa) até as semanas de 18 a 19, quando então a curva de casos de dengue adquire uma inclinação exponencial, superando o ritmo de crescimento da curva da chuva, e caracterizando o "outbreak". Vale lembrar que antes deste momento de inflexão, as duas curvas seguem juntas num ritmo de crescimento muito parecido por cerca de 6 semanas, período onde as magnitudes percentuais acumuladas das duas curvas são praticamente idênticas, exceto pela defasagem temporal de cerca de 4 a 5 semanas, sendo a curva dos casos de dengue sempre atrasada em relação a da chuva, e, portanto, possivelmente determinada por esta em alguma medida.

Para finalizar esta análise dos gráficos de valores percentuais acumulados, olhemos mais uma vez para as nossas curvas em estudo no ano de 2013. Diferentemente do que ocorreu em 2012, em 2013 não parece ter havido um "outbreak" tão descontrolado. Como sabemos, em 2013 as chuvas dentro da quadra chuvosa não tiveram tantos episódios torrenciais – ou como chamamos no início deste artigo: tantas "semanas de chuvas intensas" – quanto em 2012.

Esta "quebra" na irregularidade das chuvas, ainda que sutil, parece ter promovido a manutenção da defasagem temporal em um nível constante durante todo o ano de 2013; uma defasagem de 5 a 6 semanas entre os percentuais acumulados de chuva e de casos de dengue. A manutenção desta defasagem como uma constante pode estar sugerindo que este período de 5 a 6 semanas é um período razoavelmente adequado para a população de Fortaleza adotar cuidados preventivos suficientes para a manutenção das populações de *Aedes aegypti* em níveis

controlados, ou seja, mais distantes da possibilidade de um "outbreak". Ao mesmo tempo, a inclinação mais suave do gráfico de percentuais acumulados de chuva em 2013 parece sugerir que este nível de crescimento percentual acumulado de chuva dentro da quadra chuvosa não chega a causar condições ambientais tão favoráveis ao *Aedes aegypti* a ponto de promover uma explosão populacional descontrolada – situação que parece ter ocorrido em 2012. Não se pode também negligenciar o trabalho realizado pelos agentes de endemias neste ano, pois sua intensidade neste momento pode ter influenciado no sentido de mitigar enormemente os efeitos do Aedes na população de Fortaleza.

Complementando a análise feita até aqui, apresentamos a seguir os cálculos de correlação cruzada das duas séries temporais em estudo. O processo de "pré-*whitening*" resultou nos seguintes modelos: para a série temporal de chuvas, um modelo SARIMA(9,0,3)(0,53,1); e para a série temporal de casos de dengue, um modelo SARIMA(38,0,0)(0,48,1). A normalidade dos resíduos dos referidos modelos foram comprovados com aplicação do teste estatístico Shapiro-Wilk, resultando em *p-values* 0.277 e 0.059, respectivamente. A aplicação da correlação cruzada na linguagem R é feita através da chamada à função *ccf()*. O comando efetuado foi: *ccf (* va_chuvas , va_casos_dengue , ylab = "Correlação", main = "Correlação Cruzada Chuva -> Dengue"), onde o primeiro parâmetro é, por hipótese, a variável aleatória causal, e o segundo, a variável aleatória dependente. O resultado pode ser verificado no Gráfico 7 a seguir.

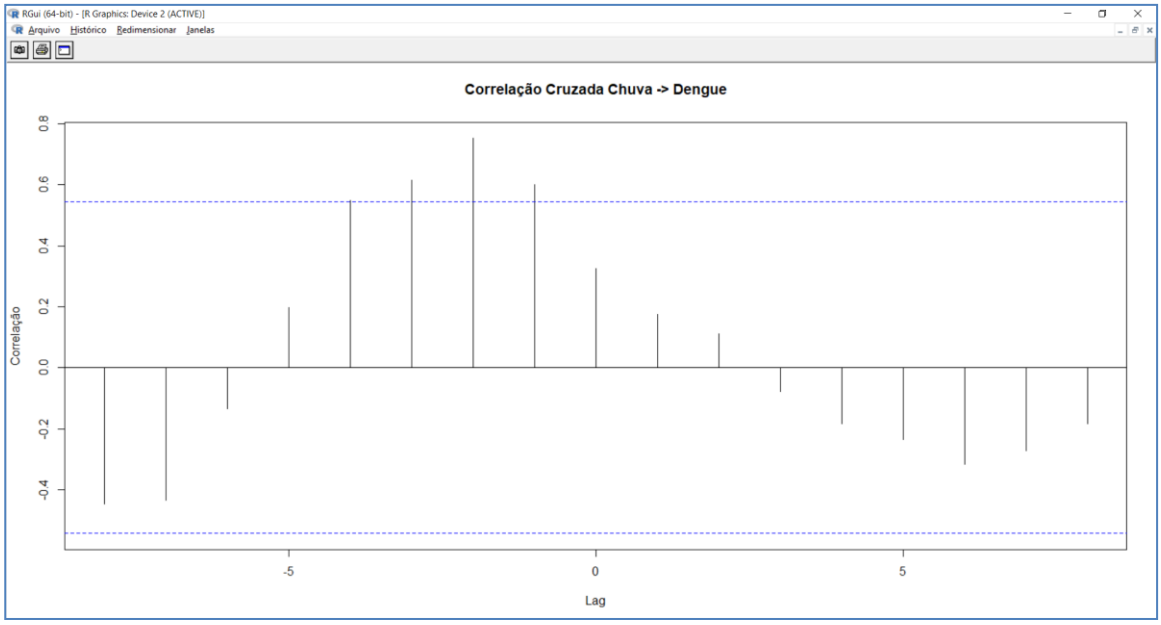

Gráfico 7: Correlação cruzada Chuva / Dengue 2007-2021

A interpretação do Gráfico 7 é a seguinte: os valores de correlação cruzada significativos (com valor maior que o intervalo de confiança[4] demarcado pelas duas linhas tracejadas azuis) foram observados em *lags* negativos. Isto indica que foi correta a hipótese de que a variável aleatória causal é de fato aquela que foi entrada como primeiro parâmetro da função *ccf*, ou seja, é de fato a chuva que causa efeitos sobre os casos de dengue. Se as autocorrelações significativas estivessem em *lags* positivos, a conclusão seria a inversa. Além disso, podemos observar que a autocorrelação de maior magnitude ocorre no *lag* -2 com magnitude 0.753, ou seja, na maior parte da história das duas ST´s os aumentos (correlações positivas) das duas variáveis aleatórias ocorre com uma defasagem de apenas 2 semanas. Mas

[4] Este valor é calculado automaticamente pela função ccf. Neste caso foi calculado em +/- 0.54.

também podemos observar que há correlações significativas nos *lags* -1, -3 e -3, ou seja: a chuva determina com até 4 semanas de antecedência os casos de Dengue em Fortaleza no período estudado, o que corrobora estatisticamente as observações feitas anteriormente, através das análises visuais sobre os gráficos de percentual semanal e percentual acumulado de chuva.

4. Conclusão

É inegável que as ações humanas preventivas são esforços determinantes na mitigação do descontrole da dengue, quanto o são as precipitações pluviométricas irregulares para o favorecimento destes. A identificação dos momentos de "outbreak" da doença é fundamental para que os serviços de controle de endemias possam funcionar com razoável confiança e efetividade. Este estudo apresenta, através de um modelo causal, que chuvas e casos de dengue ocorrem de forma possível de ser identificada através de relações percentuais e variações bruscas nas medidas. Tais variações são os indicativos de "outbreaks", que para Fortaleza podem ser detectados pelos indicativos de chuvas entre a 5ª e a 9ª semana epidemiológica do ano, iniciando os crescimento vertiginoso da dengue entre a 12ª e 13ª semana epidemiológica.

É certo afirmar que: tanto quanto as precipitações proliferam habitats naturais ao desenvolvimento do *Aedes aegypti*, os esforços preventivos da população contribuem para minimizá-los. Eliminar a água parada nas suas próprias residências representa um ato simples, mas grandioso em impacto no arrefecimento do crescimento populacional do mosquito transmissor da dengue.

Não obstante este aspecto humano determinante do ponto de vista qualitativo, esta pesquisa focalizou o aspecto quantitativo do relacionamento entre as séries temporais de chuvas e de casos de dengue que parecem figurar igualmente como variáveis capazes de exercer força determinante na composição de causas e efeitos que podem conduzir a um evento de "outbreak" da dengue na cidade de Fortaleza/CE.

Assim, os resultados obtidos nesta pesquisa mostram de forma quantitativa e tácita a assertividade das proposições de Negreiros et al (2007) acerca da relação existente entre a evolução das precipitações e a evolução de casos de dengue na cidade de Fortaleza/CE – como apresentado, uma relação não só direta, mas bastante íntima, como mostrado pelo comportamento sazonal das duas séries temporais em estudo, bem como pelas mudanças pontuais de tendências da séries temporal de precipitações, acompanhadas todas bem de perto por mudanças correspondentes e sempre positivamente correlacionadas pela série de casos de dengue – de forma tão notável, que quase podemos afirmar – de forma claramente "figurativa" – que a série temporal de casos de dengue está constantemente parecendo "imitar" a série temporal de precipitações ocorridas na cidade ao longo dos anos.

Além disso, podemos citar uma outra conclusão importante a que esta pesquisa nos conduziu: a de que os resultados obtidos nesta pesquisa podem ser remetidos à ordem prática. Uma aplicação possível – e que sugere aos autores uma oportunidade ímpar de aprofundamento dos presentes estudos – seria na forma de um algoritmo auxiliar ao Framework Webdengue[5], que poderia ser descrito em linhas gerais da seguinte forma: gerando primeiro, a partir de uma modelagem estática (revista de tempos em tempos) de um modelo de previsão ARIMA ou SARIMA previsões de uma ou mais semanas à frente do momento presente; a previsão mencionada na alínea anterior, poderá ser obtida a partir da série temporal de chuvas, ou da série temporal de casos semanais de dengue – ambas apresentadas neste trabalho; ou ainda a partir de

[5] Framework computacional de apoio ao combate a dengue desenvolvido por Negreiros (2002) que inclui aplicativos móveis para apoio à notificação para prevenção e combate à dengue, além de um módulo de Pesquisa Operacional para organização e otimização das equipes e trabalhos, e um módulo de previsão espaço-temporal denominado Dynagraph para suporte a tomada de decisões antecipadas.

uma composição de ambas as previsões. Este resultado deverá então ser buscado em janelas subsequentes anteriores nas séries temporais analisadas. Cada janela semelhante deverá ser guardada enquanto referência;

Após a busca mencionada na alínea anterior, encaminhar seus resultados em arquivo (p.ex. em formato JSON) para o Módulo Dynagraph do Webdengue (Chaves, 2007), (Graphvs, 2022), num formato compatível.

De posse desses resultados o Dynagraph poderá rodar o algoritmo DBScan/IGN sobre as médias móveis dos dados enviados por este módulo de previsão – que poderá ser implementado em R, por exemplo.

Atualmente, o Dynagraph já executa este algoritmo, porém através de médias móveis sobre as quatro semanas anteriores à semana presente, gerando a partir destes dados, uma instância geoespacial para o algoritmo DBScan/IGN montar os grupos de casos previstos de casos de dengue para a próxima semana futura, apresentando-os de forma visual, em mapas georreferenciados, facilitando imensamente a interpretação dos dados de previsão, e a tomada de decisões.

No entanto, conforme nos relata Chaves (2017) em suas conclusões, o Dynagraph apresentou uma taxa de acerto da ordem de apenas 20% em suas previsões em épocas de pouca incidência da dengue na cidade de Fortaleza-CE. Estes períodos são igualmente importantes no combate à Dengue – uma ação continuada – pois estes períodos são os mais propícios à campanhas educativas à população no sentido de eliminar focos de água parada – de modo que é desejável que o Dynagraph tenha alta capacidade de previsões assertivas também nestes período, de modo a prover aos tomadores de decisão, o poder de direcionar esforços educativos para determinada área geográfica, mais provável de ser acometida por focos de água parada nas próximas semanas.

Se, ao invés de aplicarmos o modelo de médias móveis do DBScan/Dynagraph sobre os dados espaço-temporais mencionados no parágrafo anterior, o aplicássemos sobre janelas sazonais semanais de mesmas características em anos anteriores, determinadas por previsões sobre modelos temporais ARIMA ou SARIMA, conforme a proposta sugerida por este trabalho, poderíamos obter melhores desempenhos nas previsões do Dynagraph, módulo de previsões espaço-temporais do Framework Webdengue? Esta pergunta deverá ser respondida em futuras pesquisas que aprofundarão os estudos e resultados obtidos neste trabalho.

Referências

Buczak AL, Baugher B, Moniz LJ, Bagley T, Babin SM, Guven E (2018) Ensemble method for dengue prediction. *PLoS ONE* 13(1): e0189988. https://doi.org/10.1371/journal.pone.0189988

BUTANTAN, Instituto. Vacina contra a dengue desenvolvida pelo Butantan entra na reta final de estudos clínicos. Notícia on-line de 19/11/2021. Disponível em: `https://butantan.gov.br/noticias/vacina-contra-a-dengue-desenvolvida-pelo-butantan-entra-na-reta-final-de-estudos-clinicos`,. acessado em Set/2022.

Carlos, M. A.; Nogueira, M.; Machado, R. J. (2017) Analysis of dengue outbreaks using big data analytics and social networks. In: *IEEE. 2017 4th International Conference on Systems and Informatics* (ICSAI). [S.l.], 2017. p. 1592–1597.

Chaves, B. B. (2019), Uma Metodologia De Agrupamento E Previsão Espaço-Temporal: Aplicação na Expansão da Dengue e Chikungunya em Fortaleza/CE, Dissertação de mestrado, Mestrado Profissional em Computação Aplicada (MPCOMP-UECE-IFCE), Ago/2019.

Chen, T-H K, Chen, V Y-J, Wen, T-H (2018) Revisiting the role of rainfall variability and its interactive effects with the built environment in urban dengue outbreaks, *Applied Geography*. Vol 101, pp 14-22

Chien, L-C, Yu, H-L. (2014) Impact of meteorological factors on the spatiotemporal patterns of dengue fever incidence, *Environment Internationa*l, vol 73, pp 46–56, https://doi.org/10.1016/j.apgeog.2018.10.005

Costa, Alexandre Cunha. Curso on-line: Análise de séries temporais, 2020. Disponível em: https://www.youtube.com/c/AlexandreCunhaCosta/featured, acessado entre Mai/2021-Set/2022.

Edussuriya C, Deegalla S, Gawarammana I (2021) An accurate mathematical model predicting number of dengue cases in tropics. *PLoS Negl Trop Dis* 15(11): e0009756. https://doi.org/10.1371/journal.pntd.0009756

GCE (2022), Governo do Estado do Ceará, Secretaria dos Recursos Hídricos – FUNCEME (Fundação Cearense de Meteorologia e Recursos Hídricos – http://www.funceme.br, acessado entre Mai/2021-Jun/2022.

GRJ (2022), Governo do Estado do Rio de Janeiro. Secretaria da Saúde. Informativo Sobre a Dengue – https://smaonline.rio.rj.gov.br/documentos/CSRH/cartilhas/Cartilha_dengue.htm, acessado entre Mai/2021-Jun/2022.

Fagundes, Julia Amaro Gonçalves; OLIVEIRA, Matheus Henrique de Sousa; FAGUNDES, Vladimir. A linguagem R na análise de dados: Um estudo de caso dos transportes públicos do RJ durante a pandemia da Covid-19., 2021. Disponível em: https://sol.sbc.org.br/livros/index.php/sbc/catalog/download/78/339/596-1?inline=1, acessado em Set/2022.

FIOCRUZ (2019), Fundação Oswaldo Cruz."Como é o ciclo de vida do mosquito 'Aedes aegypti'?", 2019. Disponível em: https://portal.fiocruz.br/pergunta/como-e-o-ciclo-de-vida-do-mosquito-aedes-aegypti, acessado entre Mai/2021-Jun/2022.

GLOBO. Portal G1 de Notícias. Dengue tem vacina?, Edição on-line de 02/05/2022. Disponível em: <https://g1.globo.com/saude/noticia/2022/05/02/dengue-x-vacina-veja-imunizantes-disponiveis-e-o-que-esperar-da-pesquisa-do-butantan.ghtml>. Acessado em Setembro/2022.

Micanaldo, E. F., Carvajal T. M., Ryo, M., Nukazawa, K., Amalin, D.M, Watanabe, K. (2021), Dengue disease dynamics are modulated by the combined influences of precipitation and landscape: A machine learning approach, *Science of the Total Environment* 792 https://doi.org/10.1016/j.scitotenv.2021.148406

Morenttin, Pedro A. Análise de séries temporais / Pedro A. Morettin, Cléia M. C. Toloi - 2a ed. - São Paulo: Edgard Blucher, 2006

Nayak, S. D. P., Narayan, K. A. (2019) Prediction of dengue outbreaks in Kerala state using disease surveillance and meteorological data. *International Journal of Community Medicine and Public Health*. vol 6(10): 4392-4400

Negreiros, M.; Xavier, A. E.; Xavier, A. F.; Maculan, N.; Michelon, P.; Lima, J. W. O.; Andrade, L. O. M. (2011) Optimization models, statistical and dss tools for prevention and combat of dengue disease. In: *Efficient Decision Support Systems-Practice and Challenges in Biomedical Related Domain*. [S.l.]: IntechOpen.

OPA/OMS. Organização Pan-Americana de Saúde / Organização Mundial de Saúde. "Dengue", 2019. Disponível em: https://www.paho.org/pt/topicos/dengue, acessado entre Mai/2021-Jun/2022.

PMF (2022), Prefeitura Municipal de Fortaleza, Secretaria de Vigilância da Saúde - SIMDA (Sistema de Monitoramento Diário de Agravos https://simda.sms.fortaleza.ce.gov.br/simda/index, acessado entre Mai/2021-Jun/2022.

R Development Core Team. R: A Language and Environment for Statistical Computing. Vienna: R Foundation for Statistical Computing, 2022. Disponível em: http://www.R-project.org/

Graphvs. WEBDENGUE. Framework Computacional de Apoio ao Controle da Dengue. 2022. Disponível em: http://www.webdengue.com.br/

WHO (2022), World Health Organization. Disease Outbreak, http://www.emro.who.int/health-topics/disease-outbreaks/index.html , acessado em 01/07/22

Xavier LL, Honório NA, Pessanha JFM, Peiter PC (2021) Analysis of climate factors and dengue incidence in the metropolitan region of Rio de Janeiro, Brazil. *PLoS ONE* 16(5): e0251403. https://doi.org/10.1371/journal.pone.0251403