

Sistema de previsão imediata por conjunto a partir de radares meteorológicos para alertas de inundação

Bolsista: Angélica Nardo Caseri
Responsável: Carlos Frederico de Angelis
Projeto Fapesp número: 2017/00275-0

1. Introdução

As inundações bruscas são responsáveis por danos econômicos e sociais em todo o mundo. Prever esses eventos é considerado uma das situações mais difíceis e desafiadoras enfrentadas por hidrólogos e meteorologistas. As inundações bruscas geralmente estão relacionadas a eventos intensos de chuvas e ocorrem frequentemente em bacias moderadas e pequenas. Os sistemas de previsão de tempo para previsão de enchentes são essenciais para evitar eventos extremos e reduzir seus impactos socioeconômicos. Estes sistemas são caracterizados por previsões de curto prazo de tempo (entre 0 e 6 horas) e são frequentemente baseados na observação de dados observados, como informações de radar e pluviômetros, ou por modelos numéricos de previsão de tempo com alta resolução (Collier, 2007; Sene, 2010; Hapuarachchi et al., 2011). Um sistema de previsão de cheias deve ser pelo menos composto por *weather forcing* (observado e previsto), ferramentas adaptadas para estimar as condições iniciais e o modelo hidrológico (Zappa et al., 2011). Cada componente fornece informações para entender a formação do evento e gerar um alerta com tempo suficiente para gerenciar uma situação de potencial desastre. Além da diversidade de abordagens e aplicações, quantificar as incertezas meteorológicas e hidrológicas para o *nowcasting* é um desafio. Notavelmente, as incertezas associadas aos eventos de chuva têm um impacto importante nas previsões hidrológicas, especialmente quando se trata de eventos de inundação rápida localizados.

Na previsão hidrometeorológica, a previsão de conjunto (*ensemble*) é uma abordagem cada vez mais utilizada para quantificar incertezas preditivas e melhorar a confiabilidade das previsões. As previsões probabilísticas podem então ser usadas para tomar uma decisão, as possíveis conseqüências são ponderadas pela sua probabilidade de ocorrência (Ramos et al., 2010). A incerteza preditiva total torna possível estimar a probabilidade de ocorrência de um evento no futuro, levando em conta as principais fontes de incerteza presentes no sistema de previsão (Coccia e Todini, 2011).

Os resultados encorajadores da aplicação do conjunto de previsão levaram ao desenvolvimento de sistemas de previsão de conjunto com alta resolução espacial e temporal, principalmente nos casos de *nowcasting*. Historicamente, os sistemas *nowcasting* usam as informações do radar meteorológico, às vezes combinadas com os dados do pluviômetro para rastrear o movimento das células da chuva e estimar sua intensidade nas horas seguintes. Geralmente, as imagens de radar de advecção são realizadas extrapolando o deslocamento futuro observado no passado. Estes deslocamentos são caracterizados por uma velocidade e uma direção e são estimados

usando as imagens de radar observadas. Em alguns métodos, também é possível caracterizar a evolução da intensidade do campo (aumento ou diminuição).

Em relação aos métodos de advecção probabilística, podemos citar o método SBMcast desenvolvido por Berenguer et al. (2011). Este método gera um número de previsões compatíveis com as observações de radar do modelo "String of Beads" (Pegram e Clothier, 2001). Este modelo permite modelar a estrutura de correlação temporal das zonas chuvosas a partir de dois modelos auto-regressivos. Para considerar as incertezas, alguns sistemas meteorológicos também produzem previsões conjuntas, geradas considerando, por exemplo, incertezas na etapa de estimar o estado inicial da atmosfera e/ou componentes estocásticos na parametrização de modelos. No entanto, esses sistemas de previsão, de alta resolução e frequentemente atualizados, gastam considerável tempo computacional que às vezes são incompatíveis com o sistema de previsão do tempo *nowcasting* (Vincendon et al., 2011).

Liechti et al. (2013) desenvolveram o método REAL-C2, que combina as observações de radar probabilístico geradas pelo método REAL (Germann et al., 2009) com o COSMO-2. REAL consiste na construção de um modelo de erro espaço-temporal comparando a chuva medida os dados e os dados do radar no pixel correspondente. Liechti et al. (2013) aplicaram o REAL-C2 a dois eventos de chuva em três bacias hidrográficas no sul dos Alpes suíços, com um período de previsão de 24 horas e uma nova inicialização do modelo a cada três horas. Os resultados mostraram que o método REAL-C2 pode ser uma solução para o *flash nowcasting de floods*.

Entretanto, a previsão de eventos de enchentes continua sendo um desafio, principalmente em pequenas áreas. Um dos problemas da previsão do NWP em curto prazo é gerar com sucesso os fluxos de previsão conjuntos em um período de cálculo reduzido e ativar o alerta para enchentes com avanço suficiente. Os modelos meteorológicos numéricos exigem um processo muito caro em termos de tempo de computação para fornecer uma previsão de alta resolução que possa estimar as intensidades de precipitação e localizar probabilidades de previsão geograficamente precisas e confiáveis. O monitoramento de radar pode ajudar na detecção da evolução espaço-temporal dos campos de chuva, mas técnicas de previsão e previsão de curto alcance são necessárias para ir além da observação e fornecer cenários de chuva nas próximas horas para alerta de inundação.

Neste estudo, investigamos uma estrutura geoestatística espaço-temporal para gerar múltiplos cenários de chuvas futuras em curto prazo. A abordagem geoestatística é baseada em uma simulação condicional e um método de advecção aplicado dentro do Método de Bandas de Torneamento (TBM). A abordagem foi previamente testada para a simulação de incerteza em campos pluviométricos de radar (Caseri et al., 2015). Buscamos gerar um conjunto confiável de campos de chuva por fazer o melhor uso dos pontos fortes das medições muitas vezes disponíveis para *nowcasting*: as propriedades espaciais e temporais dos campos de precipitação fornecidos pelos dados de radar e as intensidades de precipitação medidos por pluviômetros. O objetivo deste projeto de

pesquisa é estabelecer uma abordagem eficiente da previsão imediata por conjunto de alertas de inundação. O método foi aplicado em Campinas, estado de São Paulo do Brasil, usando vários eventos extremos.

2. Atividades realizadas

Neste ano este projeto de pesquisa foi dedicado as seguintes etapas:

- Aprimoramento do software SAMPO-TBM para previsão de chuva
- Seleção dos dados utilizados pelo software SAMPO-TBM
- Avaliação dos previsões de *ensemble* geradas
- Adaptação do modelo hidrológico MHD para a problemática abordada neste projeto
- Redação de dois artigos internacionais e dois artigos nacionais
- Participação em congressos

2.1. Geração de previsões ensemble de precipitações

O método usado aqui para gerar a previsão probabilística de chuva imediata é baseado em um método de simulação geoestatística, o método de bandas girantes (TBM). Este método foi apresentado pela primeira vez na literatura acadêmica por Matheron (1973). Este reduz o problema de simular um campo em bi ou tri-dimensional em uma dimensão, em bandas orientadas. As simulações da TBM buscam caracterizar a incerteza dos valores não amostrados dos atributos regionalizados (Emery e Lantuéjoul, 2006).

O algoritmo simula as três dimensões de chuva, espaço (x, y) e tempo (z), usando um modelo de variograma espaço-temporal. Ela produz campos 3D aleatórios Gaussianos homogêneos e isotrópicos. Uma transformação gaussiana de anamorfose é aplicada para simular os campos. A anisotropia temporal é levada em conta através da parametrização da advecção de chuva. A advecção incorpora uma velocidade e é considerada uniforme e constante. Representa o movimento do sistema de precipitação no tempo dentro da simulação 3D.

2.1.1. Aprimoração do método SAMPO-TBM

Neste projeto nós adaptamos o SAMPO-TBM dentro de uma estrutura de simulação condicional considerando o método de simulação proposto por Leblois e Creutin (2013), com o condicionamento em Caseri et al. (2016), o qual considera os valores de pluviômetros, e por fim, foi adicionada o condicionamento pelas informações do dado radar. Basicamente, consiste em uma simulação não-condicional de campos aleatórios no espaço e no tempo, seguida por um passo de condicionamento em locais de pluviômetros.

Nos pontos de condicionamento, são consideradas as intensidades de chuva medidas pelos pluviômetros da região e pelo radar meteorológico. Para isso a técnica de quantil x quantil é considerada para colocar as medidas dos pluviômetros e radares no mesmo nível de intensidade, pois estes medem a chuva de forma diferente; sendo assim, possuindo valores diferentes de estimação da chuva. O condicionamento é baseado na abordagem

de substituição de krigagem residual e amostragem MCMC (mais detalhes em Caseri et al., 2015). Nesses pontos, para um determinado período de tempo, todos os membros do ensemble gerados terão valores próximos. No *nowcasting*, os parâmetros do gerador são estimados considerando os dados de precipitação disponíveis no momento do início da previsão de tempo. O processo começa após um mínimo de horas que o evento começou. Aqui, consideramos 2 horas para esta inicialização. Os nowcasts de chuva são então emitidos para as próximas duas horas, com um total de 30 membros do grupo gerados a cada hora do passo do evento. A *Figura 1* apresenta um resumo desta metodologia.

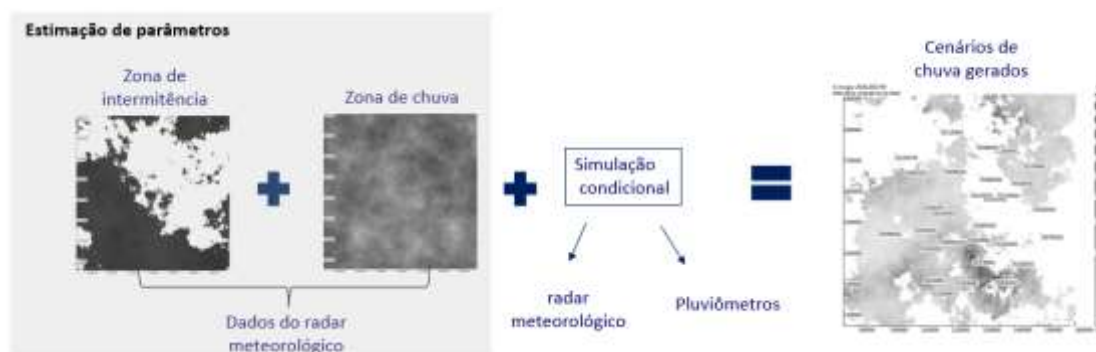


Figura 1. Explicação da metodologia aplicado neste projeto através do software SAMPO-TBM.

2.1.2. Previsões de ensemble de chuva

Nas sessões a seguir apresentamos as previsões realizadas para 6 eventos de inundação. A cada 30 minutos foram gerados 30 membros de *ensemble*, até o final de cada evento. O total de horas de simulação é de 83 horas, assim, sendo um total 4980 previsões de precipitação geradas. As previsões geradas pelos métodos SAMPO TBM foram avaliadas em relação às chuvas observadas pelos pluviômetros e pelo método de previsão Persistência. A previsão de persistência considera simplesmente a última observação como uma previsão para futuros prazos, sem modificá-la (sem advecção). Para construir a previsão de persistência, usamos os dados observados para cada pluviômetro, que é simplesmente transportado para os futuros passos de tempo. É importante notar que a persistência é um método fácil de implementar. Mas muitas vezes é difícil obter um desempenho melhor do que a persistência no primeiro passo de tempo de previsão pois esta previsão contém todas as características da última observação da chuva.

Os resultados são apresentados na forma box-plot, representando os quantis 5%, 25%, 50%, 75% e 95% de cada distribuição dos valores do score. Notaremos que, para a previsão de persistência, os resultados em CRPS e MAE serão idênticos, uma vez que aqui a persistência é uma previsão determinística (isto é, com apenas um cenário futuro). Para o cálculo da curva ROC e sua AUC, o quantil 70% da distribuição de precipitação observada (3 mm/h), estimado considerando todos os eventos, foi considerado como limiar de transbordamento que define um evento.

2.1.3. Resultados

As Figuras 2 a 4 apresentam, para cada passo de tempo, os valores dos critérios de performance obtidos na localização dos pluviômetros utilizados no condicionamento do SAMPO TBM. O passo de tempo 0 representa a última hora de observação. Neste caso, o SAMPO TBM opera em modo de simulação. O condicionamento é considerado, portanto, espera-se que o critério de pontuação em medidores de chuva de condicionamento tenha um valor nulo.

Como primeiro passo, podemos observar que, em todos os passos de tempo, o método de previsão baseado no SAMPO-TBM (PI-G) é mais eficiente no MAE e no CRPS do que a persistência. As diferenças tornam-se mais importantes à medida que o passo de tempo da previsão aumenta. Aqui, as previsões do SAMPO-TBM mostraram-se mais eficientes a partir do primeiro passo de tempo. Parece, portanto, que, nos eventos estudados, a consideração da advecção teria um papel importante na previsão imediata das chuvas. Pode-se observar igualmente que no caso do BIAS (Figura 4), as previsões quase não possuem bias. Existe apenas um pouco de sub-estimação no caso dos métodos SAMPO-TBM e super-estimação no caso da persistência; mas os valores não passam de 0.5 mm/h.

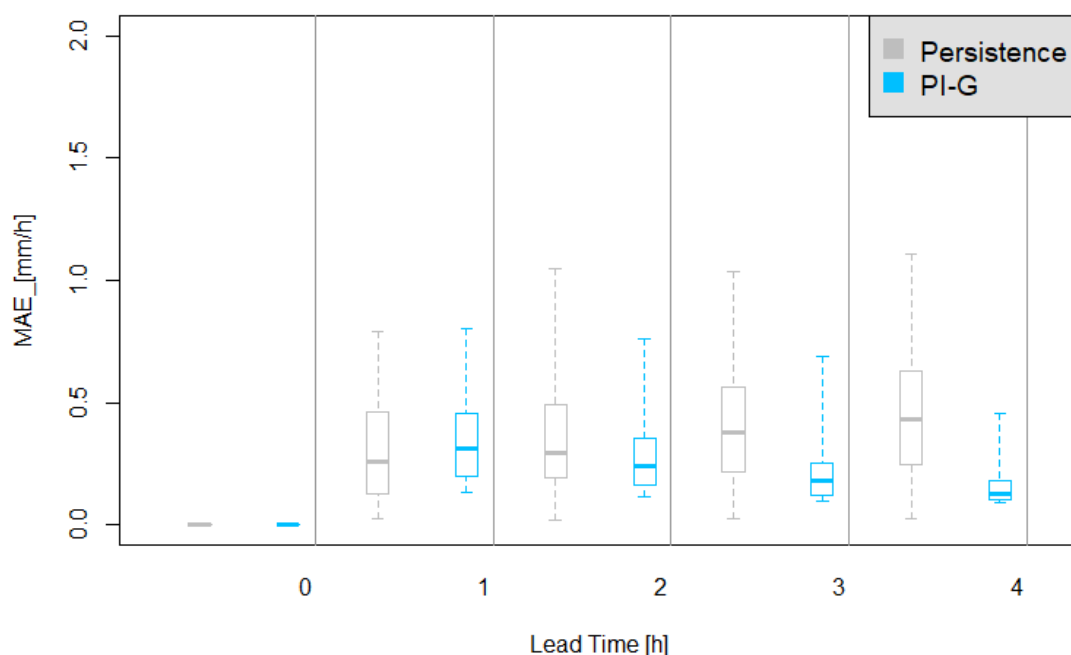


Figura 2. MAE calculado para o método de previsão SAMPO-TBM PI-G (janela deslizando, azul claro) e para a previsão por persistência (cinza) por passo de tempo futuro (1 a 4 horas) e nos 6 eventos de estudo.

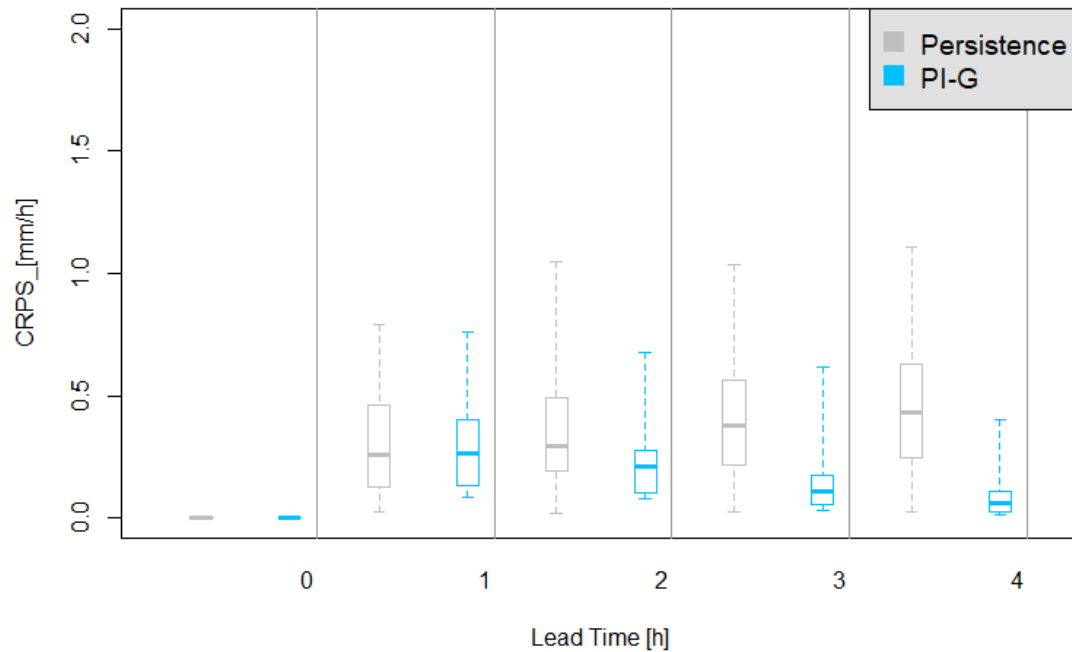


Figura 3. CRPS calculado para o método de previsão SAMPO-TBM PI-G (janela deslizante, azul claro) e para a previsão por persistência (cinza) por passo de tempo futuro (1 a 4 horas) e nos 6 eventos de estudo.

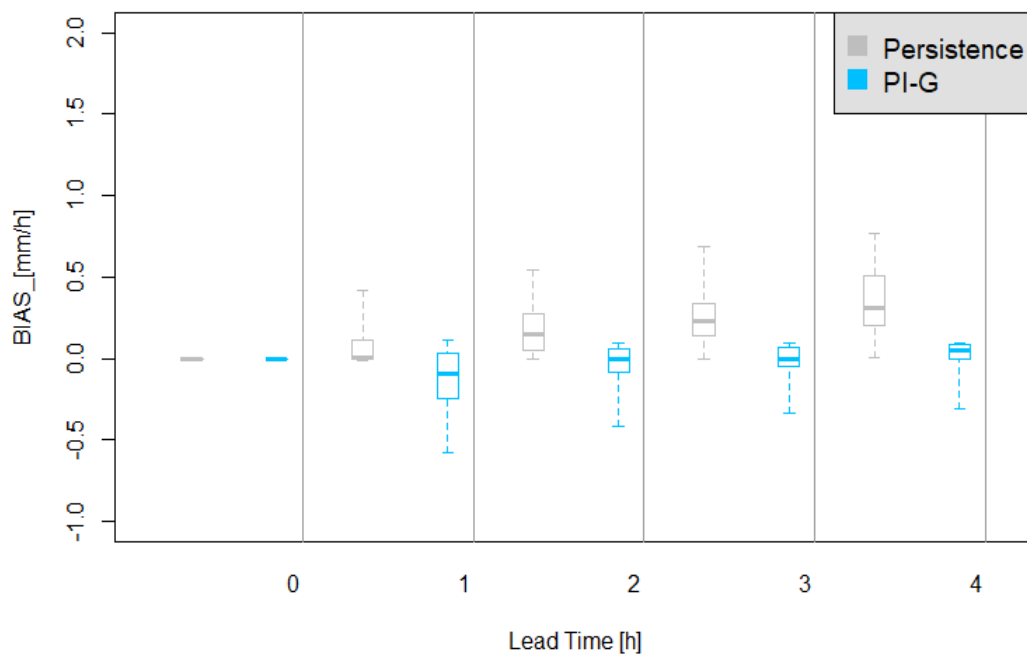


Figura 4. BIAS calculado para o método de previsão SAMPO-TBM PI-G (janela deslizante, azul claro) e para a previsão por persistência (cinza) por passo de tempo futuro (1 a 4 horas) e nos 6 eventos de estudo.

2.1.4. Mapas probabilísticos de limite excedido (*threshold*)

A partir das previsões de *ensemble* geradas pelo SAMPO-TBM é possível gerar mapas probabilísticos de limites excedidos, auxiliando assim, as autoridades, defesa civil, na tomada de decisão. Por exemplo, se uma região possui maior probabilidade de exceder um limiar, esta região é mais propensa em obter danos futuros. Desta forma, estes mapas podem auxiliar as autoridades a decidir qual região eles devem estar mais vigilantes. A Figura 5, abaixo, apresenta um exemplo de mapas probabilísticos. Estas cartas foram criadas a partir das informações de radar e pluviômetros do evento de 03 de Dezembro de 2016.

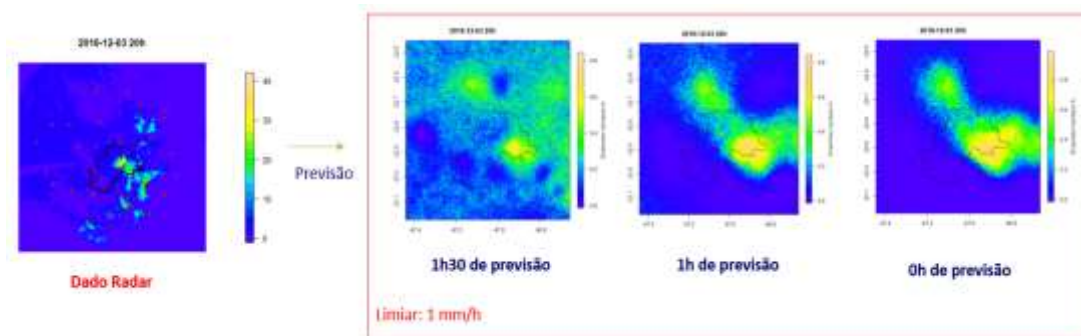


Figura 5. Mapas probabilísticos para previsão do instante do evento 20h do dia 3 de Dezembro de 2016, considerando um limiar de 1 mm/h, e 3 passos de previsão (1h30, 1h e 0h). A escala de cores das previsões representa a porcentagem dos membros do *ensemble* que excederam o limiar.

A partir da Figura 5 pode-se observar que a 1 hora e 30 minutos de previsão, os membros do *ensemble* já haviam detectado o local com maior probabilidade de exceder o limiar. Entretanto neste instante de previsão havia elevada dispersão dos membros do *ensemble*. A dispersão foi diminuindo a medida que se aproximava da hora prevista e o local com maior probabilidade de exceder o limiar foi se confirmando.

2.1.5. Discussão e conclusão dos resultados

Por fim, observamos que, para todos os critérios de avaliação, os métodos reduzem o seu desempenho com o aumento do passo de tempo de previsão (*lead time*). Este é um resultado esperado, principalmente no caso de prever grandes eventos, durante o qual as características da chuva mudam drasticamente ao longo do tempo e, portanto, as informações usadas para gerar as previsões não correspondem mais com as características das precipitações futuras.

Desta forma, os resultados indicam que a abordagem deste estudo é capaz de simular um conjunto de previsões que de modo geral apresentam melhores resultados que um método baseado em persistência. O *ensemble nowcasting of rainfall fields* pode ser usado como entrada para um modelo hidrológico e, em última análise, fornecendo informações

sobre a probabilidade de transbordar limites críticos de inundação. As próximas etapas irão explorar esses desafios.

2.2. Adaptação do modelo hidrológico MGB

Após gerar as previsões de chuva por *ensemble*, o próximo passo deste trabalho é utilizar estas previsões para gerar cenários possíveis de vazão de determinadas bacias hidrográficas. Para isso será utilizado o modelo hidrológico MHD. Este modelo é classificado como de base física, pois, por meio de equações, descreve os principais comportamentos físicos do processo hidrológico de uma bacia hidrográfica. Sua estruturação é derivada do Modelo de Grandes Bacias (MGB) do Instituto de Pesquisas Hidráulicas- IPH (Collischonn, 2001). Este modelo é distribuído (simulações em grade com espaçamento regular), permitindo, assim, que o mesmo seja adaptado para processos de grande escala tanto quanto para microbacias (Siqueira Júnior et al., 2015).

2.2.1. Dados utilizados

Afim de gerar previsões de vazão a partir do modelo MHD. Alguns dados observados são necessários para inicializar o modelo. Os dados utilizados pelo modelo hidrológico MHD são:

- Descritor da rede de drenagem
- Descritor topográfico
- Dados Meteorológicos
- Dados meteorológicos previstos
- Dados de vazões observadas:
- Características de escoamento das bacias
- Características dos solos das bacias
- Características de vegetação
- Mapa de uso e cobertura do solo

Estes dados foram coletados a partir do banco de dados do INMET, da ANA e das informações e contribuições da equipe de hidrologia do Cemaden. Para esta problemática o modelo irá rodar no passo de tempo horário, utilizando dados de pluviômetros para estimar os parâmetros do modelo. Posteriormente os dados de radar serão utilizados para realizar as simulações e serviram de parâmetro para as previsões de vazão geradas a partir das previsões de chuva do SAMPO-TBM.

2.2.2. Mapas gerados

Com o enfoque de gerar a base de dados necessário para se inicializar o modelo MHD, foram gerados os mapas apresentados abaixo. A Figura 6 representa a localização das PCDs (estações telemétricas) utilizadas para coletar as medidas de vazão; e suas respectivas áreas de drenagem. A Figura 7 apresenta a série histórica (6 de agosto de 2015 a 2 de novembro de 2017) das PCDs utilizada para as etapas de calibração e validação do modelo. As Figuras 8, 9 e 10 apresentam mapas com as características de uso e ocupação de solo, vegetação e textura (percentual de argila silt e areia) da região.

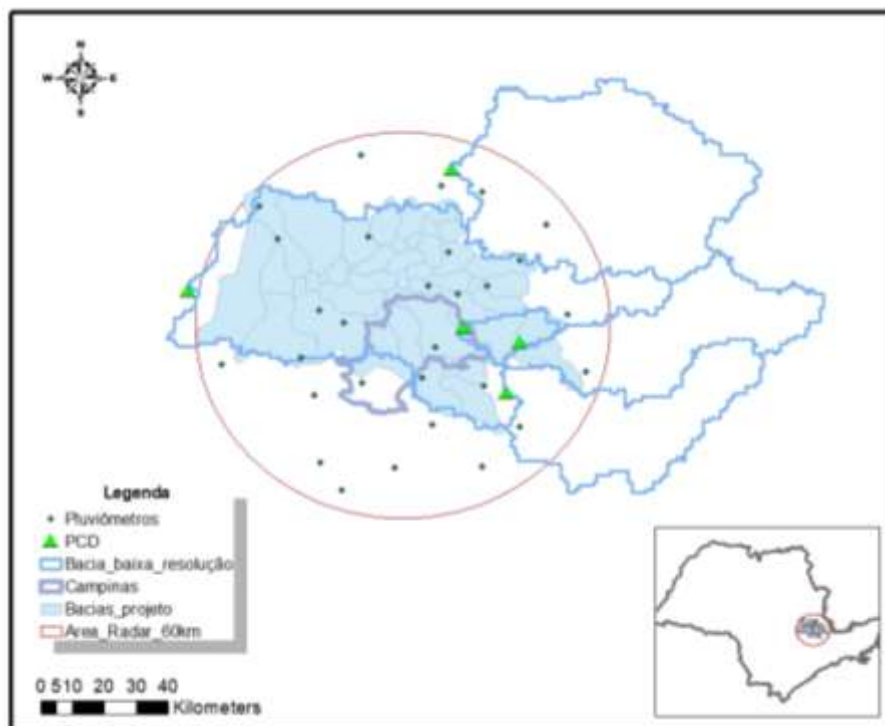


Figura 6. Mapa com a localização das PCDs que serão utilizadas no modelo hidrológico e suas respectivas áreas de drenagem.

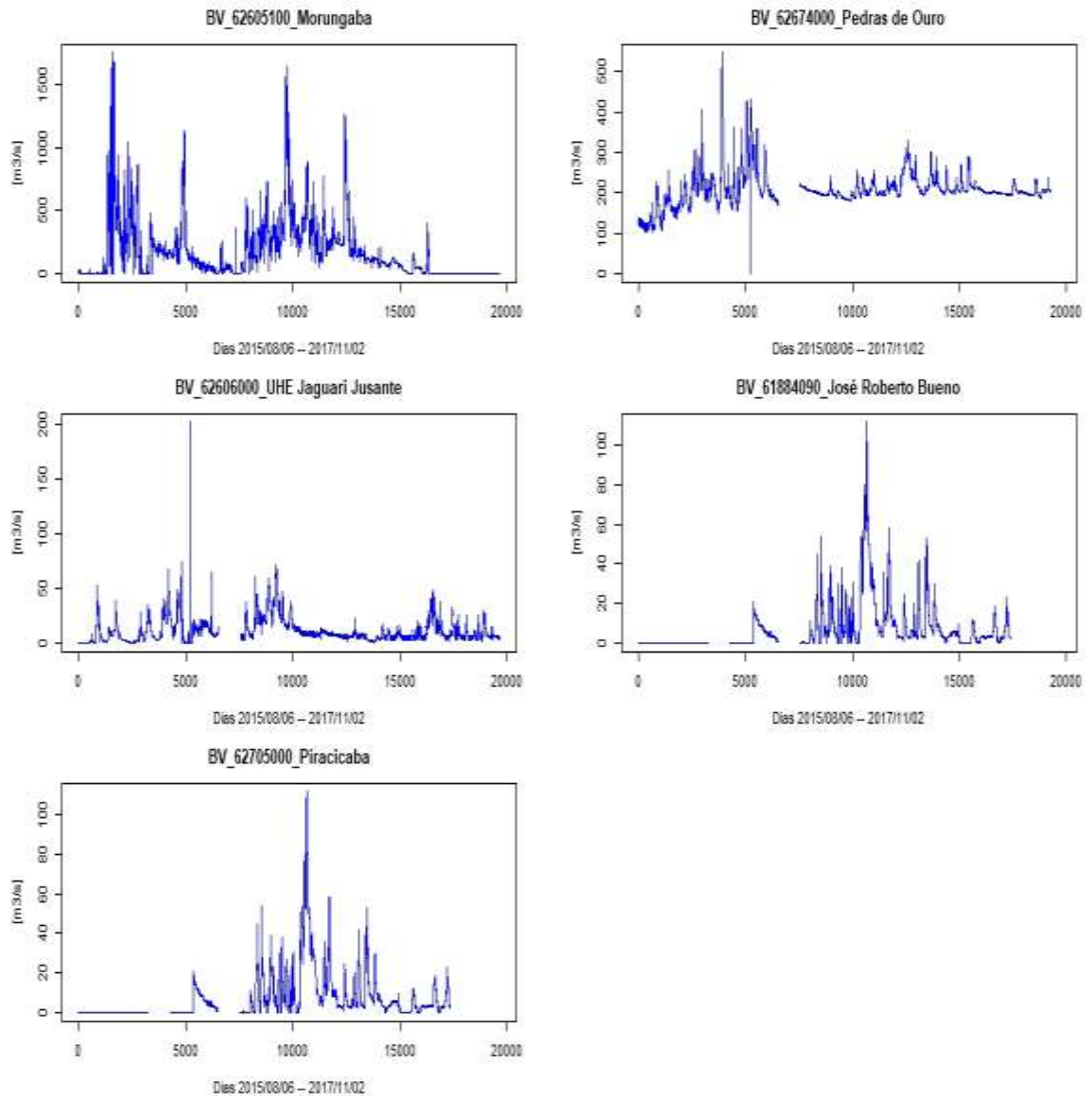


Figura 7. Série histórica das PCDs utilizadas no modelo hidrológico.

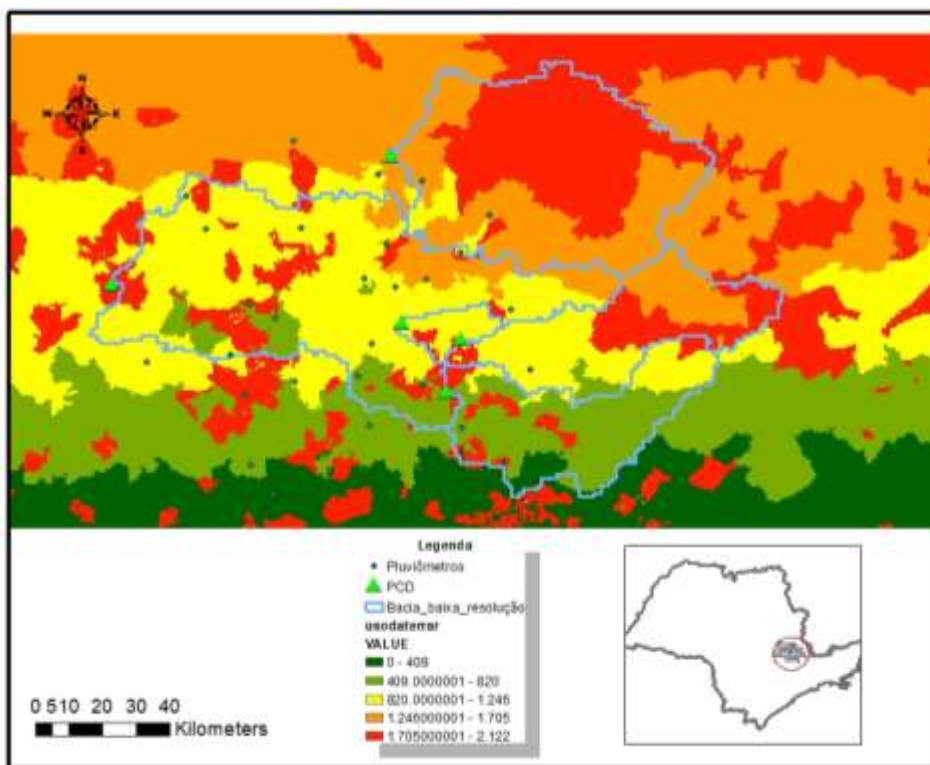


Figura 8. Mapa de uso e ocupação do solo da região.

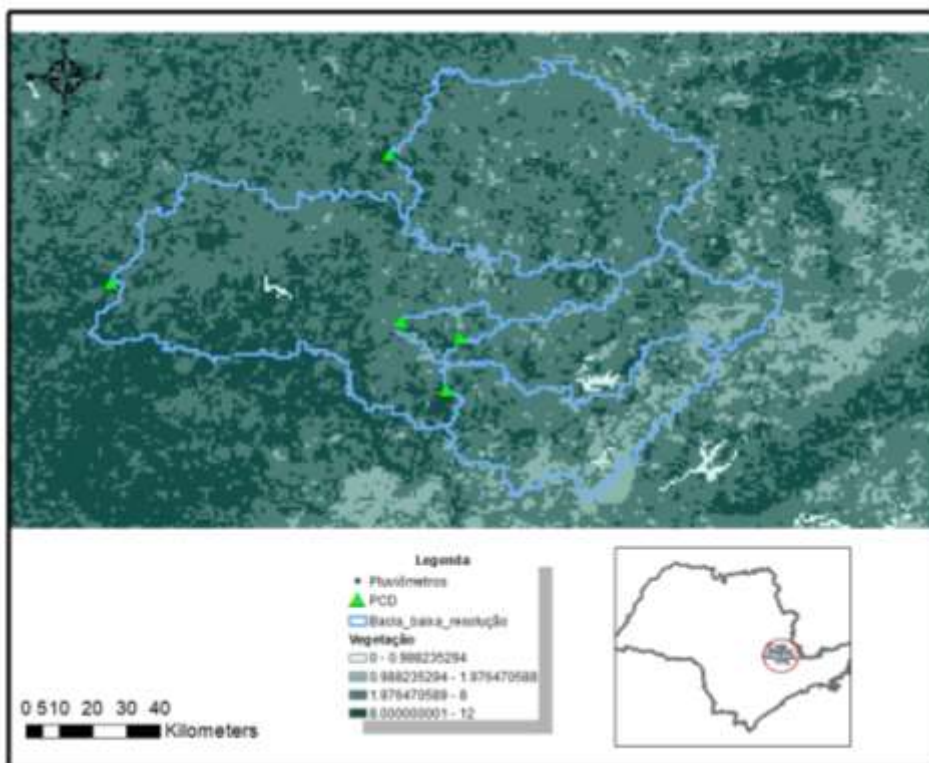


Figura 9. Mapa de vegetação da região.

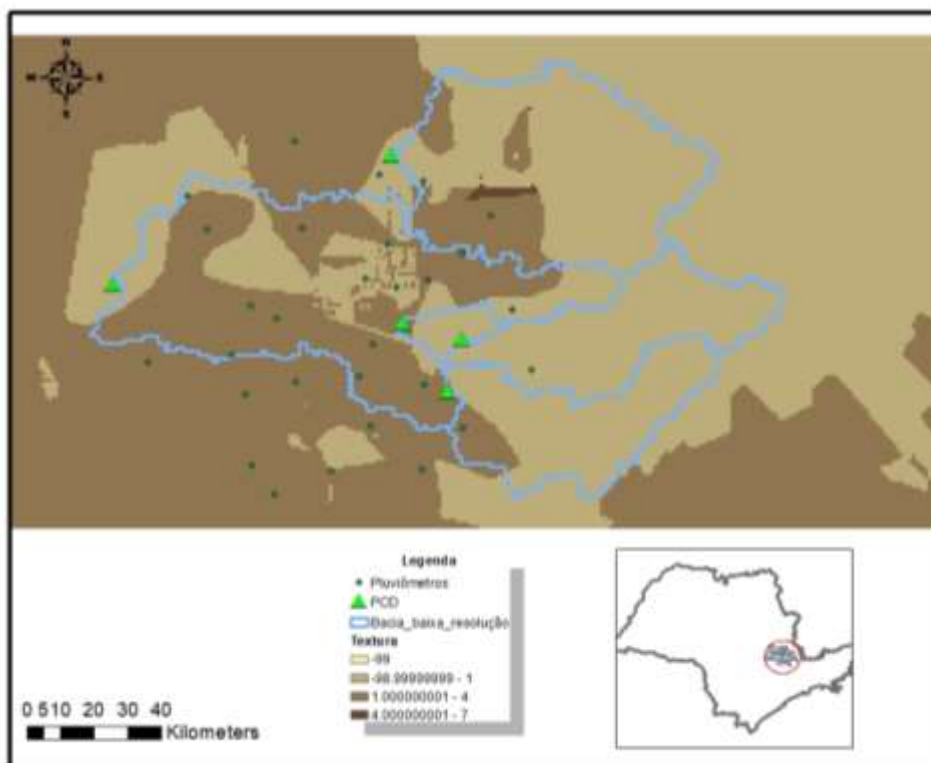


Figura 10. Mapa de textura da região.

3. Próximas etapas

As próximas etapas deste projeto são:

- Finalizar a etapa de calibração do modelo hidrológico MHD;
- Etapa de validação do modelo MHD utilizando as previsões de *ensemble* geradas pelo SAMPO-TBM;
- Avaliar as simulações e previsões geradas pelo modelo MHD;
- Gerar mapas probabilísticos de alerta de inundação.
- Escrever artigo internacional com os resultados de vazão obtidos.
- Escrever relatório Fapesp.

4. Participações em congressos e publicações

Participações

- *Pôster* – 2 Seminário Internacional de Proteção e Defesa Civil, Florianópolis. Simulação de Campos Probabilísticos de Precipitação a Partir de um Método Geoestatístico. 2018.
- *Apresentação oral* – Adaptation Futures, Cape Town. Probabilistic rainfall nowcasting warning system for flash flood risk management. 2018.
- *Apresentação oral* – CNMAC, Campinas. Combinação de informações fornecidas por pluviômetros e radares meteorológicos. 2018.
- *Apresentação oral* – AGU, Washington D. C. How rainfall probabilistic future scenarios can help the management of extreme events? 2018.

Artigos

- *Artigo aceito e publicado:* **CASERL, A.**; ANGELIS, C. F. ; LEBLOIS, E. . SIMULAÇÃO DE CAMPOS PROBABILÍSTICOS DE PRECIPITAÇÃO A PARTIR DE UM MÉTODO GEOESTATÍSTICO. Revista Gestão e Sustentabilidade Ambiental, v. 7, p. 493-507, 2018.
- *Artigo aceito:* **CASERL, A.**; ANGELIS, C. F. COMBINAÇÃO DE INFORMAÇÕES FORNECIDAS POR PLUVIÔMETROS E RADARES METEOROLÓGICOS. Proceeding Series of the Brazilian Society of Computational and Applied Mathematics. 2018.
- *Artigo para revisão:* **CASERL, A.**; ANGELIS, C. F.; LEBLOIS, E..STATISTICAL VARIABILITY OF EXTREME STORM EVENTS IN THE CAMPINAS REGION.

Referências

- Casari, A., Javelle, P., Ramos, M.-H., Leblois, E., 2015. Generating precipitation ensembles for flood alert and risk management. *Journal of Flood Risk Management*, 9 (4): 402-415, doi: 10.1111/jfr3.12203
- Berenguer M, Sempere-Torres D, Pegram GGS. 2011. {SBMcast} – An ensemble nowcasting technique to assess the uncertainty in rainfall forecasts by Lagrangian extrapolation. *Journal of Hydrology* 404 (3–4): 226 – 240 DOI: <http://dx.doi.org/10.1016/j.jhydrol.2011.04.033>
- Casari, A., Ramos, M.-H., Javelle, P., Leblois, E., 2016. A space-time geostatistical approach for ensemble rainfall nowcasting. *Proceed. FLOODrisk 2016 - 3rd European Conference on Flood Risk Management, E3S Web of Conferences*, 7 18001 (2016), 5p. DOI: 10.1051/e3sconf/20160718001
- Coccia G, Todini E. 2011. Recent developments in predictive uncertainty assessment based on the model conditional processor approach. *Hydrology and Earth System Sciences* 15 (10): 3253–3274 DOI: 10.5194/hess-15-3253-2011
- Collier CG. 2007. Flash flood forecasting: What are the limits of predictability? *Quarterly Journal of the Royal Meteorological Society* 133 (622): 3–23 DOI: 10.1002/qj.29
- Collischonn, W. Simulação Hidrológica de Grandes Bacias. 2001. 270f. Tese (Doutorado em Engenharia) - Instituto de Pesquisas Hidráulicas, Universidade Federal do Rio Grande do Sul, Rio Grande do Sul.
- Siqueira junior, J.L.S., Tomasella, J., Rodriguez, D.A. Impacts of future climatic and land cover changes on the hydrological regime of the Madeira River basin. *Climatic Change*, v. 129, n. 1, p. 117–129, 2015.
- Hapuarachchi HAP, Wang QJ, Pagano TC. 2011. A review of advances in flash flood forecasting. *Hydrological Processes* 25 (18): 2771–2784 DOI: 10.1002/hyp.8040
- Leblois E, Creutin J-D. 2013. Space-time simulation of intermittent rainfall with prescribed advection field: Adaptation of the turning band method. *Water Resources Research* 49 (6): 3375–3387 DOI: 10.1002/wrcr.20190.
- Liechti K, Zappa M, Fundel F, Germann U. 2013. Probabilistic evaluation of ensemble discharge nowcasts in two nested Alpine basins prone to flash floods. *Hydrological Processes* 27 (1): 5–17 DOI: 10.1002/hyp.9458.
- Matheron G. 1973. The Intrinsic Random Functions and Their Applications. *Advances in Applied Probability* 5 (3): 439–468.
- Pegram GGS, Clothier AN. 2001. Downscaling rainfields in space and time, using the String of Beads model in time series mode. *Hydrology and Earth System Sciences* 5 (2): 175–186 DOI: 10.5194/hess-5-175-2001.
- Ramos M-H, Mathevet T, Thielen J, Pappenberger F. 2010. Communicating uncertainty in hydro-meteorological forecasts: mission impossible? *Meteorological Applications* 17 (2): 223–235 DOI: 10.1002/met.202.
- Sene KJ. 2010. *Hydrometeorology: Forecasting and Applications*. Springer, 355 pp: Dordrecht.

- Vincendon B, Ducrocq V, Nuissier O, Vié B. 2011. Perturbation of convection-permitting NWP forecasts for flash-flood ensemble forecasting. *Natural Hazards and Earth System Science* 11 (5): 1529–1544 DOI: 10.5194/nhess-11-1529-2011.
- Zappa M, Jaun S, Germann U, Walser A, Fundel F. 2011. Superposition of three sources of uncertainties in operational flood forecasting chains. *Atmospheric Research* 100 (2–3): 246 – 262 DOI: <http://dx.doi.org/10.1016/j.atmosres.2010.12.005>.