

ANÁLISE DA MACRODRENAGEM DE AEROPORTOS: ESTUDO DE CASO DO CAMPO DOS AFONSOS – RJ

Bruno Ferreira do Nascimento (ITA) brunoferreira01@gmail.com
Nadiane Smaha Kruk (ITA) nadiane@ita.br

Resumo: Alguns aeródromos do país sofrem com problema de macrodrenagem, causados por diversos fatores, tais como: crescimento da urbanização; falta de capacidade ou de manutenção do sistema de macrodrenagem e até mesmo a intensificação dos regimes de chuvas decorrentes das mudanças climáticas. O Museu Aeroespacial (MUSAL), localizado na área do Campo dos Afonsos, apresenta um histórico de enchentes com conseqüente prejuízo ao patrimônio da União. A Diretoria de Engenharia da Aeronáutica (DIRENG) realizou uma análise preliminar do problema, ficando identificada a necessidade de estudos mais aprofundados sobre o tema. O presente trabalho identificou e quantificou os fatores geradores das enchentes, por meio: de visitas a campo; de análises, utilizando uma ferramenta de Sistema de Informações Geográficas (SIG), das bacias de contribuições para o ponto em estudo; do levantamento das variáveis físicas da área de contribuição, tais como, regime de chuvas, tipo de solo, tipo de ocupação do solo e topografia precisa das regiões mais relevantes. Para as análises de precipitações, adotou-se como caso a ser simulado a chuva do dia 31/01/2006, para validar a modelagem implementada, e estabeleceu-se a equação IDF e a chuva de projeto, para os redimensionamentos necessários. A partir das informações geradas no modelo precipitação-vazão (IPHS1), observou-se que os cursos d'água não comportam a vazão de projeto, preconizada para um período de retorno 25 anos. Foi dada uma proposta de solução para o problema das enchentes nos hangares do MUSAL, que deve ser idealmente integrada à bacia como um todo.

Palavras-chave: Macrodrenagem urbana, Sistema de Informações Geográficas (SIG), Modelagem precipitação-vazão

ANALYSIS OF AIRPORT MACRODRAINAGE: CAMPOS DOS AFONSOS - RJ CASE STUDY

Abstract: Some Brazilian airfields suffer with macrodrainage problems caused by several factors, such as urbanization growing, lack of capacity or maintenance of the macrodrainage system and even the increasing of rainfall intensities due to climate change. The Museu Aeroespacial (MUSAL), located at Campo dos Afonsos, presents a history of flooding and consequent damage to the country patrimony. The Diretoria de Engenharia da Aeronáutica (DIRENG) has conducted a preliminary analysis of the problem, being identified the necessity for detailed studies about the subject. This work identified and quantified the factors causing the flooding through: field visits, analysis of watershed contributions to the point under consideration, using a Geographic Information System (GIS); investigation of the physical variables of contribution area such as rainfall, soil type, land use and precise topography of the most important regions. For the rainfall analysis, the 01/31/2006 rainfall episode was used to validate the model implemented. It was established the IDF equation and the design rainfall required for the resizing the macrodrainage system. From the information generated by the rainfall-runoff model (IPHS1), it was observed that the watercourses do not support the 25-return period designed flow. A proposed solution was given to the flooding problem in the MUSAL hangars, which should ideally be integrated into the basin as a whole.

Keywords: Urban macrodrainage, Geographic Information System (GIS), rainfall-runoff modeling

1. INTRODUÇÃO

O aumento na ocorrência de eventos extremos que vem acometendo diversas cidades do Brasil e do mundo tem colocado ainda mais em evidência a importância da drenagem urbana. Sistemas de drenagem bem dimensionados e com a devida manutenção podem minimizar os danos causados às populações das cidades atingidas.

Pelo fato dos sítios aeroportuários estarem em áreas urbanas, o planejamento e dimensionamento dos sistemas de drenagem ali existentes devem estar integrados ao seu entorno.

Mesmo quando o aeroporto está fora do perímetro urbano, ele proporciona um vetor de crescimento da cidade na sua direção, devido às benfeitorias de infraestrutura geradas, estabelecendo em um futuro não distante, a integração com a mancha urbana. Nesses casos, o sistema de drenagem deve ser planejado no sentido de prever esse cenário de integração urbana.

Como exemplo da preocupação com a integração do aeroporto ao seu entorno, podemos citar o trabalho de Lopes *et al.* (2011) que procuraram entender como o aeroporto Santos Dumont está inserido na cidade do Rio de Janeiro e suas interferências no uso e ocupação do solo da sua vizinhança.

No Centro de Lançamento de Alcântara um bueiro executado em aço galvanizado corrugado, que cruzava a pista de pousos e decolagens, cedeu provocando um rebaixamento da pista e interdição parcial da mesma em 2010, limitando o porte de aeronaves atendidas. A causa desse problema foi um processo de subsidência provocado pela grande vazão afluyente, com elevado grau de energia, associada ao tipo de solo da região, bastante arenoso. A bacia de contribuição do bueiro contempla uma área externa ao patrimônio do Comando da Aeronáutica evidenciando mais uma vez a relevância de um estudo amplo e integrado. Esse caso ressalta também a importância que deve ter a rede de drenagem no planejamento do posicionamento das pistas, que geralmente contempla a topografia, direção predominante dos ventos, entre outros fatores.

Um estudo detalhado sobre a interferência do Aeroporto Internacional de Guarulhos na bacia do Rio Baquirivu Guaçu está apresentado no Plano Diretor de Drenagem da cidade de Guarulhos (Guarulhos, 2008). Este estudo cita que a retificação e canalização do curso inferior do Rio Baquirivu Guaçu e as obras de aterramento de suas planícies de inundação, para a implantação do Aeroporto Internacional de Guarulhos, produziram significativos impactos no sistema natural de drenagem, transferindo as cheias naturais para o seu entorno. Cita ainda que o mesmo rio, no trecho próximo ao aeroporto até a divisa com Arujá e, mais recentemente, em um segmento localizado no próprio município vizinho, numa extensão de 4.700 m, foi submetido à canalização, transferindo vazões significativas. Essas vazões produziram impacto no Município de Guarulhos, gerando enchentes periódicas na região do Aracília, com efeitos em seu afluyente, córrego Taboão (margem esquerda). Este e o Rio Ana Mendes passam sob a rodovia Presidente Dutra e, em períodos de chuvas intensas paralisam esta rodovia.

Assim como o aeroporto de Guarulhos teve influência na bacia na qual está inserido, a alteração no balanço hídrico poderá ser sentida também pelo aeroporto, tanto pela possibilidade das inundações atingirem parte de suas instalações ou pistas, quanto podendo comprometer o seu abastecimento, pois em 2008, esse aeroporto era inteiramente abastecido por poços tubulares profundos, que forneciam mais de 5.000 m³/dia de água (Guarulhos, 2008).

Isso mostra que é impossível analisar o projeto de um aeroporto sem analisar o seu entorno, cidade e/ou bacia hidrográfica, e vice-versa. Ferreira (2011) fez um estudo da cidade de Guarulhos, buscando-se uma ferramenta de apoio à decisão no que tange a gestão de águas urbanas, e teve o aeroporto de Guarulhos evidenciado em vários aspectos.

Dentro desse contexto de planejamento multidisciplinar, Souza *et al.* (2012) apresentam uma abordagem de desenvolvimento urbano de baixo impacto, para o manejo de águas pluviais de uma forma mais sustentável.

O presente trabalho apresenta o problema de inundações do aeródromo Campos dos Afonsos, localizado na cidade do Rio de Janeiro, a análise do seu entorno, bem como a modelagem da bacia de contribuição para quantificação das vazões e proposição de soluções.

2. MATERIAL E MÉTODOS

Nessa seção será apresentado um breve histórico das enchentes que acometem o MUSAL e uma descrição da área de estudo. Serão apresentadas também as hipóteses empregadas na determinação da equação de intensidade-duração-frequência das precipitações locais e na modelagem hidrológica da bacia de contribuição. Por fim será apresentada a metodologia empregada no estudo.

2.1 Enchentes no museu aeroespacial (MUSAL) do Campo dos Afonsos - RJ

Em 1971, com a transferência da Escola de Aeronáutica da região do Campo dos Afonsos, cidade do Rio de Janeiro, para Pirassununga, no Estado de São Paulo, surgiu espaço para a instalação de um museu, que ganhou o nome de Museu Aeroespacial (MUSAL) e foi inaugurado em 18 de outubro de 1976, após reforma do hangar da antiga Divisão de Instrução de Vôo da Escola de Aeronáutica.

Atualmente, o museu possui um valioso acervo tecnológico e de aeronaves. Esse acervo se encontra em constante crescimento, uma parte desse crescimento é devido a peças que são confiadas ao museu por meio de doações.

As instalações estão compreendidas em uma área de 15.195 m², sendo composta de um prédio de dois andares e cinco hangares interligados, lado a lado, com o prédio principal. Toda essa experiência histórica e cultural da memória da aeronáutica brasileira possui entrada gratuita.

Fica a cargo do Comando da Aeronáutica a administração e a manutenção das condições de excelência em padrões internacionais em que se encontra o museu.

A região do Campo dos Afonsos é situada na Zona Oeste da cidade do Rio de Janeiro. O local, quando da escolha para construção de um aeródromo, era uma região pouco urbanizada. O crescimento urbano dessa região da cidade contribuiu para diminuir a capacidade de infiltração das águas pluviais, provocando um aumento do escoamento superficial e a redução do tempo desse escoamento em ocorrências chuvosas. Atualmente, a região está recebendo mais investimentos em infraestrutura, para dar suporte às Olimpíadas de 2016, o que poderá aumentar ainda mais o grau de urbanização da área circunvizinha.

Segundo Simões & Yamamoto (2006), em um relatório técnico gerado após a enchente do dia 31 de janeiro de 2006, é frequente a ocorrência de enchentes nos hangares do MUSAL, causando prejuízos e danos ao acervo do museu e ao patrimônio da União. Esse documento bosqueja baseado em estudo preliminar e superficial, que seja formada uma comissão de estudos para diagnosticar e levantar o sistema de drenagem existente na região e bairros vizinhos, a fim de definir as ações e obras necessárias para cada órgão competente envolvido.

Em outubro de 2010 a Subsecretaria de Gestão das Bacias Hidrográficas da Prefeitura do Rio de Janeiro (Rio-Águas) identificou a região em estudo como um dos pontos críticos de enchentes da cidade do Rio de Janeiro (Rio de Janeiro, 2010).

Relatos do comandante, do engenheiro e dos funcionários do MUSAL, entrevistados em 2011 - ano de realização da análise-, apontam que o problema persistia até aquele momento, acontecendo com frequência de duas ou três vezes ao ano.

O cenário futuro de mudanças climáticas e aquecimento global podem tornar mais críticos, os máximos anuais e os regimes de chuvas e, conseqüentemente, agravar ainda mais o problema de enchentes no local.

Portanto, é de total relevância compreender os fatores geradores do problema e sugerir formas de extinguir ou mitigar os danos causados por chuvas intensas.

Oteve-se uma filmagem da enchente do dia 31 de janeiro de 2006, além de fotos que mostram as dimensões que as enchentes atingem e alguns danos provocados. A Figura 1 mostra o nível que a água atingiu nessa data.



Figura 1. Enchente do dia 31 de janeiro de 2006 no pátio do MUSAL

O fluxo de água na parte da frente do hangar é tamanho que tem energia para arrastar aeronaves estacionadas no pátio externo, sendo jogadas ao encontro das paredes do hangar.

Na parte traseira do hangar, está localizada uma casa de força com transformadores de alta tensão a poucos centímetros do nível do terreno, que em ocasião de inundação fica parcialmente submersa, causando risco de curto circuito e falta de energia.

Dentro dos limites do Campo, a responsabilidade pela operação e conservação da área e do patrimônio nele existente é do Comando da Aeronáutica. Na bacia hidrográfica em estudo, existem áreas de responsabilidade de outros órgãos, tais como: áreas urbanas, que possuem sistema de drenagem operado pela Prefeitura do Rio de Janeiro, área da Polícia Militar do Rio de Janeiro (PMRJ), que é de responsabilidade do Governo do Estado do Rio de Janeiro, além da área do Exército Brasileiro.

O fato de a região ser administrada por diferentes entidades dificulta a solução definitiva para o problema. Por isso, na medida do possível serão propostas alternativas de soluções dentro dos limites territoriais, das informações disponíveis e de orçamento do Comando da Aeronáutica.

2.2 Descrição da área de estudo

A área em estudo está contida na macrobacia da Baía de Guanabara do Rio de Janeiro, na sub-bacia dos rios Acari (Marangá) / Pavuna / Meriti. Essa sub-bacia tem o Arroio dos Afonsos como um dos cursos d'água. Esse arroio é canalizado, por uma seção construída em concreto, no trecho urbano a montante do aeródromo e volta a ser de seção natural perto do início do Campo dos Afonsos.

A Figura 2 mostra a região em análise com indicações do hangar do MUSAL e de uma tubulação subterrânea que atravessa a pista e é responsável pela drenagem de esgoto e águas pluviais captadas pelo sistema urbano unitário, que contempla a rede de esgoto juntamente com as águas pluviais.



Figura 2. Área de estudo com indicação do Hangar do MUSAL, do Arroio dos Afonsos e da tubulação subterrânea de drenagem que atravessa a pista do aeródromo. Fonte: GoogleEarth adaptado.

O hangar em estudo está compreendido entre as coordenadas geográficas, com relação ao Datum WGS-84,

43°23'29" O, 22°53'01" S e 43°23'15" O e 22°52'52" S.

A extensão do Arroio é de 7,8 km e possui o Morro Barata como vertente e o Rio Sapopemba como Foz.

O Arroio dos Afonsos limita a área patrimonial do Comando da Aeronáutica em um dos seus lados e corre paralelo à pista de pousos e decolagens. A área em estudo está situada à direita do arroio e é delimitada também pela Avenida Marechal Fontinelli e pelas áreas onde funciona a Academia de Polícia Militar D. João VI.

A região em estudo é bastante acidentada, imprimindo ao escoamento superficial altas velocidades de escoamento, e a área de contribuição transcende os limites territoriais do Comando da Aeronáutica.

Na ocasião da enchente mais severa que se tem registro, no dia 31 de janeiro de 2006, a área alagada da parte de trás do hangar atingiu a cota máxima de 1,5 m. Na parte da frente do hangar, filmagens mostram que um verdadeiro rio passa no pátio externo.

2.3 Hipóteses Formuladas

Como a região em estudo é cercada por uma cadeia montanhosa, não é esperado que seja recebido pela bacia de contribuição grande fluxo de água proveniente de outras bacias. Isso geraria uma dificuldade construtiva que é maciçamente evitada em projetos de drenagem.

Devido a dificuldades de obtenção do cadastro da rede de drenagem existente, somado às características mencionadas acima, assumiu-se como hipótese a não existência de despejo de efluente proveniente de outras bacias para a bacia em estudo.

A evaporação e evapotranspiração da área de contribuição foram consideradas, de forma indireta, com a aplicação do método Soil Conservation Service (SCS), para separação do escoamento superficial. Esse método calcula e utiliza a precipitação efetiva, que retira, indiretamente, a parcela responsável pela evaporação, infiltração e pela retenção nas depressões do terreno (Tucci, 2009).

Segundo relatos dos funcionários do local, obtidos por meio de entrevistas durante visitas técnicas, a enchente do dia 31 de janeiro de 2006 foi uma das maiores já ocorridas, logo adotou-se essa ocorrência, que é a mais rica de informações com fotos e filmagem, como o caso a ser analisado e simulado, a fim de, testar e validar os modelos utilizados nesse trabalho.

O tipo de solo da região é uma das variáveis de entrada do modelo de precipitação-vazão utilizado. Como se tornou inviável o levantamento preciso dessa variável, utilizou-se informações disponibilizadas pela Prefeitura da Cidade do Rio de Janeiro, que classifica o solo da região com do Grupo B até a cota de 75 metros e do Grupo C nas áreas acima desse valor. Levantamentos obtidos na região do aeródromo (planície, cota abaixo de 70 metros) comprovaram que o solo da região é arenoso e classificado como do Grupo B. Fora da área patrimonial da aeronáutica, não foram obtidos levantamentos para validação das informações utilizadas.

A representação de rios dentro do modelo de precipitação-vazão a ser utilizado não considera as curvas dos rios, pois a análise realizada é bidimensional. Para levar em consideração as curvaturas dos cursos d'água faz-se necessária uma modelagem hidrodinâmica com três dimensões (3D), o que seria mais complexo e exigiria uma série de dados, condições iniciais e de contorno.

2.4. Metodologia

Na fase de identificação dos fatores causadores do problema foram realizadas visitas a campo para verificar a existência e conformidade do sistema de drenagem do local com as plantas e planos diretores obtidos. Dessa forma, foi possível balizar as hipóteses geradas para algumas áreas sem informações ou com informações conflitantes a respeito do sistema de drenagem da região.

As visitas foram realizadas em toda a área de contribuição, percorrendo e efetuando medições em áreas urbanas, áreas da PMRJ dentro da Academia de Polícia Militar D. João VI, áreas do Exército Brasileiro (EB) e dentro do Campo dos Afonsos, onde se localiza o MUSAL.

Os locais de mata fechada e de difícil acesso, que possuíam cursos d'água, também foram visitados, sendo verificadas as condições da passagem do fluxo de água por esses caminhos de drenagem.

Nessas visitas foram ainda identificadas as condições de conservação e funcionamento de cada trecho da rede de drenagem existente, bem como foram definidas as malhas e efetuados os levantamentos topográficos mais precisos necessários. Portanto, as visitas foram importantes para a fase de identificação dos fatores geradores das enchentes, e também para levantar dados que foram utilizados na modelagem computacional do problema.

2.5. Modelagem hidrológica

As previsões das vazões foram realizadas utilizando métodos indiretos de determinação de vazões por meio do programa IPHS1, que é um modelo estabelecido pelo Instituto de Pesquisas Hidráulicas (IPH) da Universidade Federal do Rio Grande do Sul (UFRGS). Para alimentar esse método foi identificado o tipo e a ocupação do solo além de estabelecida a chuva de projeto para a região.

A delimitação da bacia de contribuição bem como os caminhos naturais de drenagem foram gerados em um Sistema de Informação Geográfica (SIG), a partir dos dados do SRTM (Shuttle Radar Topography Mission).

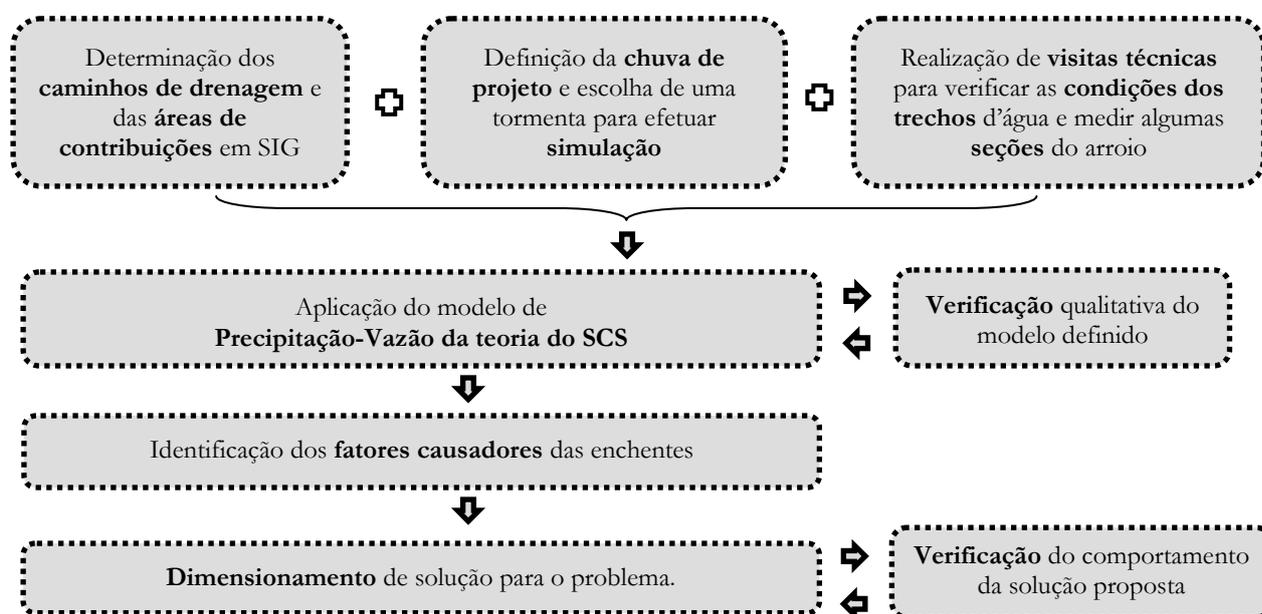


Figura 3. Diagrama da metodologia empregada.

O caminho natural de drenagem obtido pela análise em SIG foi comprovado pelo levantamento topográfico realizado durante as visitas a campo. A Figura 3 apresenta a sequência de tarefas realizadas, a fim de atingir os objetivos desse trabalho.

3. RESULTADOS E DISCUSSÃO

Nessa seção serão apresentados os resultados da equação de intensidade-duração-frequência de precipitações determinada para a região de estudo, bem como a chuva de projeto obtida a partir dessa equação. Serão apresentadas também as vazões obtidas com as simulações hidrológicas e as propostas de solução para o problema proposto.

3.1 Equação de intensidade-duração-frequência (idf)

As séries históricas de precipitação utilizadas foram disponibilizadas pela Prefeitura da Cidade do Rio de Janeiro (Rio de Janeiro, 2011). Esse banco de dados consiste em registros com intervalos de 15 em 15 minutos do período entre 1997 até 2010, fornecendo um total de 14 anos completos de observações.

De acordo com a metodologia de Thiessen, observou-se que a bacia de contribuição da área de estudo encontra-se sob influência da estação de Jacarepaguá/ Tanque.

A estação de Jacarepaguá/ Tanque fica a 3,9 km do hangar. Entre os dois pontos existe o Morro do Catonho, com cota de topo de aproximadamente 300 m em relação ao nível do mar. Como a estação possui cota de 73 m em relação ao nível do mar, existe um desnível de 227 m entre a estação e o topo do morro.

Assumiu-se que essa barreira física não provocará mudanças significativas, nas distribuições de chuvas entre os dois pontos considerados.

Para estabelecer a duração das precipitações adotou-se o Princípio das Durações Prolongadas, o qual estabelece que se um evento de uma duração qualquer for intenso o suficiente, para também resultar em uma intensidade média relevante para uma duração superior, então essa ocorrência deve ser considerada para ambas as durações. No entanto, deve-se atentar para manter a independência dos eventos, logo não se deve considerar mais de um evento de mesma duração em uma mesma chuva, separando-se apenas o mais intenso deles.

Através da análise por séries anuais, as intensidades de referência para cada duração foram calculadas considerando as variações estatísticas definidas por Ven Te Chow e a distribuição de Gumbel.

Com esses dados, estabeleceu-se a Equação 1 para a equação de chuva IDF utilizada no presente estudo. Os valores de R^2 ficaram bem próximos da unidade, $R^2 = 0,987$, mostrando que a equação apresenta um bom ajuste.

$$i = \frac{39,08Tr^{0,191}}{(t+23,34)^{0,87}} \quad (1)$$

onde Tr é o período de retorno esperado em anos e i a intensidade média em mm/min da chuva de duração t em min.

3.2 Chuva de Projeto

A utilização da chuva de projeto no modelo precipitação-vazão servirá como base para o redimensionamento dos canais, caso verifique-se que suas capacidades de transporte não sejam suficientes para atender às vazões modeladas.

Utilizou-se o método dos Blocos Alternados para definir o hietograma de projeto, assumindo-se uma discretização temporal de 15 min, pois os registros de precipitações trabalhados são de intervalos de 15 minutos, não possuindo precisão maior que esse valor.

A equação de chuvas, Equação 1, estabelecida nesse estudo, foi utilizada para a determinação das intensidades para cada duração considerada no método dos blocos alternados.

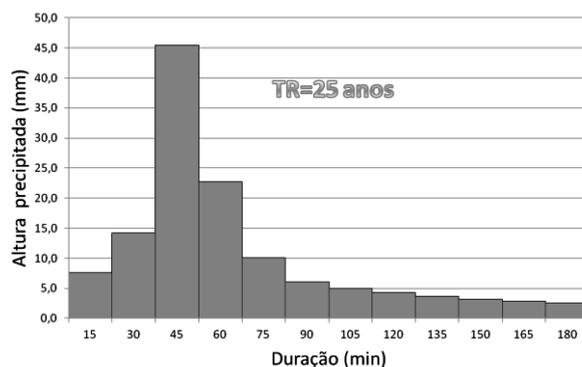


Figura 4. Chuva de projeto estabelecida para o tempo de retorno (TR) de 25 anos.

O período de retorno utilizado foi de 25 anos e a duração da chuva de projeto foi definida em 3 horas, observando-se em alguns dos muitos eventos dessa duração, que o pico de precipitação acontecia no primeiro quarto da duração. Portanto, o pico da chuva de projeto também será estabelecido nessa posição. A Figura 4 apresenta a chuva de projeto estabelecida.

3.3 Simulação da enchente de 31/01/2006

A fim de validar a modelagem aplicada nesse estudo e analisar a sensibilidade dos resultados com relação à variação do CN (curva-número do método SCS), foi simulada a enchente do dia 31/01/2006. A Figura 5 mostra as observações de precipitações no dia simulado.

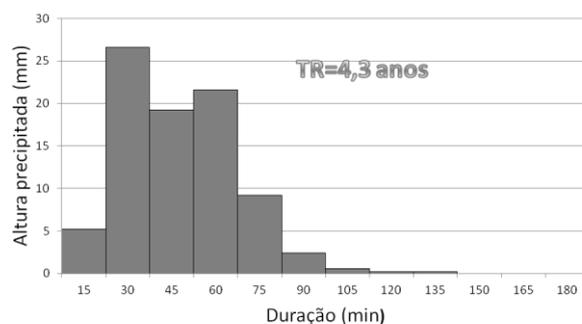


Figura 5. Hietograma da chuva simulada do dia 31/01/2006.

Nos dias que antecederam o evento simulado, chovera bastante na região, sendo observado na última semana de janeiro, que a região sudeste estava sob influência de uma ZCAS (Zona de Convergência do Atlântico Sul).

Nessas ocasiões a região é atingida por fortes chuvas durante um período prolongado de tempo. Essas condições podem durar dias ou até semanas.

Nesse caso, deve-se considerar a condição de umidade inicial do solo, como um dos fatores mais importantes para os resultados. Os coeficientes CN adotados nessa simulação foram obtidos considerando a condição III de umidade, ou seja, solo saturado.

O período de retorno da chuva simulada é de 4,3 anos, com base nas análises em séries anuais, bem menor que o de projeto de 25 anos, mas as mudanças nos CN, compensam, em alguns casos, essa diferença.

3.4 Vazão de projeto

As vazões de projeto foram determinadas aplicando a modelagem Precipitação-Vazão implementada no programa IPHS1. Esse programa fornece liberdade na escolha de diferentes teorias, para cada passo da modelagem desejada.

A Figura 6 apresenta a modelagem realizada no programa IPHS1, onde os quadrados pretos representam pontos de controle de vazão, as retas entre eles representam os trechos d'água, com indicação de sentido dada pelas setas nesses elementos, e os quadrados conectados em trechos d'água ou em pontos de controle, representam a modelagem das áreas de contribuição.

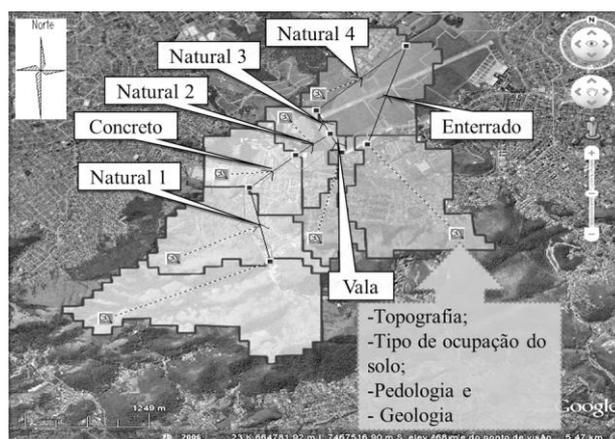


Figura 6. Representação da modelagem no IPHS1 com as bacias de contribuição e os trechos dos cursos d'água.

3.5 Vazões resultantes

Para a chuva simulada, foi adotada a Condição III de umidade do método SCS, pois se observaram precipitações com alturas somadas de 125,6 mm nos cinco dias anteriores, logo se considerando solo saturado.

No caso da chuva de projeto, com período de retorno de 25 anos, foi assumida a Condição II de umidade, em que o solo se encontra em situação normal de umidade. A aplicação do modelo resulta nos hidrogramas para cada trecho e bacia modelada.

O valor máximo da vazão, para cada trecho, pode ocorrer no hidrograma de entrada ou de saída do mesmo, logo se assumiu o maior valor entre os picos de entrada e saída como a vazão a ser comparada com a capacidade de transporte da seção. Esse valor também foi utilizado nas eventuais sugestões de redimensionamento.

Para o caso da chuva de projeto, a modelagem ocorre de forma iterativa, ou seja, inicialmente o sistema atual de drenagem fornece dados de entrada para a modelagem e obtêm-se a vazão máxima para cada trecho, posteriormente, dimensiona-se o novo sistema de drenagem para os máximos obtidos. Essas alterações nas dimensões geram necessidade de atualização nos dados de entrada do modelo e, conseqüentemente, modificações nos picos de vazões anteriormente obtidos, sendo necessário, eventualmente, novo redimensionamento.

Esse processo se repete, indefinidamente, até que a capacidade de transporte da seção seja suficiente para transportar o pico de vazão do trecho, na situação que os parâmetros de entrada são a própria seção redimensionada.

A Tabela 1 apresenta os máximos de vazões para a chuva de projeto e para a chuva simulada de 31/01/2006, tendo como dados de entrada o sistema de drenagem existente. Essa tabela apresenta ainda a capacidade de transporte de cada trecho existente, considerando-se seção plena.

Tabela 1. Capacidade de transporte e vazões máximas para a chuva de projeto e vento simulado (31/01/2006), considerando o sistema de drenagem existente.

Trecho	Vazão max Tr=25 anos [m ³ /s]	Vazão max (31/01/2006) [m ³ /s]	Capacidade do trecho [m ³ /s]
Natural 1	41,39	45,15	4,00
Concreto	50,74	55,26	66,99
Natural 2	51,44	56,60	28,59
Vala	10,59	8,84	0,45
Natural 3	51,54	56,75	20,08
Natural 4	51,11	53,23	64,81
Enterrado	33,03	30,87	3,19

Observa-se na Tabela 1, que a maioria dos trechos apresentaram vazões maiores para a chuva simulada, mesmo essa tendo um período de retorno bastante inferior ao da chuva de projeto. Esse fato ocorreu devido à variação no CN com as condições iniciais de umidade do solo, pois se considerou solo normal para a chuva de projeto e solo saturado para a chuva simulada. Essa observação mostra que o modelo adotado é bastante sensível às condições iniciais de umidade do solo.

Apenas para os trechos “Vala” e “Enterrado” a vazão máxima da chuva simulada é menor que a da chuva de projeto, esses trechos são localizados nas regiões com maiores taxas de urbanização.

Outra informação que pode ser retirada da Tabela 1, é a falta de capacidade de transporte de vazão de quase todos os trechos, com exceção dos trechos “Concreto” e “Natural 4”.

3.6 Dimensionamento de solução

Com os resultados obtidos anteriormente, onde se verifica a falta de capacidade de transporte de vazão para vários trechos do Arroio dos Afonsos, constata-se que a solução mais próxima da ideal envolve aplicação de técnicas compensatórias de drenagem para reter ao máximo a vazão precipitada. Essas técnicas são classificadas como não convencionais.

A introdução de trincheiras de infiltração, para diminuir o escoamento excedente, a introdução de barreiras e diques a montante, para retardar o fluxo no córrego, ou até a regulamentação, por parte da prefeitura, de leis que obriguem as construções, das áreas urbanas mais afetadas, terem um reservatório de amortecimento de picos de cheias, conhecidas em São Paulo por “Lei das Piscininhas”, são exemplos de medidas que devem ser idealmente tomadas para a resolução do problema.

Nesse trabalho limitou-se para efeito de solução para o problema proposto o redimensionamento e readequação dos materiais do sistema existente a montante do MUSAL. Eventualmente, as soluções propostas gerarão problemas de enchentes em outros locais menos nobres ou precisarão de ações complementares realizados por outros órgãos, que não o Comando da Aeronáutica.

Está sendo proposta, pela Prefeitura da Cidade do Rio de Janeiro, a construção de um reservatório de detenção a jusante do Campo dos Afonsos. Logo, admitiu-se que esse reservatório deva ser projetado para a vazão de saída encontrada nesse estudo, caso a solução de redimensionamento dos trechos seja adotada, tornando, portanto, a solução proposta viável e não totalmente teórica.

A solução proposta para o problema foi buscada de forma iterativa, pois mudanças nas características dimensionadas alteram as vazões máximas iniciais dos trechos, sendo necessária, a posterior verificação e, eventual, redimensionamento.

Como as condições de manutenção atuais dos trechos com seções naturais estavam precárias, foi especificada uma readequação das margens e fundo dos trechos, para que seja atingido, para esses trechos, a condição de Coeficiente de Manning de 0,040, que é o valor máximo estimado para canais naturais, de seção irregular, fundo de solo e margens com mato baixo (Canholi, 2005).

Todos os trechos do Arroio dos Afonsos a jusante do trecho “Concreto” foram projetados em seções naturais. O trecho de concreto, já existente na área urbana, não precisou de modificações. Esse trecho possui capacidade de transporte de vazão, mesmo depois das modificações propostas nesse trabalho.

O trecho mais a montante do sistema não possui espaço disponível para continuar em seção natural, logo foi dimensionado em concreto liso com coeficiente de Manning de 0,015. É importante ressaltar que essa solução para o trecho aumenta o pico de vazão nos trechos do arroio a jusante, mas impede que o excesso de fluxo esco superficialmente atingindo os hangares do MUSAL.

A verificação da existência de uma camada espessa de sedimentos nos trechos a jusante do trecho “Concreto” motivou a especificação de um afundamento de 60 cm na altura desses trechos. Acredita-se que grande parte, senão todo, acréscimo da altura necessário pode ser dado pelo simples desassoreamento do Arroio.

Propõe-se que as declividades dos trechos “Natural 2” e “Vala” sejam aumentadas. No primeiro, devido à manutenção da cota de montante, pois o trecho de montante não sofreu variação de cota e o aprofundamento proposto aconteceu de forma uniformemente distribuído, ao longo do seu comprimento até o total de 60 cm a jusante. No segundo, a cota de montante, também não foi alterada e a cota de jusante se ajustou com a cota de jusante do trecho “Natural 2”.

Tabela 2 Características das seções dimensionadas.

Trecho	Cota de fundo montante [m]	Cota de fundo jusante [m]	Declividade [m/m]	Manning
Natural 1	48,3	40,0	0,0094	0,015
Concreto	40,0	33,8	0,0100	0,016
Natural 2	33,8	30,1	0,0067	0,040
Vala	31,9	30,1	0,0032	0,040
Natural 3	30,1	29,0	0,0053	0,040
Natural 4	29,0	19,6	0,0072	0,040
Enterrado	28,6	20,7	0,0076	0,015

Para a canalização enterrada, que atravessa a pista de pousos e decolagens, foi dimensionada uma aduela de concreto com dimensões comerciais de 2,0 m de altura e 3,5 m de largura. Essa galeria possui mais de 1 km de extensão e grandes intervenções nessa galeria podem inviabilizar as operações do aeródromo. Logo, essa foi projetada com altura e pontos de visitas suficientes para que seja possível a entrada para manutenção. A Tabela 2 apresenta as características dos trechos dimensionados.

O dimensionamento proposto altera o pico de vazão de acordo com a Tabela 3. Nessa tabela, também é apresentada a capacidade de vazão de cada trecho.

Tabela 3. Capacidade de transporte e vazões máximas para a chuva de projeto e vento simulado (31/01/2006), considerando o sistema de drenagem proposto.

Trecho	Vazão max Tr=25 anos [m ³ /s]	Vazão max (31/01/2006) [m ³ /s]	Capacidade do trecho [m ³ /s]
Natural 1	47,26	50,17	52,08
Concreto	60,49	62,80	66,99
Natural 2	62,66	66,81	101,35
Vala	10,59	8,84	18,04
Natural 3	71,38	74,99	113,58
Natural 4	75,44	84,09	220,30
Enterrado	33,03	30,87	38,75

Verificada a capacidade de transporte de vazão das seções dimensionadas, foram calculadas as alturas das lâminas líquidas e o percentual de borda livre.

Observa-se que os trechos de interesse para os problemas de alagamentos nos hangares do MUSAL, “Natural 2”, “Vala” e “Natural 3” possuem borda livre entre 20 % e 30 %, para a chuva de projeto, conforme sugerido por Porto (2006), para canais abertos.

O trecho de concreto e o a montante dele não respeitam essa regra, possuindo maior risco de enchentes na parte urbana e conseqüentemente, de escoamento superficial que pode atingir os hangares do MUSAL. A adoção desse critério de projeto, com menor margem de segurança para os dois trechos iniciais, decorre do fato dos trechos terem capacidade de vazão tanto para a chuva de projeto quanto para a simulada, que se mostrou o evento mais crítico já registrado. A não alteração dos 621 m do trecho existente de concreto impactará bastante na diminuição dos gastos das intervenções e viabilidade desse projeto.

Para o trecho “Natural 4”, que já possuía capacidade de transporte suficiente, o simples desassoreamento e readequação das margens do trecho, excede a sugestão de folga.

Para tubulações fechadas, Porto (2006) recomenda borda livre de 10% a 20%, o que foi obedecido no dimensionamento da aduela enterrada. Para a chuva simulada de 31/01/2006, a seção dimensionada também gera folgas na altura.

Recomenda-se ainda, que seja feita uma manutenção periódica no sistema de drenagem, para que sejam mantidos os coeficientes de Manning utilizados para o dimensionamento.

4. CONCLUSÕES

Os fatores causadores de enchentes no aeródromo Campos dos Afonsos foram identificados e quantificados com sucesso. Conclui-se que as condições precárias de conservação dos trechos d'água da região são as principais fontes de enchentes no local em estudo.

A análise da topografia, para estabelecimento das áreas de contribuição e caminhos naturais de drenagem, utilizando o SIG gerou resultados satisfatórios, mesmo para a região em estudo que possui alta taxa de urbanização.

Os registros de chuva obtidos para a região, após separação dos dados feita pelo programa implementado nesse estudo para o caso geral, resultaram em uma equação IDF, com excelente ajuste $R^2 = 0,987$.

Os métodos indiretos de correlação precipitação-vazão nas bacias possibilitaram a previsão de vazão, de forma macro, sem que fossem consideradas todas as interferências reais dos sistemas de microdrenagem.

Toda metodologia adotada pôde ser comparada e validada para a região urbanizada em estudo, por meio da simulação do evento chuvoso do dia 31/01/2006, que causou muitos prejuízos ao patrimônio da União e que foi adequadamente registrado, possibilitando a comparação com os resultados da modelagem para efeito de validação.

A falta de dados observados de vazões no Arroio dos Afonsos dificultou a calibração dos parâmetros adotados na modelagem, porém não se mostrou impeditiva para redizer os hidrogramas ou para a realização de projetos de dimensionamentos.

A proposta de solução estabelecida se mostra viável no âmbito do Comando da Aeronáutica, pois com o foco nos hangares do MUSAL, os dimensionamentos propostos são, na maioria dos casos, apenas readequação das condições esperadas para trechos de seção natural, com manutenção, alargamentos e desassoreamentos menores que 60 cm. Apenas na seção da Vala do MUSAL, será necessária uma intervenção que excede esse limite, mas há espaço para o dimensionamento proposto e esse trecho é considerado pequeno, com 575,5 m de extensão, o que impactará pouco o custo total da obra.

AGRADECIMENTOS

Agradamos ao Instituto Tecnológico de Aeronáutica pelo apoio institucional, à Diretoria de Engenharia da Aeronáutica pelo fornecimento de dados, suporte logístico nas pesquisas de campo e apoio institucional.

REFERÊNCIAS

CANHOLI, A. P. *Drenagem urbana e controle de enchentes*. São Paulo: Oficina de Textos, 2005.

FERREIRA, R. S. *Gestão de águas urbanas em Guarulhos*. 2011. 160 f. Dissertação (Mestrado) – Escola Politécnica da Universidade de São Paulo, Departamento de Engenharia Hidráulica e Ambiental, São Paulo, 2011.

GUARULHOS. *Prefeitura Municipal. Plano Diretor de Drenagem: Diretrizes, Orientações e Propostas*. Guarulhos, 2008, 107 p.

LOPES, F. S.; MEDEIROS JUNIOR, R. A.; SANTOS, E. A. Santos Dumont airport - SBRJ surrounding land use and occupation. In: AIR TRANSPORT RESEARCH SOCIETY WORLD CONFERENCE, 2011, Sydney. Proceedings... Sydney: ATRS, 2011. p. 1-14.

PORTO, R. M. *Hidráulica básica*. 4. ed. São Carlos: EESC/USP, 2006, 540 p.

RIO DE JANEIRO. *Subsecretaria de Gestão das Bacias Hidrográficas (Rio-Águas). Pontos críticos de enchentes*. 2010. Disponível em: <<http://www.riocomovamos.org.br/arq/pontoscriticosenchentes.pdf>>. Acesso em: 09 mar. 2011.

RIO DE JANEIRO. Alerta Rio. 2011. Disponível em: <<http://www0.rio.rj.gov.br/alertario/>>. Acesso em: 20 maio 2011.

SIMÕES, F. F.; YAMAMOTO, L. A. P. *Estudo do sistema de drenagem do Campos dos Afonsos*. Rio de Janeiro: COMGAP, Diretoria de Engenharia da Aeronáutica, 2006. (No 09/EP-30/06).

SOUZA, C. F.; CRUZ, M. A. S.; TUCCI, C. E. M. *Desenvolvimento Urbano de Baixo Impacto: Planejamento e Tecnologias Verdes para a Sustentabilidade das Águas Urbanas*. Revista Brasileira de Recursos Hídricos. v. 17, n. 2, p. 9-18, abr./jun. 2012.

TUCCI, C. E. M. (org.) *Hidrologia: ciência e aplicação*. 4. ed. 1. reimp. Porto Alegre: Ed. da UFRGS/ABRH, 2009.