

ARTÍCULO ORIGINAL / ORIGINAL ARTICLE

Peligro de los raudales para los usuarios de la vía pública en ciudades del Paraguay
Danger of torrents for users of public roads and streets in cities of Paraguay

Adriana Ruiz Díaz Cardoso¹, Alfredo López Fernández¹, Edith Camaño Schettini²

¹ Universidad Nacional de Asunción, Facultad de Ingeniería. San Lorenzo, Paraguay.

² Universidade Federal do Rio Grande do Sul, Instituto de Pesquisas Hidráulicas. Rio Grande do Sul, Brasil.

Autor de correspondencia: amruizdiaz@ing.una.py

DOI: <https://doi.org/10.32480/rscp.2018-23-2.241-250>

Recibido: 15/11/2018. Aceptado: 15/12/2018.

Resumen: Los raudales/avenidas en el Paraguay causan a menudo grandes problemas en las calles de las ciudades, no solamente importantes daños materiales, si no también causan decesos humanos, arrastrando vehículos y personas. Esta alarmante situación, nos llevó a estudiarla, pero no sólo como un número estadístico más, si no a entender la física de los fenómenos hidrodinámicos del flujo que escurre por nuestras calles tras un raudal. Para ello se eligió parametrizar las velocidades y los niveles encontrados en las calles durante fenómenos reales, con precipitaciones comunes mediante el procesamiento de imágenes de filmaciones por LSPIV (Large Scale Particle Image Velocimetry) y complementando con simulaciones numéricas tridimensionales CFD (Computational Fluid Dinamic), y luego compararlos con estudios realizados por otros autores en laboratorios. Los resultados encontrados arrojaron valores de velocidades y niveles críticos para transeúntes y vehículos, confirmando el peligro que se presenta en la vía pública durante estos eventos.

Palabras Clave: Raudales, LSPIV, CFD, velocidades críticas, inundaciones pluviales.

Abstract: The runoff flow in floodwaters in Paraguay often cause great problems in our streets, not only on materials, but-also causing human deaths, dragging around vehicles and people. This situation is alarming, and led us to study it, but not just as a statistical number, but to understand the physics of the hydrodynamic phenomena of the flow that runs through our streets after a flood. To do this, it was chosen to parameterize the speeds and levels found in the streets during real events, with common rainfall, by processing images of filming by LSPIV (Large Scale Particle Image Velocimetry) and complementing with three-dimensional numerical simulations CFD (Computational Fluid Dinamic), and then compare them with studies done in laboratories. The results found showed values of speeds and critical levels for pedestrians and vehicles, confirming the danger that appears in our streets during these events.

Key Words: runoff flow in floodwaters, LSPIV, CFD, critical speeds, rain floods.



1.- INTRODUCCIÓN

Para describir de una manera breve, la problemática de las inundaciones en la Ciudad de Asunción y en Gran Asunción se divide en dos grandes grupos, el primer grupo comprendido por las inundaciones fluviales producidas por un aumento del nivel en el Río Paraguay, bien identificables y más estudiadas, y un segundo grupo, las producidas en el centro urbano, un poco más alejado de la ribera del Río Paraguay, no relacionadas directamente con el desborde de éste, inundaciones producidas por el exceso de la escorrentía de precipitaciones denominadas pluviales, influenciadas o no por el desbordamiento de arroyos urbanos, agravadas por la urbanización y su impermeabilización, además de las infraestructuras pluviales inadecuadas y en algunos casos, inexistentes. Inundaciones que plantean la problemática estudiada en este trabajo, generación de flujos torrenciales generalmente llamados como raudales que escurren en las calles y veredas, usando tales vías como grandes canales, y pueden generar el arrastre de personas y/o vehículos que se encuentren en ellas.

Investigadores hacen mención que este tipo de inundación urbana se registra históricamente, recién en la década del 60 del siglo pasado en países desarrollados; en países subdesarrollados o en vías de desarrollo como el nuestro, en el año 2003, recién se comenzaba a enfatizar de este tipo de problemas (1).

Haciendo referencia tan solo a un día de diciembre del 2015, Rafael Valdez (2) cita en un artículo del diario ABC color “Al menos dos muertos, ambos niños, y casi 40 atrapados en medio de los raudales fue el saldo del temporal que azotó hoy Asunción y el departamento Central”, señala la situación de los raudales que existen a menudo en nuestro medio.

De este modo es necesario, al describir el peligro de las inundaciones, enfocarnos que los niveles alcanzados por el agua, no deben ser el único parámetro de análisis si no que estos deben combinarse a las velocidades de los flujos que se generan (3) en especial los flujos que podrían estar en contacto a los usuarios de la vía pública, ya que estos dos parámetros son los que generan inestabilidades.

Existen dos mecanismos de inestabilidad de objetos en flujos, sean ~~estos~~ ellos personas o vehículos sumergidos, por deslizamiento y vuelco. Considerando que el cuerpo ya se encuentra sumergido y quieto en el flujo, en general para bajos niveles de agua y altas velocidades se producirá primero el deslizamiento por el predominio de la fuerza de arrastre del agua ante la fuerza de rozamiento, mientras que para altos niveles y bajas velocidades se producirá el vuelco debido a que el momento producido por la fuerza de arrastre del agua, la flotabilidad y sustentación es mayor al momento producido por el peso alrededor del punto de giro. El modelo conceptual simplificado se observa en la figura 1.

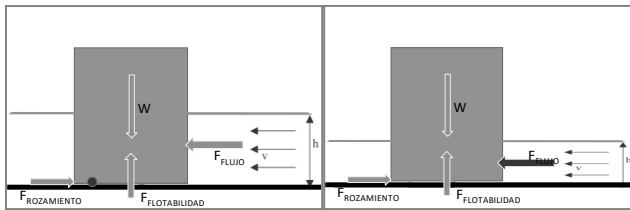


Figura 1: Modelo Conceptual, Inestabilidad de Objetos en Flujos. Izquierda: Inestabilidad por Vuelco. Derecha: Inestabilidad por Deslizamiento.

Este estudio analiza flujos en los que prevalece un régimen supercrítico de niveles bajos, que registran altas velocidades y podrían provocar el arrastre por deslizamiento de personas y vehículos en calles, y generalmente a simple vista por los niveles relativamente bajos que se presentan, aún no son alarmantes para los usuarios de la vía pública.

Estudios recientes demuestran el peligro que conllevan este tipo de flujos, donde niveles de agua bajos entre 10cm y 40cm provocan inestabilidades con velocidades en el orden de 3m/s a 1m/s en vehículos (4, 5) y en personas en el orden de 3.5m/s a 1.5m/s respectivamente (6, 9).

2.- METODOLOGÍA

El Raudal o Avenida que acá se analiza fue el ocurrido en la ciudad de Ñemby el 28 de enero del 2018, sobre la Av. de la Victoria, Tape Guazú casi Manuel Ortiz Guerrero, en la zona punteada de la figura 2. Éste fue provocado por una precipitación acumulada registrada de 47mm, con pico a los 10min aproximadamente y una considerable duración del evento de 50 min.



Figura 2: Planta General de Localización y Ubicación. Imágenes de fondo de Google Maps.

Ruiz Díaz Cardoso A, López Fernández A, Camaño Schettini E. Peligro de los raudales para los usuarios de la vía pública en ciudades del Paraguay

La metodología utilizada fue la misma planteada en (10) dividiéndose de este modo en dos partes, la primera el procesamiento de imágenes y la segunda las simulaciones CFD. Ambas aplicadas de una manera muy particular y satisfactoria.

2.1.- Procesamiento de Imágenes

Las filmaciones se obtuvieron desde dos cámaras fijas, estas fueron utilizadas para delimitar la distribución espacial del raudal, los niveles alcanzados en puntos específicos y la determinación del campo de velocidades superficiales. Los niveles alcanzados en diferentes tiempos fueron determinados directamente mediante una transformación lineal de longitudes verticales, a partir de alturas conocidas. Para determinar el campo de velocidades se utilizó la técnica de LS-PIV, esta es una técnica que utiliza la correlación cruzada por transformada de Fourier de dos imágenes consecutivas de la filmación para seguir partículas, o como el caso de estudio zonas de luz y sombra visibles. Podrá consultarse para mayor información de la técnica diversos estudios, habiendo utilizado como referencia para este estudio Qi-hua Ran (11), Patalano et al (12), o Sameh A.Kantoush et al (13).

2.2.- Simulación CFD

La Simulación CFD se realizó con la ayuda del software OpenFOAM, con su solucionador interFOAM (14), y el modelo de cierre de turbulencia $k-\varepsilon$ estándar. Este considera el fluido como bifásico, agua aire, resolviendo por volúmenes finitos las ecuaciones 1, 2, 3 y 4 de gobierno a continuación

Continuidad:

$$\frac{\partial u}{\partial x} + \frac{\partial v}{\partial y} + \frac{\partial w}{\partial z} = 0 \quad (1)$$

Momentum:

$$(2) \quad \frac{\partial u}{\partial t} + \frac{\partial}{\partial x}(uu) + \frac{\partial}{\partial y}(vu) + \frac{\partial}{\partial z}(wu) = -\frac{1}{\rho} \frac{\partial p}{\partial x} + \frac{\mu}{\rho} \nabla^2 u + g_x$$

$$\frac{\partial v}{\partial t} + \frac{\partial}{\partial x}(uv) + \frac{\partial}{\partial y}(vv) + \frac{\partial}{\partial z}(wv) = -\frac{1}{\rho} \frac{\partial p}{\partial y} + \frac{\mu}{\rho} \nabla^2 v + g_y \quad (3)$$

$$(4) \quad \frac{\partial w}{\partial t} + \frac{\partial}{\partial x}(uw) + \frac{\partial}{\partial y}(vw) + \frac{\partial}{\partial z}(ww) = -\frac{1}{\rho} \frac{\partial p}{\partial z} + \frac{\mu}{\rho} \nabla^2 w + g_z$$

Siendo (x, y, z) el vector posición, (u, v, w) el vector velocidad, t el tiempo, ρ la densidad, μ la viscosidad y g la gravedad.

La discretización espacial se realizó con la ayuda del software SALOME 8.2. con mallas estructuradas tetraédricas irregulares.

Las condiciones de contorno impuestas fueron caudales y niveles aguas arriba, y condición libre aguas abajo. El caudal utilizado no era constante en toda la sección transversal de entrada, y variaba transversalmente de magnitud según la distribución de velocidades que se encontraron en la técnica LSPIV, de modo que se transfiera la tridimensionalidad que tenía el flujo aguas arriba sin tener que extender excesivamente en el dominio (10). Se simularon impermanentes distintos entre simulaciones, con niveles de entrada de $h=0,20\text{m}$ y $h=0,40\text{m}$ en calle. Se verificaron el balance de masas y la condición de Courant. El dominio de Simulación tenía una longitud total de 280m y un ancho igual a la suma de los anchos de vereda, calle y canal lateral, además de una altura de 0,70m. Se realizó una convergencia de malla con caudales constantes, tomando como parámetros de convergencia las velocidades instantáneas en un punto del eje central de la calle con sus respectivas velocidades medias en la sección, estas fuera de las secciones donde se impusieron las condiciones de contorno, admitiendo una divergencia de los parámetros de convergencia del 5% para parámetros instantáneos y del 2% para parámetros medios simulando el 20% del dominio total en su longitud, convergiendo para un orden de dos millones de volúmenes finitos.

Con las mallas convergentes se procedió a la calibración y validación utilizando la distribución espacial de velocidades medias temporales superficiales y los niveles obtenidos de las filmaciones, arrojando discrepancias menores al 0,05%.

3.- RESULTADOS Y DISCUSIÓN

Los resultados obtenidos mostraron niveles y velocidades críticas en varias zonas del evento analizado.

Con niveles de 0,20m a 0,30m de flujo se registraron velocidades superficiales entre 3m/s y 4.2m/s en la calle en zonas cercanas a la vereda que se observan en la figura 1. Con niveles de 0.30m a 0.40m de flujo se registraron velocidades superficiales entre 1.8m/s y 5.5m/s en la calle en zonas cercanas a la vereda que se observan en la figura 2.

Estos valores de velocidades observados son superficiales, y los ensayos y deducciones teóricas se realizan con las velocidades medias sobre una vertical, de este modo, observando que la distribución y los valores de velocidades superficiales en la simulación numérica eran muy similares a los obtenidos por LSPIV, se complementó

Ruiz Díaz Cardoso A, López Fernández A, Camaño Schettini E. Peligro de los raudales para los usuarios de la vía pública en ciudades del Paraguay

con las simulaciones numéricas el estudio y se observó que las velocidades medias en una vertical sobre un punto son aproximadamente un 20% menores que las superficiales en esos casos. De este modo se calcularon las velocidades instantáneas medias en un punto sobre su vertical, que en general siguieron siendo críticas en su mayoría que según la inestabilidad teórica de personas planteada por S.N. Jonkman y E. Penning-RowSELL (7), que puede observarse en la figura 5.

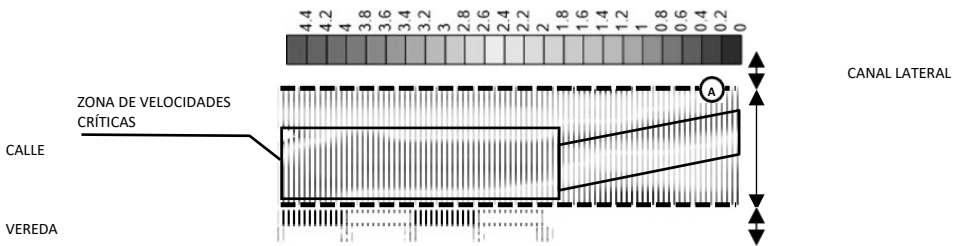


Figura 3: Velocidades superficiales (m/s) obtenidas por la técnica de LSPIV para 0,20m*. Identificación de zonas de riesgo para peatones. OBS: *Nivel de referencia en el punto A.

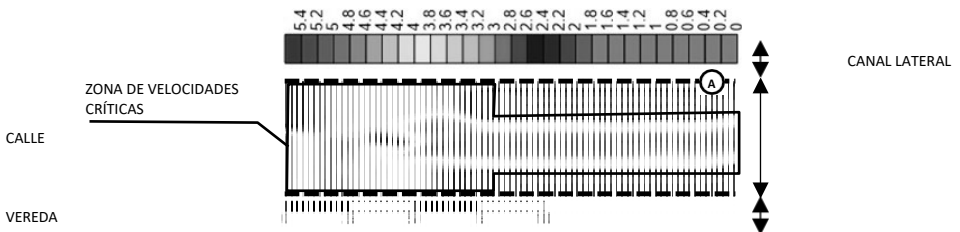


Figura 4: Velocidades superficiales (m/s) obtenidas por la técnica de LSPIV para 0,30m*. Identificación de zonas de riesgo para peatones. OBS: *Nivel de referencia en el punto A.

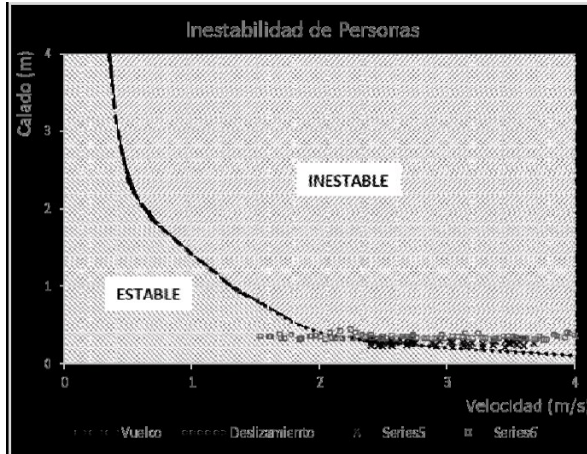


Figura 5: Gráfico de Inestabilidad de Personas en Flujos con valores observados.

Si comparamos los valores de velocidades obtenidas con valores de velocidades críticas obtenidos en laboratorio para la inestabilidad de vehículos, se puede observar lo crítico del raudal para vehículos pequeños a medios en tamaño, con un especial cuidado además aquellos que la parte inferior del vehículo sea baja (analizando hasta 40cm). Figura 6.

En este evento analizado existió el arrastre de un vehículo, este empezó a ser llevado por la corriente por deslizamiento fuera del alcance en que pueda ser procesada la imagen de video, ya que existía poca nitidez de la cámara en la zona. Solo pudo ser identificado el momento en que comenzó el arrastre.

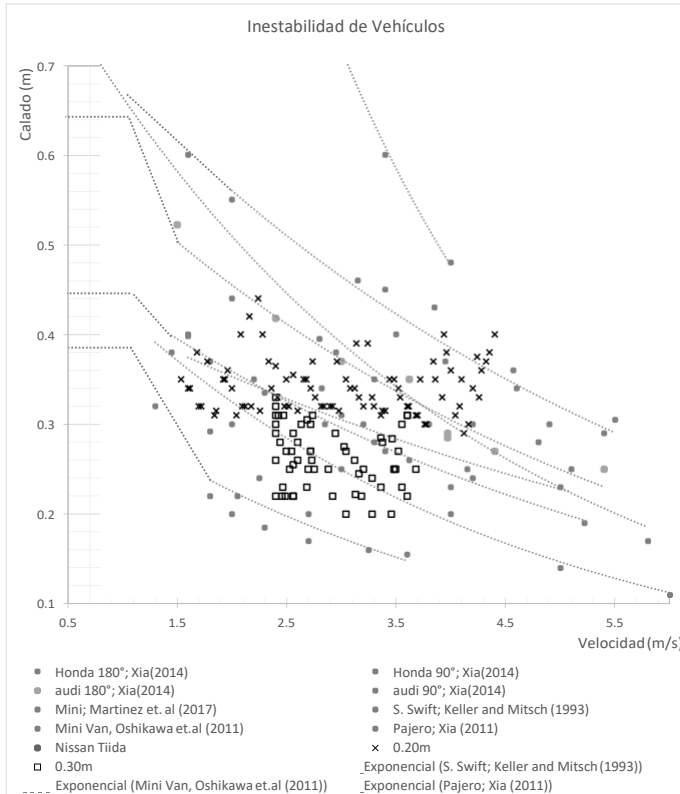


Figura 6: Gráfico de Inestabilidad de Vehículos en Flujos con valores observados.

A partir de la simulación numérica se logró determinar los parámetros de velocidades y niveles locales en el comienzo del arrastre del vehículo, este comenzó a ser arrastrado con tan solo 0.20m de profundidad de agua y una velocidad promedio cercana al vehículo de 4 m/s, velocidades verificables críticas.

Los valores de combinaciones de niveles y velocidades encontrados en todos los casos han mostrado regiones críticas y de gran peligro en un 74% del tiempo en que se generaron excesos de precipitación escurridos.

4.- CONCLUSIONES

La técnica LSPIV permitió obtener en el estudio el campo de velocidades reales superficiales para todos los escenarios analizados. Esta además pudo ser utilizada para calibrar y validar la simulación CFD.

La simulación CFD fue el complemento ideal para lograr un análisis en tres dimensiones de lo ocurrido, proporcionándonos además un factor de extrapolación de velocidades superficiales a velocidades instantáneas medias puntuales (promediado espacial en la vertical) para los niveles de agua analizados, y valores simulados de velocidades tridimensionalmente distribuidos, donde inclusive no se obtuvieron datos con la técnica de LSPIV.

Se observó que las velocidades medias espaciales, o flujo medio, como se analiza hoy en día, no representan la complejidad del flujo que se presenta en los raudales, por lo que se hace hincapié en el análisis de la distribución espacial de niveles y velocidades para representarlos.

Los raudales/avenidas son altamente peligrosos para los transeúntes de las vías públicas de Asunción y alrededores, con flujo en calles y/o veredas pueden producir velocidades muy elevadas, y difíciles de manejar por las personas y vehículos, estos deben tener en cuenta que no solo un nivel alto del escurrimiento es peligroso, sino también con niveles muy bajos como 0,20m, que es un nivel de cordón de vereda, puede presentar riesgo potencial.

Se recomienda tener en cuenta velocidades máximas reales aparte de los niveles para el dimensionamiento y verificación de los desagües pluviales y calles urbanas con un enfoque hidráulico, en especial en zonas donde el cauce principal de avenidas son las calles.

Esta investigación podría ampliarse enfocándose en determinar un mapa de peligrosidad de raudales de Asunción y Gran Asunción, que tengan en cuenta no solo niveles y si también velocidades.

REFERENCIAS BIBLIOGRÁFICAS

1. Tucci CEM, Bertoni JC. Inundações urbanas na América do Sul. Porto Alegre: Associação Brasileira de Recursos Hídricos; 2003.
2. Valdez R. Secuelas de la tormenta de este viernes. Diario ABC Color Digital. 2015. Disponible en <http://www.abc.com.py/nacionales/lo-que-dejo-la-tormenta-1432787.html>
3. Smith GP, Davey EK, Cox R. Flood Hazard. Water Research Laboratory. University of New South Wales, School of Civil and Environmental Engineering; 2014.
4. Xia J, Yenn F, Binliang T, Falconer RA. Formula of incipient velocity for flooded vehicles. Springer Science+Business. 2010.
5. Xia J, Falconer RA, Xiao X, Wang Y. Criterion of vehicle stability in floodwaters bases on theoretical and experimental studies. Natural Hazards. 2014;70(2):1619.
6. Cox RJ, Shand TD, Blacka MJ. Australian rainfall and runoff. Appropriate safety criteria for people. Engineers Australia. Water Engineers. Water Research Laboratory; 2010.
7. Jonkman SN, Penning-Rowse E. Human Instability in Flood Flows. J Amer. Water Resour. Assoc. 2008;44(4):1-11.
8. Ramsbottom D, Floyd P, Penning-Towsell E. Flood Risks to People; Phase 2: Project Record. FD 2321/PR. Department for Environment Food and Rural Affairs, United Kingdom; 2006.
9. Martínez Gomariz M, Gomez B. Russo Experimental study of the stability of pedestrians exposed to urban pluvial flooding. DOI 10.1007/s11069-016-2242-z Springer Science+Business; 2016.
10. Ruiz Diaz Cardoso A. Hidrodinámica de flujos torrenciales durante inundaciones urbanas. San Lorenzo: Universidad Nacional de Asunción, Facultad de Ingeniería; 2018.
11. Ran QH, Li W, Liao Q, TangHL, Wang MY. Application of an automated lspiv system in a mountainous stream for continuous flood flow measurements. Hydrolog. Proces. 2016;30(17):3014-3029.
12. Patalano A, Brevis W, García CM, Bleninger T, Rodríguez A. PTVlab, una herramienta grafica para el procesamiento digital en Velocimetría por Seguimiento de Partículas. III Simposio sobre Métodos Experimentales en Hidráulica. Santa Fe, Argentina; 2013.
13. Sameh A, Kantous Haanton J. Schleis SB. Lspiv implementation for environmental flow in various laboratory and field cases. Elsevier UBLS; 2011.
14. OpenCFD Ltd. The open source CFD toolbox and OpenFOAM User Guide. Disponible en <http://www.openfoam.com>