

Evaluation of Physical Stability and Physiological Fatigue of Pedestrians in Tsunami Flooding Conditions in Puerto Rico

Rosangelie Rivera-De León¹ 

Faculty Mentor: Gustavo E. Pacheco-Crosseti, PhD² ; **Faculty Co-mentor:** Ricardo J. Bravo-Pérez, MS³ 
^{1,2,3}Universidad Politécnica de Puerto Rico, San Juan, Puerto Rico, rivera_11728@students.pupr.edu, GPacheco@pupr.edu,
RBravoPerez@pupr.edu

This study evaluates the stability and mobility of pedestrians during tsunami-induced flooding in Puerto Rico. The research was divided into two main phases: the development of an analytical stability model (Phase 1) and an experimental fatigue study (Phase 2). In Phase 1, pedestrians were represented as rectangular prism and cylindrical monoliths to determine the impact of water depth and velocity on their sliding and overturning stability. Drag, buoyancy, friction, and body weight forces were considered. Anthropometric data from Puerto Rican adults and 6-year-old Colombian children were used to evaluate the analytical model. The results demonstrated that instability could occur at low water levels and moderate velocities, that sliding is the predominant cause of instability, and that the footwear-to-ground friction coefficient is the critical parameter. It was also observed that children and women are the most vulnerable populations. In Phase 2, a gait study was conducted using two concentric pools simulating an endless evacuation walk, monitoring heart rate and oxygen consumption with a portable spirometer at different flood levels (ankle, knee, and hip). Contrary to the initial hypothesis, the greatest physiological effort (measured by oxygen consumption) occurred at intermediate levels (ankle and knee). At the hip level, buoyancy reduced muscle load but drastically decreased walking speed. These findings demonstrate that horizontal evacuation routes should be designed with pavements that provide a high coefficient of friction, and that extended evacuation under flooded conditions may be infeasible, highlighting the need to integrate vertical evacuation options in high-risk coastal areas.

.Keywords— Evacuation, Physiological Fatigue, Hydrodynamic Forces, Tsunami Flooding, Pedestrian Stability

Evaluación de la Estabilidad Física y Fatiga Fisiológica de Peatones en Condiciones de Inundación por Tsunamis en Puerto Rico

Rosangelie Rivera-De León¹ 

Mentor: Prof. Gustavo E. Pacheco-Crosseti, Dr² ; **Co-Mentor:** Prof. Ricardo J. Bravo-Pérez, Ms³ 

^{1,2,3}Universidad Politécnica de Puerto Rico, San Juan, Puerto Rico, rivera_11728@students.pupr.edu, GPacheco@pupr.edu, RBravoPerez@pupr.edu

Resumen – Este estudio evalúa la estabilidad y movilidad de peatones en inundaciones por tsunami en Puerto Rico. La investigación se dividió en dos fases: desarrollo de un modelo analítico de estabilidad (Fase 1) y un estudio experimental de fatiga (Fase 2). En la Fase 1, los peatones fueron representados como monolitos prismáticos rectangulares y cilíndricos para determinar el impacto de la profundidad y velocidad del agua sobre su estabilidad al deslizamiento y vuelco. Se consideraron fuerzas de arrastre, flotación, fricción calzado-suelo y peso corporal. Se utilizaron datos antropométricos de adultos puertorriqueños y niños colombianos de seis años. Los resultados mostraron que la inestabilidad puede ocurrir con bajos niveles de agua y velocidades moderadas, que el deslizamiento es la causa predominante y que el coeficiente de fricción calzado-suelo es el parámetro crítico. Se observó que niños y mujeres son las poblaciones más vulnerables. En la Fase 2, se realizó un estudio de marcha con dos piscinas concéntricas que simulan una caminata continua, monitoreando frecuencia cardíaca y consumo de oxígeno con un espirómetro portátil a distintos niveles de inundación (tobillo, rodilla y cadera). Contrario a la hipótesis inicial, el mayor esfuerzo fisiológico ocurrió en niveles intermedios. A nivel de cadera, la flotación redujo la carga muscular, pero disminuyó significativamente la velocidad. Estos hallazgos demuestran que las rutas de evacuación horizontal deben diseñarse con pavimentos de alto coeficiente de fricción y que la evacuación prolongada bajo inundación puede ser inviable, destacando la necesidad de opciones de evacuación vertical en zonas costeras de alto riesgo.

Palabras clave— Evacuación, Fatiga Fisiológica, Fuerzas Hidrodinámicas, Inundación por Tsunami, Estabilidad de Peatones

I. INTRODUCCIÓN

La isla de Puerto Rico (PR) se encuentra en una zona de alta actividad sísmica; está rodeada de fallas tectónicas que están activas, como lo son la Falla de la Mona y la Trincheras de Puerto Rico. La isla ha experimentado dos tsunamis significativos. El primero ocurrió un 18 de noviembre de 1867, cuando un terremoto de magnitud de magnitud 7.3 en la escala Richter en el Pasaje de Anegada generó olas de hasta 20 pies en St. Thomas, Santa Cruz y Vieques, PR. En Yabucoa, PR, el

mar se retiró de la costa y entró alrededor de 450 pies tierra adentro. El segundo, el más mortífero, conocido como el terremoto de San Fermín, ocurrió el 11 de octubre de 1918. Este fue de magnitud 7.3 y el epicentro fue localizado en el Cañón de la Mona, a 25 millas de Aguadilla, generando olas de hasta 20 pies de altura que afectaron el oeste de la isla. La cifra de muertes fue de 116 personas, y de estas, hubo 40 que murieron como consecuencia directa del tsunami [1].

Estudios recientes indican que un tsunami local en Puerto Rico deja menos de 20 minutos para poder evacuar de las zonas costeras [1]. Es por esto que este estudio busca evaluar si los peatones pueden desplazarse bajo condiciones reales de inundación. Considerando que la profundidad y la velocidad del agua generan fuerzas hidrodinámicas que comprometen la estabilidad física, provocando deslizamientos o vuelcos [2].

Además, caminar venciendo la resistencia del agua incrementa exponencialmente la fatiga fisiológica, lo que reduce la velocidad de marcha y la distancia que un individuo puede recorrer. Este estudio se propuso dos objetivos principales: (1) desarrollar un modelo analítico para determinar las combinaciones de velocidad y profundidad bajo las cuales un peatón puede mantener la estabilidad, considerando las fuerzas de arrastre, flotación y fricción; y (2) cuantificar experimentalmente el consumo de oxígeno al caminar bajo distintos niveles de inundación simulada en una piscina redonda para observar el impacto de los niveles de inundación en el esfuerzo físico y la distancia recorrida. Los resultados buscan apoyar los planes de desalojo para buscar opciones viables para poder desalojar de manera más segura.

II. METODOLOGÍA

A. Fase 1: Modelo Analítico de Estabilidad

Para desarrollar el modelo se utilizaron datos antropométricos de adultos puertorriqueños, de ambos géneros, y de niños colombianos de 6 años debido a que no se encontraron datos antropométricos de niños menores de PR. Los datos utilizados se sintetizan en la Tabla I.

TABLA I
DATOS ANTROPOMÉTRICOS UTILIZADOS EN LOS MODELOS

Perfil	Peso (lb)	Ancho de caderas (AC) (ft)	Fuente
Mujer PR	145.68	1.21	[3]
Hombre de PR	173.57	1.20	[3]
Niño Colombia	46.08	0.70	[4]
Niña Colombia	51.51	0.74	[4]

El cuerpo humano fue simulado como un “tótem” con modelos de dos geometrías: un monolito de prisma rectangular (Figura 1) y un monolito cilíndrico (Figura 2). Para cada geometría se plantearon ecuaciones de equilibrio de fuerzas (condición de deslizamiento) y de momento respecto al punto de pivote O (condición de vuelco). Se consideraron las fuerzas que actúan sobre el cuerpo: peso propio (W), fuerza normal (F_N) entre suelo y persona, fuerza de fricción máxima entre calzado y suelo (F_{fmax}), fuerza de arrastre (F_d) y fuerza de flotación (F_{flot}). El monolito de prisma rectangular se evaluó con un coeficiente de arrastre (C_d) de 2.2 y el monolito cilíndrico con un C_d de 1.2. También se evaluaron tres tipos de agua con distintos pesos unitarios (γ_w): agua dulce ($\gamma_w = 62.4 \text{ lb/ft}^3$), agua salada ($\gamma_w = 64.0 \text{ lb/ft}^3$) y agua salada con sedimentos ($\gamma_w = 70.0 \text{ lb/ft}^3$). Los coeficientes de fricción analizados fueron: 0.8, 0.7, 0.6, 0.5, 0.4, 0.3, 0.2, 0.1 y 0.05. Siendo 0.8 el más resistente a resbalarse y 0.05 el más resbaladizo. Los modelos fueron resueltos analíticamente y los resultados altura vs velocidad fueron graficados en Microsoft Excel.

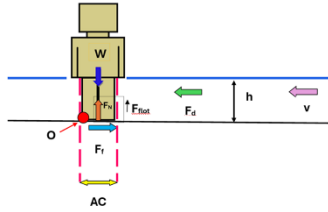


Figura 1. Monolito de Prisma rectangular

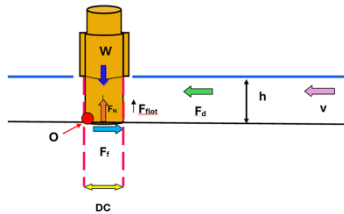


Figura 2. Monolito Cilíndrico

1) Desarrollo de Ecuaciones: Prisma Rectangular

Se analizaron las fuerzas hidrodinámicas que actúan sobre el cuerpo de una persona sumergida, pero en este caso simulada como un monolito. La F_d representa la fuerza que ejerce el flujo de agua sobre el cuerpo, y la F_{flot} que es el empuje hidrostático hacia arriba por el Principio de Arquímedes:

$$F_d = \frac{1}{2} C_d \frac{\gamma_w}{g} v^2 A \quad (1)$$

$$F_{flot} = \gamma_w Vol \quad (2)$$

donde C_d es el coeficiente de arrastre, γ_w es el peso unitario del agua [lb/ft^3], v es la velocidad del agua [ft/s^2], $A = h * AC$ es el área de la persona expuesta al empuje del agua [ft^2] y $Vol = AC^2 * h$ es el volumen del cuerpo de la persona sumergida en agua [ft^3], AC es el ancho de caderas de la persona [ft] y h es la profundidad de inundación [ft].

La fuerza de normal (F_N) es la reacción normal entre la persona y la superficie del suelo, que se expresa como:

$$F_N = W - F_{flot} \quad (3)$$

La fuerza de fricción máxima F_{fmax} es la que se opone al deslizamiento de la persona, de manera tal que, si la fuerza de arrastre la supera, comienza el deslizamiento. F_{fmax} resulta:

$$F_{fmax} = F_N * \mu \quad (4)$$

donde μ es el coeficiente de fricción estática entre el calzado y superficie del suelo.

Condición de deslizamiento: Al aplicar el equilibrio de las fuerzas en dirección del flujo ($\sum F_x = 0$, $F_d - F_{fmax} = 0$) y despejando h , la altura crítica de deslizamiento resulta:

$$h = \frac{W \mu}{\frac{1}{2} C_d \frac{\gamma_w}{g} v^2 AC + \gamma_w AC^2 \mu} \quad (5)$$

Condición de vuelco: Al igualar a cero el momento neto respecto al punto de pivote O ($\sum M_O = 0$), se obtiene una ecuación cuadrática en donde la solución positiva es:

$$h = \frac{-\left(\frac{1}{2} \gamma_w AC^3\right) + \sqrt{\left(\frac{1}{2} \gamma_w AC^3\right)^2 + \frac{1}{2} C_d \frac{\gamma_w}{g} v^2 AC^2 W}}{\frac{1}{2} C_d \frac{\gamma_w}{g} v^2 AC} \quad (6)$$

El vuelco tiende a ocurrir a alturas mayores de agua comparándolo con el deslizamiento, es por esto por lo que el deslizamiento es la causa más común de inestabilidad.

2) Resumen de Ecuaciones: Modelo Cilíndrico

Para el monolito cilíndrico de diámetro $D_c = AC$, el área frontal es $A = h * D_c$, el volumen sumergido es $Vol = \pi * D_c^2 / 4 * h$ y $C_d = 1.2$. Las alturas críticas se expresan como:

Deslizamiento:

$$h = \frac{W \mu}{\frac{1}{2} C_d \frac{\gamma_w}{g} v^2 D_c + \gamma_w \frac{\pi D_c^2}{4} \mu} \quad (7)$$

Vuelco:

$$h = \frac{-\frac{\gamma_w \pi D c^3}{8} + \sqrt{\left(\frac{\gamma_w \pi D c^3}{8}\right)^2 + \left(\frac{1}{2} C_d \frac{\gamma_w}{g} v^2 W D c^2\right)}}{2 \left(\frac{1}{4} C_d \frac{\gamma_w}{g} v^2 D c\right)} \quad (8)$$

En ambos modelos, a mayor velocidad (v) del flujo de agua, la altura (h) crítica disminuye; esto indica que el peatón pierde la estabilidad con menor profundidad de agua. El modelo cilíndrico soporta alturas críticas mayores que el rectangular, por su menor volumen sumergido, y menor coeficiente de arrastre.

B. Fase 2: Estudio Experimental

Este estudio se realizó en el primer piso del estacionamiento de la Universidad Politécnica de Puerto Rico. Como se demuestra en la Figura 3, se colocó una piscina de 18' de diámetro dentro de una de 26', creando un pasillo circular de 4' de ancho para caminar de manera constante. El diámetro efectivo de la caminata fue de 22'. La piscina contaba con 25 patas (postes). La distancia por ciclo D y la distancia entre dos patas ΔD , se calcularon como:

$$D = \pi * d \quad (9)$$

$$D = \pi * 22' = 69.115' \quad (10)$$

$$\Delta D = \frac{69.11'}{25} = 2.76 \text{ pies/pata} \quad (11)$$

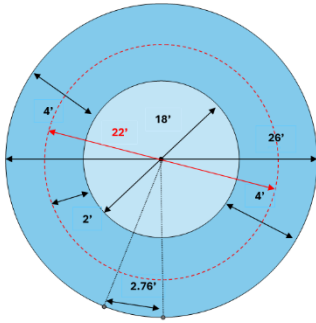


Figura 3. Visualización de medidas de piscina.

Se realizó un protocolo de rendimiento de marcha de 8 minutos (adaptación de la prueba de los 6 minutos para caminatas [5]): 1 minuto sentada (Figura 4), 1 minuto de pie (Figura 5), 6 minutos caminando (Figura 6 y Figura 7), en los que se midió la distancia recorrida, luego, descanso hasta recuperar la frecuencia cardíaca inicial. Se realizaron 5 repeticiones bajo cuatro condiciones: sin agua (con y sin cafeína provista por café en el desayuno), agua a nivel de tobillos, rodillas y caderas (las tres sin consumo de café, y con el agua en reposo). El VO_2 se midió con un analizador portátil VO_2 Master, que se calibró al inicio de cada una de las secciones. La

frecuencia cardíaca se tomó con el sensor Polar H10. Las variables de desempeño calculadas fueron:

$$\text{Consumo } O_2 = VO_2 \times \text{Peso Corporal} \times \text{Tiempo} \quad (12)$$

[ml/kg/min]

$$\text{Costo } O_2 = VO_2 / \text{Velocidad Promedio} \quad (13)$$

[ml/kg/m]

$$\text{Velocidad Promedio} = \text{Distancia Recorrida} / \text{Tiempo de Caminata} \quad (14)$$

Los datos se analizaron estadísticamente mediante ANOVA en Microsoft Excel, con $n=5$ repeticiones por condición. Cabe destacar que esta fase se desarrolló como una prueba de concepto, usando como piloto una sola participante (mujer, 24 años, 48.5 kg, 151 cm, deportista), por lo que los resultados son preliminares y buscan validar el protocolo y diseño experimental, para desarrollar estudios futuros con mayor número de participantes.



Figura 4. Persona un minuto sentada sin agua.



Figura 5. Seis minutos de caminata con agua a nivel de caderas.



Figura 6. Seis minutos de caminata con agua a nivel de rodillas.



Figura 7. Vista amplia de la caminata de seis minutos.

III. RESULTADOS

A. Fase 1- Alturas críticas

Las simulaciones demostraron que las alturas críticas de inundación que producen inestabilidad, para cada velocidad de flujo, dependen del tipo de agua, la geometría del monolito, el coeficiente de fricción y la velocidad del flujo. El deslizamiento resultó, en general, el modo de inestabilidad dominante. Como se esperaba, se observó que el monolito cilíndrico es menos conservador, y que el agua dulce permite una altura mayor comparándola con el agua salada con sedimentos, situación que ocurriría en caso de tsunamis. La Tabla II muestra las alturas críticas de deslizamiento y vuelco para $v = 1$ ft/s. Se presentan los casos para $\mu = 0.8$ (alta fricción) y $\mu = 0.4$ (fricción media).

TABLA II
ALTURAS CRÍTICAS DE DESLIZAMIENTO Y VUELCO – $V = 1$ FT/S

Perfil (Geom.)	Tipo Agua	h [ft] $\mu=0.8$	h [ft] $\mu=0.4$	h [ft] vuelco
Mujer PR (Rect.)	Dulce	1.242	1.205	1.252
Mujer PR (Rect.)	Salada	1.211	1.175	1.221
Mujer PR (Rect.)	c/Sed.	1.107	1.074	1.118
Mujer PR (Cil.)	Dulce	1.596	1.562	1.598
Mujer PR (Cil.)	c/Sed.	1.423	1.393	1.427
Hombre PR (Rect.)	Dulce	1.668	1.616	1.666
Hombre PR (Rect.)	c/Sed.	1.487	1.440	1.490

Perfil (Geom.)	Tipo Agua	h [ft] $\mu=0.8$	h [ft] $\mu=0.4$	h [ft] vuelco
Hombre PR (Cil.)	Dulce	2.146	2.098	2.129
Hombre PR (Cil.)	c/Sed.	1.913	1.870	1.904
Niño Col. (Rect.)	Dulce	1.425	1.351	1.387
Niño Col. (Rect.)	c/Sed.	1.270	1.205	1.247
Niña Col. (Rect.)	Dulce	1.420	1.343	1.375
Niña Col. (Rect.)	c/Sed.	1.266	1.197	1.237

La Tabla III muestra como las alturas críticas se reducen drásticamente, comparadas con los resultados de la Tabla II, al aumentar la velocidad a 6ft/s.

Para ayudar a visualizar la variación de la altura crítica de inundación h con la velocidad de flujo (v), se desarrollaron gráficas para cada tipo de persona, cada tipo de agua, y cada modelo de tótem, incluyendo en la misma diferentes coeficientes de fricción. Las Figuras 8 a 13 son ejemplo de estas gráficas.

TABLA III
ALTURAS CRÍTICAS DE DESLIZAMIENTO Y VUELCO – $V = 6$ FT/S

Perfil (Geom.)	Tipo Agua	h [ft] $\mu=0.6$	h [ft] $\mu=0.1$	h [ft] vuelco
Mujer PR (Rect.)	Dulce	0.509	0.127	0.823
Mujer PR (Rect.)	c/Sed.	0.453	0.113	0.756
Mujer PR (Cil.)	Dulce	0.794	0.223	1.082
Mujer PR (Cil.)	c/Sed.	0.708	0.198	0.992
Hombre PR (Rect.)	Dulce	0.660	0.161	0.985
Hombre PR (Rect.)	c/Sed.	0.588	0.144	0.908
Hombre PR (Cil.)	Dulce	1.035	0.284	1.300
Hombre PR (Cil.)	c/Sed.	0.923	0.253	1.198
Niño Col. (Rect.)	Dulce	0.400	0.086	0.626
Niño Col. (Rect.)	c/Sed.	0.356	0.076	0.582
Niña Col. (Rect.)	Dulce	0.384	0.082	0.601
Niña Col. (Rect.)	c/Sed.	0.342	0.072	0.559

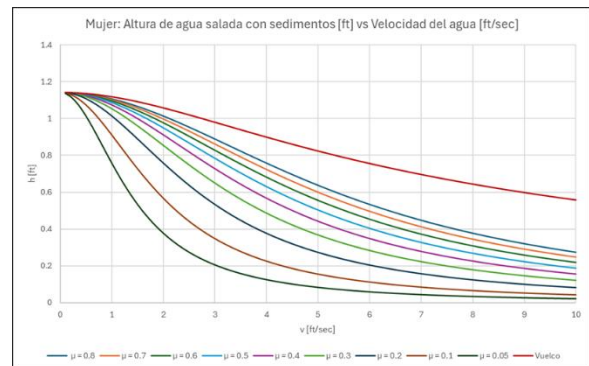


Figura 8. Mujer de PR simulada como tótem de prisma rectangular en agua salada con sedimentos.

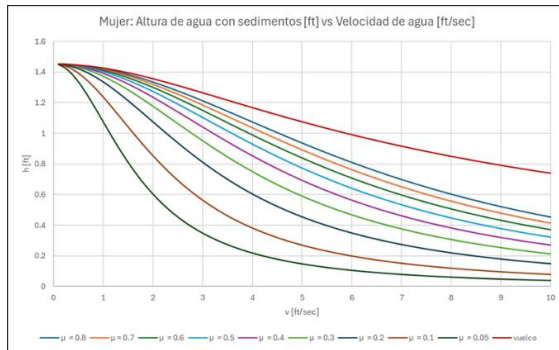


Figura 9. Mujer de PR simulada como tótem cilíndrico en agua salada con sedimentos.

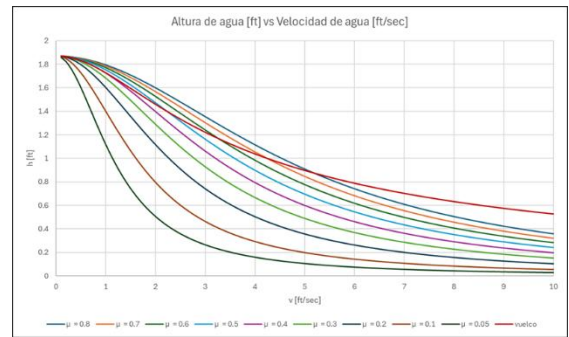


Figura 13. Niña simulada como un tótem cilíndrico en agua salada.

También se desarrollaron gráficas comparativas que permitieran analizar la diferencia de comportamiento entre modelos de monolitos, y entre diferentes personas, para determinados coeficientes de fricción. Las Figuras 14 a 16 son ejemplos de estas gráficas.

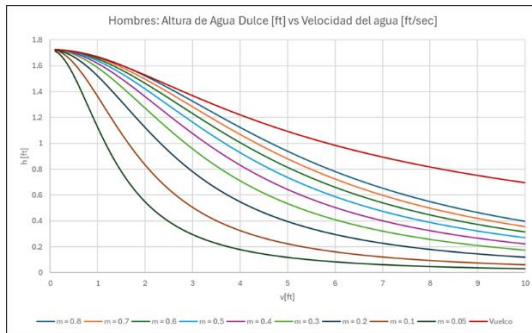


Figura 10. Hombre de PR simulado como tótem de prisma rectangular en agua dulce.

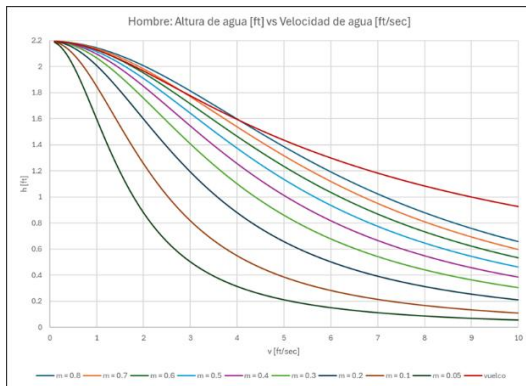


Figura 11. Hombre de PR simulado como tótem cilíndrico en agua dulce.

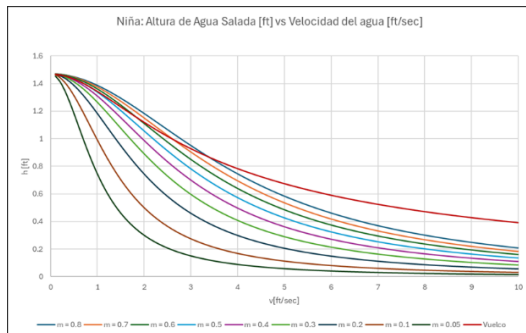


Figura 12. Niña simulada como tótem de prisma rectangular en agua salada.

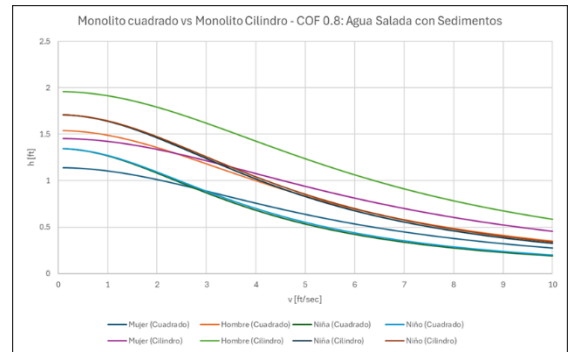


Figura 14. Comparación entre personas para agua salada con sedimentos con un coeficiente de fricción de 0.8.

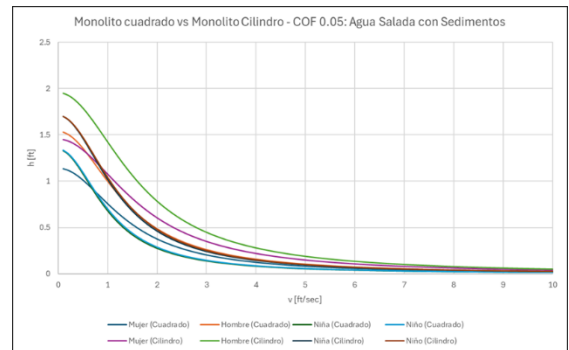


Figura 15. Comparación entre personas para agua salada con sedimentos con un coeficiente de fricción de 0.05.

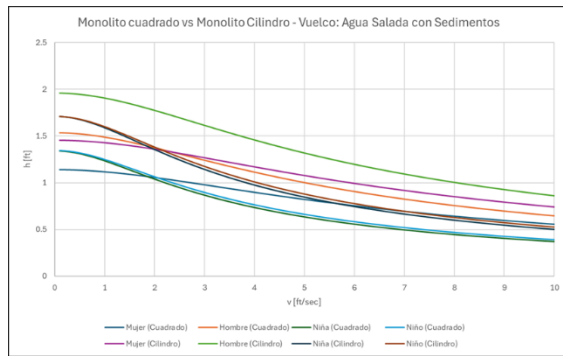


Figura 16. Comparación entre personas para agua salada con sedimentos para que ocurra vuelco.

B. Resultados Experimental – Datos por Prueba

Las tablas IV a VIII presentan los registros individuales de cada repetición por nivel de agua, incluyendo la frecuencia cardíaca (FC) inicial y final, la distancia recorrida ($Dist.$), la velocidad promedio ($Vel.$), y el consumo de oxígeno (VO_2).

TABLA IV
PRUEBA DE MARCHA SIN AGUA (CON CAFEÍNA)

Prueba	FC inicial (bpm)	Dist. (m)	Vel. (m/min)	FC final (bpm)	VO ₂ (ml/kg/min)
1	128	440.2	73.37	159	11.759
2	121	472.2	78.71	145	10.865
3	137	498.3	83.06	151	11.493
4	109	495.2	82.53	147	12.377
5	120	493.7	82.29	142	13.237
Media	123	479.9	79.99	148.8	11.946
D.E.	10.4	24.5	4.08	6.57	0.898

TABLA V
PRUEBA DE MARCHA SIN AGUA (SIN CAFEÍNA)

Prueba	FC inicial (bpm)	Dist. (m)	Vel. (m/min)	FC final (bpm)	VO ₂ (ml/kg/min)
1	116	458.9	76.49	141	12.650
2	116	490.0	81.67	139	14.609
3	114	505.9	84.32	143	14.713
4	112	510.6	85.10	142	15.305
5	120	521.5	86.92	142	17.269
Media	115.6	497.4	82.90	141.4	14.909
D.E.	2.97	24.3	4.05	1.52	1.656

TABLA VI
PRUEBA DE MARCHA CON AGUA A NIVEL DE TOBILLOS

Prueba	FC inicial (bpm)	Dist. (m)	Vel. (m/min)	FC final (bpm)	VO ₂ (ml/kg/min)
1	116	400.2	66.70	177	23.847
2	114	436.8	72.81	176	24.264
3	117	424.0	70.67	177	23.915
4	112	427.2	71.19	173	22.176
5	113	443.8	73.97	177	22.633
Media	114.4	426.4	71.07	176.0	23.367
D.E.	2.07	16.6	2.77	1.73	0.914

TABLA VII
PRUEBA DE MARCHA CON AGUA A NIVEL DE RODILLAS

Prueba	FC inicial (bpm)	Dist. (m)	Vel. (m/min)	FC final (bpm)	VO ₂ (ml/kg/min)
1	109	292.6	48.77	178	27.374
2	109	273.8	45.63	168	24.969
3	107	294.0	49.00	166	23.565
4	89	286.0	47.67	160	23.295
5	109	295.7	49.29	175	26.081
Media	104.6	288.4	48.07	169.4	25.057
D.E.	8.76	8.97	1.50	7.20	1.713

TABLA VIII
PRUEBA DE MARCHA CON AGUA A NIVEL DE CADERAS

Prueba	FC inicial (bpm)	Dist. (m)	Vel. (m/min)	FC final (bpm)	VO ₂ (ml/kg/min)
1	90	244.3	40.72	153	18.963
2	100	247.7	41.28	145	19.919
3	99	257.0	42.83	135	16.881
4	79	236.2	39.36	111	15.319
5	74	231.2	38.54	103	14.810
Media	88.4	243.3	40.55	129.4	17.178
D.E.	11.67	10.04	1.67	21.61	2.228

Estos resultados se representaron gráficamente, de manera conjunta, en la Figura 17, que presenta el consumo de oxígeno vs. velocidad promedio, y en la Figura 18, que presenta el costo de oxígeno (relación entre el VO_2 y la velocidad) vs. velocidad promedio.

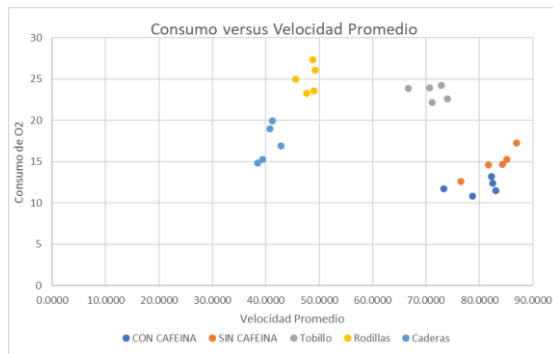


Figura 17. Relación entre consumo de oxígeno (ml/kg/min) y velocidad promedio por nivel de agua.

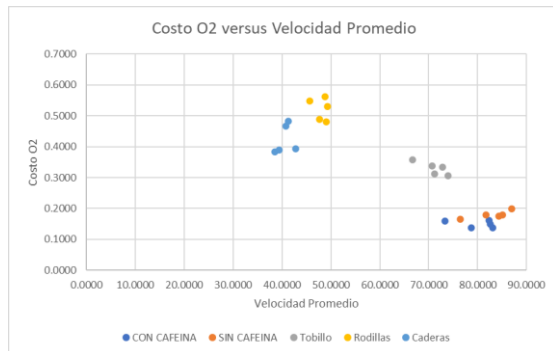


Figura 18. Relación entre costo de oxígeno (ml/kg/min) y velocidad promedio por nivel de agua.

Esta fase constituye una prueba de conceptos piloto, realizada con una sola participante (estudio de caso), lo que limita la generalización de los resultados. Sin embargo, permite validar el protocolo experimental y observar tendencias preliminares de interés. Estos resultados se utilizaron para hacer análisis estadísticos. En las tablas IX y X se muestran las diferencias significativas de la media para el consumo de oxígeno y el costo de oxígeno, respectivamente. El verde significa significativo, el amarillo cerca de ser significativo y el rojo es no significativo.

TABLA IX
DIFERENCIAS SIGNIFICATIVAS DE LA MEDIA PARA EL CONSUMO DE OXÍGENO

	Sin Agua con Café	Sin Agua sin Café	Tobillos	Rodillas	Caderas
Condiciones					
Sin Agua con Café	1	0.0126	4.15×10^{-6}	5.26×10^{-6}	0.004604
Sin Agua sin Café		1	5.73×10^{-5}	1.22×10^{-5}	0.110217
Tobillos			1	0.99281	0.002227
Rodillas				1	0.00241222
Caderas					1

TABLA X
DIFERENCIAS SIGNIFICATIVAS DE LA MEDIA PARA EL COSTO DE OXÍGENO

	Sin Agua con Café	Sin Agua sin Café	Tobillos	Rodillas	Cadera
Condiciones					
Sin Agua con Café	1	0.003686	2.71×10^{-6}	3.32×10^{-6}	0.000224
Sin Agua sin Café		1	8.89×10^{-6}	5.24×10^{-6}	9.81×10^{-5}
Tobillos			1	4.56×10^{-5}	0.006526
Rodillas				1	0.007345
Caderas					1

IV. ANALISIS Y DISCUSION DE RESULTADOS

A. Fase: Modelo Analítico

Los resultados de ambos modelos muestran que el vuelco tiende a ocurrir a alturas ligeramente mayores que el deslizamiento, lo cual indica que el deslizamiento es el modo principal de inestabilidad.

También se observa que, en ambos modelos, el coeficiente de fricción calzado-suelo es un factor determinante en la altura de agua que provoca inestabilidad a cierta velocidad de flujo.

Ambos modelos reflejan que se puede perder la estabilidad a bajas profundidades de inundación con velocidades moderadas de flujo. Por ejemplo, a velocidades de tan solo 1 ft/s, la altura crítica de deslizamiento para una niña representada como prisma en agua salada con sedimentos es de apenas 1.27 ft, lo que equivale aproximadamente a un nivel arriba de la rodilla. A 6 ft/s, esta misma altura se reduce a 0.34 ft, lo que significa que el agua arriba del nivel del tobillo es lo suficiente para causarle inestabilidad.

Como se esperaba, el agua salada con sedimentos produce alturas críticas menores en comparación a los otros tipos de agua debido a su mayor densidad ($\sim 70.0 \text{ lb/ft}^3$), que aumenta tanto la fuerza de arrastre como la de flotación. En agua dulce se observa que permite mayores alturas críticas en todos los casos.

La geometría del modelo (tótem rectangular o cilíndrico) también importa. El cilindro, con $C_d=1.2$ muestra mayor resistencia al arrastre, y menor volumen sumergido, produciendo alturas críticas mayores que el prisma rectangular ($C_d=2.2$).

Ambos modelos identifican los mismos grupos vulnerables, es decir, que se produce inestabilidad a menor altura de agua para una misma velocidad de flujo. El orden de vulnerabilidad, de mayor a menor, resultó: niñas, niños, mujer y hombre. Los infantes resultaron ser los más vulnerables debido a la relación entre su peso y su tamaño.

B) Fase Experimental

Un hallazgo principal de este estudio fue que el mayor consumo de oxígeno no ocurrió al nivel de las caderas, sino de las rodillas ($\text{VO}_2 = 25.06 \text{ ml/kg/min}$). Este resultado contradice

la hipótesis inicial de que a mayor profundidad mayor sería el esfuerzo.

Dos factores que pueden haber contribuido a este resultado son: A) El diseño del canal de marcha posibilita que el agua adquiera una velocidad estable por el movimiento confinado del peatón, creando un flujo a favor de la marcha que pudo haber colaborado a la reducción del consumo de oxígeno. B) La flotación mayor redujo el peso efectivo del cuerpo de la participante, aliviando la carga muscular en las extremidades inferiores, lo cual contribuiría a reducir el consumo absoluto de oxígeno. Esta reducción del peso efectivo es significativa; la literatura indica que una persona sumergida hasta la sínfisis púbica siente menos del 40% de su peso, al nivel del ombligo el cuerpo solo siente como el 50% de su peso y si el agua llega a nivel del apéndice xifoides, el cuerpo siente menos del 60% de su peso [5].

El costo de oxígeno fue también máximo en rodillas (0.521 ml/kg/m), seguido por las caderas, que fue de 0.423 ml/kg/m. Esto indica que, aunque el cuerpo gasta menos O_2 por minuto al caminar con el agua de caderas, el costo energético por metro recorrido sigue siendo alto, lo que en un desalojo real de tiempo limitado provocará que se alcance una menor distancia.

También se pudo observar que la velocidad promedio disminuyó con el agua en las caderas, lo cual es un factor que afecta negativamente los procesos de desalojo.

La observación cualitativa durante de las pruebas apoyó los hallazgos encontrados. En el nivel de rodillas la persona evaluada experimentó fatiga notable en la musculatura de los cuádriceps e isquiotibiales y comenzó a caminar con las piernas más separadas de lo normal para realizar pisadas en zigzag, ya que había tramos que sentía resbalosos. A nivel de caderas, reportó que se sentía cómoda y se observó una corriente de agua a favor de su dirección de marcha. Se debe considerar que el experimento se realizó en solo una participante que tenía buena condición física (24 años, 48.5 kg de peso, 151 cm de estatura, deportista). En las pruebas sin agua se tomaron observaciones con cafeína y sin cafeína, ya que la primera prueba se hizo luego de un desayuno en el que se consumió café. En estas pruebas se observó una frecuencia cardíaca alta de 137 bpm, que podría atribuirse a la cafeína, o posiblemente también por la ansiedad del primer día de pruebas. Se tomaron en cuenta estos datos para propósitos de análisis y para futuros trabajos. Todas las otras pruebas fueron realizadas sin cafeína para tener una frecuencia cardíaca estable. Estos factores deben tenerse en cuenta al generalizar los resultados a la población.

V. CONCLUSIONES, RECOMENDACIONES Y TRABAJOS FUTUROS

No se encontraron estudios previos de estabilidad para peatones de Puerto Rico en condiciones de inundación. Los modelos de tótem propuestos son conservadores, pero permiten observar resultados que se consideran significativos, como:

- a) El deslizamiento, no el vuelco, dominan la estabilidad
- b) El coeficiente de fricción es un parámetro crítico

- c) Incluso bajas alturas de inundación pueden producir inestabilidad a velocidades de flujo moderados
- d) Las condiciones de inundación por tsunamis, por la densidad mayor del agua, produce situaciones más críticas de inestabilidad
- e) Los niños son la población más vulnerable, llegando a inestabilidad a menores alturas de inundación.
- f) También se observó que las mujeres pueden ser vulnerables a velocidades de agua bastante bajas.

Estos resultados permiten recomendar que las rutas de evacuación en caso de tsunamis deben estar pavimentadas con superficies que provean alta fricción. Además, en las escuelas, donde se concentran las poblaciones más vulnerables, debe recomendarse usar calzados de alta fricción sobre los pavimentos de estas rutas de desalojo. La combinación de calzado y superficie adecuada puede salvar vidas en desalojos horizontales bajo condiciones de inundación.

Se recomienda como trabajo futuro refinar los modelos, por ejemplo, modelando el cuerpo del peatón con todas sus características antropométricas, y en diferentes posiciones de marcha, dentro de programas de mecánica de fluidos computacional. También es recomendable desarrollar estudios antropométricos de la población infantil de Puerto Rico que permitan hacer estudios más refinados dirigidos a la población escolar.

En cuanto al esfuerzo físico, se propuso un diseño experimental original que permitió ejecutar una "caminata infinita" simulada. El mayor consumo de oxígeno al caminar en una inundación resultó cuando el agua llega a nivel de las rodillas y no cuando llega a las caderas. Este resultado se atribuyó al efecto de la flotación, que reduce el peso efectivo del cuerpo, y al efecto de la corriente a favor de la marcha generada por el canal. Es importante resaltar que, aunque el esfuerzo a nivel de cadera resultó menor, la velocidad para desplazarse también fue menor. Por lo que se puede concluir que a mayor profundidad, menor velocidad: la velocidad disminuye progresivamente a medida que sube el nivel del agua.

El análisis estadístico (ANOVA) confirma que existen diferencias significativas entre casi todas las condiciones que fueron evaluadas. Lo cual corrobora que las condiciones de inundación pueden tener un impacto significativo en las posibilidades fisiológicas de emprender un desalojo en condiciones de inundación. Y que las mismas deberían considerarse para ver si un desalojo horizontal es viable, o si se deben contemplar otras alternativas, como el desalojo vertical.

Los resultados obtenidos en esta fase inicial permitieron validar el diseño experimental propuesto, evidenciando que el protocolo es capaz de capturar diferencias significativas en el consumo de oxígeno y en el comportamiento de la marcha bajo distintos niveles de inundación. Esto demuestra que la metodología es adecuada y efectiva para estudiar el proceso de fatiga fisiológica en condiciones simuladas de desalojo, lo que justifica su ampliación a un mayor número de participantes.

Con el fin de superar la limitación del tamaño de pruebas de esta prueba piloto, actualmente hay otra estudiante participando del “Undergraduate Research Program for Honor and Outstanding Students URP-HOS” dando continuidad a esta parte de la investigación.

Su enfoque primario es ampliar los estudios experimentales, incluyendo un mayor número de estudiantes en el estudio, y haciendo un análisis observacional (cuestionario de “Observational Gait Analysis” – OGA [6]) y aproximación a la cinemática de miembros inferiores (vía medición de ángulos con el software KINOVEA) sobre videos a dos planos (sagital y coronal). También se espera que estudios posteriores del URP-HOS puedan evaluar posibles mecanismos para introducir corrientes de velocidad controlada a favor y en contra de la marcha dentro del experimento diseñado, lo que permitiría en estudios futuros, cuantificar el efecto de la velocidad del agua. Finalmente, se recomienda en un futuro extender el estudio a una población más diversa, incluyendo personas de distintas edades, pesos, estaturas y condiciones físicas.

AGRADECIMIENTOS

Se le agradece al Dr. Gustavo Pacheco-Crosetti por proponer y guiar este proyecto; al Prof. Ricardo J. Bravo Pérez por su guía y apoyo en la fase experimental; a la Universidad Politécnica de Puerto Rico y al programa URP-HOS por el respaldo económico y los equipos; y a mi familia por el apoyo incondicional.

REFERENCIAS

- [1] G. Pacheco-Crosetti, O. Collazos-Ordóñez, V. Torres-Rodríguez, and J. Cohen-Vázquez, "Vulnerability of schools in Puerto Rico to tsunamis," *Revista Internacional de Desastres Naturales, Accidentes e Infraestructura Civil*, vol. 22, no. 4, 2022. [Online]. Available: https://www.scipedia.com/public/Pacheco-Crosetti_et_al_2022a
- [2] S. N. Jonkman and E. Penning-Rowsell, "Human Instability in Flood Flows1," *JAWRA Journal of the American Water Resources Association*, vol. 44, no. 5, pp. 1208–1218, Oct. 2008, doi: <https://doi.org/10.1111/j.1752-1688.2008.00217.x>.
- [3] Z. R. Toro Ramos and M. A. Henrich Saavedra, "Anthropometric table for the Puerto Rican industrial population," *Computers & Industrial Engineering*, vol. 33, no. 1–2, pp. 213–216, May 1998, doi: [https://doi.org/10.1016/S0360-8352\(97\)00077-6](https://doi.org/10.1016/S0360-8352(97)00077-6).
- [4] R. Avila-Chaurand, L. R. Prado-León, and E. L. González Muñoz, *Dimensiones antropométricas de población latinoamericana: México, Cuba, Colombia, Chile*, Guadalajara, México: Universidad de Guadalajara, 2007.
- [5] B. E. Becker, "Aquatic therapy: Scientific Foundations and Clinical Rehabilitation Applications," *PM & R: the Journal of injury, function, and Rehabilitation*, vol. 1, no. 9, pp. 859–72, 2009, doi: <https://doi.org/10.1016/j.pmrj.2009.05.017>.
- [6] M. Rupcich, R. Bravo, and M. Cerrolaza, *Análisis Clínico y Biomecánico de la Marcha Humana*, Caracas, Venezuela: Editorial del Centro Médico Docente La Trinidad, 2023, pp. 121–129.
- [7] S. R. Abt, R. J. Wittier, A. Taylor, and D. J. Love, "Human stability in a high flood hazard zone," *Journal of the American Water Resources Association*, vol. 25, no. 4, pp. 881–890, Aug. 1989, doi: <https://doi.org/10.1111/j.1752-1688.1989.tb05404.x>.
- [8] C. Arrighi, H. Oumeraci, and F. Castelli, "Hydrodynamics of pedestrians' instability in floodwaters," *Hydrology and Earth System Sciences*, vol. 21, no. 1, pp. 515–531, Jan. 2017, doi: <https://doi.org/10.5194/hess-21-515-2017>.
- [9] C. Dias, N. Abd Rahman, and A. Zaiter, "Evacuation under flooded conditions," *International Journal of Disaster Risk Reduction*, vol. 58, Art. no. 102192, May 2021, doi: <https://doi.org/10.1016/j.ijdrr.2021.102192>.
- [10] EcoExploratorio: Museo de Ciencias de Puerto Rico, "¿Qué es un tsunami?," 2024. [Online]. Available: <https://ecoexploratorio.org>.
- [11] R. Harrison, M. Hillman, and S. Bulstrode, "Loading of the Lower Limb when Walking Partially Immersed: Implications for Clinical Practice," *Physiotherapy*, vol. 78, no. 3, pp. 164–169, Mar. 1992, doi: [https://doi.org/10.1016/s0031-9406\(10\)61377-6](https://doi.org/10.1016/s0031-9406(10)61377-6).
- [12] K. Masumoto and J. A. Mercer, "Biomechanics of Human Locomotion in Water," *Exercise and Sport Sciences Reviews*, vol. 36, no. 3, pp. 160–169, Jul. 2008, doi: <https://doi.org/10.1097/jes.0b013e31817bfe73>.
- [13] M. K. Mohamed, A. M. Samy, and W. Y. Ali, "Friction Coefficient of Rubber Shoe Soles Sliding Against Ceramic Flooring," *KGK rubberpoint*, vol. 64, no. 4, pp. 44–49, Apr. 2011, Available: https://www.researchgate.net/publication/288729646_Friction_Coefficient_of_Rubber_Shoe_Soles_Sliding_Against_Ceramic_Flooring