

Resumen

Este estudio evalúa la estabilidad y movilidad de peatones en inundaciones por tsunami. Se analizó el impacto de la profundidad y la velocidad del agua (Fase 1) y el esfuerzo físico durante caminatas con espirómetro (Fase 2). Los resultados destacan la importancia del acondicionamiento físico, el uso de calzado adecuado, y que la inestabilidad puede producirse con bajos niveles de agua, aun cuando la velocidad del flujo es moderada.

Introducción

Puerto Rico está ubicado en una zona de alta actividad sísmica. En 1918, un tsunami impactó Aguadilla pocos minutos después de un terremoto de magnitud 7.3, causando múltiples muertes (EcoExploratorio, s.f.; RSPR, s.f.). Estudios recientes indican que un tsunami local deja menos de 20 minutos para evacuar (Pacheco-Crosetti et al., 2022). Este estudio busca establecer condiciones seguras para caminar en inundaciones y apoyar mejoras en los planes de desalojo y en los preparativos de la población ante este tipo de estos eventos.

Objetivos

Fase 1:

- Desarrollar un modelo analítico para evaluar la estabilidad del peatón ante fuerzas hidrodinámicas (arrastre, flotación, fricción).
- Identificar combinaciones de profundidad y velocidad donde ocurre deslizamiento o vuelco.

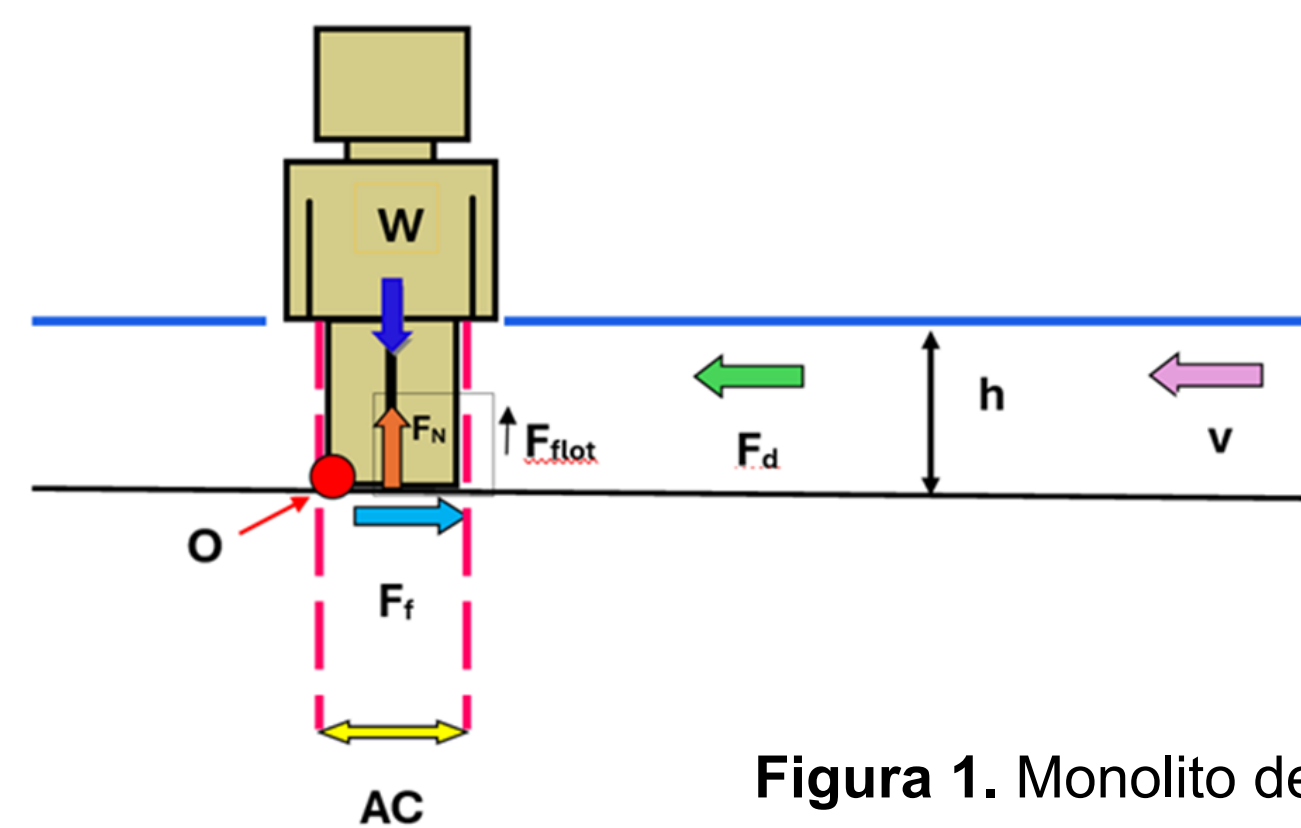
Fase 2:

- Evaluar la capacidad respiratoria y física de un peatón al caminar bajo diferentes niveles de agua.
- Analizar el consumo de oxígeno, la velocidad y la distancia durante caminatas simuladas para evacuar.

Metodología

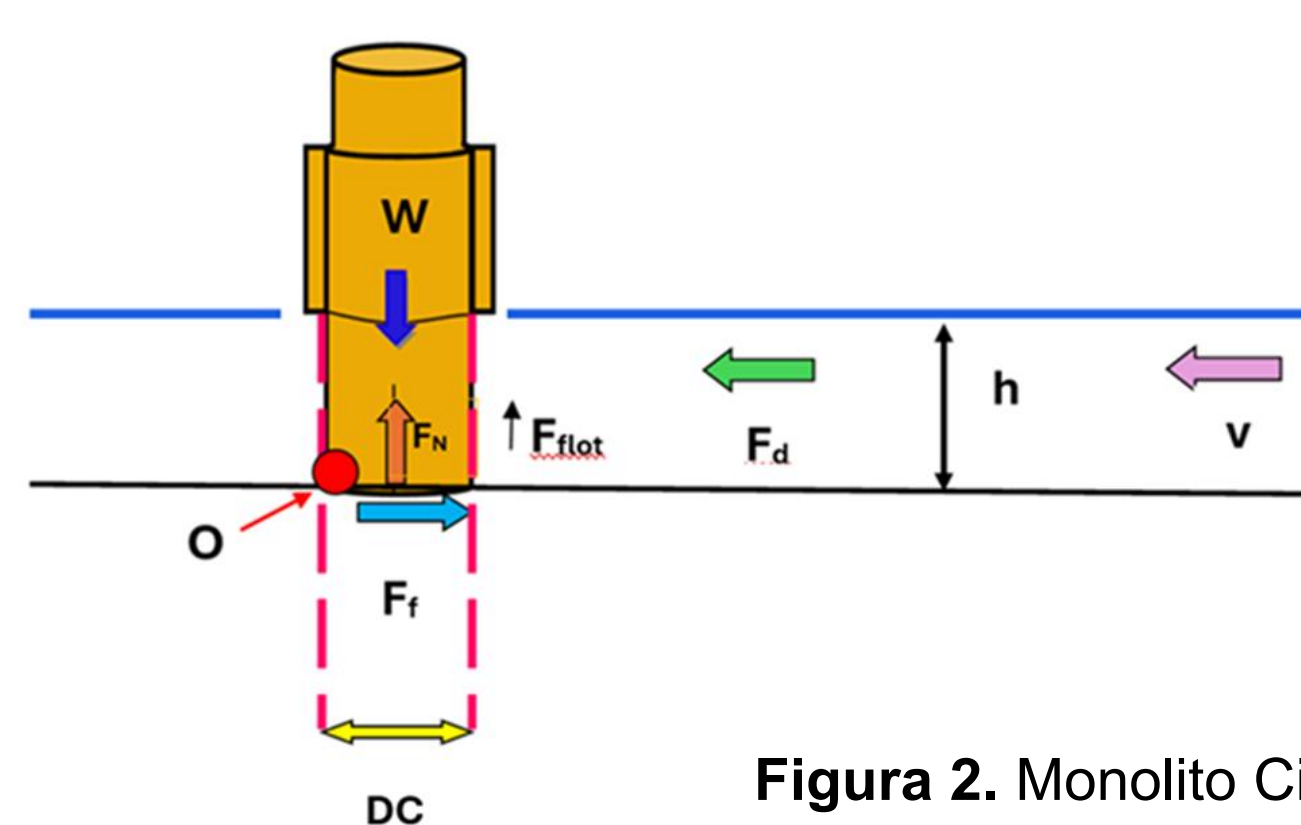
Fase 1: Modelo Analítico

- Desarrollo y evaluación de dos tótems simulando una persona como:



Fuerzas actuantes:
peso (W), fricción (F_f),
arrastre (F_d), flotación (F_{flot}), normal (F_N)

Figura 1. Monolito de prisma rectangular.

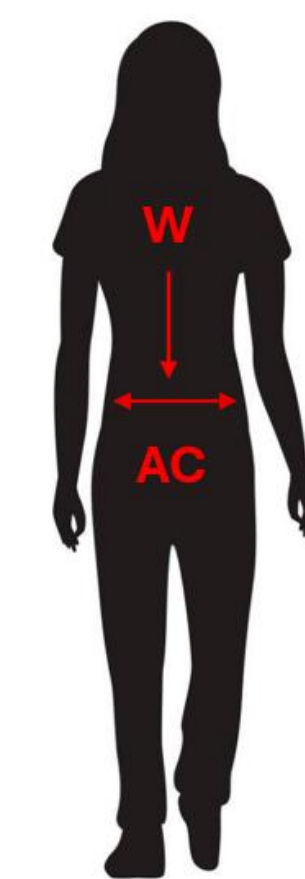


Otros parámetros:
velocidad (v), altura de
agua (h), ancho o
diámetro de caderas
(AC o DC), punto de
pivote (O), aceleración
de la gravedad (g),
peso unitario (γ),
coeficiente de fricción
(μ), coeficiente de
arrastre (C_d)

Figura 2. Monolito Cilíndrico.

Metodología

- Se recopilaron datos antropométricos de PR (adultos) y Colombia (niños de 6 años)



Niños:
Ancho de Caderas (AC): 0.74 ft
Peso (W): 51.51 lb

Niñas:
AC: 0.7 ft
W: 46.08 lb

Mujer:
AC: 1.21 ft
W: 145.68 lb

Hombre:
AC: 1.27 ft
W: 173.57

- Se evaluaron tres tipos de agua:
 - Agua Dulce: 62.4 lb/ft³
 - Agua Salada: 64.0 lb/ft³
 - Agua Salada con Sedimentos: 70.0 lb/ft³
- Se desarrollaron ecuaciones de equilibrio de fuerzas y momentos para evaluar estabilidad.
- Se determinó la altura de agua que producía la inestabilidad para cada velocidad del agua.

Planteamiento de ecuaciones de equilibrio:

- Ejemplo de Ecuaciones de Altura Crítica (h) para el modelo de Cilindro, por deslizamiento y vuelco
- Deslizamiento

$$h = \frac{gW\mu}{\frac{1}{2}C_d\gamma_w v^2 Dc + g\gamma_w \frac{\pi Dc^2}{4} \mu}$$

- Vuelco

$$h = \frac{-g\gamma_w * \pi Dc^3 \pm \sqrt{(g\gamma_w * \pi Dc^3)^2 - 4(2C_d\gamma_w v^2 Dc)(-4gW * Dc)}}{2(2C_d\gamma_w v^2 Dc)}$$

Fase 2: Estudio Experimental

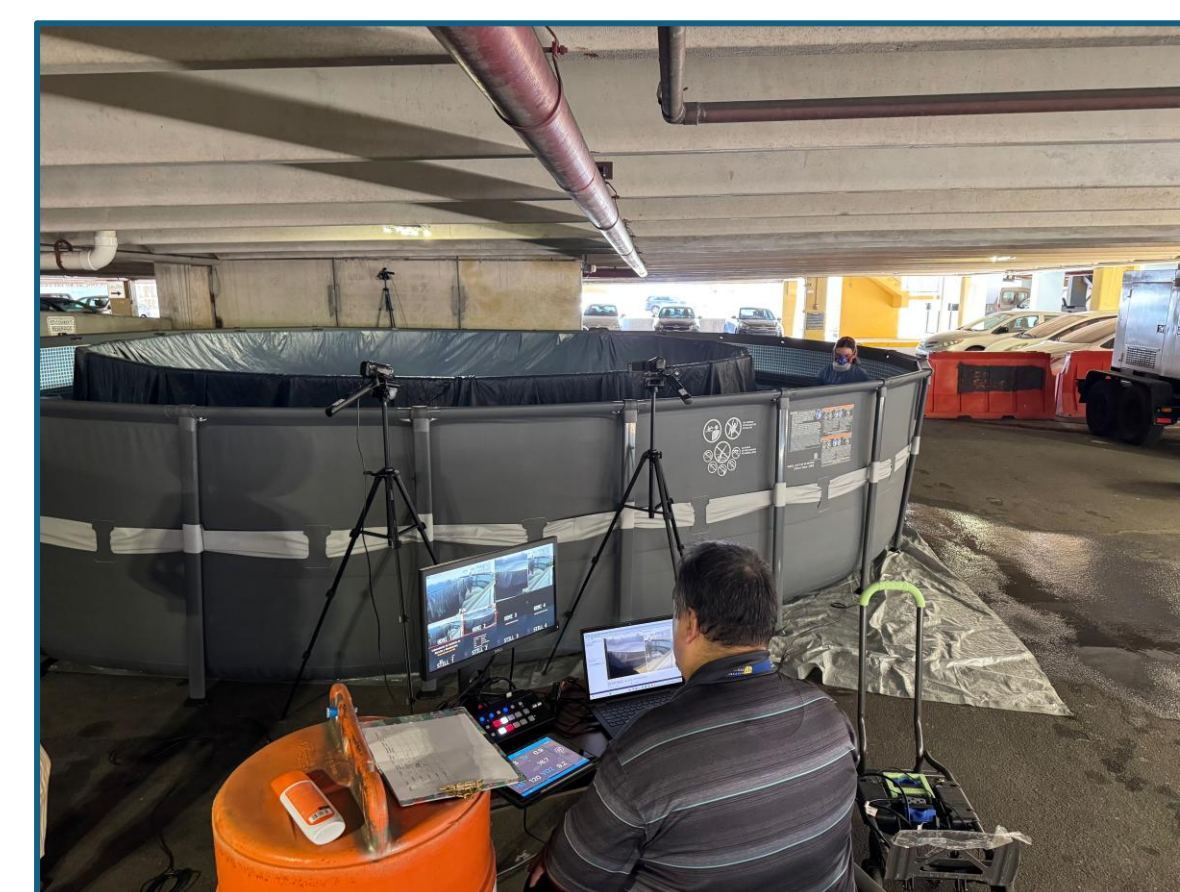


Figura 3. Montaje de piscinas y cámaras.



Figura 4. Calibración de equipo VO₂ Master (A y B), un minuto sentada (C) y un minuto de pie (D).



Figura 5. Marcha de 6 minutos a distintos niveles de inundación (A) Sin Agua, (B) Tobillos, (C) Rodillas y (D) Caderas. 5 repeticiones c/u.

Análisis de Resultados

Fase 1: Modelo Analítico

- Las ecuaciones obtenidas para la altura crítica de agua que produce inestabilidad se representaron gráficamente según cada velocidad de flujo, tótem, sujeto y tipo de agua, variando además el coeficiente de fricción entre el calzado y el suelo (con datos obtenidos de la literatura).

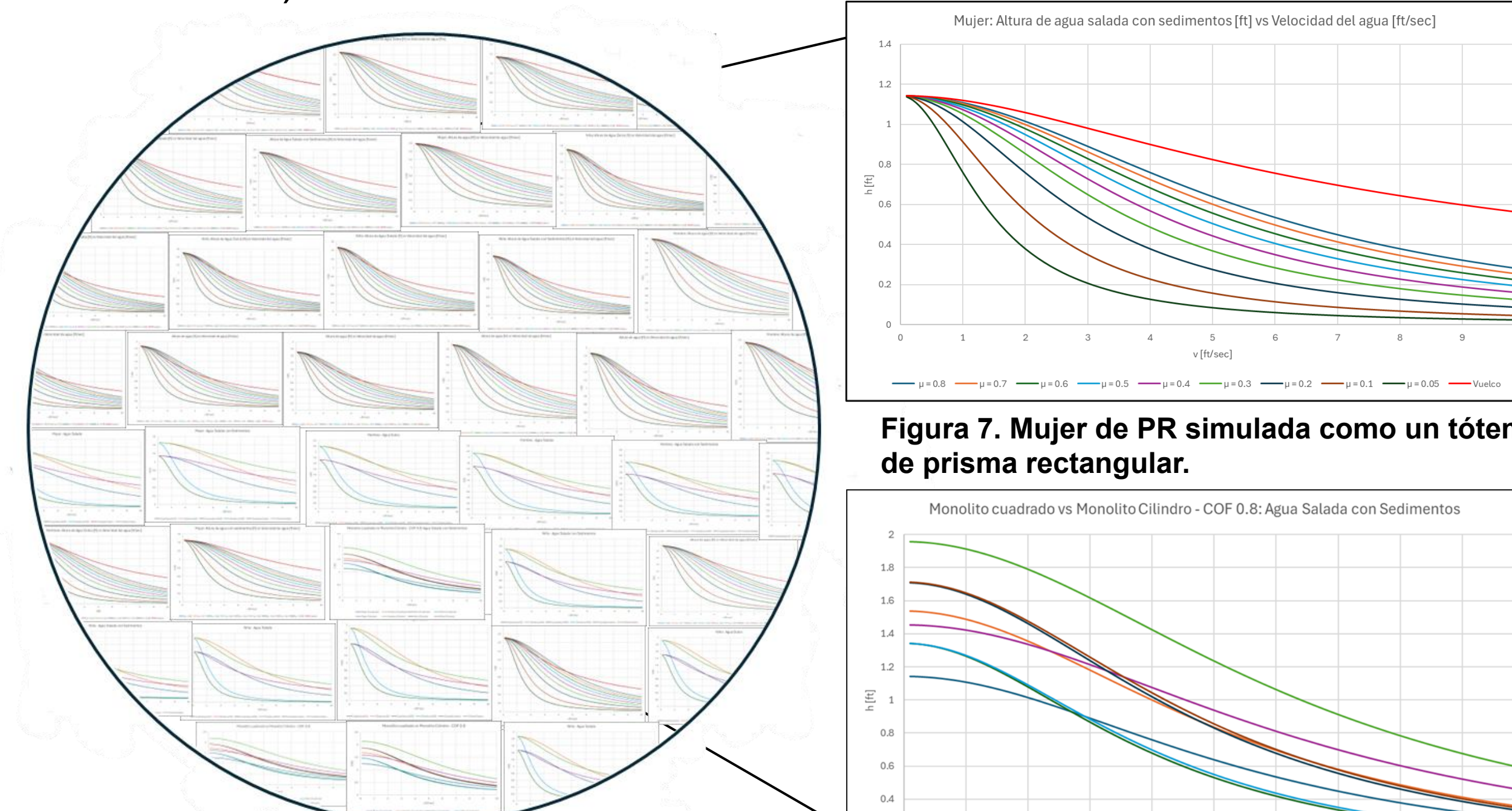


Figura 6. Vista parcial de la serie de gráficas de análisis individual por sujeto (48), y de las gráficas comparativas entre ellos (21), desarrolladas para analizar los resultados.

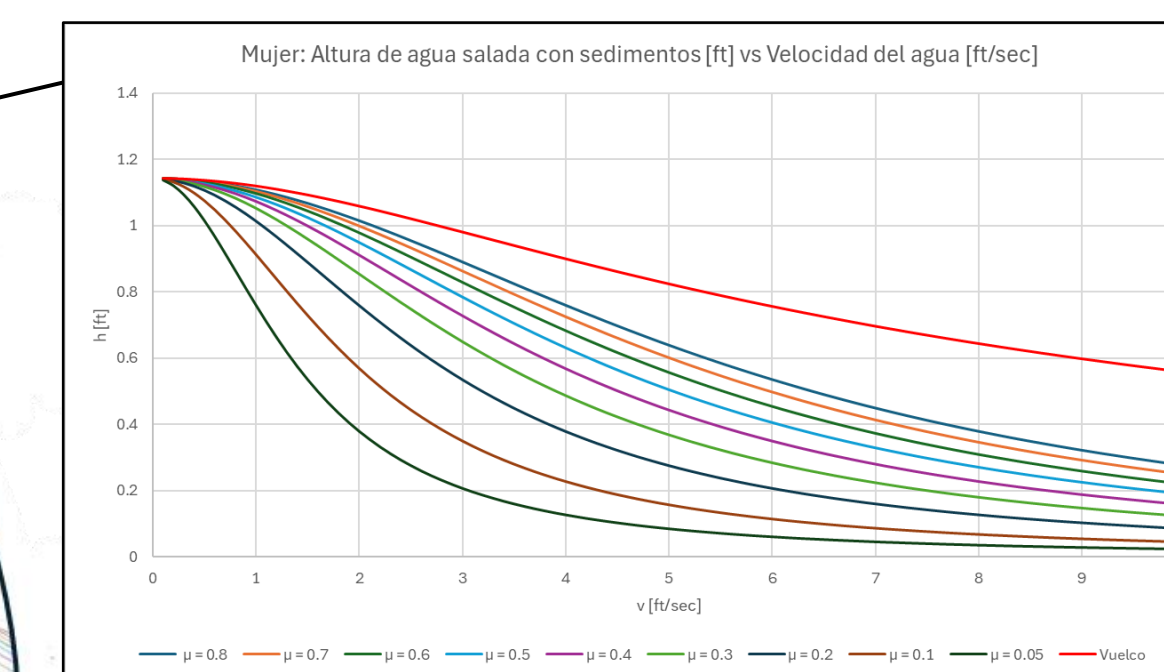


Figura 7. Mujer de PR simulada como un tótem de prisma rectangular.

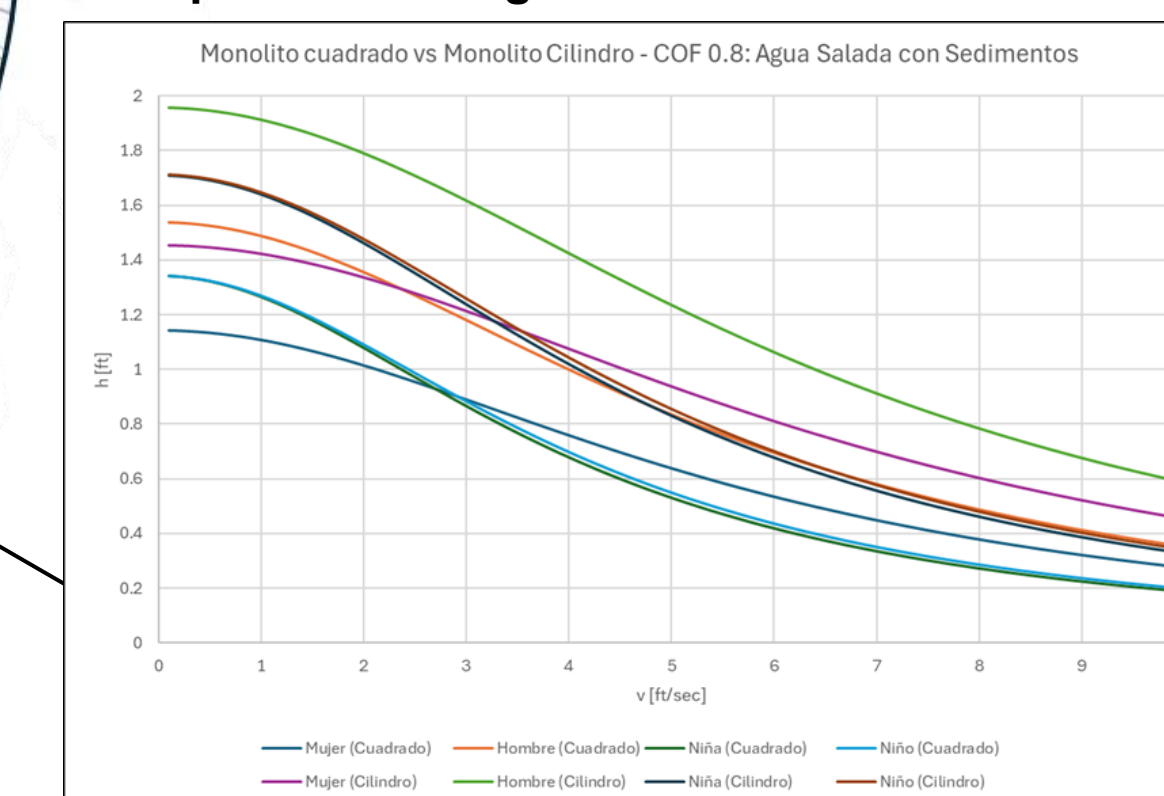


Figura 8. Curvas de altura crítica vs. Velocidad para deslizamiento con $\mu = 0.8$

- El deslizamiento fue la causa más común de inestabilidad; en niños también hubo vuelco a baja velocidad.
- Incluso con poca profundidad de agua y velocidad moderada (1 ft/s), existe riesgo de inestabilidad.
- Niños y niñas fueron más vulnerables a velocidades medias y altas; las mujeres, a velocidades muy bajas.
- El coeficiente de fricción calzado-suelo es un parámetro crítico.

Fase 2: Modelo Experimental

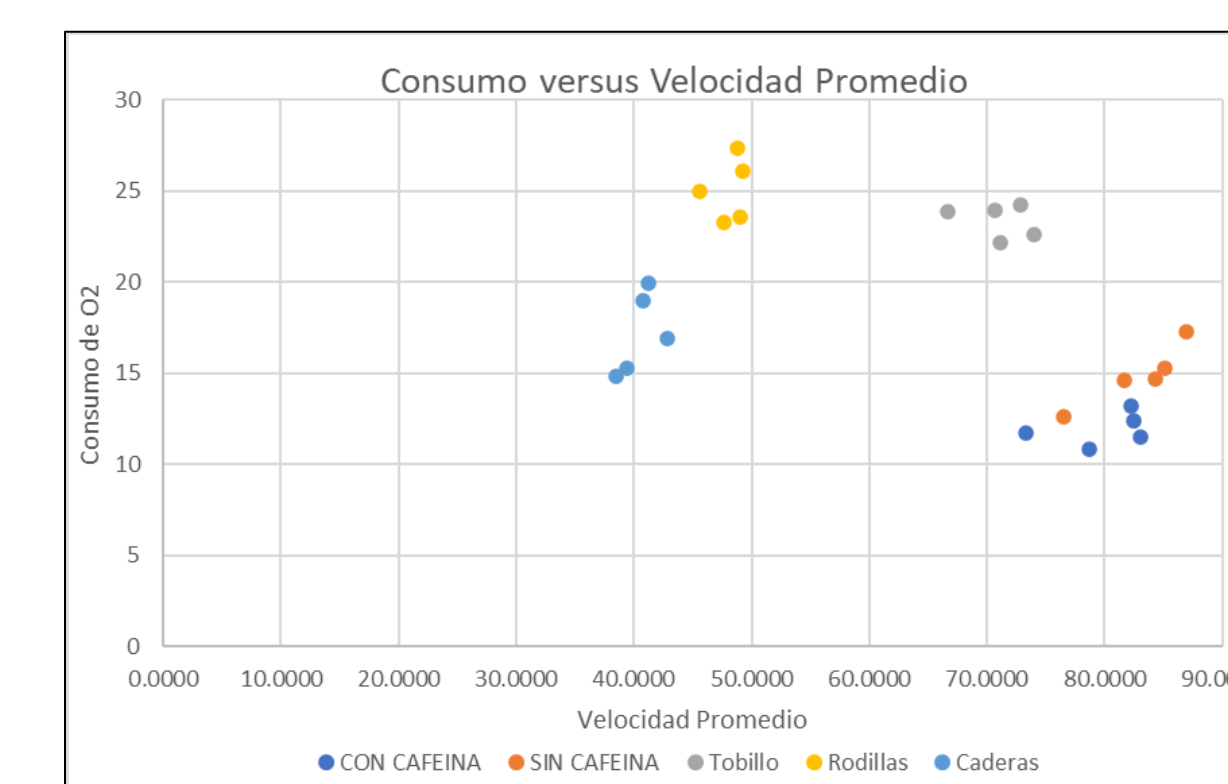


Figura 9. Relación entre consumo de oxígeno (ml/kg/min) y velocidad promedio por nivel de agua.

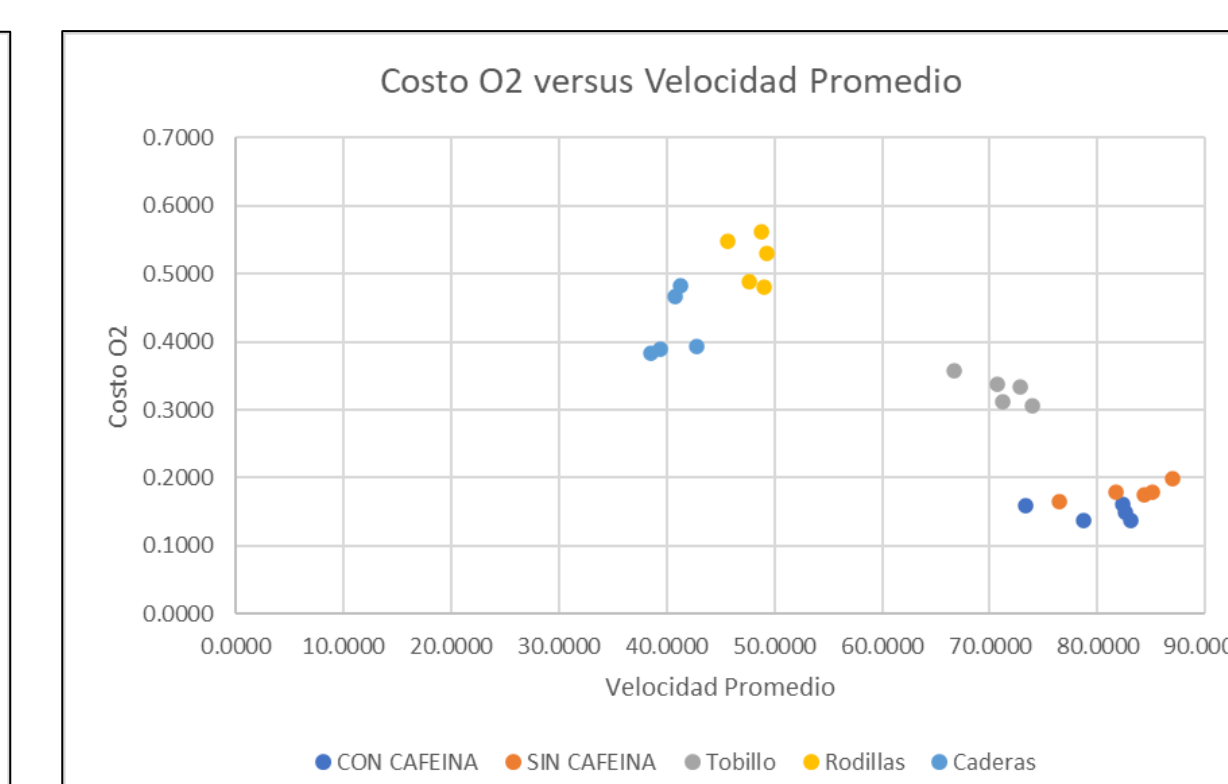


Figura 10. Relación entre costo de oxígeno (ml/kg/min) y velocidad promedio por nivel de agua.

Condiciones	Sin Agua con Café	Sin Agua sin Café	Tobillos	Rodillas	Caderas
Sin Agua con Café	1	0.0126	4.15 x 10 ⁻⁶	5.26 x 10 ⁻⁶	0.004604
Sin Agua sin Café		1	1.57 x 10 ⁻⁵	1.22 x 10 ⁻⁵	0.110217
Tobillos			1	0.99281	0.002227
Rodillas				1	0.00241222
Caderas					1

Figura 11. Tabla de diferencias significativas de la media para el consumo de O₂.

Condiciones	Sin Agua con Café	Sin Agua sin Café	Tobillos	Rodillas	Cadera
Sin Agua con Café	1	0.003686	2.71 x 10 ⁻⁶	3.32 x 10 ⁻⁶	0.000224
Sin Agua sin Café		1	1.89 x 10 ⁻⁶	5.24 x 10 ⁻⁶	9.81 x 10 ⁻⁵
Tobillos			1	1.456 x 10 ⁻⁵	0.006526
Rodillas				1	0.007345
Caderas					1

Legenda:
● Significativo
● No significativo
● No significativo, pero cerca.

Figura 12. Tabla de diferencias significativas de la media para el costo de O₂.

- Al aumentar el nivel del agua, la velocidad de traslado disminuyó y el esfuerzo aumentó hasta el nivel de rodillas.
- El costo de oxígeno mostró diferencias significativas en todas las comparaciones.
- En consumo de O₂, la mayoría de las diferencias fueron significativas, excepto dos.
- Aunque con el agua a la altura de la cadera se caminó más lento, el consumo de O₂ no fue tan alto, posiblemente por el efecto de flotación, y porque se generó una corriente estable de agua.

Conclusión y Recomendaciones

- El riesgo de deslizamiento y vuelco aumenta con mayor profundidad, velocidad del flujo y baja fricción calzado-suelo, especialmente en niños y en agua salada con sedimentos. (F1)
- Caminar con el agua a nivel de rodillas o tobillos exige más esfuerzo; a nivel de caderas, el avance es más lento aunque el consumo de oxígeno fue menor de lo esperado, esto puede afectar en la evacuación. (F2)
- Se recomienda:
 - Usar calzado con buen coeficiente de fricción.
 - Seguir refinando los modelos que representan las personas. Usar programas de CFD.
 - Capacitar a comunidades para caminar en agua.
 - Ampliar pruebas con personas de distintas edades y condiciones.
 - Utilizar motores para generar corrientes a favor y en contra, con el fin de evaluar mejor el esfuerzo físico a la hora de evacuar.

Nota: (F1) = Fase 1, (F2) = Fase 2

Agradecimientos

Gracias al Dr. Gustavo Pacheco-Crosetti por proponer el proyecto y brindarme su guía, al Prof. Ricardo Bravo por compartir sus conocimientos y su guía, a mi familia por su apoyo, al programa URP-HOS por el respaldo y los equipos, y a la Ing. Mayralis Camacho y su equipo por su ayuda en el montaje de las piscinas.

Referencias Parciales

- Avila-Chaurand, R., Prado-León, L. R., & González-Muñoz, E. L. (2007). *Dimensiones antropométricas de población latinoamericana: México, Cuba, Colombia, Chile*. Avila Chaurand, L. R., Prado León, E. L., & González Muñoz, E. L.
- EcoExploratorio: Museo de Ciencias de Puerto Rico. (s.f.). *¿Qué es un tsunami?* <https://ecoexploratorio.org/amenazas-naturales/tsunami/que-es-un-tsunami/>
- Pacheco-Crosetti, G., Collazos-Ordóñez, O., Torres-Rodríguez, V., & Cohen-Vázquez, J. (2022). Vulnerability of schools in Puerto Rico to tsunamis. *International Journal on Natural Disasters, Accidents and Civil Infrastructure (RIDNAIC)*, 22(4). https://www.scipedia.com/public/Pacheco-Crosetti_et_al_2022a
- Toro Ramos, Z. R., & Henrich Saavedra, M. A. (1997). Anthropometric table for the Puerto Rican industrial population. *Computers & Industrial Engineering*, 33(1-2), 213–216. [https://doi.org/10.1016/s0360-8352\(97\)00077-6](https://doi.org/10.1016/s0360-8352(97)00077-6)