

Evaluación de la Peligrosidad en Peatones por Inundaciones Urbanas

Miller Ardila Sánchez

Monografía para optar por el Título de: Ingeniero Civil

Universidad de Pamplona

Facultad de Ingenierías Y Arquitectura

Programa de Ingeniería Civil

Pamplona Colombia

2024

Evaluación de la Peligrosidad en Peatones por Inundaciones Urbanas

Miller Ardila Sánchez

Monografía para optar por el Título de: Ingeniero Civil

Director

Msc. Diego Iván Sánchez Tapiero

Universidad de Pamplona

Facultad de Ingenierías Y Arquitectura

Programa de Ingeniería Civil

Pamplona Colombia

2024

Dedicatoria

A Dios por brindarme sabiduría, fortaleza y guiarme a lo largo de mi trayectoria académica.

A mis padres, Adienid Sánchez Londoño, German Alexi Estupiñán y a toda mi familia quienes han sido mi mayor apoyo y motivación a lo largo de esta travesía. Su amor incondicional y aliento constante han sido la luz que ha iluminado mi camino.

A mi suegra Rosa Edith Guevara, su apoyo va más allá de las palabras y siempre estaré agradecido de tenerla como parte de mi vida y de mi familia.

A mi compañera de vida, Alejandra Salazar, su confianza en mis capacidades han sido parte fundamental en cada paso del camino. Su compañía ha sido mi fuente de inspiración y motivación, recordándome constantemente que puedo lograr todo lo que me proponga.

Agradecimientos

Agradezco a Dios, por guiarme cada día y haberme ayudado a culminar de manera satisfactoria este logro.

A la Universidad de Pamplona y a todos los profesores que contribuyeron en este proceso. Cada uno de ustedes desempeñó un papel crucial en este logro y siempre estaré agradecido por su constante respaldo.

Al Ingeniero Diego Francisco Sanabria Sepúlveda por su valiosa orientación y apoyo incondicional durante todo el proceso académico.

Por ultimo pero no menos importante al Msc. Diego Iván Sánchez, mi tutor de monografía, por su dedicación, orientación y valiosos aportes, los cuales han enriquecido significativamente mi trabajo. Su experiencia y compromiso fueron cruciales para el éxito del proyecto.

Tabla de Contenido

Dedicatoria.....	3
Agradecimientos	4
Resumen.....	12
Abstract	13
Introducción	14
Capítulo I	15
1.1 Inundaciones Urbanas	15
1.2 Inundación.....	15
1.2.1 Las Inundaciones Repentinas.....	16
1.2.2 Inundaciones Lentas.....	18
1.3 Principales Causas de las Inundaciones	19
1.3.1 Causas Naturales.....	20
1.3.2 Causas Antrópicas.....	24
1.4 Impacto de las Inundaciones	26
1.5 Inundaciones Urbanas	28
Capítulo 2.....	31
2.1 Peligrosidad en Peatones por Inundaciones	31
2.2 Concepto de Peligrosidad.....	31

2.3	Inundaciones Pluviales.....	32
2.4	Inundaciones Fluviales.....	33
2.5	Inundaciones Costeras.....	35
2.6	Inundaciones Lacustres	37
2.7	Inundaciones por Rompimiento de Presas	38
	Capítulo 3.....	40
3.1	Parámetros de Evaluación	40
3.2	Parámetros de Valoración de Peligrosidad Vial Basados en la Profundidad Máxima Permitida (Y).	41
3.2.1	Parámetro de Denver (Colorado, EE.UU.) (1969).....	41
3.2.2	Parámetros de la Comisión Nacional de Transporte de Sudáfrica.....	42
3.2.3	Parámetro de la Ciudad de Mendoza (1999).....	43
3.3	Parámetros para evaluar los riesgos en la seguridad de las personas, basados en consideraciones combinadas de la profundidad (Y) y la velocidad (V).	44
3.3.1	Parámetro (Fema) (1979).....	44
3.3.2	Parámetro de Abt et al. (1989).....	45
3.3.3	Parámetro de Témez (1992).....	47
3.3.4	Parámetro de Liguria (1993).....	49
3.3.5	Parámetros de Peligro de Inundaciones por fractura de Presas en Estados Unidos (1988) y España (1996).....	51

3.3.6	Parámetro del Condado de Clark (Las Vegas, EE.UU.) (1999)	54
3.3.7	Parámetro Nanía (1999).....	57
3.3.8	Parámetro del Consejo de Agricultura y Gestión de Recursos de Australia y Nueva Zelanda (ARMC) (2000).....	60
3.3.9	Parámetro de RESCDAM (2000)	62
3.3.10	Parámetro de Estabilidad de Gómez (2001)	65
3.3.11	Parámetro de Kelman (2002).....	67
3.3.12	Parámetro de Ramsbottom et al. (2006)	69
3.3.13	Parámetro Suizo (2004)	71
3.3.14	Parámetro de la jurisdicción de Infraestructura, Organización y Elementos Naturales de la administración de Nueva Gales del Sur (Sídney, Australia) (2005).....	71
3.3.15	Parámetro del Plan de Saneamiento De Barcelona. CLABSA (2006)	73
3.3.16	Parámetro de Russo (2009).....	74
3.3.17	Parámetro de Australian Rainfall and Runoff (2010).....	79
3.3.18	Análisis de Ávila & Ávila (2016)	79
3.3.19	Análisis de Sánchez Tapiero (2023)	81
3.4	Parámetros de Valoración de Peligros para Áreas Subterráneas en Función del Tiempo de Evacuación	83
3.5	Síntesis de los Parámetros de Peligrosidad para individuos ante Inundaciones .	87

3.6 Síntesis de Parámetros para evaluar los riesgos en la seguridad de las personas, basados en consideraciones de profundidad (Y) y velocidad (V).....	88
Capítulo 4.....	91
4.1 Ecuaciones Existentes para la Evaluación de la Peligrosidad.....	91
4.2 Ecuaciones Empíricas	92
4.2.1 Ecuaciones de Lind et al. (2004).....	92
4.2.2 Ecuación de Abt et al. (1989)	93
4.3 Ecuaciones Semi Empíricas	94
4.3.1 Ecuación de Ramsbottom et al. (1989).....	94
4.4 Ecuaciones Mecánicas.....	95
4.4.1 Ecuaciones de Xia et al. (2014)	95
4.4.2 Ecuaciones de Lind et al. (2004).....	101
4.4.3 Ecuaciones de Milanesi et al. (2014)	104
Capítulo 5.....	112
Análisis y Discusión.....	112
Conclusiones	118
Referencias.....	121

Tabla de Ilustraciones

<i>Ilustración 1</i> Inundación repentina.....	17
<i>Ilustración 2</i> Inundación lenta	19
<i>Ilustración 3</i> Principales Causas de las Inundaciones	20
<i>Ilustración 4</i> Precipitación Intensa.....	21
<i>Ilustración 5</i> Inundación por acumulación de sedimentos	22
<i>Ilustración 6</i> Inundación por derretimiento de nieve.....	23
<i>Ilustración 7</i> Acumulación de sedimentos en afluente	26
<i>Ilustración 8</i> Inundación Urbana.....	29
<i>Ilustración 9</i> Inundación pluvial	33
<i>Ilustración 10</i> Inundación Fluvial.....	35
<i>Ilustración 11</i> Inundación costera	37
<i>Ilustración 12</i> Inundación Lacustre	38
<i>Ilustración 13</i> Inundación por Rompimiento de Presa	39
<i>Ilustración 14</i> Monolito Idealizado.....	46
<i>Ilustración 15</i> Curva de peligrosidad	46
<i>Ilustración 16</i> Grafica de delimitación según Témez.....	48
<i>Ilustración 17</i> Grafica profundidad del agua vs velocidad de flujo	50
<i>Ilustración 18</i> Curva de peligrosidad para viviendas.....	52

<i>Ilustración 19</i>	<i>Curva de peligrosidad para adultos</i>	<i>54</i>
<i>Ilustración 20</i>	<i>Curva de peligrosidad para niños</i>	<i>54</i>
<i>Ilustración 21</i>	<i>Esquema de la pierna de una persona.....</i>	<i>59</i>
<i>Ilustración 22</i>	<i>Fuerzas aplicadas en una pierna.....</i>	<i>67</i>
<i>Ilustración 23</i>	<i>Plataforma empleada por Russo (2009).....</i>	<i>75</i>
<i>Ilustración 24</i>	<i>Fases de la investigación de Sánchez Tapiero (2023).....</i>	<i>82</i>
<i>Ilustración 25</i>	<i>Modelo de escalera usada en los ensayos</i>	<i>85</i>
<i>Ilustración 26</i>	<i>Grafica de velocidad vs distancia.....</i>	<i>86</i>
<i>Ilustración 27</i>	<i>Grafica de Tiempo Vs Profundidad</i>	<i>86</i>
<i>Ilustración 28</i>	<i>Modelo de Xia et al (2014)</i>	<i>96</i>
<i>Ilustración 29</i>	<i>Modelo de Lind et al (2004)</i>	<i>101</i>
<i>Ilustración 30</i>	<i>Modelo de pierna según Milanesi et al. (2014).....</i>	<i>107</i>

Listado de Tablas

Tabla 1 Niveles de daño en niños y adultos	65
Tabla 2 Escala de daños.....	68
Tabla 3 Umbrales de peligro en personas.....	70
Tabla 4 Criterios del parámetro suizo (2004).....	71
Tabla 5 Atributos de los sujetos evaluados	76
Tabla 6 Parámetros de Peligrosidad Basados en una Profundidad Máxima	87
Tabla 7 Parámetros basados en consideraciones de profundidad (Y) y velocidad (V). .	88
Tabla 8 Parámetros de valoración para personas en zonas subterráneas	90
Tabla 9 Rangos del factor de escombros dependiendo de las profundidades.....	94
Tabla 10 Parámetros calibrados en las ecuaciones 14 y 15.....	100

Resumen

El propósito de este estudio fue analizar información sobre los peligros que enfrentan los peatones durante las inundaciones urbanas. Se llevó a cabo una exhaustiva revisión, explorando los criterios de peligrosidad propuestos por diversos autores a lo largo del tiempo. Estos criterios se fundamentaron en numerosos ensayos experimentales realizados en individuos con características específicas. Durante estos ensayos, se evaluó la sensación de estabilidad de cada sujeto en diversas condiciones hidráulicas, incluyendo diferentes niveles de calado y velocidades. En Colombia, diversos autores han tratado este tema, centrándose en el desarrollo de modelos computacionales para la elaboración de mapas de riesgo. Estos mapas ayudan a identificar áreas que presentan diversos grados de peligro para los peatones debido a la inestabilidad causada por las inundaciones. Ayuda a comprender mejor la ubicación de las industrias que están más expuestas a riesgos altos, medios y bajos. Además, ha contribuido significativamente a cerrar la brecha que existía hace sólo unos años. En aquel momento, los peatones corrían peligro de inundaciones en las ciudades debido a los deficientes sistemas de drenaje y a la falta de investigaciones pertinentes. Además, se recopiló información sobre diversas ecuaciones existentes utilizadas para evaluar la peligrosidad. Estas ecuaciones fueron propuestas considerando criterios empíricos, semiempíricos, mecánicos y físicos.

PALABRAS CLAVE: Peligrosidad, Inundación, Velocidad, Calado.

Abstract

This research aimed to analyze information about the danger faced by pedestrians during urban flooding events. A thorough review was carried out, exploring the danger criteria proposed by various authors over time. These criteria were based on numerous experimental trials conducted in individuals with specific characteristics. During these trials, the sensation of stability of each subject was evaluated under various hydraulic conditions, including different draught levels and speeds. In Colombia, several authors have addressed this problem, focusing on computational models for the generation of risk maps. These maps help identify areas that present varying degrees of danger to pedestrians due to instability caused by flooding. It helps to better understand the location of industries that are most exposed to high, medium and low risks. It has also contributed significantly to closing the gap that existed only a few years ago. At that time, pedestrians were at risk of flooding in cities due to poor drainage systems and lack of relevant research. In addition, information was collected on various existing equations used to assess dangerousness. These equations were proposed considering empirical, semiempirical, mechanical and physical criteria.

KEYWORDS: Danger, Flood, Speed, Draft.

Introducción

La historia de las inundaciones revela las complejas conexiones entre las fuerzas naturales y las provocadas por el hombre. El riesgo de inundaciones aumenta por el clima, los cambios geológicos, el uso de la tierra, el mal uso del agua, el cambio climático y la expansión urbana. La urbanización no planificada exacerba los fenómenos climáticos extremos, además del calentamiento global, la deforestación y la mala gestión del agua. En este contexto, la hidrología urbana se ha convertido en una disciplina esencial ante los desafíos de la urbanización acelerada y el cambio climático. A medida que las poblaciones urbanas continúan creciendo, la gestión sostenible del agua urbana es esencial para garantizar que las ciudades sean seguras, eficientes y resilientes. La hidrología urbana estudia la interacción entre los sistemas hidrológicos y la infraestructura urbana para abordar cuestiones como la escorrentía, las condiciones del agua, las inundaciones y el manejo de aguas pluviales. Esta disciplina va más allá de la comprensión de los procesos hidrológicos para promover la planificación urbana sostenible.

En cuanto a los impactos sobre las personas, especialmente los peatones en entornos urbanos, la seguridad de estas es el objetivo principal que deben cumplir las medidas de mitigación del riesgo de inundaciones, según los informes existentes sobre causas de accidentes, la mayoría de las muertes se deben a la peligrosidad a la cual se enfrentan las personas al caminar en aguas inundadas. Existe una gran dispersión en los datos experimentales actuales sobre la inestabilidad humana en las inundaciones, que está determinada principalmente por la gran variabilidad en las características físicas de los sujetos. Debido a lo anterior es crucial definir rangos basados en criterios subjetivos, estableciendo límites entre peligros altos y medios y entre peligros medios y bajos. Obtener estos límites requiere reproducir condiciones reales en el laboratorio, probar a personas y observar cómo reaccionan ante una inundación.

Capítulo I

1.1 Inundaciones Urbanas

Este capítulo proporciona una recopilación de definiciones relacionadas con las inundaciones, con especial énfasis en comprender los diferentes tipos y su clasificación, así como el impacto de estos fenómenos sobre los peatones. La complejidad inherente de las inundaciones como eventos naturales ha llevado a diversos expertos y disciplinas a desarrollar definiciones que abarquen su alcance e intensidad. El análisis comienza explorando en detalle los múltiples aspectos de la definición de inundación, teniendo en cuenta no sólo sus aspectos hidrológicos sino también los factores geográficos y climáticos que contribuyen a su formación. Se discuten diferentes tipos de inundaciones, desde repentinas hasta lentas, incluyendo inundaciones fluviales y costeras, con el objetivo de proporcionar un marco conceptual que permita comprender la diversidad de escenarios que estos eventos pueden presentar.

1.2 Inundación

Las inundaciones son eventos hidrológicos que ocurren de manera periódica y pueden ser altamente destructivos, siendo parte inherente de la evolución de un cuerpo de agua. Son causadas por precipitaciones prolongadas y generalizadas, que hacen que el nivel del agua en los ríos aumente gradualmente por encima de la altura de las riberas naturales o artificiales de los ríos, provocando que el agua se desborde y se extienda por la llanura aluvial y las zonas circundantes. canal. Por lo general, el canal no se inunda (Calixto Ramon, 2017).

Cabe señalar que destruyen la vida no sólo mediante la asfixia y las lesiones directas, sino también mediante las enfermedades y el hambre asociados. Su impacto también debe evaluarse en relación con las perturbaciones y alteraciones de los medios de vida, así como con los

cambios en la provisión de acceso para las poblaciones afectadas. La pérdida de bienes, capacidad de trabajo, tierras y animales, así como los efectos de las lesiones y enfermedades, todavía se pueden sentir meses o incluso años después de que la inundación haya retrocedido (Blaikie et al. 1996).

Las lluvias intensas y prolongadas en grandes cuencas provocan inundaciones, de igual manera las lluvias intensas y breves en cuencas pequeñas provocan inundaciones. El control de inundaciones se complica por la necesidad de retirar objetos que pueden causar daños a los ríos, la infraestructura. (Arreguín Cortés et al. 2016). En la clasificación más sencilla se pueden reconocer dos tipos:

1.2.1 Las Inundaciones Repentinas

Comúnmente conocidas como Flash floods, son inundaciones inesperadas y extremadamente rápidas que ocurren en un breve lapso de tiempo, frecuentemente en cuestión de minutos u horas. Estas inundaciones se distinguen por su rápida acumulación de agua en áreas que normalmente carecen de agua o tienen una elevación mínima.

Las tormentas localizadas, las fuertes lluvias, la rotura de presas o diques, el rápido deshielo, los deslizamientos de tierra e incluso los escombros que obstruyen las vías fluviales naturales son factores que pueden provocar inundaciones repentinas. Estos sucesos pueden ser particularmente peligrosos debido a su inicio repentino y rápido, lo que deja un período mínimo para que las personas desalojen o implementen medidas de precaución. Además, las inundaciones repentinas tienen la capacidad de arrastrar rápidamente automóviles, demoler posesiones y estructuras esenciales y presentar un peligro inminente para la existencia y el bienestar humanos. (Cruz Roja Colombiana & SENA, 1990).

Si se producen fuertes lluvias en cuencas muy pronunciadas o inclinadas o en las estribaciones, el agua puede fluir rápidamente sobre la superficie y concentrarse en arroyos y barrancos, provocando graves inundaciones. Una inundación, o inundación repentina, se caracteriza por una alta velocidad temporal del agua que crea fuerza, caos o turbulencia en el agua. Debido a la presión, arrastran a su paso grandes cantidades de maleza, rocas, troncos, escombros y otros materiales (Cruz Roja Colombiana & SENA, 1990).

En algunos casos, las inundaciones son causadas por la rotura de presas o embalses que contienen agua, y el flujo de agua en sí puede ser causado por sustancias transportadas a través de la presa. También puede ser causada por deslizamientos de tierra que bloquean o impiden el flujo de agua. Si hay demasiada agua en la presa, se puede crear una fuerza tal que puede romper con fuerza las barreras que la retienen. A partir de este punto, el agua comienza a fluir a través del canal, lo que indica un desastre río abajo a medida que se encuentra un terreno más plano y menos parecido a un cañón (Cruz Roja Colombiana & SENA, 1990).

Ilustración 1 Inundación repentina



Nota: causada por lluvias intensas en un lapso de tiempo corto, generalmente menos de 6 horas, tomada de ialert, 10 enero de 2011 (www.ialert.com).

1.2.2 Inundaciones Lentas

El segundo tipo de inundación ocurre en terrenos llanos que drenan muy lentamente, cerca de la orilla de un río o donde llueve con frecuencia. Muchos de ellos son el resultado del comportamiento normal (es decir, el régimen hídrico) de los ríos, cuando el nivel del agua aumenta en invierno, las tierras cercanas suelen quedar inundadas, como playas o llanuras (UNGRD, 2014). Los niveles del agua aumentan sólo centímetros por día, se reportan daños generalizados, pero por lo general pocas víctimas, y el impacto puede durar varios meses.

Para Alvarez Poveda & Giraldo Rincón (2003) este tipo de inundación se caracteriza por un aumento gradual del nivel del agua y se produce bajo las siguientes condiciones:

- Las fuertes lluvias inundan ríos y afectan áreas adyacentes.
- Cuando lluvias prolongadas e intensas caen sobre valles o terrenos planos como llanuras o llanuras, el suelo y la vegetación absorben el agua, pero si la lluvia continúa, se satura y se producen inundaciones.
- Si el terreno no tiene suficiente pendiente para que fluya el agua y no hay desagües ni canales, el agua puede estancarse y provocar inundaciones.
- Cuando un río cambia de curso y pierde su curso debido a la erosión.

Las actividades humanas provocan la erosión del suelo y los sedimentos transportados por los ríos se depositan en zonas bajas, lo que reduce la capacidad de los ríos y provoca nuevas inundaciones y cambios en los ríos (Cruz Roja Colombiana & SENA, 1990). En diversas regiones se pueden observar diferentes tipos de inundaciones lentas, variando sus manifestaciones según su origen y las características geográficas de la zona afectada. Estas inundaciones pueden manifestarse como el desbordamiento gradual de ríos y arroyos, superando

sus límites habituales, o como la presencia prolongada de agua estancada en regiones bajas, además, las inundaciones lentas también pueden identificarse por la acumulación continua de agua en las llanuras aluviales.

Amenazas a la salud pública causadas por la contaminación del agua, incluidos los daños a la infraestructura, las pérdidas económicas debido a la interrupción de actividades comerciales y agrícolas y las alteraciones de los ecosistemas acuáticos y terrestres, son consecuencias importantes de las inundaciones lentas. Es por esto que se requiere el establecimiento de zonas de protección y la gestión sostenible de las cuencas para mitigar los impactos de las inundaciones lentas. Las medidas preventivas, como la implementación de infraestructuras de control de inundaciones, también forman parte de una gestión integral.

Ilustración 2 Inundación lenta



Nota. Las lluvias no cesan y el río Cauca sigue creciendo en La Mojana, tomado de El Tiempo, 01 de septiembre 2021.

(<https://www.eltiempo.com/colombia/otras-ciudades/la-mojana-emergencia-por-inundaciones-en-bolivar-y-sucre-614799>)

1.3 Principales Causas de las Inundaciones

Las inundaciones tienen muchas causas y pueden clasificarse como naturales, no naturales o una combinación de ambas. (Floodup.ub, 2020). Estos eventos, aunque pueden ser desencadenados por fenómenos naturales como lluvias intensas, deshielos repentinos o

marejadas ciclónicas, también pueden resultar de acciones humanas como la deforestación masiva, la urbanización sin control o el deterioro de infraestructuras hidráulicas.

Ilustración 3 Principales Causas de las Inundaciones



Nota. Tomada de Idiger, 2016 (<https://www.idiger.gov.co/rinundacion>)

1.3.1 Causas Naturales

Las causas naturales, como los fenómenos meteorológicos extremos, desempeñan un papel crucial a la hora de provocar inundaciones repentinas. Las lluvias intensas, concentradas en un período de tiempo largo o corto, pueden superar la permeabilidad de la superficie y los sistemas de drenaje naturales, lo que resulta en inundaciones en los ríos y áreas circundantes. Además, el derretimiento acelerado de la nieve y los glaciares en las estaciones cálidas puede provocar un aumento del nivel del agua, provocando inundaciones y afectando a grandes zonas.

Lluvias Intensas

Pueden ocurrir por precipitaciones, tormentas, entre otros. Estos fenómenos pueden ocurrir debido a un aumento del caudal de los ríos. Existen mayores riesgos cuando se presentan precipitaciones de larga duración. Para resolver estos problemas, a menudo se construyen presas o embalses para almacenar grandes cantidades de agua de diversas fuentes. Esta agua puede emplearse para abastecer cultivos, regar el suelo o producir energía. (Sánchez, 2018).

Ilustración 4 Precipitación Intensa



Nota. Una lluvia torrencial en Barcelona causa inundaciones y complicaciones en el transporte , Tomado de efeverde, 9 de octubre de 2018. (<https://efeverde.com/barcelona-lluvia-torrencial/>.)

Acumulación de Sedimentos

Estas acumulaciones generan obstáculos los cuales retienen el agua y, a medida que aumenta el caudal, estas barreras colapsan, permitiendo que escapen grandes cantidades de agua mezclada con barro, troncos o rocas. (Sánchez, 2018).

Las inundaciones por sedimentación, también conocidas como inundaciones por represamiento, se producen cuando se acumulan cantidades sustanciales de sedimentos en ríos, arroyos u otros cursos de agua, obstruyendo el movimiento habitual del agua. Esta acumulación de sedimentos puede tener diversos orígenes, incluida la erosión del suelo, la deforestación, la construcción de represas, actividades humanas intensivas y fenómenos naturales como deslizamientos de tierra o erupciones volcánicas.

Cuando las partículas del suelo y los escombros se acumulan en el fondo de un río o arroyo, el canal de agua puede transportar menos agua. Esta reducción de potencia puede hacer que los niveles de agua aumenten y eventualmente provoquen inundaciones. Además, la acumulación de sedimentos puede obstruir los puentes, represar el agua detrás de ellos, ejercer más presión sobre la infraestructura fluvial y aumentar el potencial de inundaciones repentinas y

graves. Tienen el potencial de dañar la infraestructura, afectar los parámetros del agua, arruinar las tierras agrícolas y alterar los sistemas acuícolas.

Ilustración 5 Inundación por acumulación de sedimentos



Nota: Deslizamiento de tierra provoca el represamiento del río Coca, Tomado del universo, 25 de febrero de 2021(<https://www.eluniverso.com/noticias/ecuador/deslizamiento-de-tierra-provoca-el-represamiento-del-rio-coca-nota/>)

Fusión de Nieves en Altas Montañas

La nieve del invierno suele derretirse en la época de florecimiento, pero si la temperatura aumenta repentinamente, este proceso puede acelerarse e incluso provocar que el nivel del mar o de los ríos suba e invada la tierra. (Sánchez, 2018)

El deshielo es un proceso importante en zonas montañosas de España, como los Pirineos, la serranía Cantábrica, sierra Nevada entre otros. En invierno, la nieve se acumula en estos lugares, creando un sistema natural que regula el flujo de agua. El deshielo se produce principalmente de marzo a junio, lo que es crucial para retrasar la escorrentía de los ríos y proporcionar una base con menos precipitaciones en verano. Este fenómeno no sólo es de crucial importancia en el uso sostenible de los recursos hídricos, sino también de gran importancia en relación con el cambio climático, ya que los cambios en los regímenes de nieve indican

claramente posibles cambios en las condiciones meteorológicas globales (Spesa ingeniería S.A, 2019).

El derretimiento de la nieve juega un papel vital en nuestros recursos hídricos. Es crucial medir y cuantificar este proceso para la gestión diaria y abordar eventos hidrológicos extremos como sequías e inundaciones. Los científicos realizan estudios sistemáticos utilizando herramientas como postes y telenivómetros, y analizan el cambio a lo largo del tiempo examinando imágenes de satélite. Los datos recopilados de estos estudios nos ayudan a gestionar nuestros recursos de manera eficiente y enfatizan la importancia de monitorear la acumulación de nieve para anticipar cualquier cambio potencial. Esto es especialmente importante en zonas montañosas donde los recursos hídricos necesitan una gestión cuidadosa. El lento derretimiento de la nieve, así como las repentinas condiciones climáticas que provocan rápidos deshielos e inundaciones, enfatizan la necesidad de comprender y controlar este fenómeno. Al hacerlo, podemos prevenir daños y garantizar un suministro estable de agua en diversos contextos hidrológicos.

Ilustración 6 Inundación por derretimiento de nieve



Nota. Inundaciones en el Val de Arán y Valle de Benasque, Tomada de *eltiempo.com*, 18 de junio 2013.

[https://www.tiempo.com/ram/34667/inundaciones-en-el-val-de-aran-y-valle-de-benasque18-de-junio-2013/.](https://www.tiempo.com/ram/34667/inundaciones-en-el-val-de-aran-y-valle-de-benasque18-de-junio-2013/))

1.3.2 Causas Antrópicas

La actividad humana también influye significativamente en la aparición de inundaciones. La deforestación aleatoria reduce la capacidad de infiltración del suelo y aumenta la probabilidad de escorrentía superficial e inundaciones.

La tala de árboles en áreas montañosas provoca deforestación, lo cual está directamente ligado a las inundaciones. Durante la temporada de lluvias, este fenómeno incrementa el riesgo de movimientos de tierra, que arrastran no solo tierra y agua, sino también desechos que se han acumulado en los ríos. Este fenómeno provoca la acumulación de sedimentos, excede la capacidad del río, provoca avalanchas y aludes.

Cuando se carece de una capa vegetal, especialmente durante las lluvias intensas, se producen derrumbes que obstaculizan las vías de comunicación. Además, las crecientes resultantes arrasan con todo a su paso, agravando aún más la situación y afectando gravemente a las comunidades locales. (García Marín, 2016).

Por otro lado, la urbanización descontrolada, sin planes de drenaje y mitigación adecuados, puede modificar el curso natural del agua y exacerbar el impacto de las precipitaciones intensas. Además, el deterioro o la falta de mantenimiento de infraestructuras como presas, diques o sistemas de drenaje puede llevar a su colapso repentino, desencadenando inundaciones repentinas y graves.

El desarrollo de las urbes en los últimos años ha provocado la ocupación de algunos espacios con condiciones ambientales no aptas para los residentes. Como resultado, los cambios en las instalaciones de retención de agua de lluvia para las nuevas urbanizaciones han cambiado

su dinámica y, como resultado, se han producido algunos cambios. inundaciones y/o anegamientos (Da Silva et al. 2022).

La presencia de basura en vías fluviales como ríos y arroyos impide el flujo natural del agua y reduce la capacidad del agua para conducir agua, aumentando el riesgo de inundaciones. Los desechos sólidos, como troncos y escombros, pueden causar bloqueos temporales, lo que aumenta la probabilidad de desbordamientos río arriba durante las fuertes lluvias. Además, la acumulación de escombros cambia la topografía del cauce del río, creando obstrucciones y sedimentos que afectan el flujo de agua. La contaminación resultante también reduce la capacidad natural de los afluentes para soportar altos caudales, lo que reduce los parámetros del agua y afecta los sistemas acuáticos. Para resolver estos problemas, es necesario implementar un mejor manejo de los residuos, aumentar la responsabilidad medioambiental y garantizar el cumplimiento de leyes y reglamentos para prevenir el vertido ilegal de residuos en cuerpos de agua. La limpieza periódica de los lechos de los ríos y la restauración de los hábitats acuáticos es esencial para prevenir las inundaciones provocadas por la acumulación de escombros.

Las inundaciones a menudo ocurren debido a la influencia entrelazada de la naturaleza y las acciones humanas, como una combinación de condiciones climáticas severas y prácticas ambientales que pueden empeorar los peligros de inundaciones. Entender estas diversas razones es esencial para crear estrategias eficaces que prevengan, reduzcan y se adapten a los efectos negativos de las inundaciones, así como para proteger a las comunidades en situación de vulnerabilidad.

Ilustración 7 Acumulación de sedimentos en afluente



Nota. Realizan limpieza en caños de Lorica para mitigar inundaciones, Tomado de *elheraldo.com*, 20 de noviembre de 2020 (<https://www.elheraldo.co/cordoba/limpieza-en-canos-de-lorica-cordoba-para-mitigar-inundaciones-926699>)

1.4 Impacto de las Inundaciones

El desarrollo urbano tiene importantes consecuencias socioeconómicas, demográficas y ambientales. La dinámica de las comunidades urbanas y el impacto del debido a las variaciones del clima aumentan la exposición de las ciudades a eventos hidrometeorológicos extremos, especialmente en los países en desarrollo. Las inundaciones urbanas son un importante desafío para el desarrollo que afecta particularmente a las comunidades de estos países.

Gran parte de la discusión y el conocimiento sobre las inundaciones se centra en sus causas. Es importante enfatizar que las inundaciones urbanas pueden ser interpretadas de manera diferente por diferentes actores. La atribución de causalidad se basa no sólo en los efectos directos de los eventos hidrometeorológicos, sino también en cómo los organismos responsables de definir, gestionar y prevenir estos eventos consideran los factores causales. Además, diferentes interpretaciones de la causalidad pueden conducir a diferentes respuestas institucionales (Aragón Durand, 2014).

Los efectos devastadores de los desastres naturales son evidentes en todo el mundo y causan enormes pérdidas de vidas humanas y pérdidas financieras. En el planeta, estos acontecimientos catastróficos mataron a 35.000 personas y provocaron pérdidas económicas estimadas en 370.000 millones de dólares. Es importante subrayar que los daños asegurados se estiman en 116 mil millones de dólares, el doble que en 2010. De esta cantidad, la mayor parte fueron pérdidas relacionadas con catástrofes naturales. (Aragón Durand, 2014).

Particularmente sorprendente es el hecho de que el 90% de los desastres de la última década estuvieron relacionados con peligros naturales relacionados con el clima. Estos eventos representan el 60% de las muertes y el 98% de las secuelas, lo que evidencia que los países en desarrollo son vulnerables. Estadísticas del Centro de Investigación en Epidemiología de Desastres (CRED) muestran que, en el año 2013, 23.538 personas perdieron la vida debido a 362 eventos catastróficos. Esta cifra refleja la cruda realidad de la frecuencia y gravedad de los desastres naturales y su importante impacto en las víctimas humanas. Se necesitan urgentemente estrategias globales de mitigación y adaptación para abordar la vulnerabilidad y los riesgos que plantean estos eventos catastróficos, como lo muestra la escala de estas estadísticas (Aragón, 2011).

El cambio climático es el principal responsable del notable aumento de los fenómenos meteorológicos extremos. Los países de América Latina y el Caribe ya experimentan los impactos del cambio climático, como lluvias irregulares, inundaciones, tormentas, sequías, deslizamientos de tierra, temperaturas extremas e incendios forestales. Independientemente de otros, estos fenómenos afectarán en gran medida a la gestión de inundaciones y, por tanto, a la reducción de riesgos. Es crucial mejorar las medidas de prevención, preparación y respuesta para

reforzar la resiliencia en medio de fenómenos climáticos extremos crecientes y cambiantes (FAO, 2011).

1.5 Inundaciones Urbanas

Son un tipo de crecida que impacta a ciudades y áreas urbanizadas. Pueden originarse tanto de manera natural, como por ejemplo debido a lluvias intensas o desbordamiento de ríos, así como también pueden ser provocadas por actividades humanas, como fallos en proyectos de protección del agua o ruptura de presas, entre otros ejemplos. Las inundaciones urbanas son causadas por factores como la densidad de población, la erosión del suelo y el aumento de la producción de desechos. El cambio climático y la urbanización han aumentado las inundaciones urbanas, lo que plantea graves riesgos para la sociedad y la infraestructura. La creciente ocurrencia de inundaciones urbanas subraya la importancia de implementar estrategias confiables destinadas a minimizar las pérdidas causadas por estos peligros. (Qi et al. 2023).

Este fenómeno puede ser extremadamente peligroso, especialmente cuando el agua que se mueve rápidamente llena calles, casas y edificios antes de que las personas puedan evacuar de manera segura. Algunas comunidades urbanas pueden experimentar inundaciones repetidas, lo que puede causar factores estresantes como cargas financieras, estrés emocional y dificultad para vivir temporalmente en viviendas dañadas para los propietarios. Limpiar y reparar después de una inundación puede exponer a las personas a muchos peligros evitables.

Ante el acelerado crecimiento urbano y el cambio en las condiciones climatológicas, la intensidad y frecuencia de las inundaciones urbanas seguirán aumentando. Para 2050, se espera que una mayor parte de la población mundial (alrededor de 60%) viva en ciudades, lo que aumentará el riesgo de inundaciones para los sistemas de infraestructura, las personas y las

propiedades y aumentará la carga sobre una infraestructura de defensa contra inundaciones ya sobrecargada. La rápida urbanización en la mayoría de los países en desarrollo está empeorando el riesgo de inundaciones. Las inundaciones urbanas se producen con frecuencia, lo que obstaculiza gravemente el desarrollo urbano. Por lo tanto, es importante explorar estrategias para ayudar a los administradores urbanos a prepararse y responder a las inundaciones y así mejorar la toma de decisiones. (Ma et al. 2022).

Ilustración 8 *Inundación Urbana*



Nota. Carreteras como ríos, inundaciones, muerte: emergencia en Bogotá y La Calera, Tomado de semana.com, 12 de noviembre de 2022 (<https://www.semana.com/actualidad/articulo/carreteras-como-rios-inundaciones-muerte-las-impactantes-imagenes-de-la-emergencia-en-bogota-y-la-calera/202241/>.)

Según Aragón Durand (2014) aunque las inundaciones también ocurren en las zonas rurales, las inundaciones son un problema más notable en las zonas urbanas debido a la alta concentración de personas, bienes e infraestructura que se ven afectados y amenazados. Las pérdidas y pérdidas son mayores que en las zonas rurales y afectarán el desarrollo de la región e incluso del país. Las interrupciones en servicios esenciales como hospitales, energía y comunicaciones a menudo perjudican el funcionamiento de las ciudades y regiones en las que se encuentran. En las ciudades, muchos recursos se dedican a la gestión del agua y al saneamiento, y la falla o insuficiencia de estos recursos a menudo aumenta el riesgo de inundaciones y los problemas resultantes, como las enfermedades asociadas con la mala gestión del recurso hídrico.

Durante las fuertes lluvias, cualquier aumento del caudal de agua en las vías por cualquier motivo puede crear grandes volúmenes de agua, El caudal y la velocidad hidráulica pueden constituir un riesgo para la seguridad de los transeúntes y el tráfico. Por lo tanto, es importante comprender estos parámetros hidráulicos máximos que se pueden alcanzar en las calles relacionadas con tormentas durante un período de retorno determinado y evaluar las posibles consecuencias (Mártinez Gomariz, 2016).

Capítulo 2

2.1 Peligrosidad en Peatones por Inundaciones

Este capítulo analiza la amenaza de inundaciones basándose en diferentes tipos, como inundaciones por lluvia, inundaciones de ríos, inundaciones costeras, inundaciones de lagos, inundaciones por rotura de presas, etc. En el contexto de las inundaciones, los peligros de los eventos naturales se hacen evidentes, especialmente en el caso de fuertes lluvias que advierten de posibles daños. Se analizan diferentes tipos, desde inundaciones provocadas por fuertes lluvias hasta crecidas de ríos, y se analiza su gravedad en relación con la duración e ímpetu de estas. Además, se analizan las inundaciones costeras relacionadas con el aumento de la altura del océano y los eventos climáticos severos, así como las inundaciones de los lagos relacionadas con los desbordamientos de los lagos y su impacto en las comunidades locales. Finalmente, se examinan las inundaciones causadas por fallas de represas, destacando los peligros inherentes de estos eventos y sus efectos potencialmente devastadores en las áreas aguas abajo.

2.2 Concepto de Peligrosidad

Un peligro se describe como cualquier factor, circunstancia o acción que puede resultar en lesiones personales, enfermedades, daños a la propiedad, degradación ambiental o una combinación de estos. (Comision de la verdad, 2022). Un peligro ocurre cuando ocurre un evento natural amenazante (en este caso, inundación por lluvia), lo que no significa que se haya producido daño, sino más bien la posibilidad de que se produzca. El concepto de peligro abarca tanto la probabilidad o frecuencia como la magnitud o intensidad del riesgo, y la hidráulica junto con la hidrología ofrecen enfoques para evaluar estos peligros.

Las áreas urbanas tienden a ser más susceptibles a las inundaciones debido a que las superficies de las calles y los edificios generan una impermeabilización del suelo, dificultando así la absorción natural del agua en el terreno. Además, el rápido crecimiento urbano puede provocar la pérdida de zonas naturales de absorción de agua, como humedales o campos, agravando el problema del drenaje. Generalmente se acepta en la literatura que las principales variables hidráulicas para la evaluación de riesgos son la velocidad del agua, la profundidad (calado) y el periodo de exposición. No obstante, este último puede no ser relevante para las inundaciones urbanas. Por tanto, se puede decir que el riesgo se puede calcular de forma bastante objetiva. (Mártinez Gomariz, 2016).

Al evaluar el riesgo de inundaciones urbanas se tienen en cuenta factores como la capacidad del sistema de drenaje, la topografía del terreno, el manejo de cuencas, la organización urbana y la infraestructura existente. El análisis de riesgos ayuda a identificar áreas sensibles en las ciudades e implementar medidas preventivas, como construir mejores sistemas de drenaje, implementar planes contra inundaciones y crear áreas verdes que sirvan como áreas de captación.

2.3 Inundaciones Pluviales

Tradicionalmente, los estudios relacionados con la probabilidad de inundaciones se han centrado en las crecidas de los ríos. Sin embargo, muchas inundaciones son causadas por inundaciones repentinas. Estas inundaciones son causadas por precipitaciones intensas y de corta duración que pueden afectar potencialmente a los centros urbanos donde se concentra mayor infraestructura y equipamiento y donde se producen inundaciones debido a su impermeabilidad. terreno (Ihobe, 2022).

Las inundaciones pluviales son un tipo de inundación que ocurre como resultado directo de la precipitación intensa, ya sea en forma de lluvia, u otros eventos meteorológicos relacionados con el agua. Las inundaciones suceden cuando la cantidad de agua que llega al suelo es mayor a la capacidad de infiltración de este o la capacidad del sistema de aguas lluvias para captar los excesos. Las áreas urbanas son particularmente vulnerables a las inundaciones por aguas pluviales porque la presencia de aceras y edificios hacen que el suelo sea impermeable, lo que limita la capacidad del suelo para absorber agua. Las inundaciones pluviales pueden provocar desbordamientos de ríos, deslizamientos de tierra y acumulación de agua en áreas bajas, afectando comunidades, infraestructuras y el entorno natural.

Ilustración 9 Inundación pluvial



Nota. Emergencias por lluvias: menor de edad fue arrastrado por un arroyo en Barranquilla, Tomado de Wradio.com, 22 de julio de 2022. (<https://www.wradio.com.co/2022/07/23/emergencias-por-lluvias-menor-de-edad-fue-arrastrado-por-un-arroyo-en-barranquilla/>)

2.4 Inundaciones Fluviales

Las inundaciones fluviales se producen cuando la cantidad de agua en la superficie supera la capacidad de los cauces naturales o canales artificiales para contenerla. Este exceso de agua se desborda hacia las áreas adyacentes a lo largo de las riberas de los ríos (Jha et al. 2012). Este tipo de eventos es uno de los fenómenos naturales más frecuentes y causa efectos

catastróficos y duraderos en todo el mundo que las inundaciones costeras y las inundaciones repentinas (IPCC, 2012). Las inundaciones de los cuerpos de agua ocurren cuando los niveles aumentan por encima del cauce del río y se extienden a las tierras circundantes debido a fuertes lluvias o inundaciones (Chen et al. 2010).

El peligro asociado a las inundaciones de los ríos depende de la duración y la intensidad de las precipitaciones (la cantidad de lluvia se mide en volumen), el contenido de humedad del suelo procedente de precipitaciones anteriores, la naturaleza del suelo y las características del terreno circundante (Zurich, 2019). Los dos tipos principales de inundaciones fluviales son: inundaciones repentinas, que ocurren cuando los niveles del agua aumentan e inundan las orillas de los ríos, e inundaciones repentinas, que son flujos rápidos y de corta duración causados por lluvias intensas o una ruptura repentina de los bancos (Yang & Liu, 2020).

El impacto y la intensidad de las inundaciones de los ríos pueden verse afectados por el cambio climático. En general, las inundaciones se ven afectadas por diversas características de las precipitaciones, como la potencia, la duración, la cantidad, el momento y la fase (nieve o lluvia). Por lo tanto, los cambios en las características anteriores debido al cambio climático pueden provocar cambios en las características de las inundaciones. Según el Informe especial sobre eventos extremos del Panel Intergubernamental sobre Cambio Climático, el cambio climático está afectando significativamente muchas variables relacionadas con el agua que contribuyen a las inundaciones. (IPCC, 2012).

Aunque es posible que las variaciones climáticas no causen inundaciones directamente, puede exacerbar las causas que contribuyen a estas. No obstante, obtener evidencia concluyente

resulta desafiante debido a la escasez de datos en numerosas regiones del mundo. La excepción es Europa, donde la información detallada de precipitaciones muestra una tendencia creciente.

Ilustración 10 *Inundación Fluvial*



Nota. El desborde de los ríos Los ríos Mulato, Sangoyaco y Mocoa, provocó una nueva inundación, Tomado de semana.com,12 de agosto de 2018 (<https://www.semana.com/impacto/articulo/causas-de-las-inundaciones-en-colombia-e-impactos-en-la-biodiversidad/41385/>)

2.5 Inundaciones Costeras

Los residentes costeros y todos aquellos que dependen de los recursos y del medio marino están constantemente expuestos a situaciones peligrosas y son vulnerables a fenómenos meteorológicos que amenazan sus vidas. Los fenómenos meteorológicos o climáticos extremos son fenómenos naturales que ocurren de forma aleatoria en todo el mundo. Estos fenómenos meteorológicos potencialmente peligrosos afectan el medio marino costero y las actividades sociales y económicas (Cadena, 2010).

Uno de estos fenómenos son las inundaciones costeras provocadas por la intrusión de agua del mar o del océano. Se diferencian de las mareas periódicas en que son provocadas por un aumento relativo inesperado del nivel del mar provocado por tormentas o tsunamis. Este tipo de

inundación suele ocurrir durante las mareas altas estacionales y las tormentas que empujan el agua hacia la costa. Pero a medida que aumenta el nivel del mar, las inundaciones en las comunidades costeras son cada vez más comunes en los días en que las mareas son más bajas o los vientos son más bajos, incluso en los días soleados.

Las consecuencias de las inundaciones costeras incluyen frecuentes cierres de carreteras, reducción de la capacidad de drenaje de aguas pluviales, infraestructura degradada e intrusión de agua salada en el agua potable. (Bradford, 2023). Algunas consecuencias típicas de las inundaciones costeras incluyen la inundación de caminos y senderos, el acceso limitado a las playas y la inundación de parques y reservas. Esto puede ocasionar repercusiones a corto y largo plazo. Si ocurre un incidente, puede causar peligro o molestias a las personas, pero a largo plazo puede causar daños a la infraestructura más rápido de lo habitual, lo que puede tener consecuencias financieras (Martín León, 2019).

Según Swail et al. (2019), se estima que al menos 2,6 millones de personas se han ahogado en inundaciones costeras provocadas por tormentas durante los últimos 200 años. En muchos países con costas vulnerables se observa un aumento de los asentamientos, la infraestructura y el desarrollo de la pesca y el turismo. Esto pone a más personas en riesgo, lo que genera preocupaciones sobre inundaciones costeras.

Ilustración 11 Inundación costera



Nota. El mar se está devorando seis pueblos del Pacífico colombiano, Tomado de *eltiempo.com*, 08 de enero de 2020, (<https://www.eltiempo.com/colombia/otras-ciudades/cambio-climatico-esta-devorando-a-seis-pueblos-del-pacifico-colombiano-449694>)

2.6 Inundaciones Lacustres

Tipo de inundación que hace referencia a las que afectan áreas cercanas a los lagos, también conocidas como inundaciones de lagos. Estas inundaciones son el resultado del aumento del nivel del lago, ya sea debido a fuertes lluvias, nieve derretida, agua de río que desemboca en el lago o una combinación de estos factores. Cuando los niveles del lago exceden su capacidad normal, las áreas circundantes, como las zonas bajas y los bordes de los ríos, pueden inundarse. Este tipo de inundación es particularmente problemático para las comunidades que viven cerca de lagos porque puede causar daños a la propiedad, daños a los cultivos y representar un riesgo para la seguridad humana. La frecuencia y magnitud de las inundaciones lacustres pueden variar según la geografía, el clima y el manejo que se le da a los recursos hídricos en cada lugar. (Rojas et al. 2014).

Ilustración 12 Inundación Lacustre



Nota. inundaciones en Michigan a lo largo del lago erie, Tomado de [elvoceros.com](https://www.elvocerous.com), 15 de abril de 2019, (<https://www.elvocerous.com/NewWebsite/index.php/homepage/michigan/119664-fuertes-vientos-causan-inundaciones-en-michigan-a-lo-largo-del-lago-erie>)

2.7 Inundaciones por Rompimiento de Presas

Todas las represas se construyen siguiendo estándares de seguridad, pero hay muchos factores más allá del diseño ad hoc que afectan la confiabilidad, y las variaciones hidrológicas causadas por el cambio climático añaden más incertidumbre. Padrino (2018) Afirma que Una ruptura se produce cuando el agua se escapa violenta e incontrolablemente a través de un agujero en la cortina de la presa, provocando una inundación en forma de ola río abajo.

Una inundación causada por el rompimiento de una presa puede tener consecuencias graves y peligrosas para las comunidades ubicadas aguas abajo. El rompimiento de una presa puede ocurrir debido a diversas razones, como lluvias intensas, crecida de ríos, terremotos, defectos en la estructura de la presa o el mal mantenimiento. Cuando una presa se rompe, el agua liberada puede inundar áreas bajas rápidamente, provocando daños materiales, pérdidas humanas y la destrucción de la infraestructura. (Padrino, 2018).

Ilustración 13 Inundación por Rompimiento de Presa



Nota. La rotura de la presa Whaley Bridge obliga a evacuar a 6.000 personas en Reino Unido, Tomado de Publimetro.cl, 01 de agosto de 2019 (<https://www.publimetro.cl/cl/noticias/2019/08/01/reino-unido-represa-agua-whaley-bridge-peak-district.html>)

Capítulo 3

3.1 Parámetros de Evaluación

En este capítulo, se presenta una recopilación acerca de los diversos elementos de riesgo vinculados a los eventos de inundación que afectan a los peatones durante su enfrentamiento con el flujo de agua. Se examinan las posibles repercusiones, tales como el volteo o deslizamiento, respaldadas por una amplia gama de estudios realizados por diferentes autores.

Se analizan varios estudios realizados para evaluar el grado de riesgo (bajo, medio o alto) al que se expone una persona cuando se enfrenta a ciertas circunstancias hidrodinámicas, como la profundidad y la velocidad del flujo. Como consecuencia, el agua que fluye y crea condiciones seguras o de bajo riesgo puede circular por las calles de la ciudad sin comprometer la seguridad de los peatones.(Martínez Gomariz et al. 2016).

También es crucial destacar que hay consenso respecto a las variables que determinan los riesgos de inundación. Estas variables abarcan la velocidad (v) y la profundidad (y), junto con varias propuestas para combinar estas dos medidas. Investigaciones experimentales indican que el umbral de seguridad para adultos se establece como el producto de la resistencia (m) y la velocidad (m/s) en el rango de 0,5 a 1,0 m^2/s . (Mártinez Gomariz, 2016).

A continuación, se exponen los parámetros de riesgo sugeridos por distintos autores, organizados de la siguiente manera:

- Parámetros de Valoración de Peligrosidad Vial Basados en la Profundidad Máxima Permitida (Y).
- Parámetros para evaluar los riesgos en la seguridad de las personas, basados en consideraciones combinadas de la profundidad (Y) y la velocidad (V).

- Parámetros de valoración de peligros para áreas subterráneas basados en el tiempo de evacuación.

3.2 Parámetros de Valoración de Peligrosidad Vial Basados en la Profundidad Máxima Permitida (Y).

En cuanto al daño físico y su mitigación, la profundidad máxima permitida de una calle es la profundidad de una casa o negocio que impide que el agua ingrese a la zona de inundación. Esto es menos común que usar calado (y) y velocidad (v) combinados, pero es el estándar utilizado en varias ciudades de EE. UU (Mártinez Gomariz, 2016).

3.2.1 *Parámetro de Denver (Colorado, EE.UU.) (1969)*

Según Wright-McLaughlin Engineers (1969), es fundamental resaltar la relevancia del Manual de parámetros de Desagüe de Denver, el cual establece directrices fundamentales para la gestión del agua pluvial en entornos urbanos. Específicamente, se resalta la directriz que prohíbe que el agua de lluvia alcance niveles lo suficientemente elevados como para causar inundaciones en la planta baja de diversos tipos de edificaciones, incluyendo residenciales, públicas, comerciales e industriales en las calles locales.

El límite de referencia no es más de 45 cm por encima de la altura mínima de la calle y cualquier altura de edificio por debajo de esta medida requiere una acción inmediata para evitar inundaciones. Esta regulación es esencial para garantizar que los edificios y sus ocupantes estén seguros y protegidos de los efectos negativos de las condiciones climáticas, como las fuertes lluvias. Además, cabe mencionar que el rigor de estas normas se ha vuelto cada vez más estricto con el tiempo en calles importantes. (Wright-Mc Laughlin Engineers, 1969).

Esto pone de relieve la necesidad de seguir adaptando y mejorando los sistemas de drenaje en las zonas urbanas para reducir los riesgos y garantizar la resiliencia frente a fenómenos meteorológicos extremos. Las regulaciones revisadas reflejan el creciente reconocimiento de la importancia de un manejo correcto de las aguas pluviales para la sustentabilidad y protección a largo plazo de las comunidades urbanas. (Wright-Mc Laughlin Engineers, 1969).

3.2.2 Parámetros de la Comisión Nacional de Transporte de Sudáfrica

La contribución de la CNTRS en el ámbito del manejo del agua en carreteras es evidente a través del Manual de Drenaje de Carreteras de 1986, según lo elaborado por Rooseboom et al. (1986). Este documento se destaca por proponer criterios específicos que juegan un papel crucial en la preservación y eficiencia de la infraestructura vial del país.

Uno de los criterios clave establecidos en este manual es la limitación del calado máximo a 6 cm, especialmente diseñado para hacer frente a lluvias con un intervalo de ocurrencia cada 5 años. Este enfoque demuestra la meticulosa planificación y consideración de factores climáticos extremos al definir estándares de drenaje que deben cumplir las carreteras sudafricanas. Al limitar el calado a esta medida específica, se busca prevenir problemas asociados con inundaciones y asegurar la seguridad y funcionalidad de las vías de comunicación. Este enfoque proactivo hacia el drenaje de carreteras no solo es fundamental para la preservación de la infraestructura vial, sino que también contribuye significativamente a la Protección de los usuarios de las carreteras y la eficacia en su mantenimiento. La implementación de criterios específicos como esta evidencia la conciencia de CNTRS acerca de la importancia de gestionar

eficazmente el agua pluvial para mantener la integridad de las carreteras y salvaguardar la movilidad y seguridad de la población. (Rooseboom et al. 1986).

3.2.3 *Parámetro de la Ciudad de Mendoza (1999)*

En la ciudad de Mendoza, República Argentina, se ha adoptado un enfoque proactivo en la gestión del agua pluvial en las calles, tomando como referencia el criterio establecido en Denver por Wright-McLaughlin Engineers (1969). Este criterio específico dicta que el calado máximo admisible en las calles no debe ser suficiente para permitir la infiltración de agua en edificaciones. Siguiendo esta directriz, en Mendoza se ha establecido un valor concreto de 30 cm como límite máximo de calado. (Nania Escobar , 1999).

Esta medida demuestra la sensibilidad y adaptabilidad de la ciudad frente a las características particulares de su urbanización. Al fijar un calado máximo de 30 cm, se busca garantizar que las calles sean capaces de manejar eficientemente el flujo de agua de lluvia sin comprometer la integridad de los edificios circundantes. Este enfoque evidencia una inquietud por la protección tanto en espacios estatales y particulares, además de una reducción de los riesgos de inundaciones en zonas urbanas. (Nania Escobar , 1999).

Es importante resaltar que esta norma ha sido adoptada no sólo como una norma a seguir, sino también como un parámetro para el análisis de los peligros causados por el tránsito humano en las calles de la ciudad. Este enfoque analítico proporciona una comprensión más profunda de la vulnerabilidad y la capacidad de recuperación de la infraestructura urbana frente a eventos meteorológicos extremos., lo que permite tomar medidas preventivas y correctivas basadas en datos. La aplicación de estos criterios refleja el compromiso de Mendoza con la planificación urbana sostenible y la seguridad de sus habitantes. (Nania Escobar , 1999).

3.3 Parámetros para evaluar los riesgos en la seguridad de las personas, basados en consideraciones combinadas de la profundidad (Y) y la velocidad (V).

3.3.1 Parámetro (Fema) (1979)

La seguridad en el agua es una preocupación crucial, especialmente al considerar factores como la profundidad y la velocidad. En el caso de una persona de tamaño moderado, se ha identificado que la pérdida de estabilidad ocurre cuando el calado alcanza los 0.91 m y la velocidad del agua es de 0.61 m/s. Estos valores son fundamentales para establecer límites y garantizar la seguridad en ambientes acuáticos. (Federal Emergency Management Agency (FEMA), 1979).

El umbral del parámetro velocidad (m/s) por profundidad (m) se define como $(v \cdot y) \leq 0.56 \text{ m}^2/\text{s}$, una fórmula que sugiere una relación crítica entre la velocidad y el calado para mantener la estabilidad. Este criterio se vuelve esencial para prevenir situaciones peligrosas y garantizar que las personas puedan mantenerse firmes en el agua. Es importante destacar que los niños presentan una susceptibilidad mayor a perder la estabilidad en comparación con personas de tamaño moderado. Para un niño, la pérdida de estabilidad puede ocurrir a velocidades y calados más bajos. Por ejemplo, incluso un caudal rápido con una profundidad de apenas 15 cm puede hacer que un niño pierda el equilibrio, lo cual subraya la necesidad de precauciones adicionales en entornos acuáticos cuando se trata de la seguridad de los más jóvenes. (Federal Emergency Management Agency (FEMA), 1979).

Estos límites y normativas ofrecen un fundamento sólido para evaluar riesgos y aplicar medidas de protección en entornos acuáticos, contribuyendo así a la prevención de accidentes y

al resguardo de las personas ante situaciones potencialmente peligrosas (Federal Emergency Management Agency (FEMA), 1979).

3.3.2 *Parámetro de Abt et al. (1989)*

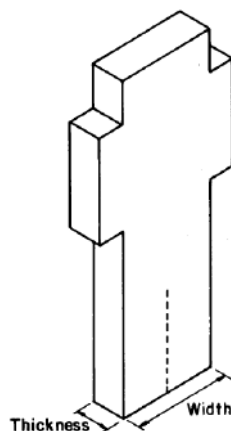
El estudio de Abt et al (1989) es un trabajo importante que examina exhaustivamente la interacción entre las estructuras rígidas y el flujo de agua, con especial atención a la evaluación del riesgo para la vida humana durante las inundaciones. Combinando estudios teóricos y experimentales, el equipo intentó predecir las tasas de arrastre y flujo asociadas con el colapso de una estructura rígida idealizada. Como parte de este estudio, realizaron pruebas con humanos en un conducto rectangular para establecer la rapidez y flujos de aire que podrían causar inestabilidad. Este enfoque práctico permitió una comprensión más precisa de cómo las corrientes de agua afectan la estabilidad humana, complementando los aspectos teóricos del estudio. (Mártinez Gomariz, 2016).

La evaluación de la amenaza a la vida humana se lleva a cabo mediante la realización de un análisis preliminar destinado a determinar las condiciones en las que el agua puede volcar un cuerpo humano. El análisis se basa en el uso de un cuerpo rígido formado por un bloque rectangular de amplias superficies y una parte superior. Se eligió esta configuración con extrema precaución en relación con la exposición a inundaciones, asumiendo que los resultados del análisis de rocas representan los umbrales mínimos de estabilidad humana. (Mártinez Gomariz, 2016).

Los resultados del análisis general, que reflejan la suposición del límite inferior de la estabilidad humana, sugieren precaución y seriedad al abordar las cuestiones de seguridad en situaciones de inundación. Esta investigación no solo proporciona información valiosa sobre la

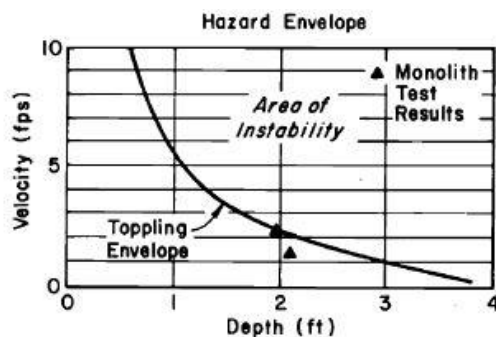
dinámica de los cuerpos rígidos del agua. Además, no solo proporciona una base para evaluar la peligrosidad humana en situaciones de inundación, sino que también contribuye a la seguridad y el confort de la población afectadas por estos eventos. (Mártinez Gomariz, 2016).

Ilustración 14 Monolito Idealizado



Nota. Esquema de 54.4 kg (120 lbs). (1 ft= 30.48 cm; 1 fps= 3.28 m/s, tomado de (Sandoval , 2015).

Ilustración 15 Curva de peligrosidad



Nota. tomado de (Mártinez Gomariz, 2016).

Esta curva delinea las condiciones en las que el cuerpo permanecerá estable (debajo de la curva) y las condiciones en las que el flujo derribará el monolito (sobre la curva). Los resultados experimentales para profundidades y velocidades de flujo críticas en el punto de derrumbe coincidieron con la envolvente prevista. (Sandoval , 2015). Durante el estudio se examinaron 20 individuos que pesaban entre 40,9 y 91,4 kg respectivamente y cuya altura oscilaba entre 1.52 y 1.83 metros. Cada participante fue evaluado hasta que mostró una pérdida de equilibrio debido al

flujo. Los resultados, representados como el producto $v \cdot y$ de inestabilidad para cada participante y bajo diferentes condiciones de prueba, demostraron una variación que osciló entre 0.71 y 2.13 m^2/s . Esta variación también se encontró influenciada por el tipo de superficie empleada en los experimentos. Las velocidades registradas abarcaron un rango de 0.36 a 3.05 m/s , mientras que las profundidades oscilaron entre 0.49 y 1.20 m. (Sandoval , 2015).

Uno de los resultados más importantes de la prueba experimental fue la observación de que el producto de inestabilidad $y \cdot v$ para una persona de 59,59 kg (124,5 lb) era notablemente mayor que la relación $v \cdot y$ necesario para derribar una roca de 120 libras. Esta diferencia se debe a la capacidad de los humanos para compensar los cambios en el flujo del canal y la relación de pendiente ajustando dinámicamente la postura y la posición. (Sandoval , 2015).

Estos hallazgos resaltan la capacidad inherente de los humanos para responder a los desafíos ambientales acuáticos y adaptarse a las condiciones cambiantes. La capacidad de los humanos para adaptarse a las condiciones del agua, en comparación con la rigidez de las estructuras rígidas, destaca la complejidad y la fluidez de la reacción humana ante condiciones de agua inestable, lo cual posee repercusiones substanciales en la concepción de medidas de seguridad y en el diseño de infraestructura hídrica. (Sandoval , 2015).

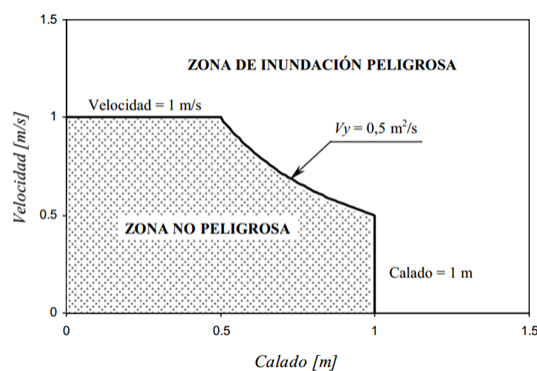
3.3.3 *Parámetro de Témez (1992)*

El concepto de "zonas peligrosas de inundación" tal como lo define Témez (1992) se centra en áreas donde existe un peligro significativo de fatalidad o daños severos. Témez ha establecido ciertos criterios para clasificar áreas como peligrosas, incluyendo condiciones adversas en términos de profundidad mayor a un (01) metro, velocidad del flujo mayor a un (01) metro sobre segundo y el producto de la profundidad por la velocidad del flujo mayor a 0,5

metros sobre segundo. Curiosamente, Témez recomendó un límite de profundidad de 1 m, pero existía la preocupación de que este valor fuera demasiado alto en áreas densamente pobladas, especialmente si no se tiene en cuenta la velocidad del flujo. En las ciudades, tensiones de esta escala no sólo causan importantes pérdidas materiales, sino que también plantean importantes peligros para la seguridad humana (Nanía et al. 2005)

En el mismo contexto, el resultado de $v^* = 0,5 \text{ m}^2/\text{s}$ se presenta como un criterio menos restrictivo que los productos de tirantes máximos de otros criterios propuestos por Témez. Estos productos están relacionados con las velocidades máximas propuestas para Mendoza y Denver, que son $0,30 \text{ m}^2/\text{s}$ y $0,45 \text{ m}^2/\text{s}$, respectivamente. Esta evaluación destaca la importancia de encontrar un equilibrio adecuado al establecer límites para las zonas de inundación peligrosa. La consideración tanto de la profundidad como de la velocidad es esencial para comprender y mitigar los riesgos asociados con inundaciones, especialmente en áreas urbanas densamente pobladas. La propuesta de criterios menos restrictivos puede proporcionar una base más realista y adaptable para abordar las complejidades de la interacción entre el agua y el entorno construido. (Nanía et al. 2005).

Ilustración 16 Grafica de delimitación según Témez



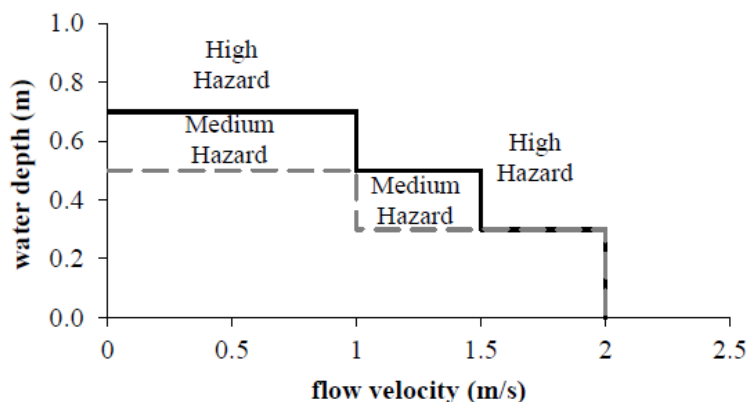
Nota. Zona de inundación peligrosa y no peligrosa. Tomado de (Recasens Vargas , 2014)

3.3.4 *Parámetro de Liguria (1993)*

El cálculo de mapas de inundaciones suele basarse en el uso de la descarga máxima para un período de retorno específico como variable de entrada. Esto se realiza mediante modelos hidrodinámicos unidimensionales estacionarios simples, que se aplican a los principales cursos de agua. Es importante señalar que estos modelos no consideran el volumen real del hidrograma ni la ruta exacta en el área inundada. Esta simplificación se realiza para facilitar el análisis, pero puede no reflejar completamente la complejidad de los procesos hidrológicos. (Ravazzani et al. 2009).

En este enfoque, el volumen de almacenamiento, aunque relevante, no se tiene en cuenta de manera integral. Sin embargo, se reconoce que el volumen de almacenamiento puede tener un impacto significativo en el recorrido y la extensión del área inundada, especialmente en entornos urbanos. En este contexto, la presencia de obstáculos, el almacenamiento en edificaciones y los patrones complejos de flujo hidráulico pueden potenciar aún más este efecto. La inclusión del volumen de almacenamiento en los modelos hidrodinámicos se vuelve crucial para una evaluación más precisa de las inundaciones, especialmente en entornos urbanos donde la topografía y la infraestructura pueden influir significativamente en el comportamiento del agua. La consideración de estos factores adicionales puede mejorar la capacidad de los modelos para prever y representar con mayor precisión las inundaciones, lo que a su vez contribuye a una planificación más efectiva y a la toma de decisiones informadas en el control de riesgos y la reducción de inundaciones urbanas. (Ravazzani et al. 2009).

Ilustración 17 Grafica profundidad del agua vs velocidad de flujo



Nota. Valores límite de profundidad y velocidad según el criterio de Liguria. Tomado de (et al. 2009).

El gráfico que se nos presenta representa varios puntos, donde los que se encuentran en la línea continua indican situaciones extremadamente peligrosas. Para garantizar la seguridad, se ha propuesto un valor umbral definido para la velocidad del flujo, manteniéndolo en 2 m/s para profundidades comprendidas entre 0 y 30 cm. Se sabe que estas circunstancias particulares de flujo ocurren con frecuencia cuando las áreas urbanas sufren inundaciones debido a fenómenos climáticos intensos y lluvias moderadas. En consecuencia, esta investigación se erige como una de las escasas fuentes que definen criterios precisos de peligrosidad para las regiones urbanas impactadas por inundaciones. Lamentablemente, los autores no nos proporcionan ninguna idea sobre su metodología para establecer estos valores umbral. No aclaran si estos valores se derivaron de estudios previos o se obtuvieron mediante una experimentación meticulosa. Esta ambigüedad en torno a su enfoque genera dudas sobre la credibilidad y la amplia aplicabilidad de los criterios propuestos. (Ravazzani et al. 2009).

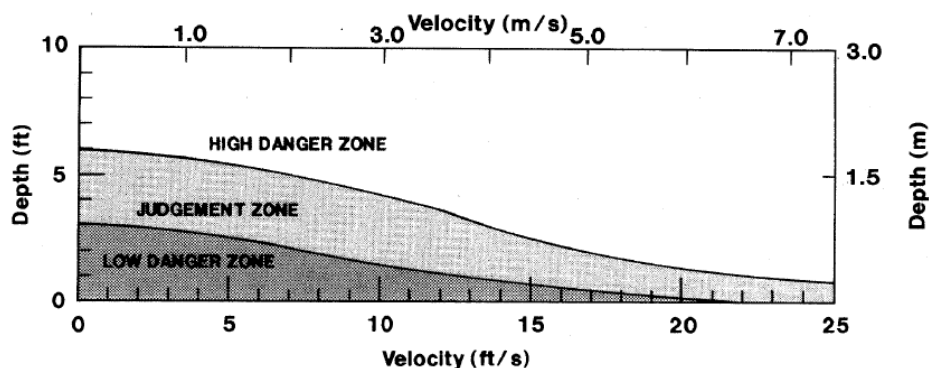
3.3.5 Parámetros de Peligro de Inundaciones por fractura de Presas en Estados Unidos (1988) y España (1996)

En 1988, el Bureau of Reclamation del Departamento del Interior de los Estados Unidos elaboró una guía que establece parámetros para evaluar el peligro asociada con posibles rupturas de presas. Este documento se enfoca particularmente en las pequeñas presas, ya que se reconoce que los fallos en estas estructuras podrían tener un impacto significativo en pequeñas poblaciones. Se parte de la premisa de que la peligrosidad abajo de presas de gran tamaño es generalmente evidente y bien entendida. Las directrices establecidas en este documento buscan abordar específicamente los riesgos asociados con las presas más pequeñas, donde los posibles efectos de una ruptura pueden ser menos previsibles y potencialmente más peligrosos para comunidades cercanas. Se reconoce que el análisis de peligrosidad debe considerar no solo la magnitud de la estructura de la presa, sino también la vulnerabilidad de las poblaciones y los bienes aguas abajo. (U.S . DEPARTMENT OF THE INTERIOR , 1988).

En las presas más pequeñas se destaca la importancia de no subestimar los riesgos asociados con estas estructuras y subraya la necesidad de directrices específicas para su evaluación. Al asumir que la peligrosidad de las presas de grandes dimensiones es generalmente evidente, el documento se centra en llenar posibles vacíos en la comprensión de los riesgos y en brindar orientación clara para la seguridad de las comunidades que podrían estar en peligro en caso del fallo de la presa. Este tipo de directrices contribuyen a mejorar la gestión de riesgos asociados con infraestructuras hidráulicas críticas y a garantizar la seguridad de las áreas pobladas cercanas a estas presas. (Mártinez Gomariz, 2016).

El método de evaluación de peligros para áreas de inundación propuesto, basado en la combinación de profundidad y velocidad, se divide en tres categorías: área de bajo peligro, área de alto peligro y área incierta.

Ilustración 18 Curva de peligrosidad para viviendas



Nota. Zonas de peligrosidad para los ocupantes de las viviendas situadas en la zona de inundación, tomado de (U.S . DEPARTMENT OF THE INTERIOR , 1988)

sujeto a una combinación de profundidad y velocidad trazada dentro de esta zona, se supone que el número de vidas en peligro asociadas con posibles peligros aguas abajo es cero. Es decir, en esta zona, se considera que no hay riesgo significativo para la vida humana. (U.S . DEPARTMENT OF THE INTERIOR , 1988).

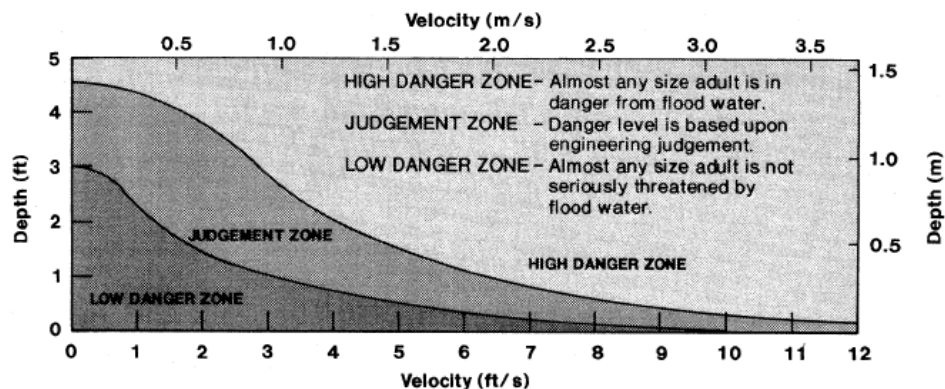
- **Zona de Alto Peligro:** Se caracteriza por una combinación de velocidad y profundidad que, si está presente en un posible peligro, se asume que pone en peligro vidas en todos los casos aguas abajo. Esta zona indica un alto riesgo de impacto en la vida humana. (U.S . DEPARTMENT OF THE INTERIOR , 1988).
- **Zona Indefinida:** Representa una franja intermedia entre las zonas de bajo y alto peligro. Las zonas de bajo y alto peligro son los extremos de certeza razonable: en la primera se presume que no hay vidas en peligro, y en la segunda, se supone que todas las vidas están en peligro. La Zona de Juicio reconoce la complejidad de cada situación de inundación,

que es única. Debido a la imposibilidad de tener en cuenta todas las variables que podrían poner en peligro vidas, especialmente en casos donde la magnitud de la inundación se encuentra en esta zona, se deja a criterio del analista de ingeniería la determinación de las vidas en peligro. Se destaca la importancia de llegar a un acuerdo entre varios analistas para fortalecer esta determinación. (U.S . DEPARTMENT OF THE INTERIOR , 1988).

Para los peatones, el documento proporciona tablas de peligrosidad que diferencian entre adultos (personas que miden más de 1,5 metros y pesan 54 kilogramos) y niños. Utiliza la categoría de niños, que representa a personas más pequeñas y livianas, específicamente para situaciones que involucran grupos mixtos de personas. Tener en cuenta esta categoría de peatones más vulnerables puede ayudar a lograr resultados que promuevan la seguridad. La distinción entre adultos y niños en el mapa de peligros refleja una conciencia de las diferentes características físicas y de comportamiento que pueden afectar la seguridad de los peatones en un entorno determinado. Incluir categorías de niños en las evaluaciones de peligros es particularmente importante en áreas urbanas y entornos escolares, donde la presencia de niños puede ser considerable y su seguridad es una máxima prioridad. (U.S . DEPARTMENT OF THE INTERIOR , 1988).

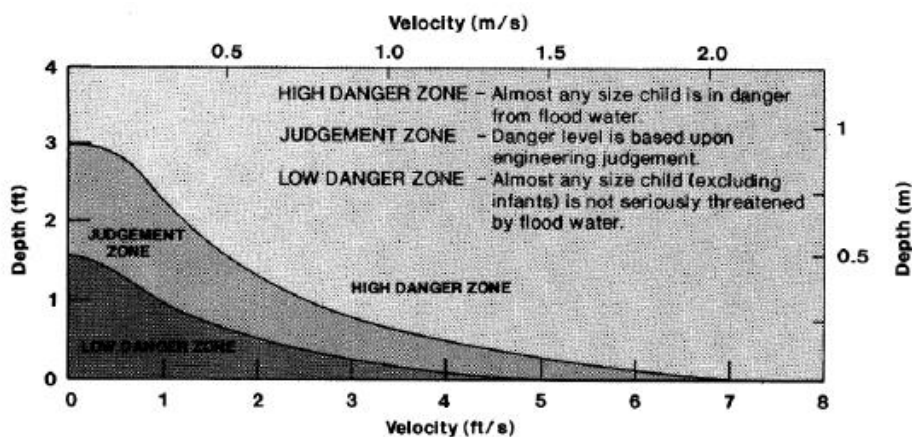
Al categorizar los niños cuando hay multitudes mixtas, el documento busca garantizar que las medidas de seguridad y la infraestructura estén diseñadas para tener plenamente en cuenta las necesidades y vulnerabilidades específicas de los peatones jóvenes. Este enfoque ayuda a crear un ambiente más seguro para personas de todas las edades, promueve la seguridad vial y reduce los riesgos asociados con el movimiento de peatones. (U.S . DEPARTMENT OF THE INTERIOR , 1988).

Ilustración 19 Curva de peligrosidad para adultos



Nota. Definición de zonas de peligrosidad para adultos, tomado de (U.S . DEPARTMENT OF THE INTERIOR , 1988).

Ilustración 20 Curva de peligrosidad para niños



Nota. Definición de zonas de peligrosidad para niño, tomado de (U.S . DEPARTMENT OF THE INTERIOR , 1988)

3.3.6 Parámetro del Condado de Clark (Las Vegas, EE.UU.) (1999)

Al emplear calles para gestionar el agua de lluvia, aunque parece natural, impacta la función principal de transporte de las mismas. A pesar de ello, las calles desempeñan un papel crucial en el sistema de drenaje de tormentas al tener una gran capacidad para llevar agua de lluvia, sin costos significativos asociados al drenaje. Para equilibrar estos dos usos, se necesitan límites en la capacidad de carga de las calles, basados en su clasificación y uso de emergencia

durante inundaciones, que generalmente sigue la clasificación de tráfico. Por ejemplo, las vías más anchas y transitadas tienen limitaciones adicionales en la profundidad y capacidad de escorrentía de aguas pluviales en comparación con las calles locales o de captación (Clark County Regional Flood Control District, 1999).

En puntos de intersección o puntos bajos entre intersecciones, existen dos opciones para gestionar el flujo de agua en las cunetas: a) instalar sumideros y alcantarillas para llevar el agua bajo la calle; b) colocar una cuneta de concreto a lo largo de la calle y/o intersección. La elección entre estas opciones depende de la clasificación de la calle y de la dirección del tráfico que pasa por la intersección. Se recomienda que el planificador de drenaje consulte con la entidad local para seleccionar la alternativa adecuada. En el pasado, se utilizaron canales o conductos subterráneos para transportar el agua de lluvia bajo las calles sin construir alcantarillas adicionales. Aunque funcionan bien en teoría, en la práctica surgen problemas como la sedimentación gradual de las estructuras y la acumulación de agua en los laterales. Por lo tanto, el uso de conductos subterráneos está prohibido, a menos que condiciones especiales del sitio lo justifiquen y se obtenga permiso de la entidad local y/o CCRFCD. (Clark County Regional Flood Control District, 1999).

El Manual de parámetros de Diseño del Drenaje del Condado de Clark, (Clark County Regional Flood Control District, 1999), cumple un rol clave en el adelanto de directrices específicas para la gestión local aguas producto de escorrentía y la seguridad frente a inundaciones. Para calles de menos de 24 metros de ancho, el manual permite una profundidad máxima de 30 centímetros por encima de la sección más baja de la vía (generalmente cerca de la acera). Este valor se utiliza para estimar la capacidad portante de la calle y es una referencia importante a la hora de planificar y diseñar infraestructura de drenaje.

Adicionalmente, el manual propone un producto específico $y \cdot v \leq 0.55 \text{ mm}^2/\text{s}$ como criterio para la capacidad de transporte, estableciendo así una relación entre la profundidad $[y]$ y la velocidad $[v]$. Esta métrica se presenta como una herramienta valiosa para garantizar que las calles locales tengan la capacidad adecuada para gestionar las aguas pluviales de manera eficiente y segura. (Clark County Regional Flood Control District, 1999).

En el contexto de zonas con peligrosidad de inundación, el manual establece requisitos para la altura del piso terminado en viviendas, sugiriendo que este debe ser al menos 45 cm sobre el nivel superior del bordillo. Alternativamente, se plantea la opción de proteger las viviendas contra inundaciones. Esta disposición refleja un enfoque proactivo para abordar la seguridad de las viviendas en áreas expuestas a eventos de inundaciones, reconociendo la posibilidad de calados significativos y buscando medidas de mitigación efectivas. (Nanía Escobar et al. 2016).

Ciudades como Austin, Texas, han adoptado un enfoque diferente para gestionar las inundaciones de las carreteras, centrándose en reservar ciertas áreas de las carreteras únicamente para el tráfico de unidades de rescate. Este procedimiento no define claramente la profundidad máxima, sino que lo define indirectamente especificando la parte superior de la calle como límite superior. La altura máxima es la parte más alta de la calzada, y su valor puede variar mucho dependiendo del ancho y la pendiente transversal de la calle (Mártinez Gomariz, 2016).

El propósito de asignar esta área de mayor protección a los vehículos de emergencia es garantizar que se mantenga una ruta viable incluso en condiciones de inundación, permitiendo una respuesta rápida y efectiva en situaciones críticas. Al no especificar explícitamente un calado máximo, se reconoce la variabilidad en las características de la calle, lo que permite una mayor

flexibilidad para adaptarse a diversas condiciones hidrológicas. Este enfoque, basado en reservar espacio para vehículos de emergencia, enfatiza la importancia de la movilidad en situaciones de crisis y subraya las consideraciones prácticas de adaptar las soluciones a las características específicas de cada calle. Las variaciones en los niveles máximos de agua reflejan la diversidad de la infraestructura urbana y reconocen que el enfoque debe adaptarse a las especificidades de cada calle, contribuyendo así a una gestión de inundaciones más eficaz y personalizada en los entornos urbanos. (Mártinez Gomariz, 2016).

3.3.7 *Parámetro Nanía (1999)*

Este parámetro fue presentado por Nanía (1999) y aborda el problema de estabilidad del deslizamiento humano contra la resistencia creada por el flujo de agua. Si el agua tiene que cruzar la calle a cierta velocidad y corriente, existe incertidumbre sobre la capacidad del agua para transportarnos. El requisito básico de esta norma es garantizar que la fuerza del agua que actúa sobre la persona no sea suficiente para provocar que ésta resbale o caiga. La principal inquietud es la estabilidad de las personas ante caudales donde la velocidad y profundidad del flujo de agua pueden crear riesgos potenciales.

La clasificación de resistencia al agua es un factor clave para establecer si se atienden los parámetros de estabilidad. Este análisis puede incluir factores como la velocidad del flujo y la resistencia del cuerpo humano a deslizarse por el agua. El objetivo es determinar el umbral para que la resistencia no supere el límite que garantiza la estabilidad de una persona al cruzar la vía en condiciones específicas de tráfico. Esta norma está diseñada para proporcionar una guía práctica y segura para las personas que deben seguir el agua a lo largo de un camino, teniendo en cuenta la capacidad del cuerpo para resistir resistencia. Esta perspectiva centrada en la seguridad

ayuda a abordar los desafíos de la movilidad de los peatones en entornos inundados y garantiza que las decisiones de cruce se tomen conscientemente teniendo en cuenta la seguridad personal en condiciones de inundación (Nania Escobar , 1999).

Nanía (1999) plantea la siguiente ecuación para evaluar la fuerza de arrastre:

$$F_D = \frac{1}{2} C_d \rho_w A V^2 \quad [1]$$

donde,

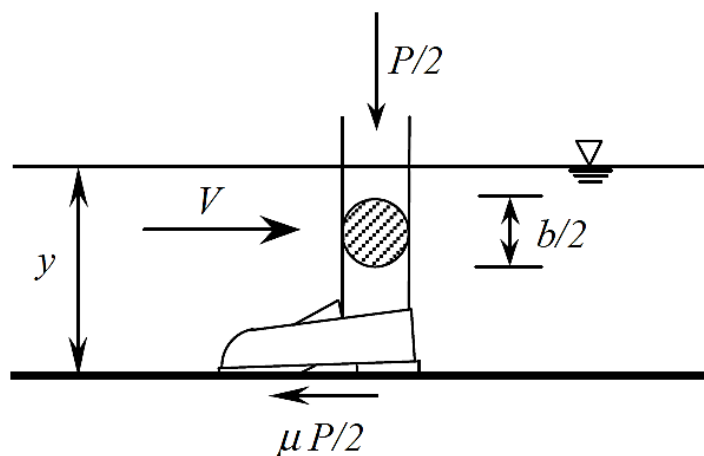
- C_d = El coeficiente de arrastre, el cual está determinado por la configuración de la superficie con la que el fluido interactúa.
- ρ_w = Densidad del agua.
- A = La proyección frontal del área donde actúa la fuerza del agua, equivalente a $y * b$, siendo y el calado multiplicado por el ancho de la persona, en este caso de las piernas.
- v = velocidad.

Presumiendo que la persona se pueda mantener en pie, la fuerza que la nivela es la fricción entre los zapatos y el suelo, la cual se expresa como:

$$F_R = \mu F_G = \mu(P * g) \quad [2]$$

Donde F_g es la fuerza de la gravedad, μ es el factor de fricción, que está sujeto al material del zapato y del suelo y de la posición de ambos, y P es el peso del individuo. Aquí, se desatiende la presión vertical hacia arriba debida al fluido desplazado por la parte inmersa del cuerpo (Nania Escobar , 1999).

Ilustración 21 Esquema de la pierna de una persona



Nota. Fuerzas aplicadas en las piernas de una persona, tomado de (Nania Escobar , 1999)

Si el factor de resistencia de un prisma circular infinitamente alto se considera con un valor de 1.2, la densidad del agua 1000 kg/m³, el ancho de una pierna humana es b=0,1 m x 2=0,2 m, el peso 50 kg , la fuerza de fricción del caucho húmedo El coeficiente entre y del hormigón es igual a 0,5 y el parámetro de protección como 2 para incluir el efecto de la presión y posibles cambios en las medidas consideradas, las condiciones de estabilidad estarán dadas por las siguientes desigualdades (Mártinez Gomariz, 2016):

$$v^2 * y \leq \frac{2\mu\rho g}{C_d\rho_w b 2} = \frac{2 * 0.5 * 50 * 9.81}{1.2 * 1000 * 0.2 * 2} \frac{m^3}{s^2} = 1 \frac{m^3}{s^2} \quad [3]$$

El factor de seguridad puede interpretarse como un factor de fricción, teniendo en cuenta las incertidumbres asociadas a los diferentes materiales y al estado del suelo y del calzado. También se pueden tener en cuenta el peso y la anchura de los peatones, ya que los cambios en estos factores pueden afectar a la seguridad. Aunque los valores de esta norma se asignan en función de tipos concretos de peatones. Es importante destacar su adaptabilidad, ya que puede

ajustarse a la masa, dimensiones y estructura del individuo para adecuarse a cada situación., así como a los tipos. de peatones que quieren ser analizados, el pavimento y los zapatos (Nania Escobar , 1999).

3.3.8 Parámetro del Consejo de Agricultura y Gestión de Recursos de Australia y Nueva Zelanda (ARMC) (2000)

El Consejo Recursos y Agronomía de Australia y Nueva Zelanda (ARMC) cumple un rol clave en el control de amenazas asociados con los eventos hidrológicos mediante la producción de estimaciones integrales de múltiples factores. En un informe de 2000, el ARMC introdujo una evaluación de peligros fundamentada en el tiro, la rapidez y el tiempo de salida como parámetros básicos (ARMC, 2000).

Además de centrarse en la firmeza de los individuos en el agua, este enfoque también cubre la permanencia de diversas infraestructuras. Ampliar la definición de peligro para incluir la estabilidad de factores distintos de la seguridad humana representa un enfoque integral y holístico para evaluar los riesgos asociados con eventos hidrológicos, particularmente en áreas agrícolas y rurales. Al considerar el calado, la velocidad y el tiempo de evacuación, el ARMC reconoce la complejidad de las interacciones entre el agua y las estructuras circundantes. Este enfoque ampliado va más allá de la seguridad individual y se adentra en la preservación de la integridad de las infraestructuras agrícolas y otros elementos esenciales. La estabilidad de los cimientos, mástiles y áreas verdes se convierte en un indicador crítico para comprender el impacto global de eventos inundantes en la infraestructura y los recursos de las áreas evaluadas. (ARMC, 2000).

Según ARMC (2000) la contribución a la gestión de riesgos hidrológicos subraya la importancia de considerar no solo los aspectos relacionados con la seguridad personal, sino también los efectos más amplios en el entorno circundante. Este enfoque integral suministra un criterio consistente para la toma de decisiones basada en información y la aplicación de acciones de reducción de riesgos adaptadas a las condiciones concretas de Australia y Nueva Zelanda.

La investigación clasifica el grado de peligrosidad en cuatro niveles:

- **Baja**

- ✓ Evacuación sin ningún tipo de inconveniente.
- ✓ Cualquiera puede caminar por el agua sin dificultades.
- ✓ Velocidad y profundidad máxima bajos.
- ✓ Evacuación posible mediante coches.
- ✓ Tiempo suficiente para prever inundaciones, dar aviso y evacuar.

- **Media**

- ✓ Adultos pueden desplazarse sin dificultad.
- ✓ Niños y ancianos con posibles limitaciones.
- ✓ Evacuación más extensa, con mayores velocidades y profundidades máximas.
- ✓ Evacuación en coches solo en las primeras etapas; luego se requieren vehículos 4WD y/o vehículos de carga.

- **Alta**

- ✓ Personas Mayores tienen dificultades al caminar.
- ✓ Evacuación con vehículos de motor posible solo en las primeras etapas; luego se necesitan vehículos todoterreno o camiones.
- ✓ pueden ser necesarios equipos de evacuación especializados.

- **EXTREMA**

- ✓ Necesarios equipos de evacuación especializados
- ✓ Salir caminando no es una alternativa viable debido a las velocidades y profundidades máximas.
- ✓ Velocidad y profundidad máxima significativamente superiores a 1.0 m y 1.5 m/s.

3.3.9 Parámetro de RESCDAM (2000)

El proyecto europeo RESCDAM, iniciado en 1999 y regulado por el "Finnish Environment Institute", el cual desempeñó un papel crucial en el análisis de avenidas producidas por el rompimiento de embalses. Según Falconer & Xia (2013) este proyecto se enfocó en tres objetivos fundamentales, con el propósito de proporcionar información valiosa para las autoridades de rescate y mejorar la organización de acciones ante el riesgo de estos fenómenos hidrológicos:

Permanencia y capacidad de maniobra de individuos en corrientes de agua.:

- ✓ Este aspecto se abordó mediante estudios específicos que se centraron en la permanencia y equilibrio de individuos en situaciones con corriente de agua.
- ✓ La investigación incluyó ensayos en laboratorio físico con sujetos humanos, con el objetivo de definir límites seguros para las operaciones de rescate en operaciones de rescate ante inundaciones por fallo de presa.
- ✓ Los resultados proporcionaron información esencial para valorar los riesgos ligados con la existencia de personas en áreas afectadas por inundaciones y contribuyeron a mejorar las estrategias de rescate.

Capacidad de las viviendas para resistir el flujo de agua:

- ✓ Se realizaron estudios específicos para evaluar la resistencia de las viviendas ante los impactos durante una inundación por fractura de presa.
- ✓ Los hallazgos ayudaron a comprender la vulnerabilidad de las estructuras residenciales y a informar las medidas de rescate y protección.

Coefficientes de rugosidad de bosques y casas:

- ✓ El proyecto se ocupó de estudiar los coeficientes de rugosidad asociados con bosques y casas en el contexto de inundaciones.
- ✓ Estos estudios permitieron mejorar la comprensión de cómo la rugosidad del entorno afecta el comportamiento del flujo de agua durante una inundación.

Cada individuo fue sometido a ensayos individuales con variados niveles de calado de agua. Previamente a los experimentos, se aseguró de que cada participante se familiarizara con las instalaciones y los implementos de protección en condiciones de agua en reposo. La profundidad inicialmente se fijó y, seguidamente, se proporcionó una velocidad inicial a la plataforma. Los parámetros se establecieron de manera que el producto ($v \cdot y$) fuera lo suficientemente bajo como para permitir caminar fácilmente sobre el agua. (Mártinez Gomariz, 2016).

Durante el experimento, se pidió a todos que caminaran en dirección perpendicular al flujo de agua y corriente abajo. La velocidad se aumenta gradualmente mientras los participantes mantienen la estabilidad y la destreza. Este proceso continuo hasta que el sujeto pierde permanencia o destreza. Si la estabilidad se ve comprometida, el remolque se detiene inmediatamente. Se registraron cuidadosamente la corriente de aire y la rapidez del agua, y el

ensayo continuó hasta el subsiguiente nivel de corriente y procedimiento, y cada hombre repitió el ciclo al menos cuatro veces (Karvonen et al. 2000).

Todo el proceso experimental fue realizado por siete sujetos y grabado y fotografiado para registrar cada paso en detalle. Este enfoque sistemático y detallado nos permitió obtener datos precisos sobre la estabilidad y maniobrabilidad del personal en diferentes condiciones de calado y velocidad del agua, contribuyendo a una comprensión más profunda de su comportamiento en escenarios de inundaciones simuladas (Karvonen et al. 2000).

En el ensayo se probaron un total de siete personas. El protocolo de prueba especifica un rango de velocidad de 0,6 a 2,75 m/s y un rango de profundidades de 0,3 a 1,1 m. Se observa una amplia gama ($v \cdot y$) en el producto debido a las características individuales de cada miembro que caracterizan la funcionalidad humana en el proceso. El producto específico ($v \cdot y$) que produce una disminución de equilibrio o rendimiento oscila entre 0,64 y 1,26 m²/s. Es decir, los voluntarios de mayor estatura y robustos tienen una maniobrabilidad más efectiva que los individuos con una estatura o constitución más baja. Estos cambios en el rendimiento demuestran el impacto significativo de la estructura corporal individual en las interacciones con el flujo de agua, destacando la importancia de comprender la diversidad de respuestas humanas a condiciones de inundaciones simuladas (Mártinez Gomariz, 2016).

Basado en Abt et al. (1989) y el estudio RESCDAM (Karvonen et al. 2000) suministran acercamientos a las limitaciones de movilidad y estabilidad para los adultos en la actualidad. Estas restricciones se aplican a adultos que viajan sin herramientas especiales (como cuerdas) y no incluyen chalecos salvavidas. No se ha estudiado la capacidad de los niños para confrontar el

flujo, pero los niños no deben intentar afrontar un caudal sin ayuda. Las condiciones ambientales y de tráfico se dividen en tres clases: malas, normales y buenas (Mártinez Gomariz, 2016).

Tabla 1 Niveles de daño en niños y adultos

	Medida de daño ($v \cdot y$) (m^2/s)		
	Bajo	Moderado	Elevado
Infantes	<0.1	0.1 – 0.25	>0.25
Individuo adulto	<0.3	0.3 – 0.7	>0.70

Nota. Daño potencial ante inundaciones, tomado de (Karvonen et al. 2000).

3.3.10 Parámetro de Estabilidad de Gómez (2001)

Un análisis perpetrado por (Gómez, 2001) para analizar la distancia entre sitios de drenaje en Barcelona utilizó un enfoque que se centraba en la estabilidad en vuelco de los peatones como criterio de seguridad. La consideración básica es considerar al peatón como una unidad rígida, que, aunque sólo se satisface aproximadamente, permite calcular el momento de vuelco (M_0). Este momento es producido por la potencia cinética del flujo sobre el sujeto (llamada FD) y se ejerce a una altura específica, en este caso la mitad del tiro. El fundamento de este enfoque es que considerar al peatón como un cuerpo rígido lo que facilita la comprensión de su estabilidad al interactuar con el flujo de agua, simplificando así el análisis. Se utiliza la dinámica de flujo que actúa sobre la altura crítica para calcular los momentos que pueden provocar el vuelco del peatón. Aunque este método tiene ciertas limitaciones en términos de representación realista del comportamiento humano, suministra un fundamento conceptual para evaluar la protección en función de la distancia entre drenajes en entornos urbanos, ayudando así

a comprender los riesgos de inundaciones y diseñar soluciones que los reduzcan. riesgo para los transeúntes (E.T.S. Ingenieros de Caminos, Canales y Puertos, 2004).

$$M_o = F_D * \frac{y}{2} = \frac{1}{2} * C_d * \rho_w * A * v^2 * \frac{y}{2} \quad [4]$$

El análisis de la permanencia de las personas un estudio de Gómez (2001) muestra que el momento estabilizador (M_e) se debe principalmente al peso de la persona. Este peso actúa sobre el centro de gravedad de la persona, creando una barra de apalancamiento igual a la mitad del diámetro de la pierna, o $b/4$.

$$M_e = F_g * \frac{b}{4} = P g * \frac{b}{4} \quad [5]$$

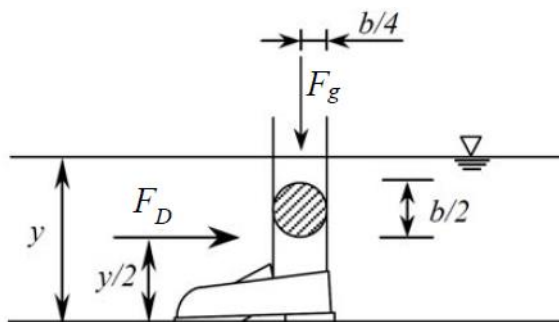
Según Martínez Gomariz (2016), realizando un análisis de estabilidad de peatones que cumplen con los criterios de resistencia al movimiento y aplicando un coeficiente de fiabilidad de 2 para tener en cuenta los efectos de tracción y posibles cambios en los parámetros considerados, obtenemos la siguiente desigualdad:

$$\frac{1}{2} M_e \geq M_o \quad [6]$$

$$(v^2 * y^2) \leq \frac{P g * \frac{b}{4}}{C_d * \rho_w b^2} = \frac{50 * 9.81 * 0.05}{1.2 * 1000 * 0.2 * 2} \frac{m^4}{s^2} = 0.204 \frac{m^4}{s^2} \quad [7]$$

Finalmente se obtiene el valor de $(v*y) \leq 0.45 \text{ m}^2/\text{s}$. (Mártinez Gomariz, 2016).

Ilustración 22 Fuerzas aplicadas en una pierna



Nota. Esquema de las fuerzas actuantes sobre las piernas de una persona, para evaluar su estabilidad al vuelco, tomado de (Gómez, 2001).

3.3.11 Parámetro de Kelman (2002)

El estudio aborda mejoras significativas en el manejo de riesgos asociados a desastres naturales. y se centra en la debilidad física de los hogares a las inundaciones en la costa este de Inglaterra. Además de estudiar los daños causados por el lento aumento del nivel freático, también se analizó la presión lateral y el caudal de agua provocado por la discrepancia de elevación del agua entre la parte interna y externa de la vivienda. Canvey Island y Kingston-upon-Hull fueron seleccionados como sitios de estudio, y mediante encuestas de campo, se determinaron las características de la vulnerabilidad de las residencias en estas áreas. Se identificaron modos de fallo críticos, como la velocidad de aumento del agua dentro de las residencias y el fallo de vidrio y paredes, desarrollando matrices de vulnerabilidad bidimensionales para ilustrar herramientas de gestión de desastres. Se presentó el método del "porcentaje equivalente de pérdida" para describir el riesgo cuantitativo y se discutieron herramientas de toma de decisiones cualitativas y estrategias de análisis. Los resultados,

aplicables a residencias modernas en Inglaterra, ofrecen conocimientos y métodos valiosos para entender y gestionar el riesgo de la sociedad frente a desastres naturales. (Kelman, 2002).

En su tesis doctoral, llevó a cabo un estudio amplio de los efectos de la profundidad y la rapidez en unidades habitacionales en el Reino Unido. Una contribución importante de este estudio es la propuesta de una escala de daños de DS0 a DS5. Además, Kelman proporciona gráficos informativos que visualizan eficazmente los efectos de la resistencia y la velocidad en un edificio, con líneas discontinuas que muestran los límites inferiores de cada nivel de daño. Estos recursos gráficos son una valiosa herramienta visual para ayudar a comprender la relación entre la gravedad de las inundaciones y los daños potenciales a los edificios, ayudando así a comprender y gestionar los riesgos de inundaciones en un área de estudio específica. Este documento presenta un marco detallado que será útil tanto para los profesionales de la gestión de desastres como para los investigadores interesados en evaluar la vulnerabilidad residencial a las inundaciones. (Kelman, 2002).

Tabla 2 Escala de daños

Daño	Descripción
DS0	Los edificios no se ven afectados por el agua.
DS1	El agua llega al edificio, pero no entra.
DS2	Los daños externos se deben a la penetración de agua en el edificio.
DS3	Las puertas y ventanas cerradas permiten que entre agua o escombros al edificio.
DS4	El daño estructural de las paredes permite la infiltración de agua/suciedad.
DS5	Colapso estructural y posteriores reformas.

Nota. Escala y descripción de daños en edificaciones, Tomado de (Kelman, 2002).

3.3.12 Parámetro de Ramsbottom et al. (2006)

El proyecto "Flood Risks to People" tenía como objetivo desarrollar una metodología para evaluar y mapear el riesgo de muerte o daño grave causado por inundaciones. Dividido en dos fases, la primera, concluida en julio de 2003, se centró en evaluar el conocimiento existente y desarrollar el marco general del proyecto. La Fase 2, que se ocupó de investigaciones más detalladas sobre la calificación del riesgo de inundación y los conceptos de "Área" y "Vulnerabilidad de las Personas", culminó en un Registro del Proyecto que compiló y resumió la información de los informes previos, proporcionando metodología final y conclusiones en el Informe Técnico 1 y 2 FD2321. Este proyecto representó una contribución significativa a la gestión del riesgo de inundaciones, alineándose con estrategias gubernamentales y proporcionando orientación para evaluar el riesgo de muerte o daño grave causado por inundaciones. Su enfoque en fases permitió la evaluación exhaustiva del conocimiento existente y la realización de investigaciones más detalladas, lo que condujo al desarrollo de una metodología final y conclusiones fundamentadas. El Registro del Proyecto compiló la información de manera integral, sirviendo como referencia para el Comité del Proyecto y otras partes interesadas involucradas en el proyecto. (Ramsbottom et al. 2006).

El método utilizado en este estudio ha demostrado ser muy eficaz en la evaluación de riesgos en zonas inundadas. No obstante, es fundamental resaltar que los procesos utilizados en el estudio se derivan de una revisión de investigaciones previas en esta área y no se derivan empíricamente. Los autores enfatizan la necesidad de realizar más ensayos centrados en los

efectos de diversas facetas relacionadas con el estado del agua, como la basura, los flujos de desechos y la presencia de factores químicos y biológicos. Estos experimentos pueden proporcionar datos valiosos sobre cómo estos elementos pueden causar perjuicios o inclusive el deceso a las personas, aumentando así la precisión y aplicabilidad de los métodos propuestos (Surendran et al. 2008).

Tabla 3 Umbrales de peligro en personas

Y * (V + 0.5) + DF	Nivel De Peligro	Descripción
< 0.75	Bajo	Precaución: Es posible estar de pie en áreas inundadas con diferentes profundidades de agua.
3.75– 1.25	Medio	Peligro para algunas personas (p. ej. niños): Peligro: inundaciones profundas o rápidas.
3.25– 2.5	Alto	Peligros para la mayoría de las personas, las llanuras aluviales son profundas y tienen altos caudales.
>2.5	Extremo	La zona de inundación representa un grave peligro para todos debido a su profundidad y alta velocidad.

Nota. Tomada de (Surendran et al. 2008).

3.3.13 *Parámetro Suizo (2004)*

En Suiza, se introdujeron criterios adicionales para determinar la relación entre los parámetros del flujo hidráulico (por ejemplo, velocidad y tiro) y los niveles de peligro basados en el concepto de zonas sensibles. Este enfoque muestra que la vulnerabilidad se puede ver de manera más integral al centrarse en las áreas afectadas y así proporcionar un enfoque integral de los niveles de inseguridad asociados con los diferentes parámetros de flujo. (Mártinez Gomariz, 2016).

Tabla 4 Criterios del parámetro suizo (2004)

Velocidad [M/S]	Profundidad < 1 M	Profundidad > 1 M
< 0.5 m/s	Baja Peligrosidad	Elevada Peligrosidad
> 0.5 m/s	Elevada Peligrosidad	Peligrosidad extrema

Nota. Tomado de (Mártinez Gomariz, 2016)

3.3.14 *Parámetro de la jurisdicción de Infraestructura, Organización y Elementos Naturales de la administración de Nueva Gales del Sur (Sídney, Australia) (2005)*

La Guía de desarrollo de llanuras aluviales, desarrollada y publicada en 2005, es una herramienta integral con el objetivo principal de mitigar las inundaciones. Consecuencias para propietarios e inquilinos en zonas propensas a inundaciones. Su enfoque abarca desde el análisis de inundaciones hasta la administración de riesgos. y tiene como objetivo reducir las pérdidas públicas y privadas por inundaciones. Uno de los 14 apéndices del manual proporciona una visión profunda de la hidráulica y la clasificación de peligros. Se definen tres categorías hidráulicas para zonas propensas a inundaciones (canales de navegación, embalses y franjas de

protección contra inundaciones) y se definen dos niveles de peligrosidad hidráulica: peligro bajo y peligro alto. Esta clasificación dio como resultado la creación de seis áreas específicas de riesgo de inundación según la intensidad del peligro y la ubicación dentro de la zona de inundación. (Department of Infrastructure Planning and Natural, 2005).

El Departamento de Planificación de Infraestructuras y recursos naturales (2005) ha dividido las categorías de riesgo de cada categoría hidráulica en alto riesgo y bajo riesgo.

Estas se pueden definir de la siguiente manera:

- **Alto Riesgo:** Posible peligro para la seguridad personal; evacuación por camiones difícil; adultos en buena forma física tendrían dificultades para llegar a un lugar seguro; potencial de daño estructural significativo en edificios.
- **Bajo Riesgo:** Si se requiere, los vehículos pueden desalojar a las personas y sus pertenencias, los mayores de edad sanos no tendrán dificultades para ponerse a salvo.

Un análisis exhaustivo del riesgo de inundación para establecer el riesgo solo se puede realizar desde la estructura de una estrategia de mitigación de riesgos en llanuras de inundación. El plan requiere los resultados detallados de un estudio de inundaciones y una evaluación de todos los factores como advertencias de inundación, conciencia de inundaciones, preparación para inundaciones, posibles problemas de evacuación, etc. El proceso implica primero la evaluación del nivel de riesgo desde principios hidráulicos puros, y luego refinar la categoría de riesgo hidráulico a la luz de otros factores relevantes que afectan la seguridad de las personas. (Mártinez Gomariz, 2016).

Las velocidades del agua y las profundidades por debajo de los niveles seguros establecidos para proteger al personal se consideran riesgos menores. El límite de velocidad es de 2,0 m/s, incluso si la profundidad es inferior a 0,2 m; El límite de profundidad es de 0,8 m sin velocidad. También se introdujo un límite adyacente al margen de seguridad del personal, denominada franja de cambio, con un margen de profundidad de 1,0 m. La dimensión de la franja de peligro leve está determinada por las condiciones específicas del lugar afectado por la inundación. Sin embargo, fuera de esta zona la situación se clasifica como extremadamente peligrosa (Department of Infrastructure Planning and Natural, 2005).

Es importante señalar que estas categorías se consideran provisionales, ya que no tienen en cuenta todos los factores que pueden afectar el peligro. Estos gráficos proporcionan un punto de partida para la categorización de peligros. Si se identifican y califican otros factores que afectan el peligro, como el volumen del aluvión, el intervalo de previsión, la duración, los problemas de desalojo, etc., El grupo de peligro temporal necesita modificarse según sea necesario para garantizar resultados inequívocos. También se recomienda preparar mapas de peligros que ayudarían a evaluar los efectos de los peligros antes mencionados en áreas desarrolladas existentes y futuras en áreas propensas a inundaciones (Mártinez Gomariz, 2016).

3.3.15 Parámetro del Plan de Saneamiento De Barcelona. CLABSA (2006)

Un drenaje superficial adecuado es importante para garantizar niveles ideales de asistencia en las vías y mantener altos estándares de confort vial. Cuando el agua se acumula en la carretera, no sólo interferirá con el tráfico normal, sino que también reducirá la seguridad de derrapar y aumentará el riesgo de derrape o aquaplaning. La administración estatal debe trabajar para garantizar un comportamiento hidráulico eficaz en las calles, especialmente durante las

fuertes lluvias. Este enfoque es especialmente importante para las carreteras principales, que a menudo sirven como rutas de emergencia en situaciones de inundación. La implementación de medidas de drenaje efectivas no sólo ayuda a mantener el flujo del tráfico, sino que también reduce el riesgo de acumulación de agua en las carreteras y garantiza la seguridad de los conductores (Mártinez Gomariz, 2016).

Por estas razones, es una buena práctica diseñar sistemas de drenaje para garantizar adecuadamente los estándares de desempeño de las calles para una frecuencia de recurrencia de lluvias de 10 años y cumplir con los estándares de peligrosidad para un período de lluvia de 100 años (CLABSA, 2006). La municipalidad de la ciudad Condal, a través de CLABSA (2006) (la compañía mixta que manejó la red de saneamiento del municipio que funcionó en Barcelona desde 1992 hasta 2013), recomendó los siguientes criterios de calidad para las vías urbanas:

- Profundidad máxima $y = 6 \text{ cm}$
- Máxima Velocidad $v = 1.5 \text{ m/s}$

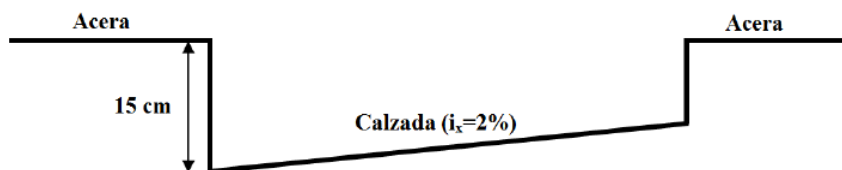
El valor inicial se refiere a la situación de anegamiento de las calzadas contiguas, en tanto que el carril central permanece sin agua para garantizar el paso seguro de los vehículos. El segundo valor se refiere al caudal y se deriva del programa ARMC (ARMC, 2000) teniendo en cuenta los rangos bajos típicos de inundación en arterias municipales debido a la precipitación. CLABSA también exige que se cumplan criterios de vuelco (Gómez, 2001) y deslizamiento (Nania Escobar, 1999) con una frecuencia de recurrencia de 100 años.

3.3.16 Parámetro de Russo (2009)

Russo (2009) realizó un análisis centrado en determinar el nivel de peligro que enfrentan las personas al cruzar carreteras, especialmente cuando la escorrentía fluye en las vías urbanas

durante o después de la lluvia. El método utilizado en este estudio es de carácter experimental, utilizando un modelo físico diseñado y construido dentro del centro de investigación del centro de Ingeniería Civil y Ambiental de la Academia Técnica Superior de Ingeniería Civil, de Canales y Portuarios de la UPC. Los modelos físicos creados para las pruebas tienen dimensiones importantes para asegurar la confiabilidad de los resultados, evitando efectos de escala innecesarios. El ancho es de 1,6 m, el largo es de 5,0 m y la pendiente varía del 0 al 10%, estas dimensiones se eligen en función del espacio disponible en el laboratorio. Los experimentos realizados en este entorno controlado permiten obtener datos precisos y relevantes sobre la interacción entre el clima severo, el flujo de agua en las calles y la protección de los usuarios al atravesar las vías. Este enfoque experimental proporciona una base sólida para comprender los riesgos asociados con la reutilización del agua de lluvia urbana y proporciona información valiosa que puede ayudar a mejorar la organización y la delineación del sistema vial (Russo, 2009).

Ilustración 23 Plataforma empleada por Russo (2009)



Nota. Sección transversal de la plataforma utilizada en los ensayos, tomado de (Mártinez Gomariz, 2016).

Los caudales utilizados se incrementaron de 100 en 100 hasta llegar a los 500 L/s, y se supuso que la aspereidad del material era una carretera de concreto normal con un valor n de 0,016. Esta aspereidad fue estimada para su uso en una simulación computacional de una

dimensión, que sirve como base para diseñar el prototipo y establecer diferentes combinaciones de flujo y pendiente (2%, 4%, 6%, 8% y 10%) (Mártinez Gomariz, 2016).

Un total de 23 personas, entre ellas 15 hombres y ocho mujeres, pesaban entre 48 y 100 kg y medían entre 1,48 y 1,82 m, como se describe en los documentos adjuntos. El escenario de prueba incluye personas caminando por las calles. Se efectuaron dos tipos de ensayos: una bajo condiciones óptimas de iluminación y otra bajo condiciones desfavorables. En el caso de estas últimas, se proporcionaron a las participantes gafas diseñadas para disminuir la visibilidad, simulando así situaciones de mala iluminación. Este enfoque metodológico permitió evaluar cómo las condiciones de iluminación impactan en la capacidad de las personas para atravesar la calle de manera segura. La inclusión de ambos sexos, una variabilidad en peso y altura, así como la simulación de diferentes niveles de iluminación, enriquecen la Fiabilidad y utilidad de los resultados obtenidos en los ensayos, ofreciendo una perspectiva más completa sobre los factores que afectan la seguridad peatonal en situaciones específicas de escorrentía pluvial en las calles urbanas. (Mártinez Gomariz, 2016).

Tabla 5 Atributos de los sujetos evaluados

Sujeto N°	Edad [Años]	Altura H [M]	Peso P [Kg]	Peso Total P' [Kg]
1	39	1.72	95	99
2	41	1.81	82	86
3	43	1.72	88	92
4	31	1.68	64	68
5	36	1.54	48	52
6	36	1.80	62	66
7	36	1.62	58	62

8	34	1.73	74	78
9	30	1.68	75	79
10	23	1.67	60	64
11	23	1.71	72	76
12	30	1.62	65	69
13	49	1.70	67	71
14	26	1.69	63	67
15	26	1.66	57	61
16	14	1.61	45	49
17	14	1.61	50	54
18	16	1.82	100	104
19	31	1.78	91	95
20	45	1.72	63	67
21	25	1.70	60	64
22	23	1.68	60	64
23	25	1.63	62	66

Nota. Tomado de (Mártinez Gomariz, 2016).

En el estudio de Russo (2009) Se propusieron tres niveles de peligrosidad: baja, media y alta, y se establecieron criterios distintivos para cada uno de ellos, detallados a continuación:

Peligrosidad Alta

- La persona pierde significativamente la estabilidad, no puede mantenerse en pie ni caminar y en algunos casos se deja llevar por la corriente.
- La persona tiene una pérdida importante de movilidad y no puede realizar correctamente el protocolo de prueba.

Peligrosidad Moderada

- El sujeto presenta una acentuada pérdida de permanencia, se muestra inestable y le cuesta mantenerse erguido al caminar.
- la persona tiene una pérdida importante de movilidad; En estas condiciones, se observan importantes dificultades en la ejecución y finalización del protocolo de prueba.

Peligrosidad Baja

- El hombre accidentalmente agarró la cuerda.
- La persona vacila o se niega a entrar a la estación mientras el agua circula.
- Este individuo presenta escasas dificultades de estabilidad y maniobrabilidad.

Estas normas permiten clasificar diferentes situaciones de inspección según la gravedad del riesgo para la seguridad del personal en condiciones de escorrentía de la calle. La claridad de los parámetros de evaluación facilita la interpretación de los hallazgos y la elección de determinaciones adecuadas. para gestionar y prevenir los riesgos asociados a estos escenarios (Mártinez Gomariz, 2016).

Finalmente, La consideración de Russo (2009), Las medidas específicas para la zona de peligro y calado son de 9 a 16 cm:

- Baja Peligrosidad: $v < 1.5 \text{ m/s}$
- Media Peligrosidad: $1.5 \text{ m/s} \leq v \leq 1.88 \text{ m/s}$
- Alta Peligrosidad: $v \geq 1.88$.

3.3.17 Parámetro de Australian Rainfall and Runoff (2010)

Según Cox et al (2010) la Guía Australiana de Lluvias y Escorrentías (AR&R) fue divulgada originalmente por los ingenieros de Australia en 1958 y ha desempeñado un papel importante en las directrices de ingeniería hidráulica para Australia. Después de la edición de 1987, se sugirió una investigación para adaptar las directrices a los requerimientos actuales. El manual AR&R consta actualmente de 21 artículos que han sido actualizados y publicados en varias fechas. De particular importancia para estos esfuerzos es la Cláusula 10 titulada "Normas apropiadas de seguridad personal", publicada en abril de 2010.

Durante los últimos cuarenta años, se han realizado numerosos análisis de laboratorio enfocados en las condiciones críticas de permanencia para diversos caudales. Algunos de estos estudios fueron sintetizados en el manual AR&R (Cox et al. 2010) y revisados detalladamente, culminando en un Análisis combinado de los resultados logrados por los diversos investigadores. Las características hidrológicas consideradas en estos estudios son la profundidad (y), la velocidad (v) y el resultado de la multiplicación de las dos ($v * y$). Además, los rasgos de la persona sometida a prueba se caracterizan por el producto de su altura y peso (HP). Este enfoque integrado proporciona una base sólida para comprender las interacciones entre las variables hidráulicas y las características individuales, ayudando así a establecer estándares de seguridad apropiados en entornos afectados por la escorrentía de aguas pluviales.

3.3.18 Análisis de Ávila & Ávila (2016)

Según Ávila & Ávila (2016), la ciudad de Barranquilla en Colombia enfrentó uno de los mayores problemas de gestión de aguas pluviales en el pasado. Dado que más del 90% de las áreas urbanas carecen de sistemas de evacuación de agua pluvial, la escorrentía fluye por las

calles mientras llueve a velocidades peligrosas de hasta 100 metros cúbicos por segundo y una frecuencia de ocurrencia de hasta 50 años. Las áreas permeables son pocas y las pronunciadas pendientes de la ciudad provocan flujos de agua supercríticos a alta velocidad e inundaciones repentinas en muchas calles. Estos problemas tienen consecuencias negativas como pérdida de vidas, daños a la infraestructura y pérdidas económicas.

Por lo tanto, Ávila y Ávila (2016) configuraron un modelo unidimensional, PCSWMM, para estimar el flujo, la velocidad y los niveles de peligrosidad en las calles durante diferentes eventos de lluvia. El modelo fue desarrollado teniendo en cuenta la caracterización y calibración de las condiciones de drenaje de la ciudad, incluidos estudios territoriales y mediciones in situ mediante pluviómetros y caudalímetros instalados en sistemas de monitoreo de lluvias. Los resultados del nivel de peligro se compararon con los estándares de seguridad del personal (1,2 m²/s), se registraron eventos de hasta 6 m²/s en 2014 y 20 m²/s para el evento de lluvia fuerte de 100 años. En el artículo se muestran tablas de peligros, velocidad y profundidad.

La calibración del modelo tuvo como objetivo ajustar el porcentaje de áreas impermeables, la proporción de tripulación impermeable y la proporción de tripulación permeable. Los coeficientes de Manning calibrados fueron 0,01 y 0,02 para condiciones impermeables y permeables, respectivamente (Ávila & Ávila, 2016).

El análisis de riesgo del estudio fue específico para individuos, ya que los accidentes registrados cerca de arroyos urbanos son causados por peatones imprudentes que intentan cruzar estos y finalmente son arrastrados por ellos. Este estudio profundizó en varios factores que contribuyen a los riesgos para los peatones cerca de cuerpos de agua en paisajes urbanos. Para comprender la dinámica de estas situaciones de peligro se estudiaron aspectos como la velocidad

actual, los patrones de comportamiento de los peatones y la Deficiencia en las medidas de seguridad. Además, se analizan datos históricos sobre dichos incidentes para identificar tendencias y patrones que puedan informar el desarrollo de medidas preventivas y campañas de concientización pública destinadas a mejorar la seguridad de los peatones cerca de cuerpos de agua.

Ávila y Ávila (2016) definieron el nivel de Peligro (m^2/s) se definió de la siguiente manera:

$$Peligro \left(\frac{m^2}{s} \right) = velocidad \frac{m}{s} * profundidad (m) \quad [8]$$

Finalmente, Ávila y Ávila (2016) concluyeron en su estudio que el nivel de peligrosidad asociado al escurrimiento superficial en las calles de Barranquilla supera el nivel máximo de 1,2 m^2/s en más del 50% de las calles principales del canal. Para una frecuencia de recurrencia de 5 años y 100 años, los niveles de peligro alcanzan 19 y 32, respectivamente.

3.3.19 Análisis de Sánchez Tapiero (2023)

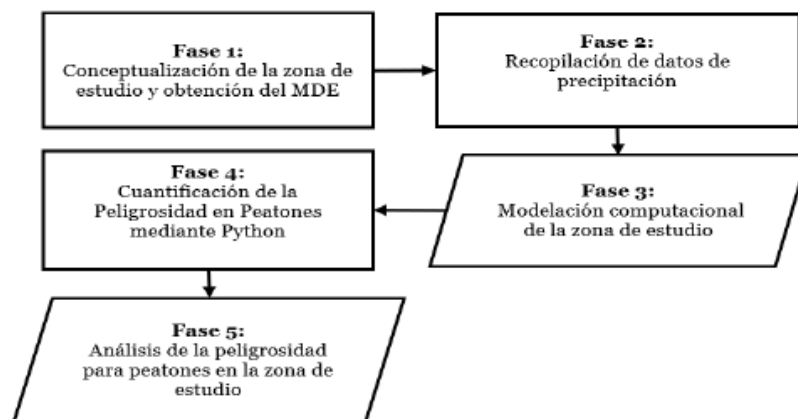
En su tesis de maestría, Sánchez Tapiero (2023) llevó a cabo una investigación enfocada a evaluar los peligros para los peatones por la inestabilidad causada por inundaciones de aguas pluviales en cuencas urbanas. Este estudio se realizó utilizando el lenguaje de programación Python y un modelo hidrológico e hidráulico específico en el municipio de Cúcuta, Colombia. El modelo se desarrolló utilizando el software PCSWMM (que permite el modelado doble 1D – 2D) de los sistemas de evacuación de aguas pluviales urbano preexistentes. La información requerida para el modelo fue recolectada durante visitas de campo, donde se realizó un estudio detallado de la infraestructura y red de drenaje de la ciudad.

Además, Sánchez Tapiero (2023) desarrolló un código utilizando el idioma de codificación Python para percibir peligros para los peatones. El código analiza las velocidades máximas y profundidades obtenidas en simulaciones de modelos de precipitación para diferentes periodos de retorno según los criterios marcados por el método elegido. Por lo tanto, se creó un mapa de peligros que identifica áreas en el área de estudio que presentan riesgo alto, medio y bajo para los peatones debido a la inestabilidad inducida por inundaciones.

Además, se identificaron variables hidráulicas que influyen en la detección de mayor riesgo en las vías más transitadas. Estos hallazgos brindan a los responsables de políticas alternativas para prevenir y mitigar estos riesgos.

El programa de investigación se llevó a cabo en 5 fases como se evidencia en la ilustración 24. Para Sánchez Tapiero (2023) el objetivo principal fue cuantificar la amenaza que suponen para los peatones las inundaciones en zonas urbanas. Este objetivo se logró utilizando el lenguaje de programación Python y el modelo PCSWMM.

Ilustración 24 Fases de la investigación de Sánchez Tapiero (2023)



Nota. tomado de (Sánchez Tapiero, 2023).

Sánchez Tapiero (2023) encontró que la herramienta PCSWMM SRTC calibró efectivamente los modelos hidrológicos e hidráulicos utilizados en investigaciones 1D-2D. El coeficiente de instrumento Nash-Sutcliffe (NSE) fue de 0.981 y el factor de determinación (R^2) de 0.998. Estos valores indicaron que el ajuste de los datos de calibración fue muy bueno en comparación con los datos observados en dicho estudio.

3.4 Parámetros de Valoración de Peligros para Áreas Subterráneas en Función del Tiempo de Evacuación

En tiempos de lluvias intensas, es posible que el agua penetre en áreas por debajo del nivel del suelo, como plazas comerciales subterráneas, estación subterráneas o sótanos de inmuebles. En tales circunstancias, es importante que las personas abandonen estas áreas sin demora. Es fundamental establecer criterios de desalojo para garantizar una salida segura antes de elaborar cualquier plan de evacuación (Mártinez Gomariz, 2016).

En los últimos años, Japón fue azotado por numerosas inundaciones ocasionadas por intensas lluvias y tifones, afectando severamente diversas zonas urbanizadas. Ciudades emblemáticas como Tokio, Nagoya y Fukuoka experimentaron inundaciones que alcanzaron áreas completamente urbanas, incluyendo espacios subterráneos. Galerías comerciales subterráneas y estaciones de metro se vieron sumergidas durante estos eventos climáticos. Estos desastres no se limitaron solo a Japón, ya que también afectaron a Corea y a varios países europeos. Las inundaciones subterráneas emergieron como un desafío crítico que requiere una solución urgente. En consecuencia, se implementaron diversas medidas para mitigar los daños derivados de estos eventos catastróficos, siendo una de las estrategias más efectivas la evacuación rápida de los espacios subterráneos (Ishigaki et al. 2005).

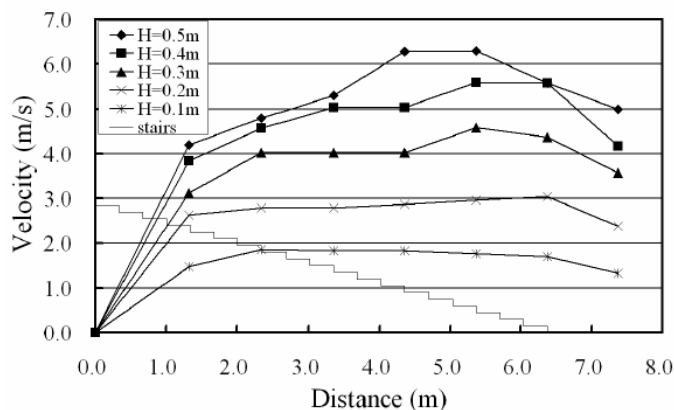
En la búsqueda de soluciones, Ishigaki et al. (2005) efectuaron una investigación minuciosa que valoró la eficacia de la evacuación de espacios subterráneos mediante el uso de modelos a escala real de escaleras y puertas. Los resultados obtenidos revelaron que una profundidad de agua de 0,3 metros en el suelo representó un umbral crítico para la evacuación exitosa a través de escaleras. Además, se determinó que una profundidad de agua de 0,4 metros frente a las puertas era el límite máximo para abrir las mismas de manera efectiva durante un proceso de evacuación. Este análisis innovador subraya la importancia de comprender y abordar las complejidades asociadas con las inundaciones subterráneas, proporcionando datos críticos que pueden ayudar significativamente a planificar y brindar una seguridad más efectiva en áreas urbanas expuestas a estos eventos climáticos extremos.

Para simular el flujo real sobre una escalera, Ishigaki et al. (2005) procedieron a instalar un modelo a tamaño real de dicha estructura. Este modelo constó de 20 escalones, con una huella de 0,3 metros y una contrahuella de 0,15 metros. La altura total de la escalera era de 3 metros y tenía un ancho de 1 metro para garantizar condiciones realistas. El caudal de escape utilizado en estas pruebas alcanzó un caudal de 0,8 metros cúbicos por metro cúbico. el segundo. Durante la investigación se realizaron extensas pruebas de evacuación utilizando esta escalera a escala real. Se recopilaron datos críticos, incluida la altura de la lámina de agua, la rapidez del flujo y las fuerzas que actúan sobre el modelo de la pierna, para poder analizar exhaustivamente la respuesta de la estructura a las condiciones de flujo simuladas.

Los datos recopilados en el estudio revelaron una notable coherencia con la fórmula de flujo escalonado, una herramienta comúnmente empleada en modelos numéricos. La velocidad en las cercanías de la superficie del agua se evaluó utilizando una técnica de visualización precisa. En este procedimiento, pelotas de tenis coloreadas con pinturas fluorescentes actuaron

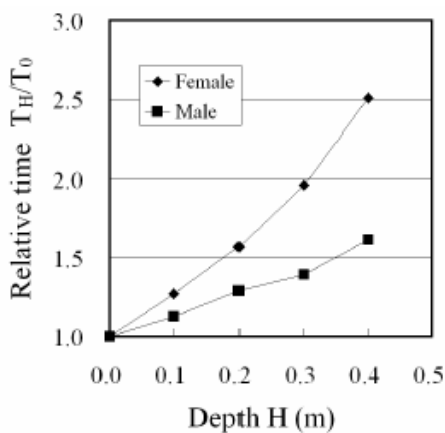
agua (v) deberían considerarse en los criterios para una evacuación segura. De esta manera, se determinaron tres criterios específicos de calado máximo, intervalo de tiempo por unidad de medida de longitud y relación por unidad de longitud, derivados de la información obtenida durante el levantamiento. Estos estándares brindan una mejor comprensión de los determinantes de una evacuación segura y efectiva y ayudan a desarrollar programas y estrategias más efectivos en situaciones similares en el pasado. (Mártinez Gomariz, 2016).

Ilustración 26 Grafica de velocidad vs distancia



Nota. Distribución de velocidades obtenidas en los ensayos, tomado de (Ishigaki et al. 2005).

Ilustración 27 Grafica de Tiempo Vs Profundidad



Nota. Tiempo de evacuación registrado en los ensayos. Tomado de (Ishigaki et al. 2005).

El estudio concluyó que se pueden desarrollar planes de evacuación en estas zonas subterráneas en función de las limitaciones propuestas y realizando un modelo hidráulico bidimensional. Posteriormente probaron esto con básculas colocadas en los tobillos y muñecas de adultos más jóvenes (edad media 25,8 años) para imitar el comportamiento de los adultos mayores. Utilizando este procedimiento, calcularon que los individuos de 70 años podían caminar un 80 por ciento más rápido que las personas más jóvenes (Mártinez Gomariz, 2016).

3.5 Síntesis de los Parámetros de Peligrosidad para individuos ante Inundaciones

Tabla 6 Parámetros de Peligrosidad Basados en una Profundidad Máxima

Núm.	Parámetro	Referencia	Y _{máx.} [M]	V _{máx.} [M/S]	Aplicabilidad
1	Parámetro De Denver (Colorado, EE.UU.) (1969)	(Wright-Mc Laughlin Engineers, 1969)	0.45	-	Cuencas Urbanas
2	Parámetros De La Comisión Nacional De Transporte De Sudáfrica	(Rooseboom et al. 1986)	0.3-0.7	-	Cuencas Rurales
3	Parámetro De La Ciudad De Mendoza (1999)	(Nania Escobar , 1999)	0.3	-	Cuencas Urbanas

Nota. Tomado de (Mártinez Gomariz, 2016).

3.6 Síntesis de Parámetros para evaluar los riesgos en la seguridad de las personas, basados en consideraciones de profundidad (Y) y velocidad (V).

Tabla 7 Parámetros basados en consideraciones de profundidad (Y) y velocidad (V).

Núm.	Parámetro	Referencia	Ymáx. [M]	Vmáx [M/S]	Aplicabilidad
1	Parámetro (Fema) (1979)	(Federal Emergency Management Agency (FEMA), 1979)	0.91	0.61	Cuencas urbanas y rurales
2	Parámetro de Abt et al. (1989)	(Abt et al. 1989)	1.20	3.05	Cuencas urbanas y rurales
3	Parámetro De Témez (1992)	(Témez, 1992)	1.00	1.00	Cuencas rurales
4	Parámetro De Liguria (1993)	(Ravazzani et al. 2009)	0.30-0.70	1.00-2.00	Cuencas rurales
5	Parámetros De Peligro De Inundaciones Por fractura De Presas En Estados Unidos (1988) Y España (1996)	(U.S . DEPARTMENT OF THE INTERIOR , 1988)	0.00 – 1.75	0.00 – 7.00	Cuencas rurales
6	Parámetro Del Condado De Clark (Las Vegas, Eeuu) (1999)	(Clark County Regional Flood Control District, 1999)	0.45	-	Cuencas urbanas
7	Parámetro Nanía (1999)	(Nania Escobar , 1999)	0.3	1.00	Cuencas urbanas

Parámetro Del Consejo					
De Agricultura Y Gestión					
8	De Recursos De Australia Y Nueva Zelanda (Armc) (2000)	(ARMC, 2000)	1.20 – 1.50	1.50	Cuencas urbanas
9	Parámetro De RESCDAM (2000)	(Karvonen et al. 2000)	-	-	Cuencas rurales
10	Parámetro De Estabilidad De Gómez (2001)	(Gómez, 2001)	-	-	Cuencas urbanas
11	Parámetro De Kelman (2002)	(Kelman, 2002)	1.25	5.00	Cuencas urbanas
12	Parámetro De Ramsbottom et al. (2006)	(Ramsbottom et al. 2006)	-	-	Cuencas Urbanas
13	Parámetro Suizo (2004)	(Mártinez Gomariz, 2016)	0.00 – 1.00	0.25 – 1.00	Cuencas urbanas y rurales
14	Parámetro Del Departamento De Infraestructura, Planificación Y Recursos Naturales Del Gobierno De Nueva Gales Del Sur (Sídney, Australia) (2005)	(Department of Infrastructure Planning and Natural, 2005)	2.00	2.00	Cuencas urbanas y rurales
15	Parámetro Del Plan De Saneamiento De Barcelona. CLABSA (2006)	(CLABSA, 2006)	0.06	1.5	Cuencas urbanas
16	Parámetro De Russo (2009)	(Russo, 2009)	0.16	1.88	Cuencas Urbanas

Parámetro De Australian					
17	Rainfall And Runoff (2010)	(Cox et al. 2010)	1.2	3.2	Cuencas urbanas y rurales

Nota. Tomado de (Mártinez Gomariz, 2016).

Tabla 8 Parámetros de valoración para personas en zonas subterráneas

Núm.	Criterio	Referencia	Y _{máx.} [M]	V _{máx} [M/S]	Aplicabilidad
1	Parámetros De Evaluación De Peligros Para Áreas Subterráneas	(Ishigaki et al. 2005)	0.30	-	Cuencas urbanas

Nota. Tomado de (Mártinez Gomariz, 2016).

Capítulo 4

4.1 Ecuaciones Existentes para la Evaluación de la Peligrosidad

En el presente capítulo, se recopilaron algunas de las diversas ecuaciones que constituyen herramientas fundamentales para evaluar la peligrosidad a la que se encuentran expuestos los peatones ante eventos de inundación. Abordamos ecuaciones de naturaleza empírica, semi empírica y mecánica, todas ellas diseñadas para cuantificar de manera precisa y efectiva la peligrosidad que enfrentan los individuos en entornos inundados.

Las ecuaciones empíricas basadas en observaciones y análisis de datos proporcionan un método práctico para la evaluación de peligros. Examinamos cómo estas ecuaciones tienen en cuenta factores específicos como la velocidad del agua, la profundidad y la duración de la inundación para determinar los peligros de inundación para los peatones. También exploramos ecuaciones semi empíricas que combinan principios teóricos con datos observacionales, proporcionando un enfoque más sólido que combina elementos mecanicistas y empíricos. Sin embargo, los mecánicos también desempeñan un papel crucial en la evaluación del peligro para los peatones. Analizamos ecuaciones de carácter puramente mecánico basadas en principios físicos para modelar el comportamiento del agua durante las inundaciones y su interacción con la presencia humana. Estas ecuaciones proporcionan un enfoque más detallado que tiene en cuenta aspectos como la resistencia del cuerpo al movimiento del agua y la influencia del terreno sobre los peligros.

4.2 Ecuaciones Empíricas

4.2.1 Ecuaciones de Lind et al. (2004)

Lind et al. (2004) utilizaron datos de laboratorio recopilados por Abt et al. (1989) y Karvonen et al. (2000) para calibrar y comparar tres modelos mecánicos y cuatro modelos empíricos de estabilidad. los autores sugieren que los modelos empíricos calibrados pueden proporcionar mejores resultados.

$$DV_{CR} = K \left[M \left(1 - \frac{D}{H} \right) \right]^{\frac{1}{2}} \quad [9]$$

$$DV_{CR} = KM^{\frac{1}{2}} \quad [10]$$

$$DV_{CR} = KM \quad [11]$$

$$DV_{CR} = K \quad [12]$$

Las expresiones empíricas evaluadas (Ecuaciones 8-11) asignan diferentes ponderaciones a la altura y masa del sujeto (H.M), al mismo tiempo que calibran el flujo crítico (DVcr) utilizando un coeficiente empírico K. La relación simple DVcr = K *HM no ha sido sometida a prueba. (Cox et al. 2010). Según Cox et al. (2010) los factores que influyen en las diversas expresiones se calibran utilizando los antecedentes de Abt et al. (1989) y Karvonen et al. (2000), además de los coeficientes de variación encontrados para los diferentes conjuntos de datos. Se identificaron diferencias entre los sujetos de prueba masculinos y femeninos, pero estas desaparecieron cuando se incluyeron los factores de altura y masa en la expresión.

Lind et al. (2004) sugieren que la fórmula más simple (Ecuación 11) con el flujo crítico dependiendo únicamente de un coeficiente calibrado debería utilizarse, con coeficientes

diferentes para hombres y mujeres, así como para distintos tipos de ropa (verano e invierno). Sin embargo, esto contradice conclusiones anteriores que indicaban que los parámetros de altura y peso son importantes y que la incorporación de estos parámetros resuelve las diferencias observadas entre casos masculinos y femeninos.

4.2.2 Ecuación de Abt et al. (1989)

Abt et al. (1989) realizaron estudios teóricos y experimentales para predecir la resistencia y la rapidez del flujo cuando se vuelca una configuración rígida idealizada. En consecuencia, varias personas fueron sujetas a pruebas en un conducto de forma rectangular con el fin de determinar la rapidez y flujos de aire que ocasionan el desequilibrio (Mártinez Gomariz, 2016).

Con el objetivo de predecir cuantitativamente los puntos de inestabilidad humana, se realizó un análisis empírico y se determinó una relación entre el producto $v*y$ y el peso y la altura del sujeto. Esta relación se basa en resultados experimentales y es importante señalar que no distingue entre tipos de superficies, aunque se realizan pruebas en superficies de diferentes materiales (Abt et al. 1989).

$$v * y = \left[e^{\left(\frac{0.022HP}{1000} \right) + 1.088} \right]^2 \quad [13]$$

Donde,

- P = peso de la persona (libras)
- H = altura de la persona (pies)

Según Abt et al. (1989), por causa de los procedimientos y limitaciones empíricas, los hallazgos no evidencian totalmente las condiciones de flujo reales, lo que hace que el estudio esté sujeto a varios sesgos y limitaciones.

4.3 Ecuaciones Semi Empíricas

4.3.1 Ecuación de Ramsbottom et al. (1989)

Ramsbottom et al. (2006) Tomaron en cuenta la adición de desechos del agua para reflejar el hecho de que representa un peligro mayor. Según este proceso, el peligro de inundación se puede expresar mediante la siguiente expresión:

$$HR = y(v + 0.5) + DF \quad [14]$$

Donde,

- HR = nivel de peligro.
- y = profundidad (m)
- v = velocidad (m/s)
- DF= Parámetro de restos

Tabla 9 Rangos del factor de escombros dependiendo de las profundidades.

Profundidad	Hierba/Plantación	Monte	Citadino
0 - 0.25 m	0	0	0
0.25 - 0.75 m	0	0.5	1
$y > 0.75 \text{ m}$ y/o $v > 2 \text{ m}$	0.5	1	1

Nota. Tomado de (Mártinez Gomariz, 2016).

Siguiendo la ecuación [13] y consultando la Tabla 9, Los rangos críticos de riesgo de inundación se muestran en la Tabla 10. Se han establecido categorías de peligrosidad basadas en el riesgo para las personas, según la clasificación de Ramsbottom et al. (2006). El método empleado en este estudio demuestra ser altamente efectivo para gestionar la evaluación del riesgo en un área inundada. No obstante, es crucial señalar que la expresión utilizada en el estudio resulta de la revisión de investigaciones previas en el campo y no se derivó de manera empírica.

4.4 Ecuaciones Mecánicas

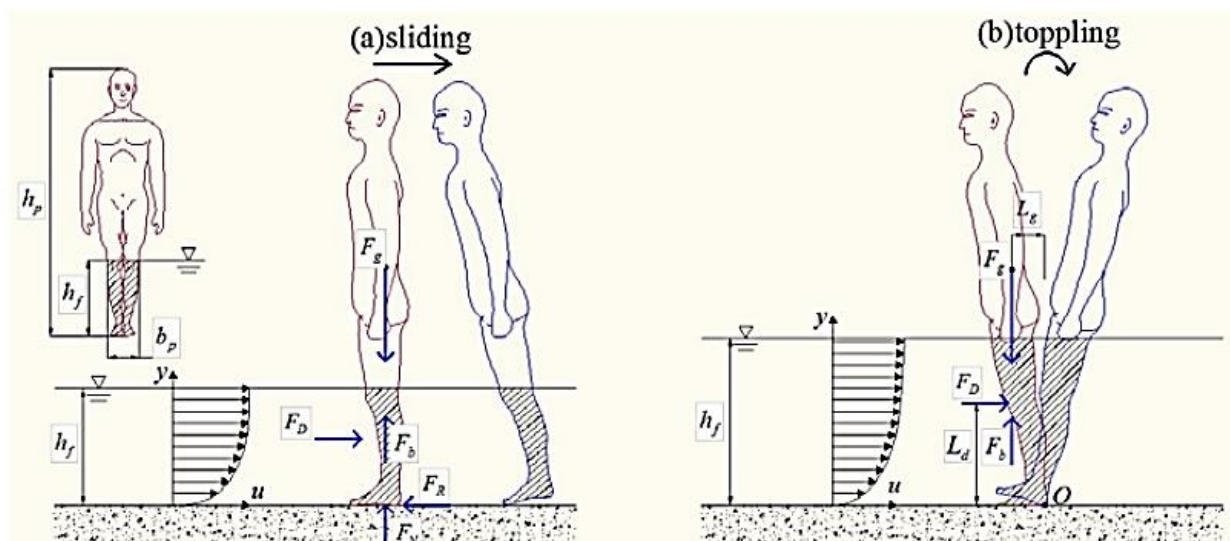
4.4.1 Ecuaciones de Xia et al. (2014)

Xia et al. (2014) lograron derivar dos fórmulas básicas para describir la velocidad inicial del flujo en el cuerpo humano, con especial atención en las inestabilidades de deslizamiento y giro. Esta relación se basa en un análisis mecanicista riguroso que explica de manera integral los efectos de dos factores principales: la flotabilidad del cuerpo y los perfiles no uniformes de velocidad del agua que actúan sobre el cuerpo aguas arriba. El primer aspecto importante que se aborda en estas fórmulas es la flotabilidad del cuerpo humano. Dada la dinámica y complejidad de los fluidos en movimiento, es necesario considerar cómo interactúa la flotabilidad del cuerpo con el flujo de agua circundante. La capacidad de un objeto para flotar o hundirse afecta directamente su respuesta a las fuerzas hidráulicas y estas fórmulas están diseñadas para modelar con precisión este fenómeno.

El segundo aspecto crucial en la ecuación es la influencia de la distribución irregular de la rapidez del flujo. Esto significa que la velocidad del fluido que golpea el cuerpo no se distribuye uniformemente, sino que varía a lo largo de sus contornos. Este perfil de velocidad

desigual ejerce fuerzas y momentos específicos sobre el cuerpo, contribuyendo a la complejidad del fenómeno. Las fórmulas desarrolladas tienen en cuenta esta variabilidad en la velocidad de la corriente para proporcionar una representación más realista y precisa de las condiciones del flujo. Es importante destacar que estas relaciones teóricas fueron sometidas a rigurosas pruebas y validaciones utilizando modelos físicos a escala humana. La validación experimental implica recrear condiciones cercanas a la realidad en entornos controlados, donde se simulan flujos de agua y se evalúa la respuesta del modelo humano frente a la inestabilidad al deslizamiento y al volcamiento. Este proceso garantiza la robustez y confiabilidad de las fórmulas, al confirmar su capacidad para prever el comportamiento del cuerpo humano en situaciones específicas de flujo.

Ilustración 28 Modelo de Xia et al (2014)



Nota. Cuerpo sumergido en una situación de desequilibrio para (a) fricción y (b) momento, tomado de (Xia et al. 2014).

Fuerzas impactan a un individuo sumergido en agua

- **Fuerza de Flotabilidad**

Xia et al. (2014) creen que, a causa de la forma no uniforme de un individuo, al calcular la flotabilidad se debe tener en cuenta el tamaño y el volumen correspondiente de cada segmento corporal. En el cuerpo humano normal existe una vinculo uniforme entre las dimensiones de las pantorrillas, los muslos, el tronco y otras partes. La altura corporal (hk) o el volumen total (vp) pueden considerarse como parámetros básicos adecuados para determinar el tamaño o volumen de cada parte. Por ejemplo, la altura del pie a la rodilla de los adultos chinos generalmente está entre 0,261 HP y 0,265 HP, mientras que el tamaño del muslo y la pantorrilla es de aproximadamente 0,266 HP. Por lo tanto, con base en los parámetros característicos de la estructura principal, se puede establecer una correlación empírica entre la fuerza de flotabilidad (FB) debida al empuje ascendente del agua (FB) y la profundidad de entrada (hF).

$$F_B = g\rho_f V_b \quad \& \quad \frac{V_b}{v_p} = a_1 x^2 + b_1 x \quad [15]$$

Donde;

V_b = Cantidad de agua desplazada por un cuerpo humano sumergido.

g = Aceleración de la gravedad

ρ_f = Densidad del agua.

$a_1; b_1$ = Coeficientes (Los coeficientes a_1 y b_1 pueden ser calibrados mediante los parámetros característicos de la estructura del cuerpo, siguiendo la restricción $a_1 + b_1 = 1$. Los

valores calibrados de a_1 y b_1 son 0.633 y 0.367, respectivamente, según las características promedio del cuerpo de las personas chinas.)

x =Proporción entre la profundidad entrante y la altura del cuerpo.

Según Xia et al. (2014) Las estadísticas de los parámetros de cada segmento del cuerpo humano muestran que existe una correspondencia casi lineal entre el volumen del cuerpo humano V_p [m³] y la masa m_p [kg], que se puede expresar como:

$$v_p = a_2 m_p + b_2 \quad [16]$$

Donde a_2 y b_2 son coeficientes, con valores típicos obtenidos de $a_2=1.015 \times 10^{-3}$ y $b_2=-4.927 \times 10^{-3}$ respectivamente. Por lo tanto, para una profundidad de entrada de agua dada, la flotabilidad se puede expresar como una función de la longitud del cuerpo (h_p) y la masa (m_p):

$$F_B = g \rho_f (a_1 x^2 + b_1 x) (a_2 m_p + b_2) \quad [17]$$

- **Fuerza de Arrastre**

En su estudio Según Xia et al. (2014) establece que la dirección horizontal, la fuerza de arrastre (F_D) actuando sobre un cuerpo humano sumergido puede expresarse como:

$$F_D = \frac{A_d C_D \gamma_f u_b^2}{2g} \quad [18]$$

Donde;

u_b = es la velocidad representativa cerca del lecho.

γ_f = peso específico del agua.

C_D = Coeficiente de arrastre.

A_d = Área mojada.

- **Peso Efectivo**

$$F_G = gm_p - F_B = g[m_p - \rho_f(a_1x^2 + b_1x)(a_2m_p + b_2)] \quad [19]$$

- **Fuerza De Fricción**

$$F_R = \mu F_N = \mu g[m_p - \rho_f(a_1x^2 + b_1x)(a_2m_p + b_2)] \quad [20]$$

Fórmula para el Modo de Inestabilidad Deslizante

Xia et al. (2014) expresaron La condición crítica para la inestabilidad por deslizamiento mediante la igualdad $F_d = F_r$.

$$U_c = a \left(\frac{h_f}{h_p} \right)^\beta \sqrt{\frac{m_p}{\rho_f h_p h_f} - \left(a_1 \frac{h_f}{h_p} + b_1 \right) \frac{(a_2 m_p + b_2)}{h_p^2}} \quad [21]$$

Donde $a = \sqrt{2\mu g / C_d a_d a_p} / [(1 + \beta)(a_b)^\beta]$ La determinación de los parámetros α y β está relacionada con la forma del cuerpo, y los coeficientes de fricción y arrastre pueden calibrarse a partir de los siguientes datos experimentales. Se observa en la ecuación (20) la primera expresión de la raíz simboliza la gravedad y el termino secundario se refiere al efecto de

la flotabilidad. Si se descarta el término de flotabilidad dentro de la raíz en la derivación y se asume un flujo uniforme (es decir, $\beta=0$), entonces la simplificación de la ecuación (14) sería similar a la fórmula existente (Xia et al. 2014).

Fórmula para el Modo de Inestabilidad por Vuelco

Cuando una persona se para mirando en dirección al flujo entrante, entonces la condición crítica para la inestabilidad por vuelco es que el cuerpo humano pivote alrededor del talón (Punto O) y se voltee hacia atrás, ya que el momento total alrededor del punto de pivote O es igual a cero. (Xia et al. 2014).

$$U_c = a \left(\frac{h_f}{h_p} \right)^\beta \sqrt{\frac{m_p}{\rho_f h_f^2} - \left(\frac{a_1}{h_f^2} + \frac{b_1}{h_f h_p} \right) (a_2 m_p + b_2)} \quad [22]$$

La estructura de la fórmula es relativamente compleja en las ecuaciones (15) y (18) debido a la introducción de la fuerza de flotación y, por lo tanto, los parámetros α y β se calibran utilizando los datos medidos y el software SPSS. (Xia et al. 2014).

Tabla 10 Parámetros calibrados en las ecuaciones 14 y 15

Formula	Parámetro De Calibración		R^2	Modo De Inestabilidad	Número De Pruebas
	α	β			
Ecuación 14	7.975	0.018	0.8830		8
Ecuación 15	3.472	0.188	0.853		46

Nota. Tomado de (Xia et al. 2014)

4.4.2 Ecuaciones de Lind et al. (2004)

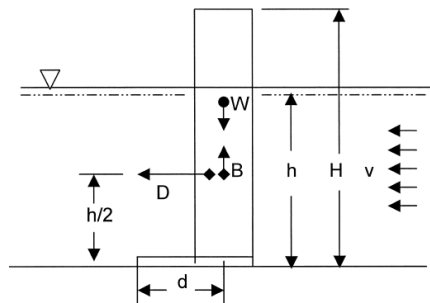
La representación mecánica del cuerpo humano puede modelarse como un sólido rígido de altura H y densidad uniforme igual a la densidad del agua, ρ , que está de pie sobre un pie delgado, sin peso y rígido que la distancia d que se prolonga hacia abajo desde el centro de masa del cuerpo. W es el peso, y B es la flotación; y d es el brazo de momento común alrededor del pivote del dedo del pie. A es la proyección del área mojada normal al flujo (Lind et al. 2004).

$$D = CA\rho \frac{v^2}{2} \quad [23]$$

Donde según Lind et al. (2004) C es el coeficiente de arrastre. Suponiendo que la resistencia resultante actúa a la mitad de la profundidad del agua, $h/2$, como en el flujo uniforme, entonces, en la inestabilidad incipiente es:

$$(W - B)d = D \frac{h}{2} \quad [24]$$

Ilustración 29 Modelo de Lind et al (2004)



Nota. Modelos mecánicos A y B. Tomado de (Lind et al. 2004).

Modelo A - Cuerpo Cilíndrico Circular

Para Lind et al. (2004) el cuerpo humano se modela simplemente como un cilindro circular rígido de diámetro a . Para un cilindro circular, $W = (\pi/4) a^2 H \rho g$, $B = (\pi/4) a^2 h \rho g$, y $A = ah$. Para números de Reynolds entre aproximadamente 200 y 200,000, $C = 1.2$, aproximadamente. Entonces, la Ecuación (23) proporciona el número crítico del producto velocidad-profundidad como:

$$hv_{cr} = \left[\left(\frac{\pi g}{C} \right) adH \left(1 - \frac{h}{H} \right) \right]^{\frac{1}{2}} \quad [25]$$

Donde c es igual a 1.2 y la gravedad g igual a 9.81 m/s^2 .

$$hv_{cr} = K \left[(adH) \left(1 - \frac{h}{H} \right) \right]^{\frac{1}{2}} \quad [26]$$

Donde K toma el valor de

$$K_A = \left(\frac{\pi g}{C} \right)^{\frac{1}{2}} = 5.1 \text{ m}^{\frac{1}{2}} \text{ s} \quad [27]$$

Modelo B - Paralelepípedo Cuadrado

De acuerdo Lind et al. (2004) si el cilindro tiene una sección transversal cuadrada con lados a , entonces $W = a^2 H \rho g$; $B = a^2 h \rho g$; $A = ah$ y $C = 2.0$. Se reemplaza en la ecuación (23). Luego, en la ecuación (25), K toma el valor de:

$$K_B = \left(\frac{4g}{C} \right)^{\frac{1}{2}} = 4.4 m^{\frac{1}{2}}_s \quad [28]$$

Modelo C - Cilindros Compuestos

El cuerpo humano se modela de manera más cercana mediante tres cilindros circulares rígidos, dos de ellos de diámetro $2^{-1/2}a$ y altura $H/2$ (las piernas) y uno (el torso) de diámetro a y altura $H/2$. El cuerpo está de pie sobre un pie delgado, rígido y sin peso que sobresale una distancia d aguas abajo desde el centro de gravedad del cuerpo. (Lind et al. 2004).

Caso 1.

Si h es menor que $H/2$, la inestabilidad incipiente proporciona las Ecuaciones (28) y (29) con $W = (\pi/4) a^2 H \rho g$; $B = (\pi/4) a^2 h \rho g$; y $A = 2^{1/2} ah$. Así, la Ecuación (19) resulta en un valor de K (ecuación 24).

$$R = 0.5 \text{ para } W < 0.25 \text{ hrs}; P^{-0.4} \text{ para } 0.25 < w < 1.5 \text{ hrs}; \text{ y } 0.0002 \text{ para } w > 1.5 \text{ hrs} \quad [29]$$

$$R = (1 + 5.207 P^{0.513} e^{(3.838w - 4.012)})^{-1} \text{ para alta letalidad} \quad [30]$$

$$K_{C1} = \left(\frac{2^{-\frac{1}{2}} \pi g}{C} \right)^{\frac{1}{2}} = 4.3 m^{\frac{1}{2}}_s \quad [31]$$

Caso 2.

Según Lind et al. (2004) si h es mayor que $H/2$ entonces;

$$(W - B)d = D_1 h_1 + D_2 h_2 \quad [32]$$

Donde $D_1 = C \left(\frac{\frac{1}{2} a H}{2} \right) \rho (v^2/2)$ actuando a una altura $h_1 = \frac{H}{4}$ y $D_2 = C a (h -$

$H/2) \rho (v^2/2)$ actuando a una altura y $h_2 = (\frac{h}{2} + H/4)$; $W = (\pi/4) a^2 H \rho g$ y $B = (\pi/4) a^2 h \rho g$.

El resultado se puede formular como en la Ecuación (19); sin embargo, K no es constante.

$$K_{C2} = \left(\frac{2^{-\frac{1}{2}} \pi g}{C} \right)^{\frac{1}{2}} \left[\frac{2^{\frac{1}{2}} - \left(\frac{H}{h} \right)^2 \left(2^{\frac{1}{2}} - 1 \right)}{4} \right]^{-\frac{1}{2}} \quad [33]$$

4.4.3 Ecuaciones de Milanesi et al. (2014)

Estimar el empuje proporcionado por el flujo de agua sobre el cuerpo humano es una tarea compleja que requiere la consideración de varios factores interrelacionados. Este problema no solo requiere tener en cuenta el movimiento relativo del cuerpo en relación con el agua, sino que también debe abordar la variabilidad de la posición del cuerpo, la influencia de la ropa que pueda modificar su forma exacta, la presencia de cargas adicionales como mochilas, y la interacción real suelo-suelo. A medida que se profundiza en la complejidad de este escenario, resulta esencial considerar otros elementos significativos. Por ejemplo, la interacción psicológica del individuo con su entorno acuático, las condiciones ambientales como la iluminación, La presencia de desechos, la temperatura y posibles obstrucciones en el medio acuático. Cada uno de estos elementos consigue tener un impacto significativo en la respuesta del cuerpo humano a

la corriente de agua, generando una gama diversa de escenarios y desafíos. (Milanesi et al. 2014).

Para Milanesi et al. (2014) para describir analíticamente el comportamiento entre la corriente y el cuerpo humano, se propone un esquema conceptual que representa su parte sumergida en función de la profundidad del agua h (m) medida perpendicular al lecho del río. La superficie en contacto, el volumen y la gravedad del cuerpo sumergido son necesarios para calcular las fuerzas y definir las condiciones de equilibrio.

La composición corporal de una persona es m (kg) y la altura Y (m), representadas conceptualmente por un conjunto de cilindros colocados verticalmente sobre una pendiente formando un ángulo θ con la horizontal. Una persona podría adoptar diferentes posturas (por ejemplo, alineada con el flujo y con las piernas abiertas) según su experiencia y capacidad para enfrentar la corriente. En lo que sigue, se considerará el cuerpo en posición vertical, inclinado a un ángulo $\alpha = \frac{\pi}{2} - \theta$ con respecto al terreno y afectado frontalmente por el flujo. Esta posición proporciona los umbrales de estabilidad más cautelosos, ya que minimiza la adaptación postural al flujo y maximiza las acciones desestabilizadoras (Milanesi et al. 2014).

Según Milanesi et al. (2014) Las piernas se describen mediante dos cilindros emparejados de diámetro d (m), separados por $d/2$, mientras que el torso se esquematiza mediante un solo cilindro de diámetro $D = 2d$. Tanto las piernas como el torso tienen una altura de $Y/2$. El centro de gravedad del cuerpo se identifica por sus coordenadas (x_G, y_G) . Con base en la geometría idealizada y asumiendo una distribución de peso uniforme, x_G se encuentra a $5/6 d$ desde el talón, y y_G está ubicado a $7/12 Y$ en la ascendente desde el suelo. Estos resultados están respaldados

por la literatura médica sobre adultos y niños. El volumen sumergido del cuerpo V_s (m^3) y su superficie en contacto A_s (m^2) se pueden describir como:

$$V_s = \begin{cases} 2 \frac{h}{\cos \theta} \pi \frac{d^2}{4} & si \frac{h}{\cos \theta} \leq \frac{Y}{2} \\ 2 \frac{Y}{2} \pi \frac{d^2}{4} + \left(\frac{h}{\cos \theta} - \frac{Y}{2} \right) \pi \frac{D^2}{4} & si \frac{h}{\cos \theta} > \frac{Y}{2} \end{cases} \quad [34]$$

$$V_s = \begin{cases} 2 \frac{h}{\cos \theta} d & si \frac{h}{\cos \theta} \leq \frac{Y}{2} \\ 2 \frac{Y}{2} d + \left(\frac{h}{\cos \theta} - \frac{Y}{2} \right) D & si \frac{h}{\cos \theta} > \frac{Y}{2} \end{cases} \quad [35]$$

En su estudio Milanesi et al. (2014) afirman que el centro de gravedad del volumen sumergido tiene coordenadas (x_{Gs} , y_{Gs}) y en base a la geometría del cuerpo, se calcula de la siguiente manera.:

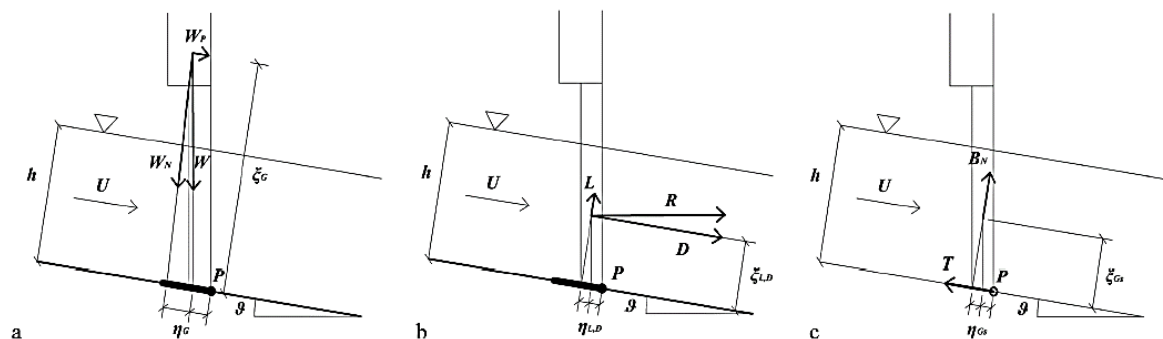
$$X_{Gs} = \begin{cases} \frac{d}{2} & si \frac{h}{\cos \theta} \leq \frac{y}{2} \\ \frac{2a \frac{y}{2} \frac{d}{2} + A \left(\frac{h}{\cos \theta} - \frac{y}{2} \right) \frac{D}{2}}{2a \frac{y}{2} + A \left(\frac{h}{\cos \theta} - \frac{Y}{2} \right)} & si \frac{h}{\cos \theta} > \frac{y}{2} \end{cases} \quad [36]$$

$$y_{Gs} = \begin{cases} \frac{h}{2 \cos \theta} & si \frac{h}{\cos \theta} \leq \frac{Y}{2} \\ \frac{2a \frac{Y^2}{8} + A \left(\frac{h}{\cos \theta} - \frac{Y}{2} \right) \left[\frac{1}{2} \left(\frac{h}{\cos \theta} - \frac{Y}{2} \right) + \frac{Y}{2} \right]}{2a \frac{Y}{2} + A \left(\frac{h}{\cos \theta} - \frac{Y}{2} \right)} & si \frac{h}{\cos \theta} > \frac{Y}{2} \end{cases} \quad [37]$$

Donde $A = \frac{\pi D^2}{4}$; $a = \frac{\pi d^2}{4}$ según Milanesi et al. (2014) son, respectivamente, las áreas transversales del torso y de cada pierna.

Las siguientes consideraciones Milanesi et al. (2014) las basaron en la suposición simplificadora de que el cuerpo se encuentra en un flujo constante y uniforme, donde la distribución de presión a lo largo de la dirección ortogonal a la pendiente del lecho es lineal bajo la acción del componente de gravedad $g \cos \theta$, siendo g (m s^{-2}) la aceleración debido a la gravedad. El flujo se caracteriza por la densidad ρ (kg m^{-3}) y la velocidad promedio U (m s^{-1}). Las fuerzas que intervienen sobre el sujeto son su peso W (N), la potencia hidrodinámica R (N), la flotabilidad B_N (N) y fuerza de rozamiento entre las plantas de las extremidades inferiores y el suelo T (N). Se ignoran las diferencias de altura estáticas provocadas por la conversión parcial de la altura dinámica en energía potencial que se produce delante del cuerpo. El peso de un objeto se define como el resultado de multiplicar su masa m por la aceleración debida a la gravedad g . Teniendo en cuenta la pendiente del lecho, el peso se divide geométricamente en dos partes: perpendicular a la pendiente (W_N) y paralela a la pendiente. pendiente (W_P).

Ilustración 30 Modelo de pierna según Milanesi et al. (2014)



Nota. Fuerzas actuantes y sus lugares de incidencia. Tomado de (Milanesi et al. 2014).

$$W_N = W \cos \theta \quad [38]$$

$$W_P = W \sin \theta \quad [39]$$

También Milanesi et al. (2014) Afirman que el centro de gravedad del cuerpo soporta el peso., cuyas coordenadas (η_G, ξ_G) , en un marco de referencia normal a la pendiente, se definen como:

$$\eta_G = \frac{X_G}{\cos \theta} + y_G \sin \theta \quad [40]$$

$$\xi_G = y_G \cos \theta \quad [41]$$

Según Milanesi et al. (2014) suponen que la distribución de presiones es paralela al flujo, la potencia de flote BN que ejerce sobre la persona sumergida en dirección perpendicular al lecho y puede expresarse en función del volumen sumergido:

$$B_N = \rho g V_S \cos \theta \quad [42]$$

Como es costumbre en otras aplicaciones de ingeniería (por ejemplo, la velocidad de sedimentación de sedimentos en un fluido), aquí la fuerza de flotación tiene en cuenta únicamente el campo de presión ambiental (es decir, en ausencia del cuerpo), ya que el campo de esfuerzo cortante y la desviación del campo de presión debido a la presencia del cuerpo se tienen en cuenta específicamente en las fuerzas dinámicas del fluido. La fuerza BN se concentra en el cg (centro de gravedad) volumen sumergido. (Milanesi et al. 2014).

$$\eta_{Gs} = \frac{X_G}{\cos \theta} + y_G \sin \theta \quad [43]$$

$$\xi_{Gs} = y_G \cos \theta \quad [44]$$

La fuerza fluidodinámica, denotada R, se delimita como la integral de la potencia aplicada sobre la superficie de un objeto cuando interactúa con el flujo de fluido. En esta disposición, el cuerpo está en posición vertical sobre la pendiente, por lo que el campo de flujo no es perpendicular al eje del cuerpo. Dado que el campo de flujo alrededor del cuerpo en esta configuración es asimétrico, se espera que la dirección de la fuerza dinámica no sea coincidente a la velocidad de la corriente que se aproxima. En el caso de un miembro cilíndrico largo inclinado hacia la corriente formando un ángulo agudo α , la fricción sobre la superficie del cuerpo es en realidad despreciable. La fuerza resultante R (N) es perpendicular al área frontal del cuerpo y se puede expresar en relación del elemento en línea recta de la rapidez media $u = U \sin \theta$ (Milanesi et al. 2014).

$$R = \frac{1}{2} \rho C_c U^2 A_s = \frac{1}{2} \rho C_c U^2 \sin^2 \alpha A_s \quad [45]$$

$$D = R \sin \alpha = \frac{1}{2} \rho C_c \sin^3 \alpha U^2 A_s \quad [46]$$

$$L = R \cos \alpha = \frac{1}{2} \rho C_c \sin^2 \alpha \cos \alpha U^2 A_s \quad [47]$$

$$\eta_{L,D} = \frac{X_{GS}}{\cos \theta} + \frac{h}{2} \tan \theta \quad [48]$$

$$\xi_{L,D} = \frac{h}{2} \quad [49]$$

Según Milanesi et al. (2014) La fuerza de rozamiento T entre las extremidades inferiores y el suelo se puede describir según el método de Mohr-Coulomb como producto de los

coeficientes de fricción λ (-) y el peso efectivo w (N). Este último es la suma algebraica de las fuerzas normales a la pendiente:

$$T = \mu w \quad [50]$$

$$w = W_N - B_N - L \quad [51]$$

Finalmente, Milanesi et al. (2014) concluyen que se debería introducir una tercera condición, independiente de la velocidad del flujo, para tener en cuenta el riesgo de ahogamiento. Una restricción similar fue sugerida por Cox et al. [2010], quienes propusieron una profundidad máxima admisible de 1.2 para adultos y 0.5 m para niños. El presente modelo introduce una profundidad máxima admisible h_d (m) que podría asumirse como una función de la altura del cuello. En resumen, la profundización límite de seguridad en relación de la rapidez del flujo U se define como el valor mínimo entre la profundidad de deslizamiento (h_s), la profundidad de vuelco (h_t) y la profundidad de inmersión (h_d):

$$h = \min[h_s(U); h_t(U); h_d] \quad [52]$$

El modelo propuesto requiere varios parámetros para definir la geometría del cuerpo y las fuerzas dinámicas. No obstante, la información relativa a las dimensiones del cuerpo humano y al coeficiente de resistencia aerodinámica se puede extraer de la literatura. Únicamente se ajustó el coeficiente de fricción en un intervalo experimental limitado. Una ventaja clave de la parametrización en relación con el cuerpo humano es que permite adaptar naturalmente el método a diversas regiones geográficas, donde las personas pueden presentar distintas masas y alturas promedio. Como resultado, es posible establecer umbrales específicos para individuos

con diferentes características, lo que conduce a una subdivisión de la vulnerabilidad en dos o más clases (Milanesi et al. 2014).

Capítulo 5

Análisis y Discusión

Este capítulo analiza los criterios de peligrosidad propuestos por varios autores que, a través de pruebas experimentales con individuos con características específicas, evaluaron el sentido de estabilidad de cada individuo bajo diferentes condiciones hidráulicas y sugirieron diferentes tiros y velocidades. También analizamos ecuaciones que se han propuesto a lo largo de los años para estimar el peligro para los peatones durante las inundaciones urbanas.

Como señala Martínez Gomariz (2016) en su tesis doctoral, la mayor parte de los análisis que proponen estándares de peligros individuales se enfocan en inundaciones de ríos de gran calado y baja velocidad que hacen que las personas pierdan su estabilidad. Un número limitado de estos estudios se consideraron adaptables a las zonas rurales (Témez, 1992; Regione Liguria, 1993); también examinaron áreas urbanas y rurales (Agencia Federal para el Manejo de Emergencias (FEMA), 1979; Cox et al. 2010; Gobierno de Nueva Gales del Sur, 2005), otros han basado sus estudios en condiciones muy diferentes causadas por la escorrentía urbana. Por ejemplo, el proyecto RESCDAM (Karvonen et al. 2000).

También para Martínez Gomariz (2016), los estudios de cuencas urbanas han sido mucho más pequeños, basándose en ocasiones en estándares de seguridad vial, estableciendo límites que permiten el ingreso de agua a los edificios, o considerando solo corrientes de aire (Wright-Mc Laughlin Engineers, 1969), o considerando una mezcla sobre la profundidad y la rapidez (Kelman, 2002). En otras situaciones, las normas de protección carecen de fundamento experimental, por ejemplo, se especificó una profundidad de 6 cm (CLABSA, 2006) para garantizar que sólo los carriles cercanos al pavimento cumplan con las normas de seguridad en

vías de doble calzada. Las inundaciones fueron elevadas y la línea media estaba despejada. También tenemos el ejemplo de la norma ARMC (2000) que, aunque está prevista para su uso en zonas urbanas, considera que la profundidad máxima (1,5 m para mayores) es demasiado alta y más adecuada para avenidas de ríos que para inundaciones de aguas producto de lluvias (Martínez Gomariz, 2016)

Para Martínez Gomariz (2016), el valor de la función $(v^*y) = 0.5 \text{ m}^2 \cdot \text{s}^{-1}$, que es un límite seguro de estabilidad para personas normales, propuesto por Abt et al. (1989); valores de Témez (1992) y Gómez (2001) resulta muy alto, y propuso en su tesis un margen de seguridad para transeúntes $(v^*y) = 0,17 \text{ m}^2 \cdot \text{s}^{-1}$ o (v^*) , que es significativamente menor que el de los citados autores. Martínez Gomariz (2016) concluyó que en este aspecto los parámetros para evaluar la peligrosidad del tráfico en las vías tendrían que ser más estrictos que los considerados hasta ahora.

Russo (2009) señaló que las bajas corrientes y las altas velocidades pueden ser peligrosas para los peatones en inundaciones urbanas, por lo que efectuó un ensayo piloto para probar a un grupo de personas y exponerlas a condiciones típicas de inundación de poca profundidad y alto flujo, pero la falta de información y conocimiento previo obligó a cambiar las condiciones iniciales individuales, dificultando la reproducción de las condiciones asumidas. En el laboratorio concluyó que es necesario estudiar la permanencia de personas con peculiaridades físicas (P*H) más propensas a la inestabilidad. Este hallazgo fue apoyado por Cox et al. (2010), quienes confirmaron que el empleo de peculiaridades humanas (H*P) como variables independientes para las condiciones generales de seguridad contra inundaciones no parece práctico debido a la gran extensión del área. Caracterización de personas, población. En este

sentido, ofrecen las siguientes divisiones poblacionales para definir de manera diferente el riesgo de cada persona.

También existen otros factores a considerar, por ejemplo, para Lind et al. (2004) Los parámetros que mayormente afectan la estabilidad de las personas son el producto $h \cdot v$ y el factor de resistencia, el cual depende exclusivamente de la ropa. Los sujetos evaluados por Abt et al. (1989) usaban calzado ligero, y jeans o pantalones y camisetas sin mangas. Los ensayados por Karvonen et al. (2000) usaron trajes de supervivencia, los cuales aumentan significativamente la resistencia. Lind et al. (2004) enfatizan que afirmar que solo este factor explica toda la diferencia entre los resultados de las dos investigaciones es solo una especulación. Sin embargo, el tipo de ropa es un factor que debe considerarse en cualquier análisis de riesgo de inundación.

La implementación de criterios de análisis de estabilidad para personas adquiere un rol esencial en la comprensión integral de la peligrosidad asociada a inundaciones en entornos urbanos. Este proceso implica la creación de criterios basados en una sólida fundamentación física, los cuales son validados mediante diversas estrategias que capturan la complejidad de la representación del cuerpo humano en situaciones de riesgo hídrico. (Re et al. 2018). La necesidad de desarrollar estos criterios radica en la complejidad inherente de las inundaciones urbanas, donde la interacción entre el agua y las personas presenta desafíos únicos. La solidez de la base física de estas normas garantiza que estén arraigadas en principios científicos sólidos, lo que permite una perspectiva más amplia de los componentes que afectan la estabilidad humana durante las inundaciones.

Lind et al. (2004) utilizaron datos de laboratorio recopilados por Abt et al. (1989) y Karvonen et al. (2000) para calibrar y comparar tres modelos mecánicos y cuatro modelos

empíricos. En su estudio revelaron que los modelos mecánicos indican que la velocidad y la profundidad de la inundación, así como la masa y la altura de la persona ensayada, son parámetros importantes. Pero un factor muy importante es la resistencia, que depende del número de producto $v \cdot y$ (multiplicación entre la rapidez y la profundidad) este también es dependiente de área expuesta y de la ropa del sujeto en estudio, pero en su mismo estudio Lind et al. (2004) sugieren que los modelos empíricos calibrados correctamente pueden proporcionar mejores resultados comparados con los modelos o ecuaciones mecánicas.

El modelo basado en entropía de Shannon propuesto es factible para los conjuntos de datos experimentales considerando cierta dispersión de los puntos de datos experimentales. Este modelo podría tener una forma matemática simple y contener pocos coeficientes calibrados. Además, los resultados de un análisis cualitativo simple sobre algunos parámetros que se han incorporado al modelo pueden estar de acuerdo con nuestra comprensión del mecanismo físico de la inestabilidad de las personas en las inundaciones. (Zhu et al. 2021).

El análisis de Ávila & Ávila (2016) sobre el grado de peligrosidad asociado al escurrimiento superficial en las calles de Barranquilla reveló una situación alarmante donde más del 50% de las vías principales superaban el nivel máximo de 1,2 m²/s. Estos resultados indican que la ciudad está expuesta a riesgos relacionados con inundaciones. Además, Ávila & Ávila (2016) observaron en su estudio que las tasas de amenaza alcanzan valores extremadamente altos con períodos de retorno de 19 y 32 a 5 años y 100 años, respectivamente, lo que enfatiza la urgente necesidad de medidas de mitigación y adaptación. . para afrontar este desafío. Es claro que las condiciones hidrológicas actuales amenazan seriamente la seguridad de Barranquilla y la infraestructura de la ciudad. Es probable que la periodicidad y el ímpetu de los aluviones aumenten aún más con el tiempo, especialmente en la fluctuación del clima y el desarrollo

urbano acelerado. Es fundamental que las autoridades locales trabajen con expertos en gestión de riesgos y planificación urbana para desarrollar estrategias efectivas que reduzcan la vulnerabilidad de las ciudades a eventos tan extremos. Estas estrategias pueden incluir la mejora de la infraestructura de drenaje, manejo del recurso hídrico y la ejecución de medidas de planificación del uso de la tierra para mitigar los riesgos. Además, es importante aumentar la conciencia pública sobre los riesgos relacionados con las inundaciones y la promoción de la participación y preparación pública.

Resultados similares obtenidos por Sánchez Tapiero (2023) en un análisis de peligrosidad para peatones realizado en el municipio de Cúcuta, Colombia, revelan factores de alto riesgo en las vías más transitadas durante los desastres. . Sánchez Tapiero (2023) concluyó en su estudio que en la creación de una amenaza alta intervienen diferentes estándares dependiendo de la ubicación específica en el área de estudio.

Sánchez Tapiero (2023) indicó que el alto riesgo se relaciona principalmente con la profundidad del agua. Los resultados muestran que, durante las inundaciones, los peatones que transitan por las vías pueden correr el riesgo de ser arrastrados debido a la altura del flujo de agua. Sin embargo, Sánchez Tapiero (2023) también señala que una peligrosidad alta está asociada a velocidades de flujo que exceden ciertos umbrales en algunas vías urbanas, y en caso de inundación las personas pueden correr riesgo de volcarse debido a las altas velocidades del agua. Finalmente, Sánchez Tapiero (2023) señaló que estos resultados son importantes para los formuladores de políticas porque brindan información crítica sobre los riesgos específicos que enfrentan los peatones en diferentes áreas de la ciudad durante las inundaciones. Estos datos se pueden emplear para formular enfoques de protección y mitigación adaptadas a las

características específicas de cada vía y para promover la seguridad de las personas en eventos peligrosos.

Conclusiones

Las inundaciones en las zonas urbanas son causadas principalmente por el agua de los ríos y tienen su origen principalmente en el escurrimiento de aguas producto de lluvias, que a menudo se acumulan en carreteras y calles. Estas inundaciones suelen estar asociadas a la ineficiencia de los sistemas de drenaje urbanos, que resultan ineficaces ante fenómenos hidrológicos, o muchas veces a la ausencia total de sistemas de drenaje. Por lo tanto, es importante abordar y mejorar la planificación y gestión del drenaje urbano no solo para prevenir y mitigar las inundaciones, sino también para aumentar la resiliencia de las áreas urbanas ante eventos climáticos extremos. Por lo tanto, se convierte en una tarea importante implementar estándares de análisis de estabilidad del cuerpo humano para comprender de manera integral los peligros relacionados con inundaciones en entornos urbanos, basados en principios físicos rigurosos y respaldados por diferentes estrategias de representación del cuerpo humano.

Para realizar este documento se ha realizó una revisión que abarca algunos criterios de peligrosidad propuestos por varios autores a lo largo del tiempo. Estos criterios se han desarrollado a partir de numerosos ensayos experimentales llevados a cabo en individuos con características específicas. En el transcurso de dichos ensayos, se examinó la percepción de estabilidad de cada participante en diversas condiciones hidráulicas, abarcando distintos niveles de calado y velocidades.

Existen múltiples criterios para evaluar la peligrosidad en peatones por inundaciones, pero un número reducido para evaluar la peligrosidad ante una inundación urbana, la mayoría de los límites de velocidad y calado son muy permisivos a pesar de que los autores consideran que se pueden aplicar a zonas urbanas, algunos criterios como por ejemplo el de ARMC (2000)

permiten un calado máximo de 1.5 m en adultos lo cual a criterio propio resulta excesivo (considerando que tal altura significa que la persona va a estar sumergida poco más de la mitad del cuerpo) y no apto como parámetro para inundaciones pluviales.

Durante la etapa de recopilación de datos, se estudiaron diversos factores que afectan la estabilidad humana en condiciones de inundación urbana. Los factores que determinan las dos variables principales, profundidad (calado) y velocidad, son que la profundidad juega un papel crítico en la pérdida de estabilidad por deslizamiento (fricción) o caída (impulso). Si la profundidad es grande, la flotabilidad de una persona aumenta, por lo que la fricción bajo los pies disminuye, lo que provoca una pérdida del equilibrio, lo que le impide caer, lo que aumenta la posibilidad de arrastrarse y ahogarse. Por otro lado, los flujos a poca profundidad y altas velocidades pueden causar inestabilidad por deslizamiento.

Durante los últimos años, se han realizado en todo el planeta diversas indagaciones empíricas con el objetivo de establecer los umbrales de permanencia en distintos regímenes de corriente. Existen diferencias significativas en la información obtenidos de estos ensayos experimentales, que son evidentes cuando se combinan todos los conjuntos de datos disponibles. Esta variabilidad puede atribuirse a diversos parámetros, entre los que se incluyen el material de la superficie de prueba, características propias de cada individuo (sexo, edad, peso, altura), la experiencia del mismo, la indumentaria y el calzado utilizados, así como la propia definición del límite de estabilidad que proponen los autores.

Se necesita más investigación para establecer estándares previos a las inundaciones más estrictos utilizando las condiciones del fondo (obstáculos irregulares y resbaladizos), las condiciones del flujo de agua (escombros flotantes, temperaturas frías, mala visibilidad,

corrientes irregulares), etc. Los parámetros tienen en cuenta las condiciones de las propias personas (experiencia y entrenamiento, vestimenta y calzado, características físicas distintas de la altura y el peso, incluyendo el crecimiento muscular, aspectos psicológicos) y otros elementos (vientos fuertes, iluminación deficiente, incertidumbre o pérdida total del equilibrio).

Referencias

- Abt, S. R., Wittler, R. J., Taylor, A., & Love, D. J. (1989). Human stability in a high flood hazard zone. *AWRA Water Resources Bulletin*, 25(4), 881–890.
- Alvarez Poveda, C. I., & Giraldo Rincón, M. A. (Febrero de 2003). *eird.org*. Obtenido de <https://www.eird.org/cd/toolkit08/material/insercion-curricular/los-ninos-y-la-gr/losninosylagdr.pdf>
- Aragón Durand, F. (2014). *Inundaciones en zonas urbanas de cuencas en América latina*. Enrique Bruce. Obtenido de <http://repositorio.gestiondelriesgo.gov.co/handle/20.500.11762/19850?locale-attribute=es>
- Aragón, F. (Enero de 2011). Disaster discourses, policy values and responses: the social construction of urban floods in the peri-urban interface of Mexico City. Obtenido de https://www.researchgate.net/publication/369301472_Disaster_discourses_policy_values_and_responses_the_social_construction_of_urban_floods_in_the_peri-urban_interface_of_Mexico_City
- ARMC. (2000). Floodplain Management in Australia. Best Practice Principles and Guidelines. SCARM Report 73, CSIRO Publishing. Obtenido de https://d3n8a8pro7vhmx.cloudfront.net/yycbares/pages/20/attachments/original/1499124431/Floodplain_management_in_Australia_best_practice_principles_and_guidelines.pdf?1499124431
- Arreguín Cortés, F. I., López Pérez, M., & Marengo Mogollón, H. (Septiembre-Octubre de 2016). *Redalyc.org*. Obtenido de <https://www.redalyc.org/pdf/3535/353549829001.pdf>

- Ávila, L., & Ávila, H. (Mayo de 2016). Hazard Analysis in Urban Streets Due to Flash Floods: Case Study of. Obtenido de https://www.researchgate.net/publication/303362727_Hazard_Analysis_in_Urban_Streets_Due_to_Flash_Floods_Case_Study_of_Barranquilla_Colombia
- Blaikie, P., Cannon, T., David, I., & WISNER, B. (1996). *Vulnerabilidad*. Perú: La Red.
- Bradford, N. (2023). Aumentos en las inundaciones costeras. Recuperado el 17 de Enero de 2024, de <https://www.neefusa.org/es/story/climate-change/aumentos-en-las-inundaciones-costeras>
- Cadena, M. (Mayo de 2010). Amenazas costeras. Obtenido de <http://www.ideam.gov.co/documents/21021/23877/Amenazas+Costeras.pdf/2d134cc7-063e-43c3-8ef2-c76fa25c1cdd>
- Calixto Ramon, L. (2017). Determinación de zonas susceptibles de inundación mediante el uso de herramientas SIG en el área de influencia del río cravo sur, ubicado en el municipio de Yopal, departamento de Casanare. Obtenido de https://ciaf.igac.gov.co/sites/ciaf.igac.gov.co/files/files_ciaf/Calixto-Ram%C3%B3n-Liliana-Lisbeth.pdf
- Chen, A., Djordjević, S., Leandro, J., & Savić, D. (1 de Octubre de 2010). Un análisis de las consecuencias combinadas de las inundaciones pluviales y fluviales. Obtenido de <https://iwaponline.com/wst/article-abstract/62/7/1491/16606/An-analysis-of-the-combined-consequences-of?redirectedFrom=fulltext>
- CLABSA. (2006). Plan integral de Alcantarillado de Barcelona.

Clark County Regional Flood Control District. (12 de Agosto de 1999). Hydrological criteria and drainage. Obtenido de

[http://gustfront.ccrfcd.org/pdf_arch1/hcddm/current%20manual%20\(complete\)/hcddm.pdf](http://gustfront.ccrfcd.org/pdf_arch1/hcddm/current%20manual%20(complete)/hcddm.pdf)

Comision de la verdad. (12 de 05 de 2022). GUÍA PARA LA IDENTIFICACIÓN DE

PELIGROS, VALORACIÓN Y CONTROL DE RIESGOS. Obtenido de

https://web.comisiondelaverdad.co/images/G5.TH_Identificaci%C3%B3n_Peligros_Valoraci%C3%B3n_Control_de_Riesgos_V3.pdf

Cox, R. J., Shand, T. D., & Blacka, M. J. (Abril de 2010). Australian Rainfall and Runoff

(AR&R). Revision 10: Appropriate Safety Criteria For People. New South Wales (NSW), Australia. Obtenido de

https://arr.ga.gov.au/__data/assets/pdf_file/0006/40578/ARR_Project_10_Stage1_report_Final.pdf

Cruz Roja Colombiana, & SENA. (1990). *Prevención y atención de desastres: Inundaciones*.

Da Silva, C., López, P., & Arias, F. (1 de Septiembre de 2022). Las inundaciones en las áreas

urbanas: el caso del Área Metropolitana del Gran Resistencia. Obtenido de

<https://www.scielo.cl/pdf/rgeong/n82/0718-3402-rgeong-82-333.pdf>

Department of Infrastructure Planning and Natural. (Abril de 2005). Floodplain Development

Manual: the management of flood liable land vulnérabilité. Obtenido de

<https://www.environment.nsw.gov.au/-/media/OEH/Corporate-Site/Documents/Water/Floodplains/floodplain-development-manual.pdf>

E.T.S. Ingenieros de Caminos, Canales y Puertos. (Enero de 2004). Curso de Hidrología urbana.

5. Obtenido de <https://pdfcoffee.com/hidrologia-urbana-9-pdf-free.html>

Falconer, R., & Xia, J. (Abril de 2013). Hydrodynamic modelling to support enhanced flood risk estimation. Obtenido de

https://www.academia.edu/en/4234539/Hydrodynamic_modelling_to_support_enhanced_flood_risk_estimation

FAO. (2011). Estrategia Regional de la FAO para la gestión del riesgo de desastres en América Latina. Obtenido de <https://www.fao.org/3/i2628s/i2628s.pdf>

Federal Emergency Management Agency (FEMA). (1979). The floodway: a guide for community permit officials. EEUU. Obtenido de

<https://www.chehalisbasinstrategy.com/wp-content/uploads/2020/10/FEMA-Floodway-Guide-1979.pdf>

Feito, L. (2007). *Scielo*. Obtenido de

https://scielo.isciii.es/scielo.php?script=sci_arttext&pid=S1137-66272007000600002

Floodup.ub. (2020). *floodup.ub*. Obtenido de <http://www.floodup.ub.edu/por-que-se-producen/>

García Marín, M. (30 de Noviembre de 2016). La deforestación: una práctica que agota nuestra biodiversidad. Obtenido de

[http://www.scielo.org.co/scielo.php?script=sci_arttext&pid=S1909-](http://www.scielo.org.co/scielo.php?script=sci_arttext&pid=S1909-04552016000200014#:~:text=Igualmente%2C%20la%20deforestaci%C3%B3n%20se%20relaciona,y%20ocasionando%20avalanchas%20y%20aludes.)

[04552016000200014#:~:text=Igualmente%2C%20la%20deforestaci%C3%B3n%20se%20relaciona,y%20ocasionando%20avalanchas%20y%20aludes.](http://www.scielo.org.co/scielo.php?script=sci_arttext&pid=S1909-04552016000200014#:~:text=Igualmente%2C%20la%20deforestaci%C3%B3n%20se%20relaciona,y%20ocasionando%20avalanchas%20y%20aludes.)

- Gómez, M. (2001). Definición de Criterios de Riesgo para el Flujo en Calles. Análisis del espaciamiento para rejillas e imbornales utilizados en la Ciudad de Barcelona. Informe realizado para Clavegueram de Barcelona (CLABSA). Barcelona, España.
- Ihobe. (2022). *Inundación pluvial asociada a eventos extremos de precipitaciones en escenarios de cambio climático en EUSKADI*. Sociedad Pública de Gestión Ambiental. Obtenido de https://bideoak2.euskadi.eus/2023/01/25/news_83134/INF_INUNDACIONES_PLUVIALES_ES.pdf
- IPCC. (2012). Managing the Risks of Extreme Events and Disasters to Advance Climate Change Adaptation. In Special Report of the Intergovernmental Panel on Climate Change (Vol. 9781107025). Obtenido de <https://doi.org/10.1017/CBO9781139177245.009>
- Ishigaki, T., Baba, Y., Toda, K., & Inoue, K. (11 de Septiembre de 2005). Estudio experimental sobre evacuación del espacio subterráneo en inundaciones urbanas. Obtenido de <https://www.iahr.org/library/infor?pid=16720>
- ISO 31010. (17 de Abril de 2013). *Universidad Militar Nueva Granada*. Obtenido de <https://www.umng.edu.co/documents/20127/517101/ISO+31010.pdf/162891f7-4591-2486-12e4-90b9ecb2017c?t=1575487373025>
- Jha, A., Bloch, R., & Lamond, J. (2012). *Ciudades e Inundaciones*. The World Bank - GFDRR. Obtenido de <http://repositorio.gestiondelriesgo.gov.co/handle/20.500.11762/19769>
- Karvonen, R. A., Hepojoki, H. K., Huhta, H. K., & Louhio, A. (2000). The Use Of Physical Models In Dam-Break Flood Analysis, Development of rescue actions based on dam-break flood analysis (RESCDAM). Final report of Helsinki University of Technology 57.

Kelman, I. (Septiembre de 2002). Physical Flood Vulnerability of Residential Properties in

Coastal, Eastern England. Obtenido de

<https://www.ilankelman.org/phd/IlanKelmanPhDDissertation.pdf>

Ley 1523 de 2012. (2012). *Ministerio de Ambiente y Desarrollo Sostenible*. Obtenido de

<https://www.funcionpublica.gov.co/eva/gestornormativo/norma.php?i=47141>

Lind, N., Hartford, D., & Assaf, H. (2004). HYDRODYNAMIC MODELS OF HUMAN

STABILITY IN A FLOOD. Obtenido de

https://www.academia.edu/49774613/Hydrodynamic_Models_of_Human_Stability_in_a_Flood

Ma, C., Qi, W., Xu, H., & Zhao, K. (25 de Junio de 2022). Urban flood response analysis for

designed rainstorms with different characteristics based on a tracer-aided modeling simulation. Obtenido de

<https://www.sciencedirect.com/science/article/abs/pii/S0959652622014081?via%3Dihub>

Martín León, F. (10 de Marzo de 2019). ¿Qué es la inundación costera? Obtenido de

<https://www.tiempo.com/ram/inundacion-costera.html>

Martínez Gomariz, E. (4 de Noviembre de 2016). Inundaciones urbanas: criterios de peligrosidad

y evaluación del riesgo para peatones y vehículos. Obtenido de

<http://hdl.handle.net/10803/404336>

Martínez Gomariz, E., Gómez, M., & Russo, B. (29 de Enero de 2016). *Estabilidad de personas*

en flujos de agua. Obtenido de <https://doi.org/10.4995/ia.2016.4231>

Milanesi, L., Pilotti, M., & Ranzi, R. (19 de Noviembre de 2014). A conceptual model of people's vulnerability to floods. Obtenido de https://www.researchgate.net/publication/268525867_A_conceptual_model_of_people's_vulnerability_to_floods/link/5b7aac5992851c1e12221662/download?_tp=eyJjb250ZXh0Ijp7ImZpcnN0UGFnZSI6InB1YmxpY2F0aW9uRG93bm9vYXVhZCJwYWdlIjoicHVibGljYXRpb24ifX0

Nania Escobar , L. S. (01 de Agosto de 1999). Metodología numérico - experimental para el análisis del riesgo asociado a la escorrentía pluvial en una red de calles. Obtenido de <https://www.tdx.cat/handle/10803/6395>

Nanía Escobar, L. S., Gómez Valentín, M., & Dolz Ripollés, J. (Abril-Junio de 2016). Análisis de la peligrosidad de la escorrentía pluvial en zona urbana utilizando un enfoque numérico-experimental. Obtenido de https://www.scipedia.com/wd/images/a/a9/Draft_Samper_632312481_4984_1081-1389-1-SM.pdf

Nanía, L. S., Maza, J. A., Gómez, M., & Dolz, J. (2005). METODOLOGÍA PARA EL ESTUDIO DE LA ESCORRENTÍA DE ORIGEN PLUVIAL EN MEDIO URBANO. DOS APLICACIONES EN LA CIUDAD DE MENDOZA. Obtenido de <https://repositorio.ina.gob.ar/bitstreams/adda883b-7e67-4c2c-85afb3af22cbd8b0/download>

Padrino, L. (10 de Septiembre de 2018). Riesgo por Rotura de Presa (Dam Break): Consideraciones para América Latina. Obtenido de <https://www.iagua.es/blogs/luis-alejandro-padrino/riesgo-rotura-presa-dam-break-consideraciones-america-latina>

- Qi , W., Ma, C., Xu , H., Lian, J., Xu, K., & Yao, Y. (9 de Noviembre de 2023). An exploratory framework to urban flood collaborative mitigation strategy considering synergistic effect of inundation volume. Obtenido de <https://www.sciencedirect.com/science/article/abs/pii/S002216942301497X?via%3Dihub>
- Ramsbottom, D., Wade, S., Floyd, P., Penning Rowsell, E., & Surendran, S. (2006). Risks to people: developing new approaches for flood hazard and vulnerability mapping. Obtenido de https://eprints.hrwallingford.com/562/1/HRPP340-Risks_to_people-Flood_hazard_approaches.pdf
- Ravazzani, G., Mancini, M., & Meroni, C. (22 de Julio de 2009). Diseño de hidrograma y esquema de ruta para mapeo de. Obtenido de <https://www.openaccessrepository.it/record/22698/files/fulltext.pdf>
- Re, M., Golluscio, D., Kazimierski, L., & Badano, N. D. (Septiembre de 2018). ANÁLISIS DE LA ESTABILIDAD DE PERSONAS DURANTE INUNDACIONES URBANAS A PARTIR DE RESULTADOS DE MODELACIÓN NUMÉRICA. Obtenido de https://www.ina.gob.ar/congreso_hidraulica/resumenes/LADHI_2018_RE_692.pdf
- Recasens Vargas , J. (Junio de 2014). Modelación tridimensional del flujo de entrada en un sumidero. Obtenido de <https://upcommons.upc.edu/bitstream/handle/2099.1/22291/Recasens%202014%20-%20Modelizacion%20tridimensional%20del%20flujo%20de%20entrada%20en%20un%20sumidero.pdf?sequence=1&isAllowed=y>

- Regione Liguria. (1993). Autorit  di Bacino Regionale. Ambito di Bacino No. 7. Piano di bacino stralcio per la difesa idraulica e idrogeologica. Italia. Obtenido de <https://polipapers.upv.es/index.php/IA/issue/download/490/68>
- Rojas, O., Mardones, M., Aguayo, M., & Arum , J. L. (Mayo de 2014). Una revisión de inundaciones fluviales en Chile, período 1574-2012: causas, recurrencia y efectos geográficos. Obtenido de https://www.scielo.cl/scielo.php?script=sci_arttext&pid=S0718-34022014000100012
- Rooseboom , A., Basson , M., Loots , C., Wigget, J., & Bosman, J. (1986). Manual on Road Drainage. 2nd Edition. National Transport Commission. República de Sudafrica. Obtenido de http://observatoriaigua.uib.es/repositori/suds_carreteras_3.pdf
- Russo, B. (2009). Design of surface drainage systems according to hazard criteria related to flooding of urban areas. Tesis Doctoral. Universitat Polit cnica de Catalunya. Barcelona, España.
- Sánchez Tapiero, D. I. (Febrero de 2023). Cuantificación de la Peligrosidad en Peatones por Inundaciones de Origen Pluvial en Cuencas Urbanas Usando Lenguaje de Programación Python y el Modelo Avanzado de gestión de Aguas Pluviales (PCSWMM).
- Sánchez, J. (16 de Abril de 2018). *Ecología verde*. Obtenido de https://www.ecologiaverde.com/causas-y-consecuencias-de-las-inundaciones-1282.html#anchor_2
- Sandoval , C. (2015). Peligro directo para el personal en caso de desborde de flujos de olas en diques marinos. Obtenido de <https://www.semanticscholar.org/paper/Direct-personnel->

hazard-in-wave-overtopping-flows-

Sandoval/c20e800d0c9f33fa9c360b7145ee53046dffec8a

Spesa ingeniería S.A. (2019). *Secretaría de Estado de Medio Ambiente*. Obtenido de

<https://www.divulgameteo.es/ampliab/4/1996/Caracterizacion-de-la-nieve-en-Espana-y-su-incidencia-en-las-inundaciones.html>

Surendran, S., Gibbs, G., Wade, S., & Udale Clarke, H. (Mayo de 2008). SUPPLEMENTARY

NOTE ON FLOOD HAZARD RATINGS AND THRESHOLDS FOR DEVELOPMENT PLANNING AND CONTROL PURPOSE. Obtenido de

https://assets.publishing.service.gov.uk/media/602d04a98fa8f5037d371a08/FLOOD_HAZARD_RATINGS_AND_THRESHOLDS_explanatory_note.pdf

Swail, V., Grimes, S., Pilon, P., Canterford, R., Barrett, C., & Simonov, Y. (2019). *Alertas tempranas de inundaciones costeras*. Obtenido de

https://repositorio.aemet.es/bitstream/20.500.11765/12366/1/BolOMM-68_2%287%29.pdf

Témez, J. R. (1992). Control del desarrollo urbano en las zonas inundables” en Monografías del Colegio de Ingenieros de Caminos, Canales y Puertos no 10. Madrid, España. 105–115.

Tolima.Gov. (2021). *Gobernación del Tolima*. Obtenido de

<https://www.tolima.gov.co/glosario/m/1164-mapas-de-riesgo>

U.S . DEPARTMENT OF THE INTERIOR . (1988). DOWNSTREAM HAZARD CLASSIFICATION GUIDELINES. Obtenido de

<https://mde.maryland.gov/programs/Water/DamSafety/Documents/Dam-Breach-Analysis/USBR-ACER-TM11-Downstream-Hazard-Classification-Guidelines.pdf>

UCL. (19 de 12 de 2006). *Corporación Universitaria Latinoamericana*. Obtenido de

<https://ul.edu.co/uleduco/cul/sst/identificacion-de-riesgos-laborales.html#:~:text=Es%20el%20procedimiento%20sistem%C3%A1tico%20para,y%20salud%20de%20los%20trabajadores.>

UNGRD. (2014). *Unidad nacional para la gestión del riesgo de desastres*. Obtenido de

<https://gestiondelriesgo.gov.co/snigrd/pagina.aspx?id=144>

UNISDR. (15 de 06 de 2009). *UN International Strategy for Disaster Reduction*. Obtenido de

<http://www.unisdr.org/eng/library/lib-terminology-eng.htm>.

Villegas González, P. A., Ramos Cañón, A. M., González Méndez, M., González Salazar, R. E.,

De Plaza Solórzano, J. S., Durán Gaviria, E. D., & Bolívar Barón, H. D. (2017). *Gestión del riesgo en Colombia: vulnerabilidad, reducción y manejo de desastres*. Bogotá:

Universidad Católica de Colombia.

Wright-Mc Laughlin Engineers. (1969). Urban drainage and Flood control district. Urban

Drainage and Flood Control District. Denver, Colorado, EEUU.

Xia, J., Falconer, R., Wang, Y., & Xiao, X. (14 de 02 de 2014). *New criterion for the stability of*

a human body in floodwaters. Obtenido de <https://www.iahr.org/library/infor?pid=14146>

Yang, T.-H., & Liu, W.-C. (29 de Marzo de 2020). settingsOrder Article Reprints. Obtenido de

<https://www.mdpi.com/2071-1050/12/7/2687>

Zhu, Z., Zhang, Y., Gou, L., & Pang, B. (6 de Enero de 2021). Un enfoque entrópico para estimar el criterio de inestabilidad de las personas en inundaciones. Obtenido de <https://www.ncbi.nlm.nih.gov/pmc/articles/PMC7825550/#B6-entropy-23-00074>

Zurich. (2019). Three common types of flood explained. Obtenido de <https://www.zurich.com/en/knowledge/topics/flood-and-water-damage/three-common-types-of-flood#:~:text=A%20fluvial%2C%20or%20river%20flood,banks%2C%20shores%20and%20neighboring%20land.>