XVIII ENCONTRO NACIONAL DE CONFORTO NO AMBIENTE CONSTRUÍDO
XIV ENCONTRO LATINO-AMERICANO DE CONFORTO NO AMBIENTE CONSTRUÍDO
AMBIENTE CONSTRUÍDO E USUÁRIO: PERSPECTIVAS LATINO-AMERICANAS

Proposta de um método experimental para avaliar a entrada da água da chuva em duas configurações de aberturas

Propuesta de un método experimental para evaluar el ingreso de agua de lluvia en dos configuraciones de aberturas

Proposal of an experimental method to evaluate rainwater ingress in two opening configurations

Desempenho térmico do ambiente construído/ Desempeño térmico del entorno construido/ Thermal performance of the built environment

Parra Correa, Elizabeth
Arq. Mg. en Bioclimática, La.B, Medellín, Colombia, elizabethparra@la-b.co

Callejas, Luisa Fernanda
Arq. Mg. en Hábitat Sustentable y Eficiencia Energética, La.B, Medellín, Colombia, luisa.callejas@la-b.co

Murillo, Manuela
Arq. Mg. en Bioclimática, Universidad de San Buenaventura, Medellín, Colombia, manuela.murillo@tau.usbmed.edu.co

Calle, Juan Sebastián
Arq. Mg. en Bioclimática, La.B, Medellín, Colombia, juan.calle@la-b.co

Cuartas Jiménez, Valentina
Arquitecta, La.B, Medellín, Colombia, valentina.cuartas@la-b.co

Arango Díaz, Lucas
Arq. PhD. en Arq. y Urbanismo, Universidad Nacional de Colombia, Medellín, Colombia, larango@unal.edu.co

Orozco Sosa, María Alejandra
Arquitecta, La.B, Medellín, Colombia, morozcoso@unal.edu.co

Resumo

Limitar a entrada de chuva impulsionada pelo vento através de aberturas representa um desafio para a aplicação de estratégias bioclimáticas de ventilação natural em climas tropicais. Este estudo propõe e valida um método experimental para avaliar essa entrada em fachadas, considerando o diâmetro das gotas e a velocidade do ar. O método compara um modelo físico em escala com cálculos teóricos, avaliando duas configurações: abertura livre e abertura com membrana permeável. Os resultados identificam os ângulos de incidência mais frequentes e demonstram que a membrana pode reduzir a entrada da água entre 21–62 % em altas velocidades e entre 88,5–100 % em baixas velocidades. A proposta pode embasar futuras simulações computacionais que integrem essa variável na avaliação do conforto e desempenho de fachadas.

Palavras-chave: Edificação. Desempenho de aberturas. Água da chuva. Fachada. Ventilação natural

Resumen

Limitar el ingreso de agua lluvia impulsada por viento a través de aberturas representa un desafío para aplicar estrategias bioclimáticas de ventilación natural en climas tropicales. Esta investigación propone y valida un método experimental para evaluar dicho ingreso en fachadas, considerando el diámetro de las gotas y la velocidad del aire que las impulsa. El método compara un modelo físico a escala con cálculos teóricos, evaluando dos configuraciones: abertura libre y abertura con membrana permeable. Los resultados identifican los ángulos de incidencia más frecuentes y demuestran que la membrana puede reducir el ingreso de agua entre un 21 % y 62 % con altas velocidades, y entre un 88,5 % y 100 % con bajas velocidades. Esta propuesta puede servir de base para futuras simulaciones computacionales que integren esta variable en la evaluación del confort y la eficiencia en fachadas.

Palabras clave: Edificación. Comportamiento de aberturas. Agua lluvia. Fachada. Ventilación natural.

Abstract

Limiting wind-driven rain entry through openings is a challenge for implementing bioclimatic natural ventilation strategies in tropical climates. This study proposes and validates an experimental method to evaluate water ingress through façade openings, considering droplet diameter and air velocity. The method compares a scaled physical model with theoretical calculations, testing two configurations: an open façade and one with a permeable membrane. Results identify the most frequent incidence angles and show that the membrane can reduce water entry by 21–62 % at high air speeds and by 88.5–100 % at low speeds. This approach may support future computational simulations that integrate this variable in assessing comfort and façade performance.

Keywords: Building. Window performance. Rainwater. Façades. Natural ventilation.

1. Introducción

La ventilación natural es, junto con el control solar, una de las principales estrategias bioclimáticas implementadas para favorecer el confort térmico en edificaciones localizadas en la franja intertropical. “En este contexto, puede representar una alternativa interesante al aire acondicionado en zonas donde vive el 40 % de la población mundial y los vientos alisios son fuertes y constantes” (RIOU et al., 2023). Para que esta alternativa resulte eficaz en climas tropicales, es indispensable considerar una serie de factores relacionados con el diseño del edificio y las condiciones del entorno. Una de las más relevantes es evitar el ingreso no deseado de agua lluvia a través de las aberturas, ya que este fenómeno representa una limitación recurrente para el uso de aberturas permanentes en fachadas destinadas a facilitar el flujo constante de aire. Esta situación ha restringido, en la práctica, la implementación de soluciones arquitectónicas que promuevan ventilación continua en regiones tropicales, a pesar de su potencial en términos de eficiencia energética y confort térmico.

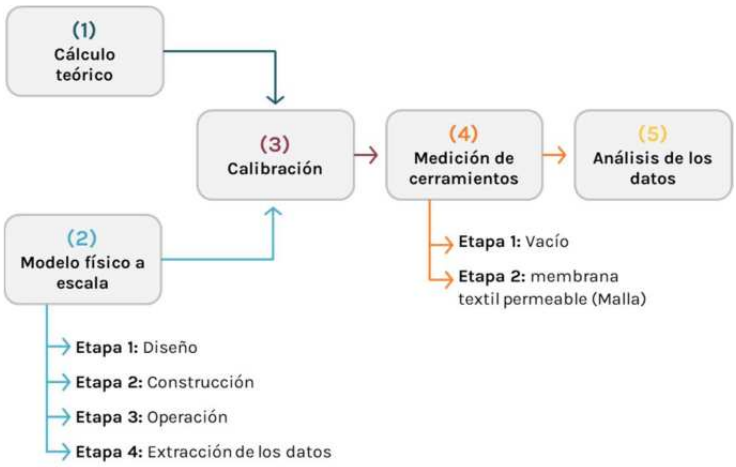
Los países tropicales, principalmente los que están cerca del ecuador como por ejemplo Colombia, experimentan precipitaciones considerables. Por tanto, en estos lugares la lluvia termina siendo un factor determinante del diseño arquitectónico tanto por su influencia en el desempeño térmico de la edificación (BAI et al., 2024; DIAZ; OSMOND, 2017; GAO et al., 2017; PÉREZ-BELLA et al., 2024b) como por la relación entre el diseño de aberturas y la lluvia conducida por el viento que pasa a través de ellas (PÉREZ-BELLA et al., 2024a; RAGHAVAN et al., 2017)y, en general, por modelos teóricos para estudiar la lluvia conducida por el viento (TECAMACHALCO; BARRIENTOS, [s.d.])

Frente a la escasez de métodos que permitan evaluar el comportamiento de aberturas frente al ingreso de agua lluvia impulsada por el viento, esta investigación plantea un enfoque experimental para comprobar la aplicabilidad de un modelo teórico basado en variables como el diámetro de la gota y la velocidad del aire. Para ello, se desarrolló un ejercicio comparativo entre un modelo teórico de cálculo y pruebas en un modelo físico a escala, mediante el cual se evaluaron dos condiciones típicas en fachadas: una abertura libre y otra equipada con una membrana textil permeable. Esta configuración permitió observar el comportamiento del agua en escenarios reales de uso, aportando una base inicial para para incluir esta variable en algoritmos para realizar simulaciones computacionales.

2. Metodología

La investigación se desarrolló mediante una metodología de tipo exploratorio, enfocada en un análisis comparativo entre los resultados obtenidos de cálculos teóricos y un modelo físico a escala. Se realizó una calibración del modelo físico con respecto al teórico y, una vez completada esta etapa, se procedió a evaluar el desempeño de una abertura con membrana textil permeable como caso de estudio, frente a un evento hipotético de lluvia que consideraba las condiciones ambientales específicas de una ciudad ubicada en el trópico. A continuación, se presenta un esquema que resume la metodología desarrollada, seguido por una descripción detallada de cada uno de los pasos.

Figura 1. Esquema que resume la metodología



Fuente: Autoría propia (2025).

2.1. Cálculo teórico

En este apartado, se buscó predecir el ángulo de inclinación de las gotas de lluvia, basándose en la fórmula propuesta por A. N. Dingle y Y. Lee en 1972, y reconfirmada en 1997 por B. Bank y F. Flores. Esta fórmula parte de una primera variable: el diámetro de la gota y la velocidad con la que la gota es atraída hacia el suelo. El diámetro de la gota de lluvia se limitó al rango entre 1 y 7 mm, debido a que las gotas con un diámetro menor a 1 mm se evaporan y las mayores de 7 mm se dividen. Una vez delimitado este rango, fue necesario conocer la velocidad con la que la gota es atraída al suelo por acción de la gravedad para finalmente conocer el ángulo de inclinación de las gotas de lluvia debido al efecto del viento.

La velocidad, V (m/s), de una gota de agua con diámetro D (mm), cayendo en el aire, puede calcularse mediante la siguiente ecuación.

$$V = 5.49 \times D^3 - 88.80 \times D^2 + 491.84 \times D - 16.60 \quad (1)$$

El ángulo de inclinación de las gotas de lluvia debido al efecto del viento, a (°), pudo calcularse mediante la siguiente ecuación, considerando, Arc Tang: arco de tangente, Vg: velocidad límite de la gota de lluvia, y Vv: velocidad del viento.

$$a = Arc\ Tang\ (V_g \div V_V) \quad (2)$$

Dado que el viento determina la inclinación con la que las gotas de lluvia caen al suelo, y que en el trópico presenta variaciones significativas a lo largo del año, se propone que, cada vez que se aplique el método, se consulten datos de estaciones meteorológicas representativas del microclima analizado y se construya un histograma de frecuencias, como se detallará en el capítulo de resultados. Este histograma mostrará los rangos de velocidad del viento (m/s) en función del número de minutos anuales. Así, con los datos de velocidad del viento y diámetro de las gotas, y utilizando las fórmulas previamente presentadas, será posible predecir el ángulo de inclinación de las gotas provocado por el viento, así como la frecuencia con la que estos ángulos ocurren a lo largo del tiempo.

2.2. Modelo físico a escala

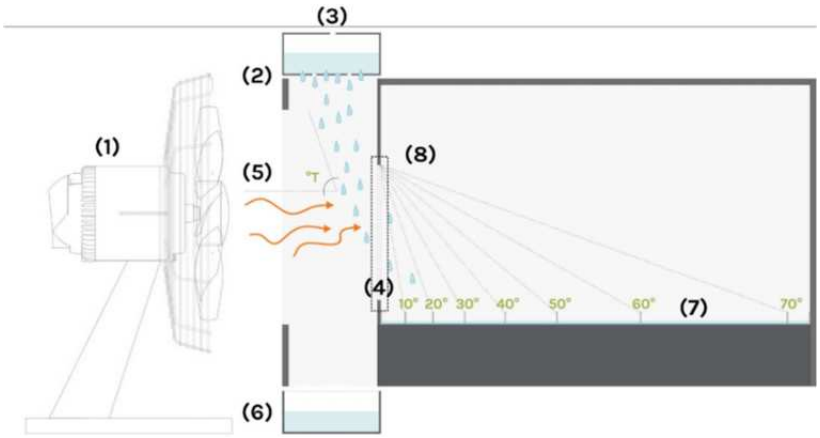
Como segundo paso metodológico, se llevó a cabo el diseño, construcción, operación y recolección de datos del modelo físico a escala. Estos procesos se agruparon en cuatro etapas, como se mostró en la **Erro! Fonte de referência não encontrada.** y se describen a continuación.

2.2.1. Etapa 1: Diseño del modelo físico a escala

Se diseñó un modelo físico a escala que buscó recrear de forma controlada las variables que inciden en el comportamiento de la lluvia (variables independientes), como la velocidad del aire y el diámetro de la gota. Inicialmente, este modelo permitió corroborar el cálculo teórico, y posteriormente se utilizó para medir el comportamiento de un tipo de cerramiento, obteniendo como resultado el porcentaje de agua que lo atraviesa y el ángulo en que lo hace (variables dependientes). El modelo representa una abertura tipo vano rectangular sin elementos de protección adicionales como goterones, sellos perimetrales o marcos de cierre. Se evaluaron dos condiciones: una abertura completamente libre y otra equipada con una

membrana textil permeable de poliéster tensado, sin sellado lateral. En la siguiente figura se presenta el diseño propuesto para el modelo físico, así como una tabla con la identificación de las variables independientes y dependientes involucradas.

Figura 2. Propuesta de diseño del modelo físico a escala



Fuente: Autoría propia (2025).

Tabla 1. Variables independientes

N°	Sigla	Componente	Dispositivos
1	V	Velocidad del viento (m/s)	Ventilador mecánico con regulador de velocidad.
2	Tg.	Tamaño de la gota (mm)	Recipiente con perforaciones que generan gotas de 1 y 7 mm.
3	Va.	Volumen de agua inicial (L)	Recipiente con una cantidad definida de agua pigmentada.
4	C	Cerramiento por analizar	Marco en el que se instala el tipo de cerramiento a analizar.

Fuente: Autoría propia (2025).

Tabla 2. Variables dependientes

N°	Sigla	Componente	Dispositivos
5	°T	Ángulo teórico (°)	Depende de la velocidad y el tamaño de la gota.
6	Va.No	Volumen de agua - NO ingresa	Recipiente en la parte exterior del cerramiento.
7	Va.Sí	Volumen de agua – SI ingresa	Cartulina absorbente de 240 gr.
8	°R	Ángulo resultante (°)	Ángulo de inclinación de la gota después de atravesar el cerramiento.

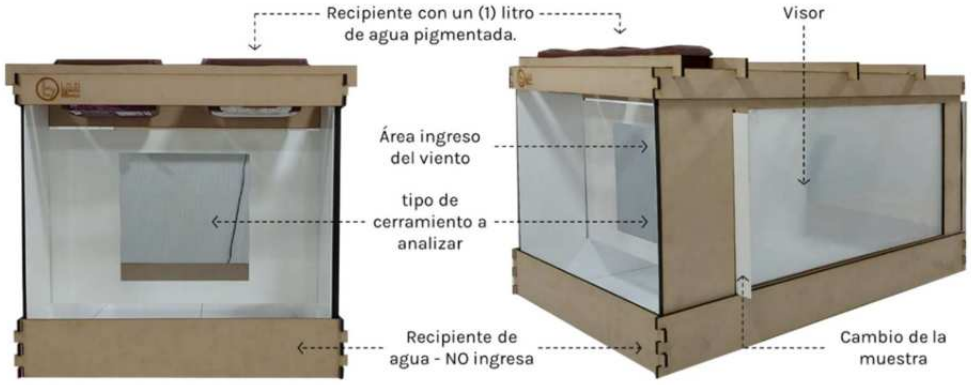
Fuente: Autoría propia (2025).

2.2.2. Etapa 2: Construcción del modelo físico a escala

El modelo fue construido en MDF (Medium Density Fibreboard) y recubierto internamente con un material acrílico impermeable. Mide 85 cm × 52 cm en la base y 50 cm de alto. La

muestra del material de cerramiento se cambiaba mediante una pestaña lateral móvil, y se incorporó un visor en uno de los lados para facilitar la observación.

Figura 3. Fotografía del modelo a escala construido



Fuente: Autoría propia (2025).

2.2.3. Etapa 3: Operación del modelo físico a escala

Para realizar la operación del modelo a escala, se siguieron los siguientes pasos en cada medición: **1.** Se encendía el ventilador mecánico y se ajustaba la velocidad inicial del aire, utilizando un anemómetro de hilo caliente para medir la velocidad en el centro del marco donde se instalaría la muestra del cerramiento a analizar. **2.** Se colocaban dos hojas de cartulina absorbente: una en posición vertical y otra en posición horizontal, para medir el ángulo de ingreso de la lluvia y la cantidad de agua que atraviesa el cerramiento. **3.** Se vertía agua pigmentada en un recipiente superior provisto de orificios en su base. La variación en el diámetro de estos orificios permitía generar gotas de 1 o 7 mm, según los requerimientos de la medición. **4.** Se esperaba a que el recipiente se vaciara completamente. **5.** Se pesaba el agua restante en la parte inferior del recipiente, fuera de la muestra, y el agua atrapada en las hojas de cartulina.

2.2.4. Etapa 4: Extracción de los datos

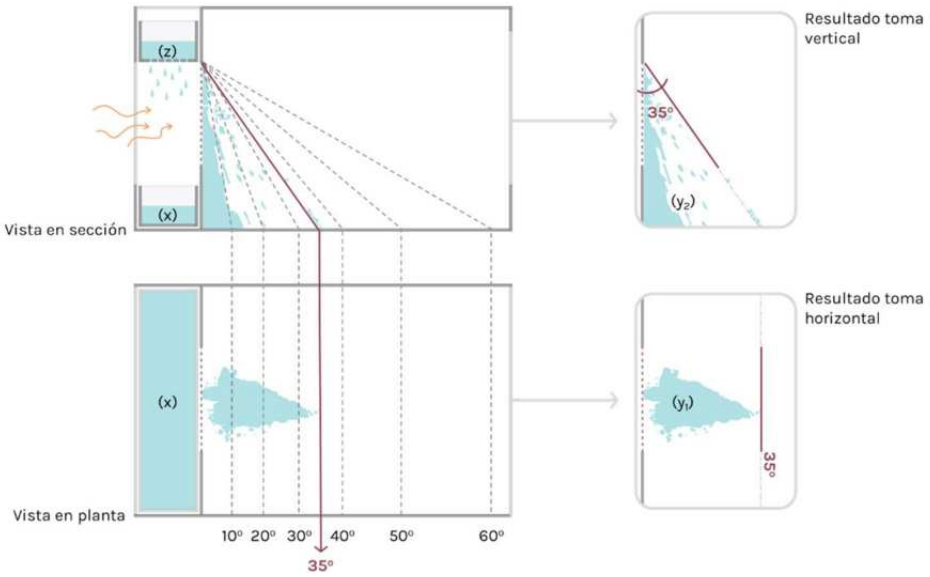
La operación sobre modelo físico a escala, descrita en la etapa anterior, se repitió sucesivamente tantas veces como configuraciones de velocidad del viento, diámetro de la gota y tipo de cerramiento se desearon medir.

Una vez que cada una de estas iteraciones terminó, se obtuvieron dos hojas de cartulina (una vertical y una horizontal) en las que se pudo observar la distribución del agua pigmentada.

Como se muestra en la Figura 4 siguiente, en ambas hojas se identificó el ángulo máximo alcanzado con respecto a la vertical, así como otros fenómenos como el salpicado y la distribución.

Para determinar el porcentaje exacto de agua que atravesaba el cerramiento en cada iteración, se midió el peso del agua inmediatamente después de finalizar la caída, a fin de evitar errores causados por la evaporación. En una balanza se pesó el agua que quedaba en la parte exterior del cerramiento (x), descontando el peso del recipiente, y el agua que quedaba en las cartulinas, tanto en la vertical (y2) como en la horizontal (y1), descontando el peso de las cartulinas. La suma de (x + y1 + y2) debía ser igual al agua total ingresada (z) para considerar válido el resultado. De esta manera, se asumió que, si z representaba el 100% del agua, la suma de y1 y y2 correspondería al porcentaje de agua que logró atravesar el cerramiento.

Figura 4. Esquema explicativo de la extracción de los datos



Fuente: Autoría propia (2025).

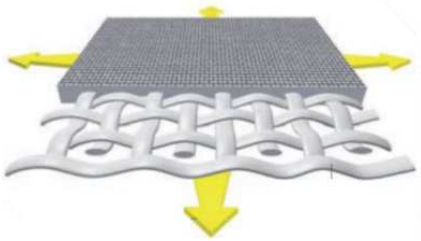
2.3. Calibración

La calibración del modelo físico a escala se realizó con base en los cálculos teóricos previos. Los análisis se llevaron a cabo considerando un vano abierto, sin incluir ningún tipo de cerramiento. Se estableció una velocidad y un diámetro de gota determinados, lo que permitió obtener un ángulo de inclinación de la lluvia. Posteriormente, se comparó el ángulo resultante del método teórico con el obtenido en el modelo físico a escala.

2.4. Cerramiento analizado

El tipo de cerramiento analizado en esta primera prueba fue una malla textil utilizada para fachadas, referencia STAMISOL, compuesta por hilos de poliéster y tensada en dos direcciones, generando orificios de 1mm por 1,5mm. Este cerramiento fue seleccionado por ofrecer una solución a los requerimientos típicos de edificios en zonas tropicales, donde las fachadas deben proporcionar simultáneamente visión hacia el exterior, entrada de luz natural, control solar, ventilación natural constante y, al mismo tiempo, protección contra la lluvia.

Figura 5. Esquema ilustrativo del cerramiento analizado.



Fuente: Tomado de: https://stamisol.com/en/.

2.5. Análisis de los datos

Para analizar los datos extraídos, se utilizó la siguiente matriz en la que se registraron las condiciones de entrada para cada una de las iteraciones (velocidad del viento, diámetro de la gota y volumen de agua), el ángulo teórico, el ángulo resultante y los porcentajes de agua obtenidos. En total, se realizaron 8 iteraciones, tomando la velocidad del viento mínima, media y máxima correspondiente al 90% de los datos, así como la velocidad máxima absoluta.

Tabla 3. Matriz de resultados

	Información de entrada			**Referencia**	**Resultados**		
N°	**(V)** Velocidad del viento (m/s)	**(Tg.)** Tamaño de la gota (mm)	**(Va.)** Volumen de agua inicial (L)	**(°T)** Ángulo teórico (°)	**(°R)** Ángulo resultante (°)	**(Va.Sí)** Porcentaje de agua – SI ingresa	**(Va.No)** Porcentaje de agua – NO ingresa
1.							
2.							

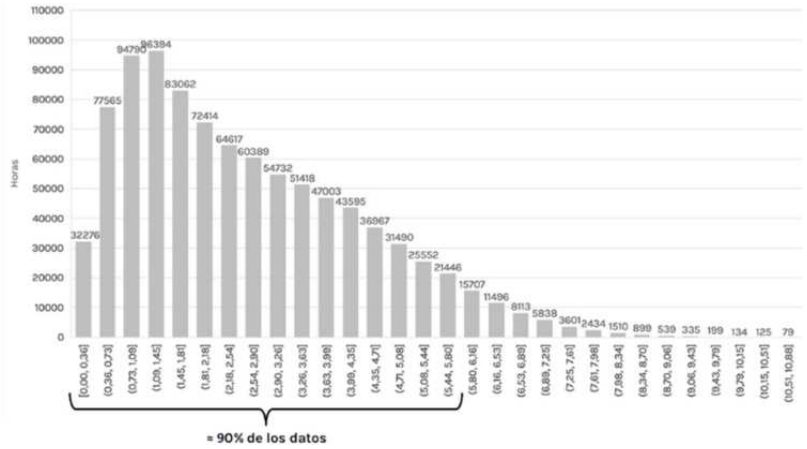
Fuente: Autoría propia (2025).

3. Resultados

3.1. Cálculo teórico

Con el fin de aplicar el cálculo teórico a un contexto real, se tomaron datos del Sistema de Alerta Temprana de Medellín y el Valle de Aburrá (SIATA), específicamente de la estación número 368, durante un período de dos años, 2019 al 2021. Estas estaciones registraron datos cada minuto, por lo que se obtuvieron 1.051.200 registros, de los cuales se descartaron aquellos en los que los sensores presentaron algún tipo de error. Con los datos obtenidos, se construyó el histograma de frecuencias que se muestra en la Figura 7. El eje horizontal contiene los rangos de velocidades y el eje vertical el número de minutos registrados durante ambos años. Como se indica en la gráfica, el rango de velocidades con mayor frecuencia registrada en la estación 368 durante este período fue de 0,96 a 1,24 m/s, y la velocidad máxima del viento registrada alcanzó los 10,88 m/s.

Figura 6. Histograma de frecuencias del viento estación 368 del SIATA



Fuente: Autoría propia (2025).

Se tomaron las velocidades de viento registradas por la estación, de acuerdo con los rangos planteados en el histograma de frecuencias, y para cada una de estas velocidades se calculó el ángulo de inclinación que alcanzaría la gota de lluvia en función del viento y diámetro. En la Tabla 4 se puede observar el ángulo de inclinación alcanzaría la gota y el porcentaje de tiempo en que esto ocurriría, permitiendo identificar cuáles son los ángulos de lluvia que se repetirían con mayor frecuencia. Se resaltó en color gris oscuro aproximadamente el 90% de los datos, indicando que el rango de velocidades más representativo está entre 0,36 y 5,08 m/s. Los ángulos con respecto a la vertical correspondientes a estos rangos de velocidad se encuentran,

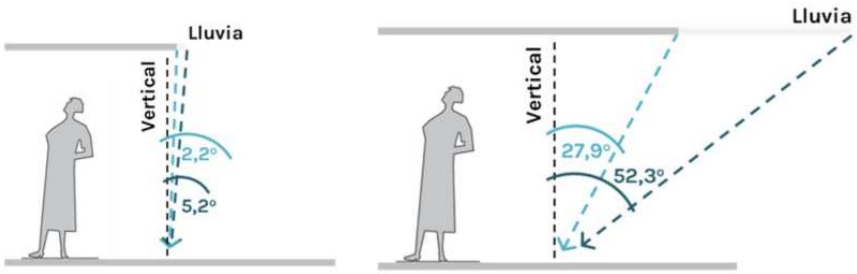
para un diámetro de gota de 1 mm, entre 5,2° y 52,3°. En el caso de un diámetro de gota de 7 mm, los ángulos están entre 2,2° y 27,9° (Ver Figura 8)

Tabla 4. Ángulo de inclinación de la gota conducida por el viento

Características del viento			Ángulo con respecto a la vertical	
% Horas	Nº Horas	Velocidad del viento (m/s)	Gotas de 1 mm de diámetro	Gotas de 7 mm de diámetro
3,42%	32276	**0,36**	**5,2**	**2,2**
8,22%	77565	0,73	10,6	4,4
10,05%	94790	1,09	15,5	6,5
10,10%	95294	1,45	20,3	8,6
8,80%	83062	1,81	24,8	10,7
7,67%	72414	2,18	29,1	12,8
6,85%	64617	**2,54**	32,9	14,8
6,40%	60389	2,90	36,5	16,8
5,80%	54732	3,26	39,8	18,8
5,45%	51418	3,63	42,8	20,7
4,98%	47003	3,99	45,5	22,6
4,62%	43595	4,35	48,0	24,4
3,92%	36967	4,71	50,3	26,2
3,34%	31490	**5,08**	**52,3**	**27,9**
2,71%	25552	5,44	54,2	29,6
2,27%	21446	5,80	56,0	31,2
1,66%	15707	6,16	57,6	32,8
1,22%	11496	6,53	59,0	34,3
0,86%	8113	6,89	60,4	35,7
0,62%	5838	7,25	61,6	37,1
0,38%	3601	7,62	62,8	38,5
0,26%	2434	7,98	63,8	39,8
0,16%	1510	8,34	64,8	41,0
0,10%	899	8,70	65,8	42,2
0,06%	539	9,07	66,6	43,4
0,04%	335	9,43	67,4	44,5
0,02%	199	9,79	68,2	45,6
0,01%	134	10,15	68,9	46,7
0,01%	125	10,52	69,6	47,7
0,01%	79	**10,88**	70,2	48,6

Fuente: Autoría propia (2025).

Figura 7. Ángulos representativos con respecto a la vertical



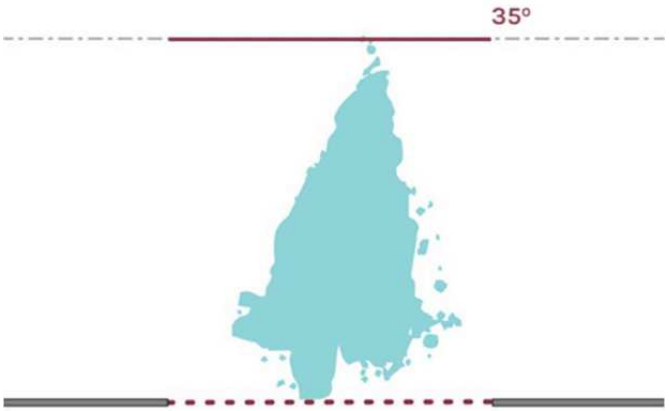
Fuente: Autoría propia (2025).

3.2. Calibración

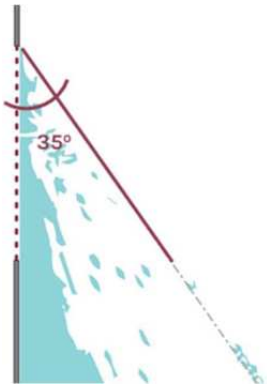
Para calibrar el modelo físico con el cálculo teórico, se utilizó una velocidad media del 90 % de los datos de viento (2,54 m/s) y gotas de 1 mm, por ser más susceptibles al viento. La medición se realizó según lo descrito en la etapa 3, con el vano completamente abierto. El ángulo teórico fue de 32°, y el observado en el modelo físico osciló entre 32° y 35°, rango considerado aceptable.

Tabla 5. Calibración del modelo físico a escala con respecto al cálculo teórico

	Información de entrada			Referencia	Resultados		
N°	**(V)** Velocidad del viento (m/s)	**(Tg.)** Tamaño de la gota (mm)	**(Va.)** Volumen de agua inicial (L)	**(°T)** Ángulo teórico (°)	**(°R)** Ángulo resultante (°)	**(Va.Sí)** Porcentaje de agua – SI ingresa	**(Va.No)** Porcentaje de agua – NO ingresa
1.	**2.54 m/s**	**1 mm**	**50 ml**	**32.95**	**32° - 35°**	**59.1%**	**40.9%**



Resultados - Vista en planta



Resultados - Vista en sección

Fuente: Autoría propia (2025).

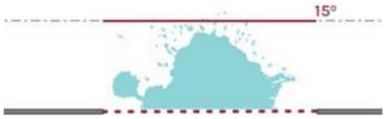
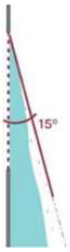
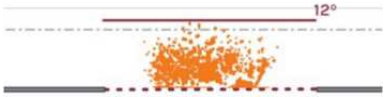
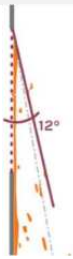
Es importante señalar que se realizó una prueba de calibración para cada iteración, verificando que el ángulo teórico y el obtenido en el modelo físico, para cada velocidad y diámetro de gota, fueran suficientemente similares (con una discrepancia menor a ±5°) antes de iniciar la medición con el cerramiento a analizar.

3.3. Mediciones de cerramientos

Una vez establecidos los protocolos de calibración y medición, se procedió a realizar las mediciones correspondientes a las 8 iteraciones propuestas. Para cada una de ellas se elaboró una tabla de resultados, como la que se muestra a continuación, donde se presentan tanto los datos numéricos como los gráficos con los resultados obtenidos.

Tabla 6. Ejemplo de matriz de resultados numéricos y gráficos.

		Información de entrada			Referencia	Resultados		
N°	Tipo de cerramiento	**(V)** Velocidad del viento (m/s)	**(Tg.)** Tamaño de la gota (mm)	**(Va.)** Volumen de agua inicial (L)	**(°T)** Ángulo teórico (°)	**(°R)** Ángulo resultante (°)	**(Va.Sí)** Porcentaje de agua – SI ingresa	**(Va.No)** Porcentaje de agua – NO ingresa
1.	**Sin malla**	**2.54 m/s**	**7 mm**	**50 ml**	**14.85**	**13° - 15°**	**72%**	**28%**
2.	**Con malla**					**10° - 12°**	**23%**	**77%**

1. Sin malla		**Diferencia**
		
Resultado vista en planta	*Resultados - Vista en sección*	*Resultado vista en planta*
2. Con malla		**(1.)** Calibración **(2.)** Evaluación
		**% Reducción** **Ángulo de incursión:** 20% **Volumen del agua:** 49%
Resultado vista en planta	*Resultados - Vista en sección*	**Nota:** Este resultado representa el valor máximo del 55,4% del tiempo.

Fuente: Autoría propia (2025).

Con base en estos resultados, se elaboró la siguiente tabla, que consolida los valores numéricos obtenidos en las mediciones del modelo físico con el cerramiento de malla.

Tabla 7. Resultados numéricos globales – Cerramiento en malla

	Información de entrada			Referencia	Resultados		
N°	**(V)** Velocidad del viento (m/s)	**(Tg.)** Tamaño de la gota (mm)	**(Va.)** Volumen de agua inicial (L)	**(°T)** Ángulo teórico (°)	**(°R)** Ángulo resultante (°)	**(Va.Sí)** Porcentaje de agua – SI ingresa	**(Va.No)** Porcentaje de agua – NO ingresa
1.	0.36 m/s	1 mm	50ml	5.25°	5°	0.5%	99.5%
2.		7 mm	50ml	2.15°	0°	0%	100%
3.	2.54 m/s	1 mm	50ml	32.9°	15.2°	4.3%	95.7%
4.		7 mm	50ml	14.8°	11°	23%	77%
5.	5.08 m/s	1 mm	50ml	52.3°	37°	11%	88%
6.		7 mm	50ml	27.9°	19°	26%	74%
7.	10.88 m/s	1 mm	50ml	70.1°	52°	52%	21%
8.		7 mm	50ml	48.6°	45°	45%	62%

Fuente: Autoría propia (2025).

Figura 8. Resultados ángulos de inclinación de la gota y mitigación de ingreso de agua lluvia



Fuente: Autoría propia (2025).

Se evidencia que, a mayor velocidad, mayor es el ángulo de incursión de agua lluvia sobre la edificación, sin embargo, la trayectoria más amplia es por parte las gotas de menor tamaño; para la cual la malla seleccionada logra mitigar el ingreso hasta un 28%, a mayor velocidad, mayor mitigación; esto ocurre debido al taponamiento de la malla, al taponarse, esta impide el ingreso de las gotas de menor tamaño. Bajo esta misma lógica actúan las gotas de mayor tamaño, no obstante, a mayor velocidad el impuso de la esta provoca un impacto en la malla que ocasiona el destaponamiento, por lo cual en el caso del diámetro de 7mm hay menor protección.

4. Discusión

El método empleado para medir el ángulo y la cantidad de agua que atraviesa el cerramiento, basado en el uso de cartulina absorbente de 240 g, permitió obtener una aproximación inicial sobre el comportamiento del agua en contacto con la superficie. No obstante, mejorar la precisión de estas mediciones podría contribuir a una caracterización más detallada del fenómeno. Asimismo, el método propuesto posibilitó la observación del salpique, tanto sobre la malla como en el suelo, lo que representa un aspecto relevante en la dinámica de la lluvia sobre los cerramientos, aunque no se incluyó en los resultados presentados. Por otro lado, es fundamental considerar el coeficiente de descarga en relación con el control de la lluvia, para promover la eficiencia en la ventilación de acuerdo con los tipos de cerramientos. En particular, se identificó que, en el caso de la malla, la acumulación de gotas sobre su superficie puede obstruir los poros, limitando así el paso del viento. Además, la medición puntual en la malla sugiere que su desempeño en el control del viento y la lluvia implica una pérdida de vistas y de iluminación natural, lo que plantea un balance entre confort visual y eficiencia en la protección de diversos factores ambientales.

5. Conclusiones

Ante la limitada disponibilidad de métodos para evaluar el ingreso de agua lluvia impulsada por el viento en aberturas de fachada, esta investigación permitió comprobar la aplicabilidad de un modelo teórico mediante un ejercicio experimental controlado. Al contrastar los resultados del modelo físico con cálculos teóricos, se identificaron los ángulos de incidencia más frecuentes y se cuantificó el ingreso de agua en dos configuraciones: abertura libre y abertura con membrana textil permeable. Si bien el modelo permitió aproximaciones útiles, no reproduce completamente la complejidad técnica de una abertura real, lo cual representa una de sus principales limitaciones. Esta propuesta metodológica aporta una base valiosa para futuras simulaciones digitales y abre la posibilidad de explorar nuevas tipologías de cerramientos adaptadas a condiciones climáticas tropicales.

6. Referencias

BAI, X. et al. Analysis of numerical simulations and semi-empirical models on distribution characteristics of wind-driven rain on low-rise building facades. **Building and Environment**, v. 263, 1 set. 2024.

DIAZ, C. A.; OSMOND, P. **Influence of Rainfall on the Thermal and Energy Performance of a Low Rise Building in Diverse Locations of the Hot Humid Tropics**. Procedia Engineering. **Anais**...Elsevier Ltd, 2017.

GAO, G. et al. **Wind-driven rain on a building façade in urban environment**. Procedia Engineering. **Anais**...Elsevier Ltd, 2017.

PÉREZ-BELLA, J. M. et al. Closing the gap between traditional wind-driven rain studies and the performance-based design of building façades: Case study of the Netherlands. **Building and Environment**, v. 248, 15 jan. 2024a.

PÉREZ-BELLA, J. M. et al. Incorporating façade-specific climatic factors to improve the ISO 15927-3 characterisation of wind-driven rain spells: Dutch and Spanish case studies. **Developments in the Built Environment**, v. 17, 1 mar. 2024b.

RAGHAVAN,V. S. G. et al. **Determination of Optimal Parameters for Wind Driven Rain CFD Simulation for Building Design in the Tropics**. Procedia Engineering. **Anais**...Elsevier Ltd, 2017.

RIOU B., ORTEGO, E., DELPLANQUE, V., BLANCHARD, B., GANDEMER, J., & STABAT, P. (2023). **Potential and limits of natural ventilation for comfort in retrofit buildings in tropical climates**. *E3S Web of Conferences 396*. https://doi.org/10.1051/e3sconf/202339602021

TECAMACHALCO, U.; BARRIENTOS, J. E. E. **INSTITUTO POLITÉCNICO NACIONAL Escuela Superior de Ingeniería y Arquitectura**. [s.l: s.n.].