

# Evaluación de riesgo de inundaciones en el Municipio de Machico, Madeira (Portugal)

## Flood risk assessment in the Municipality of Machico, Madeira (Portugal)

Victor Rodrigues Quintal<sup>a</sup>, Juan De Sousa Do Nascimento<sup>b</sup>, Juan Pita Martins<sup>c</sup>, Bárbara De Sousa Ramos<sup>d</sup> & Sergio Neves Lousada<sup>e\*</sup>

*a Faculdade de Ciências Exatas e da Engenharia, Universidade da Madeira, Funchal, Portugal. victordrq710@gmail.com*

*b Faculdade de Ciências Exatas e da Engenharia, Universidade da Madeira, Funchal, Portugal. juanc.nascimento.88@gmail.com*

*c Faculdade de Ciências Exatas e da Engenharia, Universidade da Madeira, Funchal, Portugal. juale2892@gmail.com*

*d Faculdade de Ciências Exatas e da Engenharia, Universidade da Madeira, Funchal, Portugal. barbararamos3m@hotmail.com*

*e Faculdade de Ciências Exatas e da Engenharia, Universidade da Madeira, Funchal, Portugal. slousada@staff.uma.pt*

*\* Autor de correspondencia*

Recibido: 02 julio 2021 / Recibido en formato revisado: 10 agosto 2021 / Aceptado para publicación: 17 agosto 2021 / Disponible en línea 18 de setiembre 2021

### Resumen

Este estudio tiene como objetivo realizar un análisis comparativo del riesgo de inundaciones en todas las cuencas hidrográficas de Machico en la isla de Madeira. La evaluación aborda la necesidad de implementar cuencas de detención para mitigar el riesgo de inundaciones durante precipitaciones de alta intensidad a corto plazo. Se caracterizaron las 4 cuencas hidrográficas ubicadas en el municipio de Machico utilizando ecuaciones empíricas para obtener parámetros e índices específicos. Fue realizado un estudio entre análisis hidrológico y análisis espacial, utilizando sistemas de información geográfica. El estudio reveló que la cuenca hidrográfica de Machico es de tamaño mediano y con baja probabilidad de ocurrencia de inundaciones, con excepción del curso principal y se concluyó que solo en esta cuenca se da la necesidad de la implementación de una cuenca de detención o modificación del coeficiente de rugosidad de su cauce. Además, la comparación entre los resultados obtenidos con los del informe de riesgo de inundaciones regional valida el resultado del estudio.

*Palabras clave:* Flujo superficial; Hidráulica; Hidrología; Riesgo de inundaciones; Sistemas de Información Geográfica.

### Abstract

This study aims to carry out a comparative analysis of the risk of flooding in all the hydrographic basins of Machico on the island of Madeira. The assessment addresses the need to implement detention basins to mitigate the risk of flooding during short-term high intensity rainfall. The 4 watersheds located in the municipality of Machico were characterized using empirical equations to obtain specific parameters and indices. A study was carried out between hydrological analysis and spatial analysis, using geographic information systems. The study revealed that the Machico watershed is medium in size and with a low probability of flooding, with the exception of the main course, and it was concluded that only in this watershed is there the need for the implementation of a detention or modification basin of the river. roughness coefficient of its channel. In addition, the comparison between the results obtained with those of the regional flood risk report validates the result of the study.

*Keywords:* Flood risk; Geographic Information Systems; Hydraulics; Hydrology; Surface runoff.

### 1 Introducción

Procedente del propio ciclo meteorológico de la Tierra y agravado por cuestiones praxeológicas, Los fenómenos meteorológicos extremos son cada vez más frecuentes e intensos y provocan graves problemas medioambientales, sociales y económicos [1 - 5]. Es evidente que el análisis de modelos de cambio climático puede predecir este cambio, que tiende a causar aún más daño a la población [6].

Las inundaciones son uno de los fenómenos cada vez más frecuentes y destructivos debido al crecimiento desordenado de las ciudades y la falta de una planificación urbanística adecuada a su realidad [7]. Así, queda claro que las inundaciones son el tipo de desastre natural más común en Europa, teniendo en cuenta la base de datos internacional sobre desastres, representando el 43% de todos los desastres ocurridos durante el período comprendido entre 1998 y 2002. [8].

Las inundaciones pueden definirse como fenómenos hidrológicos extremos de frecuencia variable, de carácter natural o por inducción humana, que consisten en el desbordamiento de un curso de agua [9, 10]. Con la alta tasa de urbanización y los factores climáticos naturales, las inundaciones se han convertido en uno de los principales problemas en varias ciudades del mundo, especialmente en las regiones tropicales [1, 5, 11].

Este hecho se debe al aumento de la impermeabilidad del suelo y el consiguiente aumento de la escorrentía superficial, con el fin de llevar el volumen de agua precipitada a las zonas aguas abajo [12]. Además, la construcción de carreteras cerca de la desembocadura de los arroyos puede crear barreras a la salida del flujo precipitado, aumentando el riesgo de daños materiales y pérdidas humanas durante una inundación [13].

Las áreas urbanas son considerablemente más susceptibles a los riesgos y daños, ya que es en estas áreas donde se concentra la mayor parte residencial y comercial [14, 15]. Por lo tanto, es plausible que a través del desarrollo urbano en áreas que antes eran llanuras aluviales, la magnitud de las consecuencias negativas de los episodios de inundaciones en ciertas áreas se incrementa, contribuyendo al riesgo de inundación aguas abajo del río debido a la canalización del volumen precipitado no infiltrado en el suelo [8, 16].

En este contexto, es necesario un estudio profundo y preciso de las condiciones que tienden a conducir a la agravación de los eventos antes mencionados en el caso de inundaciones, por ejemplo, geomorfología, geología, hidrología, índice de impermeabilidad del suelo, pendiente, densidad de drenaje y la implementación de medidas de mitigación de los impactos ocasionados por este tipo de eventos [17]. Sin embargo, incluso si no es posible reducir los impactos de estos eventos a cero, en el futuro, los efectos pueden minimizarse tanto en la cantidad de daños materiales como en la reducción de muertes [13]. Para ello, es necesario sensibilizar a la sociedad - es decir, ciudadanos y gobierno - para la adopción de mecanismos de gestión de riesgos en las zonas más sensibles como la cuenca hidrográfica del arroyo Machico.

Hasta hace relativamente poco tiempo, el principio básico del drenaje urbano era el concepto convencional de alejarse rápidamente de la causa de los problemas, es decir, alejar el exceso de flujo de su fuente. Este principio de flujo rápido, aunque eficiente en un aspecto, traslada el problema de un punto a otro, sin combatir realmente el origen del problema: la acción humana en la cuenca [18 - 20].

Para combatir este concepto desactualizado, surge otro principio de drenaje urbano, esta vez con un enfoque más moderno y ambiental del problema, utilizando el concepto de almacenamiento / retraso para prevenir o mitigar los efectos de la urbanización y distribuir mejor los caudales en el tiempo, preservando las características hidrológicas naturales de la cuenca hidrográfica [21].

A partir de esta premisa, surgen otras técnicas de mitigación del impacto de las inundaciones, aunque a través de conceptos simples y utilizados durante mucho tiempo, con aplicaciones dirigidas principalmente al riego y suministro de agua, consistente en la implementación de cuencas de detención. Este mecanismo tiene como finalidad única y específica el control de las inundaciones urbanas [21]. Por lo tanto, las cuencas de detención pueden definirse como un mecanismo para el almacenamiento, regulación y control de la escorrentía

superficial de las precipitaciones en una cuenca determinada [20].

De manera concisa, las estructuras de mitigación de inundaciones contribuyen a la regularización del volumen de agua afluente a la línea principal, permitiendo el control de la evolución morfológica del curso de agua y la reducción de la degradación del lecho por el proceso de erosión, provocado por el transporte de sólidos [20, 22].

## 2 Materiales y métodos

### 2.1 Área de Estudio

Con referencia a la región en estudio, la cuenca del río de Machico, se localiza en el municipio de Machico, Archipiélago de Madeira, con una superficie de 24,650 km<sup>2</sup> que se ubica en el Atlántico Norte, entre las latitudes 30° 01' N y 33° 31' N y longitudes 15° 51' W y 17° 30' W, Fig. 1 [24].



Figura 1. Isla de Madeira - Ubicación de la cuenca hidrográfica de Machico.

El presente estudio se puede resumir a través del organigrama que se muestra en la Fig. 2.

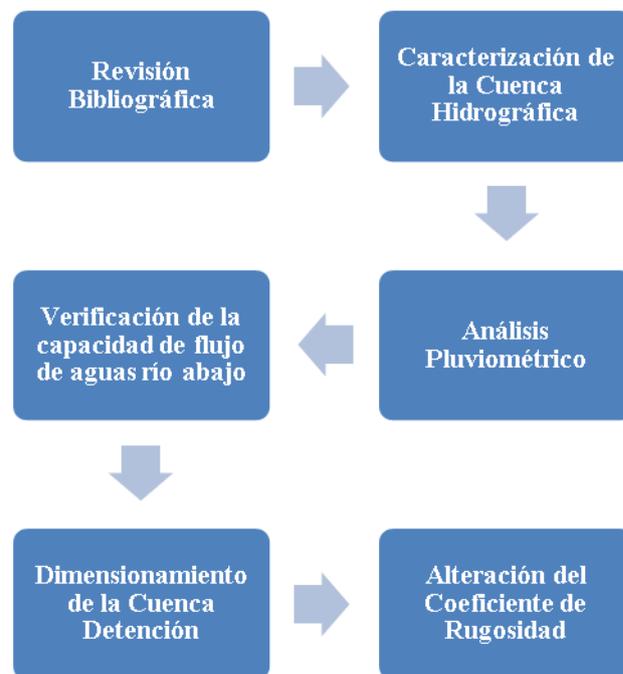


Figura 2. Síntesis de metodología aplicada.

A priori, se llevó a cabo una amplia revisión bibliográfica, es decir, artículos científicos, tesis de maestría, tesis doctorales, con el fin de verificar los principales parámetros que sugieren la susceptibilidad de una cuenca hidrográfica a problemas de inundaciones, así como las metodologías más utilizadas a nivel mundial para su determinación.

## 2.2 Análisis morfométrico de la cuenca hidrográfica

Entre los parámetros encontrados se encuentran:

Índice de Gravelius -  $K_C$ : establece la relación entre el perímetro de la cuenca y el perímetro de una cuenca perfectamente circular, pero con un área igual a la cuenca en estudio, con el fin de establecer qué tan circular es. Este parámetro se puede obtener mediante la Ec. 1.

$$K_C = P / 2 \times \sqrt{\pi \times A} \quad (1)$$

Dónde:

P = perímetro de la cuenca hidrográfica, en km;  
 A = área de la cuenca hidrográfica, en km<sup>2</sup>.

Este índice es adimensional y cuanto más cerca de "1", más redondeada es la cuenca y mayor es la susceptibilidad a las inundaciones. [25].

Como referido anteriormente, cuando temos:

- i.  $K_C = 1$ , estamos na presença de uma bacia circular;
- ii.  $K_C < 1,128$ , temos uma bacia arredondada;
- iii.  $K_C = 1,128$ , corresponde a uma bacia quadrada;
- iv.  $K_C > 1,128$ , torna-se necessário calcular o Índice de alongamento.

Índice de alargamiento -  $K_L$ : establece la relación entre la cuenca hidrográfica bajo análisis con un rectángulo equivalente de idéntica superficie. Este parámetro se puede calcular usando la Ec. 2.

$$K_L = L_e / l_e \quad (2)$$

Siendo:

$$L_e = \frac{K_C \times \sqrt{A}}{1,128} \times \left| 1 + \sqrt{1 - \left(\frac{1,128}{K_C}\right)^2} \right| \quad (3)$$

$$l_e = \frac{K_C \times \sqrt{A}}{1,128} \times \left| 1 - \sqrt{1 - \left(\frac{1,128}{K_C}\right)^2} \right| \quad (4)$$

Dónde:

$L_e$  = longitud equivalente, en km;  
 $l_e$  = ancho equivalente, en km;  
 $K_C$  = índice de Gravelius, adimensional;  
 A = área de la cuenca hidrográfica, en km<sup>2</sup>.

Este coeficiente es adimensional, y si el valor obtenido es mayor que "2", la cuenca se considera alargada. [6].

Factor de forma -  $K_f$ : establece la relación entre el ancho y largo promedio de la cuenca. La determinación de este coeficiente se puede hacer a partir de la Ec. 5.

$$K_f = A / L_B^2 \quad (5)$$

Dónde:

A = área de la cuenca hidrográfica, en km<sup>2</sup>;  
 $L_B$  = longitud de la cuenca, en km.

Este índice presenta valores adimensionales. Entonces, al igual que con el factor de alargamiento, este parámetro determina qué tan alargada está la cuenca. Sin embargo, en este caso, cuanto menor sea el valor obtenido, más alargada será la cuenca en estudio y menor será la propensión a las inundaciones [26]. En este índice, los valores iguales a "1" indican una cuenca cuadrada. [25].

Posteriormente, a través de los archivos MDT (Digital Terrain Model) proporcionados por el LREC (Laboratorio Regional de Ingeniería Civil) y con la ayuda del software ArcGIS, se realizó la caracterización de la cuenca del río Machico. Mediante este procedimiento se eliminaron los valores geomorfológicos de las cuencas en estudio, que luego se aplicaron en las formulaciones de varios autores, como una forma de establecer valores medios y más confiables, debido a las desviaciones encontradas en cada método utilizado.

Varios autores sugieren que el análisis morfométrico debe partir de la jerarquización de canales, donde cada línea de drenaje se puede categorizar según su posición (orden o magnitud) dentro de la cuenca hidrográfica. Este orden se puede utilizar para describir la línea de drenaje y dividir la red de drenaje en partes que se pueden cuantificar y comparar. [27].

Como criterio para ordenar los canales de la red de drenaje de una cuenca hidrográfica, se destaca la metodología de Arthur N. Strahler. A partir de la elaboración de esta metodología, el análisis de cuencas hidrográficas se volvió más objetivo luego de la elaboración de la metodología de Strahler, que estableció las leyes de desarrollo de los ríos y sus respectivas cuencas, sirviendo de base para varias otras investigaciones en este campo [27]. El uso de este método se hizo a partir del tratamiento de datos altimétricos y planimétricos a través del software ArcGIS.

El análisis de la clasificación de Strahler se puede realizar en función del grado de ramificación o bifurcación existente en una cuenca, donde cada grado se puede obtener mediante la Ec. 6 [6, 25, 28 - 32].

$$R_B = \frac{N_i}{N_{i+1}} \quad (6)$$

Dónde:

$N_i$  = número de canales con orden "i"; adimensional;  
 $N_{i+1}$  = número de canales con orden inmediatamente superior "i + 1", adimensional.

Este parámetro tiene un carácter adimensional, ya que solo establece una relación proporcional entre los órdenes bajo análisis. Para obtener la razón de bifurcación promedio de la cuenca, se utiliza la Ec. 7.

$$\bar{R}_B = \sqrt[i-1]{\prod_{i=1}^{i-1} \frac{N_i}{N_{i+1}}} = \sqrt[i-1]{N_1} \quad (7)$$

Dónde:

$N_i$  = número de canales con orden "i";  
 $N_{i+1}$  = número de canales con orden inmediatamente superior a "i + 1";  
 $N_1$  = número de canales de primer orden.

Así, al igual que el parámetro anterior, éste tiene un carácter adimensional ya que simplemente establece un promedio de las relaciones de proporcionalidad realizadas. Otro parámetro fundamental para este estudio se refiere al tiempo de concentración, que corresponde al tiempo necesario para que toda la cuenca hidrográfica contribuya a la salida de agua después de una precipitación [20, 33 - 35]. Dado que cada metodología tiene valores diferentes debido a las particularidades en las que fueron creadas, optamos por utilizar la media aritmética de 3 métodos, a saber: Kirpich, Ec. 8; Temez, Ec. 9 y Giandotti, Ec. 10.

$$tc = 57 \times \left( \frac{L^3}{H_{máx} - H_{mín}} \right)^{0,385} \quad (8)$$

Dónde:

$tc$  = tiempo de concentración, en minutos;  
 $L$  = longitud del curso de agua principal, en km;  
 $H_{máx}$  = altura máxima de la corriente principal, en m;  
 $H_{mín}$  = altura mínima del curso de agua principal, en m.

$$tc = \left( \frac{L}{i^{0,25}} \right)^{0,76} \quad (9)$$

Dónde:

$tc$  = tiempo de concentración, en horas;  
 $L$  = longitud del curso de agua principal, en km;  
 $i$  = pendiente media del curso de agua principal, en m / m.

$$tc = \frac{(4 \times \sqrt{A}) + (1,5 \times L)}{0,8 \times \sqrt{Hm}} \quad (10)$$

Dónde:

$tc$  = tiempo de concentración, en horas;  
 $A$  = área de la cuenca hidrográfica, en km<sup>2</sup>;  
 $L$  = longitud del curso de agua principal, en km;  
 $Hm$  = altura promedio de la cuenca, en m.

### 2.3 Análisis de la Precipitación

El siguiente paso consistió en el análisis cuantitativo de los caudales precipitados en eventos raros, mediante el estudio probabilístico realizado a través de la historia de precipitación de la cuenca hidrográfica en estudio. En este contexto, se utilizaron los valores máximos diarios de cada año (en base a las estaciones hidrométricas presentes) y se aplicó la metodología de Distribución Probabilística de Gumbel, con la ayuda del software Microsoft Excel. Este método consiste en aplicar la Ec. 11.

$$Pest = Pm + S' \times Kt \quad (11)$$

Dónde:

$Pest$  = precipitación diaria máxima anual estimada, en mm;  
 $Pm$  = precipitación media, en mm;  
 $S'$  = desviación estándar de la muestra, en mm;  
 $Kt$  = factor de frecuencia, adimensional.

Siendo:

$$S' = \left( \frac{\sum (X_i - X_m)^2}{n'} \right)^{0,5} \quad (12)$$

Dónde:

$X_i$  = valor de la muestra, en mm;  
 $X_m$  = media de la muestra, en mm;  
 $n'$  = cantidad de muestras.

$$Kt = - \frac{6^{0,5}}{\pi} \cdot \left\{ 0,577216 + \ln \left( \ln \left( \frac{Tr}{Tr - 1} \right) \right) \right\} \quad (13)$$

Dónde:

$Tr$  = tiempo de recurrencia, en años.

Una vez que se determinó la precipitación diaria estimada para un evento raro, la intensidad de la precipitación se determinó de acuerdo con la Ec. 14.

$$I = \frac{Pest \times k}{tc} \quad (14)$$

Dónde:

$I$  = intensidad de precipitación, en mm/h;  
 $Pest$  = precipitación diaria máxima anual estimada, en mm;  
 $tc$  = tiempo de concentración, en horas;

k = coeficiente de repartición temporal, adimensional.

Am = área de la sección de flujo de la desembocadura, en m<sup>2</sup>;

Siendo:

$$k = 0,181 \times \ln(tc) + 0,4368 \quad (15)$$

Dónde:

tc = tiempo de concentración, en horas.

El coeficiente de distribución temporal se vuelve necesario ya que la precipitación diaria máxima anual estima un aguacero para 24 horas. Sin embargo, dado que la duración de la precipitación se igualará al tiempo de concentración de la cuenca, considerar la cantidad total de precipitación para el análisis del flujo del curso de agua principal sería demasiado conservador y conduciría a un sobredimensionamiento de las estructuras hidráulicas [20].

#### 2.4 Capacidad de flujo de la desembocadura y flujo esperado

Posteriormente, se verificó la capacidad de flujo de la boca mediante la fórmula de Manning-Strickler, **¡Error! No se encuentra el origen de la referencia.**, comparándolo con el flujo esperado para un evento con una recurrencia de 100 años. La verificación del flujo esperado se realizó mediante la media aritmética de cuatro metodologías utilizadas a nivel mundial, siendo ellas: Forti, **¡Error! No se encuentra el origen de la referencia.**; Pagliaro, **¡Error! No se encuentra el origen de la referencia.**; Racional, **¡Error! No se encuentra el origen de la referencia.**; Giandotti, **¡Error! No se encuentra el origen de la referencia.** e Mockus, **¡Error! No se encuentra el origen de la referencia.**

$$Q_m = \frac{1}{n} \times A_m \times R^{\frac{2}{3}} \times \sqrt{i} \quad (16)$$

Dónde:

Q<sub>m</sub> = capacidad de flujo de la desembocadura, en m<sup>3</sup>/s.

A<sub>m</sub> = área de la sección de flujo de la desembocadura, en m<sup>2</sup>;

R = radio hidráulico, en m;

I = inclinación media de la región da desembocadura, en m/m;

n = coeficiente de rugosidad la desembocadura, en m<sup>-1/3</sup> s, conforme a la **¡Error! No se encuentra el origen de la referencia.**

Siendo:

$$R = \frac{(B + 2 \times h)}{A_m} \quad (17)$$

Dónde:

B = ancho de la sección de flujo de la desembocadura, en m;

h = altura de la sección de flujo de la desembocadura, en m;

En este caso, el principal obstáculo está relacionado con el desconocimiento de las dimensiones reales de la desembocadura de la cuenca, siendo necesario utilizar valores aproximados medidos mediante georreferenciación.

$$Q_{forti} = A \times \left( b \times \frac{500}{125 + A} \right) + c \quad (18)$$

Dónde:

Q<sub>Forti</sub> = caudal de punto de inundación, en m<sup>3</sup>/s;

A = área de la bacía hidrográfica, en km<sup>2</sup>;

b = 2,35 para precipitación diaria máxima inferior a 200 mm y 3,25 para valores superiores a 200 mm;

c = 0,5 para precipitación diaria máxima inferior a 200 mm y 1 para valores superiores a 200 mm.

$$Q_{Pagliaro} = A \times \left( \frac{2900}{90 \times A} \right) \quad (19)$$

Dónde:

Q<sub>Pagliaro</sub> = caudal de punto de inundación, en m<sup>3</sup>/s;

A = área de la cuenca hidrográfica, en km<sup>2</sup>.

$$Q_{Racional} = \frac{C \times I \times A}{3,6} \quad (20)$$

Dónde:

Q<sub>Racional</sub> = caudal de punto de inundación, en m<sup>3</sup>/s;

C = coeficiente de flujo superficial, conforme a la **¡Error! No se encuentra el origen de la referencia.**;

I = intensidad de precipitación, en mm/h;

A = área de la cuenca hidrográfica, en km<sup>2</sup>.

$$Q_{Giandotti} = \frac{\lambda \times A \times P_{m\acute{a}x}}{tc} \quad (21)$$

Dónde:

Q<sub>Giandotti</sub> = caudal de punto de inundación, en m<sup>3</sup>/s;

λ = coeficiente de reducción, conforme a la **¡Error! No se encuentra el origen de la referencia.**;

A = área de la cuenca hidrográfica, en km<sup>2</sup>;

P<sub>máx</sub> = altura de precipitación para una duración igual al tiempo de concentración, en mm;

tc = tiempo de concentración, en horas.

$$Q_{Mockus} = \frac{2,08 \times A \times Pest \times C}{\sqrt{tc} + 0,6 \times tc} \quad (22)$$

Dónde:

Q<sub>Mockus</sub> = caudal de punto de inundación, en m<sup>3</sup>/s;

A = área de la cuenca hidrográfica, en km<sup>2</sup>;

Pest = precipitación diaria máxima anual estimada, en cm;

C = coeficiente de flujo superficial, conforme a la Tabla II;  
tc = tiempo de concentración, en horas.

Se sugiere que uno de los criterios de dimensionamiento de la cuenca de retención establezca que el control del flujo de efluentes debe ser igual o menor al 85% de la capacidad de flujo correspondiente a las condiciones de la cuenca antes de la implementación de la medida [36]. Otro criterio sugerido por el citado autor indica que es necesario diseñar un aliviadero para asegurar el flujo de caudales extremos, sin romper la estructura.

Con base en esta premisa, es necesario verificar la Fill Rate, **¡Error! No se encuentra el origen de la referencia.**, y si la capacidad de flujo de la boca es insuficiente para garantizar el criterio antes mencionado, se dimensionará la cubeta de retención.

$$FR = \frac{Q_p}{Q_m} \times 100 \quad (23)$$

Dónde:

FR = Fill Rate, en %;

Qp = media aritmética dos caudales de punto de inundación, en m<sup>3</sup>/s;

Qm = capacidad de flujo da desembocadura, en m<sup>3</sup>/s.

El Fill Rate es el grado de llenado de la desembocadura después de una precipitación. Por lo tanto, si la FR es superior al 100%, sugiere que el caudal precipitado excederá la capacidad de flujo aguas abajo.

## 2.5 Dimensionamiento - Cuenca de Detención

Luego de constatar la insuficiencia de flujo de la desembocadura, se diseñó una cuenca de detención para regular el exceso de caudal, respetando la realidad geográfica local y la presencia de estructuras humanas construidas en las inmediaciones. Se utilizaron dos metodologías para este diseño: el método holandés, **¡Error! No se encuentra el origen de la referencia.**; y el método del hidrograma triangular simplificado (HTS), **¡Error! No se encuentra el origen de la referencia.** Primero, se diseñó un descargador tipo Cipoletti, **¡Error! No se encuentra el origen de la referencia.**, como una forma de regular el caudal hasta que satisfaga el criterio comentado anteriormente.

$$Q_s = 1,86 \times Lsd \times Hd^{1,5} \quad (24)$$

Dónde:

Qs = caudal de salida del descargador, en m<sup>3</sup>/s;

Lsd = ancho del vertedero, en m<sup>3</sup>/s;

Hd = altura del agua encima de la cota del vertedero, en m.

$$V_a = (Q_p - Q_s) \times t_c \times 3600 \quad (25)$$

$$V_a = \frac{(Q_p - Q_s) \times (2 \times t_c - 2 \times [Q_s / \{Q_p / t_c\}])}{2} \quad (26)$$

Dónde:

Va = volumen de almacenamiento, en m<sup>3</sup>;

Qp = caudal precipitado, en m<sup>3</sup>/s;

Qs = caudal de salida del descargador, en m<sup>3</sup>/s;

tc = tiempo de concentración, en horas.

La **¡Error! No se encuentra el origen de la referencia.**, fue elaborado a través del análisis geométrico del HTS, **¡Error! No se encuentra el origen de la referencia.**, considerando el tiempo base como el doble del valor del tiempo de concentración. Si se cambia esta relación, esta ecuación pierde aplicabilidad y debe revisarse de acuerdo con la nueva configuración.

## 2.6 Modificación del Coeficiente de Rugosidad

Finalmente, otra metodología de mitigación utilizada fue la alteración del coeficiente de rugosidad de las paredes y el fondo del canal, con el fin de reducir la pérdida de capacidad de flujo, resultante del rozamiento del fluido con la superficie en contacto.

## 3 Resultados

Inicialmente, se realizó el análisis individual de los parámetros calculados, Tabla 1, sin correlacionarlos, con el fin de verificar la importancia de cada uno de los parámetros en el análisis final de propensión a inundaciones.

**Tabla 1.**  
Parámetros Calculados o Retirados del ArcGIS.

Parámetro	Valor
Área (km <sup>2</sup> )	24,650
Perímetro (km)	34,740
Longitud del Curso de Agua Principal (km)	13,483
Altitud Máxima del Curso de Agua Principal (m)	1080,95
Altitud Mínima del Curso de Agua Principal (m)	0,000
Tiempo de Concentración Medio (horas)	2,253
Índice de Gravelius (adimensional)	1,973
Índice de Alargamiento (adimensional)	10,141
Factor de Forma (adimensional)	0,136
Cantidades de Cursos de Agua (unidades)	2126
Relación de Bifurcación Media (adimensional)	4,531
Clasificación de Strahler (orden)	6,000

El primer parámetro a estudiar se refiere al área de la cuenca hidrográfica, que tiene un papel primordial en el análisis del volumen de agua drenado a la desembocadura, **¡Error! No se encuentra el origen de la referencia.**, donde pueden clasificarse como Muy grandes > 20 km<sup>2</sup>;

Grande > 10 km<sup>2</sup>; Mediano > 1 km<sup>2</sup> y Pequeño < 1 km<sup>2</sup> [37]. Por lo tanto, de acuerdo con la tabla anterior, la cuenca hidrográfica en estudio tiene una clasificación de “Muy Grande”, lo que también sugiere una mayor propensión a las inundaciones en relación a las cuencas hidrográficas más pequeñas. Tenga en cuenta que el parámetro de análisis de dimensión es arbitrario y puede variar según el tipo de análisis a realizar [37], así como la propensión a inundaciones.

En cuanto a la forma geométrica, la cuenca hidrográfica del arroyo Machico, **¡Error! No se encuentra el origen de la referencia.**, se presenta con valores de alargamiento promedio y, en consecuencia, propensión promedio a las inundaciones. Finalmente, en cuanto a la red de drenaje, **¡Error! No se encuentra el origen de la referencia.**, la cuenca hidrográfica tiene una gran cantidad de cursos de agua, lo que sugiere una alta densidad de agua (relación entre el número de cursos de agua y el área de la cuenca) y, en consecuencia, una alta propensión a las inundaciones. Debido a la moderada variación del alargamiento e hipsometría de la referida cuenca hidrográfica, Fig. IV, lo que significa que la relación entre la altitud y la longitud de la cuenca no es muy grande, por lo que la cuenca no presenta propensión a inundaciones.

Para el análisis de precipitaciones se utilizaron datos proporcionados por el Sistema Nacional de Información de Recursos Hídricos (SNIRH), con datos muestrales de dieciséis años, presentados en, **¡Error! No se encuentra el origen de la referencia.** y **¡Error! No se encuentra el origen de la referencia.** Con el tratamiento probabilístico de la Distribución de Gumbel, los valores presentados en la **¡Error! No se encuentra el origen de la referencia.**

**Tabla 2.**  
Parámetros Pluviométricos.

Parámetro	Símbolo	Valor
Precipitación Media (mm)	Pm	112.025
Desviación Estándar (mm)	S'	53.844
Factor de Frecuencia	Kt	3.136
Coefficiente de Repartición Temporal	k	0.259
Precipitación Diaria Máxima Anual Estimada (mm)	Pest	280.916
Intensidad de Precipitación (mm/h)	I	72.883

Con la determinación de la intensidad de precipitación esperada para un tiempo de recurrencia de 100 años y el uso de las metodologías explicadas anteriormente, se calcularon los caudales máximos de inundación, presentados en la **¡Error! No se encuentra el origen de la referencia.**, así como su media aritmética. Es evidente que el coeficiente de flujo superficial utilizado en el Método Racional corresponde a un valor de 0,70, es decir, se consideró una región con un índice urbano considerable donde el 70% del volumen precipitado se dirigirá, a la desembocadura, a través de flujos superficiales.

**Tabla 3.**  
Caudales de Punto de Inundaciones.

Metodología	Caudal (m <sup>3</sup> /s)
Forti	292.306
Pagliari	623.486
Racional	379.424
Giandotti	280.141
Mockus	379.090
Media	390.889

Posteriormente, se analizó la capacidad de drenaje de la desembocadura mediante la ecuación de Manning-Strickler y la verificación de la necesidad de implementar una cuenca de detención, obteniendo los valores indicados en la **¡Error! No se encuentra el origen de la referencia.** Dado que los muros y el cauce del río están revestidos con diferentes materiales y, en consecuencia, tienen diferentes coeficientes de rugosidad, se calculó el promedio ponderado para este parámetro, donde los muros son de mampostería de mortero de piedra en buen estado (n = 0.020) y el lecho es un Canal pedregoso con vegetación en mal estado (n = 0.040). La pendiente utilizada fue de 0,01 m / m, como una forma de aproximar lo más posible la reducción de pendiente presente en la desembocadura del arroyo.

**Tabla 4.**  
Verificación de la Necesidad de Implementación de la Cuenca de Detención.

Parámetro	Valor
Ancho de la Desembocadura (m)	24.000
Altura de la Desembocadura(m)	3.000
Capacidad de flujo de la desembocadura (m <sup>3</sup> /s)	358.512
Fill Rate Pre-Medida (%)	109

A través de la Tabla 4 Se verifica que el Fill Rate se encuentra por encima del límite preestablecido del 85%, siendo fundamental la implementación de medidas de mitigación. En primer lugar, el aliviadero de Cipoletti fue diseñado con el propósito de regular el flujo, para permitir que la desembocadura funcione dentro de sus límites de flujo. Las características del descargador se muestran en la Tabla 5.

**Tabla 5.**  
Implementación del descargador Cipoletti.

Parámetro	Valor
Anchura del umbral del descargador (m)	22.000
Altura de la hoja de agua del derrame (m)	3.000
Flujo de salida del descargador (m <sup>3</sup> / s)	212.627
Fill Rate Pos-Medida (%)	59

Luego, el diseño de las cuencas de detención se llevó a cabo utilizando el método holandés y HTS, como se mencionó anteriormente. Es importante destacar que ambas metodologías están simplificadas, es decir, tienden a desconocer una serie de factores y particularidades, que pueden presentar un sobredimensionamiento. Otro punto clave de este dimensionamiento se refiere a la opción de no cambiar la altura y ancho del arroyo, como una forma de reducir los impactos ambientales y urbanísticos debido a las obras de implementación de la medida. Por lo tanto, la única variable geométrica de la cuenca de detención será su longitud, por lo que es necesario que la longitud de la cuenca sea menor que la longitud total del curso de agua principal. Luego de realizar los cálculos, se obtuvieron los valores que se muestran en la Tabla 6.

**Tabla 6.**  
 Dimensionamiento de la cuenca de detención.

Parámetro	Valor
Ancho de la cuenca de detención (m)	24.000
Altura de la cuenca de detención (m)	3.000
Longitud de la cuenca de detención (m): holandés	20049.139
Longitud de la cuenca de detención (m) - HTS	9143.295

Finalmente, como una forma de sugerir otra medida de mitigación, se cambió el coeficiente de rugosidad de las paredes y el lecho, sin embargo, manteniendo la característica vegetativa del fondo del arroyo. Por tanto, los valores presentados en la Tabla 7 corresponden más precisamente a la mejora del estado de conservación del arroyo, con el fin de reducir la pérdida de capacidad de flujo por excesivo rozamiento del fluido con el material de recubrimiento.

**Tabla 7.**  
 Cambio en el coeficiente de rugosidad.

Parámetro	Valor
Coefficiente de rugosidad de la pared: Alterado	0.012
Coefficiente de rugosidad del lecho: Alterado	0.030
Capacidad de flujo por la desembocadura: Alterado (m <sup>3</sup> / s)	488.881
Fill Rate Pos-Alteración (%)	80

Los coeficientes de rugosidad alterados en los muros corresponden a una superficie con mortero de cemento en buen estado, mientras que en el lecho hay un revestimiento de vegetación pedregosa en buen estado, como se muestra en la Tabla I.

#### 4 Discusión

A priori, es fundamental presentar una serie de consideraciones admitidas en este estudio, ya que se trata de la aplicación de metodologías simplificadas y que presentarán valores que se verificaron con estudios complementarios y similares en los cuales se pudo hacer una comparación de los resultados extraídos.

1. Dado que no existe una metodología determinista que indique con precisión los parámetros hidrológicos y geomorfológicos de una cuenca hidrográfica, optamos por utilizar el promedio de varias metodologías o las metodologías más utilizadas a nivel global;
2. La estimación de la precipitación diaria máxima anual para la cuenca del río Machico se realizó a partir de la Distribución de Gumbel, utilizando el registro hidrométrico específico de la región;
3. El tiempo de recurrencia utilizado corresponde a 100 años, valor indicado para la ejecución de obras hidráulicas, con miras a mitigar fenómenos extremos;
4. No se consideró la capacidad de drenaje de las redes de drenaje existentes, ya que el estudio pretende simular su colapso total;
5. La ejecución del aliviadero se ubica cerca de la desembocadura, es decir, en los tramos finales donde la pendiente se reduce mucho y la capacidad de caudal se ve comprometida, además de ser el tramo que recibirá el mayor aporte de la cuenca hidrográfica y tendrá el índice de urbanización más alto;
6. Se consideró que el curso de agua principal tiene dimensiones constantes y una sección rectangular, aunque existen ensanchamientos en ciertos puntos, sirviendo también como margen de seguridad;
7. No se consideró el arrastre de partículas como rocas, arenas, arcillas o vegetación que pudieran depositarse aguas abajo y obstruir parte de la sección de flujo;
8. El estudio se presenta como una simulación de una situación de inundación extrema, con el fin de presentar argumentos hidrológicos y geomorfológicos que expliquen la razón de los desastres ocurridos en la región de estudio.

Como objetivo principal de este estudio, la sugerencia de una medida simplificada para mitigar los impactos de las crecidas aguas abajo, el dimensionamiento de la cuenca de detención para la cuenca hidrográfica del río Machico resultó ser efectivo para controlar el caudal en la desembocadura, donde el valor de la Tasa de llenado pasó de 109% a 59%, es decir, por debajo del límite preestablecido.

También es evidente que el propósito de este estudio es causar el menor impacto posible en el canal existente y su entorno. En este sentido, se decidió no cambiar las dimensiones de la sección transversal de los arroyos, tanto en ancho como en alto. Por lo tanto, la única variable dimensional de la cuenca de detención fue su longitud. Partiendo de esta premisa, el método holandés presentó un sobredimensionamiento considerable, ya que la longitud total de la cuenca de detención encontrada debe ser mayor que la longitud total del curso de agua principal, lo que denota la necesidad de cambiar uno más de los tramos de flujo, es decir, altura o ancho. Por tanto, a pesar de la

eficiencia en la regulación del caudal, el método holandés no era aplicable a las condiciones urbanas impuestas anteriormente.

Con respecto al método HTS, se impusieron las mismas condiciones, sin embargo, la metodología mostró aplicabilidad ya que la longitud total de la cuenca de detención es menor que la longitud total del curso de agua principal.

Esta disparidad entre los resultados obtenidos se puede explicar, teniendo en cuenta que el método holandés no considera el retraso y amortiguamiento del hidrograma de inundación, lo que conduce a un sobredimensionamiento de la estructura [38], como se muestra en la Fig. 3.

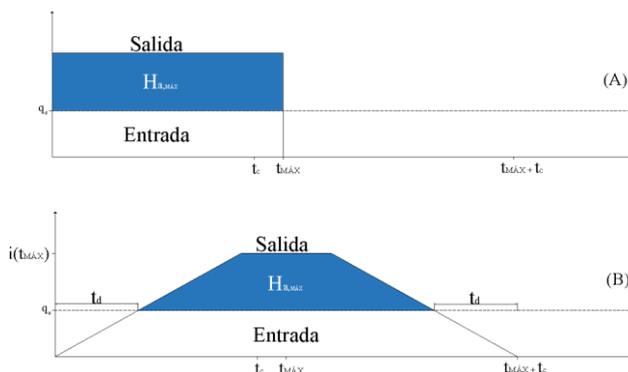


Figura 3. (A) Método holandés; (B) Método HTS.

Se observa que, en el método holandés, el almacenamiento comienza inmediatamente después de la precipitación, lo que no corresponde a la realidad, ya que el almacenamiento solo comenzará cuando el flujo aguas abajo de la cuenca hidrográfica sea mayor que la capacidad de flujo del aliviadero. Por lo tanto, luego de verificar la no aplicabilidad de esta metodología para este caso específico, se procedió al diseño utilizando el método HTS.

En cuanto al cambio en el coeficiente de rugosidad del arroyo, se decidió mantener la característica de vegetación en los cauces, ya que la remoción completa de la cubierta vegetal tendría que ser muy frecuente. Sin embargo, se considera que el lecho se mantiene en buen estado y con una vegetación menos densa de la que se encuentra actualmente. En cuanto a las paredes, el mantenimiento no debe ser constante ya que el desgaste por abrasión solo se produciría con la presencia de grandes volúmenes de agua con sedimentos de tamaño de partícula significativo.

El cambio en el coeficiente de rugosidad de los canales fue una medida eficaz para mitigar los efectos de las crecidas, donde la Tasa de Llenado se establece dentro del criterio previamente comentado - es decir, el caudal precipitado corresponde a menos del 85% de la capacidad de caudal de la boca. Se enfatiza que ambas metodologías aplicables, es decir, el método HTS y la alteración del coeficiente de rugosidad, se pueden trabajar juntas para reducir la longitud de la cuenca de detención optimizando la capacidad de flujo de la desembocadura.

Como se mencionó anteriormente, las metodologías utilizadas son de carácter simplificado, es decir, no consideran las particularidades locales. Debido a este hecho, las medidas suelen tener un margen de seguridad demasiado elevado, lo que provoca que las estructuras

hidráulicas en cuestión estén sobredimensionadas. Debido a la imposibilidad de explorar todos los aspectos que componen un análisis más completo y efectivo en este estudio, se pueden realizar otros estudios con el fin de complementar u optimizar los resultados aquí obtenidos, tales como: análisis de la capacidad de infiltración del suelo; análisis de la capacidad de drenaje del sistema hidráulico urbano implementado, con el fin de reducir el volumen de almacenamiento de las cuencas de detención; análisis de deposición de sedimentos; comprobar el deterioro de las paredes del canal por abrasión; análisis de la perspectiva del crecimiento urbano y su influencia en el aumento del caudal, etc.

Se realizó una comparación con trabajos similares a este, verificando los resultados y datos obtenidos en los cuales se llegaron a las conclusiones esperadas.

## 5 Conclusiones

Mediante el análisis morfométrico de la cuenca definir algunos parámetros que nos ayudan a determinar la ocurrencia de inundaciones de la cuenca. Estos valores están establecidos en la Tabla 1.

En el caso específico de la cuenca hidrográfica del municipio de Machico, podemos concluir que se trata de una cuenca con baja probabilidad de inundación, considerando todos los parámetros analizados.

Al ser el índice de Gravelius ( $K_c$ ) mayor a 1,128 se debe calcular el índice de alargamiento ( $K_L$ ) para determinar su forma y la probabilidad de ocurrencia de inundaciones.

El parámetro más evidente es el índice de alargamiento ( $K_L$ ) que, cuanto mayor sea, menor es la probabilidad de inundación, teniendo en cuenta que el tiempo de concentración en una cuenca alargada es mucho mayor que en una cuenca circular con la misma superficie. La cuenca hidrográfica en estudio tiene un índice de alargamiento alto, lo que demuestra exactamente lo mencionado anteriormente.

Esto junto con el valor bajo del factor de forma, indica que la cuenca de Machico tiene una baja probabilidad de ocurrencia de inundaciones debido a su forma larga.

## Apéndice

Tabla I.

Coefficiente de rugosidad de Manning-Strickler.

Naturaleza del Fondo	Muy Buena	Buena	Regular	Mala
Mampostería de piedra con mortero	0,017	0,020	0,025	0,030
Mampostería de piedra vestida	0,013	0,014	0,015	0,017
Mampostería de piedra seca	0,025	0,033	0,033	0,035
Albañilería	0,012	0,013	0,015	0,017
Canaletas metálicas lisas (semicirculares)	0,011	0,012	0,013	0,016

Canales de roca abiertos (irregulares)	0,035	0,040	0,045	-
Canales con fondo de tierra y talud con piedras	0,028	0,030	0,033	0,035
Canales con lecho rocoso y talud vegetado	0,025	0,030	0,035	0,040
Canales revestidos de hormigón	0,012	0,014	0,016	0,018
Canales de tierra (rectos y uniformes)	0,017	0,020	0,023	0,025
Canales dragados	0,025	0,028	0,030	0,033
Conductos de arcilla (drenaje)	0,011	0,012	0,014	0,017
Conductos de arcilla vidriada (alcantarillado)	0,011	0,013	0,015	0,017
Conductos de tablones de madera cepillada	0,010	0,012	0,013	0,014
Tejado	0,022	0,030	0,035	-
Superficies de mortero de cemento	0,011	0,012	0,013	0,015
Superficies de cemento alisado	0,010	0,011	0,012	0,013
Tubo de hierro fundido recubierto de alquitrán	0,011	0,012	0,013	-
Tubería de hierro fundido sin revestimiento	0,012	0,013	0,014	0,015
Tubos de bronce o vidrio	0,009	0,010	0,012	0,013
Tubos de hormigón	0,012	0,013	0,015	0,016
Tuberías de hierro galvanizado	0,013	0,014	0,015	0,017
Ríos y arroyos limpios, rectos y uniformes	0,025	0,028	0,030	0,033
Arroyos y ríos limpios, rectos y uniformes con rocas y vegetación	0,030	0,033	0,035	0,040
Arroyos y ríos limpios, rectos y uniformes con meandros y pozos	0,035	0,040	0,045	0,050
Márgenes de propagación c/ poca vegetación	0,050	0,060	0,070	0,080

Márgenes de propagación c/ mucho vegetación	0,075	0,100	0,125	0,150
---	-------	-------	-------	-------

Fuente: [39].

**Tabla II.**  
Coeficiente de flujo superficial.

Zonas Urbanísticas		Coeficiente de Flujo Superficial
Ocupación del Suelo		
Áreas Verdes	Césped sobre suelos arenosos	0,050 – 0,200
	Césped en suelos pesados	0,150 – 0,350
	Parques y cementerios	0,100 – 0,350
	Campos deportivos	0,200 – 0,350
Áreas Comerciales	Centro de la ciudad	0,700 – 0,950
	Periferia	0,500 – 0,700
Áreas Residenciales	Viviendas en el centro de la ciudad	0,300 – 0,500
	Viviendas en la periferia	0,250 – 0,400
	Edificios de apartamentos	0,500 – 0,700
Áreas Industriales	Industria dispersa	0,500 – 0,800
	Industria concentrada	0,600 – 0,900
Vías Férreas		0,200 – 0,400
Calles y caminos	Asfaltadas	0,700 – 0,900
	En hormigón	0,800 – 0,950
	En ladrillo	0,700 – 0,850

Fuente: [40].

**Tabla III.**  
Coeficiente de reducción de Giandotti.

A (km <sup>2</sup> )	$\lambda$	"C" equivalente
< 300	0,346	1,250
300 – 500	0,277	1,000
500 – 1000	0,197	0,710
1000 – 8000	0,100	0,360
8000 – 20000	0,076	0,270
20000 – 70000	0,055	0,200

Fuente: [41].

**Tabla IV.**  
Muestra de datos de precipitación.

n	Año	(mm)
1	1998/1999	48,000
2	1999/2000	61,000

3	2000/2001	160,000
4	2001/2002	90,000
5	2002/2003	68,900
6	2003/2004	65,000
7	2004/2005	111,000
8	2005/2006	105,000
9	2006/2007	87,700
10	2007/2008	79,400
11	2008/2009	137,200
12	2009/2010	193,000
13	2010/2011	162,200
14	2011/2012	43,200
15	2012/2013	217,700
16	2013/2014	163,100

Fuente: [41].

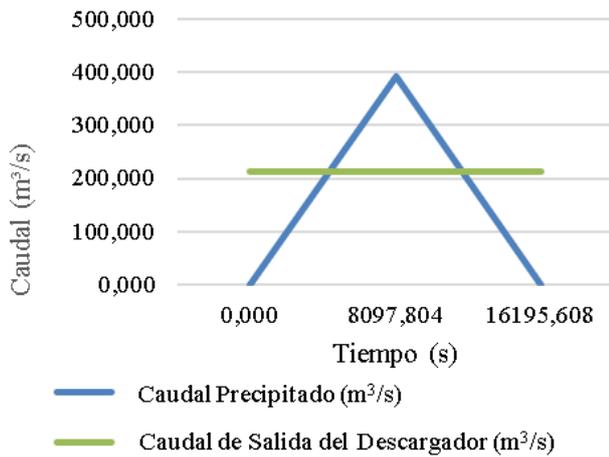


Figura I. Hidrograma triangular simplificado.

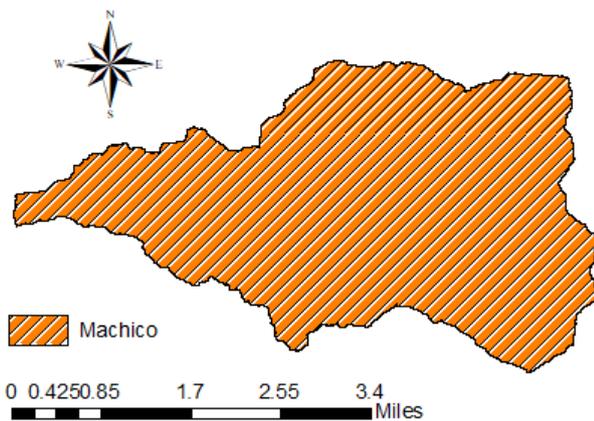


Figura II. Cuenca hidrográfica de la Ribeira de Machico.

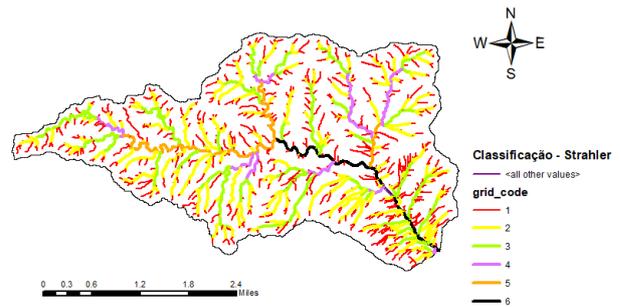


Figura III. Clasificación de Strahler.

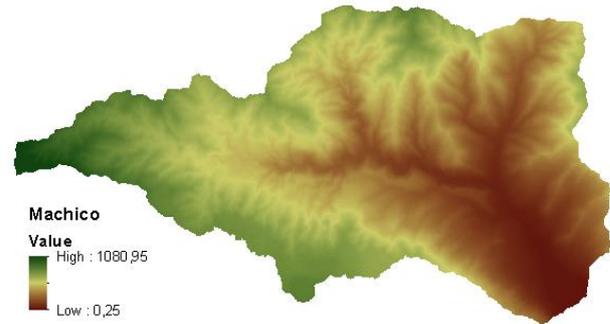


Figura IV. Cuenca hidrográfica de Machico.

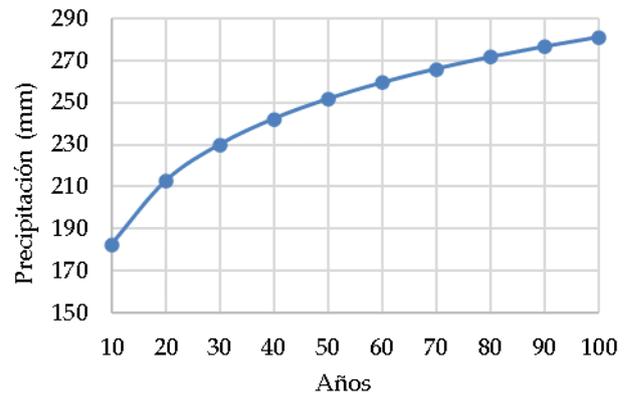


Figura V. Precipitación esperada para la cuenca del río Machico.

### Referencias bibliográficas, tablas y figuras

- [1] Tucci, C. E. M. Hidrologia: Ciência e Aplicação, Porto Alegre: UFRGS Editora, 1993.
- [2] Franco, E., Fill, H. Dimensionamento de bacias de detenção das águas pluviais com base no método racional. Tesis, Curso de Programa de Pós-graduação em Engenharia de Recursos Hídricos e Ambiental, Universidade Federal do Paraná, Curitiba, 2004.
- [3] Borrego, C., Lopes, M., Ribeiro, I., Carvalho, A. As alterações climáticas: uma realidade transformada em desafio. Debater a Europa, n.º 1, junho/dezembro, 2009, pp. 15-40.
- [4] Moreira, A., Ramos, M. Alterações climáticas e suas consequências: deslocamentos populacionais forçados. The Overarching Issues of the European Space. Rethinking Socioeconomic and Environmental Problems, Porto, 2016, pp. 203-219.
- [5] Gonçalves, L. B., Lousada, S. A. N., Cabezas, J. Análise teórico-prática da precisão dos descarregadores retangulares e triangulares: Otimização das simulações à escala para os caudais em bacias de detenção. Livro de Resumos, Universidade de Évora, 2019, ISBN: 978-972-778-134-8.
- [6] Camacho, R. F. Caracterização, Simulação (à escala) e Modelação do escoamento em Canais Artificiais. Aplicação a caso de estudo, Tesis, Departamento de Engenharia Civil e Geologia, Universidade da Madeira, Funchal, Portugal, 2015.
- [7] Freitas, M., Andrade, C. Alterações Climáticas e Impactos na Linha de Costa. XXIX Curso de Actualização de Professores em

- Geociências, Portugal, Centro Interdisciplinar de Estudos Educacionais, ESELx, Portugal, 2007, pp. 35-43.
- [8] EEA. Alterações climáticas e cheias fluviais na Europa. Agência Europeia do Ambiente 2005/01, Copenhagen. 2005.
- [9] Chow, V. T. (1956). Hydrologic Studies of Floods in the United States. *Inter. Assoc. Sci. Hydrol.*, n° 42, 1956, pp. 134-170.
- [10] Guedes, L. J. S. Riscos de Cheias e inundações. Estudo de um caso: Esposende, Portugal, Trabalho escrito no âmbito da disciplina da UC de Geologia Ambiental, UMinho, Portugal, 2014.
- [11] Barichivichi, J., Gloor, E., Peylin, P., Brienen, R., Schöngart, J., Espinoza, J., Pattanyak, K. Recent intensification of Amazon flooding extremes driven by strengthened Walker circulation, 2018.
- [12] Canholi, A. Drenagem Urbana e Controle de Enchentes. São Paulo: Oficina de Textos, 2005.
- [13] Caetano, C. Avaliação do risco de aluviões das ribeiras da ilha da Madeira, Tesis, Departamento de Engenharia Civil, Arquitetura e Georrecursos Mestre em Engenharia do Ambiente, Instituto Superior Técnico de Lisboa, Lisboa, Portugal, 2014.
- [14] Hough, M. *Naturaleza y ciudad: Planificación urbana y procesos ecológicos*, Barcelona: Gustavo Gilli, 1998.
- [15] Silva, C. S., Santiago, A. Urbanização e Inundação: Conflitos e Possibilidades. *Paisagem Ambiente*, n° 24, 2007, pp. 327-334.
- [16] Campana, N. A., Tucci, C. E. M. Estimativa de área impermeável de microbacias urbanas, *Caderno de Recursos Hídricos*, v.12, n° 2. 1994, pp. 79-94.
- [17] Warner, K., Hamza, M., Oliver-Smith, A., Renaud, F., Julca, A. Climate change, environmental degradation and migration. *Natural Hazards*, 55 (3), 2008, pp.689-715.
- [18] Tucci, C. E. M., Porto, R. L., Barros, M. T. Drenagem Urbana, Porto Alegre: UFRGS Editora, 1995, pp. 414.
- [19] Parkinson, J., Milograna, J., Campos, L. C., Campos, R. Drenagem urbana sustentável no Brasil, Goiânia: Universidade Federal de Goiás, Loughborough University, 2003.
- [20] Gonçalves, L. B., Lousada, S. A. N. Análise Probabilística de Cheias e o Uso de Bacias de Detenção como Medida Mitigadora: Aplicação à Bacia de Santa Luzia. *Revista Científica Monfragüe Desarrollo Resiliente*, Volumen XIII, ISSN, 2020, pp. 2340-5457, ISSN: 2340-5457.
- [21] Nakazone, L. M., Porto, R. L. L. Implantação de reservatórios de detenção em conjuntos habitacionais: a experiência da CDHU, Tesis, Escola Politécnica, Universidade de São Paulo, São Paulo, Brasil, 2005.
- [22] Reis, J. J. S. Estruturas de Correção Torrencial nas Ribeiras do Funchal – Açudes. Inventariação e análise comparativa. Tesis, Faculdade de Ciências Exatas e da Engenharia, Universidade da Madeira, Funchal, Portugal, 2015.
- [23] Fernandes, M. J. P. Riscos no Concelho da Ribeira Brava: Movimentos de vertente cheias rápidas e inundações, Tesis, Faculdade de Economia, Universidade de Coimbra, Coimbra, Portugal, 2009.
- [24] Prada, S., Gaspar, A., Sequeira, M. M., Nunes, A. Disponibilidades Hídricas na Ilha da Madeira. *AQUAMAC – Técnicas e métodos para a gestão sustentável da água na Macaronésia*, Tecnológico de Canarias, 2005, pp. 261-294.
- [25] Lousada, S. A. N. & Camacho, R. Hidrologia, recursos hídricos e ambiente - Aulas Teóricas. Vol. I, Universidade da Madeira, Portugal, 2018, p. 230, ISBN 978-989-8805-33-1.
- [26] Ferreira, C. W. & Lima, C. S. & Cavalcanti, L. C. S. & Santos, A. H. O. Caracterização morfométrica da bacia hidrográfica do açude Cachoeira II, no município de Serra Talhada – PE, Brasil, VI Seminário Latino Americano de Geografia Física. Universidade de Coimbra, 2010.
- [27] Christofolletti, A. *Geomorfologia*. São Paulo: Edgard Blücher, 1980.
- [28] Strahler A. N. Quantitative geomorphology of drainage basins and channel networks. Section 4 – II, in Chow, Ven Te, Maidment, D. R., Mays, L. W. (1988). *Applied Hydrology*, New York: McGraw-Hill, 1964.
- [29] Chow, V. T. *Applied Hydrology*. McGraw-Hill Series in Water Resources and Environmental Engineering. Chow, V. T., Maidment, D. R., Mays, L. W., IV Series.
- [30] Silveira, A. L., Louzada, J. A., Beltrame, L. Infiltração e Armazenamento no Solo. *Hidrologia: Ciência e Aplicação*. 2ª Edição, Porto Alegre: UFRGS Editora, 1993.
- [31] Guimarães, R. C. Capítulo 2 - Bacia Hidrográfica. In: Guimarães, R. C., Shahidian, S. e Rodrigues, C. M. (Editores). *Hidrologia Agrícola*, 2ª edição. ECT e ICAAM. Évora, 2017, pp. 5-22, ISBN: 978-989-8550-40-8.
- [32] Moura, A. D. S. Canais Artificiais e a sua Influência em Processos de Planeamento Urbano e Ordenamento Territorial. Tesis, Departamento de Engenharia Civil e Geologia, Universidade da Madeira, Funchal, Portugal, 2019.
- [33] Villela, S. M. & Mattos, A. *Hidrologia Aplicada*, São Paulo: Mc Graw Hill, 1975, p. 245.
- [34] Martins, M. F., Candido, G. A. Indicadores de Desenvolvimento Sustentável para Localidades: uma proposta metodológica de construção e análise, *Revista de Gestão Social e Ambiental*, 2012, ISSN: 1981-982X. DOI: 10.5773/rgsa.v6i1.229.
- [35] Justi Junior, J. & Andreoli, C. V. Uso de dados climáticos e hidrológicos como subsídio na determinação do regime de fluxo de canais de drenagem, *Revista Brasileira de Geomorfologia*, Vol. 16, n° 1, 2015, ISSN: 2236-5664.
- [36] Porto, R. L. & Filho, K. Z. & Tucci, C. E. M. & Bidone, F. Drenagem Urbana. *Hidrologia: Ciência e Aplicação*, 2ª Edição, Porto Alegre: UFRGS Editora, 1993.
- [37] Beck, H. E., Bruijnzeel, L. A., Van Dijk, A. I. J. M., McVicar, T. R., Scatena, F. N., Schellekens, J. The impact of forest regeneration on streamflow in 12 mesoscale humid tropical catchments. *Hydrol. Earth Syst. Sci.*, 17, 2013, pp. 2613-2635, DOI: 10.5194/hess-17-2613-2013.
- [38] David, L. M. & Carvalho, R. F. Bacias de Retenção para Controlo de Cheias: Reflexão sobre os métodos de dimensionamento, 13º Encontro Nacional de Saneamento Básico, 2008.
- [39] Gonçalves, J. Caracterização do coeficiente de rugosidade e seu efeito no escoamento em Canais Naturais. Simulação e Modelação (à escala) no laboratório de Hidráulica. Aplicação às ribeiras do Funchal, Tesis, Departamento de Engenharia Civil e Geologia, Universidade da Madeira, Funchal, Portugal, 2016.
- [40] Chow, V. *Handbook of Applied Hydrology*, New York: McGraw-Hill, 1964.
- [41] SNIRH. Sistema Nacional de Informação de Recursos Hídricos, [consulta, 20 de junio de 2020]. Available at: <https://snirh.apambiente.pt/index.php?idMain=2&idItem=1&objCover=920123704&objSite=920685506>