

Análisis Probabilístico De Inundaciones En Función De Los Drenajes Existentes En Vías De Primer Orden

Probabilistic Analysis Of Inundation In Function Of Existing Drainage On First Order Roads

Autores

Abdul Amin Awudu Micolta¹, Mary Deyanira Loayza Freire², Jesús Enrique Espinoza Correa³, Luis Ángel Vargas Collaguazo⁴

¹Ingeniero civil, Universidad Técnica de Machala, aawudu1@utmachala.edu.ec, <https://orcid.org/0009-0004-7782-2771>

²Ingeniero civil, Universidad Técnica de Machala, mloayza6@utmachala.edu.ec, <https://orcid.org/0009-0007-4108-6540>

³Ingeniero civil, Universidad Técnica de Machala, jespinoza@utmachala.edu.ec, <https://orcid.org/0000-0003-3859-0918>

⁴Ingeniero ambiental, Universidad Técnica de Machala, lvargas@utmachala.edu.ec, <https://orcid.org/0000-0001-7619-1323>

RESUMEN

La presente investigación se basa en el análisis de probabilidad de inundaciones, centrado en la capacidad hidráulica de los drenajes existentes en vías de primer orden, en la ciudad de Santa Rosa ubicada en Ecuador. La zona en donde se desarrolla el estudio tiene un historial de fuertes inundaciones, las cuales son consideradas como un evento meteorológico que puede llegar al nivel de un desastre natural en el caso más desfavorable, convirtiéndose en una gran amenaza en épocas de invierno. Es por ello que el objetivo del trabajo es evaluar el sistema de drenaje vial, mediante métodos de análisis hidrológicos e hidráulicos, para determinar la probabilidad de inundación a la que se ve expuesta la zona. Para llevar a cabo esta investigación se ha planteado una metodología que consta de tres partes: análisis hidrológico de la zona, análisis hidráulico de los drenajes y análisis probabilístico de inundaciones en función de las alcantarillas existentes en la vía de primer orden. Los resultados demuestran que el número de eventos posibles de inundación apunta a que la zona se inundará más de cinco veces en periodos de cinco años. En invierno de enero, febrero, marzo y junio, con los drenajes trabajando a toda su capacidad, la probabilidad de inundación es del 100%, lo que significa que el drenaje existente es incapaz de evacuar los caudales máximos hidrológicos. También se obtuvo en función de los caudales por periodos de retorno, que el drenaje puede soportar hasta 25 años trabajando a su máxima capacidad hidráulica.

Palabras claves: carretera, caudal, drenaje, hidráulica, hidrológico, inundación

ABSTRACT

This research is based on the analysis of the probability of flooding, focused on the hydraulic capacity of existing drainage in first order roads in the city of Santa Rosa, located in Ecuador. The area where the study is being carried out has a history of heavy flooding, which is considered a meteorological event that can reach the level of a natural disaster in the most unfavorable case, becoming a major threat in winter. Therefore, the objective of this work is to evaluate the road drainage system, by means of hydrological and hydraulic analysis methods, in order to determine the probability of flooding to which the area is exposed. In order to carry out this research, a methodology consisting of three parts has been proposed: hydrological analysis of the area, hydraulic analysis of the drains and probabilistic analysis of flooding based on the existing culverts in the first order road. The results show that the number of possible flood events suggests that the area will flood more than five times in five-year periods. In the winter of January, February, March and June, with the drains working at full capacity, the probability of flooding is 100%, which means that the existing drainage system is incapable of evacuating the maximum hydrological flows. It was also obtained, based on the return period flows, that the drainage can withstand up to 25 years working at its maximum hydraulic capacity.

Keywords: road, flow rate, drainage, hydraulics, hydrological, inundation

Nota Editorial: Recibido: Febrero 2024 Aceptado: Marzo 2024

1. INTRODUCCIÓN

A nivel mundial se han suscitado desastres naturales relacionados a inundaciones, por tal motivo se han empleado diferentes metodologías sobre riesgos de inundación en carreteras. En el año 2021, en un estudio realizado en Europa, sobre riesgos de inundación en carreteras, se usó una evaluación de riesgos utilizando un enfoque basado en cuadrículas, para poder determinar el nivel de daño en la infraestructura vial. En donde, se tomaron seis mapas ráster de inundación para periodos de retorno de 10, 25, 50, 100, 200 y 500 años. Como resultados, compararon con cuatro métodos diferentes, y obtuvieron que el daño vial por inundaciones puede ser del 5 % al 10 % y llegar hasta el 60 % en casos específicos [1].

Ecuador ha tenido muchos eventos naturales en los últimos 35 años, siendo las inundaciones y las fuertes lluvias responsables del 44 % de los daños más graves y destructivos. Estos episodios han generado daños significativos en la agricultura, aislamiento de comunidades, origen de epidemias y consecuencias socioeconómicas adversas. Estas inundaciones suelen tener su origen en diversos factores, como las precipitaciones estacionales, obstrucción de ríos, eventos meteorológicos extremos, rupturas de presas, sistemas de drenaje deficientes, entre otros [2].

Las inundaciones, son consideradas como un evento meteorológico y/o un desastre natural, el cual representa una gran amenaza, cuando se desarrolla la etapa invernal, según datos de la Organización de las Naciones Unidas para la Educación, la Ciencia y la Cultura UNESCO, de los desastres suscitados relacionados con el agua, el 50% corresponden a inundaciones [3]. Así que, analizar las inundaciones, se ha vuelto muy importante por el riesgo al que se encuentra expuesta la población, por eso se han generado con los años métodos de procesamiento informático y representación espacial, que permiten identificar metodologías óptimas para plasmar e interpretar las condiciones específicas de cada área de investigación [4]

Las fuertes precipitaciones, el desborde de ríos, y las inundaciones han sido fenómenos naturales recurrentes, que afecta a la estabilidad social, mientras más asentamientos haya en zonas vulnerables a inundaciones, más riesgo este involucra, por lo que más efectos negativos se presentaran. Estos efectos negativos, golpean directamente a la economía municipal ya que tienen que invertir más en construcción y reparación de obras de drenaje [5].

Por lo tanto, una solución a esta problemática es la evaluación de los sistemas de drenaje dado que esto se refiere a un proceso en el que se analiza el rendimiento y la eficacia de los sistemas, lo que conlleva medir indicadores y parámetros para evaluar la capacidad del sistema con el fin de gestionar la escorrentía del agua de lluvia y reducir los impactos negativos en el ámbito social y ambiental. En el año 2023 en Brasil se desarrolló un modelo de evaluación mediante la utilización de indicadores de fragilidad del sistema (IFS) y el proceso de jerarquía analítica (AHP), cuyo propósito es medir los parámetros de desempeño de los sistemas de drenaje urbano [6]. Además, la evaluación de los sistemas de drenaje implica evaluar la capacidad de un sistema para administrar de manera efectiva el escurrimiento de las aguas de lluvia [7] destacar que un drenaje vial se basa en un proceso de eliminar el exceso de agua de la superficie de una vía con el fin de prevenir la acumulación y daños. Este aspecto es muy importante en la infraestructura vial para garantizar la seguridad vial. En una investigación realizada en España, en donde se realizó un diagnóstico de sistemas de drenaje, menciona que los drenajes están diseñados para gestionar y controlar el flujo de aguas pluviales y residuales [8].

Al inspeccionar artículos científicos, se ha observado que se han empleado diferentes enfoques metodológicos en sus investigaciones, siendo uno de ellos un trabajo realizado en el 2018 en donde, estipulan que existen zonas urbanas, rurales o en la intemperie susceptibles a inundaciones, en donde, se evalúan redes de drenaje con un modelo de inundación 1D y 2D, para determinar la capacidad del sistema de drenaje, y se mezclaron datos computacionales de inundación, y se evalúan simulaciones de eventos de lluvia con diferentes periodos de retorno. Para los requisitos de datos en 1D, se utilizan subcuencas con sus respectivos parámetros hidrológicos, los parámetros para la caracterización de la subcuenca incluyen nodos de entrada, salida, pendiente del terreno, depósitos de depresión y características de infiltración del suelo. Las precipitaciones se aplicarán a su área con hietogramas para así describir los eventos considerando su intensidad, duración y frecuencia. Los datos por usar para el modelo 2D incluyen un modelo digital de elevación (DEM) [9].

En el año 2016 en un estudio realizado en Inglaterra, se usaron tres conjuntos de datos, nacionales sobre inundación, como el riesgo de inundaciones, mapas y áreas susceptibles a inundaciones por aguas subterráneas, como resultados, establecieron una serie de parámetros para calificar el riesgo de inundación y su afectación en la carretera, la evaluación depende del área local de frecuencia de inundación, de su gravedad y de la intersección de las carreteras, también determinaron que parte de los motivos de inundación, viene dado por la obstrucción de alcantarillas y llegaron a la conclusión de que es importante que se encuentren en constante mantenimiento. No obstante, para poder comprender la probabilidad por obstrucción, recomiendan realizar el modelado del drenaje hasta su fallo, usando los datos históricos sobre inundaciones, combinados con información sobre precipitaciones [10].

Por efectos del cambio climático, la zona baja del cantón Santa Rosa, resalta la vulnerabilidad a inundaciones en donde según el Plan de Ordenamiento Territorial del cantón, identifican alrededor de 23 zonas críticas. La zona noreste del cantón es en donde está la zona de estudio, ubicado en el margen del Río Santa Rosa es una zona definida de muy alto riesgo. Por lo que es prioritario la realización de estudios y evaluación, para la realización de obras de mitigación de los territorios vulnerables [11].

El presente trabajo tuvo como objetivo evaluar el sistema de drenaje vial, mediante métodos de análisis hidrológicos e hidráulicos, para determinar la probabilidad de inundación en la vía E25 Troncal de la Costa, comprendido entre la gasolinera La Victoria hasta el sector El Recreo.

2. DESARROLLO

En Ecuador, la región costera es susceptible a inundaciones, sobre todo por la existencia de extensas llanuras próximas a los ríos que tienden a inundarse frecuentemente. La acumulación de sedimentos y la presencia de comunidades asentadas en las zonas propensas a inundaciones aumentan de forma considerable la vulnerabilidad a eventos de esta naturaleza [2].

Según el servicio Nacional de Gestión de Riesgos y Emergencias, desde el comienzo del año hasta el 5 de junio de 2023, un total de 154 situaciones de riesgo se han producido en los 14 cantones de la provincia de El Oro por las intensas lluvias. Siendo el Cantón Santa Rosa uno de los más afectados, debido a las particularidades de la topografía de las cuencas hídricas, la intensidad de las precipitaciones, la concentración de las lluvias en intervalos breves y la influencia del fenómeno del Niño. Durante este año, en el cantón Santa Rosa se han registrado un total de 637 familias afectadas, 585 viviendas afectadas y 0,19 kilómetros lineales de vías afectadas, lo cual ha ocasionado pérdidas económicas significativas y la recurrencia de este acontecimiento conlleva consecuencias graves [12].

El presente trabajo de investigación tiene una parte documental, de campo e interpretación de resultados. A partir de los resultados obtenidos, por medio del método estadístico de distribución binomial se determinará la probabilidad de inundación en la zona de estudio. En la figura 1 se muestra la representación del tramo de la zona de estudio de la vía.



Figura 1: Tramo de la vía E25 Gasolinera la Victoria-Sector El Recreo Fuente: Los autores

En una investigación realizada en el 2023, señala que los estudios de probabilidad hidrológicos involucran el análisis de datos históricos con el fin de determinar la probabilidad de que ciertos eventos hidrológicos, como inundaciones, ocurran en el futuro [13]. Estos estudios abarcan análisis y técnicas usadas en la hidrología para comprender y analizar la variabilidad de eventos hidrológicos, como inundaciones, precipitaciones y caudales de ríos. El objetivo de los estudios de probabilidad hidrológicos es comprender la distribución, el flujo y la calidad del recurso hídrico, además de indagar las relaciones entre el agua y otros elementos del entorno natural. Estos estudios proporcionan información importante para diversos propósitos, como la gestión de recursos hídricos, observación ambiental y reducción de impactos de peligros naturales como inundaciones [14].

Análisis hidrológico de la zona de estudio:

Una cuenca hidrográfica se define como la zona de la superficie de la tierra donde todas las gotas de agua resultantes de una precipitación, al caer sobre ella, fluyen en una dirección común hacia un punto de salida particular. Por lo general, este punto de salida se encuentra a la menor elevación en toda la cuenca [15].

Para llevar a cabo el estudio referente a inundaciones, es importante recopilar los datos apropiados, que permitan obtener productos satisfactorios y reales. En la Escuela Superior Politécnica del Litoral (ESPOL), se realizó una investigación sobre inundaciones, y lo que postula, en primera instancia, es la recolección y procesamiento de datos, para el diagnóstico del sistema de drenaje. Tales como lo son, la utilización de programas informáticos como Google Earth y ArcMap, para poder obtener y procesar la topografía del terreno. Asimismo, sirve para delimitar las subcuencas y microcuencas, a través del software ArcMap se puede direccionar el flujo y conocer su acumulación. Para la determinación del tiempo de concentración se puede usar la ecuación de Kirpich y California [16] [17]. Para la obtención de datos se realizó modelación hidrológica y análisis probabilístico, que son fundamentales en este proyecto de investigación. Para la obtención de datos se realizó modelación hidrológica y análisis probabilístico, que son fundamentales en este proyecto de investigación.

Se procedió a obtener datos de precipitación máxima mensual de 22 años de registro mediante el satélite Giovanni, puesto que en la zona de estudio no existe una estación meteorológica.

Mediante el software ArcMap, se importó el modelo digital de elevación de 12,5x12,5 píxeles de tamaño de la página de la NASA para identificar los cauces y delinear las áreas de las microcuencas que contribuyen con el caudal en la zona de estudio. Este modelo digital de elevación requiere de un sistema de coordenadas UTM que incluye componentes horizontales y verticales, los cuales deben ser detallados en los metadatos [18].

Luego, se elaboró el cálculo de intensidad de lluvia para los siguientes períodos de retorno: 2; 5; 10; 25; 50; 100 y 500 años. Intensidad de lluvia se define como la cantidad de lluvia que cae en un punto, por el tiempo que dura la tormenta. La intensidad representa la cantidad de agua que ha caído, medida en milímetros por unidad de tiempo, la cual puede ser instantánea o promedio, considerando la duración completa de la lluvia [19]. Para determinar las intensidades de lluvia, se empleó la ecuación de Sherman mejorada por Bernard ecuación (1), la cual se presenta a continuación:

$$I = \frac{K \times (T)^m}{(tc)^n} \quad (1)$$

Donde:

I = Intensidad de lluvia (mm/H)

T = Período de retorno (años)

K = Término constante de regresión

m = Coeficiente de regresión

tc = Tiempo de concentración (min)

n = Reconocimiento de ubicaciones geográficas

Para delimitación de microcuencas se utilizó el software ArcMap versión 10,8 en la cual se obtuvo la caracterización hidrológica de cada una de las microcuencas, como su longitud máxima del cauce, la cual es la medida de la distancia más larga recorrida por las partículas de flujo, comprendida entre el punto más alto y el punto más bajo del cauce, además se determinó la pendiente de cada microcuenca, la cota máxima y mínima de cada microcuenca.

El tiempo de concentración es el tiempo que demora una gota de agua en llegar desde el punto más alto de una cuenca hasta el punto más bajo. Para este caso se emplearon dos ecuaciones con el fin de comprobar valores, la ecuación (2) es de Kirpich y la ecuación (3) es de California [16] [17], presentadas a continuación:

$$T_c = 0,000323 \times \left(\frac{L^{0,77}}{S^{0,385}} \right) \quad (2)$$

Donde:

T_c = Tiempo de concentración

L = Longitud del cauce principal (m)

S = Pendiente (m/m)

$$T_c = \left(\frac{0,87 \times L^3}{C_{Mc} - C_{mc}} \right)^{0,385} \quad (3)$$

Donde:

T_c = Tiempo de concentración

L = Longitud del cauce principal (m)

C_{Mc} = Cota máxima

C_{mc} = Cota mínima

Para el cálculo del coeficiente de escorrentía se identificaron áreas de uso de suelo de cada microcuenca, realizando el cálculo con coeficientes ponderados para cada área. Para este cálculo se usó las tablas de Ven Te Chow [20]. Posteriormente, para determinar el caudal hidrológico de cada microcuenca se utilizó el método racional utilizando la ecuación (4), dado que calcula el caudal máximo de aguas lluvias. La ecuación del método racional es la siguiente:

$$Q = \frac{C \times I \times A}{3.6} \quad (4)$$

Donde:

Q = Caudal (m^3/seg)

C = Coeficiente de escorrentía

I = Intensidad de precipitación (mm/h)

A = Área de aportación (Km^2)

Análisis hidráulico de alcantarillas:

Para el análisis hidráulico hay que calcular el caudal máximo de las alcantarillas. Se realizó la nivelación geométrica de la zona para obtener las cotas partiendo de una placa geodésica del Ministerio de Transporte y Obras Públicas con nomenclatura MR7H-21 con una altura geométrica de 4,043 m con coordenadas planas E: 615577,8366 N: 9620998,6481. Luego, se continuó con la medición de longitud de alcantarillas y el cálculo de pendientes, puesto que la nivelación se basa en la identificación de diferencias de elevación entre distintos puntos en una superficie de terreno. Además, se revisaron las estructuras de drenaje existentes en la zona para evaluar su condición, ubicación, capacidad con la que trabajan, tipo y dimensiones. Se consideró la trabajabilidad de las alcantarillas tomando en cuenta la posibilidad de obstrucción, haciendo que las alcantarillas operen en distintos porcentajes de su capacidad. También se usó el software de uso libre H canales, para comparar los resultados de caudales de las alcantarillas.

Posteriormente, se procedió a determinar los caudales hidráulicos de los ductos cajones a través de la ecuación para canales abiertos de Gauckler Manning [20] expresada a continuación en la ecuación (5).

$$Q = \frac{A \times R^{\frac{2}{3}} \times S^{\frac{1}{2}}}{n} \quad (5)$$

El radio hidráulico se obtiene de la relación entre el área y perímetro de las alcantarillas ecuación (6):

$$R = \frac{A}{P} \quad (6)$$

Donde:

$A = \text{Área Hidráulica (m}^2\text{)}$

$S = \text{Pendiente (m/m)}$

$R = \text{Radio Hidráulico (m)}$

$n = \text{Coeficiente de rugosidad}$

$P = \text{Perímetro Mojado}$

La fórmula de Manning se utiliza para calcular el flujo en ríos, utilizando como referencias los parámetros hidráulicos, como el radio hidráulico, la pendiente y el área hidráulicas [21].

El coeficiente de rugosidad (n) se seleccionó en base a la tabla del libro de Ven Te Chow [20], en el que se eligió a 0,014 puesto que las alcantarillas son de concreto sin pulir.

Análisis probabilístico: Obtenidos los caudales hidrológicos e hidráulicos, se realizaron los cálculos para el análisis probabilístico de inundación para determinar si las alcantarillas pueden o no soportar los caudales máximos hidrológicos de las microcuencas de estudio. A través del método de Distribución Binomial ecuación (7) se determinó la probabilidad de inundación. La ecuación es la siguiente:

$$P(x = a) = \binom{n}{a} P^a (1 - P)^{n-a} \quad (7)$$

Donde:

$P = \text{Probabilidad de éxito}$

$x = \text{Número de éxitos en las } n \text{ réplicas}$

$n = \text{Número de réplicas}$

La distribución binomial, funciona bien para muestras grandes y para eventos muy escasos. La aplicación de la distribución binomial presenta la probabilidad de que un posible evento ocurra, combinando diferentes variables aleatorias de manera independiente a lo largo del tiempo, lanzando un resultado concreto para cada una de las combinaciones de datos [22] [23].

Cabe recalcar que la distribución binomial es un modelo de probabilidad que se emplea cuando hay dos posibles resultados en cada prueba. Suele ser beneficioso en situaciones donde el resultado es de naturaleza dicotómica, es decir puede clasificarse como éxito o fracaso [24]. Según Sirbiladze et al.,2022 la distribución binomial se desarrolla tomando en cuenta una serie de ensayos independientes de Bernoulli, donde cada ensayo posee dos resultados posibles. Se puede calcular la probabilidad de lograr un número específico de éxitos en un número determinado de intentos, bajo la suposición de que la probabilidad de éxito es constante y que las pruebas son independientes [25]. La distribución binomial es una distribución de probabilidad reservada que describe la cantidad de éxitos en un número fijo de ensayos independientes de Bernoulli [26].

3. RESULTADOS

A continuación, se presentan los resultados de las tres partes planteadas en la metodología, correspondientes al análisis hidrológico de la zona, análisis hidráulico de los drenajes y probabilidades de inundación de la zona.

3.1. Análisis Hidrológico

Se realizó el proceso de trabajo con un modelo digital de elevación, en el software ArcMap para posteriormente reconocer las cuencas hidrográficas que inciden en la carretera. Y se obtuvo los siguientes resultados.

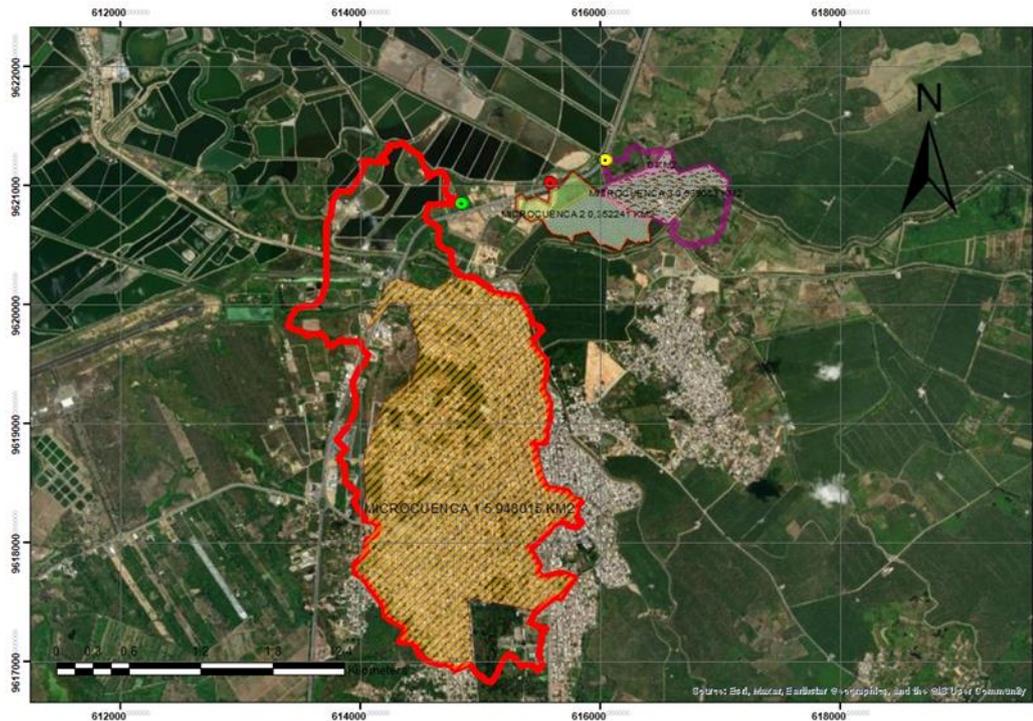


Figura 2: Áreas de Microcuencas de Tramo de la vía E25 Gasolinera la Victoria-Sector El Recreo
Fuente: Los autores

Luego de obtener las áreas de cada microcuenca se procedió a calcular el coeficiente de escorrentía de cada una como se observa en la Tabla 1, para lo cual se escogió los coeficientes de la tabla del autor Ven Te Chow [20] considerando que cada microcuenca tiene un área de uso de suelo de cultivos, vegetación ligera y área urbana. Con las curvas IDF se calcularon las intensidades de lluvia, con el fin de aplicar la ecuación del método racional. Se obtuvieron los siguientes resultados, detallados en la Tabla 2.

Tabla 1: Resultados de áreas totales y de uso de suelo de microcuencas

Microcuencas	Área total (km ²)	Área de cultivos (km ²)	Área de vegetación ligera (km ²)	Área urbana (km ²)
1	5,95	0	2,02	3,93
2	0,36	0,244	0,07	0,04464
3	0,54	0,29096	0,24904	0

Tabla 2: Resultados de tiempo de concentración y caudal máximo hidrológico de cada microcuenca, para cada periodo de retorno. (Método Racional)

MICROCUENCA	TC (MIN)	CAUDALES MÁXIMOS (m ³ /s)						
		PERIODO DE RETORNO (AÑOS)						
		2	5	10	25	50	100	500
1	125,99	49,51	60,91	72,37	89,80	106,51	126,47	180,09
2	22,31	5,00	6,01	7,18	9,19	11,09	13,53	20,85
3	26,81	5,79	6,40	7,77	10,04	12,35	15,28	24,37
TOTAL		60,30	73,32	87,32	109,03	129,95	155,28	225,31

Como se puede observar en la tabla 2, se han calculado los caudales máximos hidrológicos para cada periodo de retorno, de las tres microcuencas que intervienen en la zona de estudio. Se ha sumado el caudal de cada microcuenca para obtener un caudal total, porque se considera que, al presentarse precipitaciones, las microcuencas aportaran un caudal de forma simultánea.

El caudal es directamente proporcional al periodo de retorno y al tiempo de concentración, lo que significa que mientras mayor sea el periodo de retorno y tiempo de concentración, mayor será el caudal.

3.2. Análisis Hidráulico De Las Alcantarillas

Para la obtención de los caudales hidráulicos, se realizó un levantamiento visual de la carretera en donde se identificaron siete alcantarillas del tipo ducto cajón, en la zona de estudio. Los resultados obtenidos se detallan en la tabla 3.

Tabla 3: Resultados de caudal hidráulico de cada alcantarilla de la carretera.

Alcantarillas	Área (m ²)	Perímetro(m)	Radio hidráulico	Longitud(m)	Pendiente	N	Caudal(m ³ /s)
Ducto 0:	5,94	6,90	0,86	34,50	0,004638	0,014	26,15
Ducto 1:	5,86	6,88	0,85	36,20	0,003702	0,014	22,88
Ducto 2a:	3,57	5,39	0,66	68,38	0,000541	0,014	4,51
Ducto 2b:	3,57	5,39	0,66	68,38	0,000541	0,014	4,51
Ducto 3:	3,02	5,02	0,60	41,00	0,000927	0,014	4,68
Ducto 4:	3,49	5,35	0,65	41,00	0,000854	0,014	5,47
Ducto 5a:	5,95	6,98	0,85	30,00	0,000667	0,014	9,87
Ducto 5b:	5,95	6,98	0,85	30,00	0,000667	0,014	9,87
Ducto 6:	1,91	4,07	0,47	38,50	0,011247	0,014	8,74
TOTAL							96,68

En la tabla 3, las alcantarillas que tienen nomenclatura del mismo número con diferente letra, son ductos de doble sección, los cuales se eligió trabajar cada uno por separado. Se considera que todas las alcantarillas trabajaran de manera simultánea, por ello se realiza la suma total del caudal de cada ducto.

Por otra parte, se puede apreciar que se tiene secciones grandes, que evacuan caudales pequeños como es el caso de los ductos 5a y 5b, esto es porque tienen pendientes pequeñas, se puede verificar aquello observando los ductos 0 y 1, los cuales poseen menor sección en comparación a los ductos 5a y 5b, pero son capaces de conducir más caudal, y es gracias a que tienen mayor pendiente.

3.3. Análisis Probabilístico De Inundaciones

Una vez obtenidos los cálculos de caudales hidrológicos e hidráulicos, se procede a hacer uso de estos resultados, determinando la probabilidad de inundación en la zona, mediante el método estadístico de la distribución binomial.

Se presentará en la figura 3 la probabilidad de inundación por mes en la zona de estudio. Para las alcantarillas, se consideran porcentajes de obstrucción, por lo que sus secciones se varían en intervalos del 20%. En función de cada porcentaje de obstrucción se calculó la probabilidad de inundación para cada caso. Por otro lado, cabe mencionar que los escenarios de probabilidad de inundación presentados se realizaron a partir de datos pluviométricos convertidos en caudales mensuales.

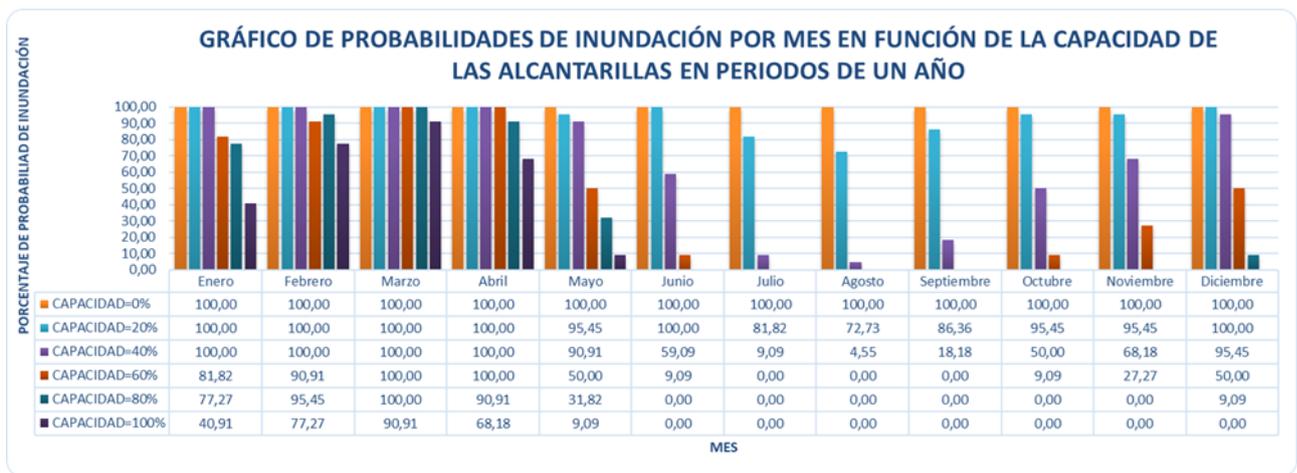


Figura 3: Análisis probabilístico de inundación por mes, en periodos de un año

Fuente: Los autores

En la figura 3 se muestran las probabilidades de eventos posibles que pueden darse cada año, según los resultados, en los meses de enero hasta abril, la probabilidad de inundación es del 100%, cuando las alcantarillas trabajan al 60% de su capacidad hidráulica. En mayo la probabilidad se reduce al 50 % trabajando a la misma capacidad mencionada. Desde junio hasta noviembre, cuando las alcantarillas trabajan al 80 %, la probabilidad de inundación es del 0 % y en diciembre sube al 9.09%, lo que significa que en esos meses el drenaje puede evacuar los caudales producidos por las precipitaciones, lo que no ocurre claramente en invierno.

A continuación, en la figura 4 se presentará la probabilidad de que un evento de inundación ocurra una vez en periodos de cinco años.

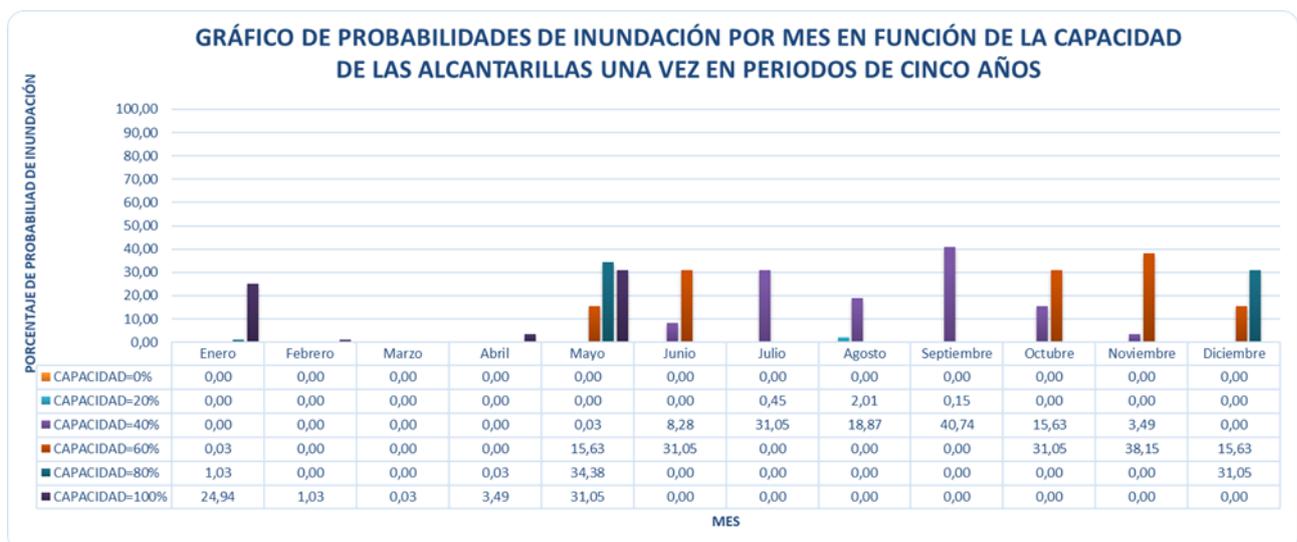


Figura 4: Análisis probabilístico de inundación por mes, una vez en periodos de cinco años Fuente: Los

autores

En la figura 4 se muestra que la probabilidad de inundación en los meses de invierno es casi nula a excepción de cuando las alcantarillas trabajan al 80 u 100%. Esto significa que las probabilidades no están sujetas a los caudales hidrológicos o hidráulicos, están directamente relacionados, con el número de inundaciones con respecto a muchos ensayos estadísticamente hablando. Las probabilidades de que se inunde una sola vez en cinco años son bajas, lo que significa que la zona se inundará más veces.

A continuación, en la figura 5 se mostrará la probabilidad de inundación dos veces en periodos de cinco años.

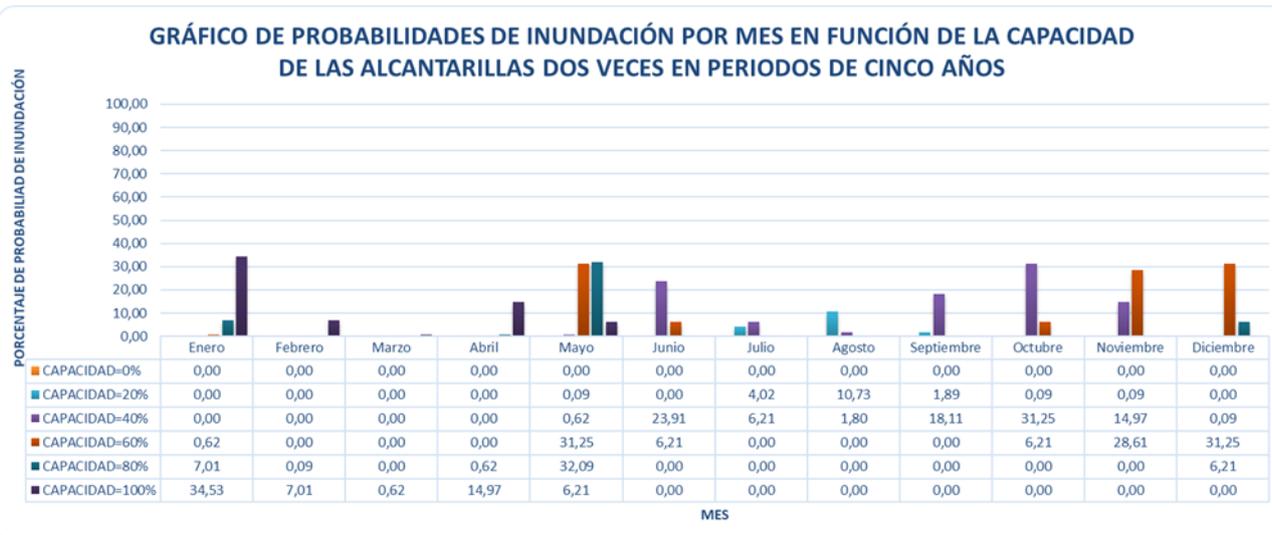


Figura 5: Análisis probabilístico de inundación por mes, dos veces en periodos de cinco año
Fuente: Los autores

En la figura 5, la probabilidad de que un evento de inundación ocurra dos veces en periodos de cinco años es baja, la máxima probabilidad ocurre en el mes de enero con el 34.53%, cuando la alcantarilla trabaja al 100% de su capacidad, el resto de los meses están por debajo de la probabilidad antes mencionada.

A continuación, en la figura 6 se mostrará la probabilidad de inundación tres veces en periodos de cinco años.

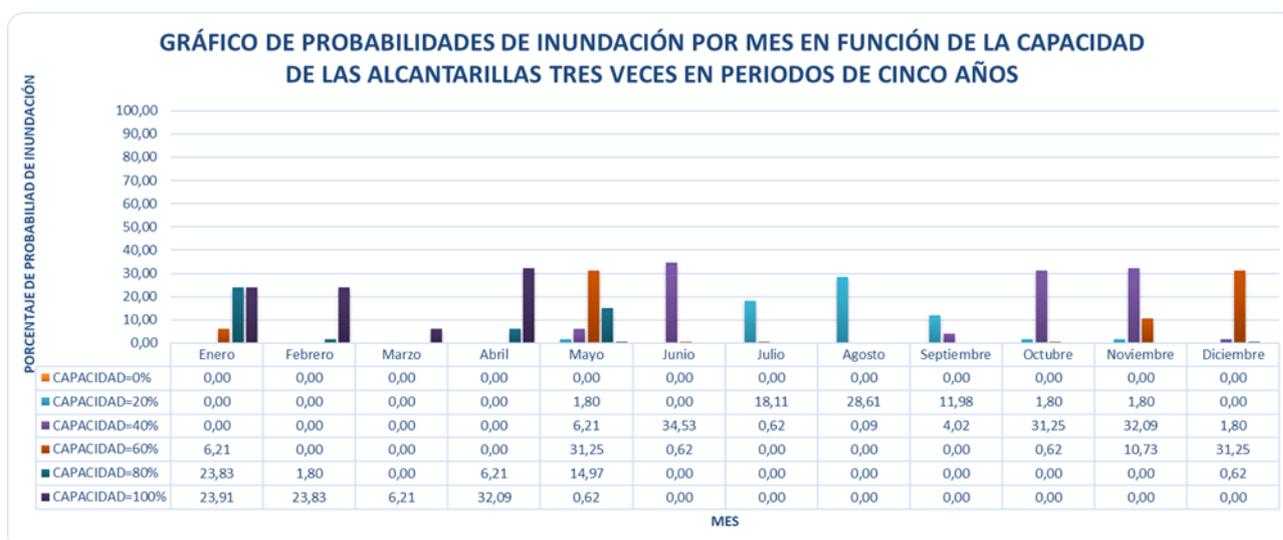


Figura 6: Análisis probabilístico de inundación por mes, tres veces en periodos de cinco años
Fuente: Los autores

En la figura 6 las probabilidades de inundación para tres veces en periodos de cinco años, es alta en los meses de abril a junio cuando las alcantarillas trabajan al 40 y 100% de su capacidad, fluctuando las probabilidades desde 6.21 a 32.09%, y en los meses de octubre a diciembre, la probabilidad más alta es de 31.25%.

A continuación, en la figura 7 se mostrará la probabilidad de inundación cuatro veces en periodos de cinco años. Donde se podrá observar como las probabilidades aumentan con respecto a las figuras 6, 5, 4 y 3.

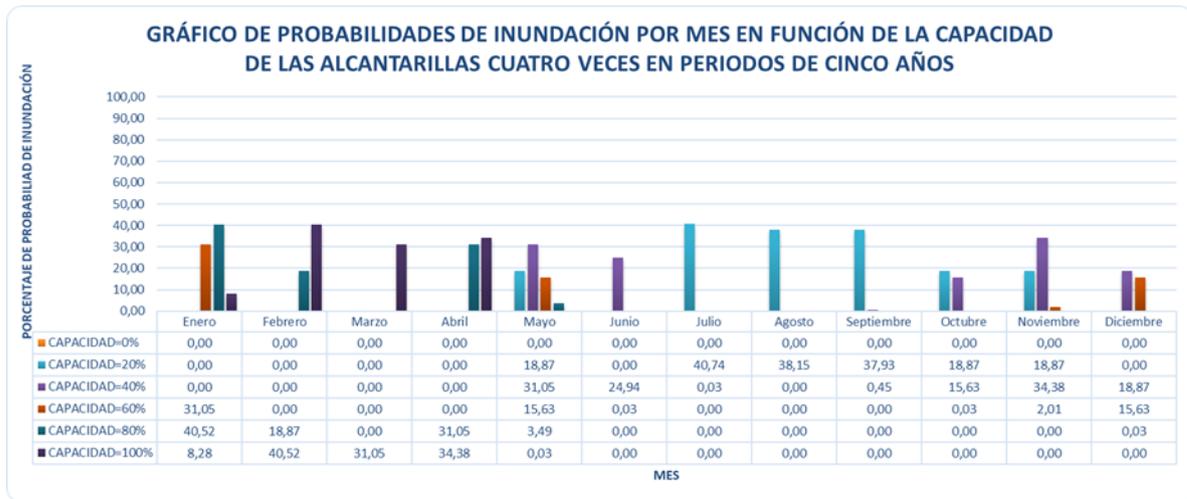


Figura 7: Análisis probabilístico de inundación por mes, cuatro veces en periodos de cinco años

Fuente: Los autores

En la figura 7 se observa el aumento de las probabilidades de inundación, lo que significa que los eventos de inundación son mayores a una vez en periodos de cinco años. Por otro lado, se observa que la probabilidad máxima es en julio con un 40,74 % cuando las alcantarillas trabajan al 20 %.

En la figura 8, se presentará las probabilidades de inundación cinco veces en periodos de cinco años, y se podrá tener una mejor perspectiva de los resultados obtenidos en las figuras 7, 6, 5, 4 y 3.

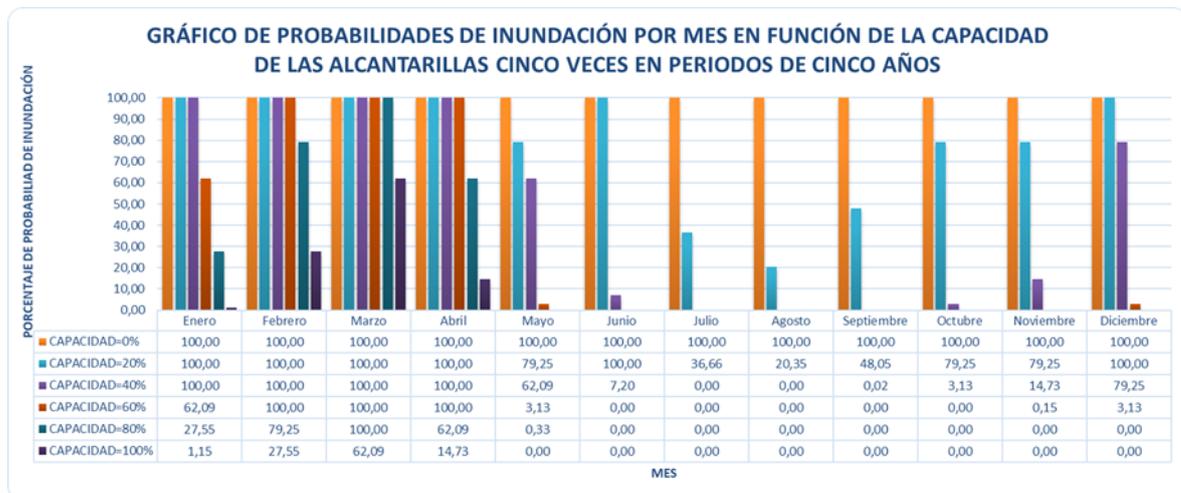


Figura 8: Análisis probabilístico de inundación por mes, cinco veces en periodos de cinco años

Fuente: Los autores

En la figura 8 las probabilidades de inundación en periodos de cinco años son altas y llegan al 100% para todos los meses si las alcantarillas trabajan al 0%. En los meses de invierno de enero hasta abril, las probabilidades de inundación son del 100% cuando las alcantarillas trabajan al 20% de su capacidad hidráulica. En los meses de mayo a diciembre la probabilidad de inundación es del 0% cuando el drenaje trabaja al 100% de su capacidad hidráulica. Según la figura 8 y según los resultados de las figuras 7, 6, 5, 4 y 3, se constata que la probabilidad de no inundación es muy baja, la tendencia apunta a que la zona se inundará más de cinco veces.

En la figura 9, se apreciarán las probabilidades de inundación según diferentes periodos de retorno, donde se relacionarán directamente los caudales hidrológicos e hidráulicos.



Figura 9: Análisis probabilístico de inundación por periodo de retorno

Fuente: Los autores

En la figura 9 se muestran que las alcantarillas podrían evacuar los caudales de manera eficiente hasta los 25 años, trabajando al 100% de su capacidad hidráulica. Después de los 25 años, existe probabilidad de inundación, aun si el drenaje trabaja al 100% de su capacidad, existe el riesgo. Por lo que, en términos generales, el drenaje no debería trabajar a menos del 80% de su capacidad, para los periodos de retorno de dos años, cinco años. Para periodos de 10 y 25 años el drenaje no puede bajar del 100% de su capacidad hidráulica.

4. CONCLUSIONES

Se ha propuesto una metodología para la evaluación de sistemas de drenaje vial, mediante métodos de análisis hidrológico e hidráulicos, y se ha determinado la probabilidad de inundación en la vía de primer orden, E25 Troncal de la Costa, ubicada en el cantón Santa Rosa. También se identificaron los métodos de análisis hidrológicos e hidráulicos, mediante una investigación bibliográfica, y se interpretaron los resultados obtenidos, con un método estadístico como la distribución binomial, para determinar probabilidades de inundación.

En base a los resultados, se ha podido observar que los caudales máximos hidrológicos para periodos de retorno de 10 años en adelante, son mayores a los caudales que las alcantarillas pueden soportar, en consecuencia, el drenaje no será capaz de evacuar la escorrentía superficial, y como resultado hay una alta probabilidad de que se den inundaciones.

En cuanto a, nivel de ocurrencia de que se produzca un solo evento de inundación en periodos de cinco años la probabilidad es baja, ya que, según los resultados en la zona de estudio el número de eventos de inundación será de cinco veces en adelante en periodos de cinco años por lo tanto en los meses de invierno, el drenaje no debe funcionar a menos del 80% de su capacidad hidráulica.

1. Van Ginkel Kees C.H., Dottori Francesco, Alfieri Lorenzo, Feyen Luc, y Koks Elco E., «Flood risk assessment of the European road network», *Natural Hazards and Earth System Sciences*, vol. 21, n.o 3, pp. 1011-1027, mar. 2021, doi: 10.5194/nhess-21-1011-2021.
2. A. I. Stefania Vallecilla-Ponce, W. José Méndez-Mata III, y D. I. Alfredo Delgado-Gutiérrez, «Retrospectiva de escenarios de inundaciones en la región costera de Ecuador: Una visión de sus impactos a escala local urbana», *Mayo Especial*, vol. 8, n.o 2, pp. 318-339, may 2022, doi: 10.23857/dc.v8i2.2757.
3. R. Ernesto Hernández-Uribe, H. Barrios-Piña, A. I. Ramírez, y A. para correspondencia Resumen Hernández-Uribe, «Análisis de riesgo por inundación: metodología y aplicación a la cuenca Atemajac», jun. 2017. doi: <https://doi.org/10.24850/j-tyca-2017-03-01>.
4. D. C. Diaconu, R. Costache, y M. C. Popa, «An overview of flood risk analysis methods», *Water (Switzerland)*, vol. 13, n.o 4, feb. 2021, doi: 10.3390/w13040474.
5. D. Svetlana, D. Radovan, y D. Ján, «The Economic Impact of Floods and their Importance in Different Regions of the World with Emphasis on Europe», *Procedia Economics and Finance*, vol. 34, pp. 649-655, 2015, doi: 10.1016/s2212-5671(15)01681-0.
6. R. F. S. Pereira, N. M. de Figueiredo, y L. C. C. Filho, «Performance evaluation of urban drainage systems: an analytic hierarchy process approach for the Jaracati basin in Brazil», *Acta Scientiarum - Technology*, vol. 45, 2023, doi: 10.4025/actascitechnol.v45i1.63176.
7. H. Rujner, G. Leonhardt, K. Flanagan, J. Marsalek, y M. Viklander, «Green infrastructure drainage of a commercial plaza without directly connected impervious areas: a case study», *Water Science and Technology*, vol. 86, n.o 11, pp. 2777-2793, dic. 2022, doi: 10.2166/wst.2022.381.
8. I. Andrés-Doménech, J. Anta, S. Perales-Momparler, y J. Rodríguez-Hernandez, «Sustainable Urban Drainage Systems in Spain: A Diagnosis», *Sustainability*, vol. 13, n.o 5, p. 2791, mar. 2021, doi: 10.3390/su13052791.
9. C. Martínez, A. Sanchez, B. Toloh, y Z. Vojinovic, «Multi-objective Evaluation of Urban Drainage Networks Using a 1D/2D Flood Inundation Model», *Water Resources Management*, vol. 32, n.o 13, pp. 4329-4343, oct. 2018, doi: 10.1007/s11269-018-2054-x.
10. Hankin Barry, Craigen Iain, Rogers Will, Morphet Joanne, Bailey Andy, y Whitehead Michael, «Flood Risk to the Strategic Road Network in England», nov. 2016. doi: <https://doi.org/10.1051/e3sconf/20160710001>.
11. «PDOT SANTA ROSA 2019-2023».
12. «Unidad de Monitoreo de Eventos Adversos».
13. K. B. Almheiri, R. Rustum, G. Wright, y A. J. Adeloye, «A Review of Hydrological Studies in the United Arab Emirates», *Water (Switzerland)*, vol. 15, n.o 10. MDPI, 1 de mayo de 2023. doi: 10.3390/w15101850.
14. T. M. Maksimovskaya, «Hydrological studies of Zelenetskaya Bay in the summer of 2021», *Transactions of the Kola Science Centre. Series: Natural Sciences and Humanities*, vol. 2, n.o 3/2023, pp. 45-50, jun. 2023, doi: 10.37614/2949-1185.2023.2.3.006.
15. M. Ramón, G. Blanquer, y J. MI, «Morfología de las cuencas hidrográficas».
16. B. Merchán-Sanmartín et al., «Stormwater Sewerage Masterplan for Flood Control Applied to a University Campus», *Smart Cities*, vol. 6, n.o 3, pp. 1279-1302, may 2023, doi: 10.3390/smartcities6030062.
17. D. Matamoros, M. Arias-Hidalgo, M. del Pilar Cornejo-Rodriguez, y M. J. Borbor-Cordova, «Hydrodynamic analysis of a stormwater system, under data scarcity, for decision-making process: The duran case study (Ecuador)», *Sustainability (Switzerland)*, vol. 12, n.o 24, pp. 1-16, dic. 2020, doi: 10.3390/su122410541.
18. P. L. Guth et al., «Digital elevation models: Terminology and definitions», *Remote Sens (Basel)*, vol. 13, n.o 18, sep. 2021, doi: 10.3390/rs13183581.
19. E. Ing Wilmer Guachamín Ing Fernando García Ing Miguel Arteaga Blgo Jorge Cadena, «DETERMINACIÓN DE ECUACIONES PARA EL CÁLCULO DE INTENSIDADES MÁXIMAS DE PRECIPITACIÓN INSTITUTO NACIONAL DE METEOROLOGIA E HIDROLOGIA EQUIPO TÉCNICO 2015 DETERMINACIÓN DE ECUACIONES PARA EL CÁLCULO DE INTENSIDADES MÁXIMAS DE PRECIPITACIÓN Contenido», 2015.

20. Ven te Chow, «Hidraulica de canales abiertos-Ven te Chow», 1994.
21. A. Díaz-Salas, E. Guevara-Pérez, y J. Rosales-Cueva, «Modelo de estimación del coeficiente de rugosidad de Manning en función de la granulometría en el río Santa, sector Recuay – Carhuaz, Áncash, Perú», *Revista Ingeniería UC*, vol. 27, n.o 3, pp. 328-342, dic. 2020, doi: 10.54139/revinguc.v27i3.292.
22. Alvarado Hugo y Batanero Carmen, «SIGNIFICADO DEL TEOREMA CENTRAL DEL LIMITE EN TEXTOS UNIVERSITARIOS DE PROBABILIDAD Y ESTADÍSTICA», *Estudios pedagógicos (Valdivia)*, vol. 34, n.o 2, pp. 7-28, 2008, doi: 10.4067/S0718-07052008000200001.
23. A. Navarro, F. Utzet, / P Puig, / J Caminal, y / M Martín, «ORIGINALES BREVES La distribución binomial negativa frente a la de Poisson en el análisis de fenómenos recurrentes», 2001.
24. M. Aashna, «A SHORT REVIEW ON BINOMIAL DISTRIBUTION», Mohali, Punjab, jul. 2021. doi: <https://www.doi.org/10.51201/JUSST/21/07231>.
25. G. Sirbiladze, J. Kacprzyk, T. Manjafarashvili, B. Midodashvili, y B. Matsaberidze, «New Fuzzy Extensions on Binomial Distribution», *Axioms*, vol. 11, n.o 5, may 2022, doi: 10.3390/axioms11050220.
26. Z. Amry y S. Nadia Amalia, «Minimax Estimator on Binomial Distribution», *SCIREA Journal of Mathematics*, jul. 2022, doi: 10.54647/mathematics11340.