

**INFORME DE ANÁLISIS HIDROLÓGICO DE LA ESTACIÓN
PARAGUACHON – 15087080 EN EL MUNICIPIO DE MAICAO
DEPARTAMENTO DE LA GUAJIRA.**

**PROYECTO: MANTENIMIENTO DEL CANAL CALLE 22 CARRERA
1A BARRIO JARI FUMINAYA Y CRISTO VIVE DEL MUNICIPIO DE
MAICAO, LA GUAJIRA**



**ELABORADO POR: ING. YASIR JESUS PATIÑO ECHEVERRIA
T.P. 44202-343453 GJA**

Maicao, La Guajira

TABLA DE CONTENIDO

INTRODUCCIÓN	5
GENERALIDADES DEL MUNICIPIO DE MAICAO.	6
FUENTES DE INFORMACIÓN	7
INFORMACIÓN CLIMATOLÓGICA.	8
TEMPERATURA.	9
BRILLO SOLAR	14
HUMEDAD RELATIVA	18
PRECIPITACIÓN.....	19
ESTIMACIÓN DE LOS PERIODOS DE RETORNO PARA LLUVIAS MÁXIMAS .	23
SERIE DE LLUVIAS MÁXIMAS EN LAS ESTACIONES METEOROLÓGICAS	24
PERIODO DE RETORNO DEL AGUACERO DE DISEÑO.....	25
DISTRIBUCIÓN NORMAL	27
DISTRIBUCIÓN LOG NORMAL.....	27
DISTRIBUCIÓN ESTÁNDAR PEARSON TIPO III.....	28
DISTRIBUCIÓN GUMBEL	29
DETERMINACIÓN DE LAS CRECIENTES CON DIFERENTES PERIODOS DE RETORNO.....	32
TIPO DE SUELO HIDROLÓGICO.....	39
COMBINACIONES HIDROLÓGICAS DE SUELO Y VEGETACIÓN.....	41
CONDICIONES DE HUMEDAD ANTECEDENTE A LA LLUVIA DE DISEÑO ..	41
DETERMINACIÓN DE LA LLUVIA EFECTIVA.....	42
HIDROGRAMAS OBTENIDOS DE LAS CRECIENTES ANALIZADAS.	49
ESTUDIO HIDRÁULICO.	52
RESULTADOS DE LA MODELACIÓN.	56
CONCLUSIONES	65
REFERENCIAS	67

LISTA DE FIGURAS.

Figura 1. Ubicación del municipio de Maicao.	6
Figura 2. Vista del módulo de consulta de datos hidrometeorológica IDEAM.	7
Figura 3. Estaciones meteorológicas utilizadas para el análisis climatológico.	9
Figura 4. Grafica de las series de temperaturas máximas, medias y mínimas multianuales.....	10
Figura 5. Histogramas de temperaturas A. Máximas B. Media C. Mínima.....	11
Figura 6. Box Plot de las series de temperaturas A. Máximas B. Medias C. Mínimas.	13
Figura 7. Temperaturas máximas, medias y mínimas mensuales multianuales. ...	14
Figura 8. Serie de datos de brillo solar.	15
Figura 9. Histograma de brillo solar.....	15
Figura 10 Box Plot de la serie de brillo solar.	16
Figura 11.Brillo solar medio mensual multianual.	17
Figura 12. Serie de datos de humedad relativa.	18
Figura 13. Serie de precipitación total.	20
Figura 14. Histograma de la serie de precipitaciones.	21
Figura 15. Box Plot de la serie de precipitaciones.....	22
Figura 16. Precipitación total promedio mensual multianual.....	22
Figura 17. Polígonos de Thiessen para estaciones meteorológicas activas.	23
Figura 18. Ajuste de distribuciones de precipitaciones máximas.....	30
Figura 19. Curva de distribución de aguacero seleccionado	37
Figura 20. Grafica para determinar el valor de la escorrentía directa utilizando el número de curva CN.	39
Figura 21. Hidrograma de la creciente con un periodo de retorno de 5 años	49
Figura 22. Hidrograma de la creciente con un periodo de retorno de 10 años	50
Figura 23. Hidrograma de la creciente con un periodo de retorno de 25 años	50
Figura 24. Hidrograma de la creciente con un periodo de retorno de 50 años	51
Figura 25. Hidrograma de la creciente con un periodo de retorno de 100 años ...	51
Figura 26. Perfil longitudinal del canal modelado.	64

LISTA DE TABLAS

Tabla 1. Estaciones meteorológicas utilizadas para el análisis climatológico.	8
Tabla 2. Resumen numérico de las serie de temperaturas mensuales multianuales.	12
Tabla 3. Resumen numérico de la serie de brillo solar mensual multianual.	16
Tabla 4. Resumen numérico de la serie de humedad relativa promedio anual.	19
Tabla 5. Resumen numérico de la serie de precipitación.	21
Tabla 6. Serie de lluvias máximas en 24 horas de la estación Paraguachon.	24
Tabla 7. Criterio para seleccionar el periodo de retorno de diseño.	26
Tabla 8. Valores de periodos de retorno con diferentes distribuciones.	30
Tabla 9. Precipitaciones máximas en 24 horas con diferentes periodos de retorno de la distribución seleccionada	31
Tabla 10. Lluvia en mm para los periodos de retorno ajustados a la cuenca.	36
Tabla 11. Distribución temporal de la lluvia adoptada	37
Tabla 12. Determinación de la cobertura.	38
Tabla 13. Condiciones de humedad antecedente a la lluvia de diseño	41
Tabla 14. Selección del valor CN” considerando diferentes combinaciones hidrológicas de suelo y vegetación.	42
Tabla 15. Valores de CN para diferentes condiciones de humedad antecedente.	43
Tabla 16. Determinación del cubrimiento vegetal y del valor CN en la cuenca.	44
Tabla 17. Calculo de tiempo de concentración.	46
Tabla 18. Resumen de los tiempo calculados.	47
Tabla 19. Resumen de los valores de crecientes para los periodos de retorno seleccionados	49
Tabla 20 Características geométricas e hidráulicas del canal para periodos de retorno de 5, 10, 25, 50 y 100 años.	56

INTRODUCCIÓN

En el medio ambiente ocurren diversos fenómenos atmosféricos de tipo hidrológico que regulan los distintos procesos naturales que tienen lugar día a día en la naturaleza. Dentro de estos se encuentra las precipitaciones, que puede darse en forma de lluvia, granizo o nieve. Este tipo de eventos climatológico está incluido dentro los factores a tener en cuenta dentro de la gestión de riesgo, debido a la posibilidad de propiciar inundaciones, movimientos en masa, entre otros sucesos extremos a los cuales se encuentran expuestos los seres humanos, para lo cual se utilizan diversos métodos de predicción de eventos climatológicos con el fin de disminuir la vulnerabilidad frente a estos.

En busca de predecir el tiempo en el que los eventos anteriormente mencionados puedan volver a ocurrir, se utiliza el análisis de probabilidad llamado Periodo de Retorno, que permite determinar la posibilidad de que ocurra un evento extremo. para ello se usan de datos históricos tomados por las diferentes estaciones meteorológicas que tenga cobertura dentro del área de estudio y, de esta manera se puede predecir la frecuencia con la que puede presentar el evento extremo.

El siguiente informe contiene el análisis hidrológico de la estación meteorológica PARAGUACHON [15087080] a través del estudio de la información climatológica disponible del INSTITUTO DE HIDROLOGÍA, METEOROLOGÍA Y ESTUDIOS AMBIENTALES (IDEAM), el cual sirve como insumo para la determinación de las herramientas y elementos a desarrollar en el marco del proyecto MANTENIMIENTO DEL CANAL CALLE 22 CARRERA 1A BARRIO JARI FUMINAYA Y CRISTO VIVE DEL MUNICIPIO DE MAICAO, LA GUAJIRA.

GENERALIDADES DEL MUNICIPIO DE MAICAO.

El Municipio de Maicao se encuentra ubicado en el Centro – Este del departamento de La Guajira, cuenta con una superficie de 1.825 Km² y tiene una altura media de 25 m.s.n.m. el municipio es conocido como la Vitrina comercial de Colombia y cuenta con un aproximado de 162.000 habitantes de los cuales 111.000 se encuentran en la zona urbana.



Figura 1. Ubicación del municipio de Maicao.

Fuente: (Wikipedia, 2011)

FUENTES DE INFORMACIÓN

La fuente principal de información para este estudio fue la información hidrometeorológica, disponible en la plataforma de consulta y descarga del Instituto de Hidrología, Meteorología y Estudios Ambientales IDEAM a cerca de los diferentes factores climáticos (temperatura, brillo solar, precipitación y humedad relativa) medidos por las estaciones meteorológicas disponibles en el municipio de Maicao.

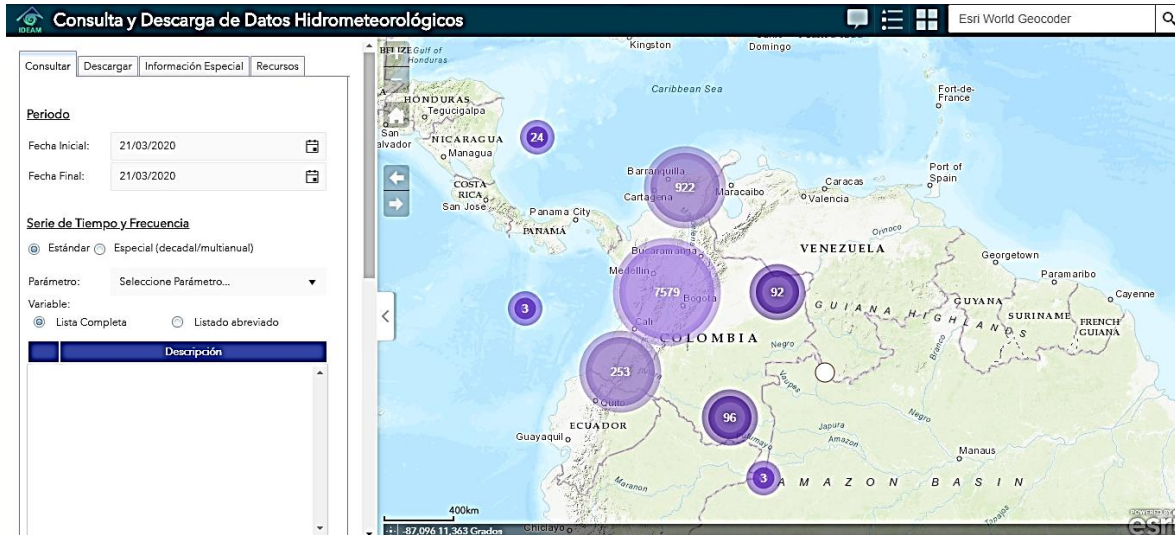


Figura 2. Vista del módulo de consulta de datos hidrometeorológica IDEAM.

Fuente: IDEAM

INFORMACIÓN CLIMATOLÓGICA.

Los análisis climatológicos del presente estudio están direccionados a definir los datos de precipitaciones, temperatura, brillo solar y humedad relativa. Esta información, tiene como objetivo caracterizar en una serie temporal el comportamiento de estas variables climáticas, las cuales resultan de importancia al momento de definir el tipo de obras que se puedan realizar en el marco de un proyecto y brindar una caracterización de toda la zona de interés del mismo.

Es importante resaltar que para el análisis de las condiciones climáticas fueron utilizadas las estaciones que de la Escuela Agrícola Carraipia y la estación Paraguachon, cuyas características se presentan a continuación dado que estas estaciones fueron las que cumplieron en términos de cantidad y calidad de datos con los requerimientos para la descripción y cubrimiento espacial del territorio.

Tabla 1. Estaciones meteorológicas utilizadas para el análisis climatológico.

CÓDIGO	15085030	15087080
NOMBRE	ESCUELA AGRÍCOLA CARRAIPIA	PARAGUACHON
CATEGORÍA	Climática Ordinaria	Limnigráfica
TECNOLOGÍA	Automática con Telemetría	Convencional
ESTADO	Activa	Activa
FECHA DE INSTALACIÓN	14/10/1968	15/02/1989
LATITUD	11,21675	11,360139
LONGITUD	-72,359944	-72,132444
ALTITUD	118	35

Fuente: IDEAM

El análisis de la serie de datos comprende tres etapas principales, la representación gráfica, el resumen numérico y el análisis exploratorio, estas con el objetivo de obtener una aproximación del comportamiento de las series en el tiempo.

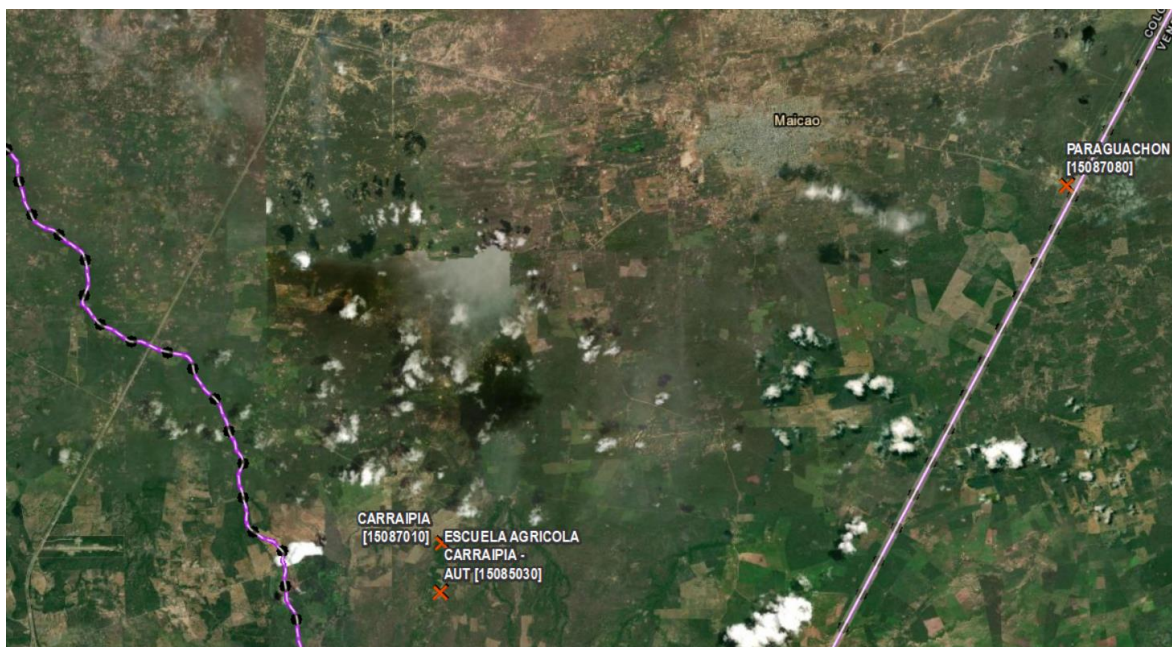


Figura 3. Estaciones meteorológicas utilizadas para el análisis climatológico.

Fuente: IDEAM

TEMPERATURA.

La temperatura es una propiedad física que hace referencia a la presencia o ausencia de calor. Es una de las magnitudes más utilizadas para describir el estado de la Atmósfera; este parámetro varía entre el día y la noche, de una estación a otra y dependiendo de la ubicación geográfica. Se mide en diferentes escalas ya sea Fahrenheit, Celsius o Kelvin.

Realizando un análisis temporal, el comportamiento de la temperatura se obtuvo mediante la serie de los datos obtenidos de las estaciones, cuyos registros se encuentran presentados en una temporalidad que supera los 20 años de registros.

A continuación, se presentan las gráficas y los histogramas de las series de temperaturas máximas, medias y mínimas.

SERIES DE TEMPERATURAS AÑO 2000-2021

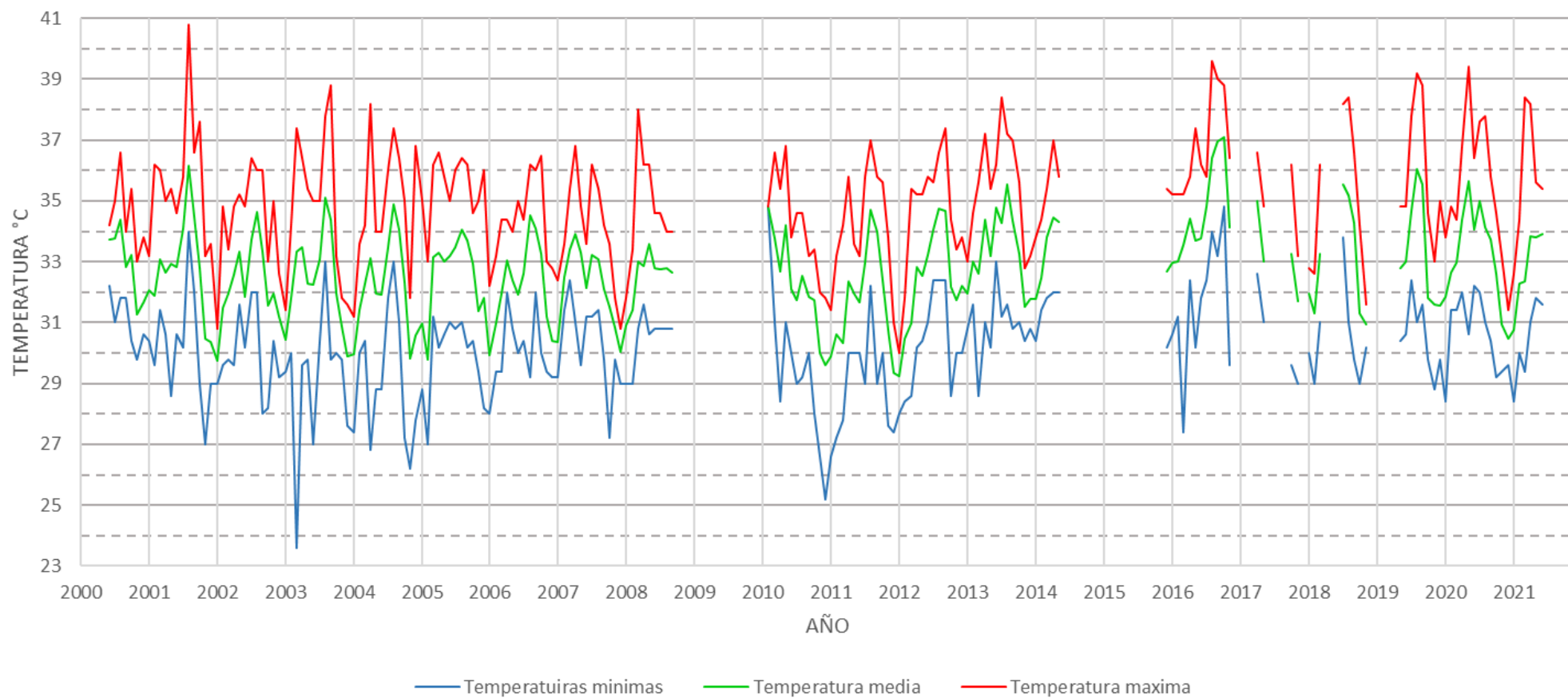
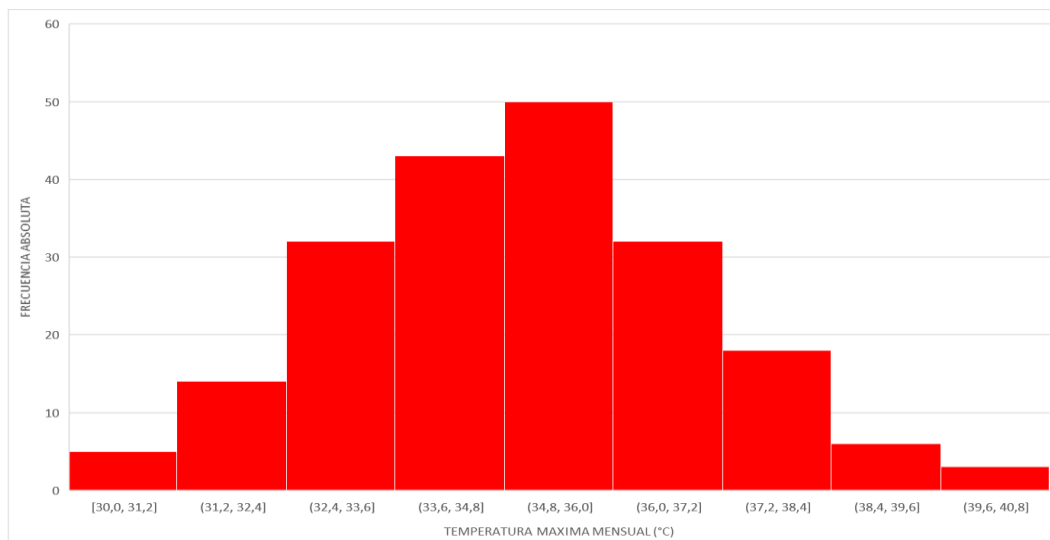


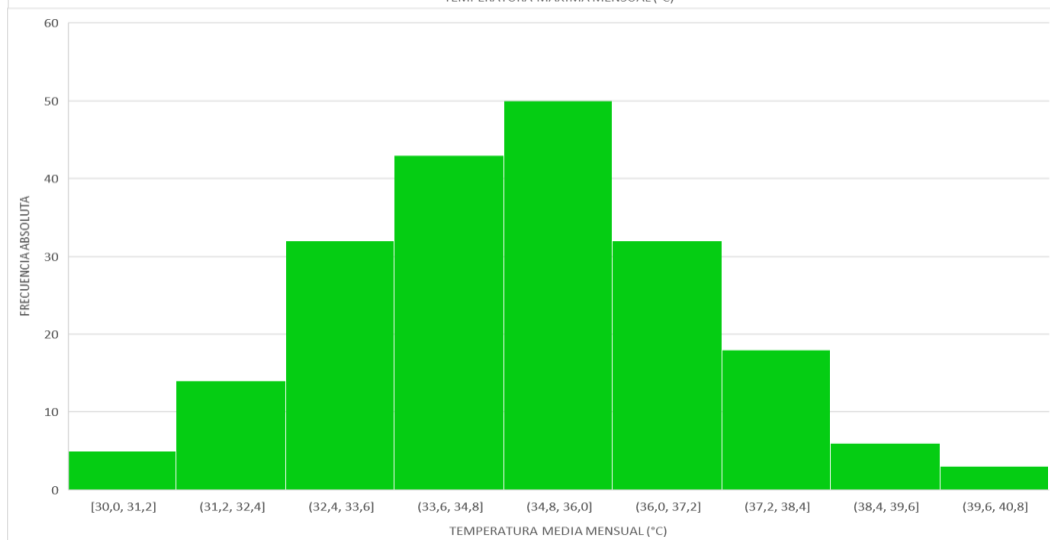
Figura 4. Grafica de las series de temperaturas máximas, medias y mínimas multianuales.

Fuente: Elaboración propia

A



B



C

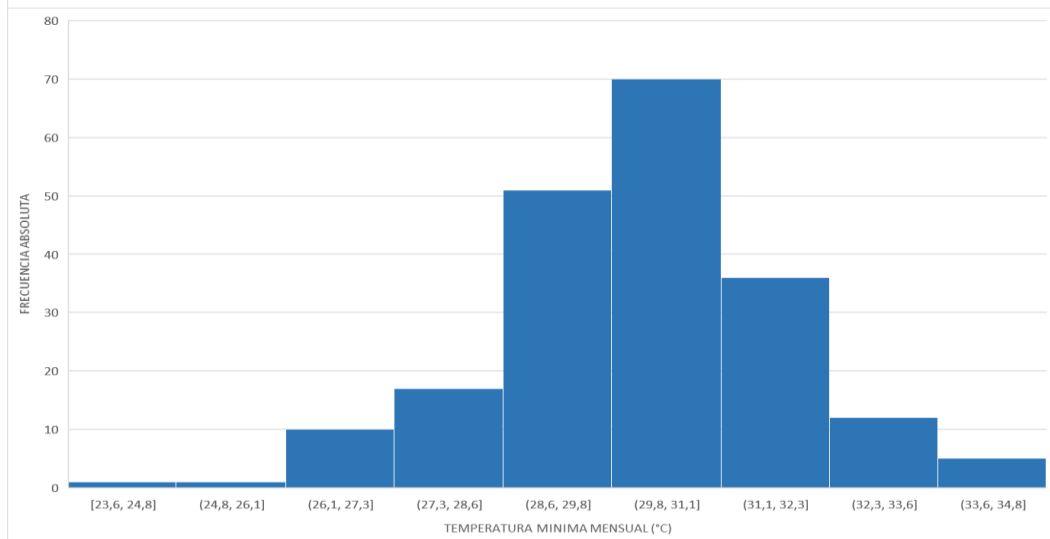


Figura 5. Histogramas de temperaturas A. Máximas B. Media C. Mínima

Fuente: Elaboración propia

En la siguiente tabla se presenta un resumen numérico de los valores de las temperaturas.

Tabla 2. Resumen numérico de las serie de temperaturas mensuales multianuales.

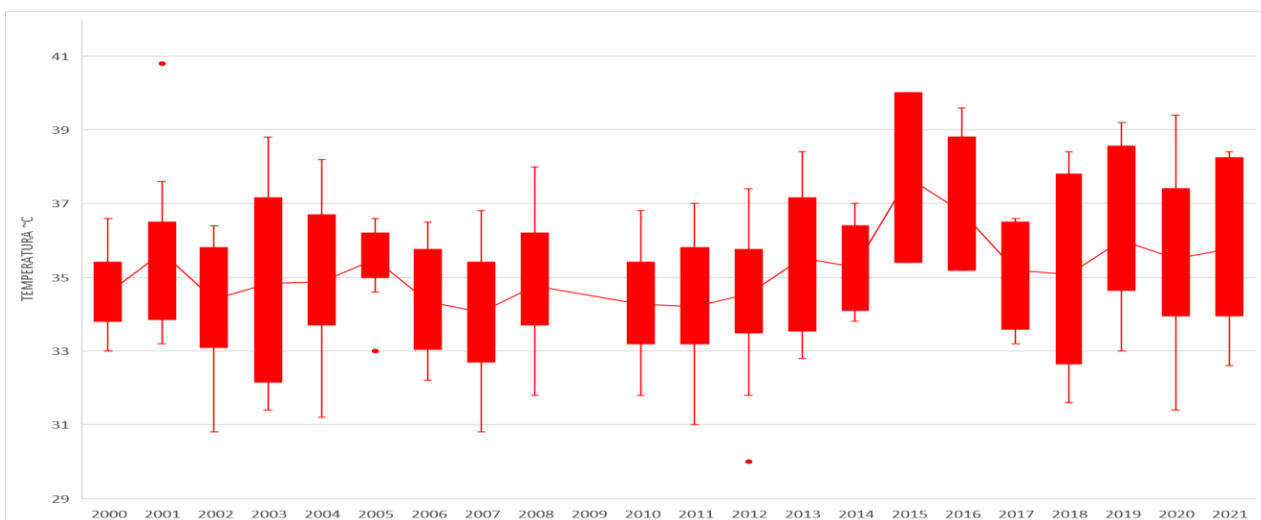
Parámetro	VALOR		
	T. MAXIMA	T. MEDIA	T. MINIMA
Año Inicial	2.000	2.000	2.000
Año Final	2.021	2.021	2.021
Numero de Datos	258	258	258
Numero de Datos Faltantes	55	55	55
Porcentaje de Datos Faltantes	21,31	21,31	21,31
Media	35,041	32,733	30,175
Desviación Estándar	1,966	1,568	1,688
Coeficiente de Variación	0,056	0,048	0,056
Coeficiente de Asimetría	0,100	0,160	-0,349
Coeficiente de Curtosis	0,005	-0,074	1,057
Máximo	40,800	37,103	34,800
Q75	36,200	33,780	31,200
Q50	35,000	32,784	30,200
Q25	33,600	31,753	29,200
Mínimo	30,000	29,258	23,600

Fuente: Elaboración propia

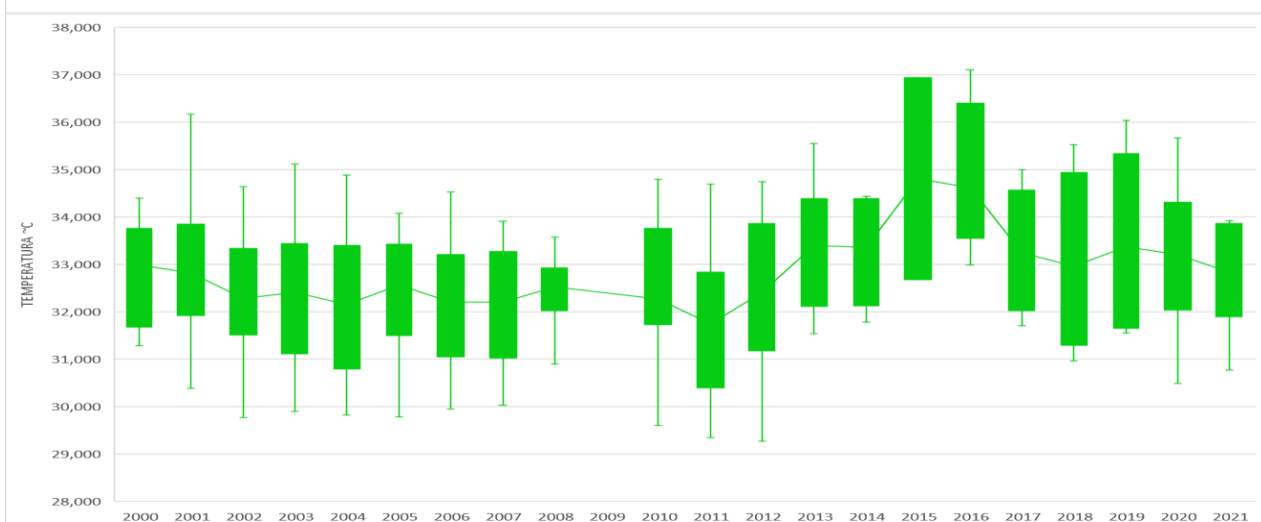
Con el método exploratorio de datos (siguiente figura), se puede observar el grafico box plot de los datos de temperaturas analizadas.

La información presentada permite constatar que existe una variación en los diferentes meses del año en cuanto a la temperatura, es de resaltar que en promedio la temperatura máxima es de 35,041°C, la media de 32,733°C y la mínima de 30,175°C.

A



B



C

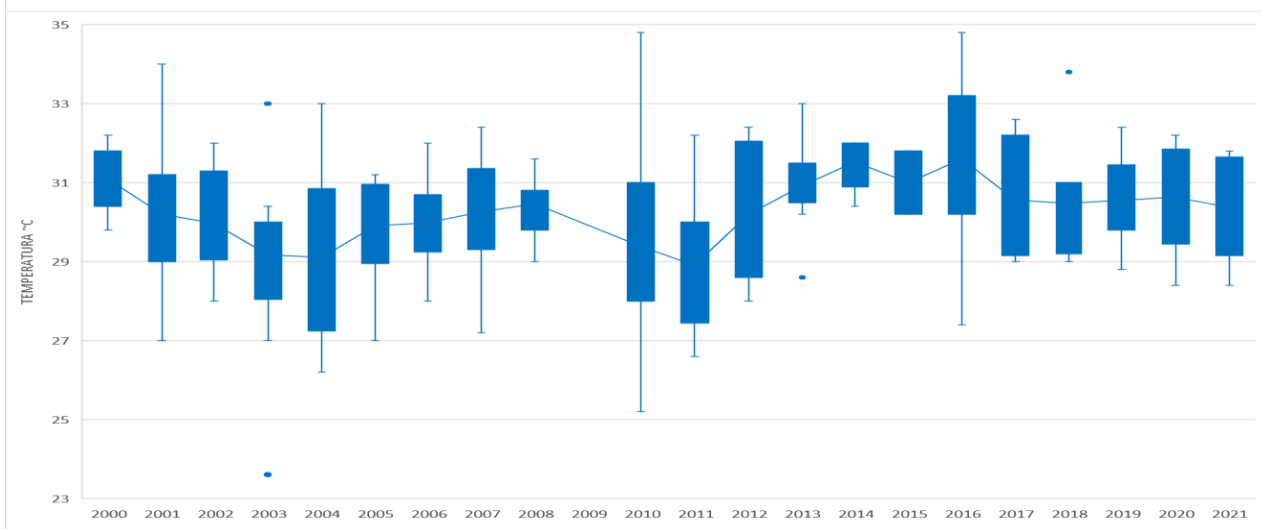


Figura 6. Box Plot de las series de temperaturas A. Máximas B. Medias C. Mínimas.

Fuente: Elaboración propia

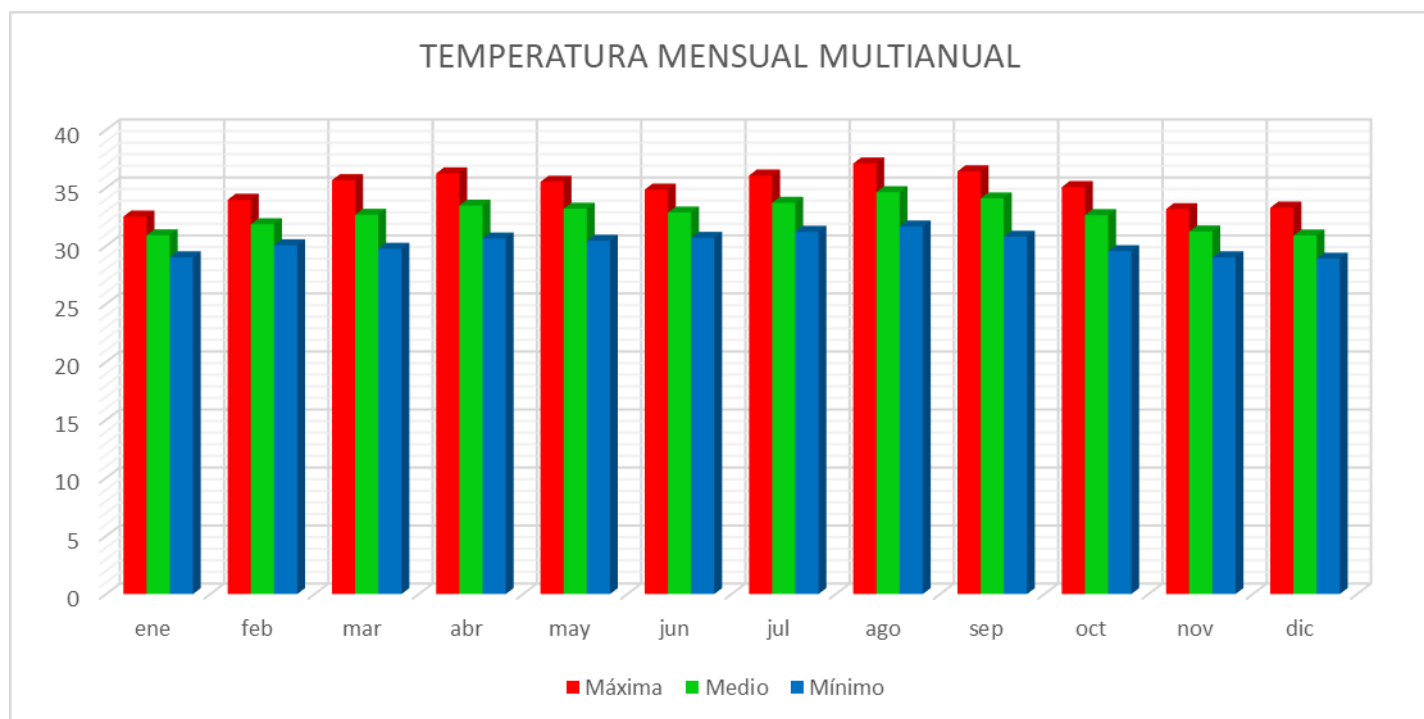


Figura 7. Temperaturas máximas, medias y mínimas mensuales multianuales.

Fuente: Elaboración propia

BRILLO SOLAR

El brillo solar o Heliofanía, es un parámetro que mide la duración del brillo solar u horas sol, la importancia de este factor radica en la importancia del sol para el desarrollo de actividades como lo es el crecimiento de la vegetación; Este parámetro se mide con un heliofanógrafo, y puede verse afectado por elementos como la nubosidad y las precipitaciones.

A continuación, se presenta la gráfica y el histograma de la serie de datos de brillo solar.

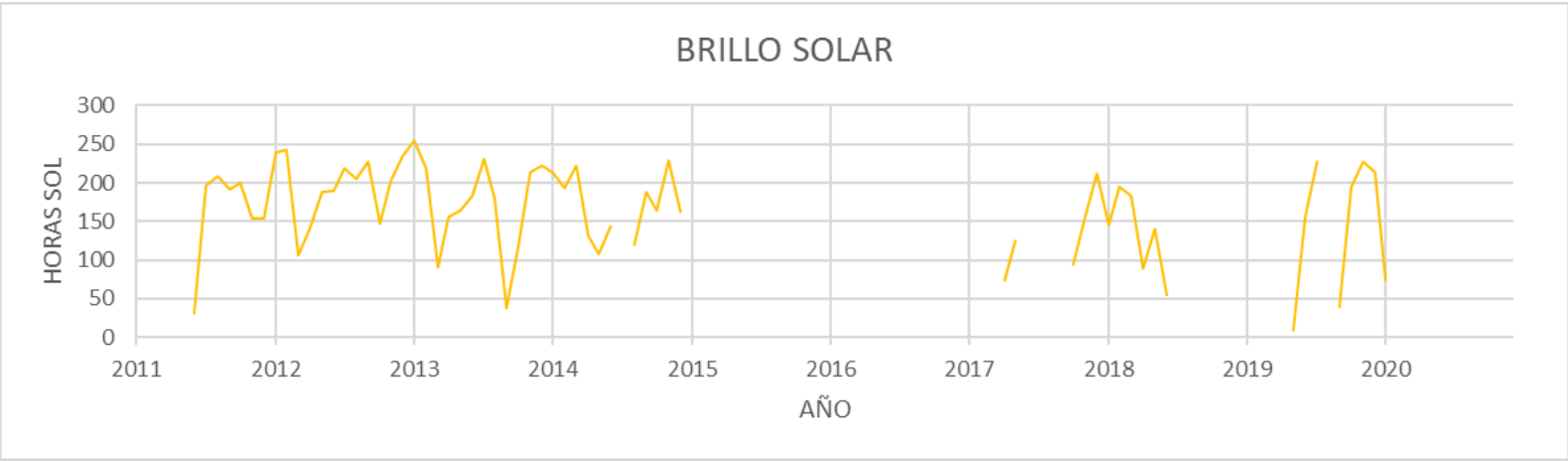


Figura 8. Serie de datos de brillo solar.

Fuente: Elaboración propia

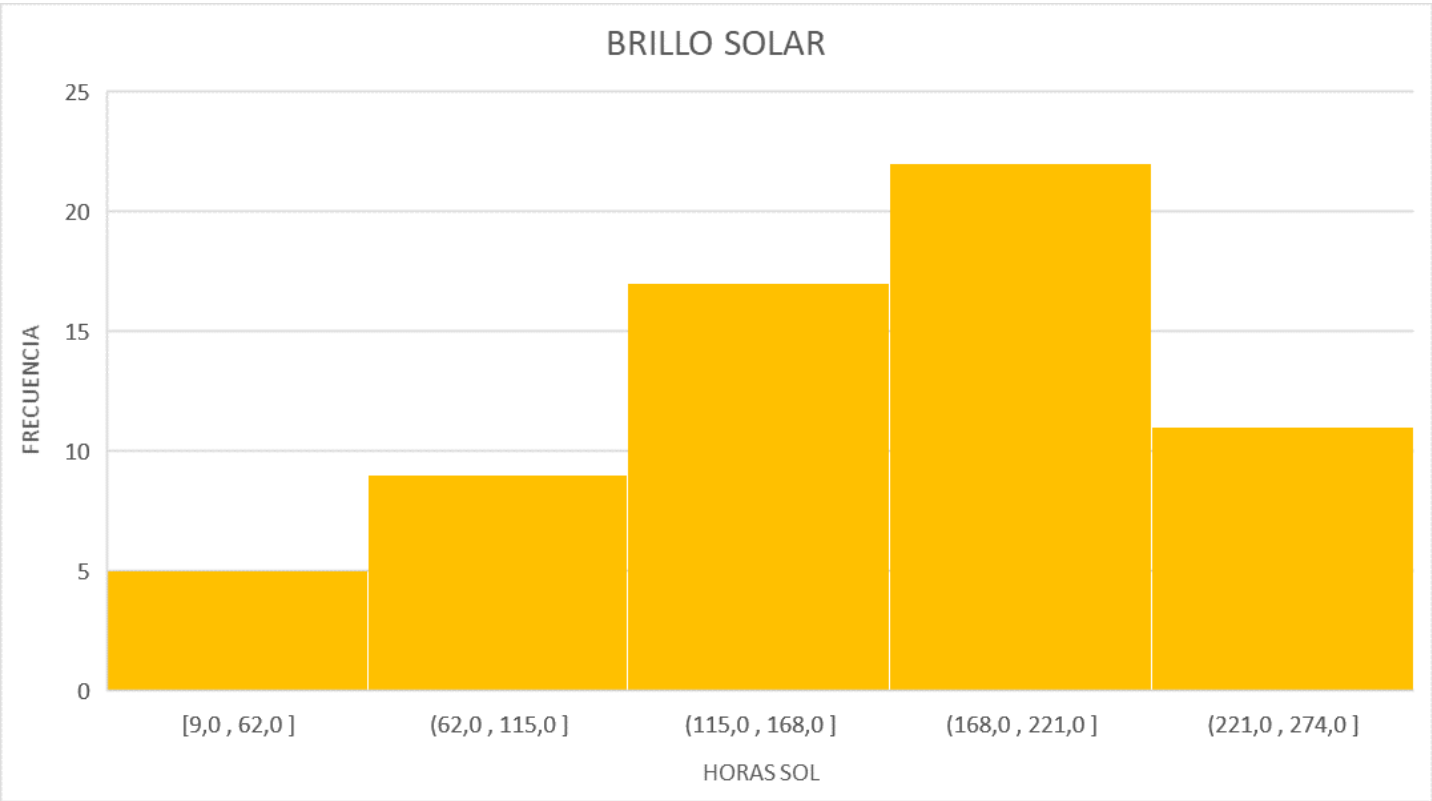


Figura 9. Histograma de brillo solar.

Fuente: Elaboración propia

En la siguiente tabla se presenta un resumen numérico de los valores de brillo solar.

Tabla 3. Resumen numérico de la serie de brillo solar mensual multianual.

Parámetro	Valor
Año Inicial	2.011
Año Final	2.020
Numero de Datos	109
Numero de Datos Faltantes	45
Porcentaje de Datos Faltantes	41,284
Media	162,3016
Desviación Estándar	60,3093
Coeficiente de Variación	0,3716
Coeficiente de Asimetría	-0,7087
Coeficiente de Curtosis	-0,3454
Máximo	254,800
Q75	212,95
Q50	180,85
Q25	121,45
Mínimo	9

Fuente: Elaboración propia

Con el método exploratorio de datos (siguiente figura), se puede observar el grafico box plot de los datos de brillo solar analizado.

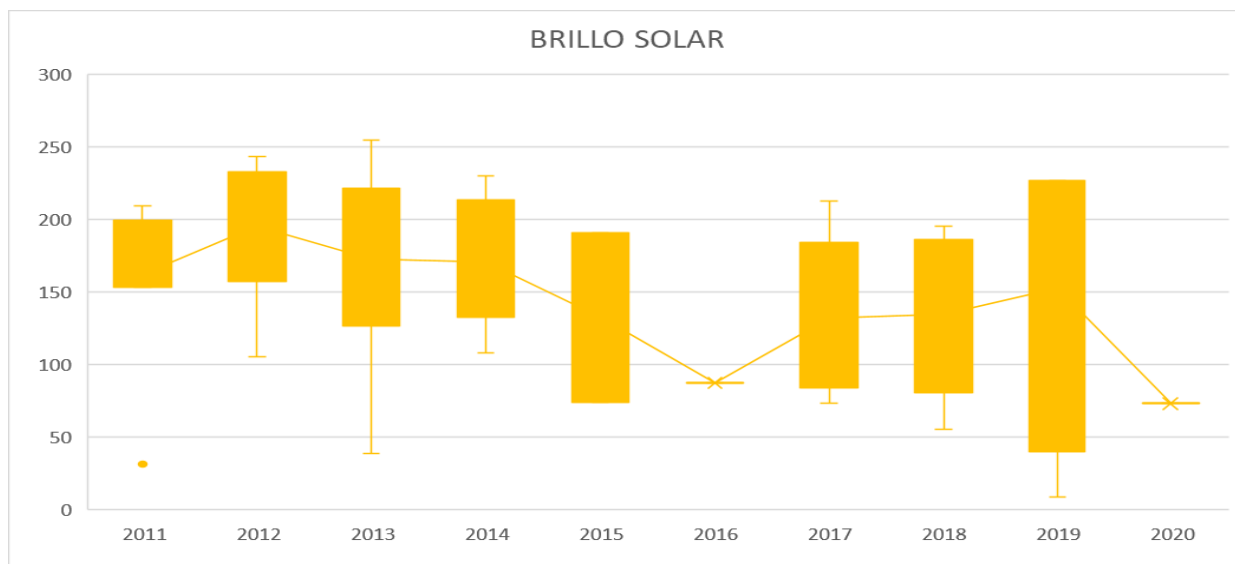


Figura 10 Box Plot de la serie de brillo solar.

Fuente: Elaboración propia

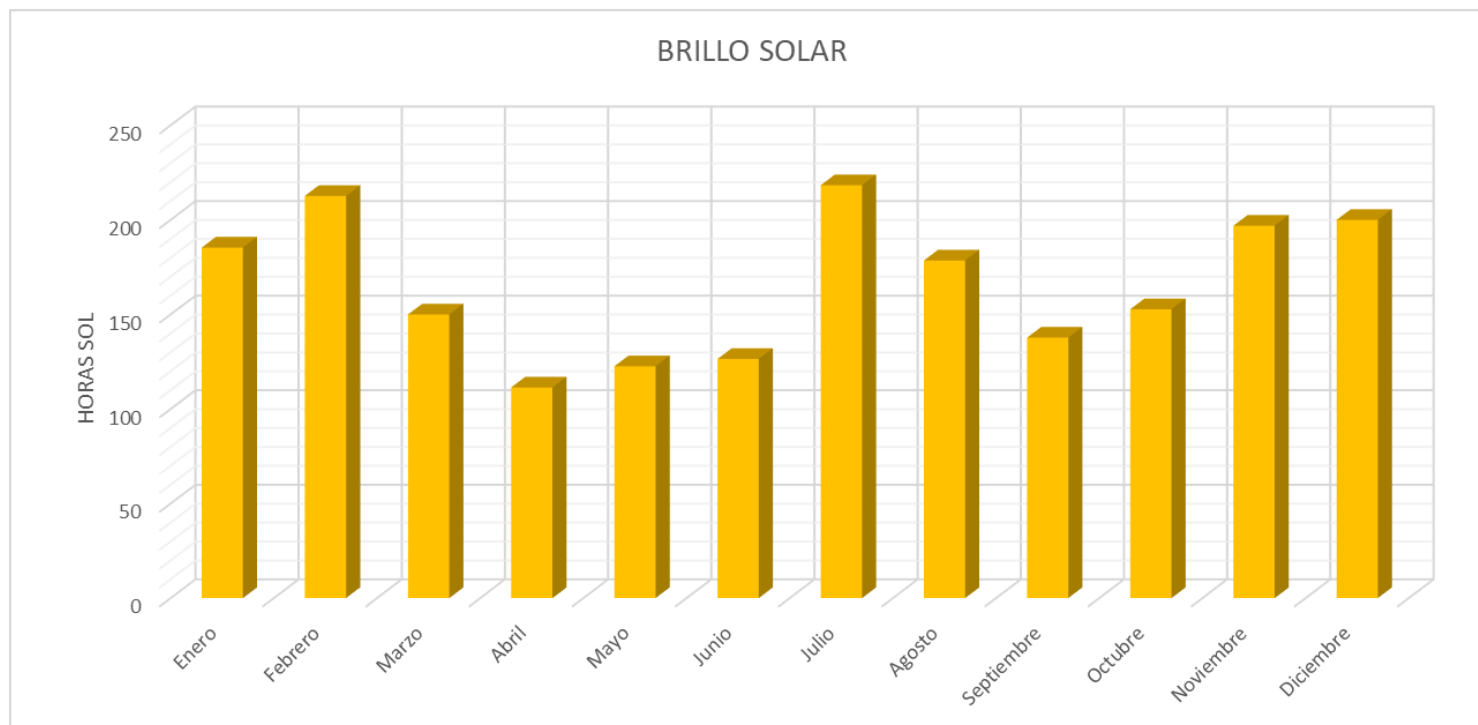


Figura 11.Brillo solar medio mensual multianual.

Fuente: Elaboración propia

Como es posible observar el promedio mensual de brillo solar es de 162,3 horas sol al mes, y posee una tendencia a disminuir durante los meses de abril hasta junio, la mayor incidencia del mismo se da en los meses de febrero y de julio cuando supera las 200 horas sol al mes.

HUMEDAD RELATIVA

La humedad relativa hace referencia al vapor de agua y su presencia de el en la atmosfera, más específicamente se refiere a la cantidad de vapor de agua existente en un ambiente en relación a la cantidad de vapor de agua que podría estar contenida en su máximo punto en ese aire a una temperatura determinada.

A continuación, se presenta la serie de datos de humedad relativa que se obtuvo para la descripción de las condiciones ambientales del municipio de Maicao

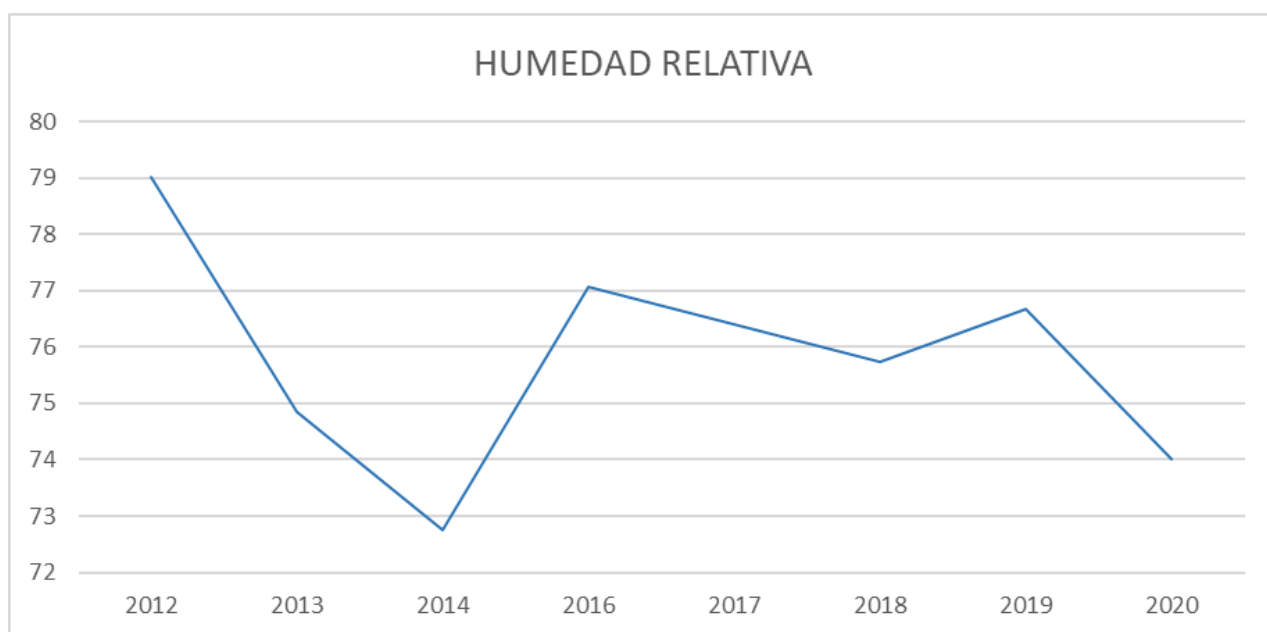


Figura 12. Serie de datos de humedad relativa.

Fuente: Elaboración propia

En la siguiente tabla se presenta un resumen numérico de la serie de datos de humedad relativa.

Tabla 4. Resumen numérico de la serie de humedad relativa promedio anual.

Parámetro	Valor
Año Inicial	2.012
Año Final	2.021
Numero de Datos	8
Numero de Datos Faltantes	0
Porcentaje de Datos Faltantes	0
Media	75,8138
Desviación Estándar	1,9457
Coeficiente de Variación	0,0257
Coeficiente de Asimetría	-0,0007
Coeficiente de Curtosis	0,0784
Máximo	79,014
Q75	76,9716502
Q50	76,0679902
Q25	74,223987
Mínimo	72,7447046

Fuente: Elaboración propia

Dado que los valores encontrados solo corresponden a los promedios anuales, no se realizó el grafico de box plot

Como se puede observar, los valores de humedad relativa más altos se presentaron en el año 2012, su valor promedio es de 75,8 y la variación estándar es de 1,9457.

PRECIPITACIÓN

La precipitación es la cantidad de agua que llega al suelo de forma líquida a través de lluvia o sólida en forma de nieve o granizo, la medida de la altura de una lámina de agua que cubriría el suelo en horizontal bajo el supuesto que no existiese infiltración, evaporación o escurrimiento y es expresada en milímetros.

La información utilizada para la realización del análisis tiene un espectro temporal comprendido entre 1971 hasta 2020, lo cual permite tener bastante certeza acerca de la calidad de la información, a continuación, se presenta el grafico con la serie de datos con los de precipitación en el municipio de Maicao.

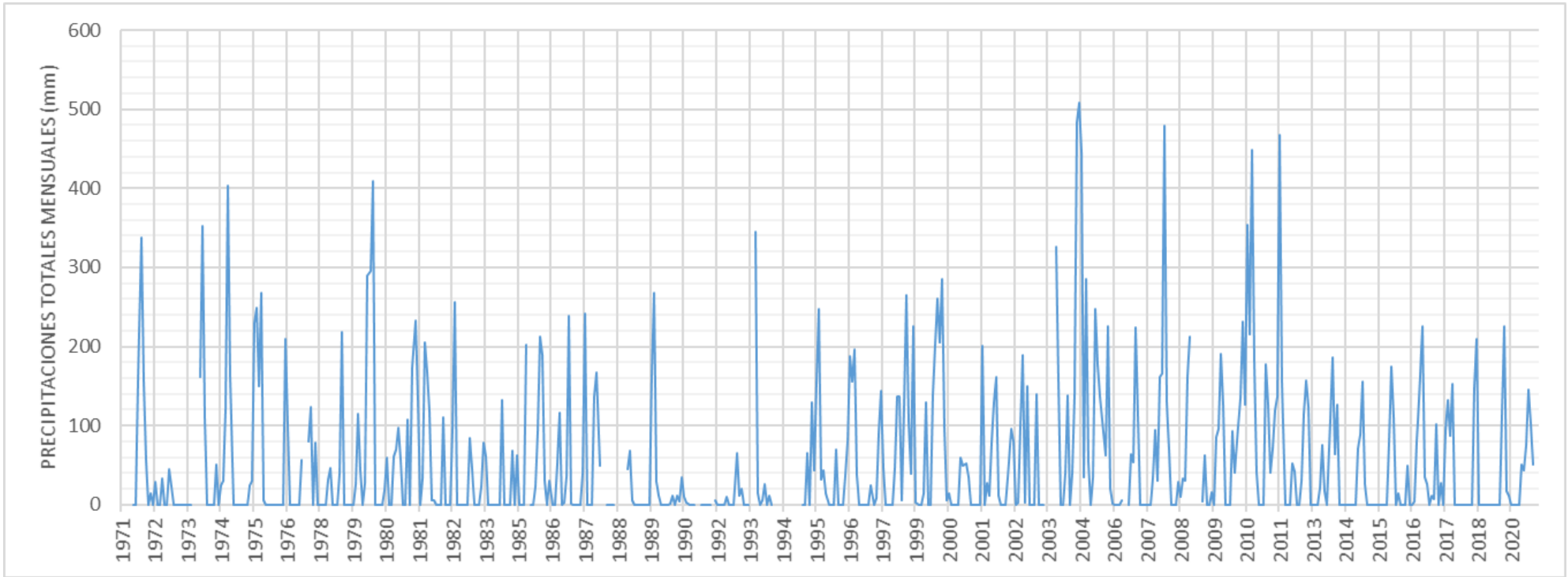


Figura 13. Serie de precipitación total.

Fuente: Elaboración propia

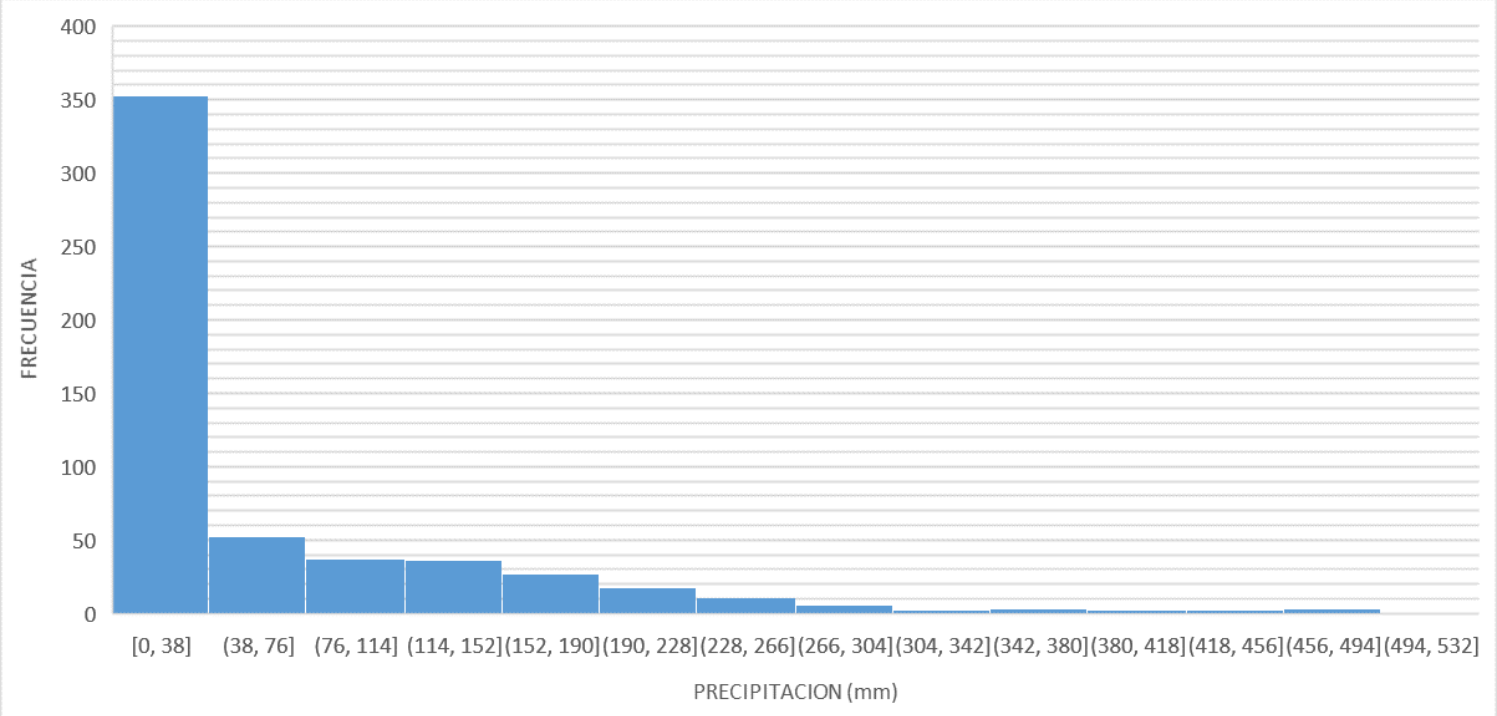


Figura 14. Histograma de la serie de precipitaciones.

Fuente: Elaboración propia

En la siguiente tabla se presenta el resumen numérico de los datos de precipitación.

Tabla 5. Resumen numérico de la serie de precipitación.

Parámetro	Valor
Año Inicial	2.011
Año Final	2.020
Numero de Datos	600
Numero de Datos Faltantes	47
Porcentaje de Datos Faltantes	7,83
Media	55,3910
Desviación Estándar	89,4396
Coeficiente de Variación	1,6147
Coeficiente de Asimetría	2,1991
Coeficiente de Curtosis	5,5263
Máximo	508,000
Q75	83
Q50	3,5
Q25	0
Mínimo	0

Fuente: Elaboración propia

Con el método exploratorio de datos (siguiente figura), se puede observar el grafico box plot de los datos de precipitación analizado.

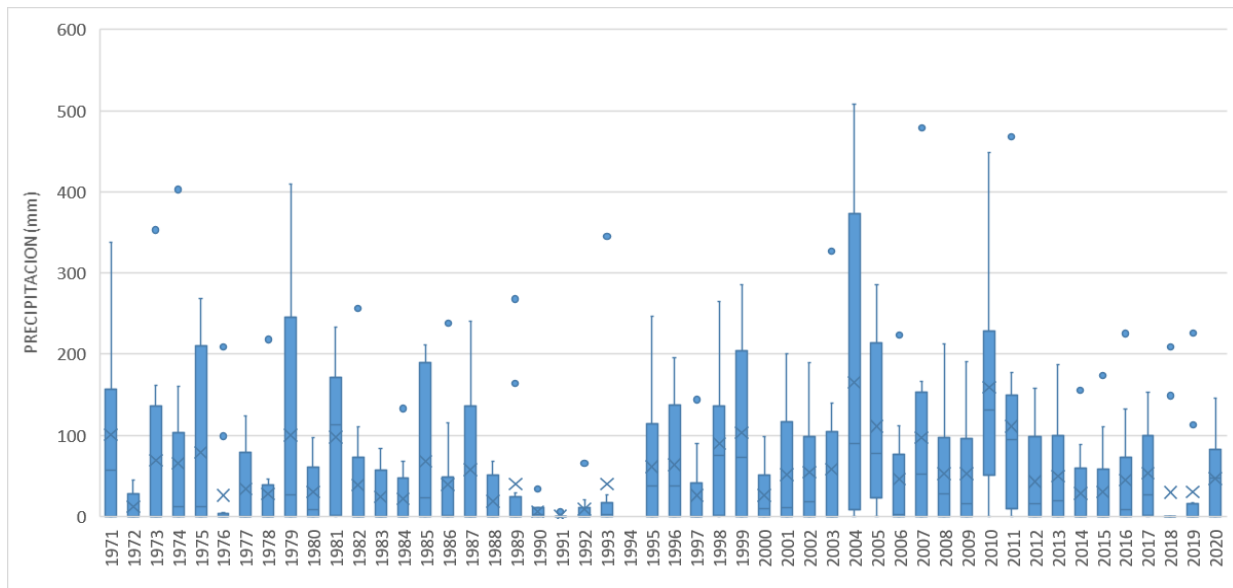


Figura 15. Box Plot de la serie de precipitaciones

Fuente: Elaboración propia

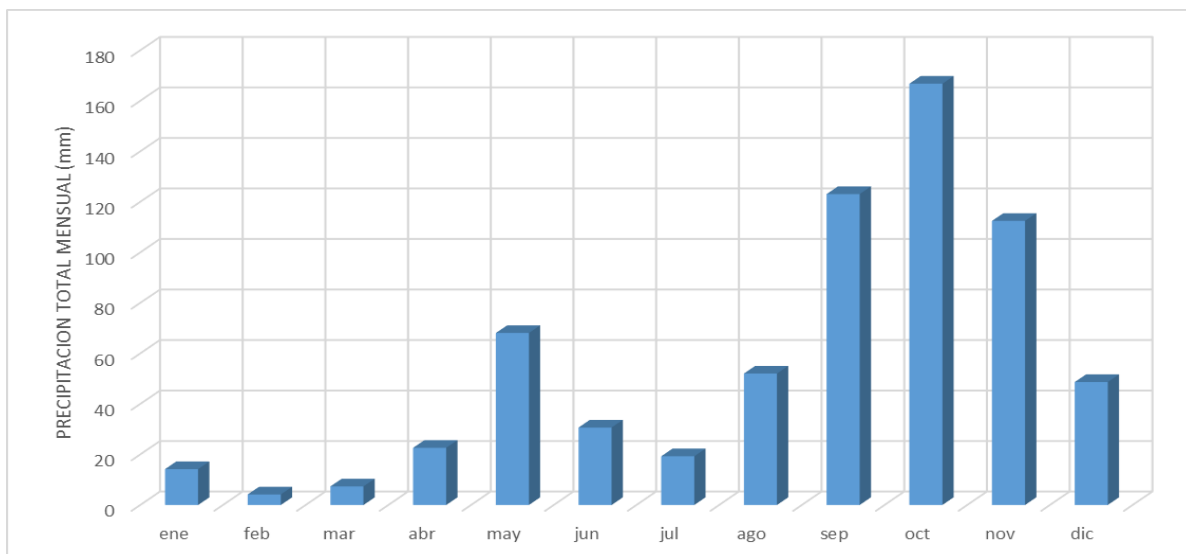


Figura 16. Precipitación total promedio mensual multianual

Fuente: Elaboración propia

La precipitación media mensual en Maicao varía entre 4,19 hasta 166,79 mm, el comportamiento a través del año es de tipo bimodal, siendo los meses mas lluviosos el periodo entre marzo y junio, para posteriormente retomar las temporadas de lluvias en el periodo entre septiembre y octubre, el valor medio de la precipitación total multianual es de 669,48 mm.

ESTIMACIÓN DE LOS PERIODOS DE RETORNO PARA LLUVIAS MÁXIMAS

En la naturaleza los fenómenos hidrológicos constituyen procesos aleatorios que para efectos de planificación y diseño están basados en eventos futuros, cuya magnitud y frecuencia no se puede predecir; es por ello que se debe recurrir a los estudios de probabilidad y frecuencia (Lourdes Bello Mendoza, Sara Jane Velazquez Juarez, 2012).

El periodo de retorno hace referencia a cualquier evento extremo como lo son las lluvias torrenciales, temperaturas extremas, huracanes, entre otros, con lo cual, el intervalo, duración o número de daños que, en promedio se cree que será igual o excedido; es decir la frecuencia con la que se presenta un evento (Gutierrez et al, 2011).

Con el fin de conocer que estación meteorológica que presentara la información de precipitación máxima diaria partiendo de las disponibles en el municipio de Maicao se realizó un análisis con polígonos de Thiessen como se muestra en la siguiente figura, dando como resultado que la estación Paraguachon con código 15087080 es la que mayor cantidad mayor representatividad tiene en el área de estudio.

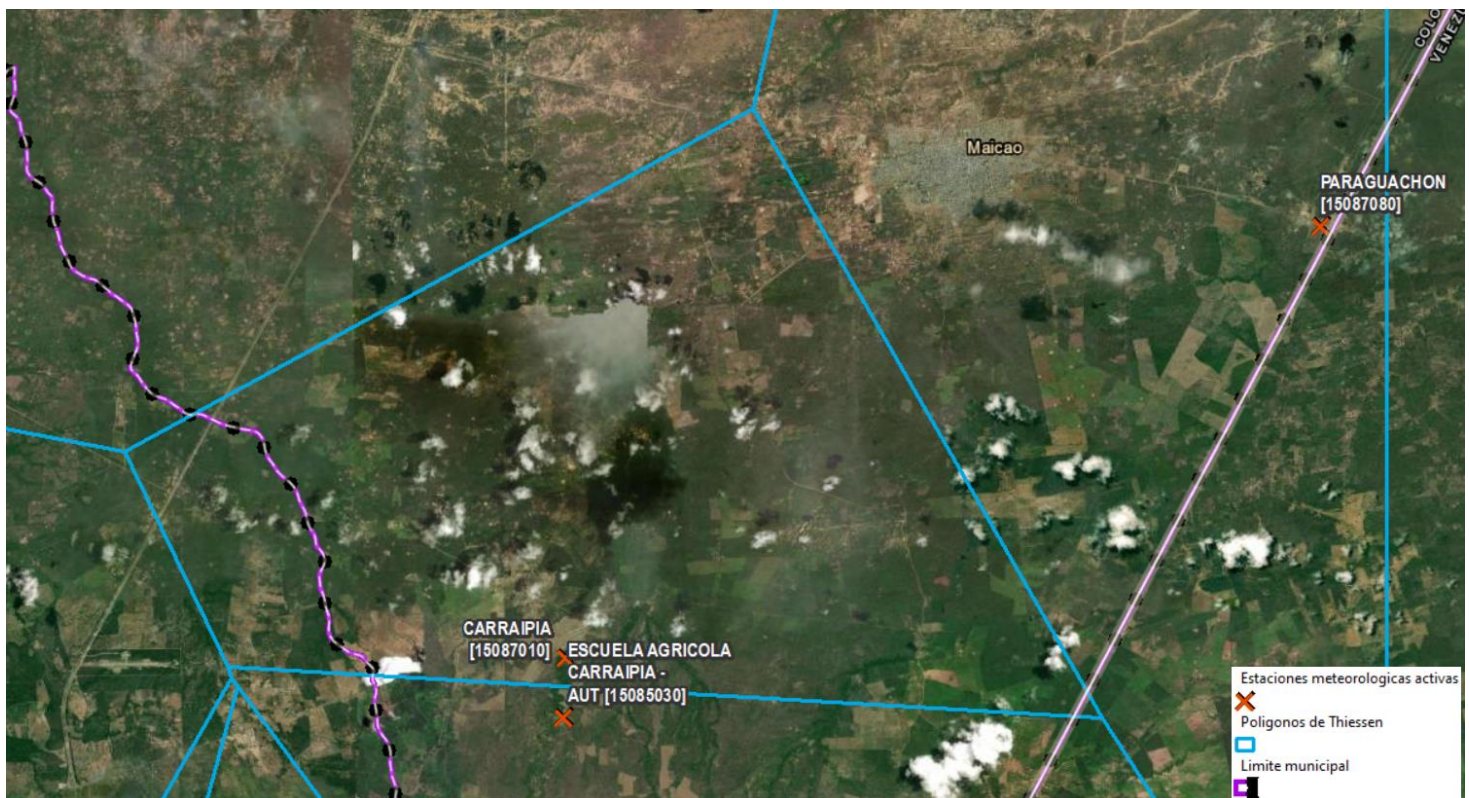


Figura 17. Polígonos de Thiessen para estaciones meteorológicas activas.

Fuente: Elaboración propia

SERIE DE LLUVIAS MÁXIMAS EN LAS ESTACIONES METEOROLÓGICAS

En la siguiente tabla se presenta los valores de precipitaciones máximas de la estación que se utilizó para la zona del proyecto.

Tabla 6. Serie de lluvias máximas en 24 horas de la estación Paraguachon.

PERIODO 1971 - 2020												
AÑO	ENE	FEB	MAR	ABR	MAY	JUN	JUL	AGO	SEP	OCT	NOV	DIC
1971						0	0	70	63	47	27	0
1972	14	0	29	0	0	33	0	0	35	23	0	0
1973	0	0	0	0	0	0				124	133	79
1974	0	0	0	0	50	0	24	30	40	90	98	0
1975	0	0	0	0	0	0	24	30	90	135	75	53
1976	5	0	0	0	0	0	0	0	0	73	55	0
1977	0	0	0	0	56			80	101	0	50	0
1978	0	0	0	10	20	0	0	0	26	140	0	0
1979	0	0	0	25	75	20	0	27	115	75	131	0
1980	0	0	0	18	32	0	0	24	40	35	42	0
1981	0	49	0	78	51	47	0	22	50	110	63	6
1982	6	0	0	0	53	0	0	0	80	88	0	0
1983	0	0	0	84	44	0	0	0	23	43	34	0
1984	0	0	0	0	0	82	0	0	0	44	0	63
1985	0	0	0	105		0	0	23	83	70	60	30
1986	0	30	0	0	52	53	0	2	23	46	1	0
1987	0	0	0	40	90	0	0	0	34	52	38	
1988		0	0	0	0						43	43
1989	6	0	0	0	0	0	0	0	65	50	23	11
1990	0	0	0	0	1,5	7,7	0	11	2,5	5	6,8	1,4
1991	0	0	0			0	0	0	0	0		1,8
1992	0	0	0	0	2,3	0	0	0	30	5,6	7,3	0
1993	0	0			103	14	0	3,4	10,5	0	9,7	0
1994												
1995	0	0	44	0	130	44	92	64	9,5	13,2	10	0
1996	0	0	55	0	0	0	38	20	92	43	50	19
1997	0	0	0	0	0	15	0	8	32	97	20,5	0
1998	0	0	0	30	55	136	5	60	87	52	19	120
1999	2	0	0	10	80	0	0	47	135	97	60	105
2000	27	5	14	0	0	0	0	60	25	31	24	0
2001	0	0	0	0	93	0	20	12	64	53	45	8
2002	0	0	0	28	60	48	0	2	60	55	2	100
2003	0	0	0	140	0	0	0					206
2004	106	0	0	40	60,9	0	20,6	52	87	91	96	22

PERIODO 1971 - 2020												
AÑO	ENE	FEB	MAR	ABR	MAY	JUN	JUL	AGO	SEP	OCT	NOV	DIC
2005	86	54	0	35	89	90	97	32	25	64	6	0,6
2006	0	0	0	6			0	64	29	92	63	0
2007	0	0	0	0	34	95	30,2	90,8	92	95	90	70
2008	0	0	0	20,4	10	33,3	20	30	33,3			
2009		4	20,7	0	0	6,5	0	85	58	103,3	34,5	0
2010	0	0	55,5	41	52	54	100	38	60	90	85	50
2011	30	0	0	0	44	75	30	20	30	50	63	65
2012	0	0	0	36	14	0	0	23	36	90	58,7	0
2013	0	0	0	21,9	30,7	16,6	0	65	52,6	36	107	0
2014	0	0	0	0	0	0	0	40	30	38,7	17,8	0
2015	0	0	0	0	0	0	0	0	63	78	50	0
2016	13,8	0	0	0	42,8	0	0	4	66	69	67,5	19,5
2017	26,6	0	11,2	6,8	52,5	0	16	0	45,6	69	44,5	128,5
2018	0	0	0	0	0	0	0	0	94,2	45,2	0	0
2019	0	0	0	0	0	0	0	0	68,7	48	16,9	6,4
2020	0	0	0	0	51,3	44	76,2	54,2	47	18		

Fuente: Elaboración propia

PERIODO DE RETORNO DEL AGUACERO DE DISEÑO.

No existe en Colombia normas para la determinación de los periodos de retorno del aguacero de diseño aplicado al control de inundaciones, sin embargo, existen normas técnicas como la presentada por la Empresa de Acueducto y Alcantarillado de Bogotá NS-085 “Criterios de Diseño de Sistemas de Alcantarillado”, en la cual se indica los periodos de retorno de diseño debe determinarse de acuerdo a la importancia de la importancia de las áreas y con los daños, perjuicios o molestias que las inundaciones periódicas puedan generar, en la siguiente tabla se presentan los criterios de diseño para el periodo de retorno del aguacero de diseño.

Tabla 7. Criterio para seleccionar el periodo de retorno de diseño

		BORDE LIBRE	BORDE LIBRE	BORDE LIBRE
CARACTERÍSTICAS DEL ÁREA DE DRENAJE	PERIODO DE RETORNO	TUBERÍAS	BOX CULVERT	CANALES
Tramos de alcantarillado con áreas tributarias hasta de 3 hectáreas, localizados en las zonas de los cerros o en zonas donde la pendiente longitudinal de las vías sea mayor del 1 %.	3 años	La relación entre el caudal de diseño y el caudal a tubo lleno debe ser igual o menor a uno.	La lámina de agua no debe superar el 90% de la altura interna del Box culvert	N.A.
Tramos de alcantarillado con áreas tributarias hasta de 3 hectáreas, localizadas en la zonas bajas o en las zonas donde la pendiente longitudinal de las vías se menor	5 años	La relación entre el caudal de diseño y el caudal a tubo lleno debe ser igual o menor a uno.	La lámina de agua no debe superar el 90% de la altura interna del Box culvert	N.A.
Tramos de alcantarillado con áreas tributarias mayores de 3 ha.	5 años	La relación entre el caudal de diseño y el caudal a tubo lleno debe ser igual o menor a uno.	La lámina de agua no debe superar el 90% de la altura interna del Box culvert	N.A.
Canalizaciones abiertas, adecuación de cauces de ríos y quebradas en cualquier zona con áreas tributarias hasta de 1000 hectáreas.	10 años	N.A.	N.A.	Borde libre equivalente al 30% de la profundidad de la lámina para un Tr. de 10 años. Mínimo 0,50m.

Fuente: (EMPRESA DE ACUEDUCTO Y ALCANTARILLADO DE BOGOTÁ - E.S.P., 2006)

Para el cálculo del periodo de retorno se utilizarán los métodos de distribución Normal, Log Normal, Pearson y Gumbel, los cuales serán explicados más adelante, estos análisis se utilizaron para los periodos de retorno calculados de 5,10,25,50 y 100 años.

DISTRIBUCIÓN NORMAL

Ecuación: $P_T = \bar{P} + \sigma * K_1$

P_T : es la precipitación con un determinado periodo de retorno, T (mm).

$\bar{P}$: es el valor medio de la serie de lluvias máximas en 24 horas (mm).

σ : es la desviación estándar de los datos de la serie (mm).

K_1 : es el factor de frecuencia, propio de la distribución normal.

T: periodo de retorno (años).

Secuencia para la solución general de la fórmula:

- Se define la función de distribución de probabilidad: $F(P_p) = \frac{T-1}{T}$
- Se obtiene el factor de frecuencia K_1 , en función del valor $\frac{T-1}{T}$ por tabla.
- Se calcula el valor medio de la serie de lluvias máximas en 24 horas, $\bar{P}$, (mm).
- Se determina la desviación estándar de los datos de la serie, σ , (mm).

$$\sigma = \sqrt{\frac{\sum_{i=1}^n (P_i - \bar{P})^2}{n - 1}}$$

P_i : es cada uno de los valores de la serie, (mm)

n: es el número de datos de la serie

DISTRIBUCIÓN LOG NORMAL

La ecuación general de cálculo es:

$$\ln P_T = \bar{P} + \sigma * K_2$$

$$P_T = e^{\bar{P} + \sigma K_2}$$

P_T : es la precipitación con un determinado periodo de retorno, T (mm)

$\bar{P}$: es el valor medio de la serie de lluvias máximas en 24 horas (mm).

σ : es la desviación estándar de los datos de la serie (mm)

K_2 : factor de frecuencia, propio de la distribución normal.

T: es el periodo de retorno (años)

e: es la base de los logaritmos naturales

DISTRIBUCIÓN ESTÁNDAR PEARSON TIPO III

Ecuación general:

$$P_T = \delta_1 + y * \alpha_1$$

P_T : es la precipitación con un determinado periodo de retorno, T, (mm)

δ_1 : es el valor medio corregido de la serie de lluvias máximas en 24 horas (mm)

α_1 : es la desviación estándar corregida de los datos de la serie (mm).

y: es el factor de frecuencia, propio de la distribución Pearson tipo III.

T: es el periodo de retorno (años).

La solución de la ecuación general es la siguiente:

Se define la función de distribución de probabilidad: $F(P_P) = \frac{T-1}{T}$

Se obtiene el coeficiente de sesgo, y.

$$y = \sum_{i=1}^n \frac{(P_i - \bar{P})^3 / n}{\sigma^3}$$

P_i : es cada uno de los valores de la serie, (mm)

n: es el número de datos de la serie

Se calcula el parámetro β_1 de la función de densidad de probabilidad

$$\beta_1 = \left(\frac{2}{y}\right)^2$$

Se determinan los grados de libertad de la ecuación

$$V = 2\beta_1$$

Se define el parámetro x^2 de la función de distribución en función de los grados de libertad de la ecuación (en tabla).

Se calcula el factor de frecuencia, propio de la distribución Pearson Tipo III “y”

$$y = \frac{x^2}{2}$$

Se evalúa la desviación estándar corregida de los datos de la serie α_1 (mm)

$$\alpha_1 = \frac{\sigma}{\sqrt{\beta_1}}$$

Se calcula el valor medio corregido de la serie de lluvias máximas en 24 horas $\delta_1 = \bar{P} - \alpha_1 \beta_1$

DISTRIBUCIÓN GUMBEL

Ecuación de cálculo:

$$P_T = \bar{P} + \sigma K_4$$

P_T : es la precipitación con un determinado periodo de retorno, T (mm)

$\bar{P}$: es el valor medio de la serie de lluvias máximas en 24 horas (mm)

σ : es la desviación estándar de los datos de la serie (mm)

K_4 : es el factor de frecuencia, propio de la distribución Gumbel.

T: es el periodo de retorno (años).

$$K_4 = \left(\frac{Y - Y_n}{\sigma_n} \right)$$

Y, Y_n : son parámetros tomados en función de la longitud de la serie.

σ_n : es la desviación estándar tomando en el denominador solo n.

Se obtiene el factor de frecuencia K_4 , en función de Y, Y_n , por tabla.

Se calcula el valor medio de la serie de lluvias máximas en 24 horas, $\bar{P}$, (mm)

Se determina la desviación estándar de los datos de la serie, σ , (mm).

$$\sigma = \sqrt{\frac{\sum_{i=1}^n (P_i - \bar{P})^2}{n - 1}}$$

P_i : es cada uno de los valores de la serie (mm).

n : es el número de datos de la serie.

Finalmente se calcula P_T

El cálculo de las lluvias máximas con diferentes periodos de retorno se efectuó en Excel (archivo anexo), a continuación, se presenta la tabla con los resultados de las precipitaciones máximas en los periodos de retorno por cada uno de los diferentes métodos analizados, posteriormente, se graficaron los resultados de los métodos junto a la serie de datos para mirar los ajuste de la misma con los métodos analizados, dando como resultado que los valores del método Log Normal son los que mejor se ajustan.

Tabla 8. Valores de periodos de retorno con diferentes distribuciones.

TR	Normal			Log-Normal			Gumbel			Pearson		
	Li	P	Ls	Li	P	Ls	Li	P	Ls	Li	P	Ls
5	106,68	119,23	131,78	95,41	113,17	130,93	123,75	149,58	175,42	106,42	119,16	131,90
10	121,81	136,36	150,92	111,90	136,71	161,53	140,24	172,37	204,49	121,45	136,51	151,56
25	137,49	154,67	171,84	132,74	167,29	201,84	160,93	201,16	241,38	135,30	155,13	174,96
50	147,34	166,35	185,36	148,24	190,30	232,35	176,22	222,51	268,81	142,87	167,07	191,27
100	156,45	177,25	198,05	164,55	214,62	264,68	191,36	243,71	296,06	149,07	178,25	207,43

Fuente: Elaboración propia

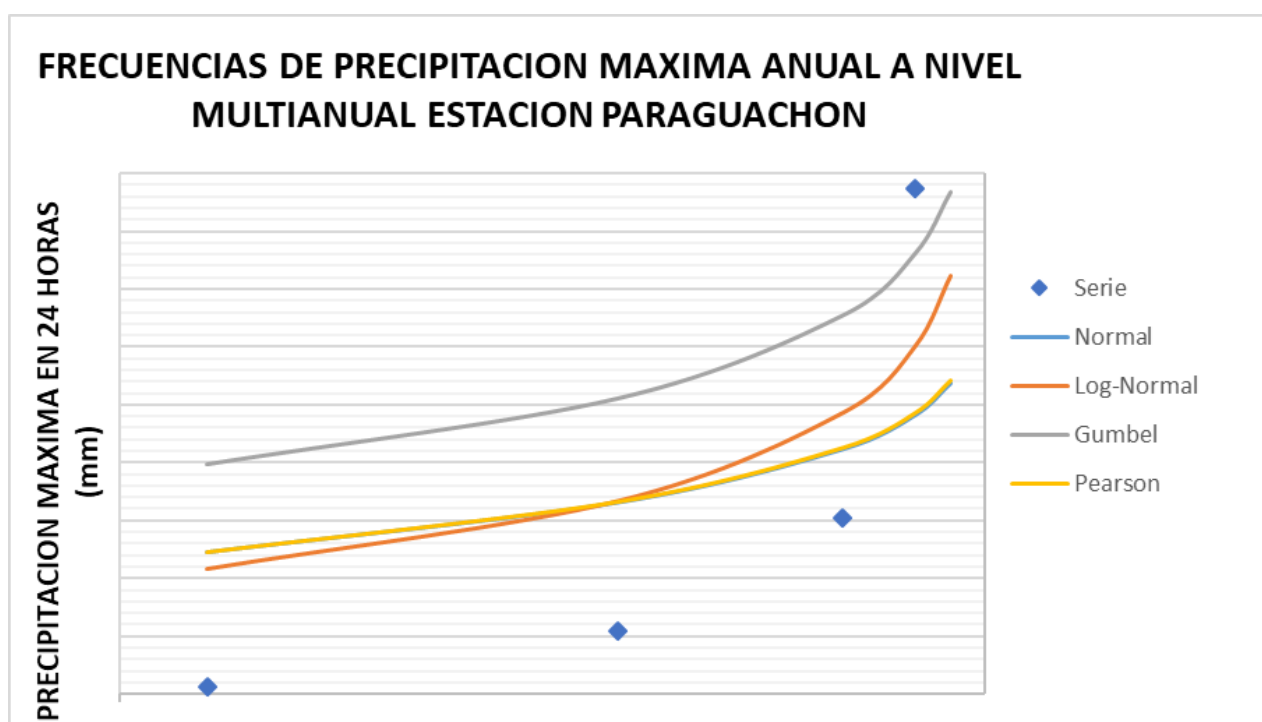


Figura 18. Ajuste de distribuciones de precipitaciones máximas

Fuente: Elaboración propia

A continuación, se presenta una tabla con la distribución seleccionada para los diferentes periodos de retorno para las precipitaciones máximas en 24 horas para la estación Paraguachon.

Tabla 9. Precipitaciones máximas en 24 horas con diferentes periodos de retorno de la distribución seleccionada

TR	PRECIPITACIÓN MÁXIMA (mm)
5	113,17
10	136,71
25	167,29
50	190,30
100	214,62

Fuente: Elaboración propia

DETERMINACIÓN DE LAS CRECIENTES CON DIFERENTES PERIODOS DE RETORNO.

Las crecientes se calcularon por medio del programa HEC- HMS (Hydrologic Engineering Center – Hydrologic Modeling System) de los Estados Unidos de América, el cual posee un gran número de aplicaciones como el HEC-RAS, entre otras, además de la mencionada.

Para construir de manera sintética los hidrogramas de las crecientes en la cuenca se aplica un modelo lluvia-caudal con el método del Soil Conservation Service de los Estados Unidos de Norteamérica. Este modelo determina la escorrentía producida por un aguacero considerando la condición de humedad antecedente y el complejo suelo-cobertura.

Todos los procedimientos orientados a calcular el hidrograma de una creciente mediante modelos lluvia-caudal requieren convertir la lluvia original en lluvia efectiva, que es la que realmente produce la creciente, descontando las pérdidas, es decir, las abstracciones por diferentes conceptos. Por lo anterior, se presenta aquí el procedimiento usual para evaluar la lluvia efectiva, antes de explicar la metodología para calcular la creciente propiamente dicha.

La lluvia efectiva es el escurrimiento directo e inmediato que produce una lluvia sobre una determinada cuenca y resultan igual a la lluvia total menos las pérdidas de agua. Estas pérdidas poseen tres componentes:

- Interceptación por parte de la vegetación
- Detención superficial, e
- Infiltración

Para una determinada lluvia, la relación entre la precipitación, la escorrentía y la retención (precipitación que no se convierte en escorrentía) es:

$$\frac{F}{S'} = \frac{Q}{P_e}$$

F – es la retención real

Q – es la escorrentía real

S' – es la máxima retención potencial

P_e – es la máxima escorrentía potencial

Si se acepta que: $F = Pe - Q$, entonces, $\frac{Pe - Q}{S'} = \frac{Q}{P_e}$ y despejando S' se obtiene:

$$S' = \frac{(P_e)^2}{Q} - P_e$$

Sabiendo que: $S = S' + Ia$; donde Ia son las abstracciones iniciales; se tiene que:

$$F = (P - Ia) - Q$$

El valor de S para una determinada condición de frontera ha sido propuesto por el Soil Conservation Service igual a $0,2 P_e$; por lo cual: $Ia = 0,2S$. Efectuando reemplazos se obtiene la expresión para determinar la escorrentía acumulada en función de la lluvia total y de la infiltración potencial.

$$Q = \frac{(P - 0,2S)^2}{P + 0,8S}$$

La cual, en el sistema internacional (SI) se transforma en la siguiente:

$$Q = \frac{(P - 5,08S)^2}{P + 20,32S}$$

Q – Lluvia efectiva o escorrentía acumulada, en mm.

P – Precipitación total del evento, en mm.

S – Infiltración potencial, en mm.

En esta fórmula la precipitación total del evento es conocida, dado que se determina de antemano y el valor de la infiltración potencial “ S ” se puede calcular a partir de un cierto valor CN, denominado Curva Número, con la siguiente expresión:

$$S = \frac{1.000}{CN} - 10,0$$

La selección del valor CN en cada caso, se realiza considerando los siguientes cuatro parámetros:

- Tipo de suelo hidrológico
- Uso y tratamiento del suelo
- Combinaciones hidrológicas de suelo y vegetación, y
- Condiciones de humedad antecedente a la lluvia de diseño.

En la presente metodología se supone que el hidrograma unitario es triangular, el cual se calcula con las siguientes relaciones:

$$V = \frac{q_p \cdot t_b}{2}$$

V – volumen de escorrentía, igual al área bajo el hidrograma triangular, en m3

q_p – caudal pico del hidrograma triangular, en m3/s/mm

t_b - tiempo base del hidrograma unitario, en horas.

A – área de la cuenca aferente, en km2

De esta manera, el caudal pico del hidrograma para un milímetro de lluvia efectiva es:

$$q_p = \frac{0,2083 \cdot A}{t_p}$$

q_p – caudal pico del hidrograma triangular, en m3/s/mm

A – área de la cuenca aferente, en km2

t_p – tiempo al pico del hidrograma unitario triangular, en horas

El tiempo al pico se define de la siguiente manera:

$$t_p = \frac{D}{2} + 0,6 \cdot t_c$$

D – duración de la lluvia efectiva, en horas.

t_c – tiempo de concentración de la cuenca, en horas. Es el tiempo que consume la gota de lluvia más alejada en llegar a la sección del puente. Los diferentes métodos para calcularlo se presentan más adelante.

El tiempo de retraso (lag) es:

$$t_r = 0,6 \cdot t_c$$

El tiempo base del hidrograma unitario se calcula como:

$$t_b = 2,67 \cdot t_p$$

En caso de que no existan suficientes datos para definir la duración de la lluvia efectiva (D, en horas) que produce el mayor caudal pico en el hidrograma, se puede determinar, aproximadamente, de la siguiente manera para cuencas grandes ($A > 2 \text{ km}^2$):

$$D = 2 \sqrt{t_c}$$

y se puede tomar igual al tiempo de concentración (t_c) en cuencas pequeñas ($A \leq 2 \text{ km}^2$)

En general, el cálculo del hidrograma de la creciente posee un carácter aproximado. Por tratarse de un modelo lluvia-caudal, inicialmente se determina el valor de la lluvia de diseño, su duración y su distribución en el tiempo y en el espacio. A partir de ella se calcula la lluvia efectiva y, por último, se construye el hidrograma de la creciente producida, considerando las características de la cuenca y aplicando las propiedades del hidrograma unitario.

En general, el cálculo del hidrograma de la creciente posee un carácter aproximado. Por tratarse de un modelo lluvia-caudal, inicialmente se determina el valor de la lluvia de diseño, su duración y su distribución en el tiempo y en el espacio. A partir de ella se calcula la lluvia efectiva y, por último, se construye el hidrograma de la creciente producida, considerando las características de la cuenca y aplicando las propiedades del hidrograma unitario.

El detalle del procedimiento para la creación del hidrograma de diseño es el siguiente.

1. Se calcula el área de la cuenca considerada, la cual se determinó con el apoyo de la información cartográfica del IGAC y el satélite ASTER para la obtención de la elevación, y con la cual se delimita la cuenca.
2. Se utiliza como insumo el valor de las lluvias máximas en 24 horas con diferentes periodos de retorno que fueron seleccionados.
3. La duración de diseño como se trata de una cuenca relativamente pequeña, se adopta una duración de 2,5 horas.
4. A partir del área de la cuenca, se aplica un factor de reducción de 0,95 para representar la distribución espacial de la lluvia en la zona estudiada. Para seleccionar este valor se parte del concepto que una lluvia puntual abarca

hasta unos 25 km², aproximadamente. De esta manera, se obtuvieron los siguientes valores para las lluvias.

Tabla 10. Lluvia en mm para los periodos de retorno ajustados a la cuenca

TR	PRECIPITACIÓN MÁXIMA (mm)
5	107,5115
10	129,8745
25	158,9255
50	180,785
100	203,889

Fuente: Elaboración propia

5. Debido a que la distribución temporal de los aguaceros en cualquier estación es aleatoria, se adopta la siguiente curva que representa bien una condición crítica

Tabla 11. Distribución temporal de la lluvia adoptada

Fracción tiempo	Fracción precipitación
0,0	0,000
0,1	0,040
0,2	0,130
0,3	0,280
0,4	0,490
0,5	0,700
0,6	0,840
0,7	0,920
0,8	0,970
0,9	0,995
1,0	1,000

Fuente: Elaboración propia



Figura 19. Curva de distribución de aguacero seleccionado

Fuente: Elaboración propia

6. Se selecciona el intervalo “D” para todo el período del aguacero menor a la quinta parte del tiempo de concentración, Así, la lluvia anteriormente seleccionada se divide en 10 intervalos de tiempo de duración “D” cada uno.
7. Se definen los valores secuenciales del aguacero de diseño, Inicialmente se seleccionan los incrementos de tiempo “D”, en horas; se registran los porcentajes de cada incremento respecto a la duración de la lluvia total, se escriben los incrementos de la lluvia frente a cada incremento de tiempo, en mm y se calculan los valores acumulados de la lluvia, en mm.
8. Se caracteriza la cobertura vegetal de la cuenca hasta el sitio de estudio y el tipo de suelos superficiales de la cuenca hasta esta sección para evaluar el parámetro CN. El cubrimiento de la vegetación se ilustra en la siguiente tabla.

Tabla 12. Determinación de la cobertura.

DESCRIPCIÓN	PENDIENTE %	PORCENTAJE
Abanico: Área= 70%	3	0,7
Arbustos		0,15
Pastos		0,75
Cultivos		0,08
Vías destapadas		0,02
Planicie: Área= 30%	1	0,3
Arbustos		0,6
Pastos		0,4

Fuente: Elaboración propia

La selección del valor CN en cada caso, se realiza considerando los siguientes cuatro parámetros:

- Tipo de suelo hidrológico
- Uso y tratamiento del suelo
- Combinaciones hidrológicas de suelo y vegetación, y
- Condiciones de humedad antecedente a la lluvia de diseño

La aplicación gráfica de este parámetro se presenta en la siguiente figura.

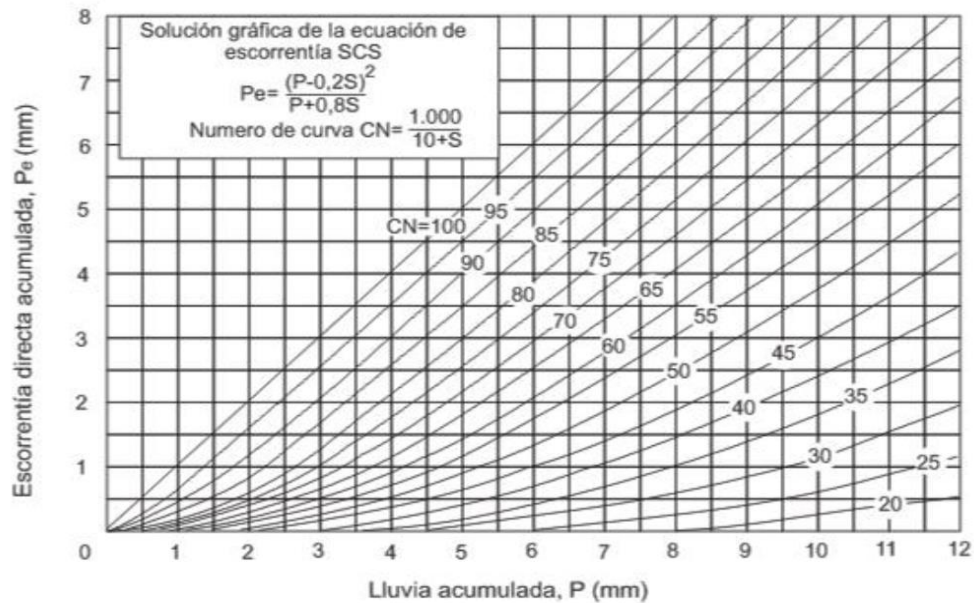


Figura 20. Grafica para determinar el valor de la escorrentía directa utilizando el número de curva CN.

Fuente: (Sanchez)

TIPO DE SUELO HIDROLÓGICO.

Desde el punto de vista de su capacidad de infiltración y para definir el valor CN junto con los otros tres parámetros mencionados, el Soil Conservation Service ha clasificado los suelos en cuatro grupos: A, B, C y D, ordenados según su potencial de escurrimiento (tasa de infiltración para suelos “desnudos” luego de un humedecimiento prolongado, profundidad del nivel freático de invierno, infiltración y permeabilidad del suelo luego del humedecimiento prolongado y profundidad hasta un estrato de permeabilidad muy lenta):

El tipo de material en cada caso particular se obtiene a partir de la información de un estudio de suelos, considerando una clasificación que va desde los tipos “A” de bajo potencial de escorrentía y con altas infiltraciones (suelos arenosos) hasta los de alto potencial de escorrentía o suelos con infiltración muy lenta cuando están muy húmedos (arcillosos) tipos “C”, A continuación se presenta la clasificación establecida por el S.C.S.

“A”, (Potencial de escorrentía mínimo), Suelos que tienen alta tasa de infiltración aun cuando estén muy húmedos, Consistentes en arenas o gravas profundas bien drenados o excesivamente drenados con poco limo y arcilla, lo mismo que loess muy permeables, Esos suelos tienen una alta rata de transmisión de agua.

“B”, (Moderadamente bajo potencial de escorrentía), Suelos con tasas de infiltración moderadas cuando están muy húmedos, Suelos moderadamente profundos a profundos, moderadamente bien drenados a bien drenados, suelos con texturas moderadamente finas a moderadamente gruesas y permeabilidad moderadamente

lenta a moderadamente rápida. Son suelos con ratas de transmisión de agua moderadas, La mayor parte de los suelos arenosos menos profundos que los del grupo A; son menos profundos o menos compactos que los del grupo A, El grupo, en conjunto, posee una infiltración media superior después de haberse mojado completamente.

“C”, (Moderadamente alto potencial de escorrentía), Suelos con infiltración lenta cuando están muy húmedos, Consisten en suelos con estratos que impiden el movimiento del agua hacia abajo; suelos de textura moderadamente fina a fina; suelos con infiltración lenta debido a sales o suelos con lentes de agua moderada, Esos suelos pueden ser pobremente drenados, o bien, moderadamente drenados con estratos de permeabilidad lenta a muy lenta, Comprende los suelos poco profundos y los que contienen mucha arcilla y coloides, aunque menos que los del grupo D, El grupo tiene una infiltración inferior a la promedio después de saturación.

“D”, (Potencial de escorrentía máximo), Suelos con infiltración muy lenta cuando están muy húmedos, Son suelos arcillosos con alto potencial de expansión; suelos con nivel freático alto permanente; suelos con estrato arcilloso superficial; suelos con infiltración muy lenta debido a sales o alcalinos y suelos poco profundos ubicados sobre materiales casi impermeables, Estos suelos tienen una rata de transmisión de agua muy lenta, Incluye a la mayor parte de arcillas expansivas y algunos suelos poco profundos con subhorizontes casi impermeables cerca de la superficie.

La clasificación de los suelos en grupos hidrológicos principales se puede realizar tomando como base el tipo hidrológico a partir de planos de suelos agrícolas, Si no se dispone de esos planos, se debe hacer uso de un buen criterio, Usualmente en una misma cuenca se reportan diferentes tipos de suelos, En ese caso se pueden considerar por separado, indicando el área ocupada por cada uno de ellos y determinar el valor CN individualmente para luego ponderarlos y obtener un CN representativo.

Para efectuar una buena clasificación y definir la respuesta hidrológica de los diferentes suelos, se presenta una lista extensa de suelos agrológicos pertenecientes a los diferentes grupos hidrológicos, En nuestro medio se deben utilizar criterios más generales, dado que aún no se han elaborados listas de este tipo, Por lo anterior, lo usual es aplicar criterios conservadores para compensar la falta de información y evitar errores por defecto.

La clasificación anterior utiliza la premisa de que los suelos con perfiles semejantes en lo que se refiere a su espesor, textura, estructura, contenido de materia orgánica y expansividad por saturación, producen una respuesta semejante ante un aguacero de duración considerable, En la comparación se supone que los suelos están desnudos y que ya han presentado el máximo cambio de volumen por humedad y que la lluvia es superior a la infiltración potencial.

COMBINACIONES HIDROLÓGICAS DE SUELO Y VEGETACIÓN

La combinación (tabla 14) de los grupos de suelos, el uso del suelo y las clases de tratamiento formando complejos hidrológicos del suelo y la vegetación. Este cuadro se utiliza para seleccionar el número de curva CN en función de los parámetros anteriores y considerando una determinada humedad antecedente, como se mostrará adelante. Los números muestran el valor relativo de los complejos como productores directos de escurrimiento. Cuanto más elevado es el número, mayor es el volumen de escurrimiento directo que puede esperarse de un aguacero. Este cuadro se preparó usando datos de cuencas aforadas con suelo y vegetación conocidos. El valor de los aguaceros se utilizó para construir una curva en función del escurrimiento directo para las crecientes anuales y otras avenidas importantes.

Para seleccionar el valor CN más apropiado en cada caso, se representará como una cuenca homogénea por concepto de suelos, de vegetación, de usos y de tratamientos.

CONDICIONES DE HUMEDAD ANTECEDENTE A LA LLUVIA DE DISEÑO

Para seleccionar el valor CN se tiene en cuenta el estado de humedad del suelo previo a la lluvia que se estudia considerando la cantidad de lluvia caída en el período de los cinco (5) días anteriores, estableciéndose tres (3) clases de relaciones con dicha cantidad de lluvia. A continuación, se presenta el cuadro y los valores correspondientes (tabla 8). Las condiciones medias quedan incluidas en la condición II que corresponde al cuadro de curvas de escorrentía para los complejos suelo cobertura (CN) que se presenta más adelante.

Tabla 13. Condiciones de humedad antecedente a la lluvia de diseño

Período inactivo de las plantas	Lluvia acumulada de los 5 días previos al aguacero en consideración
I	00,0 – 12,7 mm
II	12,7 – 28,0 mm
III	más de 28,0 mm
Período de crecimiento de las plantas	
I	00,0 – 35,5 mm
II	35,5 – 53,3 mm
III	más de 53,3 mm

Fuente: Elaboración propia

La probabilidad de que la lluvia conjunta de los cinco días anteriores a un aguacero fuerte supere los 53,3 mm es baja y, además, se considera que aún en ese caso, la saturación no es completa y no alcanza a impermeabilizar completamente la superficie de la cuenca, Por ese motivo se aplica la condición II, la cual es extrema en lo referente a su capacidad de escorrentía directa. La aplicación de este concepto a través del CN se muestra más adelante

DETERMINACIÓN DE LA LLUVIA EFECTIVA.

Este parámetro se calcula aplicando la relación:

$$S' = \frac{(P_e)^2}{Q} - P_e$$

Dado que la escorrentía acumulada “Q”, es la misma lluvia efectiva, Inicialmente se determina la infiltración potencial “S” por medio de la expresión, para lo cual se debe conocer el número de curva CN.

$$S = \frac{1.000}{CN} - 10,0$$

El siguiente cuadro se utiliza para determinar los valores de CN en función de las prácticas agrícolas y condición hidrológica promedio, (condición II),

Tabla 14. Selección del valor CN” considerando diferentes combinaciones hidrológicas de suelo y vegetación

Cobertura y uso del suelo	Tratamiento o práctica	Condición hidrológica	Grupos hidrológicos de A B C D Número de curva (cn)			
Rastroio	Hileras Rectas		77	86	91	94
Cultivos en Hileras	Hileras Rectas	Mala	72	81	88	91
	Hileras Rectas	Buena	67	78	85	89
	Curvas de Nivel	Mala	70	79	84	88
	Curvas de Nivel	Buena	65	75	82	86
	Cur/Niv y Terrazas	Mala	66	74	80	82
	Cur/Niv y Terrazas	Buena	62	71	78	81
Cultivos en Hileras Estrechas	Hileras Rectas	Mala	65	76	84	86
	Hileras Rectas	Buena	63	75	83	87
	Curvas de Nivel	Mala	63	74	82	85
	Curvas de Nivel	Buena	61	73	81	84
	Cur/Niv y Terrazas	Mala	61	72	79	82
	Cur/Niv y Terrazas	Buena	59	70	78	81
Legumbres en Hileras estrechas	Hileras Rectas	Mala	66	77	85	89
	Hileras Rectas	Buena	58	72	81	85
	Curvas de Nivel	Mala	64	75	83	85
	Curvas de Nivel	Buena	55	69	78	83
	Cur/Niv y Terrazas	Mala	63	73	80	83
	Cur/Niv y Terrazas	Buena	51	67	76	80
Pastos de Pastoreo		Mala	68	79	86	89
		Regular	49	69	79	84
		Buena	39	61	74	80
	Curvas de Nivel	Mala	47	87	81	88
	Curvas de Nivel	Regular	25	59	75	83
	Curvas de Nivel	Buena	6	35	70	79
Pastos de Corte		Buena	30	58	71	78
Bosque		Mala	45	66	77	83
		Regular	36	60	73	79
		Buena	25	55	70	77

Cobertura y uso del suelo	Tratamiento o práctica	Condición hidrológica	Grupos hidrológicos de			
			A	B	C	D
Solares		-----	59	74	82	86
Vías destapadas 2/		-----	72	82	87	89
Pavimentos		-----	74	84	90	92

Fuente: Elaboración propia

La condición hidrológica que hace referencia al grado de infiltración corresponde a la siguiente interpretación:

Buena	Para alta capacidad de infiltración, bajo potencial de escorrentía,
Regular	Para regular capacidad de infiltración, regular potencial de escorrentía,
Mala	Para baja capacidad de infiltración, alto potencial de escorrentía.

Para la condición hidrológica se hace referencia al grado de cobertura vegetal y puede establecerse de la siguiente manera:

Buena	Para cobertura de más del 75% del área
Regular	Con cobertura entre 50% y 75%
Mala	Cobertura menor del 50%

Al determinar el valor CN, se debe considerar la pendiente media de la cuenca, diferenciando entre alta, media o baja, Después de haber determinado el valor “CN” para la condición II, se puede definir el correspondiente “CN” para la condición I o para la condición III, de acuerdo con las correlaciones de la tabla siguiente.

Tabla 15. Valores de CN para diferentes condiciones de humedad antecedente

CN para condiciones			CN para condiciones continuación		
II	I	III	II	I	III
100	100	100	74	55	88
99	97	100	73	54	87
98	94	99	72	53	86
97	91	99	71	52	86
96	89	99	70	51	85
95	87	98	69	50	84
94	85	98	68	48	84
93	83	98	67	47	83
92	81	97	66	46	82

CN para condiciones			CN para condiciones continuación		
II	I	III	II	I	III
91	80	97	65	45	82
90	78	96	64	44	81
89	76	96	63	43	80
88	75	95	62	42	79
87	73	95	61	41	78
86	72	94	60	40	78
85	70	94	59	39	77
84	68	93	58	38	76
83	67	93	57	37	75
82	66	92	56	36	75
81	64	92	55	35	74
80	63	91	54	34	73
79	72	91	53	33	72
78	60	90	52	32	71
77	59	89	51	31	70
76	58	89	50	31	70
75	57	88	49	30	69

Fuente: Elaboración propia

9. Con los datos anteriores se selecciona el número de curva CN que representa el complejo hidrológico suelo-cubierta vegetal de la cuenca, de acuerdo con el procedimiento mostrado. El valor de curva número CN para la condición de humedad antecedente II se determinó en función del tipo de suelo, cobertura vegetal y relieve. Estas características fueron determinadas mediante el análisis de la información mostrada anteriormente, apoyada en el estudio de fotografías y visitas de campo y se ilustran en la siguiente tabla.

Tabla 16. Determinación del cubrimiento vegetal y del valor CN en la cuenca

DESCRIPCIÓN	PENDIENTE %	PORCENTAJE	GRUPO DE SUELO	HUMEDAD ANTECEDENTE	CN
Abanico: Área= 70%	10	0,7	B	Condición II	
Arbustos		0,15	B	Condición II	86
Pastos		0,75	B	Condición II	79
Cultivos		0,08	B	Condición II	84
Vías destapadas		0,02	B	Condición II	87
Planicie: Área= 30%	1	0,3	B	Condición II	
Arbustos		0,6	B	Condición II	86
Pastos		0,4	B	Condición II	74
		Valor final			81

Fuente: Elaboración propia

10. Se estima la lluvia efectiva, es decir, el escurrimiento directo con las siguientes fórmulas, usando el valor “CN” seleccionado anteriormente, que representa el complejo hidrológico suelo-cubierta vegetal para la condición más apropiada.

$$Q = \frac{(P - 5,08S)^2}{P + 20,32S}$$

$$S = \frac{1.000}{CN} - 10,0$$

Q: Lluvia efectiva o escorrentía acumulada, en mm,

P: Precipitación total del evento, en mm,

S: Infiltración potencial, en mm,

Para efectuar este cálculo por intervalos, se analizan los incrementos de tiempo “D” (en horas) y los incrementos de la lluvia frente a cada incremento de tiempo, en mm; se determinan los valores acumulados de la lluvia, en mm; se indican los valores acumulados de la lluvia efectiva (escurrimiento) en mm, los cuales se calculan con la fórmula:

$$Q = \frac{(P - 5,08S)^2}{P + 20,32S}$$

El valor “S” se determina con la siguiente relación, utilizando el valor “CN” previamente determinado,

$$S = \frac{1.000}{CN} - 10,0$$

Se consignan los incrementos de la lluvia efectiva (escurrimiento) en mm, para cada intervalo de tiempo y se tabulan los incrementos de las pérdidas en mm.

11. Se calcula la longitud del cauce principal y el desnivel del mismo hasta la sección mencionada.

12. Se determina el tiempo de concentración de la cuenca utilizando la pendiente longitudinal y los desniveles correspondientes aplicando los siguientes métodos.

- La fórmula de Kirpich:

$$t_c = 4 \left(\frac{L}{\sqrt{S}} \right)^{0.77} \quad (\text{Minutos})$$

- La fórmula de California:

$$t_c = 60(L^3/H)^{0,385}$$

- La fórmula del US., Corps of Engineers:

$$t_c = 7,56 \cdot L^{0,76} \cdot S^{-0,19}$$

- La fórmula de Chow:

$$t_c = 7,38 \cdot L^{0,64} \cdot S^{-0,32}$$

t_c – tiempo de concentración, en minutos

L - longitud del cauce principal, en km

H – Caída del río desde su nacimiento hasta el sitio inferior de la subcuenca, en m

S - pendiente longitudinal del cauce, en m/m.

Tabla 17. Calculo de tiempo de concentración.

	PARÁMETRO	UNIDAD	VALOR
DATOS CUENCA	ÁREA	Km ²	0,24
	LONGITUD	Km	0,385
	COTA SUPERIOR	m.s.n.m.	36
	COTA INFERIOR	m.s.n.m.	32
	DELTA H	m	4
	PENDIENTE	%	0,002631579
TIEMPOS DE CONCENTRACIÓN	CALIFORNIA	minuto	6,55
	US CORPS	minuto	5,950
	CHOW	minuto	10,88
	KIRPICH	minuto	10,450
	T MEDIO	minuto	8,4575
	T MEDIO	horas	0,1409

Fuente: Elaboración propia

Finalmente se adopta el valor correspondiente al promedio entre las fórmulas presentes.

13. Se calculan los hidrogramas triangulares para cada incremento de escurrimiento en horas para el intervalo de tiempo D seleccionado, se calcula el tiempo pico t_p , el tiempo base t_b , y el caudal máximo q_p para 1 mm de escorrentía, es decir, de lluvia efectiva.

Se calculan los hidrogramas triangulares en la cuenca para cada incremento de escurrimiento en horas.

Para el intervalo de tiempo “D” seleccionado, se calcula el tiempo al pico, t_p , el tiempo base, t_b y el caudal máximo, q_p para 1 mm de escorrentía, es decir, de lluvia efectiva.

Se utilizan las siguientes ecuaciones:

El tiempo al pico: $t_p = \frac{D}{2} + 0,6 \cdot t_c$ horas

El tiempo base del hidrograma unitario: $t_b = 2,67 \cdot t_p$ horas

El tiempo de retraso: $t_r = 0,6 \cdot t_c$ horas

El caudal pico del hidrograma para un milímetro de lluvia efectiva es:

$$q_p = \frac{0,2083 \cdot A}{t_p} \text{ m}^3/\text{s}/\text{mm}$$

t_c – tiempo de concentración, horas

D – duración de cada intervalo de la lluvia, horas

q_p – caudal pico del hidrograma triangular, en $\text{m}^3/\text{s}/\text{mm}$

A – área de la cuenca aferente, en km^2

Tabla 18. Resumen de los tiempo calculados.

PARÁMETRO	UNIDAD	VALOR
DURACIÓN LLUVIA EFECTIVA	horas	2,50347374
TIEMPO PICO	horas	1,08454
TIEMPO BASE	horas	5,85222345
TIEMPO DE RETRASO	horas	0,94010712
CAUDAL PICO	$\text{m}^3/\text{s}/\text{mm}$	0,02398

Fuente: Elaboración propia

14. Se determinan los caudales pico o máximos de los hidrogramas triangulares para cada incremento de escurrimiento. Estos máximos se obtienen multiplicando el caudal máximo de 1 mm de escurrimiento (calculado en el paso anterior) por el incremento de lluvia efectiva (escurrimiento). Se parte de los incrementos de tiempo “D”, (en horas) definidos anteriormente y de los incrementos de la lluvia efectiva (escurrimiento) en mm. Se consideran los valores de los caudales máximos (caudales pico) de cada uno de los hidrogramas unitarios en m³/s/mm, es decir, caudales producidos por 1 mm de lluvia efectiva, determinados de manera idéntica para cada intervalo de tiempo con la ecuación

$$q_p = \frac{0,2083 \cdot A}{t_p}$$

q_p – caudal pico del hidrograma triangular, en m³/s/mm

A – área de la cuenca aferente, en km²

t_p – tiempo al pico del hidrograma unitario triangular, en horas

Se tabulan los caudales pico producidos por cada incremento de lluvia efectiva en m³/s multiplicando los incrementos de la lluvia efectiva por sus caudales. Se indica la hora en la cual se inicia cada uno de los hidrogramas incrementales, en horas. Se inicia con la hora cero y, posteriormente, se va sumando el incremento de tiempo “D”. También se anota la hora en la cual se presenta el caudal pico de cada uno de los hidrogramas incrementales, lo cual se hace sumando a la hora inicial el tiempo al pico en horas. Se registra la hora en la cual termina cada uno de los hidrogramas incrementales, para lo cual se suma a los tiempos iniciales el tiempo base en horas.

15. Se construye el hidrograma final de la creciente resultante de la cuenca, con el siguiente procedimiento.
- Se dibujan los hidrogramas triangulares de los incrementos.
 - Se suman las ordenadas de los hidrogramas triangulares en varias verticales para obtener diferentes puntos que unidos originan el hidrograma final. En muchos casos, sólo es necesario sumar las ordenadas en las horas que representan el principio, el máximo y el final de cada hidrograma de los incrementos.

HIDROGRAMAS OBTENIDOS DE LAS CRECIENTES ANALIZADAS.

Siguiendo el procedimiento que fue detallado en la sección anterior, a continuación, se presentan los hidrogramas para los periodos de retorno de 5, 10, 25, 50 y 100 años para el área de estudio.

La siguiente tabla presenta los valores de las crecientes obtenidas.

Tabla 19. Resumen de los valores de crecientes para los periodos de retorno seleccionados

Periodo de retorno	Creciente (m ³ /s)
tr5	2,58
tr10	3,11
tr25	3,81
tr50	4,34
tr100	4,89

Fuente: Elaboración propia

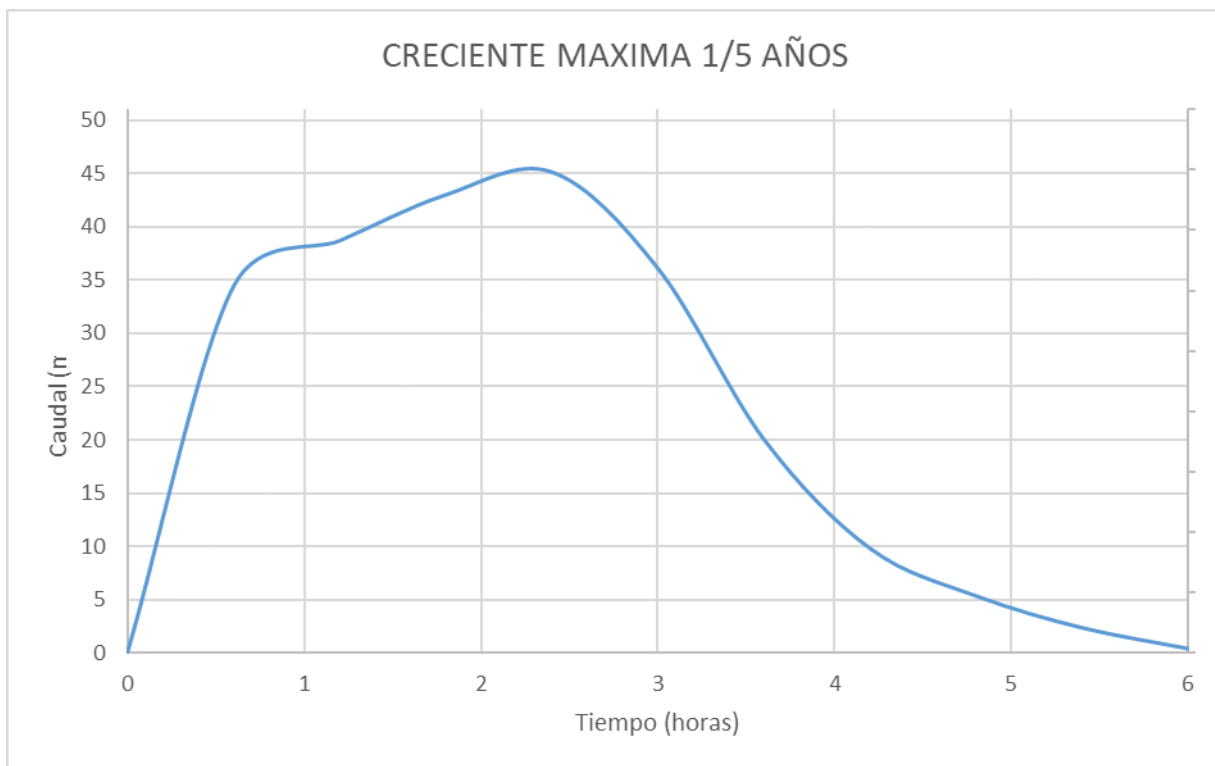


Figura 21. Hidrograma de la crecida con un periodo de retorno de 5 años

Fuente: Elaboración propia

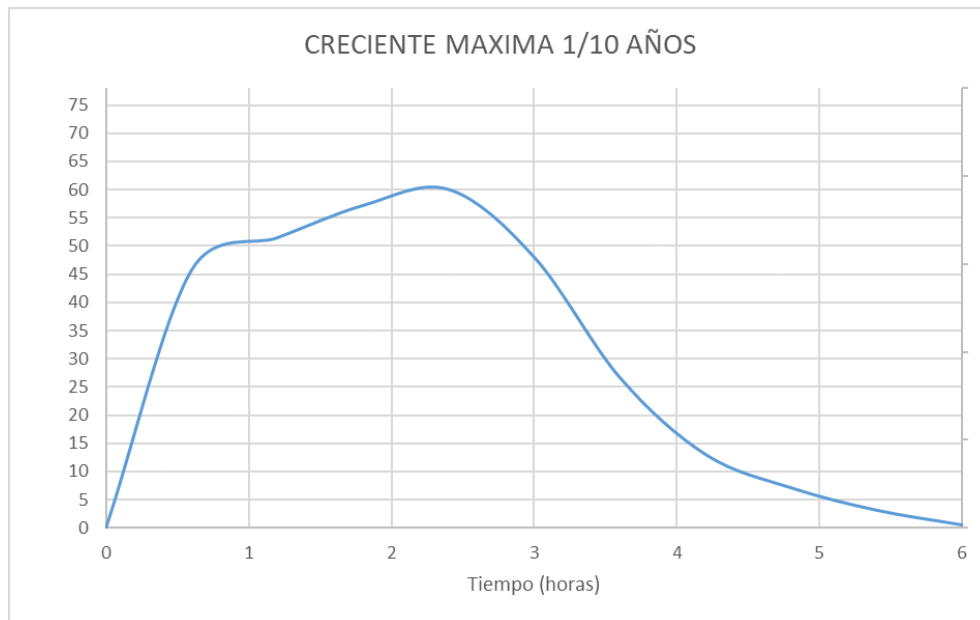


Figura 22. Hidrograma de la creciete con un periodo de retorno de 10 años

Fuente: Elaboración propia

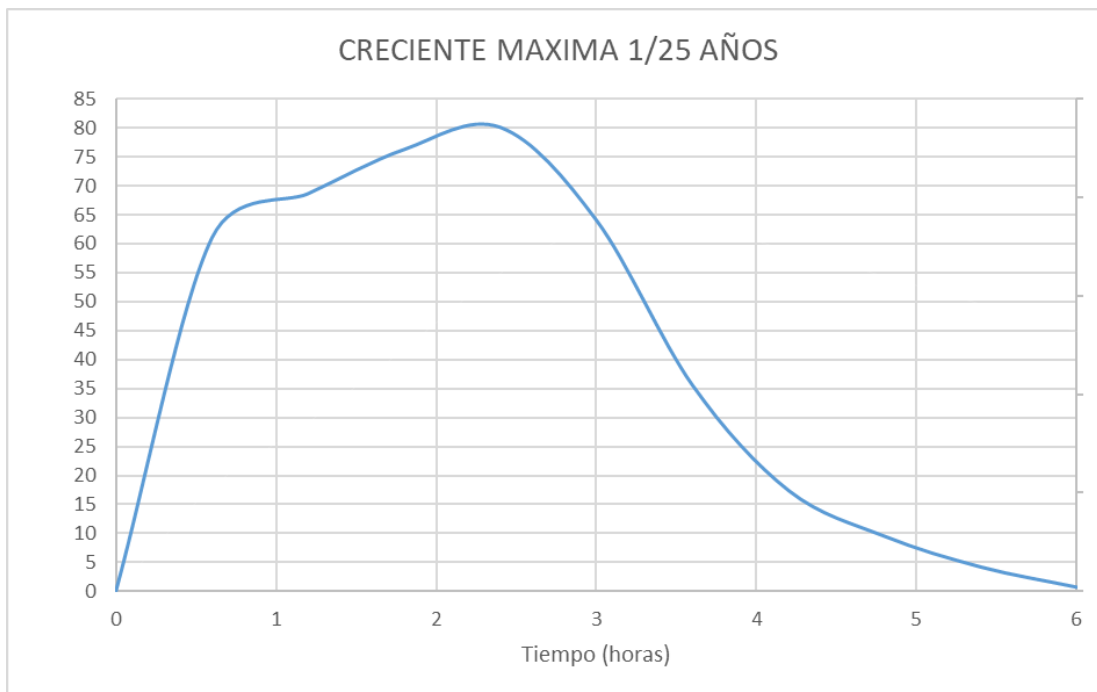


Figura 23. Hidrograma de la creciete con un periodo de retorno de 25 años

Fuente: Elaboración propia

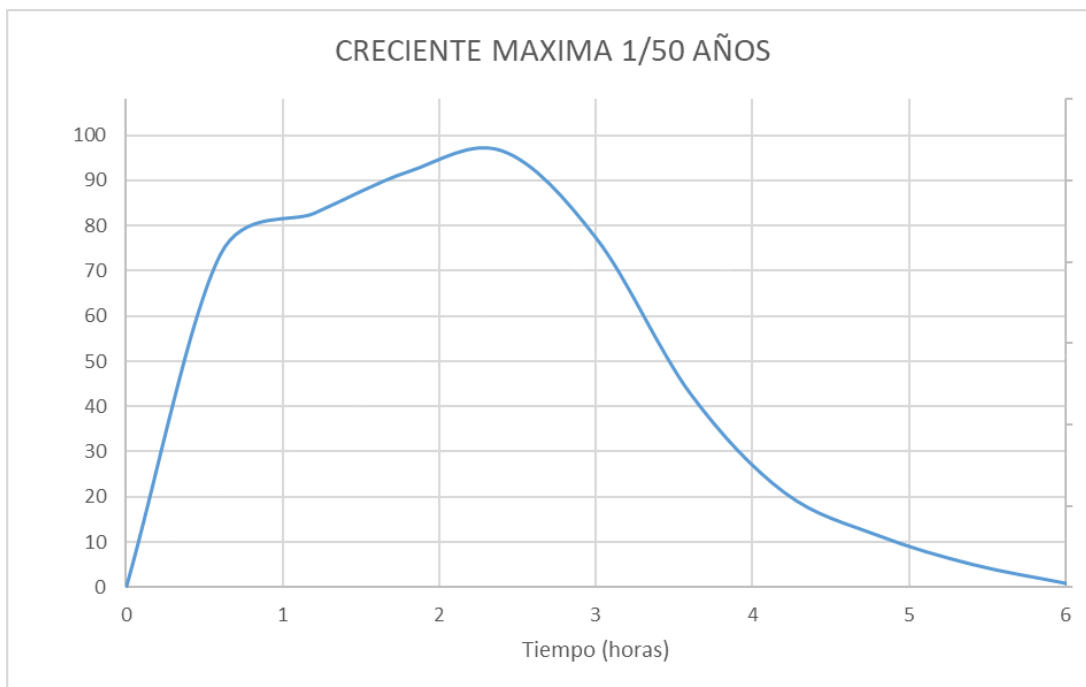


Figura 24. Hidrograma de la creciente con un periodo de retorno de 50 años

Fuente: Elaboración propia

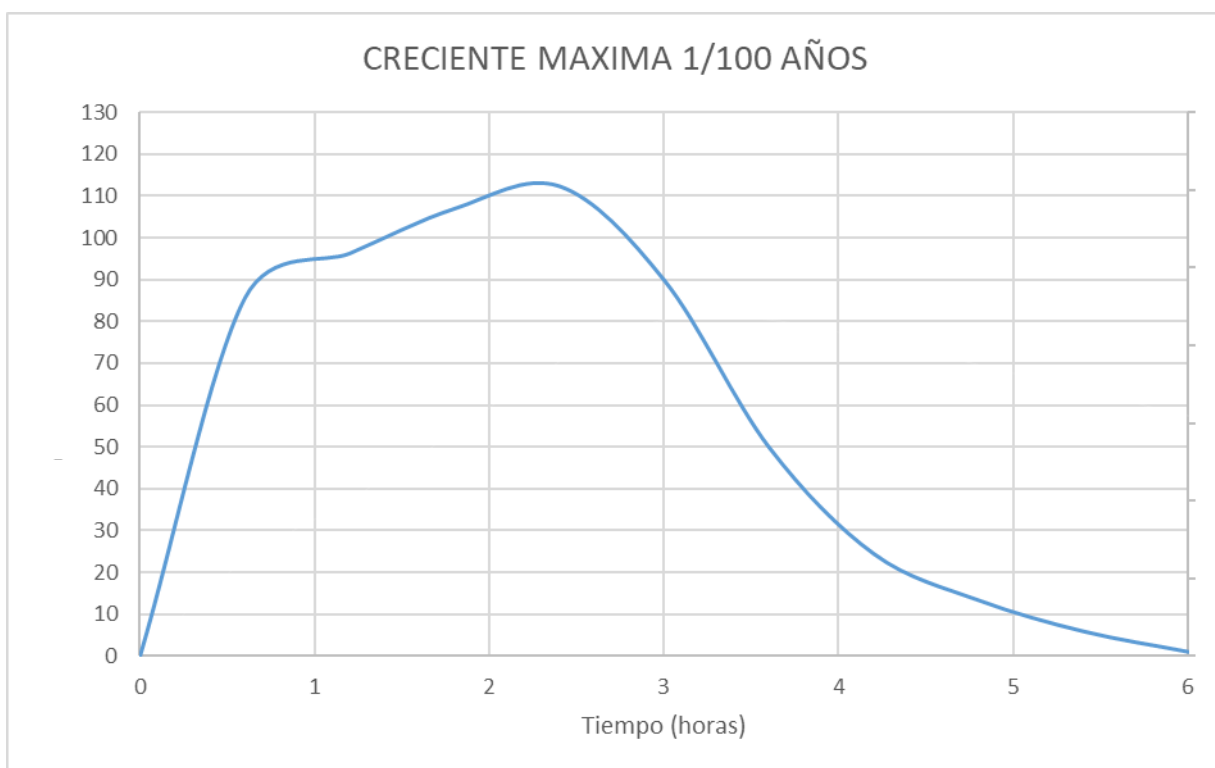


Figura 25. Hidrograma de la creciente con un periodo de retorno de 100 años

Fuente: Elaboración propia

ESTUDIO HIDRÁULICO.

El objetivo principal de la modelación es la definición de las condiciones de las crecientes en el cauce principal y la identificación de las causas que se presentan en el tramo de estudio, específicamente donde se proyectan las obras.

La determinación de los niveles de la superficie del agua se efectúa mediante la modelación hidráulica de la corriente hídrica, la cual consiste en la definición del perfil de la superficie del agua a lo largo de la corriente para la crecida de diseño y el análisis de las velocidades de la corriente, de la pendiente de la línea de energía y del estado del flujo.

A partir del valor de la crecida de diseño se define el perfil de la lámina de agua a lo largo de la corriente, en el tramo de estudio. Los datos de este perfil representan los niveles máximos del agua, el área hidráulica, el ancho superior de la lámina y la velocidad del flujo. Estos datos, junto con los demás parámetros de la evaluación, permitirán concepcuar sobre las posibilidades de inundación de la zona descrita anteriormente.

En el presente numeral se presentan los estudios hidráulicos realizados y los resultados obtenidos, incluyendo las recomendaciones prácticas para el control de las inundaciones. Como se dijo, se analizan crecientes con diferentes períodos de retorno: de 5, 10, 25, 50 y 100 años.

Para generar la información necesaria en los cálculos, se tomó como base el estudio topográfico. A partir del plano topográfico se dibujaron secciones transversales, determinando la pendiente longitudinal y evaluando el coeficiente de Manning con base en la información de suelo y cobertura vegetal. Con estos datos se corrió el programa HEC RAS y se obtuvieron los parámetros hidráulicos mencionados.

Con este programa los perfiles del agua se determinan de una sección a otra, resolviendo la ecuación de energía mediante el procedimiento estándar por pasos.

La ecuación de energía utilizada es la siguiente:

$$WS_2 + \frac{\alpha_2 V_2^2}{2g} = WS_1 + \frac{\alpha_1 V_1^2}{2g} + h_e$$

WS_1, WS_2 - son los niveles del agua en las secciones transversales 1 y 2.

V_1, V_2 - son las velocidades medias del flujo en las secciones 1 y 2.

α_1, α_2 - son los coeficientes de corrección a la velocidad

g - es la aceleración de la fuerza de gravedad

h_e - son las pérdidas de energía.

Las pérdidas de energía entre dos secciones se componen de pérdidas por fricción y pérdidas por contracción o expansión. Este valor se determina de la siguiente manera:

$$h_e = L\bar{S}_f + C \left| \frac{\alpha_2 V_2^2}{2g} + \frac{\alpha_1 V_1^2}{2g} \right|$$

L - es la longitud entre secciones

$\bar{S}_f$ - es la pendiente de fricción (motriz) entre dos secciones

C - es el coeficiente de pérdidas por expansión o contracción.

Para cada sección, se aplica la fórmula de Manning:

$$Q = \frac{AR^{2/3}S^{1/2}}{n}$$

Q - es el caudal de diseño

A - es el área de la sección transversal

S - es la pendiente longitudinal del cauce

n - es el coeficiente de rugosidad de Manning

Con el fin de representar lo mejor posible la resistencia hidráulica de la corriente hídrica, se analizó el material del lecho, los posibles obstáculos en el propio cauce, las condiciones de las laderas, la presencia de vegetación y todos los demás parámetros que influyen, el cual se expresa mediante el coeficiente de rugosidad de Manning.

El coeficiente de resistencia se determinó con la siguiente expresión, similar a la de Cowan (Ochoa Tomás. 2002):

$$n = (n_0 + n_1 + n_2 + n_3 + n_4 + n_5 + n_6)m_1 \cdot m_2$$

n0 - Valor de n para un río recto y prismático que considera sólo la textura del lecho

n1 - Valor de n por efectos del relieve del lecho creado por las microformas

n2 - Valor de n debido al tamaño y a la forma de la sección transversal

n3 - Valor de n debido a las irregularidades de la sección transversal

n4 - Valor de n debido a las variaciones de tamaño y forma de la sección

n_5 - Valor de n asociado a las obstrucciones al flujo

n_6 - Valor de n por vegetación

m_1 - Factor correctivo relacionado con el transporte de sedimentos

m_2 - Factor correctivo por la presencia de curvas o meandros en planta

El canal presenta un cauce principal relativamente libre de obstáculos y definido, con unas bancas o llanuras de inundación con presencia de árboles de diferentes tipos, tanto en la margen izquierda como la derecha, los cuales constituyen un obstáculo de consideración al flujo.

En este sector se aplicaron los siguientes valores de la resistencia hidráulica para el cauce principal:

$n_0 = 0,016$ Materiales finos

$n_1 = 0,002$ Con algunas microformas

$n_2 = 0,003$ Forma trapezoidal relativamente uniforme

$n_3 = 0,002$ Sección regular

$n_4 = 0,002$ Variaciones leves en la forma de la sección

$n_5 = 0,002$ Obstrucciones ocasionales

$n_6 = 0,006$ Presencia de vegetación

$m_1 = 1,02$ Influencia moderada de los sedimentos en suspensión

$m_2 = 1,10$ Influencia moderada de curvas

Resistencia hidráulica total en el cauce principal (n)

$$n = (n_0 + n_1 + n_2 + n_3 + n_4 + n_5 + n_6) m_1 \cdot m_2$$

$$n = (0,016 + 0,002 + 0,003 + 0,002 + 0,002 + 0,002 + 0,006) \cdot 1,02 \cdot 1,10 = 0,058$$

$$n = 0,058 \text{ en el cauce principal}$$

Resistencia hidráulica total en la llanura de inundación (n)

Debido a que en la llanura de inundación existe una vegetación relativamente densa, se eleva el valor del coeficiente de resistencia hidráulica, de la siguiente manera:

En este mismo sector se aplicaron los siguientes valores de la resistencia hidráulica para la llanura de inundación:

$$n_0 = 0,016 \text{ Materiales finos}$$

$$n_1 = 0,002 \text{ Con algunas microformas}$$

$$n_2 = 0,006 \text{ Forma trapezoidal poco uniforme}$$

$$n_3 = 0,007 \text{ Sección irregular}$$

$$n_4 = 0,005 \text{ Variaciones en la forma de la sección}$$

$$n_5 = 0,008 \text{ Obstrucciones moderadas}$$

$$n_6 = 0,02 \text{ Presencia frecuente de vegetación}$$

$$m_1 = 1,02 \text{ Influencia moderada de los sedimentos en suspensión}$$

$$m_2 = 1,10 \text{ Influencia moderada de curvas}$$

Resistencia hidráulica total en la llanura de inundación (n)

$$n = (n_0 + n_1 + n_2 + n_3 + n_4 + n_5 + n_6) m_1 \cdot m_2$$

$$n = (0,016 + 0,002 + 0,006 + 0,007 + 0,005 + 0,008 + 0,02) \cdot 1,02 \cdot 1,10 = 0,061$$

$$n = 0,061 \text{ en la llanura de inundación}$$

RESULTADOS DE LA MODELACIÓN.

Con la modelación se presentan los resultados para el área del proyecto para periodos de retorno entre 5, 10, 25, 50 y 100 años. Los resultados de la modelación para cada sección transversal considerada.

Tabla 20 Características geométricas e hidráulicas del canal para periodos de retorno de 5, 10,25, 50 y 100 años.

[illegible]

CÁLCULO HIDRÁULICO PARA LAS MODELACIONES DE LAS SECCIONES DEL CANAL CON PERIODOS DE RETORNO DE 5,10, 25, 50 Y 100 AÑOS, RESULTADOS OBTENIDOS CON HEC RAS.											
Sección de control	Perfil	Caudal	Elevaciones				Características Hidráulicas				
			fondo del cauce	superficie del agua	Altura crítica	Línea de energía	Pendiente de la línea de gradiente de energía	Velocidad media	Área hidráulica de la sección	ancho superficial	Numero de Froude
		(m3/s)	(m)	(m)	(m)	(m)	(m/m)	(m/s)	(m2)	(m)	
410	TR 5	47.17	47.16	0.01	0.01	0		2.58		7.24	0.27
410	TR10	47.27	47.25	0.01	0.01	0		3.11		7.48	0.29
410	TR25	47.37	47.35	0.02	0.02	0		3.81		7.76	0.31
410	TR 50	47.45	47.43	0.02	0.02	0		4.34		7.95	0.32
410	TR100	47.52	47.5	0.02	0.02	0		4.89		8.14	0.33
400	TR 5	47.16	47.15	0.01	0.01	0		2.58		7.25	0.26
400	TR10	47.25	47.24	0.01	0.01	0		3.11		7.49	0.28
400	TR25	47.36	47.34	0.02	0.02	0		3.81		7.76	0.3
400	TR 50	47.43	47.41	0.02	0.02	0		4.34		7.95	0.31
400	TR100	47.5	47.48	0.02	0.02	0		4.89		8.14	0.33
390	TR 5	47.15	47.13	0.01	0.01	0		2.58		7.24	0.26
390	TR10	47.24	47.22	0.01	0.02	0		3.11		7.47	0.28
390	TR25	47.34	47.32	0.02	0.02	0		3.81		7.74	0.3
390	TR 50	47.41	47.39	0.02	0.02	0		4.34		7.93	0.32
390	TR100	47.48	47.46	0.02	0.02	0		4.89		8.12	0.33
380	TR 5	47.13	47.12	0.01	0.02	0		2.58		7.23	0.27
380	TR10	47.22	47.21	0.01	0.02	0		3.11		7.47	0.29
380	TR25	47.32	47.31	0.02	0.02	0		3.81		7.74	0.31
380	TR 50	47.4	47.38	0.02	0.02	0		4.34		7.93	0.32
380	TR100	47.47	47.45	0.02	0.02	0		4.89		8.11	0.34
370	TR 5	47.12	47.1	0.01	0.02	0		2.58		7.23	0.27
370	TR10	47.2	47.19	0.02	0.02	0		3.11		7.46	0.29
370	TR25	47.31	47.29	0.02	0.02	0		3.81		7.73	0.31
370	TR 50	47.38	47.36	0.02	0.02	0		4.34		7.92	0.33
370	TR100	47.45	47.43	0.02	0.02	0		4.89		8.1	0.34
360	TR 5	47.1	47.09	0.01	0.02	0		2.58		7.23	0.28
360	TR10	47.19	47.17	0.01	0.02	0		3.11		7.46	0.3
360	TR25	47.29	47.28	0.02	0.02	0		3.81		7.73	0.33
360	TR 50	47.36	47.34	0.02	0.02	0		4.34		7.91	0.34
360	TR100	47.43	47.41	0.02	0.02	0		4.89		8.09	0.35
350	TR 5	47.09	47.07	0.01	0.02	0		2.58		7.23	0.28

CALCULO HIDRÁULICO PARA LAS MODELACIONES DE LAS SECCIONES DEL CANAL CON PERIODOS DE RETORNO DE 5,10, 25, 50 Y 100 AÑOS, RESULTADOS OBTENIDOS CON HEC RAS.											
Sección de control	Perfil	Caudal	Elevaciones				Características Hidráulicas				
			fondo del cauce	superficie del agua	Altura crítica	Línea de energía	Pendiente de la línea de gradiente de energía	Velocidad media	Área hidráulica de la sección	ancho superficial	Numero de Froude
		(m3/s)	(m)	(m)	(m)	(m)	(m/m)	(m/s)	(m2)	(m)	
350	TR10	47.17	47.16	0.02	0.02	0		3.11		7.46	0.3
350	TR25	47.28	47.26	0.02	0.02	0		3.81		7.73	0.33
350	TR 50	47.35	47.33	0.02	0.02	0		4.34		7.91	0.34
350	TR100	47.42	47.4	0.02	0.02	0		4.89		8.09	0.35
340	TR 5	47.07	47.06	0.01	0.02	0		2.58		7.21	0.29
340	TR10	47.16	47.14	0.02	0.02	0		3.11		7.44	0.31
340	TR25	47.26	47.24	0.02	0.02	0		3.81		7.71	0.34
340	TR 50	47.33	47.31	0.02	0.02	0		4.34		7.89	0.35
340	TR100	47.4	47.38	0.02	0.02	0		4.89		8.07	0.36
330	TR 5	47.05	47.04	0.01	0.02	0		2.58		7.2	0.29
330	TR10	47.14	47.13	0.02	0.02	0		3.11		7.43	0.32
330	TR25	47.24	47.23	0.02	0.02	0		3.81		7.69	0.34
330	TR 50	47.31	47.29	0.02	0.02	0		4.34		7.88	0.36
330	TR100	47.38	47.36	0.02	0.02	0		4.89		8.05	0.37
320	TR 5	47.04	47.03	0.01	0.02	0		2.58		7.2	0.29
320	TR10	47.13	47.11	0.02	0.02	0		3.11		7.42	0.32
320	TR25	47.23	47.21	0.02	0.02	0		3.81		7.68	0.35
320	TR 50	47.3	47.28	0.02	0.02	0		4.34		7.86	0.36
320	TR100	47.36	47.34	0.02	0.02	0		4.89		8.04	0.37
310	TR 5	47.02	47.01	0.01	0.02	0		2.58		7.2	0.29
310	TR10	47.11	47.09	0.02	0.02	0		3.11		7.42	0.32
310	TR25	47.21	47.19	0.02	0.02	0		3.81		7.68	0.35
310	TR 50	47.28	47.26	0.02	0.02	0		4.34		7.86	0.36
310	TR100	47.34	47.32	0.02	0.02	0		4.89		8.03	0.37
300	TR 5	47.01	46.99	0.01	0.02	0		2.58		7.16	0.3
300	TR10	47.09	47.08	0.02	0.02	0		3.11		7.38	0.33
300	TR25	47.19	47.17	0.02	0.02	0		3.81		7.64	0.35
300	TR 50	47.26	47.24	0.02	0.02	0		4.34		7.81	0.36
300	TR100	47.33	47.3	0.02	0.02	0		4.89		7.99	0.37
290	TR 5	46.99	46.98	0.01	0.02	0		2.58		7.17	0.31
290	TR10	47.07	47.06	0.02	0.02	0		3.11		7.38	0.34

CALCULO HIDRÁULICO PARA LAS MODELACIONES DE LAS SECCIONES DEL CANAL CON PERIODOS DE RETORNO DE 5,10, 25, 50 Y 100 AÑOS, RESULTADOS OBTENIDOS CON HEC RAS.											
Sección de control	Perfil	Caudal	Elevaciones				Características Hidráulicas				
			fondo del cauce	superficie del agua	Altura crítica	Línea de energía	Pendiente de la línea de gradiente de energía	Velocidad media	Área hidráulica de la sección	ancho superficial	Numero de Froude
		(m3/s)	(m)	(m)	(m)	(m)	(m/m)	(m/s)	(m2)	(m)	
290	TR25	47.17	47.15	0.02	0.02	0		3.81		7.64	0.36
290	TR 50	47.24	47.22	0.02	0.02	0		4.34		7.81	0.38
290	TR100	47.31	47.28	0.02	0.02	0		4.89		7.98	0.39
280	TR 5	46.97	46.96	0.01	0.02	0		2.58		7.15	0.31
280	TR10	47.06	47.04	0.02	0.02	0		3.11		7.37	0.35
280	TR25	47.15	47.14	0.02	0.02	0		3.81		7.62	0.37
280	TR 50	47.22	47.2	0.02	0.02	0		4.34		7.79	0.38
280	TR100	47.29	47.26	0.02	0.02	0		4.89		7.96	0.4
270	TR 5	46.96	46.94	0.01	0.02	0		2.58		7.15	0.32
270	TR10	47.04	47.02	0.02	0.02	0		3.11		7.36	0.34
270	TR25	47.14	47.12	0.02	0.02	0		3.81		7.61	0.37
270	TR 50	47.2	47.18	0.02	0.02	0		4.34		7.78	0.38
270	TR100	47.27	47.24	0.02	0.02	0		4.89		7.95	0.39
260	TR 5	46.94	46.92	0.01	0.02	0		2.58		7.12	0.31
260	TR10	47.02	47	0.02	0.02	0		3.11		7.33	0.33
260	TR25	47.12	47.1	0.02	0.02	0		3.81		7.58	0.36
260	TR 50	47.18	47.16	0.02	0.02	0		4.34		7.74	0.37
260	TR100	47.25	47.22	0.02	0.02	0		4.89		7.91	0.38
250	TR 5	46.92	46.91	0.01	0.02	0		2.58		7.12	0.31
250	TR10	47	46.98	0.02	0.02	0		3.11		7.33	0.33
250	TR25	47.1	47.08	0.02	0.02	0		3.81		7.57	0.36
250	TR 50	47.16	47.14	0.02	0.02	0		4.34		7.74	0.37
250	TR100	47.22	47.2	0.02	0.02	0		4.89		7.9	0.39
240	TR 5	46.9	46.89	0.01	0.02	0		2.58		7.1	0.32
240	TR10	46.98	46.97	0.02	0.02	0		3.11		7.3	0.34
240	TR25	47.08	47.06	0.02	0.02	0		3.81		7.54	0.37
240	TR 50	47.14	47.12	0.02	0.02	0		4.34		7.7	0.38
240	TR100	47.2	47.18	0.03	0.02	0		4.89		7.86	0.39
230	TR 5	46.88	46.87	0.02	0.02	0		2.58		7.08	0.33
230	TR10	46.96	46.94	0.02	0.02	0		3.11		7.29	0.35
230	TR25	47.05	47.03	0.02	0.02	0		3.81		7.52	0.37

CALCULO HIDRÁULICO PARA LAS MODELACIONES DE LAS SECCIONES DEL CANAL CON PERIODOS DE RETORNO DE 5,10, 25, 50 Y 100 AÑOS, RESULTADOS OBTENIDOS CON HEC RAS.											
Sección de control	Perfil	Caudal	Elevaciones				Características Hidráulicas				
			fondo del cauce	superficie del agua	Altura crítica	Línea de energía	Pendiente de la línea de gradiente de energía	Velocidad media	Área hidráulica de la sección	ancho superficial	Numero de Froude
		(m3/s)	(m)	(m)	(m)	(m)	(m/m)	(m/s)	(m2)	(m)	
230	TR 50	47.12	47.09	0.02	0.02	0		4.34		7.68	0.38
230	TR100	47.18	47.15	0.03	0.02	0		4.89		7.84	0.4
220	TR 5	46.86	46.85	0.02	0.02	0		2.58		7.05	0.33
220	TR10	46.94	46.92	0.02	0.02	0		3.11		7.25	0.35
220	TR25	47.03	47.01	0.02	0.02	0		3.81		7.48	0.37
220	TR 50	47.09	47.07	0.02	0.02	0		4.34		7.63	0.39
220	TR100	47.16	47.13	0.03	0.02	0		4.89		7.79	0.4
210	TR 5	46.84	46.83	0.02	0.02	0		2.58		7.05	0.34
210	TR10	46.92	46.9	0.02	0.02	0		3.11		7.24	0.36
210	TR25	47.01	46.99	0.02	0.02	0		3.81		7.47	0.38
210	TR 50	47.07	47.05	0.02	0.03	0		4.34		7.62	0.39
210	TR100	47.13	47.1	0.03	0.03	0		4.89		7.78	0.41
200	TR 5	46.82	46.81	0.02	0.02	0		2.58		7	0.35
200	TR10	46.9	46.88	0.02	0.02	0		3.11		7.19	0.37
200	TR25	46.99	46.96	0.02	0.03	0		3.81		7.41	0.39
200	TR 50	47.05	47.02	0.03	0.03	0		4.34		7.57	0.4
200	TR100	47.1	47.08	0.03	0.03	0		4.89		7.72	0.42
190	TR 5	46.8	46.78	0.02	0.02	0		2.58		6.99	0.36
190	TR10	46.87	46.85	0.02	0.02	0		3.11		7.18	0.37
190	TR25	46.96	46.94	0.02	0.03	0		3.81		7.4	0.4
190	TR 50	47.02	46.99	0.03	0.03	0		4.34		7.55	0.41
190	TR100	47.08	47.05	0.03	0.03	0		4.89		7.69	0.42
180	TR 5	46.78	46.76	0.02	0.02	0		2.58		6.95	0.36
180	TR10	46.85	46.83	0.02	0.03	0		3.11		7.14	0.38
180	TR25	46.93	46.91	0.03	0.03	0		3.81		7.35	0.4
180	TR 50	46.99	46.96	0.03	0.03	0		4.34		7.49	0.41
180	TR100	47.05	47.02	0.03	0.03	0		4.89		7.64	0.43
170	TR 5	46.75	46.74	0.02	0.03	0		2.58		6.93	0.36
170	TR10	46.82	46.8	0.02	0.03	0		3.11		7.11	0.38
170	TR25	46.91	46.88	0.03	0.03	0		3.81		7.31	0.4
170	TR 50	46.96	46.93	0.03	0.03	0		4.34		7.45	0.42

CALCULO HIDRÁULICO PARA LAS MODELACIONES DE LAS SECCIONES DEL CANAL CON PERIODOS DE RETORNO DE 5,10, 25, 50 Y 100 AÑOS, RESULTADOS OBTENIDOS CON HEC RAS.											
Sección de control	Perfil	Caudal	Elevaciones				Características Hidráulicas				
			fondo del cauce	superficie del agua	Altura crítica	Línea de energía	Pendiente de la línea de gradiente de energía	Velocidad media	Área hidráulica de la sección	ancho superficial	Numero de Froude
		(m3/s)	(m)	(m)	(m)	(m)	(m/m)	(m/s)	(m2)	(m)	
170	TR100	47.02	46.98	0.03	0.03	0		4.89		7.59	0.43
160	TR 5	46.73	46.71	0.02	0.03	0		2.58		6.89	0.37
160	TR10	46.8	46.77	0.02	0.03	0		3.11		7.06	0.38
160	TR25	46.88	46.85	0.03	0.03	0		3.81		7.25	0.4
160	TR 50	46.93	46.9	0.03	0.03	0		4.34		7.39	0.42
160	TR100	46.98	46.95	0.03	0.04	0		4.89	0	8.75	0.43
150	TR 5	46.7	46.68	0.02	0.03	0		2.58		6.84	0.37
150	TR10	46.77	46.74	0.02	0.03	0		3.11		7.01	0.38
150	TR25	46.84	46.81	0.03	0.04	0		3.81	0	8.63	0.41
150	TR 50	46.89	46.86	0.03	0.04	0		4.32	0.02	10.4	0.42
150	TR100	46.95	46.91	0.04	0.04	0		4.83	0.06	10.62	0.44
140	TR 5	46.67	46.65	0.02	0.03	0		2.57	0.01	9.75	0.37
140	TR10	46.73	46.71	0.02	0.03	0		3.06	0.06	10.02	0.38
140	TR25	46.81	46.78	0.03	0.04	0		3.67	0.14	10.32	0.4
140	TR 50	46.86	46.83	0.03	0.04	0		4.12	0.22	10.53	0.42
140	TR100	46.91	46.88	0.03	0.04	0		4.58	0.31	10.75	0.44
130	TR 5	46.64	46.61	0.02	0.04	0		2.54	0.04	10.11	0.37
130	TR10	46.7	46.67	0.02	0.04	0		3.01	0.1	10.34	0.38
130	TR25	46.77	46.74	0.03	0.04	0		3.6	0.21	10.62	0.4
130	TR 50	46.82	46.79	0.03	0.04	0		4.03	0.3	10.81	0.42
130	TR100	46.87	46.84	0.03	0.04	0		4.48	0.41	11	0.44
120	TR 5	46.6	46.58	0.02	0.04	0		2.47	0.1	10.24	0.38
120	TR10	46.66	46.63	0.03	0.04	0		2.92	0.2	10.46	0.39
120	TR25	46.73	46.7	0.03	0.04	0		3.47	0.34	10.72	0.41
120	TR 50	46.78	46.75	0.03	0.04	0		3.88	0.45	10.9	0.43
120	TR100	46.83	46.8	0.03	0.04	0		4.31	0.58	11.08	0.45
110	TR 5	46.56	46.54	0.02	0.04	0		2.29	0.29	10.35	0.38
110	TR10	46.62	46.6	0.02	0.04	0		2.69	0.42	10.56	0.39
110	TR25	46.69	46.67	0.03	0.04	0		3.21	0.6	10.81	0.41
110	TR 50	46.74	46.71	0.03	0.04	0		3.6	0.73	10.98	0.43
110	TR100	46.79	46.76	0.03	0.04	0		4.01	0.88	11.16	0.45

[illegible]

CALCULO HIDRÁULICO PARA LAS MODELACIONES DE LAS SECCIONES DEL CANAL CON PERIODOS DE RETORNO DE 5,10, 25, 50 Y 100 AÑOS, RESULTADOS OBTENIDOS CON HEC RAS.											
Sección de control	Perfil	Caudal	Elevaciones				Características Hidráulicas				
			fondo del cauce	superficie del agua	Altura crítica	Línea de energía	Pendiente de la línea de gradiente de energía	Velocidad media	Área hidráulica de la sección	ancho superficial	Numero de Froude
		(m3/s)	(m)	(m)	(m)	(m)	(m/m)	(m/s)	(m2)	(m)	
40	TR 5	46.32	46.3	0.02	0.04	0		1.43	1.15	10.1	0.5
40	TR10	46.37	46.35	0.02	0.04	0		1.76	1.36	10.26	0.56
40	TR25	46.43	46.41	0.02	0.05	0		2.18	1.63	10.45	0.59
40	TR 50	46.47	46.44	0.03	0.05	0		2.51	1.83	10.58	0.61
40	TR100	46.51	46.48	0.03	0.05	0		2.85	2.04	10.71	0.63
30	TR 5	46.28	46.26	0.02	0.04	0		1.34	1.24	10.15	0.55
30	TR10	46.33	46.31	0.02	0.04	0		1.65	1.46	10.3	0.6
30	TR25	46.38	46.36	0.03	0.04	0		2.07	1.75	10.47	0.62
30	TR 50	46.42	46.39	0.03	0.05	0		2.38	1.96	10.58	0.63
30	TR100	46.46	46.43	0.03	0.05	0		2.71	2.18	10.7	0.65
20	TR 5	46.24	46.23	0.01	0.04	0	0.43	1.08	1.07	13.18	0.47
20	TR10	46.29	46.27	0.01	0.04	0	0.53	1.33	1.26	13.36	0.52
20	TR25	46.34	46.32	0.02	0.04	0	0.65	1.65	1.51	13.59	0.55
20	TR 50	46.37	46.35	0.02	0.05	0	0.75	1.9	1.69	13.74	0.57
20	TR100	46.41	46.39	0.02	0.05	0	0.85	2.16	1.88	13.89	0.59
10	TR 5	46.21	46.19	0.01	0.1	0.01	0.6	1.11	0.86	13.52	0.53
10	TR10	46.25	46.23	0.02	0.11	0.01	0.73	1.35	1.03	13.67	0.59
10	TR25	46.3	46.28	0.02	0.11	0.01	0.88	1.67	1.26	13.84	0.63
10	TR 50	46.33	46.3	0.02	0.12	0.01	1	1.91	1.42	13.96	0.66
10	TR100	46.36	46.34	0.03	0.12	0.01	1.13	2.17	1.59	14.08	0.68
9	TR 5	46.1	46.01	0.09			0.61	1.59	0.38	11.93	1.07
9	TR10	46.13	46.03	0.1			0.74	1.9	0.47	12.57	1.08
9	TR25	46.17	46.06	0.11			0.92	2.28	0.61	13.31	1.11
9	TR 50	46.2	46.09	0.11			1.05	2.56	0.72	13.96	1.11
9	TR100	46.23	46.11	0.12			1.22	2.84	0.83	14.21	1.12

Fuente: Elaboración propia

Los perfiles hidráulicos resultados se presentan como anexo al documento, a continuación, se puede observar el perfil longitudinal del canal en la concepción del modelo HEC-RAS.

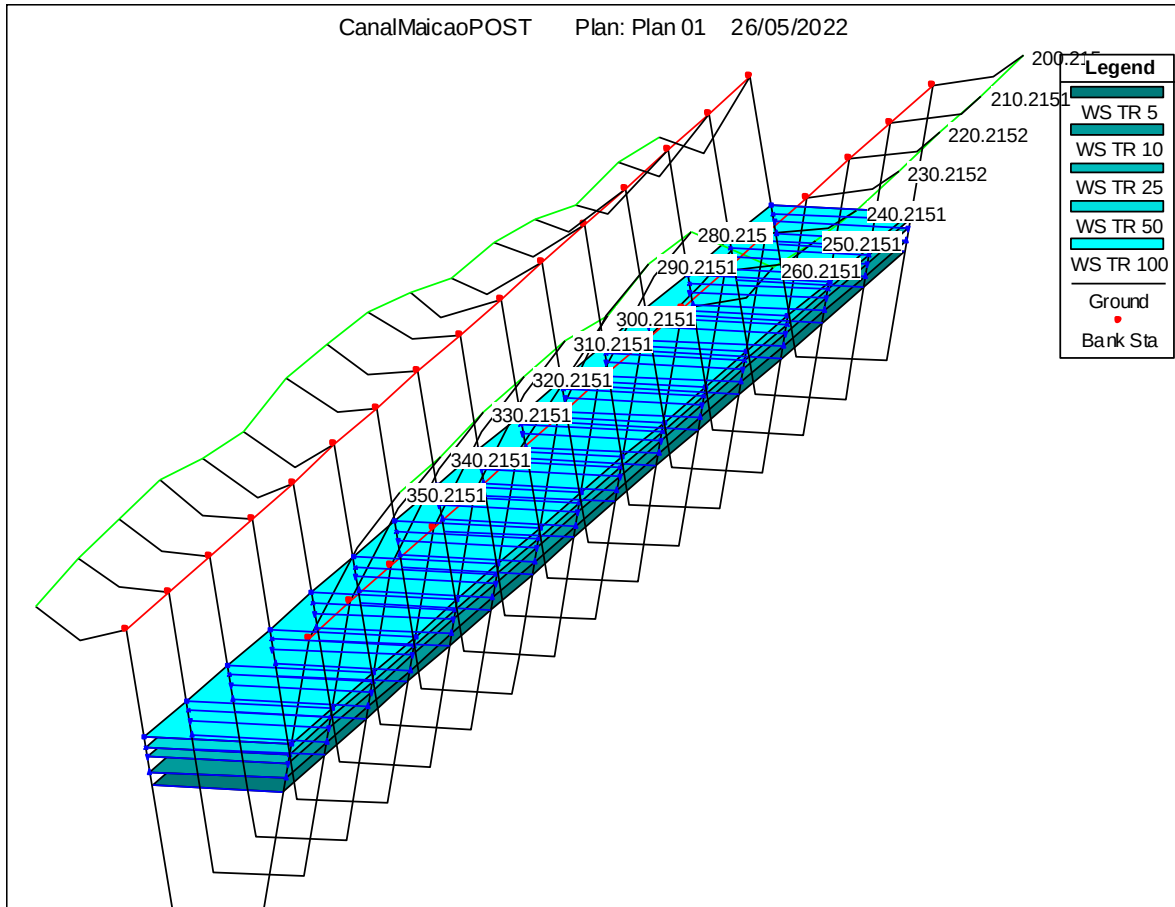


Figura 26. Perfil longitudinal del canal modelado.

Fuente: Elaboración propia

CONCLUSIONES

Como resultado general del estudio se pudo analizar el cálculo promedio a nivel mensual de las variables de temperatura, humedad relativa, brillo solar y precipitaciones y el análisis de frecuencia para las lluvias máximas en 24 horas en diferentes periodos de retorno, las crecientes para los distintos periodos de retorno y las manchas de inundación a partir del modelo hidráulico.

La información presentada permite constatar que existe una variación en los diferentes meses del año en cuanto a la temperatura, es de resaltar que en promedio la temperatura máxima es de 35,041°C, la media de 32,733°C y la mínima de 30,175°C.

El promedio mensual de brillo solar es de 162,3 horas sol al mes, y posee una tendencia a disminuir durante los meses de abril hasta junio, la mayor incidencia del mismo se da en los meses de febrero y de julio cuando supera las 200 horas sol al mes.

Los valores de humedad relativa más altos se presentaron en el año 2012, su valor promedio es de 75,8 y la variación estándar es de 1,9457.

La precipitación media mensual en Maicao varía entre 4,19 hasta 166,79 mm, el comportamiento a través del año es de tipo bimodal, siendo los meses mas lluviosos el periodo entre marzo y junio, para posteriormente retomar las temporadas de lluvias en el periodo entre septiembre y octubre, el valor medio de la precipitación total multianual es de 669,48 mm

Para determinar el caudal generado por la lluvia se aplica el modelo lluvia-caudal del Soil Conservation Service de los EE.UU., dado que el método racional sobrevalora el caudal cuando se usa en cuencas rurales con una extensión superior a 100 ha, se calcularon las precipitaciones máximas mensuales en 24 horas con diferentes períodos de retorno, para la estación seleccionada en el presente análisis.

TR	PRECIPITACIÓN MÁXIMA (mm)
5	113,17
10	136,71
25	167,29
50	190,30
100	214,62

Según el estudio hidrológico, se realizó el cálculo de las crecientes para diferentes periodos de retorno, se obtuvieron los siguientes resultados:

Periodo de retorno	Creciente (m3/s)
tr5	2,58
tr10	3,11
tr25	3,81
tr50	4,34
tr100	4,89

Con el apoyo de la modelación hidráulica en HEC-RAS, se obtuvo la información acerca de la altura de inundación y la mancha de agua misma en el territorio, lo cual es fundamental para el desarrollo de las obras de mitigación y control de riesgos.

Finalmente se resalta que con la realización de los procesos de adecuación del cauce para el canal se logra disminuir la mancha de inundación del sector, incluyendo una altura libre en el canal en promedio de 1 metro y 10 centímetros en periodos de retorno de 100 años, y hasta una altura libre de 1 metro y 30 centímetros en periodos de retorno de 5 años.

REFERENCIAS

EMPRESA DE ACUEDUCTO Y ALCANTARILLADO DE BOGOTÁ - E.S.P. (2006). Criterios de diseño de sistemas de alcantarillado - NS-085. Bogotá.

Gutierrez et al. (2011). PERIODO DE RETORNO.

INVIAS. (Diciembre de 2009). Manual De Drenaje Para Carreteras. Bogotá D.C., Colombia.

Lourdes Bello Mendoza, Sara Jane Velazquez Juarez. (2012). Calculo de periodo de retorno. En URRRA.

Sanchez, F. J. (s.f.). Calculo de la Precipitación Neta Mediante el Metodo del SCS. Obtenido de https://hidrologia.usal.es/practicas/Pneta_SCS/Pneta_SCS_fundam.pdf

Wikipedia. (30 de Junio de 2011). File:Colombia - La Guajira - Maicao.svg. Obtenido de https://commons.wikimedia.org/wiki/File:Colombia_-_La_Guajira_-_Maicao.svg#metadata

MALAVOI, J.R., GARNIER, C.C., LANDON, N., RECKING, A., BARAN, PH. Eléments de Connaissance Pour la Gestion du Transport Solide en Rivière. ONEMA. Office National de l'eau et des milieux aquatiques (pp 219). www.onema.fr

EPAM LTDA. Estudio de efecto ambiental de la explotación inicial de carbón en la Zona Central del Proyecto Carbonífero de El Cerrejón. Vol. I de V CARB OCOL. Bogotá D.E. 1983.