

ANEXO 6 – HIDROLOGÍA Y TRATAMIENTO ESTADÍSTICO

CONTENIDO

1.	Tratamiento Estadístico	2
1.1.	Río Magdalena	7
1.1.1.	Caudales	7
1.1.2.	Serie de Tiempo Caudales	10
1.1.3.	Duración Caudal	11
1.1.4.	Niveles	13
1.1.5.	Serie de Tiempo Niveles	15
1.2.	Río Sumapaz	16
1.2.1.	Caudales	16
1.2.2.	Serie de Tiempo Caudales	19
1.2.3.	Curva de Duración Caudal	20
1.2.4.	Niveles	21
1.2.5.	Serie de tiempo niveles	23
2.	Análisis de Frecuencias Información Hidrológica	24
2.1.	Descripción del proceso	25
2.2.	Río Magdalena	27
2.3.	Río Sumapaz	32
3.	Análisis de Resultados	35

1. Tratamiento Estadístico

Una de las metodologías para la evaluación de la amenaza por inundación, consiste en el análisis de frecuencias para dichos eventos, a partir de la información hidrológica sometida a un tratamiento estadístico. Dicho enfoque supone que las observaciones pasadas pueden ser consideradas como representativas del futuro y por lo tanto podrán ser empleadas para estimar los eventos (Tomado y adaptado, Centre for Ecology & Hidrology, 2013).

El tratamiento estadístico de los datos recolectados para este trabajo agrupa un componente descriptivo donde se representan y caracterizan la información de caudales y niveles del cauce; y un componente de análisis de frecuencias, el cual relaciona la magnitud de los eventos extremos con su frecuencia de ocurrencia mediante el uso de distribuciones de probabilidad (Tomado y adaptado, Chow, Maidment, & Ways, 1994).

Para realizar la fase descriptiva de las variables analizadas (caudales y niveles, medios, mínimos y máximos absolutos se recolectó la información hidrológica de las estaciones del Instituto de Hidrología, Meteorología y Estudios Ambientales de Colombia - IDEAM cercanas al área de interés

Tabla 1. Estaciones con información hidrológica empleada en este estudio

Estación	Código	Clase	Departamento	Municipio	Corriente
Girardot 2	21237030	Limnigráfica	Cundinamarca	Girardot	Magdalena
Melgar	21197100	Hidrológica	Tolima	Melgar	Sumapaz

En la Tabla 2 se muestran los datos mensuales del caudal del Río Magdalena en un periodo de 17 años mientras estuvo en funcionamiento la estación Girardot 2 del IDEAM, los datos se muestran en m^3/s . Analizando los datos, se observa que los mayores caudales se presentan en los meses de abril, mayo y noviembre, llegando a valores mayores de los $2000 m^3/S$, así mismo estos meses poseen los mayores caudales promedio a través del periodo de tiempo registrado.

Tabla 2. Caudales del río Magdalena. Estación Girardot 2

Caudal M3/s Río Magdalena													
AÑO	ENE	FEB	MAR	ABR	MAY	JUN	JUL	AGO	SEP	OCT	NOV	DIC	ANUAL
1961	988	594	774	1401	972	1232	1500	914	678	1117	1847	927	1079
1962	673	820	993	1212	2033	1719	1348	1321	803	1442	1626	931	1243
1963	917	1339	911	1416	1720	1146	991	1275	638	729	1792	774	1137
1964	674	487	469	1353	1081	1892	1258	1184	1029	881	1208	952	1039
1965	806	431	646	1590	1744	1167	1015	1104	962	1274	2068	1351	1180
1966	727	602	859	942	993	1016	1236	1013	777	1034	1633	1857	1057
1967	865	1087	1089	1488	1454	1968	1517	1243	716	868	1524	848	1222
1968	810	1086	1053	1424	1190	1711	1821	1008	1167	1476	1379	1017	1262
1969	765	732	761	1872	1248	1377	1280	1158	1219	1800	1503	1083	1233
1970	984	1112	1014	1052	1425	894	958	1172	1194	1651	2129	1653	1270
1971	1786	1334	1806	2139	2075	1292	1510	1080	1007	1380	1635	1140	1515
1972	1369	857	1216	1313	1742	1115	1530	914	876	699	1640	938	1184
1973	423	385	483	718	1064	994	1217	1369	1595	1323	1955	1839	1114
1974	1039	1798	1362	1519	1492	1295	1368	1063	1088	1523	1904	1165	1385
1975	659	899	1281	996	1682	1684	1373	1237	1291	1590	2125	1955	1398
1976	988	1112	1593	1968	2082	1695	1732	1116	964	1203	1227	875	1380
1977	538	610	563	1161	1081	1184	1084	898	999	1400	1712	719	996
1978	571	619	721	1858	1156	1325	961	988	819	996	998	1121	1011
Prom.	865,57	883,58	977,47	1412,33	1457,46	1372,53	1316,57	1114,3	990	1243,61	1661,38	1174,73	1205,8

Los valores mínimos de profundidad del río Magdalena, indican que los periodos donde más bajo se encuentra el río, se encuentran registrados en los meses de enero, febrero y marzo, con caudales promedio entre 297 y 331 cm, es decir, una profundidad media de 3 m, en promedio el nivel del Río Magdalena dentro del periodo registrado se encuentra en 352 cm de profundidad.

Tabla 3. Valores mínimos de profundidad mensuales del río Magdalena. Estación Girardot 2

Valores mínimos mensuales cms, Río Magdalena,													
AÑO	ENE	FEB	MAR	ABR	MAY	JUN	JUL	AGO	SEP	OCT	NOV	DIC	ANUAL
1972					457	385	435	325	318	283	362	246	246
1974	340	409	365	381	391	418	384	351	331	343	516	337	331
1975	262	270	342	332	434	475	375	359	386	406	532	500	262
1976	384	345	403	428	508	490	459	370	310	359	320	300	300
1977	245	234	236	310	347	392	327	311	349	403	377	301	234
1978	220			498	336	370	298	305	303	321	315	308	220
1979	310		323	305	336	441	347	322	349	310	388	338	305
1980	318	315	314	343	356	363	336	305	308	323	323	331	305
MEDIOS	297	315	331	371	396	417	370	331	332	344	392	333	352
MAXIMOS	384	409	403	498	508	490	459	370	386	406	532	500	532
MINIMOS	220	234	236	305	336	363	298	305	303	283	315	246	220

En cuanto a los valores máximos de profundidad registrados en el Río Magdalena, se observa según los datos, que los meses con mayor profundidad son: abril, mayo y noviembre, con profundidades máximas promedio de 933, 952 y 945 cms respectivamente, los niveles de mayor inundación alcanzaron valores de 1250 y 1230 cms en los meses de marzo y abril.

Tabla 4. Valores máximos de profundidad mensuales del río Magdalena.

Valores máximos mensuales cms, Río Magdalena, Estación Girardot 2													
AÑO	ENE	FEB	MAR	ABR	MAY	JUN	JUL	AGO	SEP	OCT	NOV	DIC	ANUAL
1972	ND	ND	ND	ND	1043	612	1100	670	568	634	928	680	1100
1974	678	1072	824	1130	1084	664	904	700	715	902	1134	1149	1149
1975	462	740	1046	748	1000	1076	828	701	832	1154	1148	1212	1212
1976	580	760	1250	1059	1125	960	994	725	644	794	835	576	1250
1977	355	520	570	692	690	624	664	588	638	794	992	570	992
1978	430	ND	ND	963	975	879	582	774	572	675	670	773	975
1979	510	ND	770	1230	1060	835	715	669	710	825	1145	596	1230
1980	491	635	541	710	642	950	676	645	523	790	710	610	950
MEDIOS	501	745	834	933	952	825	808	684	650	821	945	771	789
MAXIMOS	678	1072	1250	1230	1125	1076	1100	774	832	1154	1148	1212	1250
MINIMOS	355	520	541	692	642	612	582	588	523	634	670	570	355

Con respecto a los valores de precipitación, los datos registrados por la estación Nilo del IDEAM desde el año 1951 hasta el año 2004, indican que los meses con mayor precipitación son febrero, marzo y abril en el primer semestre y septiembre y octubre en el segundo semestre, en promedio los valores de precipitación son de 200 mm con picos de hasta 380 mm por mes y el promedio anual se encuentra cercano a los 1300 mm de precipitación.

Tabla 5. Valores mensuales de precipitación.

Valores mensuales de precipitación, Estación Nilo													
AÑO	ENE	FEB	MAR	ABR	MAY	JUN	JUL	AGO	SEP	OCT	NOV	DIC	ANUAL
1951	153	78	83	294	253	79	82	133	81	241	273	128	1878
1952	40	59	95	310	258	0	11	53	160	89	358	49	1482
1953	151	362	185	72	136	81	30	24	207	319	279	58	1904
1954	19	0	137	259	195	87	21	41	29	447	137	44	1416
1955	30	77	174	299	269	140	103	112	175	272	224	137	2012
1956	58	302	156	253	383	79	53	16	161	250	176	113	2000
1957	66	111	77	274	280	57	42	3	53	164	110	15	1252
1958	5	62	42	216	171	53	49	51	70	113	138	99	1068
1959	10	7	4	133	240	216	83	93	61	128	138	65	1177
1960	70	127	96	263	51	247	125	78	21	266	160	77	1579
1961	109	13	74	147	0	41	203	7	146	249	0	0	987
1963	75	82	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	157
1967	58	181	167	107	187	196	31	54	128	65	115	16	1304
1968	175	66	94	153	127	174	53	6	206	206	73	20	1351
1969	23	106	54	264	117	69	2	9	83	127	166	65	1084
1970	47	18	24	115	147	52	35	17	64	344	87	37	986
1971	82	202	289	111	286	45	40	177	103	247	118	38	1737
1972	63	99	91	245	0	0	1	76	12	0	0	0	586
1973	0	0	0	0	0	0	0	0	0	73	127	145	345
1974	184	116	129	171	321	98	0	56	235	305	80	25	1720
1975	7	97	194	111	157	70	115	41	115	269	188	87	1450
1976	33	79	198	213	0	76	0	0	33	99	88	165	983
1977	5	76	24	166	104	142	104	51	186	217	250	15	1336
1979	0	0	0	231	173	0	0	33	0	0	0	0	437
1984	0	0	0	0	0	0	15	49	216	78	144	41	543
1985	0	21	17	163	0	0	21	63	140	135	66	21	647
1986	116	73	39	258	134	72	2	110	79	204	200	20	1306
1987	33	74	27	152	234	33	76	108	124	159	107	158	1284
1988	41	67	9	216	59	118	76	211	56	88	148	155	1243
1989	50	178	62	80	73	143	20	6	157	243	55	24	1090
1990	54	82	117	84	43	9	59	22	26	281	135	77	989

1991	23	57	159	246	175	151	100	20	203	19	131	76	1360
1992	44	73	41	93	226	25	11	50	182	74	108	40	966
1993	67	92	180	262	170	33	0	12	84	256	166	153	1475
1994	83	192	125	223	212	23	28	4	166	98	135	54	1343
1995	0	90	45	112	56	157	81	38	70	141	31	114	936
1996	92	59	132	134	171	158	82	72	81	215	65	88	1347
1997	47	77	121	105	114	222	0	0	112	99	41	40	978
1998	22	54	193	162	236	24	30	32	109	185	67	172	1287
1999	70	232	58	246	83	159	33	17	225	177	62	113	1476
2000	21	71	102	117	178	129	4	14	315	202	56	72	1282
2001	45	132	244	125	148	0	34	0	71	98	113	106	1117
2002	30	9	191	303	120	80	79	20	61	220	39	54	1206
2003	0	139	262	267	54	113	40	11	116	177	156	49	1384
2004	3	133	34	231	218	22	21	21	169	140	32	97	1121

Los datos recopilados fueron procesados y representados en graficas donde se buscó detectar características y comportamientos particulares de la información. Los resultados para cada una de las corrientes se describen a continuación (Tabla 6 y Tabla 7).

Tabla 6. Parámetros relevantes para caudales o descarga en cada una de las corrientes

Parámetro	Corriente	
	Magdalena	Sumapaz
Caudal Promedio histórico (m ³ /s)	1201.63	44.25
Caudal Máximo (m ³ /s)	4398	1800
Caudal Mínimo (m ³ /s)	60	4
Varianza Caudales Medio Mensual	163777,76	890.01
Desviación Estándar Caudales Medio Mensual	404.69	29.83
Caudal Mes más Húmedo (m ³ /s)	1611.38	73.78

Tabla 7. Parámetros relevantes para niveles en cada una de las corrientes

Parámetro	Corriente	
	Magdalena	Sumapaz
Nivel Promedio histórico (cm)	490.41	81.35
Nivel Máximo (cm)	1250.0	624.0
Nivel Mínimo (cm)	220	15
Varianza Niveles Medios Mensuales	12,118.94	802.06
Desviación Estándar Niveles Medios Mensuales	404.69	28.32
Nivel Mes más Húmedo (cm)	595.00	107.91

1.1. Río Magdalena

1.1.1. Caudales

En la Gráfico 1 se presentan los valores promedio del caudal para cada uno de los meses, calculados a partir de los valores medios diarios. De igual modo se presenta el caudal medio histórico para este cauce (1205.81 m³/s) comparado con las medias mensuales. Se distingue un primer ciclo que agrupa los meses de abril, mayo, junio, julio; y un segundo ciclo (octubre y noviembre) donde se excede el caudal medio histórico.

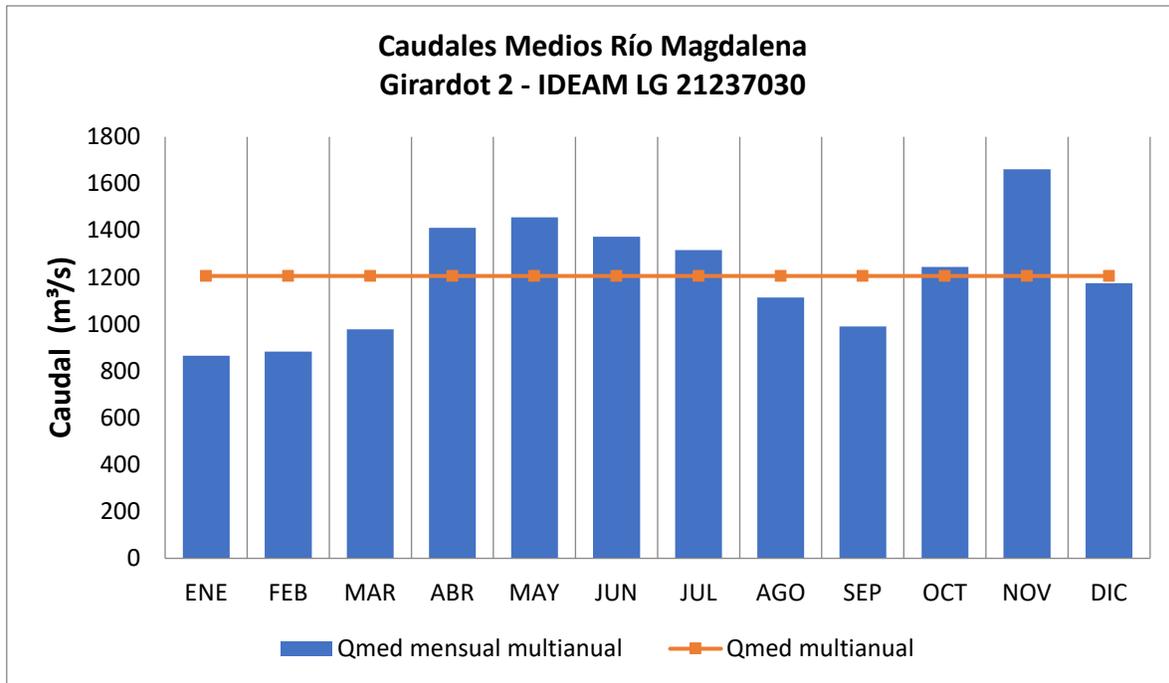


Gráfico 1. Caudales medios mensuales para el río Magdalena. Caudal medio multianual 1205.81 m³/s.

La Gráfico 1 presenta los valores máximos, mínimos y absolutos de los caudales registrados en la Estación Girardot 2. Siendo las descargas máximas empleados para el análisis de frecuencias y el cálculo de tiempos de retorno (probabilidades), los cuales constituirán uno de los insumos necesarios para el desarrollo del Modelo Hidráulico.

En este gráfico se distinguen los dos ciclos identificados en la tendencia mensual, de igual modo se presentan dos periodos donde se registra un descenso en los caudales hacia los meses de enero, febrero y marzo, y hacia octubre, noviembre y diciembre. Durante el mes de noviembre a pesar de presentar la descarga máxima histórica (4398 m³/s) también coincide con el valor mínimo registrado en la estación (60 m³/s).

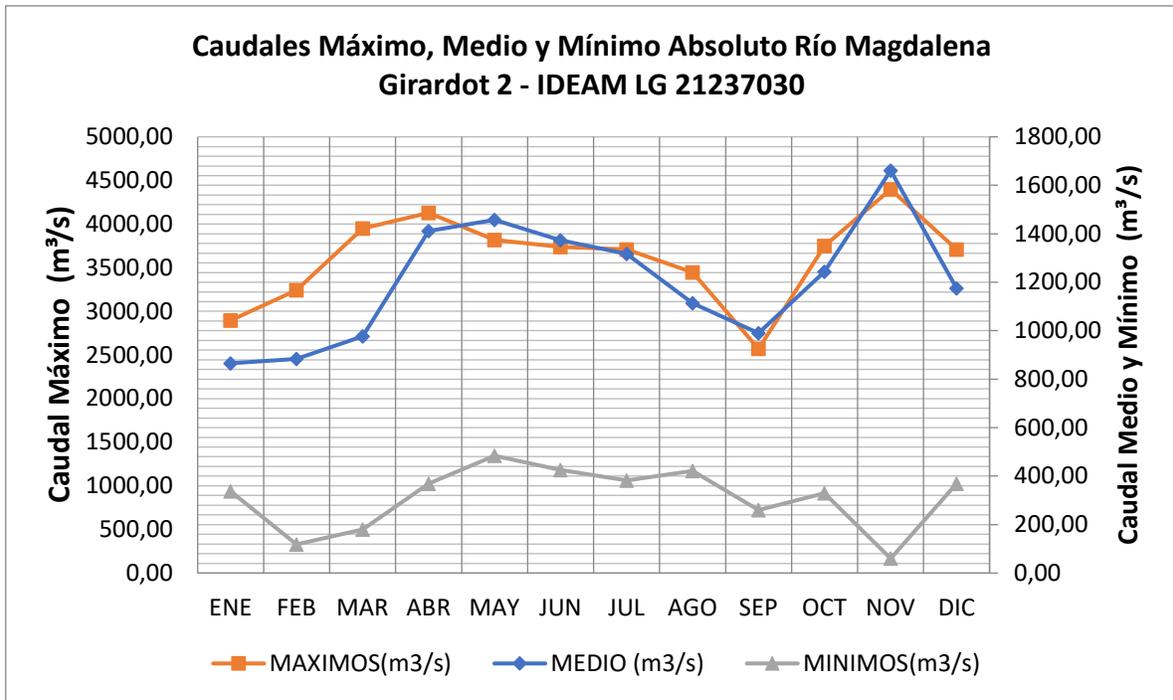


Gráfico 2. Caudales máximos, medios y mínimos absolutos para el río Magdalena, Estación Girardot 2.

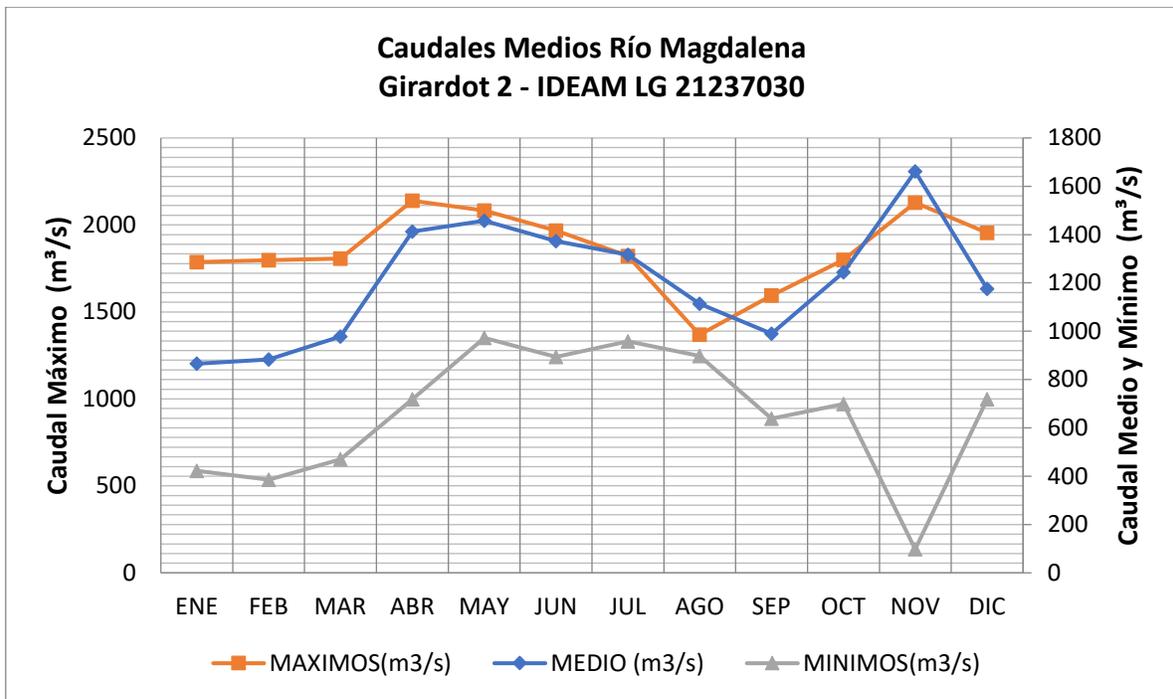


Gráfico 3. Caudales máximos, medios y mínimos calculados a partir de los valores mensuales históricos.

El Gráfico 3 presenta los caudales máximos, mínimos y medios a partir de los valores medios registrados en la Estación Girardot 2 para el río Magdalena. Es posible distinguir que hacia el mes de febrero caen los valores de descarga para después aumentar hasta alcanzar los meses de abril a mayo, para mantenerse con una tendencia descendente hasta el mes de octubre, donde luego hacia noviembre los caudales alcanzan sus valores mínimos y máximos históricos.

1.1.2. Series de Tiempo Caudales

La Figura 4 corresponde a una serie de excedencia anual (Chow, Maidment, & Ways, 1994) para los caudales medios de la estación Girardot 2. En estas se pretende mostrar el comportamiento de los caudales mensuales en relación con la descarga media multianual (línea roja) y la descarga media del mes más húmedo (línea verde). Aunque es posible realizar el cálculo de los periodos de retorno con estas series, no se hace uso de este cálculo por cuanto es difícil verificar la independencia de los eventos (*ibid*).

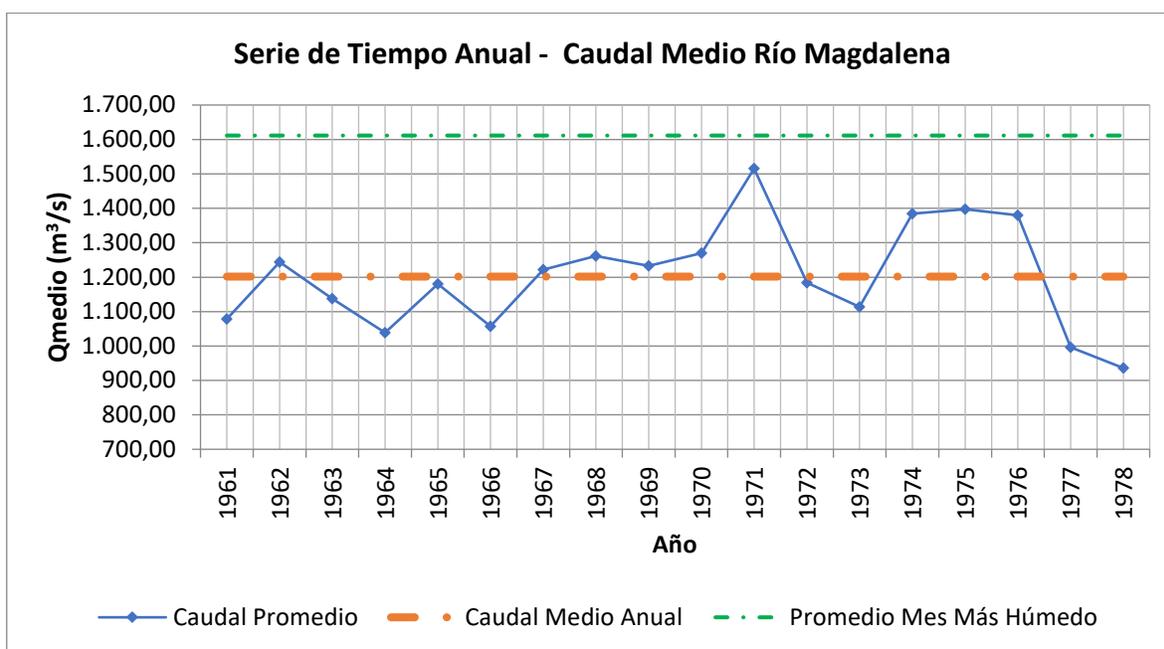


Gráfico 4. Serie de tiempo anual para caudales medios del río Magdalena (1961-1978).

Una primera aproximación al análisis de la serie se realiza por medio de los caudales mensuales ordenados cronológicamente para producir el Gráfico 5. Esto último permite distinguir dos periodos diferenciados por la amplitud del ciclo entre valores de descargas máximas y mínimas; así, el registro que va desde enero de 1961 a junio de 1970 los caudales

más altos se presentan entorno hacia los meses de Mayo – Junio y Noviembre, con una periodicidad anual. Hacia Julio de 1970 a Diciembre de 1978 los meses con descargas más altas se presentan en torno a los meses de Mayo y Noviembre, mientras los caudales más bajos se registran hacia los dos primeros meses del año con una periodicidad de dos años.

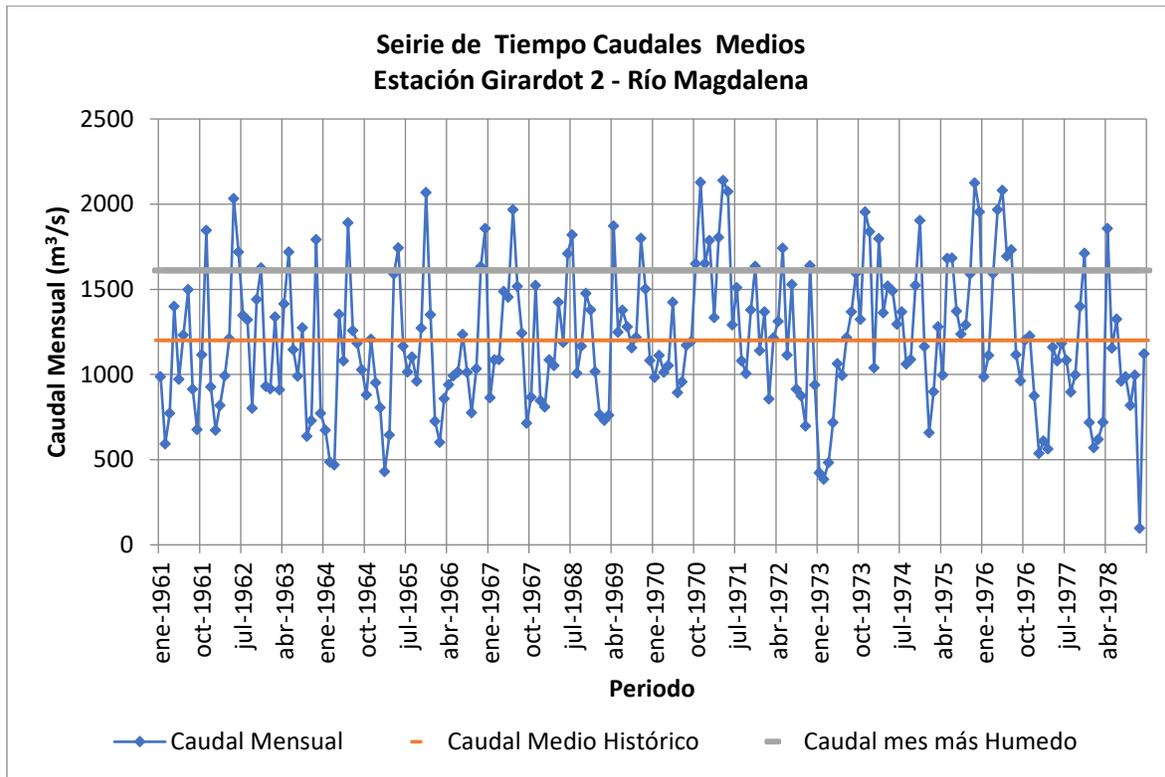


Gráfico 5. Serie de tiempo mensual para caudales medios rio Magdalena (1961-1978).

1.1.3. Duración Caudal

La curva de duración de caudales permite conocer el porcentaje de tiempo o la frecuencia en la cual las descargas han igualado o excedido un valor determinado (caudal medio). La caracterización de la corriente implica conocer los valores máximos, mínimos y medios registrados en cada estación. Para este caso fue empleada la estación limnometrica Girardot 2.

La construcción de la curva de duración de caudales medios requiere organizar de mayor a menor los valores de descarga medios mensuales, los cuales corresponden a la ordenada, mientras que hacia el eje de las abscisas se calcula la probabilidad ocurrencia de cada evento mediante la fórmula de probabilidad empírica de Weibull (I) (Maggio, 2013).

$$p = \frac{i}{n + 1} \quad (I)$$

Donde p corresponde a la probabilidad del evento o porcentaje del tiempo que el caudal es igualado o excedido, i el valor de la posición ocupada por el caudal en la lista descendente y n el número total de observaciones.

En el Gráfico 6 se presenta la curva obtenida para los caudales medios en el río Magdalena, y en la Tabla 4 se resumen los caudales que serán igualados o excedidos en una probabilidad de 50%, 75% y 95%.

La forma de la curva de duración de caudales parece coincidir con aquellas producidas por ríos de llanura, donde no existen diferencias muy notables en las pendientes de los diferentes tramos de la curva. Lo anterior puede ser constatado por la morfología en la cual discurre el cauce, un valle intramontano.

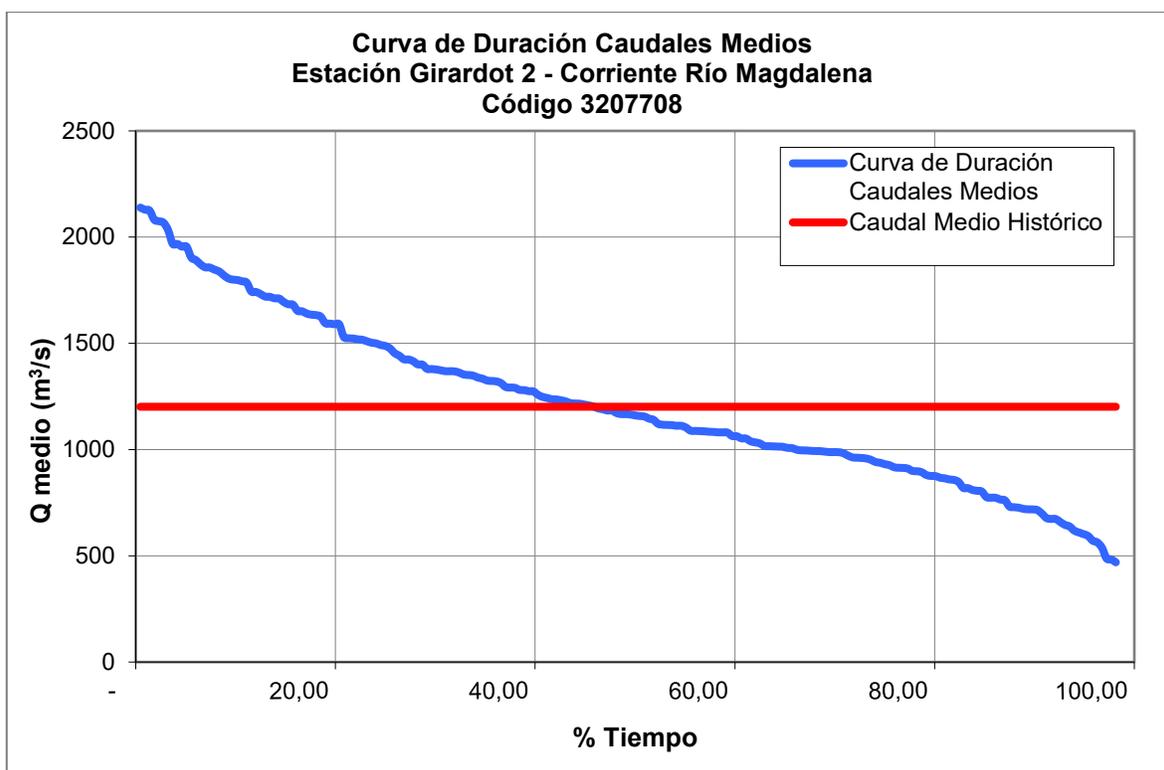


Gráfico 6. Curva de duración de caudales medios para el río Magdalena, Estación Girardot 2

Tabla 8. Valores de descarga característicos para el río Magdalena, Estación Girardot 2.

Valores Característicos Caudales Medios (m³/s)	
Máximo Registro	2139,00
Registro 50%	1161,00
Registro 75%	931,30
Registro 95%	602,10
Menor Registro	97,80

1.1.4. Niveles

El Gráfico 7 presenta los niveles mensuales obtenidos a partir de los datos históricos para el río Magdalena desde 1972 hasta 1980. Al igual que los caudales históricos, los niveles máximos para el cauce se presentan en dos épocas del año: un primer ciclo que agrupa los meses de abril hasta junio alcanzando el pico en el mes de mayo, y un ciclo final desde octubre hasta diciembre, siendo el mes de noviembre donde se registran los mayores niveles del río. Esto permite inferir que la amenaza por inundación es mayor hacia estas épocas del año.

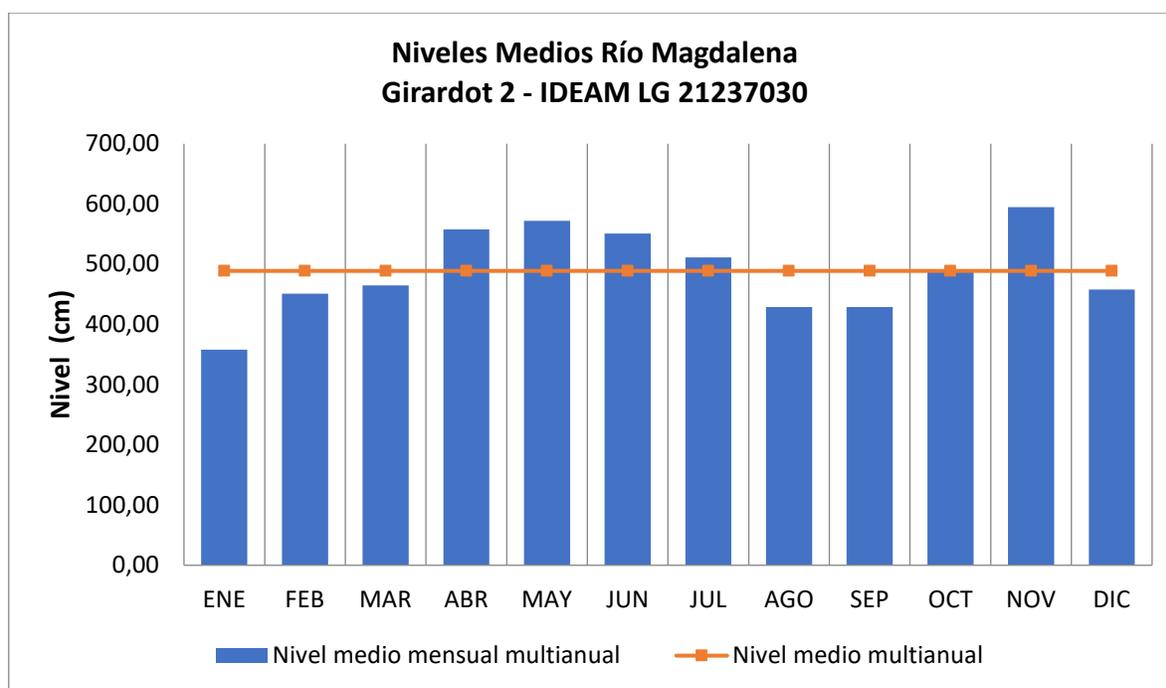


Gráfico 7. Niveles medios mensuales río Magdalena. Nivel medio multianual 488.83 cm.

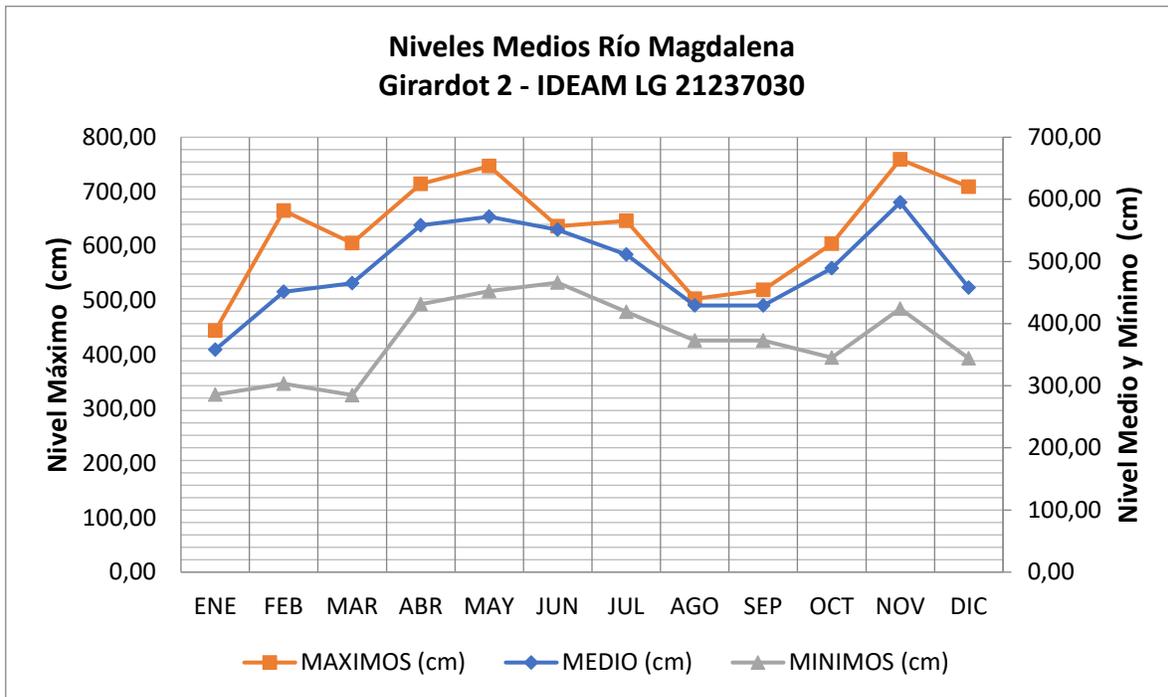


Gráfico 8. Niveles medios, máximos y mínimos para el río Magdalena calculados a partir de los valores mensuales históricos.

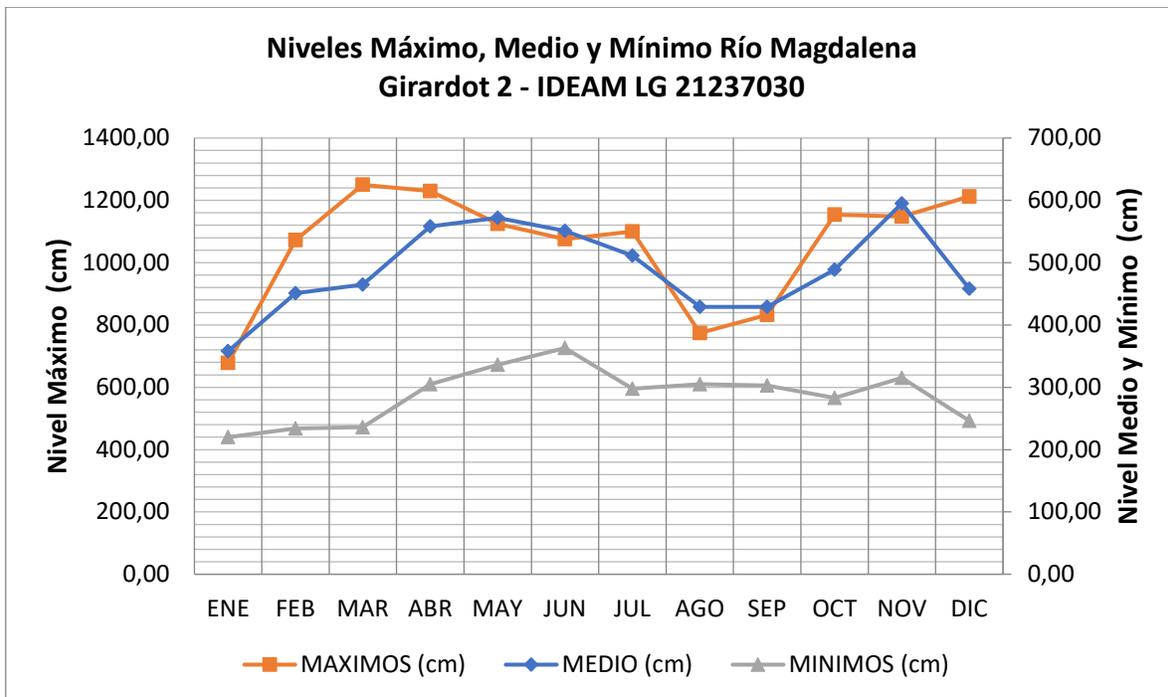


Gráfico 9. Niveles máximos medios, mínimos absolutos para el río Magdalena, Estación Girardot 2.

El Gráfico 8 presenta los niveles medios mensuales como también los valores mínimos y máximos para ese mismo mes. Los datos parecen sugerir que durante los meses de agosto y septiembre los niveles del río se acercan bastante al valor medio esperado, mientras que en el resto del año los valores máximos y mínimos presentan un comportamiento variable en relación con la media.

Los niveles máximos, medios y mínimos absolutos son presentados en la Gráfico 9 la cual permite apreciar que tanto los niveles medios como máximos presentan un comportamiento semejante en cuanto a las variaciones anuales, mientras que el registro de los niveles mínimos se presenta con una mayor regularidad, donde las variaciones entre los datos no llegan a ser tan pronunciados entre la serie.

1.1.5. Series de Tiempo Niveles

Las series de tiempo para los niveles registrados desde 1972 a 1980 no alcanzan a tener un registro lo suficientemente extenso para predecir el comportamiento del cauce, sin embargo los niveles promedio anuales parecen indicar una disminución en el nivel medio desde el año 1977 donde la mayoría de los registros no alcanzan el valor medio calculado (Gráfico 10). Así mismo los datos con los que se elaboró la Gráfico 11 muestran un comportamiento bastante variable, donde debido a la extensión de la serie no es posible identificar con seguridad la regularidad de las variaciones.

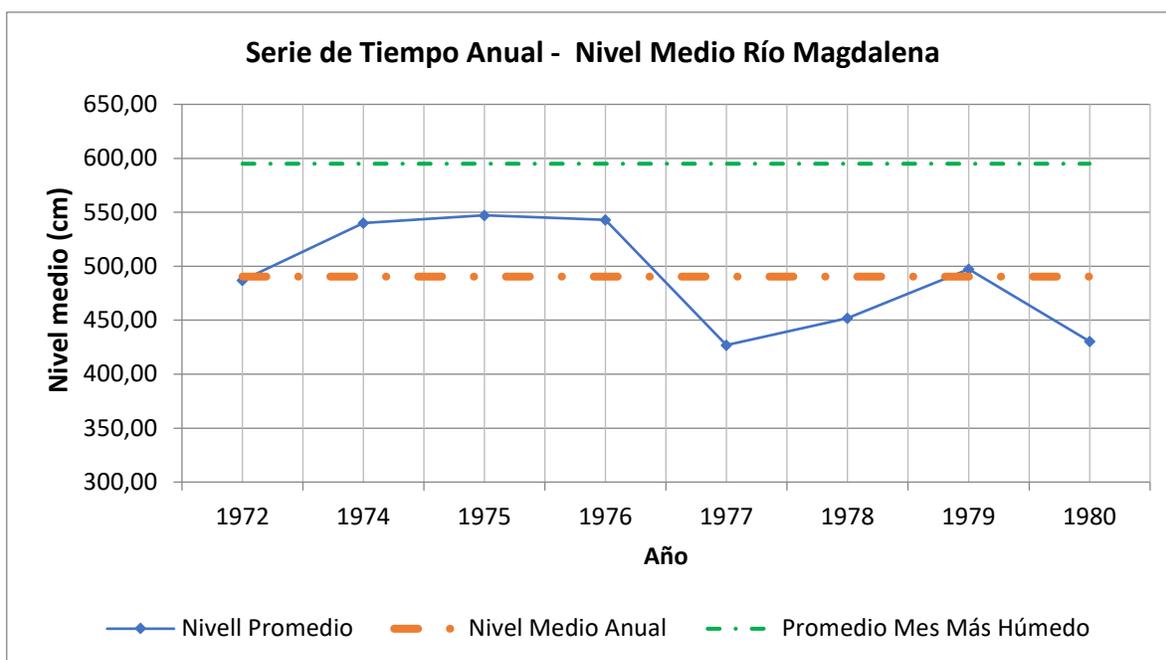


Gráfico 10. Serie de tiempo anual para niveles medios del río Magdalena (1972-1980).

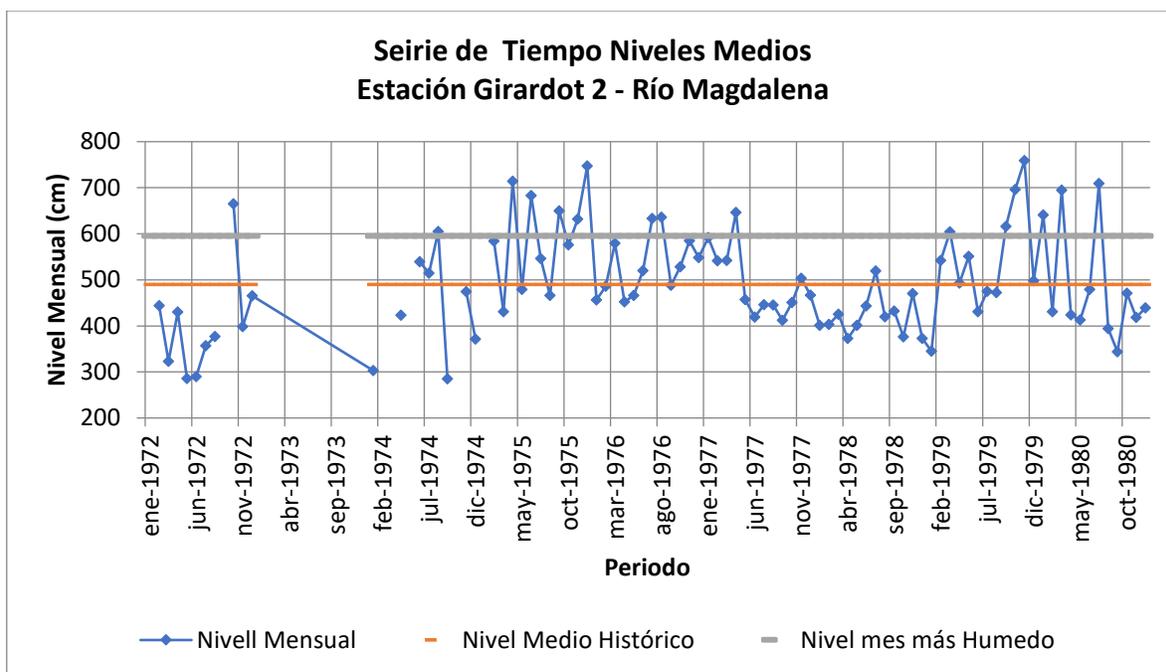


Gráfico 11. Serie de tiempo para niveles medio río Magdalena (1972-1980).

1.2. Río Sumapaz

1.2.1. Caudales

Los caudales medios mensuales para el río Sumapaz obtenidos a partir de los promedios diarios han sido presentados en la Gráfico 12, la cual permite apreciar con mucha claridad los meses durante los cuales los valores de descarga son considerablemente elevados. A diferencia de los promedios mensuales del río Magdalena, los caudales del río Sumapaz presentan un aumento entre el mes de marzo y abril para alcanzar su máximo en este último y luego descender progresiva y continuamente hasta el mes de agosto, para posteriormente incrementar en forma progresiva hasta alcanzar noviembre donde se alcanzan las descargas pico.

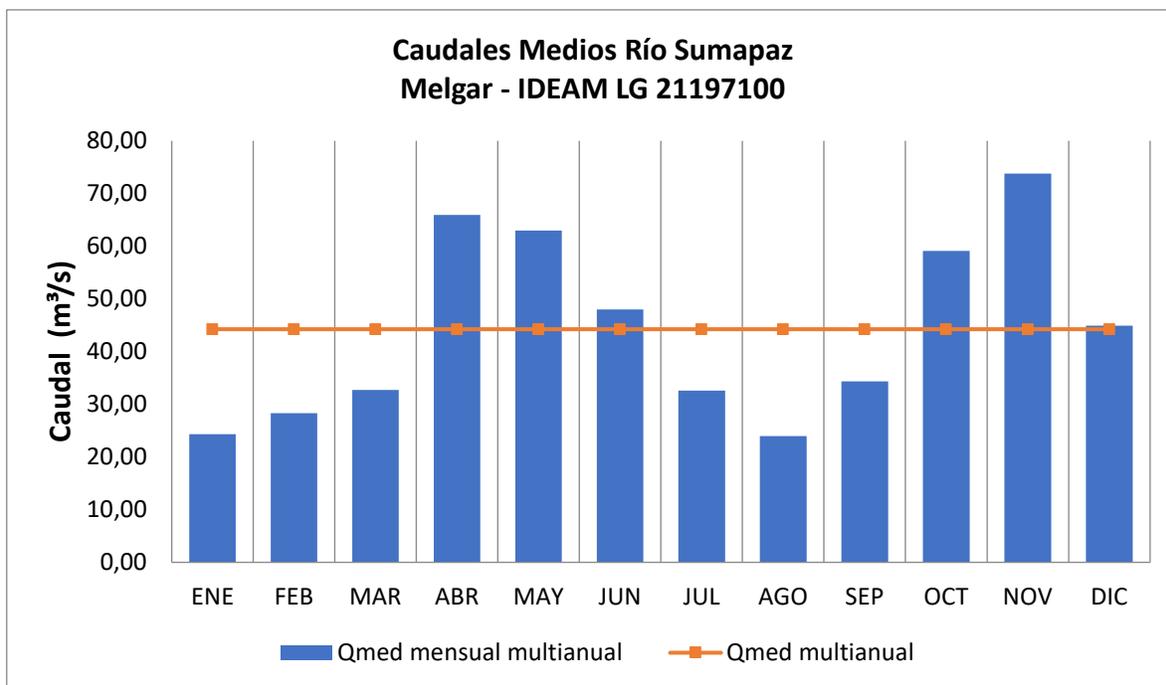


Gráfico 12. Caudales medios mensuales para el río Sumapaz. Caudal medio multianual 44.25 m³/s.

El Gráfico 13 presenta los valores de descarga promedio como también los correspondientes a valores mínimos y máximos relativos registrados en la estación. De la gráfica es posible apreciar que tanto los valores más altos como los promedios descienden y aumentan con una pendiente común para las dos series, mientras que los valores mínimos presentan una tasa de cambio mucho más atenuada en algunos meses del año.

Una situación similar se presenta en el caso de los caudales máximos, mínimos y medios absolutos donde los caudales mínimos sugieren también cambios menos pronunciados entre los meses por la ausencia variaciones significativas en la pendiente de la curva.

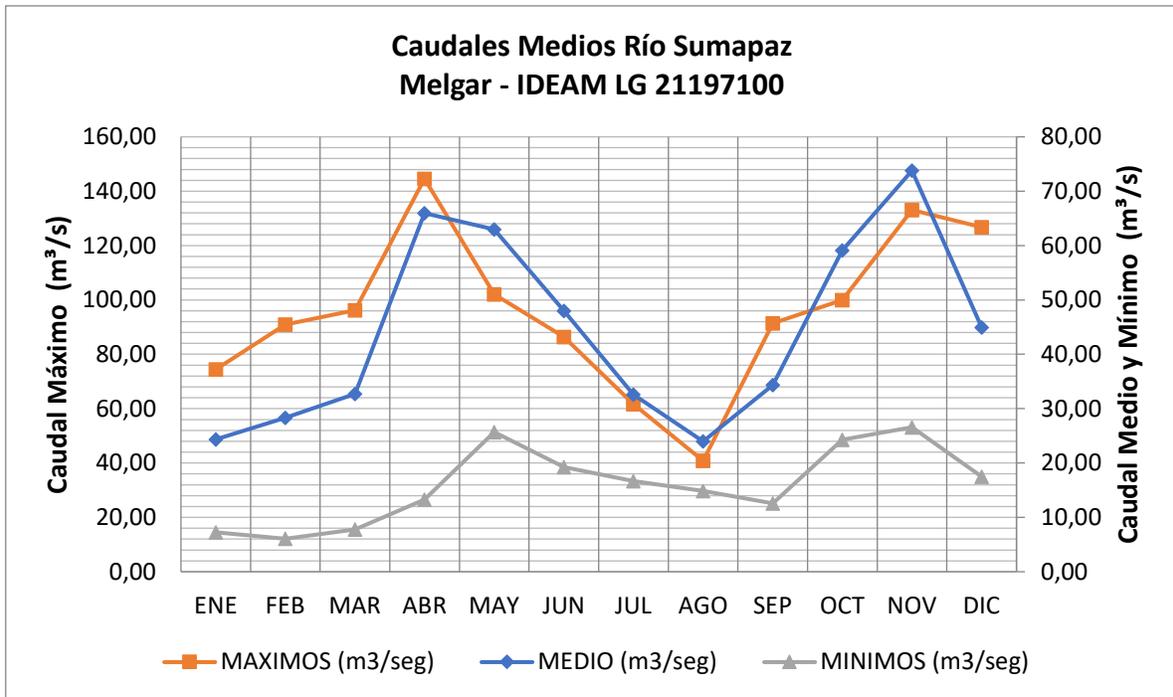


Gráfico 13. Caudales máximos, medios y mínimos calculados a partir de los valores mensuales históricos.

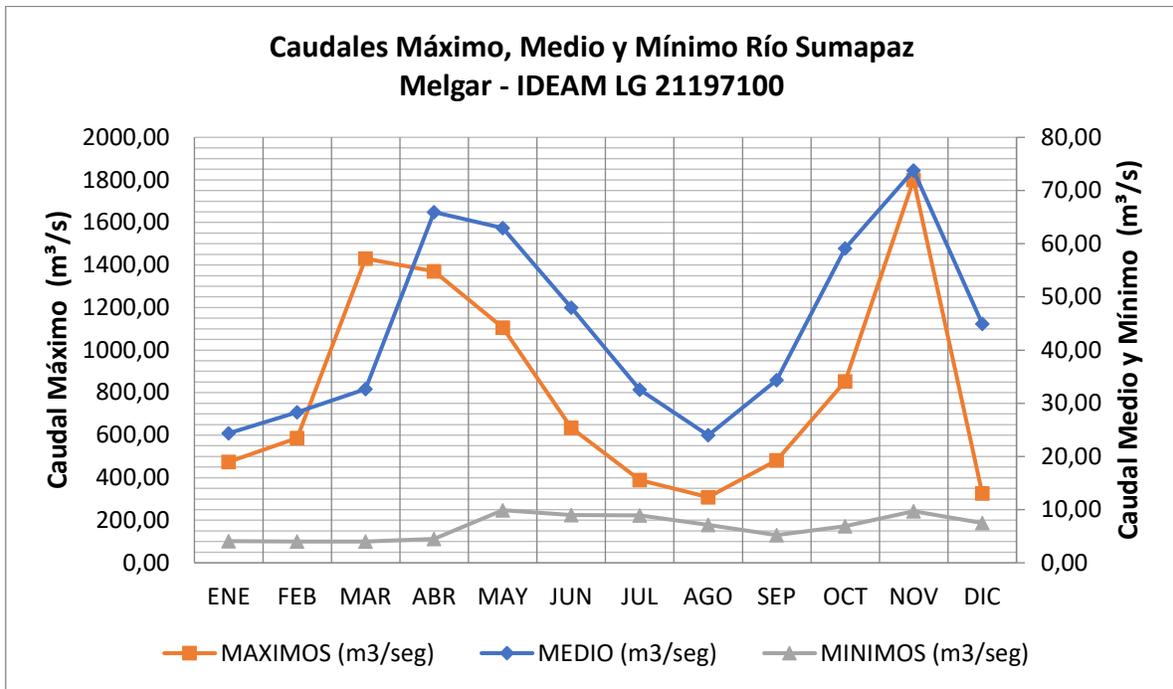


Gráfico 14. Caudales máximos, medios y mínimos absolutos para el río Sumapaz, Estación Melgar.

1.2.2. Series de Tiempo Caudales

En el Gráfico 15 se presentan los valores de caudales medios anuales desde 1973 a 1984 donde es posible apreciar dos tendencias en la serie de datos. Durante el periodo de 1973 a 1976 ocurren valores medios de caudal mucho más regulares comparados con los demás años, donde los promedios de descarga fluctúan alrededor del caudal medio multianual (línea naranja).

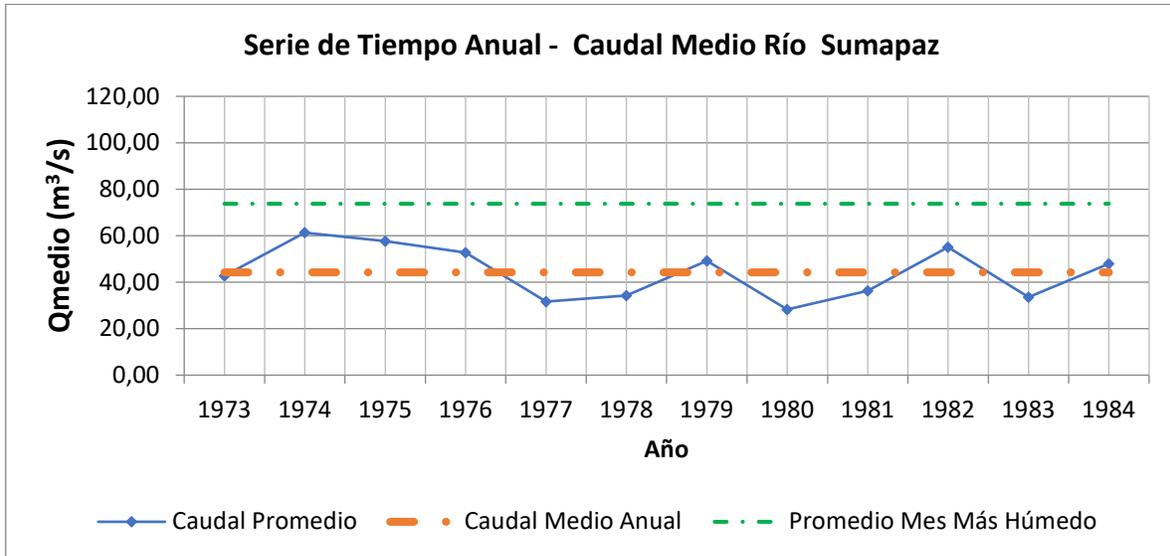


Gráfico 15. Serie de tiempo anual para caudales medios del río Sumapaz (1973-1984)

Los valores de caudales medios mensuales son representados en la Gráfico 16 donde se observan tres fases diferentes: desde 1973 a 1975 hay una intensa alternancia de los caudales con registros altos y bajos, presentándose los valores pico hacia el mes de febrero; el periodo que va de 1976 a 1982 muestra un aumento en el nivel base de los caudales mínimos, ocurre el valor más alto del registro (144.6 m³/s) y después de éste los caudales presentan una variación que va siendo atenuada hasta el final del intervalo. La última fase agrupa 1982 a 1984 y exhibe alternancia de valores altos y bajos cuyas diferencias son mucho más significativas en relación con la fase anterior y valores picos significativos hacia los meses de julio, diciembre y marzo.

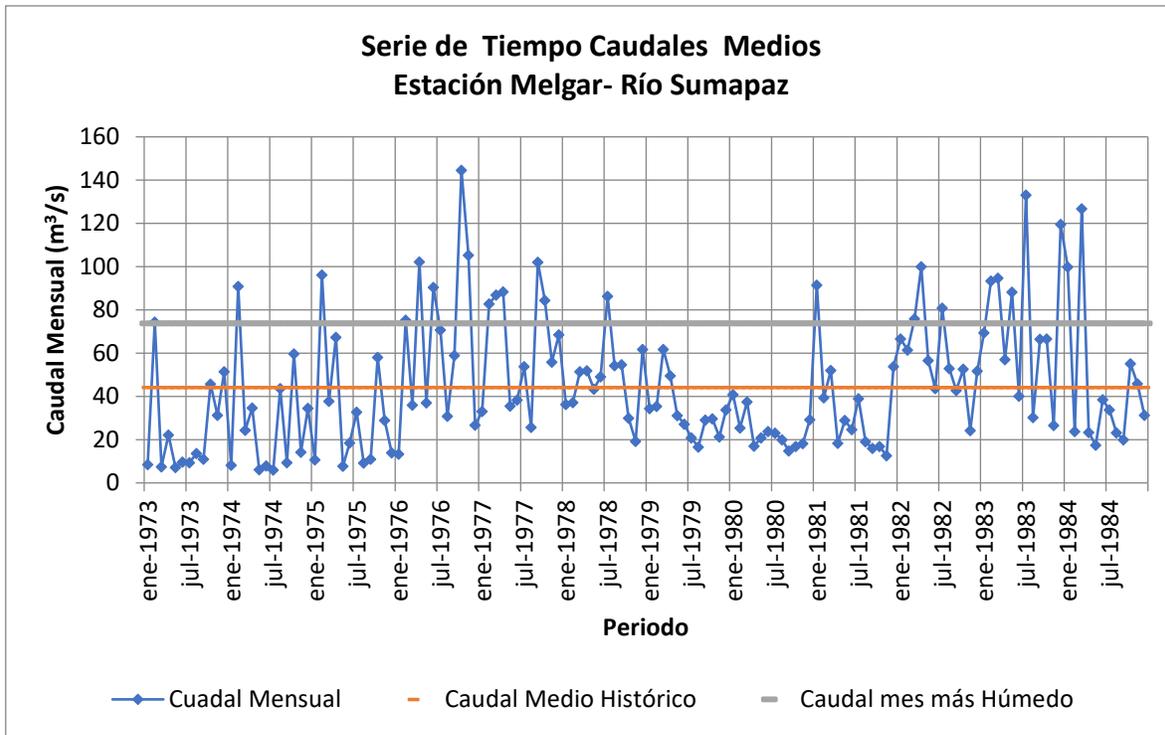


Gráfico 16. Serie de tiempo mensual para caudales medios río Sumapaz (1973-1984).

1.2.3. Curva de Duración Caudal

La curva de duración de caudales para el río Sumapaz, construida en base a los registros de la estación Melgar se muestra en el Gráfico 17, la cual parece sugerir un río de alta montaña debido a la pendiente pronunciada en el tramo inicial de la curva, producto de que los caudales más altos se presentan en periodos cortos.

En la Tabla 9 son resumidos los valores característicos para el río Sumapaz, estación Melgar, localizada en estribaciones del municipio, para tiempos de duración del 50%, 75% y 90%.

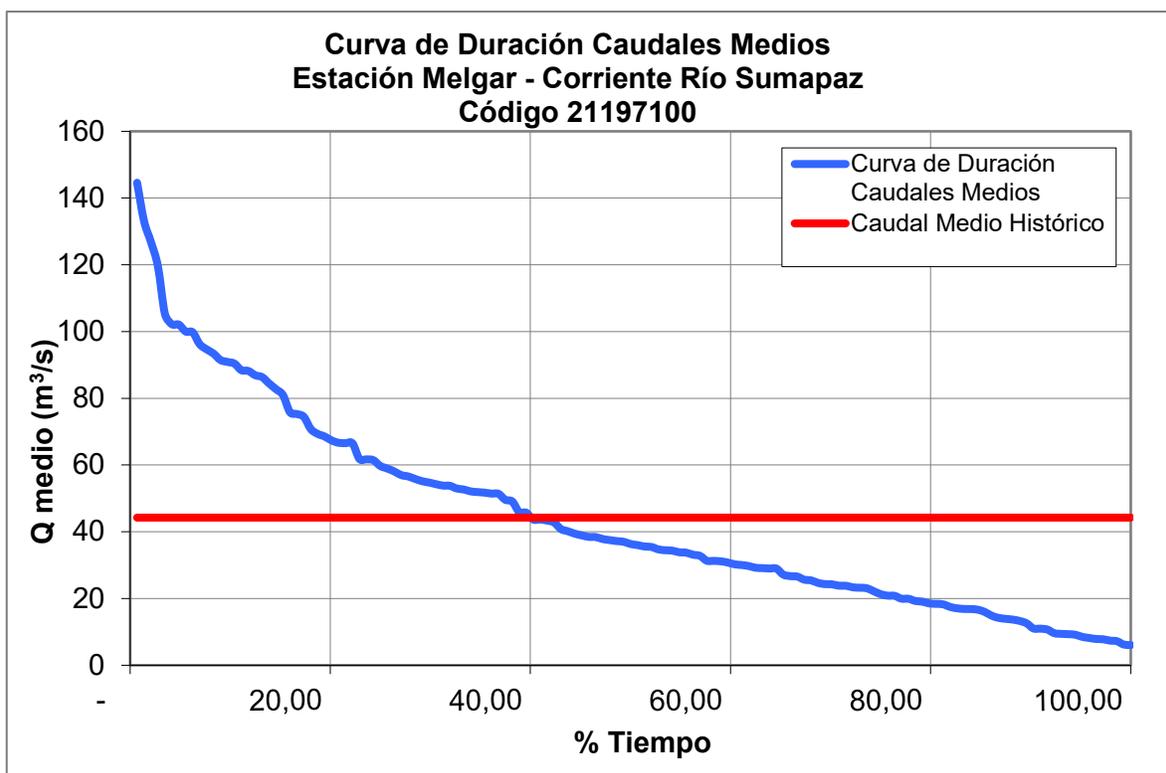


Gráfico 17. Curva de duración de caudales medios para el río Sumapaz, Estación Melgar.

Tabla 9. Valores de descarga característicos para el río Sumapaz, Estación Melgar.

Valores Característicos Caudales Medios m³/s	
Máximo Registro	144.60
Registro 50%	36.34
Registro 75%	21.32
Registro 95%	9.16
Menor Registro	6.06

1.2.4. Niveles

Los niveles registrados para el río Sumapaz han sido representados en la Gráfico 18, Gráfico 19 y Gráfico 20. Las gráficas indican que durante el año ocurren dos ciclos con niveles altos (abril a junio y octubre a diciembre) donde el mes de noviembre presenta el promedio más alto (107.91 cm) seguido por mayo (100.36 cm).

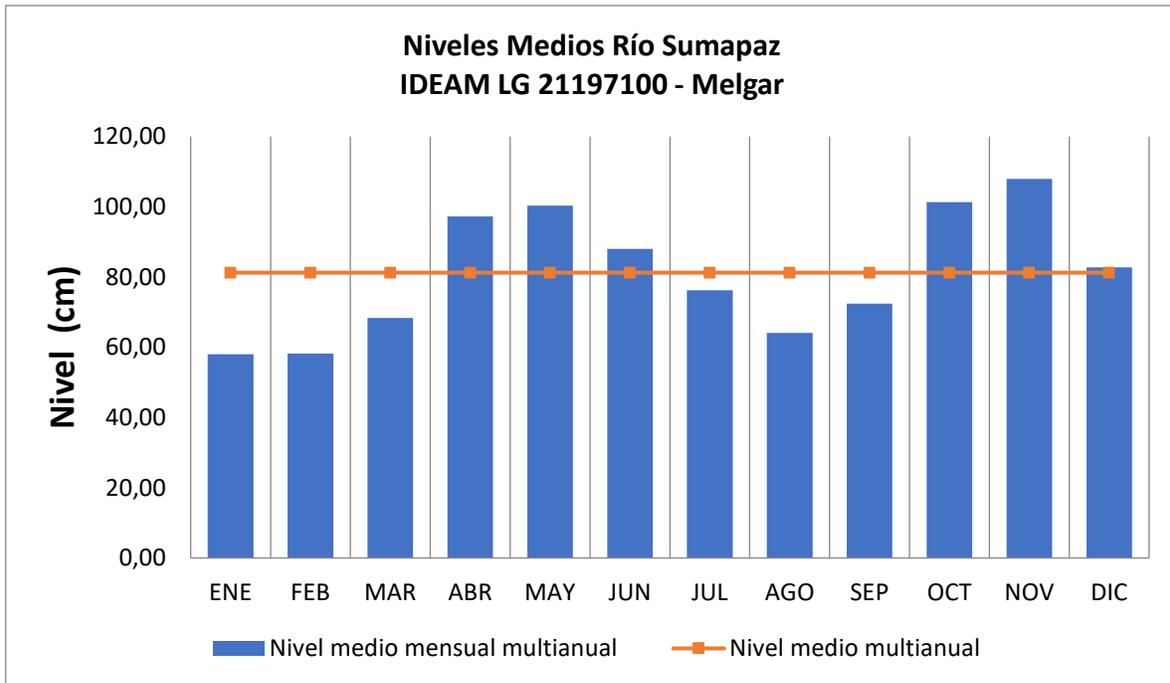


Gráfico 18. Niveles medios mensuales rio Sumapaz. Nivel medio multianual 81.25 cm.

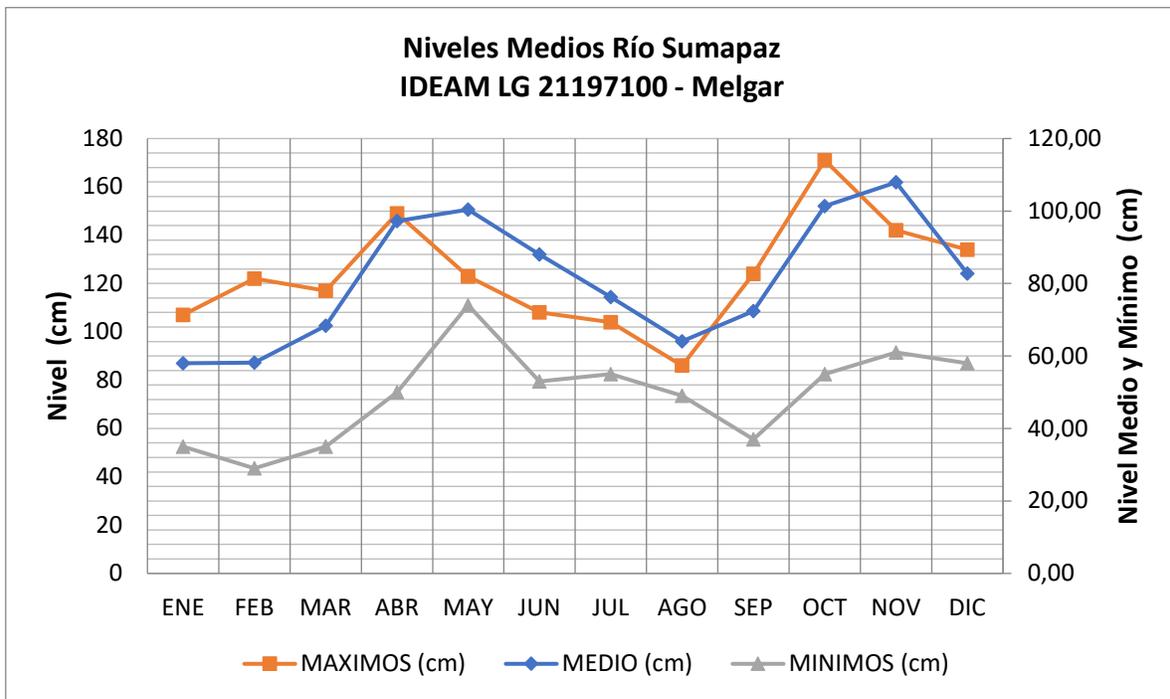


Gráfico 19. Niveles medios, máximos y mínimos para el rio Sumapaz calculados a partir de los valores mensuales históricos.

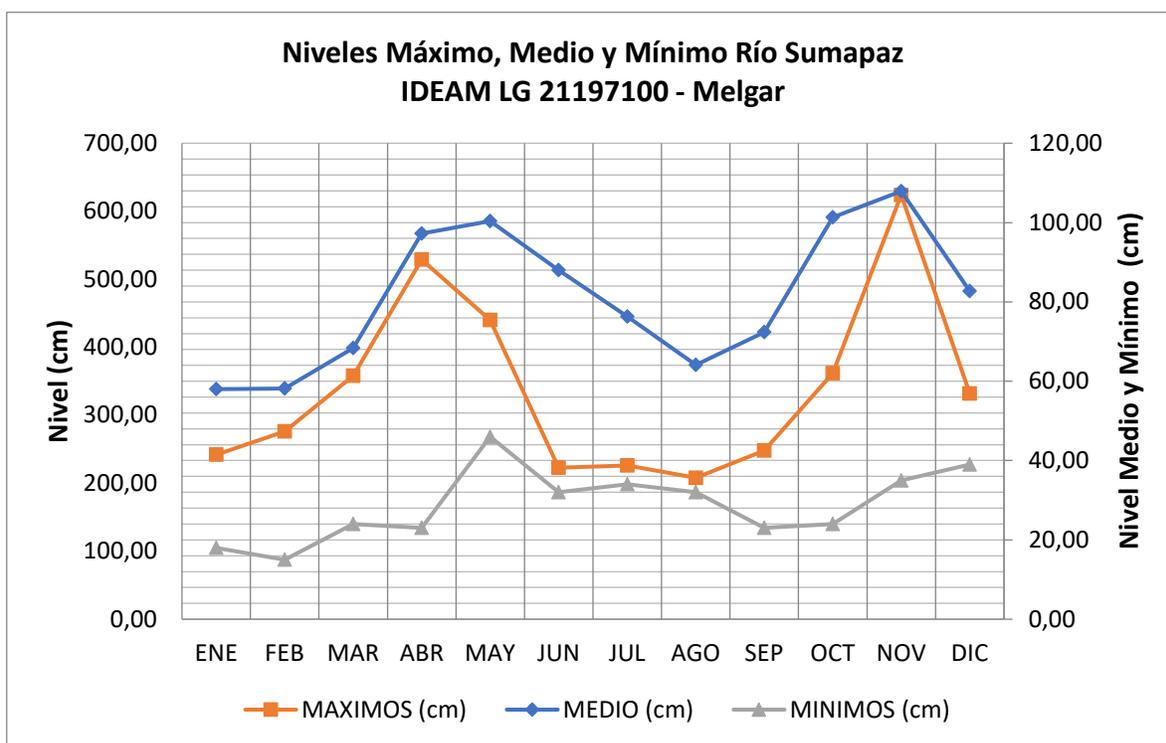


Gráfico 20. Niveles máximos, medios y mínimos absolutos para el río Sumapaz, Estación Melgar.

1.2.5. Series de tiempo niveles

La serie de tiempo para los niveles medios del río Sumapaz se muestra en la Gráfico 21. En general se aprecia que durante 1973 a 1975 el nivel base de los valores más bajos es el mínimo para el registro; de 1975 a 1984 el nivel base presenta un ascenso y las diferencia entre valores altos y bajos es inferior en relación con la fase previa, de igual modo los datos parecen indicar una tendencia decreciente hasta el año 1981 donde nuevamente los datos altos y bajos ocurren con diferencias muy pronunciadas, alcanzándose los niveles máximos y mínimos históricos.

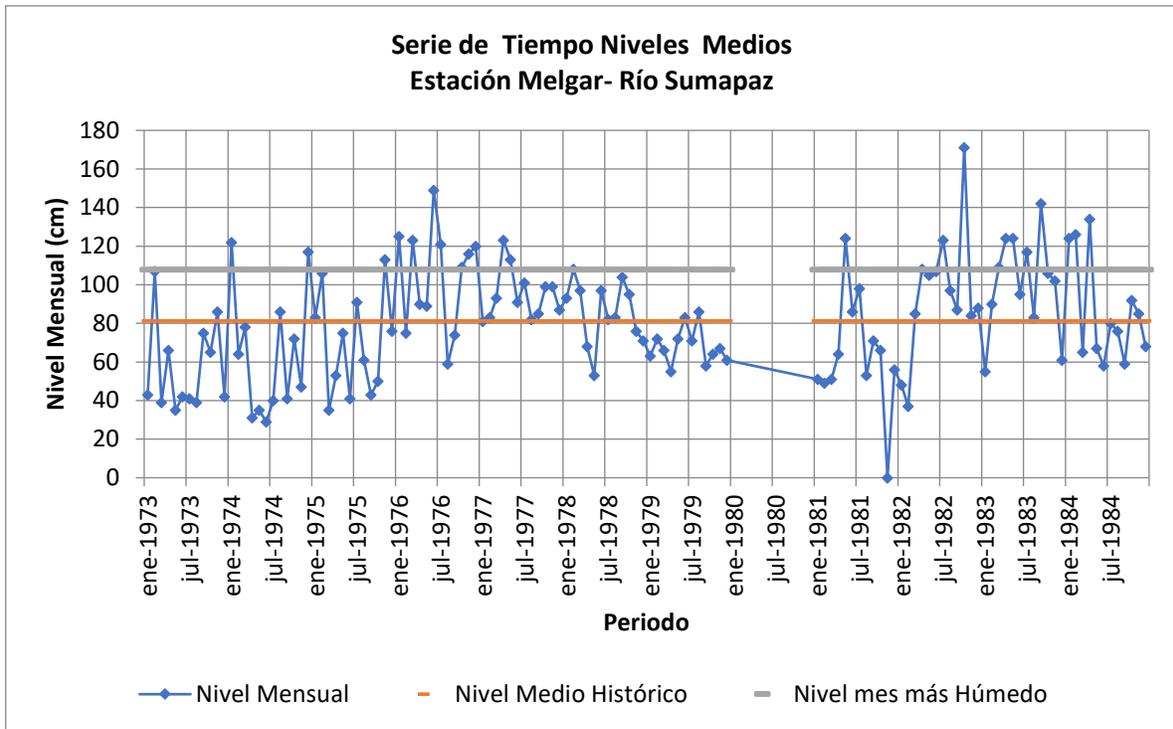


Gráfico 21. Serie de tiempo mensual para niveles medios del río Sumapaz (1973-1984).

2. Análisis de Frecuencias Información Hidrológica

Para comprender la metodología empleada en el cálculo de los periodos de retorno de las inundaciones para este estudio específico, es conveniente introducir algunos conceptos claves empleados en el tratamiento de la información:

Descarga Q (Caudal): corresponde al volumen de agua por unidad de tiempo expresado en metros cúbicos por segundo

Descarga pico de inundación (flood-peak discharge): la corresponde al flujo que ocurre cuando la etapa de inundación (*flood stage*) o profundidad es alcanzada en una corriente o estructura de control de agua como resultado de un evento de tormenta. Usualmente es referida en pies cúbicos por segundo o metros cúbicos por segundo y es la cantidad de agua que fluiría a través un punto de interés durante un segundo en la etapa de máxima inundación (United States Department of Agriculture, 1989).

Caudal máximo anual: es el flujo pico instantáneo máximo que ocurre en cualquier momento durante el año (Chow, Maidment, & Ways, 1994).

Magnitud de inundación (flood magnitude): el tamaño de una descarga pico de inundación dada en ft^3/seg o m^3/seg (Humbolt State University, 2013).

Vale la pena aclarar que cuando la variable aleatoria considerada es una magnitud relacionada con algún fenómeno natural, es conveniente referirse a periodos de retorno en lugar de probabilidades de ocurrencia (Maggio, 2013).

2.1. Descripción del proceso

La magnitud de una descarga pico de inundación (flood-peak discharge) y la probabilidad de excedencia asociada puede ser estimada desde varias aproximaciones, el análisis de frecuencias es una de ellas, la cual se basa en la inferencia estadística. En este método, las magnitudes observadas de descargas pico de inundación instantáneas de una corriente son analizadas y una distribución de probabilidad es seleccionada para producir la mejor curva de ajuste (Soong, Ishii, Sharpe, & Avery, 2004).

La ventaja del análisis de frecuencias sobre otras aproximaciones es que las aproximaciones están basadas en las magnitudes de las descargas pico y las probabilidades de excedencia son estimadas de inundaciones actuales, no de precipitaciones, como en el modelo de precipitación-escorrentía (donde la probabilidad de excedencia se asume igual a la de diseño de precipitación) *ibid.*

La escala temporal para las curvas de frecuencia es el intervalo de recurrencia. Este término es definido como el intervalo promedio de tiempo dentro del cual una inundación de determinada magnitud será igualada o excedida una vez. Una inundación que tenga un intervalo de recurrencia de 10 años es una que tiene un 10% de posibilidad de ocurrir en cualquier año, así mismo una inundación con 50-años tiene una posibilidad de 2%, y una inundación de 100-años tiene un 1% de probabilidad de ocurrir en cualquier año (Dalrymple, 1960).

En general hay consenso de que las inundaciones no exceden intervalos de recurrencia de 50 – 100 años, satisfaciendo las necesidades de la mayoría de los estudios de ingeniería (Dalrymple, 1960).

Para el desarrollo de este apartado se recolectaron los caudales máximos mensuales absolutos en (m³/s) registrados en las estaciones de cada una de estas corrientes. Los valores fueron organizados en orden descendente y se asignó un valor de probabilidad p_T usando la fórmula Weibull (I), calculando el logaritmo natural de cada caudal (distribuciones Log-Normal y Log-Pearson), construyendo una variable reducida de la forma (ecuación II):

$$x_T = -\ln(\ln(1 - p_T)) \quad (II)$$

Para la distribución de Pearson y factores de frecuencia K_T para las distribuciones restantes.

Ahora bien, la magnitud x_T de un evento hidrológico extremo puede representarse como la media μ más una desviación Δx_T , de la variable con respecto a la media (Chow, Maidment, & Ways, 1994):

$$x_T = \mu + \Delta x_T \quad (\text{III})$$

Esta desviación con respecto a la media puede igualarse al producto de la desviación estándar σ y el factor de frecuencia K_T ; es decir, $\Delta x_T = K_T \sigma$. La desviación Δx_T y el factor de frecuencia K_T son funciones del periodo de retorno y del tipo de distribución de probabilidad a utilizarse en el análisis. Por consiguiente, la ecuación (III) puede expresarse como:

$$x_T = \bar{x} + K_T \sigma \quad (\text{IV})$$

la cual puede aproximarse por:

$$x_T = \bar{x} + K_T s \quad (\text{V})$$

El factor de frecuencia (K_T) (distribución Normal y Log-Normal) puede expresarse usando la ecuación (IV) como:

$$K_T = \frac{x_T - \mu}{\sigma} \quad (\text{VI})$$

Lo anterior equivale a una variable normal estándar z . El valor de z correspondiente a una probabilidad de excedencia de p ($p = 1/T$) puede calcularse encontrando el valor de una variable intermedia w :

$$w = \sqrt{\left[\ln \left(\frac{1}{p^2} \right) \right]} \quad (0 < p \leq 0.5) \quad (\text{VII})$$

y luego calculando z utilizando la aproximación:

$$z = w - \frac{2.515517 + 0.802853w + 0.010328w^2}{1 + 1.432788w + 0.189269w^2 + 0.001308w^3} \quad (\text{VIII})$$

Cuando $p > 0.5$, $1-p$ es sustituido por p en la ecuación (VII) y el valor de z calculado al utilizar (VIII) se le asigna un signo negativo. El error de esta fórmula es menor que 0.00045 en z (Abramowitz & Stegun (1965) en Chow, Maidment, & Ways, 1994).

Una vez se han calculado estas variables y los parámetros de cada distribución se proceden a evaluar cada uno de los eventos ordenados en los modelos de probabilidad elegidos. Con el fin de evaluar el grado de ajuste de cada modelo con los valores observados se desarrolló la prueba de χ^2 (Ji-Cuadrado) (ecuación IX) con un grado de significancia de 0.005, esto permite seleccionar la distribución con el mejor ajuste de los datos.

$$\chi^2 = \sum_{i=1}^n \frac{(y - y_c)^2}{y_c} \quad \text{con } n - 1 \text{ grados de libertad} \quad (\text{IX})$$

A continuación, se presentan los gráficos correspondientes a cada una de las curvas de distribución comparadas con los datos de caudales y niveles máximos absolutos, que pretenden servir de comparación gráfica para establecer el mejor ajuste. Así mismo se expone una tabla donde se resumen los periodos de retorno y probabilidades generadas por cada uno de los modelos, donde han sido seleccionados aquellas descargas y niveles cuyos valores se han sometido a la prueba de Ji-Cuadrado inverso.

2.2. Río Magdalena

3. Análisis de frecuencias caudales mensuales máximos.

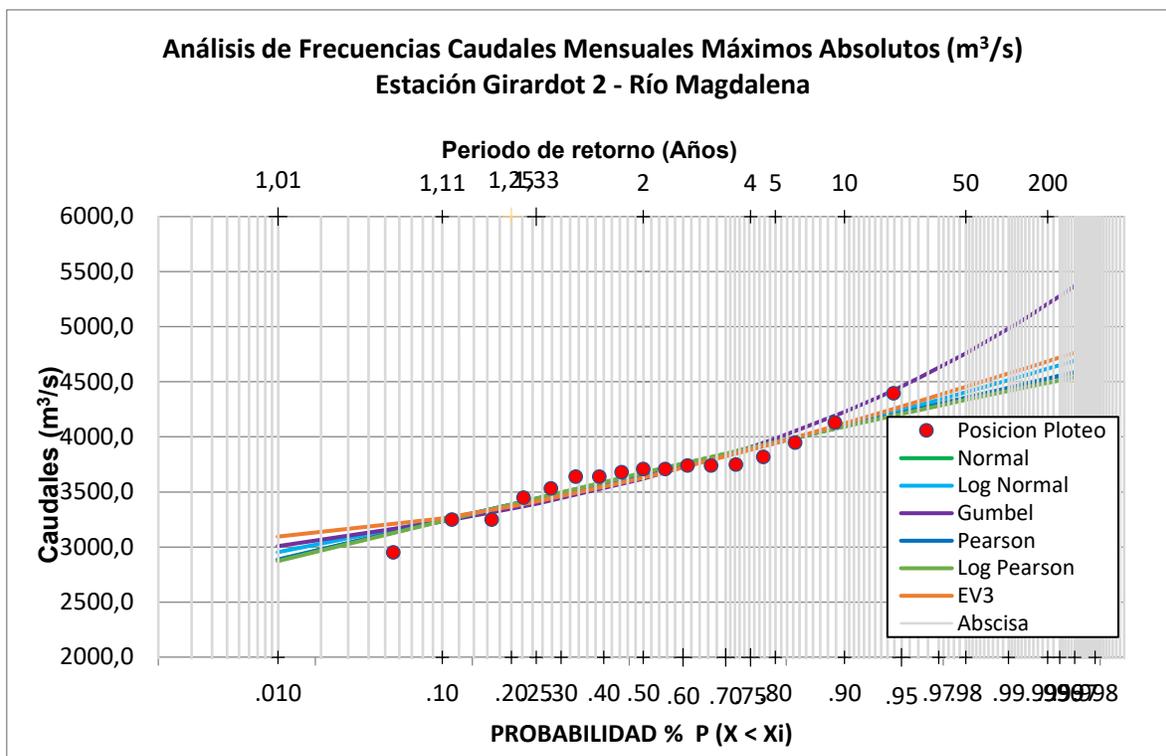


Gráfico 22. Distribución de las descargas mensuales máximas absolutas para el río Magdalena y distribuciones probabilísticas de los datos.

Tabla 10. Resultados Análisis De Frecuencias Caudales Mensuales Máximos Absolutos (M³/S) 1961-1978

Tr años	NORMAL	GUMBEL	PEARSON	LOG-PEAR	LOG-NOR	EV3	promedio
2	3667,2	3618,5	3667,8	3673,5	3652,0	3629,4	3651
5	3949,3	3983,9	3949,5	3952,9	3943,4	3944,5	3954
10	4096,9	4225,9	4096,5	4094,8	4105,0	4123,7	4124
15	4170,5	4362,4	4169,8	4164,3	4188,0	4215,8	4212
20	4218,7	4458,0	4217,8	4209,4	4243,4	4277,0	4271
25	4254,2	4531,6	4253,1	4242,2	4284,5	4322,5	4315
50	4355,8	4758,4	4354,0	4335,1	4404,6	4454,3	4444
100	4447,2	4983,5	4444,7	4416,9	4515,6	4574,8	4564

200	4530,8	5207,8	4527,7	4490,2	4619,5	4686,4	4677
500	4632,2	5503,7	4628,1	4577,1	4748,6	4823,1	4819
	39,1	50,3	39,0	39,1	41,2	49,9	

Probabilidad %	NORMAL	GUMBEL	PEARSON	LOG-PEAR	LOG-NOR	EV3	promedio
min	2886,0	3007,2	2883,5	2871,3	2952,6	3094,0	2949
10	3235,8	3230,2	3235,5	3232,7	3247,5	3258,5	3240
25	3441,2	3395,0	3441,6	3444,0	3434,2	3414,3	3428
50	3667,2	3618,5	3667,8	3673,5	3652,0	3629,4	3651
75	3893,2	3902,0	3893,5	3898,1	3883,7	3878,7	3892
90	4096,9	4225,9	4096,5	4094,8	4105,0	4123,7	4124
máx	4632,2	5503,7	4628,1	4577,1	4748,6	4823,1	4819

4. Análisis de frecuencias niveles mensuales máximos.

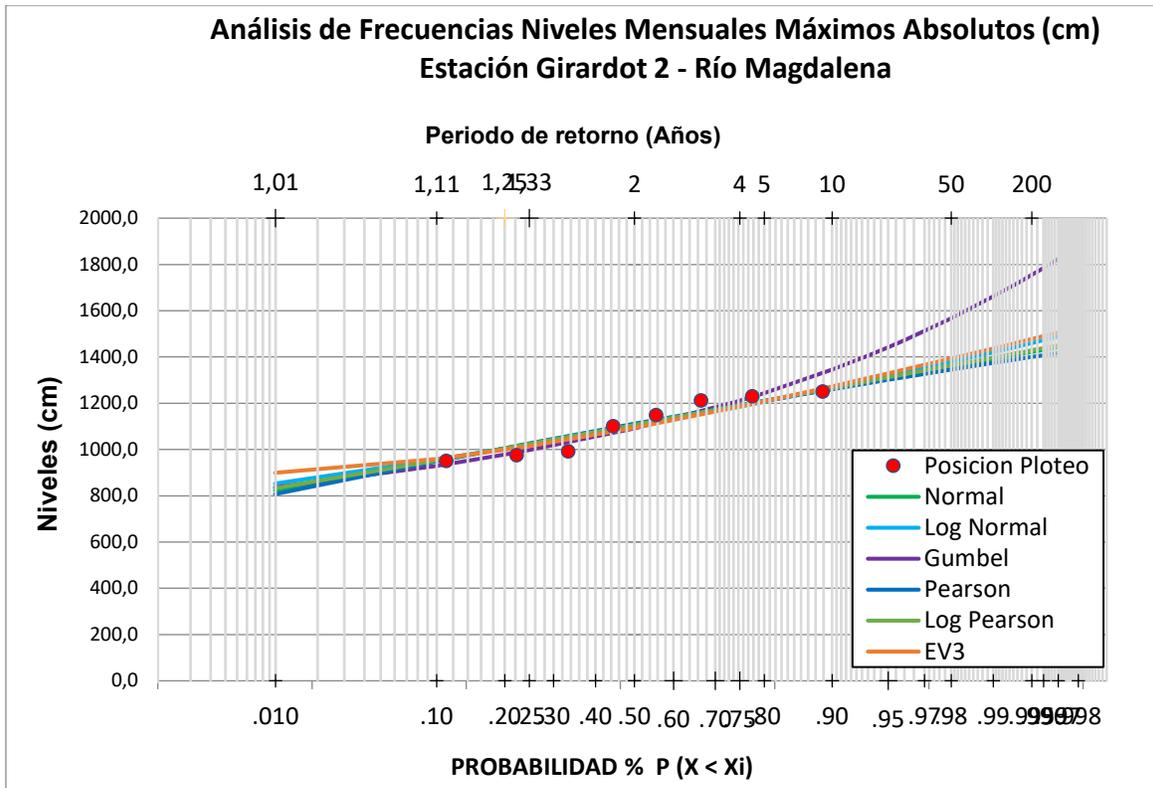


Gráfico 23. Distribución de los niveles mensuales máximos absolutos para el río Magdalena y distribuciones probalísticas para los datos.

Tabla 14. Resultados análisis de frecuencias niveles máximos mensuales absolutos (cm) 1972-1980.

Tr años	NORMAL	GUMBEL	PEARSON	LOG-PEAR	LOG-NOR	EV3	promedio
2	1107,2	1091,4	1111,0	1106,5	1100,6	1093,5	1102
5	1209,7	1244,0	1210,6	1210,8	1207,0	1207,9	1215
10	1263,3	1345,0	1260,6	1266,0	1266,6	1273,0	1279
15	1290,0	1402,0	1285,1	1293,6	1297,5	1306,4	1312
20	1307,5	1441,9	1300,9	1311,7	1318,1	1328,7	1335
25	1320,4	1472,6	1312,4	1325,1	1333,5	1345,2	1352
50	1357,3	1567,3	1345,1	1363,3	1378,5	1393,1	1401
100	1390,5	1661,2	1373,9	1397,6	1420,3	1436,8	1447

200	1420,8	1754,9	1399,8	1429,1	1459,7	1477,3	1490
500	1457,6	1878,4	1430,6	1467,0	1508,9	1527,0	1545
chi 2	9,1	10,5	9,0	9,0	9,8	9,8	

Probabilidad %	NORMAL	GUMBEL	PEARSON	LOG-PEAR	LOG-NOR	EV3	promedio
min	823,6	836,2	807,0	832,1	852,5	899,1	842
10	950,6	929,3	948,4	951,7	955,8	958,8	949
25	1025,2	998,1	1027,4	1024,5	1022,2	1015,4	1019
50	1107,2	1091,4	1111,0	1106,5	1100,6	1093,5	1102
75	1189,3	1209,8	1191,2	1189,9	1185,0	1184,0	1192
90	1263,3	1345,0	1260,6	1266,0	1266,6	1273,0	1279
máx	1457,6	1878,4	1430,6	1467,0	1508,9	1527,0	1545

2.3. Río Sumapaz

Análisis de frecuencias caudales mensuales máximos

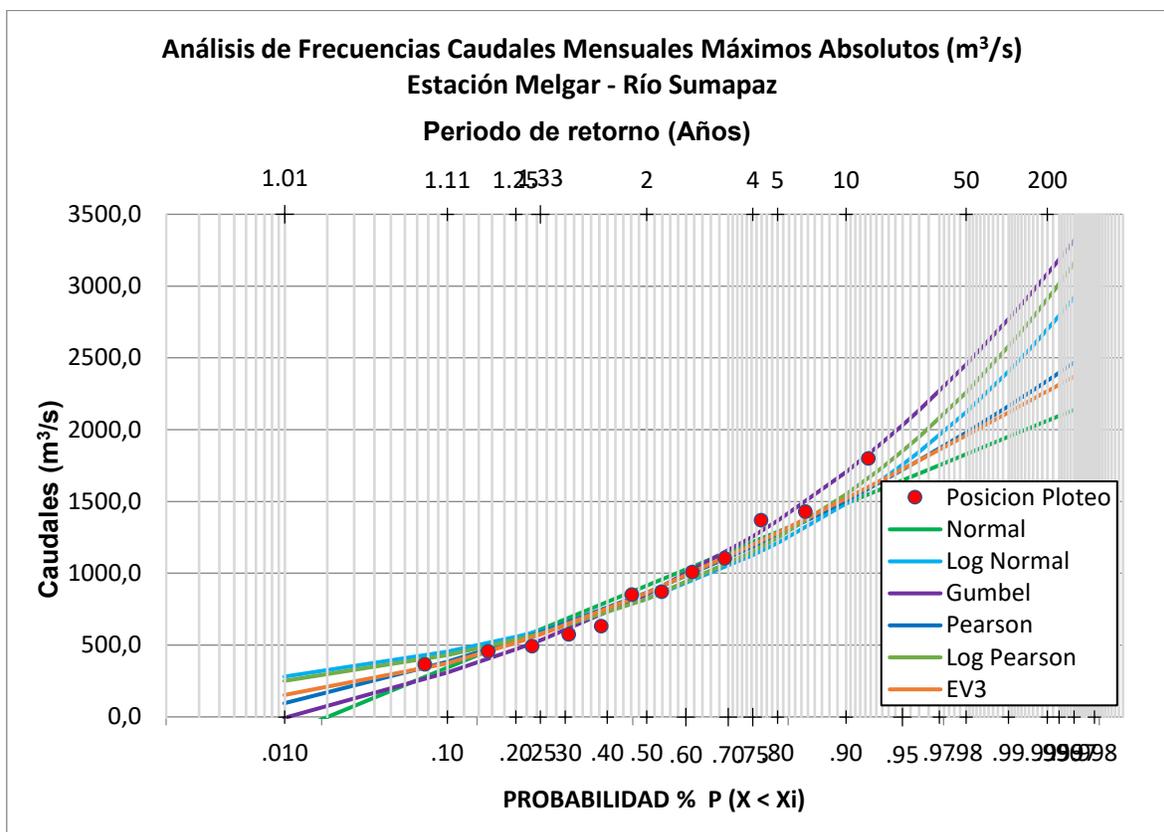


Gráfico 24. Distribución de las descargas mensuales máximas absolutas para el río Sumapaz y distribuciones probabilísticas para los datos.

Tabla 11. Resultados Análisis de frecuencias descargas mensuales máximos absolutos (m^3/s) 1973-1984.

Tr años	NORMAL	GUMBEL	PEARSON	LOG-PEAR	LOG-NOR	EV3	promedio
2	914.2	852.2	865.3	820.4	821.8	864.0	856
5	1289.3	1365.9	1266.8	1247.0	1212.0	1282.9	1277
10	1485.5	1706.0	1506.8	1549.4	1485.2	1521.1	1542
15	1583.4	1897.9	1634.6	1725.7	1643.8	1643.6	1688
20	1647.5	2032.3	1721.2	1851.6	1756.6	1725.0	1789

25	1694.7	2135.8	1786.5	1949. 9	1844.6	1785. 4	1866
50	1829.8	2454.6	1980.9	2260. 1	2121.8	1960. 7	2101
100	1951.2	2771.1	2165.1	2579. 7	2406.4	2120. 9	2332
200	2062.4	3086.4	2341.7	2910. 2	2700.1	2269. 3	2562
500	2197.1	3502.4	2566.2	3366. 1	3104.6	2451. 0	2865
chi 2	156.6	77.0	93.3	84.2	140.2	77.2	

Probabilidad %	NORMAL	GUMBEL	PEARSON	LOG-PEAR	LOG-NOR	EV3	promedio
min	(124.4)	(7.2)	94.9	250.6	280.2	152.1	108
10	340.7	306.2	383.0	428.3	453.6	370.9	380
25	613.8	538.0	593.9	584.5	602.0	578.0	585
50	914.2	852.2	865.3	820.4	821.8	864.0	856
75	1214.7	1250.7	1181.2	1147. 9	1121.9	1195. 4	1185
90	1485.5	1706.0	1506.8	1549. 4	1485.2	1521. 1	1542
máx	2197.1	3502.4	2566.2	3366. 1	3104.6	2451. 0	2865

Análisis de frecuencias niveles mensuales máximos

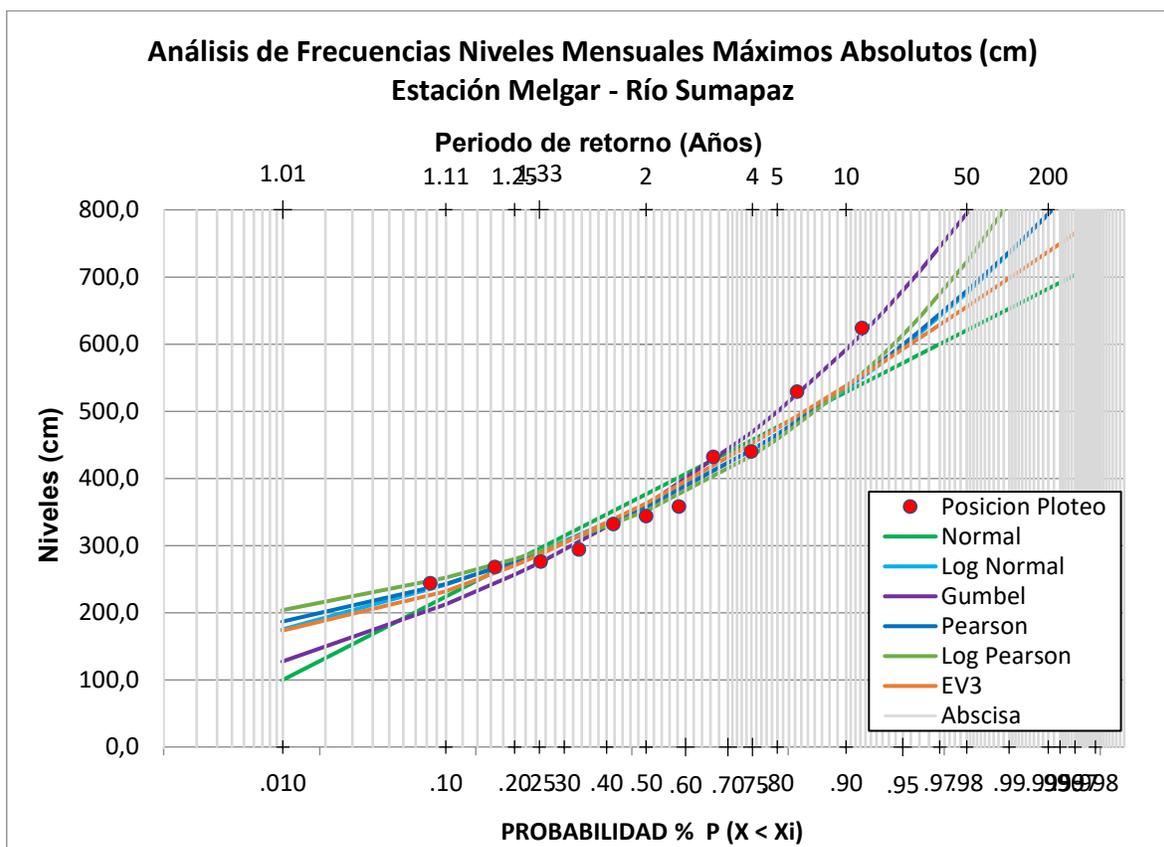


Gráfico 25. Distribución de los niveles mensuales máximos absolutos para el río Sumapaz y distribuciones probabilísticas para los datos.

Tabla 12. Resultados análisis de frecuencias niveles máximos mensuales absolutos (cm) 1973-1984.

Tr años	NORMAL	GUMBEL	PEARSON	LOG-PEAR	LOG-NOR	EV3	Promedio
2	376.5	360.1	357.0	351.5	359.0	363.0	361
5	476.5	499.3	465.9	458.4	465.3	474.8	473
10	528.8	591.5	535.1	535.2	532.9	538.3	544
15	554.9	643.5	573.1	580.7	570.2	570.9	582
20	572.0	679.9	599.2	613.6	596.1	592.6	609
25	584.6	708.0	619.1	639.5	615.9	608.8	629
50	620.6	794.3	679.2	722.6	676.2	655.5	691
100	653.0	880.1	737.3	810.6	735.4	698.2	752
200	682.6	965.6	794.1	904.4	794.2	737.8	813
500	718.5	1078.3	867.5	1038.3	871.8	786.2	893
chi 2	34.3	16.4	18.6	19.1	20.3	19.7	

Probabilidad %	NORMAL	GUMBEL	PEARSON	LOG-PEAR	LOG-NOR	EV3	Promedio
min	99.5	127.2	186.7	203.7	175.0	173.2	161
10	223.5	212.2	242.4	251.9	241.4	231.6	234
25	296.3	275.0	289.9	292.2	291.6	286.8	289
50	376.5	360.1	357.0	351.5	359.0	363.0	361
75	456.6	468.1	441.9	433.4	441.9	451.4	449
90	528.8	591.5	535.1	535.2	532.9	538.3	544
máx	718.5	1078.3	867.5	1038.3	871.8	786.2	893

3. Análisis de Resultados

A continuación, se presenta el análisis de datos para establecer un modelo evolutivo que permita reconstruir el comportamiento histórico del sistema fluvial asociado a los afluentes ubicados en el área de la desembocadura del río Sumapaz, mediante la integración y análisis morfodinámico de los datos disponibles, haciendo uso de datos ya presentes en el IDEAM. Se tomaron los datos calculados en la Tabla 12, obteniendo las respectivas gráficas de regresión con su ecuación y coeficiente de regresión R que es comparable con el valor del coeficiente de correlación comparado a su vez con cada raíz de R de cada modelo tal como se puede ver desde la Gráfico 26 hasta la Gráfico 30.

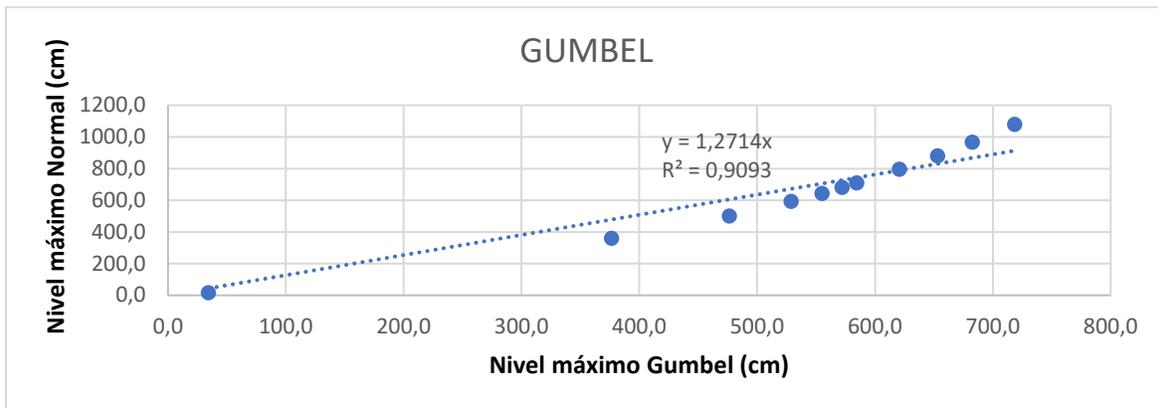


Gráfico 26. Modelo de GUMBEL

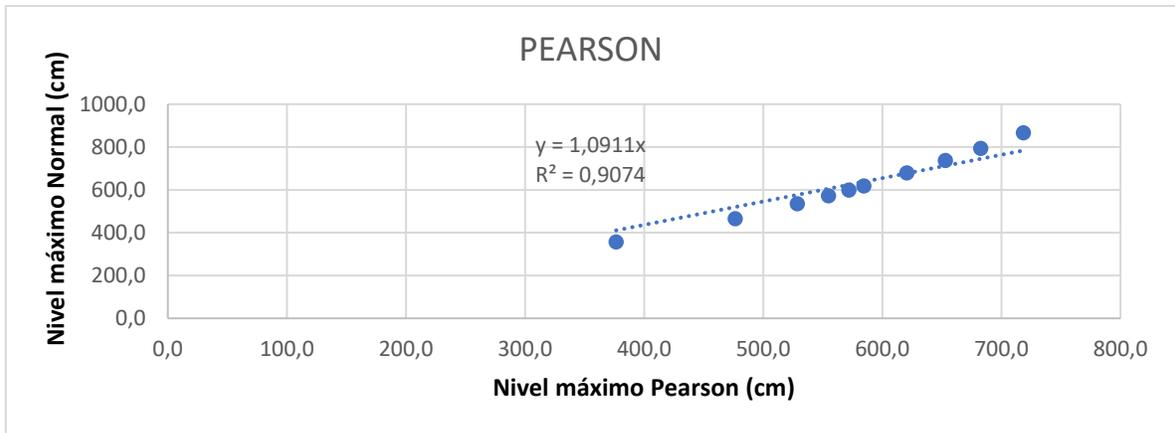


Gráfico 27. Modelo de PEARSON

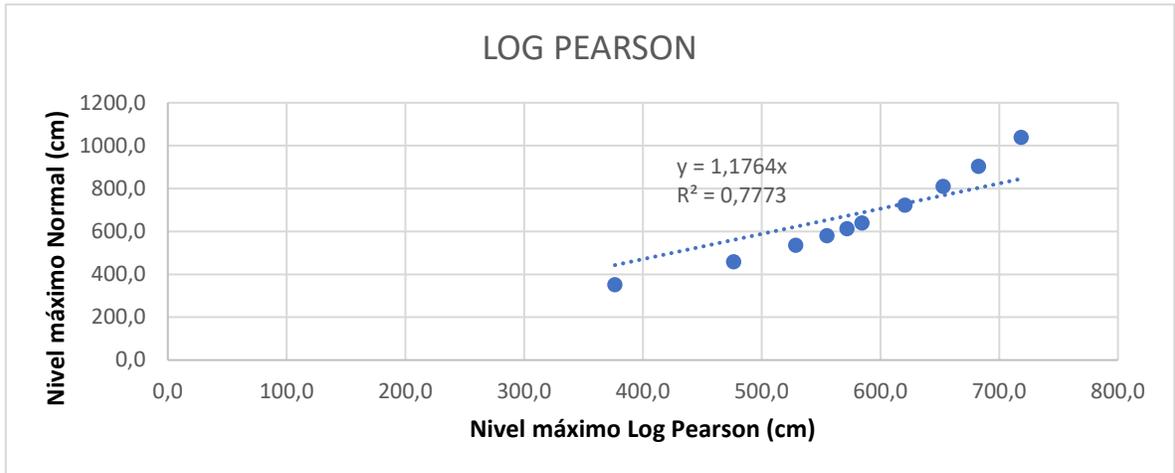


Gráfico 28. Modelo LOG PEAR

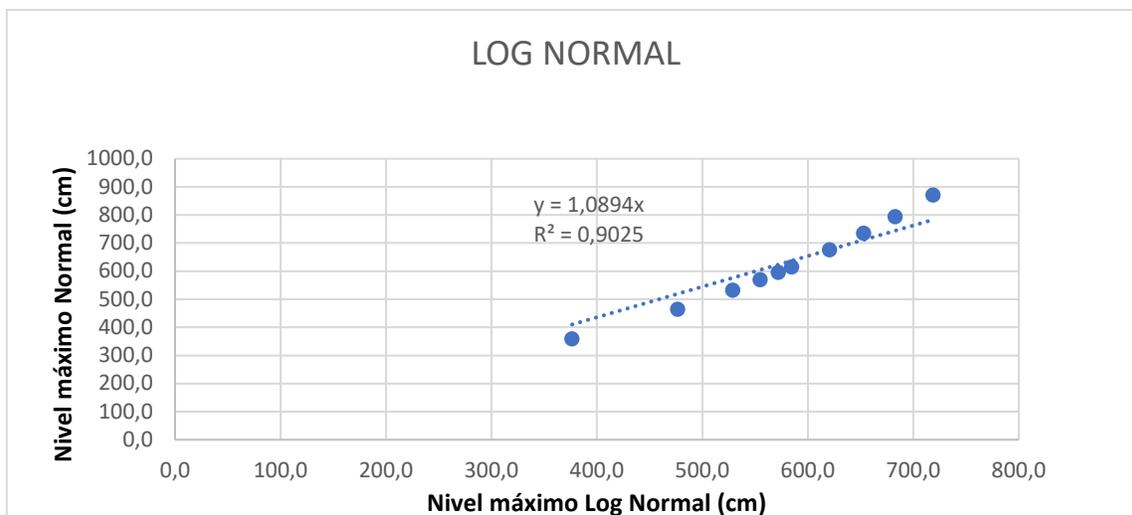


Gráfico 29. Modelo LOG NORMAL

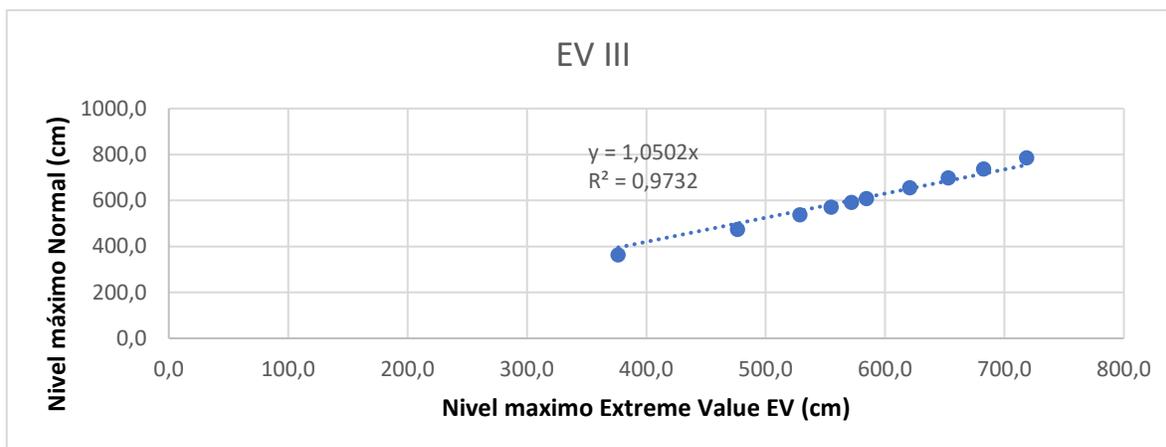


Gráfico 30. Modelo EV III

En la Tabla 13, se puede ver la comparación y cálculo de todos los valores de índice de correlación y R para poder obtener el análisis respectivo en cuanto al modelo más aceptable de elección de la ecuación que sirve para hacer una proyección adecuada para el caudal del río Sumapaz.

Tabla 13. Comparación de índices de correlación y R a partir de gráficas de regresión

Parámetro	IND. CORR	RAIZ (R ²)	%
Modelo Estadístico			
GUMBEL	0,986032042	0,9535	3,253204196
PEARSON	0,991551751	0,952575456	3,8976295

LOG PEAR	0,969204381	0,881646188	8,755819299
LOG NOR	0,989494638	0,95	3,949463818
EV 3	0,999159814	0,986508996	1,265081773

A partir de la Tabla 13 es posible observar que el modelo más coherente para la selección de la ecuación que permite mostrar el histórico de caudal para el río Sumapaz es el modelo estadístico de EV III con 1.26% de diferencia con relación al normal; por lo cual el modelo matemático es $y=1,0502x$.