



International Cooperation
Agency Japan



**PROYECTO DE PROTECCIÓN DE LAS PLANICIES DE
INUNDACIÓN Y POBLACIONES RURALES VULNERABLES
CONTRA LAS INUNDACIONES EN LA REPÚBLICA DEL PERÚ**

**HIDROLOGÍA DE MÁXIMAS AVENIDAS EN
LA CUENCA DEL RÍO MAJES CAMANÁ**

Diciembre 2012

 Yachiyo Engineering Co., Ltd.
 **NIPPON KOEI CO., LTD.**

LATIN AMÉRICA - CARIBBEAN



NIPPON KOEI LAC CO., LTD.
Ingenieros Consultores

CONTENIDO

<u>I.</u>	<u>INTRODUCCIÓN</u>	1
<u>II.</u>	<u>ASPECTOS GENERALES</u>	1
<u>III.</u>	<u>DESCRIPCIÓN DEL PROYECTO</u>	8
<u>3.1.</u>	<u>Información disponible</u>	8
<u>3.2.</u>	<u>Nivel de Riesgo Asumido</u>	16
<u>3.3.</u>	<u>Delimitación de la Cuenca</u>	17
<u>3.4.</u>	<u>Precipitación de Diseño</u>	18
<u>3.5.</u>	<u>Modelo de Infiltración</u>	26
<u>3.6.</u>	<u>Modelo del Hidrograma Unitario (Transformada)</u>	32
<u>3.7.</u>	<u>Modelo de Tránsito de Avenidas</u>	32
<u>3.8.</u>	<u>Cálculos de flujo base</u>	33
<u>3.9.</u>	<u>Soporte Lógico (Software)</u>	34
<u>3.10.</u>	<u>Calibración del Número de Curva</u>	35
<u>IV.</u>	<u>CONCLUSIONES Y RECOMENDACIONES</u>	47

LISTA DE TABLAS

<u>Tabla 1. Temperatura Media Anual versus Altitud.....</u>	3
<u>Tabla 2. Datos de precipitación mensual en la estación Tisco.....</u>	5
<u>Tabla 3. Lista de estaciones meteorológicas en el área de estudio.</u>	10
<u>Tabla 4. Estaciones meteorológicas cuyos datos se descartaron para el estudio hidrológico.</u>	11
<u>Tabla 5. Periodos de los datos de estaciones meteorológicas en el área de estudio. Algunas estaciones meteorológicas fueron descartadas por falta de datos.</u>	12
<u>Tabla 7. Ubicación de todas las estaciones hidrológicas de la Cuenca Majes-Camaná.....</u>	13
<u>Tabla 8. Caudales máximos anuales en la Estación Huatiapa.....</u>	15
<u>Tabla 9. Evaluación del mejor ajuste de cinco distribuciones de probabilidades. La distribución GEV tuvo el mejor ajuste basado en el criterio SLSC.</u>	16
<u>Tabla 11. Lista de mapas del IGN usados para la delimitación de la cuenca.</u>	17
<u>Tabla 12. Precipitaciones para diferentes periodos de retorno en cada estación meteorológica.</u>	20
<u>Tabla 13. Precipitaciones para cada sub cuenca de la cuenca del Majes - Camaná.....</u>	25
<u>Tabla 15. Valores de los CN para áreas rurales y áreas áridas y semiáridas. Fuente: Maidment (1993).</u>	30
<u>Tabla 16. Valores de CN para áreas áridas y semiáridas. Fuente: Maidment (1993).</u>	31
<u>Tabla 18. Flujos base estimados en la Estación Huatiapa.</u>	34
<u>Tabla 19. Valores iniciales y finales del CN.....</u>	36
<u>Tabla 20. Caudales pico para diferentes periodos de retorno en Huatiapa.....</u>	36

LISTA DE FIGURAS

<u>Figura 1. Temperatura Media Anual versus Altitud</u>	3
<u>Figura 2. Temperaturas Medias Anuales versus la Altitud sobre los 2000 m.s.n.m. sin los valores atípicos</u>	4
<u>Figura 3. Regresión entre dos grupos de datos de precipitación mensual</u>	6
<u>Figura 4. Mapa de la Cuenca Majes-Camaná.</u>	7
<u>Figura 5. Isoyetas de la precipitación anual en la Cuenca Majes - Camaná. Note que las precipitaciones son bajas cerca del Océano Pacífico y se incrementan con la altitud. El efecto orográfico es evidente.</u>	8
<u>Figura 6. Distribución de las 38 estaciones meteorológicas usadas en las simulaciones hidrológicas.</u>	11
<u>Figura 7. Cuenca Majes-Camaná y sus 4 subcuencas.</u>	18
<u>Figura 8. Precipitación acumulada horaria de máximas avenidas registradas en Chivay por el SENAMHI, Fuente: preparado por el Grupo de Estudio de JICA basada en datos de la Estación Chivay del SENAMHI.</u>	19
<u>Figura 9. Isoyetas para las precipitaciones de 24 hr con un periodo de retorno de 2 años.</u>	21
<u>Figura 12. Isoyetas para las precipitaciones de 24 hr con un periodo de retorno de 25 años.</u>	22
<u>Figura 13. Isoyetas para las precipitaciones de 24 hr con un periodo de retorno de 50 años.</u>	23
<u>Figura 15. Esquema de las áreas de influencia de las estaciones pluviométricas para estimar precipitaciones en cada subcuenca.</u>	25
<u>Figura 16. Relación entre la precipitación total, P, y la precipitación efectiva, Pe.</u>	27
<u>Figura 17. Distribución inicial de los Números de Curva para iniciar la simulación hidrológica y calibración.</u>	32
<u>Figura 18. Esquema HEC-HMS de la cuenca Majes - Camaná y que muestra las 4 subcuencas en las que fue divididas.</u>	35
<u>Figura 19. Resumen de resultados del programa HEC – HMS para el periodo de retorno de 2 años en la estación Huatiapa.</u>	37
<u>Figura 20. Hidrograma para el periodo de retorno de 2 años en la estación Huatiapa.</u>	37

<u>Figura 22. Hidrograma para el periodo de retorno de 5 años en la estación Huatiapa.....</u>	38
<u>Figura 25. Resumen de resultados del programa HEC – HMS para avenidas de 20 años en la estación Huatiapa.</u>	40
<u>Figura 26. Hidrograma para el periodo de retorno de 20 años en la estación Huatiapa.....</u>	40
<u>Figura 27. Resumen de resultados del programa HEC – HMS para avenidas de 25 años en la estación Huatiapa.</u>	41
<u>Figura 29. Resumen de resultados del programa HEC – HMS para avenidas de 50 años en la estación Huatiapa.</u>	42
<u>Figura 31. Resumen de resultados del programa HEC – HMS para avenidas de 100 años en la estación Huatiapa.</u>	43
<u>Figura 33. Descarga específica de picos de avenidas en el área costera del Perú y caudal pico estimado en la estación Majes - Camaná usando el modelo HEC-HMS (periodo de retorno de 10 años).</u>	44
<u>Figura 34. Descarga específica de picos de avenidas en el área costera del Perú y caudal pico estimado en la estación Majes - Camaná usando el modelo HEC-HMS (periodo de retorno de 20 años).</u>	45
<u>Figura 35. Descarga específica de picos de avenidas en el área costera del Perú y caudal pico estimado en la estación Majes - Camaná usando el modelo HEC-HMS (periodo de retorno de 50 años).</u>	45
<u>Figura 36. Descarga específica de picos de avenidas en el área costera del Perú y caudal pico estimado en la estación Majes - Camaná usando el modelo HEC-HMS (periodo de retorno de 100 años).</u>	46

ESTUDIO HIDROLÓGICO DE LA CUENCA DEL RIO CAMANÁ MAJES

I. INTRODUCCIÓN

La costa del Perú es un área muy seca donde las precipitaciones usualmente no exceden los 100 mm/año. Por lo tanto, es necesario irrigar los campos de cultivo para el desarrollo de los cultivos. La mayoría de los cultivos ocupan las zonas bajas de los valles, debido a su cercanía a los ríos. Los cultivos suelen estar cerca de las orillas del río y están sujetas a inundaciones. Existen ciudades de diferentes tamaños que también se encuentran ubicadas a lo largo de los ríos de la Cuenca del Pacífico. Por lo tanto, existe la necesidad de proteger a la población, sus propiedades, cultivos y bienes contra las inundaciones.

JICA está patrocinando un estudio de ingeniería orientado a proteger las zonas expuestas a inundaciones en 7 valles de la costa peruana. Uno de estos valles es el valle Majes – Camaná, que se localiza en el departamento de Arequipa. Este estudio es parte del Programa de Protección de Valles y Poblaciones Rurales Vulnerables ante Inundaciones en la República del Perú.

Los resultados principales del estudio hidrológico son los caudales correspondientes a las avenidas cuyos periodos de retorno son 2, 5, 10, 20, 50 y 100 años. Estos caudales serán usados en una simulación hidráulica para la delimitación de las áreas de inundación y la estimación del transporte de sedimentos. Adicionalmente, los hidrogramas y las precipitaciones máximas en 24 horas son necesarios como datos de entrada para otros equipos de estudio.

II. ASPECTOS GENERALES

En esta sección se proporciona información general acerca del área de estudio.

El área se ubica aproximadamente entre los paralelos 14° 30´ S y 16° 30´ S y los meridianos 70° 30´ W y 73 ° W. La Figura 4 muestra la ubicación de la cuenca Majes – Camaná. Un mapa más grande se puede ver en el Apéndice A.

La Cuenca Majes – Camaná se localiza en el departamento de Arequipa, en el sur del Perú. El área superficial es aproximadamente 17 031 km² de las cuales 12 493 km² se ubican en la parte húmeda de la cuenca. Se considera que la producción de escorrentía superficial es despreciable por debajo de 2800 msnm. Las zonas bajas son muy secas, la precipitación promedio anual en las estaciones costeras están por debajo de 10 mm/año. En la línea divisoria de las aguas la precipitación puede superar los 700 mm/año. La precipitación anual aumenta con la altitud como se puede ver en la Figura 5. La intensidad de la lluvia también aumenta con la altitud.

Las temperaturas anuales son semitempladas en la parte baja, entre 0 y 800 m.s.n.m. con una temperatura media anual de 19 ° C. La temperatura desciende por encima de los 800 msnm. Entre 2 200 y 3100 msnm la estación Pampacolca y Chuquibamba registran temperaturas medias entre 10.8 °C y 12.9 °C. Entre las elevaciones 3 100 y 3 900 msnm, la estación Sibayo (3800 msnm) ha registrado temperaturas anuales de 7.8 °C. Sin embargo las temperaturas más altas alcanzan 20 °C y las temperaturas más bajas están alrededor de -6.8 °C. Entre 3 900 y 4 800 msnm, se han registrado temperaturas en Pañe, con una temperatura media de 3.1 °C.

Adicionalmente, las temperaturas medias anuales son obtenidas de un considerable número de estaciones. Estos datos procesados (Tabla 1) son usados para graficar las variaciones de las temperaturas con la altitud. Estos resultados son mostrados en la Figura 1 . Existen dos valores de temperaturas medias anuales, correspondientes a las estaciones Choco y Cotahuasi, con dispersiones significativas con respecto al principal conjunto de puntos. Estos valores atípicos podrían ser originados por errores en las lecturas de los datos del clima. Se pueden observar datos adicionales de temperatura en el Anexo B.2.

Tabla 1. Temperatura Media Anual versus Altitud

Estación	Altitud (m.s.n.m.)	Temperatura Media Anual (° C)
Andahua	3528	10.05
Aplao	645	19.67
Ayo	1956	18.64
Cabanaconde	3379	11.74
Camaná	15	19.67
Caravelí	1779	19.29
Chachas	3130	13.20
Chichas	2120	17.47
Chiguata	2943	12.27
Chivay	3661	10.09
Choco	3192	18.70
Chuquibamba	2832	11.71
Cotahuasi	5088	15.62
Crucero Alto	4470	3.91
El Frayle	4267	4.72
Huambo	3500	11.30
Imata	4445	2.83
La Angostura	4256	5.50
La Joya	1292	18.59
La Pampilla	2400	15.20
Lagunillas	4250	6.52
Las Salinas	4322	4.20
Machahuay	3150	11.76
Madrigal	3262	10.75
Orcopampa	3801	9.16
Pampa de Arrieros	3715	7.18
Pampa de Majes	1434	18.40
Pampacolca	2950	12.37
Pampahuta	4320	4.16
Pillones	4455	3.13
Porpera	4152	4.79
Pullhuay	3113	12.30
Salamanca	3303	12.68
Sibayo	3827	8.23
Sumbay	4294	5.42
Tisco	4175	6.39
Yanaquihua	2815	14.38

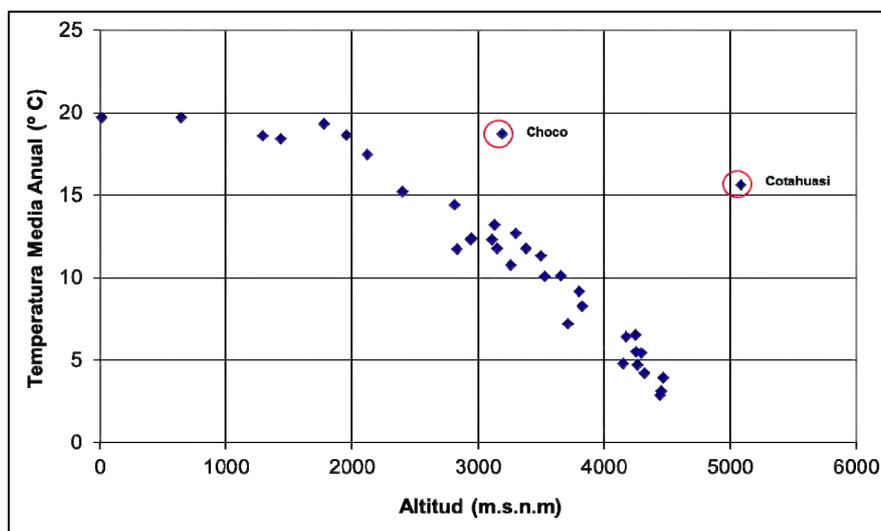


Figura 1. Temperatura Media Anual versus Altitud

El análisis de la temperatura puede ser dividido en dos secciones. En la primera sección, entre en nivel del mar y la cota 2000 m.s.n.m., la temperatura media anual es casi constante. En esta sección, la temperatura media anual se encuentra entre los 18.4 °C y 19.7°C. La segunda sección corresponde a una temperatura decreciente linealmente. La temperatura decrece aproximadamente 6°C/1000 m. La Figura 2 muestra la segunda sección con el valor R^2 correspondiente. La temperatura disminuye con la altitud porque existe pérdida de calor convectiva desde las corrientes de aire del ambiente.

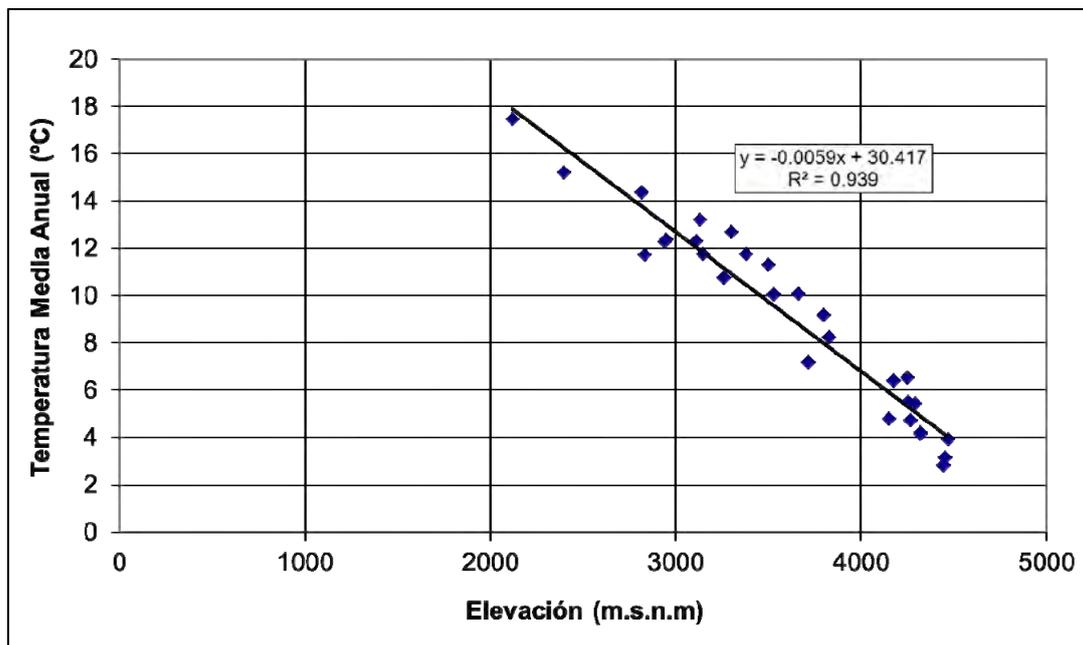


Figura 2. Temperaturas Medias Anuales versus la Altitud sobre los 2000 m.s.n.m. sin los valores atípicos

En la mayoría de las estaciones, los registros de las precipitaciones disponibles muestran valores faltantes. Las medidas concurrentes en dos estaciones fueron usadas para completar los valores faltantes, basados en los datos observados. Se completaron los datos en una estación (estación en estudio) apoyados por una estación vecina, llamada estación base (con más datos o datos completos). Se realizó una interpolación lineal entre la estación en estudio y la estación base. Por ejemplo, la Tabla 2 muestra registros de la estación Tisco con datos faltantes. La Figura 3 muestra los datos de la estación base (La estación Angostura), X_i , y de la estación con los datos faltantes (La estación Tisco), Y_i , en la cual se realizó una regresión de Y sobre X para los periodos en las cuales existen datos para ambas estaciones. El valor alto del

R² indica una buena correlación y suficiente homogeneidad para reemplazar los datos faltantes en la serie de datos incompletos. Información detallada al respecto se muestra en el Anexo B.5. Además, las isoyetas fueron calculadas a partir de las secuencias de datos completados (Figura 5). Nótese que las precipitaciones son más bajas cerca del Océano Pacífico y aumentan con la altitud. El efecto orográfico es evidente.

Tabla 2. Datos de precipitación mensual en la estación Tisco.

CUENCA	ESTACION	DEPARTAMENTO	LONGITUD	LATITUD
Camaná - Majes	TISCO	AREQUIPA	71° 27'1	15° 21'1

Año	Mes												Total
	Ene	Feb	Mar	Abr	May	Jun	Jul	Ago	Sep	Oct	Nov	Dic	
1965	75.0	161.1	85.9	42.5	0.3	0.0	9.2	0.0	24.0	22.0	10.4	151.7	582.1
1966	110.3	184.9	64.6	10.6	45.1	0.0	0.0	4.5	0.0	43.3	79.7	55.0	598.0
1967	103.8	161.0	220.2	64.5	13.1	0.6	8.2	9.4	41.8	23.6	12.7	90.5	749.4
1968	266.0	119.6	179.4	31.6	4.0	5.1	5.5	5.8	20.0	52.9	84.6	31.7	806.3
1969	150.1	113.0	52.5	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	4.0	60.8	97.7	478.0
1970	139.6	150.5	138.5	22.4	9.5	0.0	1.0	1.1	35.6	5.1	4.7	146.8	654.9
1971	140.0	183.5	101.2	30.1	2.6	0.9	0.0	0.0	0.0	5.0	2.2	132.7	598.2
1972	362.1	188.7	235.5	32.7	0.1	0.0	2.3	0.1	55.1	32.9	32.1	90.1	1031.7
1973	297.8	190.2	159.2	81.1	15.9	0.0	8.2	10.2	31.1	7.6	60.6	53.9	915.7
1974	290.2	172.9	44.7	80.7	1.5	14.5	0.0	111.1	9.3	4.3	7.5	50.2	786.8
1975	146.6	246.7	122.4	30.2	20.8	3.2	0.0	1.0	8.0	48.3	1.4	131.4	760.1
1976	153.0	107.7	166.8	41.6	9.3	7.5	4.6	2.3	58.9	0.5	0.6	71.9	624.7
1977	67.0	239.2	118.8	7.1	4.1	0.0	2.3	0.0	11.7	16.3	110.2	49.8	626.6
1978	317.6	24.1	78.7	68.9	0.0	4.0	0.0	1.0	2.3	26.9	78.6	60.0	662.2
1979	127.4	88.0	123.3	16.5	0.0	0.0	2.5	2.5	0.0	59.2	71.2	93.7	584.4
1980	72.5	43.1	183.6	2.2	0.0	0.0	13.5	25.9	28.1	94.1	2.1	30.2	495.3
1981	205.2		52.0	73.0	2.0	0.0	0.0	46.8	9.0	24.8	52.3	110.6	
1982	161.0	45.9	122.8	34.9	0.0	0.5	0.0	0.0	80.9	105.5	150.5	70.0	772.0
1983	46.7	93.7	81.0	47.9	12.0	0.5	0.5	0.0	35.2	18.0	2.5	32.4	370.5
1984	178.4	256.0	284.8	11.1	10.5	3.0	0.0	28.4	0.0	46.3	135.5	125.6	1079.6
1985	32.9	263.0	134.4	49.7	10.0	14.8	0.0	0.0	15.4	0.0	70.0	142.4	732.6
1986	105.9	162.7	178.9	98.4	12.5	0.0	2.8	52.2	18.1	11.0	11.0	149.6	803.1
1987	212.5	42.9	26.2	23.6	3.4	2.1	27.0	4.5	2.0	23.3	24.6	29.0	421.1
1988	216.9	72.5	97.0	63.5	8.5	0.0	0.0	4.0	6.8	0.0	4.0	30.2	503.4
1989	123.9	93.0	159.5	50.7	0.0	0.0	0.0	3.0	0.0	0.0	12.0	4.0	446.1
1990	118.4	27.6	58.5	25.6	12.5	39.5	0.0	13.0	5.0	52.5	0.0		
1991	150.6	72.7	162.3	10.7	3.5	30.7	3.0	1.6	3.5	29.2	48.6	0.0	516.4
1992	51.6	73.8	32.9	4.8	0.0	2.7	2.8	40.0	1.0	25.2	24.7	85.6	345.1
1993	230.9	82.4	133.9	49.9	6.2	1.3	0.3	25.1	15.5	34.2	63.7	106.1	749.5
1994	241.6	218.1	74.3	45.6	10.1	2.8	1.5	1.7	0.0	1.0	25.2	72.7	694.6
1995	121.5	135.0	215.7	27.8	3.7	0.1	0.0	2.8	8.6	13.1	22.3	122.0	672.7
1996	187.3	156.8	83.0	61.6	12.0	0.0	0.3	14.1	11.7	10.6	41.3	146.6	725.4
1997	175.0	201.8	86.5	31.7	18.1	0.0	0.0	33.1	64.8	14.0	60.1	102.2	787.3
1998	271.1	114.9	96.6	15.9	0.5	3.0	0.0	0.8	0.5	9.6	48.5	75.9	637.4
1999	199.2	273.9	198.2	30.5	6.0	0.1	1.2	0.6	23.5	75.3	10.7	90.3	909.5
2000	194.3	242.5	157.2	21.5	28.7	7.8	0.4	11.4	1.6	70.9	22.1	97.9	856.4
2001	240.3	239.0	144.2	108.9	31.3	5.4	16.5	12.0	8.4	18.7	8.6	35.9	869.0
2002	123.6	241.6	186.8	134.9	17.4	8.0	31.8	0.6	19.1	44.7	82.2	113.3	1004.1
2003	83.5		193.1	29.2	11.8	1.5	3.6	4.1	13.2	14.8		114.6	
2004	208.7	176.4	138.0	39.4	2.4	0.5	20.3	14.9	15.4	3.2	7.0	72.7	698.8
2005	124.4	207.0	127.5	56.9	0.5	0.0	0.1	0.7	23.2	11.6	18.8	103.4	674.1
2006	202.0	200.4	195.5	62.4	6.1	4.1	0.0	7.7	25.6	29.3	61.6	78.8	873.4
2007	187.0	179.7	180.4	38.4	9.1	0.1	9.7	0.8	16.1	13.7	22.9	96.2	753.8
2008	257.8	123.5	70.0	5.5	3.2	2.7	0.1	0.6	1.7	17.1	5.0	95.6	582.7
2009	104.6	203.6	133.3	65.6	2.8	0.0	11.1	2.4	23.9	9.9	47.9	64.6	669.7
2010	179.1	164.6	73.0	69.3	6.4	2.1	2.2	1.0	6.2	21.2	13.4	142.9	681.4
2011		233.8	96.9	104.8									
Pp Maxima	362.1	273.9	284.8	134.9	45.1	39.5	31.8	111.1	80.9	105.5	150.5	151.7	1079.6
Pp Media	166.8	153.2	128.4	43.7	8.5	3.6	4.1	10.8	16.7	25.8	38.7	85.9	687.9
Pp Minima	32.9	24.1	26.2	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	345.1

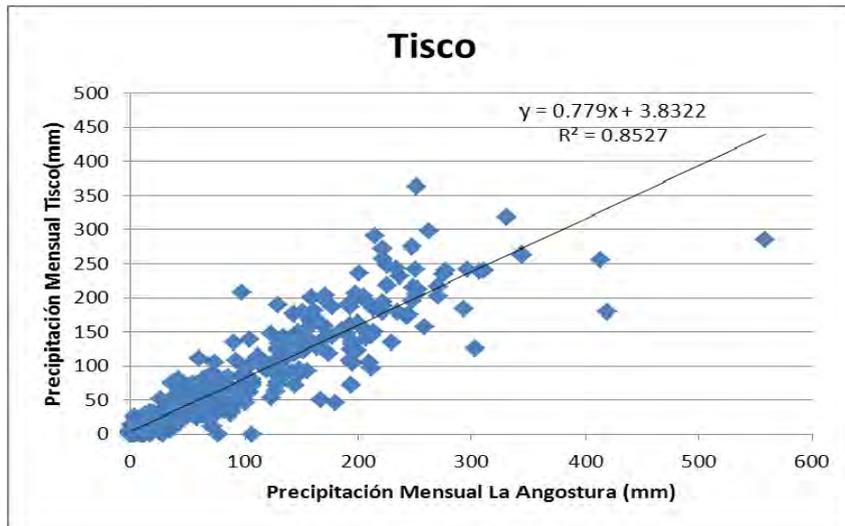


Figura 3. Regresión entre dos grupos de datos de precipitación mensual

Los caudales pico, en su mayoría, se producen en los meses de: enero, febrero y marzo, pero ocasionalmente ocurren en el mes de abril. El sesenta y tres por ciento (63%) del volumen anual de las precipitaciones son producidas en los meses de verano. Los caudales son mucho menores el resto del año y no representan una amenaza para los cultivos o asentamientos ubicados cerca de las llanuras de inundación.

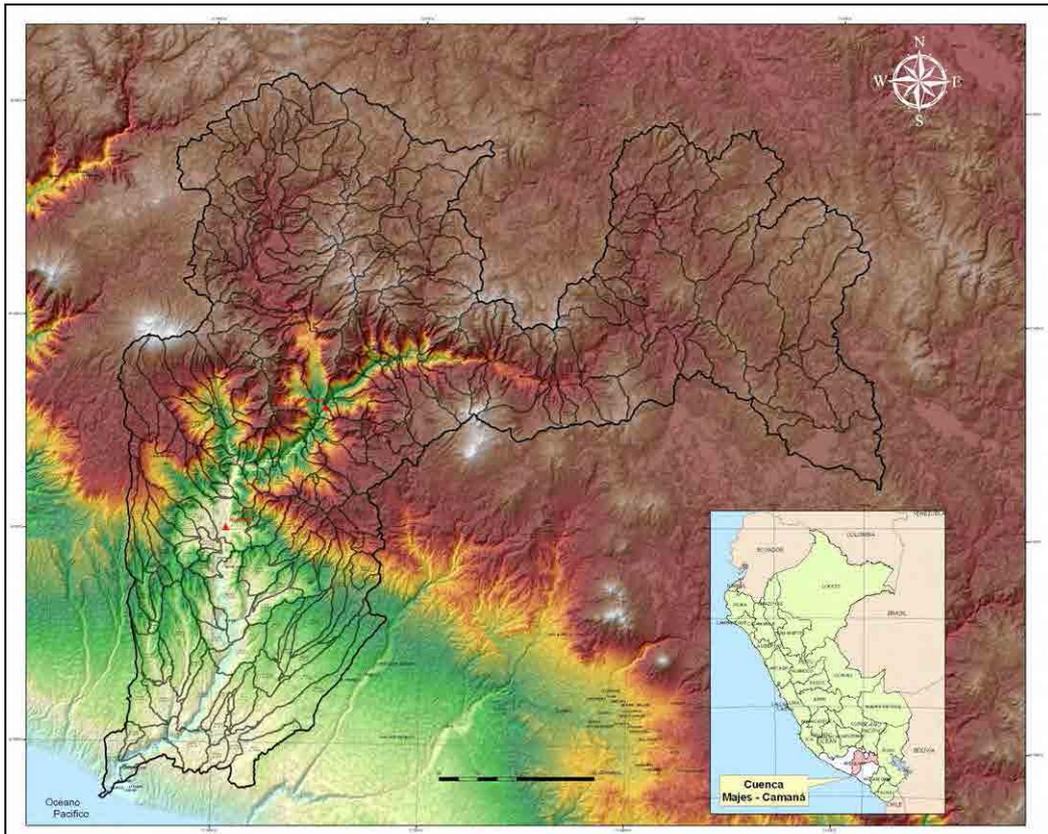


Figura 4. Mapa de la Cuenca Majes-Camaná.

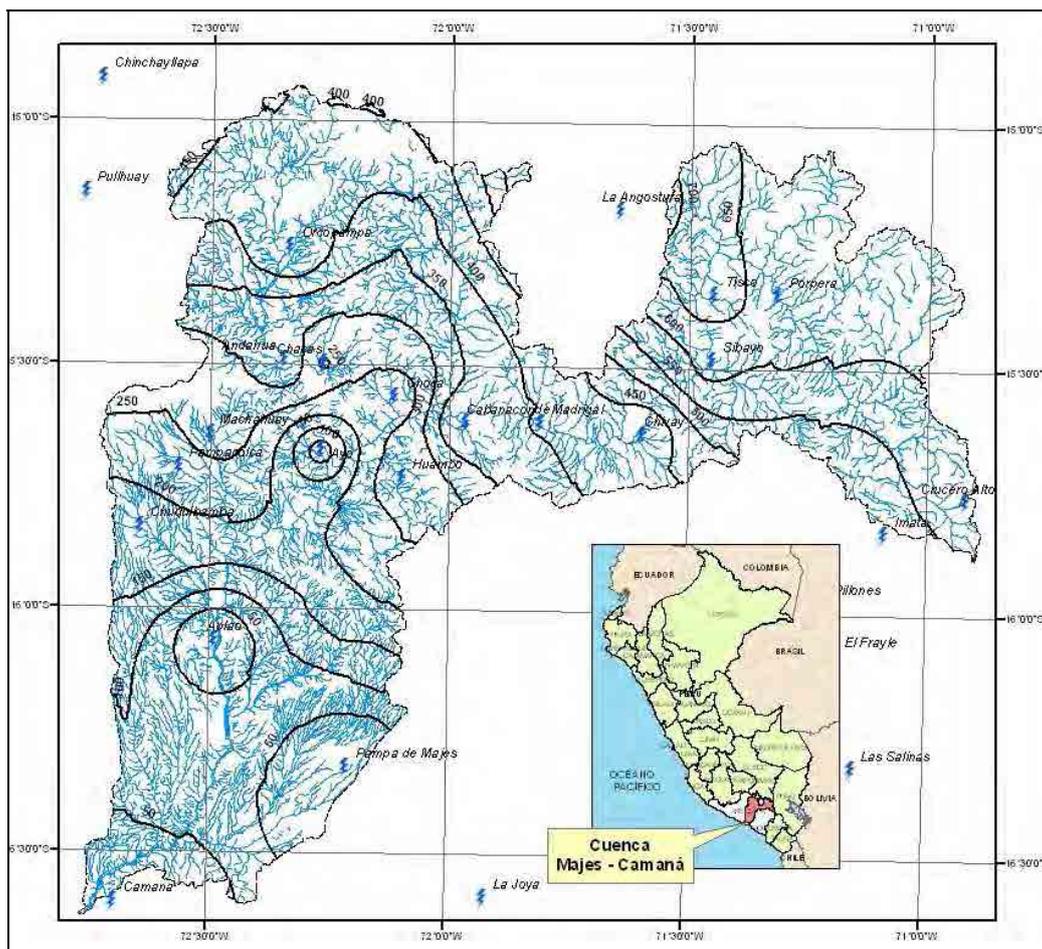


Figura 5. Isoyetas de la precipitación anual en la Cuenca Majes - Camaná. Note que las precipitaciones son bajas cerca del Océano Pacífico y se incrementan con la altitud. El efecto orográfico es evidente.

III. DESCRIPCIÓN DEL PROYECTO

En esta sección se describen las tareas que llevaron a la estimación del caudal de avenida para periodos de retorno seleccionados. Se presentan la información disponible, el análisis estadístico, las consideraciones teóricas y prácticas. Al final de este capítulo, los caudales de avenida y los hidrogramas de salida se da en dos puntos a lo largo de la Cuenca Camaná - Majes: Estación Huatiapa y en la confluencia de Andahuacabana y el Colca.

3.1. Información disponible

Existe información meteorológica disponible correspondiente a la zona del estudio. En el área de estudio se han identificado y se cuenta con información de 48 estaciones meteorológicas. La mayoría de estas estaciones se

encuentran instaladas en la cuenca Camaná – Majes. Algunas estaciones son climatológicas completas y otras sólo registran precipitaciones. La mayoría de estas estaciones meteorológicas no son automáticas y para cierto número de años solo existen estaciones de lectura manual. Por lo tanto, los registros más largos proporcionan sólo registros de lectura manual. Solamente la Estación Pluviométrica Chivay, ubicada aguas arriba del valle estudiado, ha registrado precipitación a nivel horario con instrumentación automática (pluviógrafos) desde el año 2001. Sin embargo, sólo se cuenta con información digitalizada desde el año 2011. No se pudieron recolectar otros registros de precipitación a nivel horario debido a que es información confidencial empleada para fines de explotación minera. El único tipo de información amplia disponible corresponde a las precipitaciones máximas en 24 horas, que han sido registradas en todas las estaciones. La Tabla 3 muestra la lista de estaciones meteorológicas que han sido identificadas.

Tabla 3. Lista de estaciones meteorológicas en el área de estudio.

Estación meteorológica	Coordenadas		
	Latitud	Longitud	Altitud (msnm)
Andahua	15° 29'37	72° 20'57	3528
Aplao	16° 04'10	72° 29'26	645
Ayo	15° 40'45	72° 16'13	1956
Cabanaconde	15° 37'7	71° 58'7	3379
Camaná	16° 36'24	72° 41'49	15
Caravelí	15° 46'17	73° 21'42	1779
Chachas	15° 29'56	72° 16'2	3130
Chichas	15° 32'41	72° 54'59.7	2120
Chiguata	16° 24'1	71° 24'1	2943
Chinchayllapa	14° 55'1	72° 44'1	4497
Chivay	15° 38'17	71° 35'49	3661
Choco	15° 34'1	72° 07'1	3192
Chuquibamba	15° 50'17	72° 38'55	2832
Cotahuasi	15° 22'29	72° 53'28	5088
Crucero Alto	15° 46'1	70° 55'1	4470
El Frayle	16° 05'5	71° 11'14	4267
Huambo	15° 44'1	72° 06'1	3500
Imata	15° 50'12	71° 05'16	4445
La Angostura	15° 10'47	71° 38'58	4256
La Joya	16°35'33	71°55'9	1292
La Pampilla	16° 24'12.2	71° 31'.6	2400
Lagunillas	15° 46'46	70° 39'38	4250
Las Salinas	16° 19'5	71° 08'54	4322
Machahuay	15° 38'43	72° 30'8	3150
Madrigal	15° 36'59.7	71° 48'42	3262
Orcopampa	15° 15'39	72° 20'20	3801
Pampa de Arrieros	16° 03'48	71° 35'21	3715
Pampa de Majes	16° 19'40	72° 12'39	1434
Pampacolca	15° 42'51	72° 34'3	2950
Pampahuta	15° 29'1	70° 40'33.3	4320
Pillones	15° 58'44	71° 12'49	4455
Porpera	15° 21'1	71° 19'1	4152
Pullhuay	15° 09'1	72° 46'1	3113
Salamanca	15° 30'1	72° 50'1	3303
Sibayo	15° 29'8	71° 27'11	3827
Sumbay	15° 59'1	71° 22'1	4294
Tisco	15° 21'1	71° 27'1	4175
Yanaquihua	15° 46'59.8	72° 52'57	2815

Es importante identificar qué información será útil para el estudio hidrológico. Las estaciones meteorológicas con pocos datos (menores de 20 años), o con los últimos 10 años sin datos serán descartadas para este estudio. Algunas otras estaciones fueron descartadas porque estaban muy lejos del área de estudio (en la parte media de la Cuenca del Atlántico) y podrían distorsionar la precipitación estimada en las cuencas que son de interés para este estudio. Por lo tanto, la Tabla 5 fue construida para identificar las estaciones con datos adecuados y registros completos.

Los datos de 10 estaciones meteorológicas fueron descartados. Las razones se muestran debajo en la Tabla 4. El número final de estaciones que fueron usadas para este estudio es 38. La distribución de las estaciones que fueron usadas para la simulación hidrológica se presenta en la Figura 6. La información detallada de las precipitaciones se muestra en el Apéndice B.

Tabla 4. Estaciones meteorológicas cuyos datos se descartaron para el estudio hidrológico.

N°	Estación	Motivo para descartar la estación
1	Santo Tomás	Muy lejos de la zona de estudio y escasos datos disponibles
2	Yauri	Muy lejos de la zona de estudio y escasos datos disponibles
3	Condorama	Escasos datos. No se encuentran datos de los últimos 15 años
4	Caylloma	Pocos datos disponibles
5	Huanca	Pocos datos disponibles
6	Puica	Pocos datos disponibles
7	Janacancha	No se encuentran datos de los últimos 10 años
8	La Pulpera	No se encuentran datos de los últimos 15 años
9	Yanque	No se encuentran datos de los últimos 15 años
10	Socabaya	No se encuentran datos de los últimos 15 años

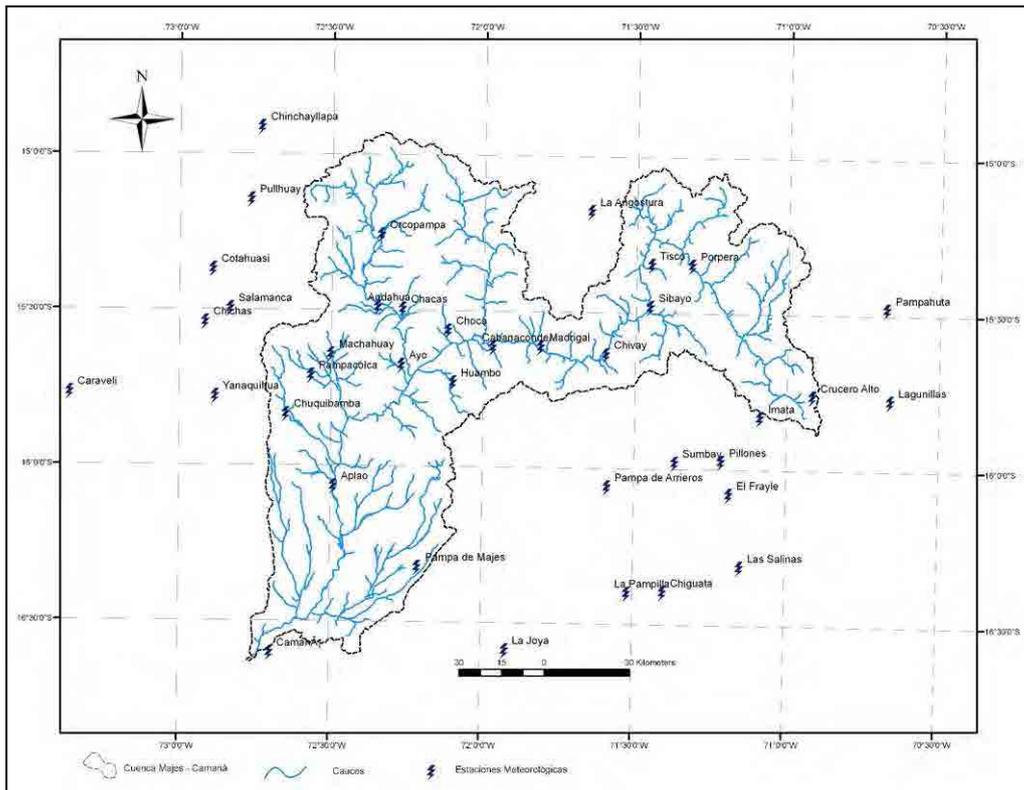


Figura 6. Distribución de las 38 estaciones meteorológicas usadas en las simulaciones hidrológicas.

La información hidrológica es agrupada de las pocas estaciones hidrológicas localizadas a lo largo del Río Colca, el Río Andahua y el Río Majes. Los dos primeros son tributarios del último. Las estaciones hidrológicas de las cuales se obtuvieron información de los caudales fueron la estación Huatiapa y la estación Puente Carretera Camaná. La estación Huatiapa comenzó a operar en el año 1964 y Puente Carretera Camaná en 1942. La última terminó de operar en 1986. La ubicación de ambas estaciones se presenta en la Tabla 6. Todas las estaciones de la cuenca Majes – Camaná se muestran en la Tabla 7.

Tabla 6. Ubicación de las principales estaciones hidrológicas de la Cuenca Majes – Camaná

Estación de aforo	Latitud	Longitud	Elevación (m.s.n.m.)
Huatiapa	15°59'41.0" S	72°28'13.0" W	700
Puente Carretera Camaná	72°44'00.0" S	16°36'00.0" W	122

Tabla 7. Ubicación de todas las estaciones hidrológicas de la Cuenca Majes- Camaná.

Nombre de la Estación	Categoría	Cuenca	Departamento	Provincia	Distrito	Longitud	Latitud	Elevación	Periodo de Funcionamiento		
									Condición	Inicio	Fin
MARIA PEREZ	HLG	CAMANA	AREQUIPA	CASTILLA	CHOCO	72° 01' 1"	15° 17' 1"	4540	Clausurada	1968-09	1979-03
GALERA MOLLOCO	HLG	CAMANA	AREQUIPA	CASTILLA	CHOCO	72° 00' 1"	15° 17' 1"	4524	Clausurada		
OSCOYO	HLG	CAMANA	AREQUIPA	CAYLLOMA	SIBAYO	71° 29' 41"	15° 27' 1"	4439	Clausurada	1950-02	1974-08
PUENTE COLGANTE-SIBAYO	HLG	CAMANA	AREQUIPA	CAYLLOMA	SIBAYO	71° 27' 1"	15° 28' 1"	4316	Operativa	1950-06	1993-03
PALLCA-HUARURO	HLG	CAMANA	AREQUIPA	CAYLLOMA	TAPAY	72° 00' 1"	15° 35' 1"	2393	Clausurada	1968-09	1978-01
BAMPUTANE	HLG	CAMANA	AREQUIPA	CAYLLOMA	CALLALLI	71° 07' 1"	15° 34' 1"	4495	Paralizada	1967-09	1974-08
NEGROPAMPA	HLG	CAMANA	AREQUIPA	CAYLLOMA	CABANA CONDE	72° 00' 1"	15° 36' 1"	2200	Clausurada	1968-09	1978-01
BLANQUILLO	HLG	CAMANA	AREQUIPA	CAYLLOMA	SAN ANTONIO DE CHUCA	71° 04' 1"	15° 39' 1"	4444	Clausurada		
LAGUNA MAMA COCHA	HLG	CAMANA	AREQUIPA	CASTILLA	AYO	72° 15' 1"	15° 41' 1"	1783	Clausurada		
AYO	HLG	CAMANA	AREQUIPA	CASTILLA	CHOCO	72° 14' 1"	15° 42' 1"	1950	Clausurada		
ANTASALLA	HLG	CAMANA	AREQUIPA	CAYLLOMA	SAN ANTONIO DE CHUCA	71° 04' 1"	15° 44' 1"	4439	Clausurada	1969-01	1973-12
DIQUE LOS ESPAÑOLES	HLG	CAMANA	AREQUIPA	CAYLLOMA	SAN ANTONIO DE CHUCA	71° 02' 1"	15° 46' 1"	4410	Paralizada	1968-01	1989-12
CHARACTA	HLG	CAMANA	AREQUIPA	CAYLLOMA	MAJES	72° 31' 1"	16° 32' 1"	977	Clausurada		
PUENTE CARRETERA CAMANA	HLG	CAMANA	AREQUIPA	CAMANA	JOSE MARIA QUIMPER	72° 44' 1"	16° 36' 1"	25	Paralizada	1960-01	1986-10
TINTO COLCA	HLG	CAMANA	AREQUIPA	CASTILLA	ANDAGUA	72° 17' 1"	15° 26' 1"	4527	Clausurada		
CALLALLI	HLG	CAMANA	AREQUIPA	CAYLLOMA	CALLALLI	71° 28' 1"	15° 30' 1"	3807	Clausurada	1977-10	1988-12
HUATIAPA	HLG	CAMANA	AREQUIPA	CASTILLA	AFLAO	72° 28' 14"	15° 59' 42"	699	Operativa	1944-09	2011-09
CONDOROMA	HLG	CAMANA	AREQUIPA	CAYLLOMA	TISCO	71° 15' 1"	15° 15' 1"	4686	Clausurada	1977-09	2009-11
PUENTE CARRETERA COLCA	HLG	CAMANA	AREQUIPA	CAYLLOMA	SIBAYO	71° 27' 1"	15° 29' 1"	3910	Clausurada	1950-02	1964-10
REPRESA CONDOROMA	HLG	CAMANA	AREQUIPA	CAYLLOMA	CALLALLI	71° 16' 1"	15° 23' 1"	4239	Clausurada	1993-09	1995-02
HACIENDA PAMPATA	HLG	CAMANA	AREQUIPA	CAMANA	NICOLAS DE PIEROLA	72° 41' 58"	16° 32' 22"	75	Operativa	2002-11	2011-09
ICHUPAMPA	HLG	CAMANA	AREQUIPA	CAYLLOMA	CABANA CONDE	71° 55' 1"	15° 40' 1"	4513	Clausurada	1983-11	1987-07
EMA PAMPAS DE MAJES	MAP	CAMANA	AREQUIPA	CAYLLOMA	MAJES	72° 12' 38"	16° 19' 39"	1434	Operativa	2011-11	2012-09
OCONA	EHA	OCONA	AREQUIPA	CAMANA	OCO	73° 06' 1"	16° 26' 1"	270	Operativa	2000-12	2012-09

Los caudales máximos anuales fueron obtenidos de un estudio hidrológico realizado por Cesar Reyes (2011). Cuarenta y un (41) caudales máximos anuales estaban disponibles en la estación Huatiapa, y 17 caudales máximos anuales estaban disponibles en la estación Puente Carretera Camaná. En la Estación Huatiapa se instaló la estación automática con flotador en el año 2006. Sin embargo, estos niveles medidos a nivel horario no han sido digitalizados hasta el presente. Por lo tanto, es necesario mencionar que los caudales

máximos diarios no son caudales de avenidas instantáneas, sino que es el máximo de 4 caudales medidos manualmente en la estación durante un día (a las 7:00, 10:00, 14:00 y 18:00). Lo más probable, es que en este registro se pierda el caudal de avenida instantánea de un día. El caudal máximo anual es el caudal máximo diario en un año determinado. El estudio realizado por Reyes (2011) fue proporcionado a la consultora por el ANA (Autoridad Nacional del Agua) y es considerada información oficial. El análisis estadístico fue realizado para verificar los resultados dados por Reyes (2011).

Se llevó a cabo un análisis estadístico usando los caudales máximos anuales de la Estación Huatiapa. Se emplearon las distribuciones de probabilidad Log Normal, Log Pearson III, GEV, SQRTET y Valor Extremo Tipo I (Gumbel). Se obtuvo que la mejor distribución fue GEV. La selección se basó en el criterio SLSC y el menor error de estimación, que son usados en Japón y otros países. La Tabla 8 muestra los registros de caudales máximos anuales. La Tabla 9 muestra los resultados de las diferentes distribuciones estadísticas usadas para calcular la estimación de caudales. Debido a que el propósito del estudio hidrológico es encontrar el caudal de avenida instantáneo para los periodos de retorno de interés, una simulación hidrológica se llevará a cabo.

Tabla 8. Caudales máximos anuales en la Estación Huatiapa.

No.	Año	Caudal Máximo Anual (m3/s)	No.	Año	Caudal Máximo Anual (m3/s)
1	1945	620	31	1979	410
2	1946	619	32	1980	415
3	1947	580.79	33	1981	1000
4	1948	506.5	34	1982	345
5	1949	1012.8	35	1983	23.2
6	1950	458.33	36	1984	1025
7	1951	687.32		1985	
8	1952	592.5	37	1986	750
9	1953	980		1987	
10	1954	980		1988	
11	1955	2400		1989	
12	1956	445.3		1990	
13	1957	316		1991	
14	1958	985.5		1992	
15	1959	1400		1993	
16	1960	600		1994	
	1961			1995	
	1962			1996	
	1963			1997	
	1964			1998	
17	1965	171.94		1999	
18	1966	237		2000	
19	1967	420		2001	
20	1968	442.55		2002	
21	1969	308.6		2003	
22	1970	362		2004	
23	1971	356		2005	
24	1972	633	38	2006	590.871
25	1973	1040	39	2007	366.327
26	1974	902	40	2008	418.496
27	1975	748	41	2009	400.223
28	1976	514			
29	1977	592			
30	1978	1600			

Tabla 9. Evaluación del mejor ajuste de cinco distribuciones de probabilidades. La distribución GEV tuvo el mejor ajuste basado en el criterio SLSC.

T (años)	Log Normal	Log Pearson III	GEV	SQRTET	Gumbel
2	543.7	664.9	559.1	570.1	598.4
5	1004.6	968	900.2	984.6	1022
10	1385.2	1080.3	1168.2	1309.9	1302.5
20	1805.2	1143	1462.5	1658.9	1571.5
25	1950.8	1156.4	1564.3	1777.1	1656.9
50	2433.7	1184.2	1905.9	2163.8	1919.8
100	2696.1	1197.8	2291.5	2580.9	2180.7
200	3561.8	1203.5	2728	3029.1	2440.7
500	4400.6	1205.1	3396.1	3669.9	2783.8
SLSC	0.0877	0.0714	0.0342	0.044	0.0493
Error de Estimación	887.5	759.6	424.5	444.3	369.3
Máximo Caudal registrados: 2, 400 m3/s					

3.2. Nivel de Riesgo Asumido

El nivel de riesgo asumido para una estructura con una vida útil de n años, diseñado para resistir los efectos de un periodo de retorno T, es la siguiente:

$$R = 1 - \left[1 - \frac{1}{T} \right]^n$$

Los trabajos de adecuación del río son diseñados usualmente para soportar inundaciones cuyas avenidas se consideran entre los 20 y 100 años. Si los trabajos de adecuación del río tienen una vida útil de 20 años, y cuyo periodo de retorno T, para el cual los trabajos de adecuación del río han sido diseñados, es 100 años, el nivel de riesgo debe ser 18.2%. La Tabla 9 muestra los niveles de riesgo para vidas útiles entre 2 y 500 años y para periodos de retorno entre 25 y 500 años.

Tabla 10. . Nivel de riesgo de falla para estructuras con una vida útil de n años, diseñados para un periodo de retorno T.

Vida útil n (años)	Riesgo de falla en trabajos diseñados para un periodo de retorno T, y una vida útil de n años.				
	Periodo de retorno, T				
	25	50	100	200	500
2	0.078	0.040	0.020	0.010	0.004
5	0.185	0.096	0.049	0.025	0.010
10	0.335	0.183	0.096	0.049	0.020
20	0.558	0.332	0.182	0.095	0.039
50	0.870	0.636	0.395	0.222	0.095
100	0.983	0.867	0.634	0.394	0.181
200	1.000	0.982	0.866	0.633	0.330
500	1.000	1.000	0.993	0.918	0.632

3.3. Delimitación de la Cuenca

La principal fuente de información son los mapas del Instituto Geográfico Nacional (IGN). Estos mapas son presentados a una escala de 1: 100 000 y con curvas de nivel espaciadas cada 50 m y son parte de la Carta Nacional. La lista de mapas del IGN usados para este estudio se muestra en la Tabla 10.

Tabla 11. Lista de mapas del IGN usados para la delimitación de la cuenca.

Zona 18 S		Zona 19 S		
	30-r			
31-q	31-r	31-s	31-t	31-u
32-q	32-r	32-s	32-t	32-u
33-q	33-r			
34-q	34-r			

La cuenca Majes – Camaná fue dividida en 4 subcuencas con el propósito de estimar los caudales y para la simulación del transporte de sedimentos. Arc Map®, un paquete del Sistema de Información Geográfica (GIS), fue usado para dividir las cuencas. Arc Hydro® es un módulo que permite dividir el terreno en subcuencas. Adicionalmente, la delimitación fue mejorada realizando ajustes manuales recomendados en los manuales del Arc GIS. La Figura 7 muestra la cuenca Majes – Camaná y sus subdivisiones.



Figura 7. Cuenca Majes-Camaná y sus 4 subcuencas.

3.4. Precipitación de Diseño

Existen varias estaciones meteorológicas disponibles para el presente estudio. La mayoría pertenece al Servicio Nacional de Meteorología e Hidrología (SENAMHI). Sin embargo, muchas estaciones fueron temporal o permanentemente desactivadas. Por lo tanto, faltan muchos datos. Las precipitaciones máximas en 24 horas están disponibles y se han analizado estadísticamente.

Solo la Estación Chivay ubicada aguas arriba de la Estación Huatiapa en la cuenca del río Majes –Camaná ha registrados datos de precipitación a nivel horario mediante pluviógrafo desde el año 2001. Sin embargo, los registros digitalizados de precipitación horaria están disponibles a partir del año 2011. El grupo de estudio de JICA recolectó registros horarios de la estación húmeda (Enero a Marzo) de los años 2011 y 2012. La Figura 8 muestra el análisis de altura-duración (llamado en Inglés análisis D-D) de datos horarios registrados en la Estación Pluviográfica Chivay para las mayores avenidas entre Febrero de 2011 y Febrero de 2012. El caudal pico en la Estacion Huatiapa se registró el 11 de Febrero de 2012 y fue de 1,400 m³/s. De acuerdo a la Figura 8, la duración de las precipitaciones de mayor duración es de 7 a 17 horas.

La precipitación de 24 horas ha sido estimada para periodos de diseño de 2, 5, 10, 20, 25, 50 y 100 años usando distribuciones estadísticas Normal, Log Normal, Log Pearson III y el Valor Extremo Tipo I (Gumbel). El mejor ajuste ha sido determinado haciendo uso del método Smirnov Kolmogorov. Éste es un método no paramétrico y puede ser aplicado a todas las distribuciones. Las precipitaciones estimadas para cada estación están dadas en la Tabla 12.

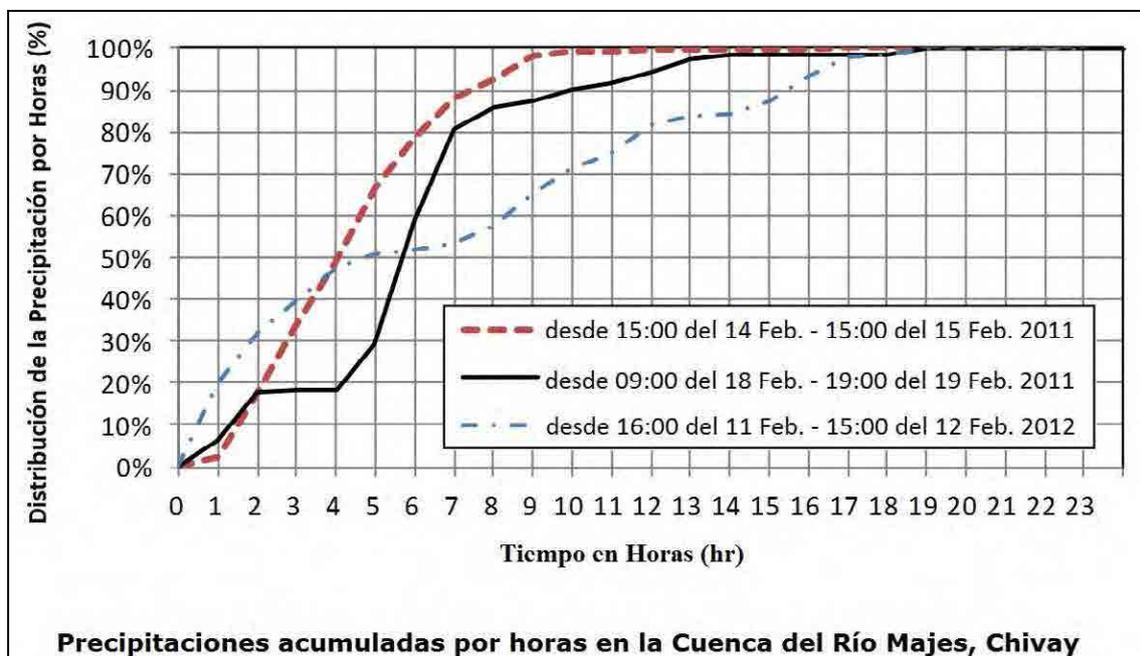


Figura 8. Precipitación acumulada horaria de máximas avenidas registradas en Chivay por el SENAMHI, Fuente: preparado por el Grupo de Estudio de JICA basada en datos de la Estación Chivay del SENAMHI.

Tabla 12. Precipitaciones para diferentes periodos de retorno en cada estación meteorológica.

Estación	Coordenadas			Precipitación para T (años)						
	Latitud	Longitud	Altitud (msnm)	2	5	10	25	50	100	200
Andahua	15° 29'37	72° 20'57	3528	24.30	31.33	34.83	38.29	40.33	42.02	43.43
Aplao	16° 04'10	72° 29'26	645	1.71	5.03	7.26	9.51	10.71	11.56	12.14
Ayo	15° 40'45	72° 16'13	1956	10.28	16.43	20.51	25.66	29.48	33.27	37.05
Cabanaconde	15° 37'7	71° 58'7	3379	26.58	37.88	45.89	56.58	64.95	73.67	82.79
Camaná	16° 36'24	72° 41'49	15	3.18	7.16	9.79	13.11	15.58	18.03	20.46
Caravelí	15° 46'17	73° 21'42	1779	7.67	16.07	22.60	31.46	38.30	45.21	52.15
Chachas	15° 29'56	72° 16'2	3130	22.21	28.60	32.08	35.83	38.24	40.37	42.30
Chichas	15° 32'41	72° 54'59.7	2120	16.28	23.47	27.01	30.37	32.23	33.67	34.80
Chiguata	16° 24'1	71° 24'1	2943	18.88	29.98	37.33	46.40	52.94	59.27	65.42
Chinchayllapa	14° 55'1	72° 44'1	4497	23.12	31.21	36.57	43.34	48.37	53.35	58.32
Chivay	15° 38'17	71° 35'49	3661	24.50	32.74	38.20	45.09	50.21	55.29	60.35
Choco	15° 34'1	72° 07'1	3192	16.10	22.92	27.45	33.16	37.39	41.60	45.79
Chuquibamba	15° 50'17	72° 38'55	2832	21.65	36.96	47.09	59.89	69.39	78.82	88.21
Cotahuasi	15° 22'29	72° 53'28	5088	21.20	29.97	35.78	43.12	48.56	53.96	59.35
Crucero Alto	15° 46'1	70° 55'1	4470	25.33	31.66	35.20	39.10	41.67	44.02	46.17
El Frayle	16° 05'5	71° 11'14	4267	22.33	29.95	35.43	42.89	48.83	55.12	61.82
Huambo	15° 44'1	72° 06'1	3500	22.87	30.14	34.96	41.05	45.57	50.05	54.52
Imata	15° 50'12	71° 05'16	4445	28.35	37.09	42.87	50.18	55.60	60.98	66.34
La Angostura	15° 10'47	71° 38'58	4256	35.90	45.89	53.22	63.31	71.46	80.18	89.57
La Joya	16°35'33	71°55'9	1292	1.22	4.74	7.89	11.93	14.65	16.98	18.92
La Pampilla	16° 24'12.2	71° 31'.6	2400	12.65	21.64	27.66	35.01	40.23	45.20	49.94
Lagunillas	15° 46'46	70° 39'38	4250	28.55	34.30	37.75	41.81	44.67	47.40	50.05
Las Salinas	16° 19'5	71° 08'54	4322	18.05	25.72	30.80	37.22	41.98	46.70	51.41
Machahuay	15° 38'43	72° 30'8	3150	21.06	29.80	34.71	40.03	43.45	46.46	49.14
Madrigal	15° 36'59.7	71° 48'42	3262	23.63	30.07	33.66	37.59	40.17	42.50	44.63
Orcopampa	15° 15'39	72° 20'20	3801	21.51	29.58	36.83	48.66	59.81	73.37	89.92
Pampa de Arrieros	16° 03'48	71° 35'21	3715	18.86	32.08	40.82	51.88	60.07	68.21	76.32
Pampa de Majes	16° 19'40	72° 12'39	1434	2.07	6.68	10.56	15.55	18.98	22.04	24.69
Pampacolca	15° 42'51	72° 34'3	2950	21.13	29.11	34.40	41.08	46.04	50.95	55.86
Pampahuta	15° 29'1	70° 40'33.3	4320	34.18	39.66	42.87	46.58	49.14	51.57	53.89
Pillones	15° 58'44	71° 12'49	4455	24.00	32.95	38.88	46.36	51.92	57.43	62.92
Porpera	15° 21'1	71° 19'1	4152	27.40	40.61	49.37	60.42	68.63	76.77	84.88
Pullhuay	15° 09'1	72° 46'1	3113	24.47	32.43	37.63	44.15	48.97	53.77	58.60
Salamanca	15° 30'1	72° 50'1	3303	19.86	26.64	31.13	36.81	41.02	45.20	49.36
Sibayo	15° 29'8	71° 27'11	3827	31.25	38.61	42.98	48.06	51.59	54.93	58.13
Sumbay	15° 59'1	71° 22'1	4294	25.43	35.57	43.10	53.56	62.08	71.26	81.17
Tisco	15° 21'1	71° 27'1	4175	33.41	42.74	51.24	65.12	78.15	93.95	113.15
Yanaquihua	15° 46'59.8	72° 52'57	2815	20.70	35.78	45.76	58.38	67.74	77.03	86.29

La precipitación en cada cuenca ha sido calculada usando el método de la inversa ponderada que se basa en las precipitaciones en las estaciones seleccionadas. Se han obtenido isoyetas para cada periodo de retorno estudiado. Las Figuras 9, 10, 11, 12, 13 y 14 muestran las isoyetas de precipitación de 24 horas estimadas para los periodos de retorno de 2, 5, 10, 25, 50 y 100 años.

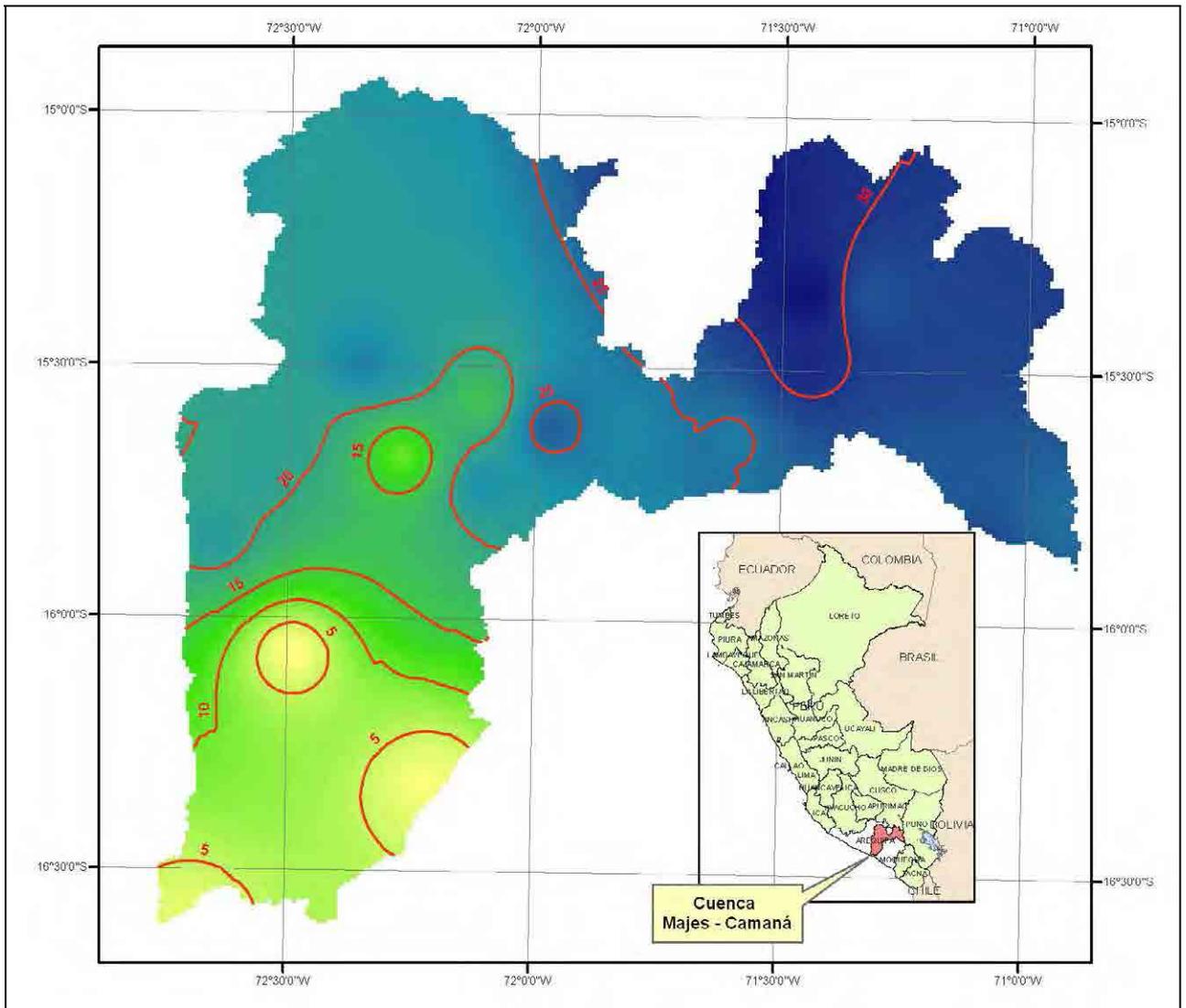


Figura 9. Isoyetas para las precipitaciones de 24 hr con un periodo de retorno de 2 años.

Figura 10. Isoyetas para las precipitaciones de 24 hr con un periodo de retorno de 5 años.

Figura 11. Isoyetas para las precipitaciones de 24 hr con un periodo de retorno de 10 años.

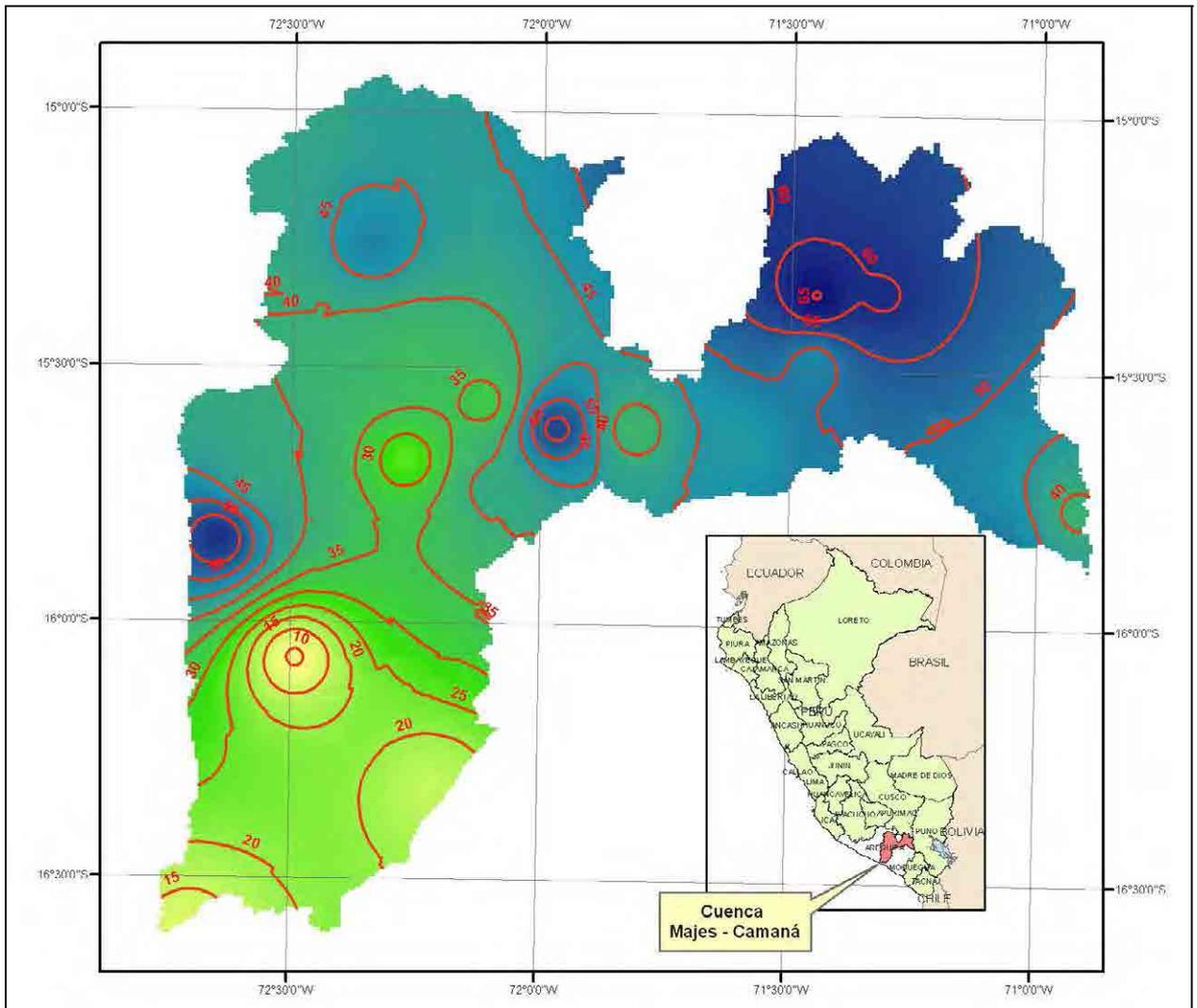


Figura 12. Isoyetas para las precipitaciones de 24 hr con un periodo de retorno de 25 años.

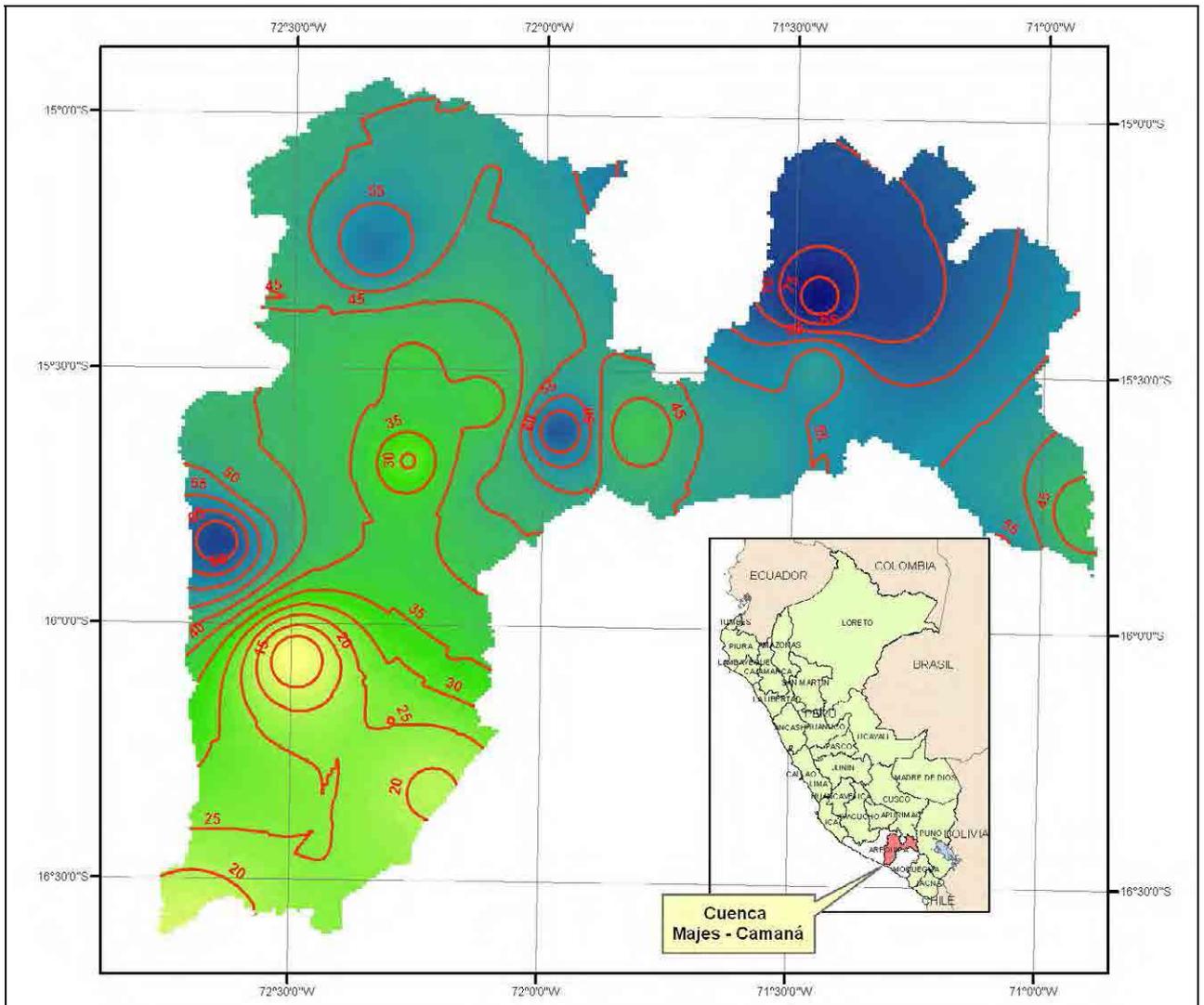


Figura 13. Isoyetas para las precipitaciones de 24 hr con un periodo de retorno de 50 años.

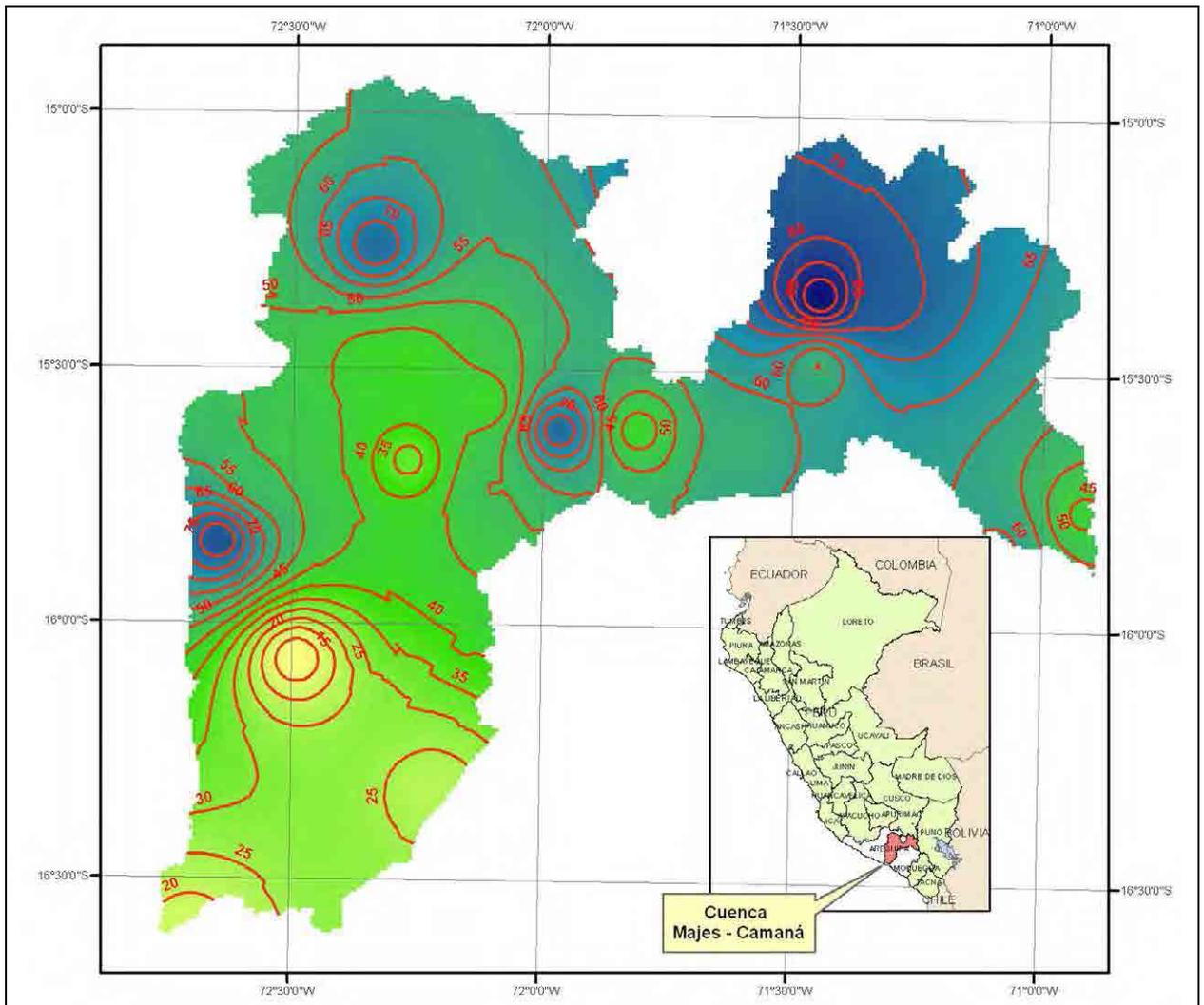


Figura 14. Isoyetas para las precipitaciones de 24 hr con un periodo de retorno de 100 años.

Las precipitaciones de 24 horas fueron calculadas para cada sub cuenca. La base de datos correspondiente a la precipitación para cada estación fue usada para determinar los valores de precipitación para los periodos de retorno de 2, 5, 10, 25, 50 y 100 años en cada subcuenca. Se emplearon los polígonos de Thiessen para estimar el área de influencia de cada pluviómetro. Las áreas de influencia se presentan en el Anexo B.6. El esquema de las áreas de influencia se muestra debajo en la Figura 15. Se halló la precipitación media para cada subcuenca. En la Tabla 13 se presenta un resumen de las precipitaciones en cada subcuenca.

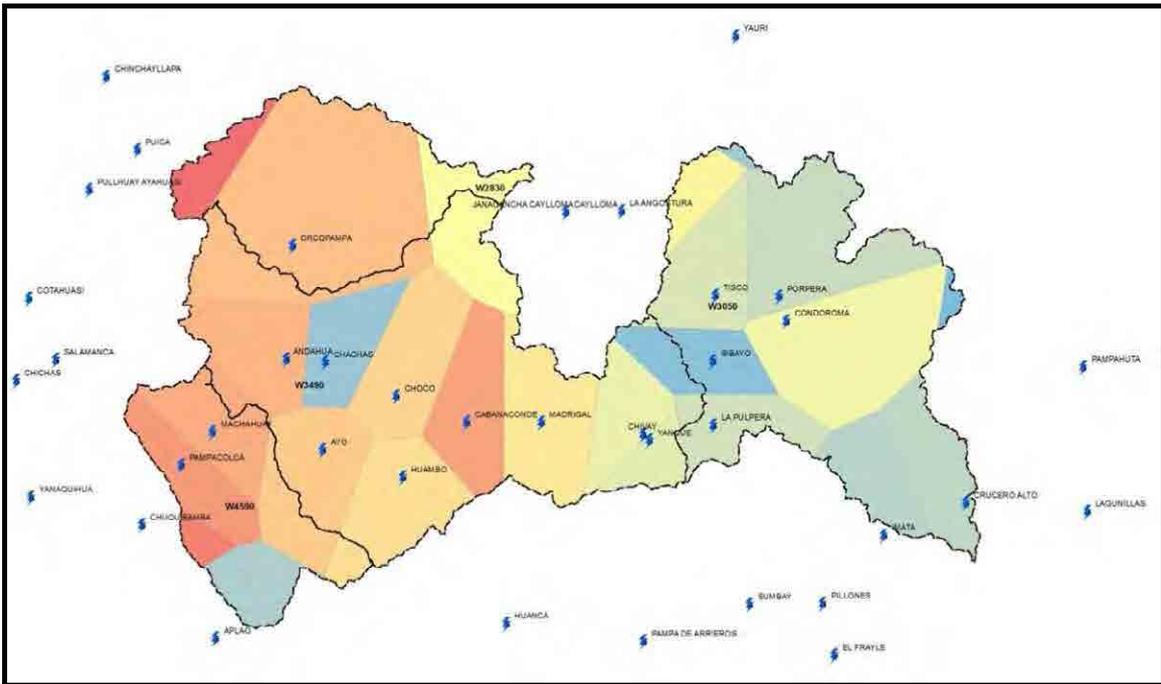


Figura 15. Esquema de las áreas de influencia de las estaciones pluviométricas para estimar precipitaciones en cada subcuenca.

Tabla 13. Precipitaciones para cada sub cuenca de la cuenca del Majes - Camaná.

Sub cuenca	Precipitación Areal Media (mm.)				
	T5	T10	T25	T50	T100
W2830	29.60	36.80	48.68	59.96	73.45
W3050	38.20	46.10	55.14	62.47	70.23
W3490	29.25	34.14	40.63	45.15	50.03
W4590	23.05	27.70	33.23	36.98	40.77

Debido a que las precipitaciones de 24 horas están disponibles, y existe mucha incertidumbre con respecto a la distribución de la lluvia, se ha utilizado la distribución del SCS. Esta distribución puede ser esencialmente usada con cualquier duración de lluvia. Las distribuciones de lluvia SCS son mostradas en la Tabla 14. En este caso, se ha usado la distribución Tipo I modificada debido a los patrones de las mayores avenidas registradas en Febrero de 2011 y 2012 como se mostró en la Figura 8.

Tabla 14. Distribuciones de lluvia SCS Tipo I, IA, II and III.

Distribución temporal de la precipitación en 24 horas					
Tiempo (hr)	t/24	Tipo I	Tipo 1A	Tipo II	Tipo III
0.00	0.000	0.000	0.000	0.000	0.000
2.00	0.083	0.035	0.050	0.022	0.020
4.00	0.167	0.076	0.116	0.048	0.043
6.00	0.250	0.125	0.206	0.080	0.072
7.00	0.292	0.156	0.268	0.098	0.089
8.00	0.333	0.194	0.425	0.120	0.115
8.50	0.354	0.219	0.480	0.133	0.130
9.00	0.375	0.254	0.520	0.147	0.148
9.50	0.396	0.303	0.550	0.163	0.167
9.75	0.406	0.362	0.564	0.172	0.178
10.00	0.417	0.515	0.577	0.181	0.189
10.50	0.438	0.583	0.601	0.204	0.216
11.00	0.458	0.624	0.624	0.235	0.250
11.50	0.479	0.654	0.645	0.283	0.298
11.75	0.490	0.669	0.655	0.357	0.339
12.00	0.500	0.682	0.664	0.663	0.500
12.50	0.521	0.706	0.683	0.735	0.702
13.00	0.542	0.727	0.701	0.772	0.751
13.50	0.563	0.748	0.719	0.799	0.785
14.00	0.583	0.767	0.736	0.820	0.811
16.00	0.667	0.830	0.800	0.880	0.886
20.00	0.833	0.926	0.906	0.952	0.957
24.00	1.000	1.000	1.000	1.000	1.000

3.5. Modelo de Infiltración

El modelo de infiltración utilizado para este estudio fue el método del Número de Curva (CN). Este método fue propuesto por el ex Servicio de Conservación de Suelos de los Estados Unidos de América (Soil Conservation Service of the United States of America), ahora llamado Servicio de Conservación de Recursos Naturales (Natural Resources Conservation Service - NRCS). Este método permite estimar un único parámetro basado en el tipo de suelo y su uso de la tierra.

El método del CN asume que una cuenca tiene una capacidad de almacenamiento S (pulgadas). Existe una abstracción inicial, I_a , que es la altura de precipitación que infiltra completamente antes que la escorrentía empiece. Después que la escorrentía comienza, la infiltración es F_a y la escorrentía es P_e (precipitación efectiva), por lo tanto, la precipitación total P es:

$$P = P_e + I_a + F_a$$

El método del CN asume que existe una relación entre la precipitación efectiva, la capacidad de almacenamiento y la abstracción inicial, tal como sigue:

$$\frac{P_e}{S} = \frac{P_e}{P - I_a}$$

Usando las dos ecuaciones anteriores y después de manipulaciones algebraicas, el resultado es:

$$P_e = \frac{(P - I_a)^2}{P - I_a + S}$$

Adicionalmente, se asume que $P_e = 0.2 S$.

$$P_e = \frac{(P_e - 0.2S)^2}{P + 0.8S}$$

El CN está relacionado a S según:

$$S = \frac{1000}{CN} - 10$$

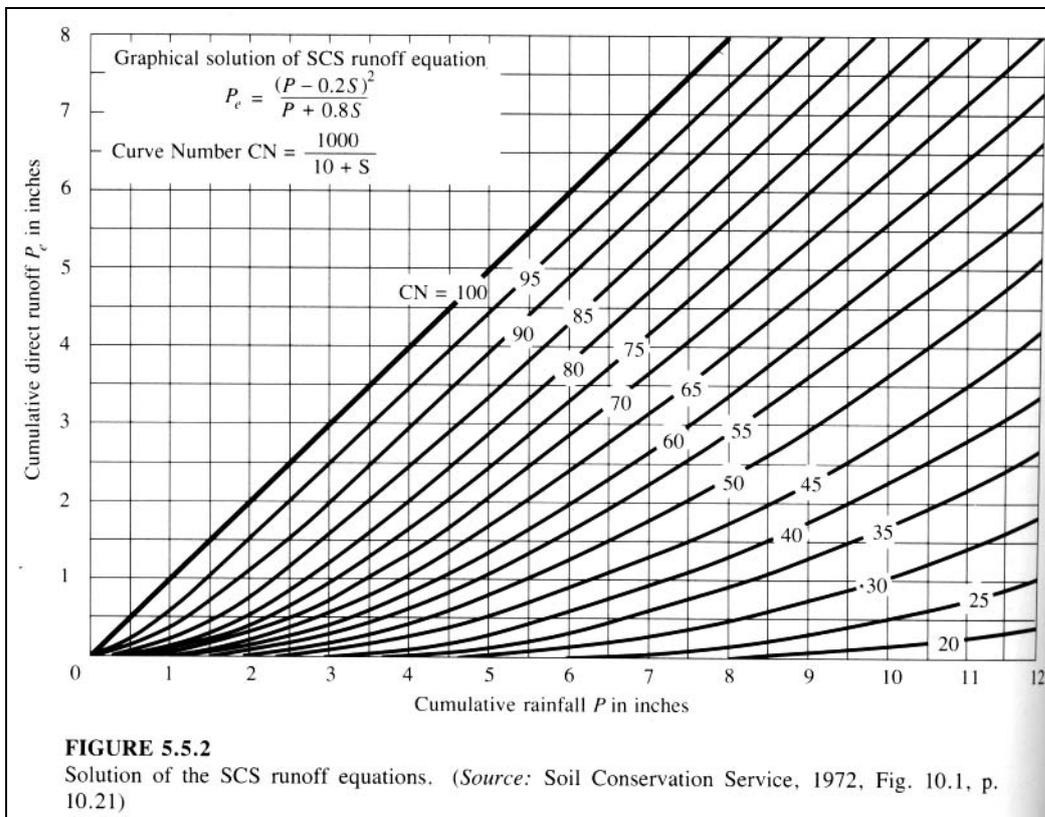


Figura 16. Relación entre la precipitación total, P, y la precipitación efectiva, Pe.

Los valores de CN están dados para condiciones normales, esto es cuando la precipitación ha registrado, en un periodo de 5 días precedentes, eventos cuyos rangos están entre 35.5 mm y 53.3 mm. Los valores de CN para condiciones normales están dados en las tablas 14, 15 y 16. Los valores de CN son estimados basados en el tipo de suelo y el uso de la tierra.

Si la precipitación es menor que 35.5 mm se aplica un factor de corrección que reduce el valor del CN. Este es el llamado Condición Antecedente de Humedad

I (AMC I). Si la precipitación excede los 53.3 mm durante el periodo de 5 días precedentes, la precipitación es ajustada y el valor del CN se incrementa. Este es el llamado Condición Antecedente de Humedad III, AMC III.

La ecuación para estimar el CN para AMC I es la siguiente:

$$CN(I) = \frac{4.2CN(II)}{10 - 0.058CN(II)}$$

La ecuación para estimar el CN para AMC III es la siguiente:

$$CN(III) = \frac{23CN(II)}{10 + 0.13CN(II)}$$

Tabla 14. Valores de CN basados en el tipo de suelo (Grupo Hidrológico de Suelo) y el uso de tierra.

TABLE 5.5.2

Runoff curve numbers for selected agricultural, suburban, and urban land uses (antecedent moisture condition II, $I_a = 0.2S$)

Land Use Description	Hydrologic Soil Group			
	A	B	C	D
Cultivated land ¹ : without conservation treatment	72	81	88	91
with conservation treatment	62	71	78	81
Pasture or range land: poor condition	68	79	86	89
good condition	39	61	74	80
Meadow: good condition	30	58	71	78
Wood or forest land: thin stand, poor cover, no mulch	45	66	77	83
good cover ²	25	55	70	77
Open Spaces, lawns, parks, golf courses, cemeteries, etc.				
good condition: grass cover on 75% or more of the area	39	61	74	80
fair condition: grass cover on 50% to 75% of the area	49	69	79	84
Commercial and business areas (85% impervious)	89	92	94	95
Industrial districts (72% impervious)	81	88	91	93
Residential ³ :				
Average lot size	Average % impervious ⁴			
1/8 acre or less	65	77	85	90
1/4 acre	38	61	75	83
1/3 acre	30	57	72	81
1/2 acre	25	54	70	80
1 acre	20	51	68	79
Paved parking lots, roofs, driveways, etc. ⁵	98	98	98	98
Streets and roads:				
paved with curbs and storm sewers ⁵	98	98	98	98
gravel	76	85	89	91
dirt	72	82	87	89

¹For a more detailed description of agricultural land use curve numbers, refer to Soil Conservation Service, 1972, Chap. 9

²Good cover is protected from grazing and litter and brush cover soil.

³Curve numbers are computed assuming the runoff from the house and driveway is directed towards the street with a minimum of roof water directed to lawns where additional infiltration could occur.

⁴The remaining pervious areas (lawn) are considered to be in good pasture condition for these curve numbers.

⁵In some warmer climates of the country a curve number of 95 may be used.

Tabla 15. Valores de los CN para áreas rurales y áreas áridas y semiáridas. Fuente: Maidment (1993).

TABLE 5.5.1 SCS Runoff Curve Numbers (Continued)					
c. Other agricultural areas					
Cover description		Curve numbers for hydrologic soil group			
Cover type	Hydrologic condition	A	B	C	D
Pasture, grassland, or range—continuous forage for grazing*	Poor	68	79	86	89
	Fair	49	69	79	84
	Good	39	61	74	80
Meadow—continuous grass, protected from grazing and generally mowed for hay	—	30	58	71	78
Brush—brush-weed-grass mixture with brush the major element†	Poor	48	67	77	83
	Fair	35	56	70	77
	Good	30	48	65	73
Woods-grass combination (orchard or tree farm)‡	Poor	57	73	82	86
	Fair	43	65	76	82
	Good	32	58	72	79
Woods§	Poor	45	66	77	83
	Fair	36	60	73	79
	Good	30	55	70	77
Farmsteads—buildings, lanes, driveways, and surrounding lots	—	59	74	82	86

* Poor: <50% ground cover or heavily grazed with no mulch.
 Fair: 50 to 75% ground cover and not heavily grazed.
 Good: >75% ground cover and lightly or only occasionally grazed.
 † Poor: <50% ground cover.
 Fair: 50 to 75% ground cover.
 Good: >75% ground cover.
 ‡ CNs shown were computed for areas with 50% woods and 50% grass (pasture) cover. Other combinations of conditions may be computed from the CNs for woods and pasture.
 § Poor: Forest litter, small trees, and brush are destroyed by heavy grazing or regular burning.
 Fair: Woods are grazed but not burned, and some forest litter covers the soil.
 Good: Woods are protected from grazing, and litter and brush adequately cover the soil.
 Source: Ref. 105.

d. Arid and semiarid range areas					
Cover description		Curve numbers for hydrologic soil group			
Cover type	Hydrologic condition*	A†	B	C	D
Herbaceous—mixture of grass, weeds, and low-growing brush, with brush the minor element	Poor		80	87	93
	Fair		71	81	89
	Good		62	74	85
Oak-aspen—mountain brush mixture of oak brush, aspen, mountain mahogany, bitter brush, maple, and other brush	Poor		66	74	79
	Fair		48	57	63
	Good		30	41	48
Piñon-juniper—piñon, juniper, or both: grass understory	Poor		75	85	89
	Fair		58	73	80
	Good		41	61	71
Sagebrush with grass understory	Poor		67	80	85
	Fair		51	63	70
	Good		35	47	55

Tabla 16. Valores de CN para áreas áridas y semiáridas. Fuente: Maidment (1993).

<i>d. Arid and semiarid range areas</i>					
Cover description		Curve numbers for hydrologic soil group			
Cover type	Hydrologic condition*	A†	B	C	D
Desert shrub—major plants include saltbush, greasewood, creosotebush, blackbrush, bursage, palo verde, mesquite, and cactus	Poor	63	77	85	88
	Fair	55	72	81	86
	Good	49	68	79	84

* *Poor*: <30% ground cover (litter, grass, and brush overstory).
Fair: 30 to 70% ground cover.
Good: >70% ground cover.
† Curve numbers for group A have been developed only for desert shrub.
Source: Ref. 105.

Para establecer los valores iniciales de CN, el territorio de la Cuenca fue dividido en diferentes áreas. A las zonas montañosas, tierras áridas, suelos escasamente cubiertos por retiros de glaciares, morrenas en su mayoría y con escasa vegetación se les ha asignado un valor de CN de 65. Este fue corregido usando la ecuación para la condición AMC III, obteniéndose un valor de 81. La parte media está cubierta con pastizales, pequeños arbustos y árboles, habiéndosele asignado un número de curva de 55. En esta área también fue necesaria corregir el valor del CN usando la corrección AMC III, obteniéndose un valor de 75. Finalmente, la parte baja corresponde a áreas hiper áridas, con precipitaciones anuales menores que 50 mm. A ésta se le asignó un valor de CN de 79, sin embargo, se aplicó el factor de corrección para la condición AMC I, resultando un valor de 61 para la parte baja de la cuenca. La Figura 17 muestra la distribución de los valores iniciales y finales de CN, los que fueron ajustados durante el proceso de calibración.

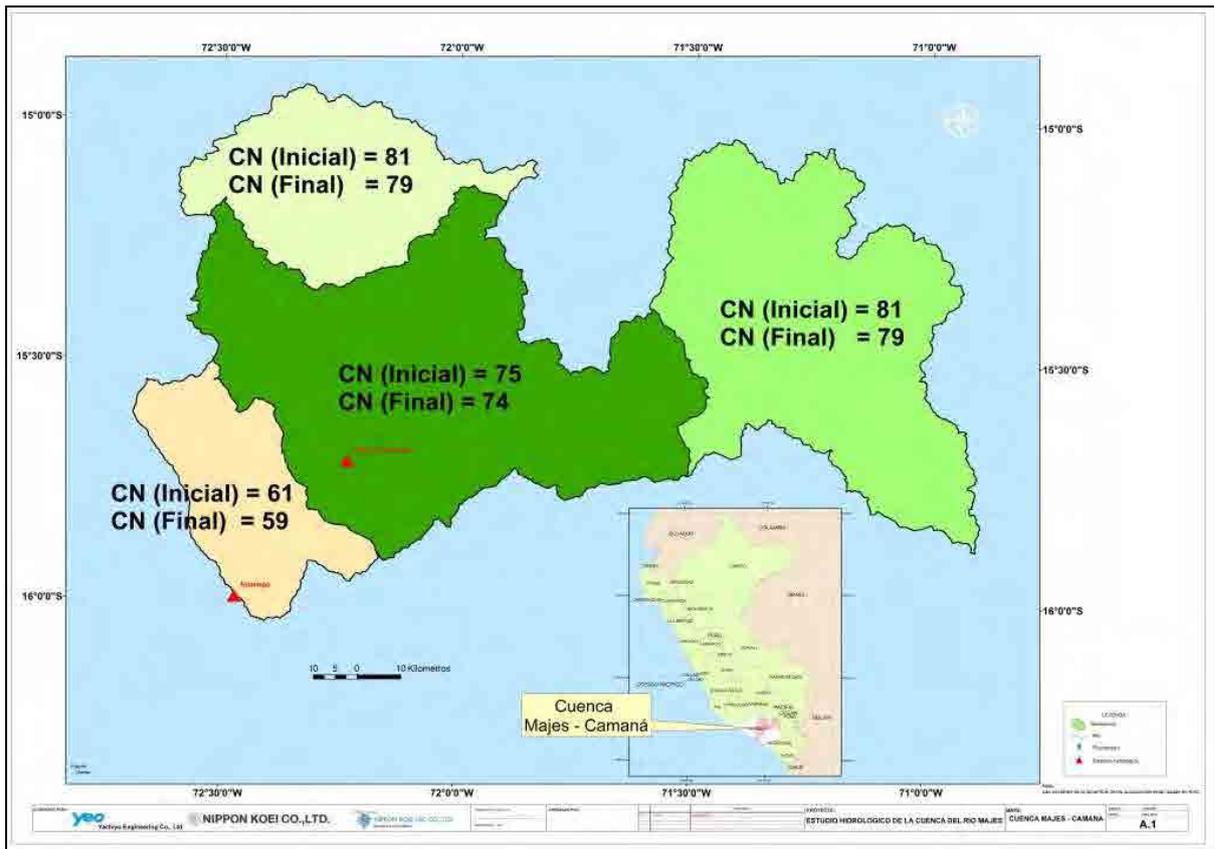


Figura 17. Distribución inicial de los Números de Curva para iniciar la simulación hidrológica y calibración.

3.6. Modelo del Hidrograma Unitario (Transformada)

El modelo del hidrograma unitario usado corresponde al método de la ex SCS. Este método estima un tiempo de concentración basado en la longitud de la Cuenca, L, la pendiente de la Cuenca, S, en porcentaje, y el CN. La fórmula se presenta a continuación:

$$t_c(hr) = \frac{4.3611L^{0.8} \left[\frac{1000}{CN} - 9 \right]^{0.7}}{1900S^{0.5}}$$

El tiempo de retardo es 0.6 t_c . El tiempo de retardo es ingresado al programa HEC-HMS como la única variable que se usará para estimar el hidrograma en cada cuenca. Los tiempos de retardo para cada cuenca son presentados en el Anexo C.

3.7. Modelo de Tránsito de Avenidas

El modelo de tránsito de avenidas usado en el estudio es el método de la onda cinemática. Este método está basado en

$$\frac{\partial Q}{\partial x} + \frac{\partial A}{\partial t} = q$$

$$S_o = S_f$$

También se asume que el área, A, es proporcional al caudal, Q, tal como sigue:

$$A = \alpha Q^\beta$$

Reformulando los resultados de la ecuación de Manning en:

$$A = \left(\frac{nP^{2/3}}{S_o^{1/2}} \right)^{3/5} Q^{3/5}$$

Por lo tanto:

$$\alpha = \left(\frac{nP^{2/3}}{S_o^{1/2}} \right)^{3/5}$$

$$\beta = 0.6$$

Este es resuelto usando un método numérico como se muestra a continuación:

$$Q_{i+1}^{j+1} = \frac{\left[\frac{\Delta t}{\Delta x} \right] Q_i^{j+1} + \alpha \beta Q_{i+1}^j \left(\frac{Q_{i+1}^j + Q_i^{j+1}}{2} \right)^{\beta-1} + \Delta t \left(\frac{q_{i+1}^{j+1} + q_{i+1}^j}{2} \right)}{\left[\frac{\Delta t}{\Delta x} + \alpha \beta \left(\frac{Q_{i+1}^j + Q_i^{j+1}}{2} \right)^{\beta-1} \right]}$$

3.8. Cálculos de flujo base

El flujo base fue estimado empleando caudales de la Estación Huatiapa. Se identificó la descarga mínima de cada mes y se halló el promedio. Se asume que este valor es aproximadamente constante para cada mes del año y se ha basado en datos recolectados en campo de la Estación Huatiapa. Finalmente, se empleó el promedio de los caudales mínimos de Febrero como el caudal total para las simulaciones precipitación-escorrentía. Debido a que la cuenca Majes – Camaná ha sido dividida en 4 sub cuencas y los caudales base se ingresan por subcuenca al modelo HEC-HMS, se asumió que los flujos base eran proporcionales a las áreas de las subcuencas, de tal manera que la suma de los flujos base de las subcuencas sea igual al caudal base en Huatiapa. Los resultados se presentan en la Tabla 18.

Tabla 18. Flujos base estimados en la Estación Huatiapa.

Sub Cuenca	Enero	Febrero	Marzo
W2830	8.37	14.69	14.24
W3050	17.46	30.65	29.72
W3490	22.32	39.18	37.99
W4590	6.25	10.98	10.64
Total	54.4	95.5	92.6

3.9. Soporte Lógico (Software)

El programa usado para llevar a cabo la simulación es el programa HEC – HMS, versión 3.4, que fue desarrollado por el Cuerpo de Ingenieros del Ejército de los Estados Unidos, para así estimar el caudal en los puntos de interés. Este programa permite la simulación de escorrentía superficial producida en las cuencas, flujos de avenida a través de canales, conductos y presas. El modelo de la cuenca tiene módulos que permiten calcular la infiltración, el hidrograma unitario y el flujo base por diferentes métodos. En este caso, el método del SCS ha sido escogido para calcular la infiltración, el hidrograma unitario ha sido empleado para estimar los hidrogramas de escorrentía superficial, y luego, el flujo base fue incluido como flujo constante mensual. El modelo de la onda cinemática fue usado para modelar el tránsito de avenidas.

Las sub – cuencas se unen en puntos llamados junctions. El programa permite incluir reservorios de cualquier tamaño en el modelo. La precipitación de diseño y el tipo de tormenta son introducidos en el modelo meteorológico. En este caso, los caudales serán estimados para avenidas de 2, 5, 10, 25, 50 y 100 años. La Figura 18 muestra el esquemático del programa HEC – HMS 3.4 implementado con los datos de la cuenca del Majes – Camaná.

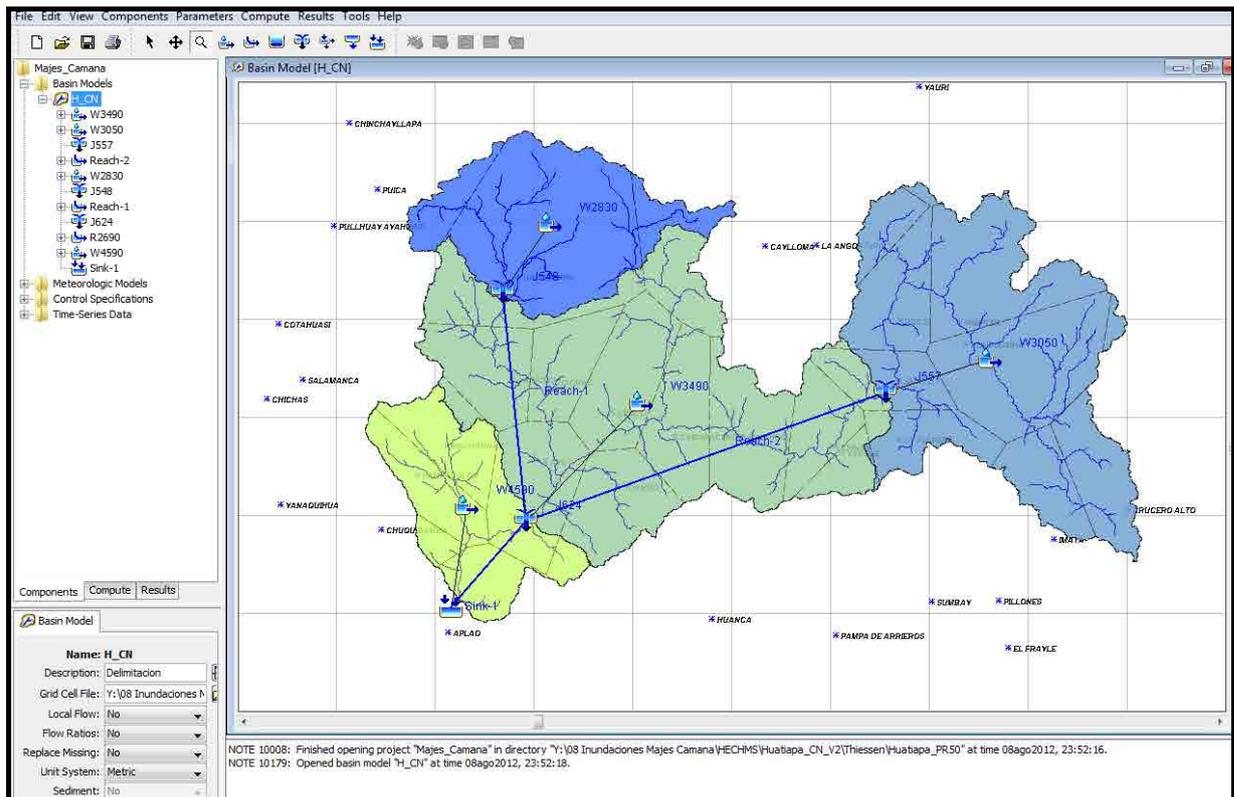


Figura 18. Esquema HEC-HMS de la cuenca Majes - Camaná y que muestra las 4 subcuencas en las que fue divididas.

3.10. Calibración del Número de Curva

El número de curva (en adelante, CN) es la única variable que puede ser calibrada. El resto de las variables puede ser medida directamente de mapas o de otras fuentes. Por lo tanto, los valores iniciales fueron asumidos tomando en consideración el tipo de suelo y el uso de la tierra. Los valores fueron extraídos de tablas publicadas por el ex Servicio de Conservación de Suelos (Actualmente, el Servicio de Conservación de Recursos Naturales, NRCS). La precipitación para el periodo de retorno del año N debe corresponder al caudal pico del periodo de retorno del año N.

Se calculó los caudales pico usando las precipitaciones que corresponden a los periodos de retorno de interés y que fueron estimadas en la Estación Huatiapa. Si los valores excedían las máximas descargas diaria para los mismos periodos de retorno, entonces se analizó el tiempo en el que la máxima descarga era excedida.

En este caso, los valores iniciales de CN produjeron flujos mucho mayores que los calculados empleando los registros de caudales. Por lo tanto, se fueron disminuyendo los valores de CN en cada sub zona hasta que se halló un hidrograma apropiado. Los valores iniciales y finales de CN se presentan en la

Tabla 19. En el Apéndice C.2 se presenta un mapa que muestra los valores iniciales y finales de CN en la cuenca Majes – Camaná.

Los valores finales produjeron hidrogramas que serán usados por los otros equipos que trabajan en este estudio. Los caudales pico serán empleados en la delineación de planicies de inundación en las partes bajas de la cuenca.

Tabla 19. Valores iniciales y finales del CN.

Área	Descripción	CN inicial estimado	CN Final
Cuenca Alta - Colca	Áreas áridas con escasa vegetación.	81	79
Cuenca Alta - Andahua	Áreas áridas con escasa vegetación.	81	79
Cuenca Media – Colca y Andahua	Pastizales, arbustos, árboles pequeños.	75	74
Cuenca Baja - Majes	Desierto, áreas hiper áridas	61	59

Los tiempos de concentración, t_c , fueron encontrados para cada condición probada y el tiempo de retardo recalculado. Los valores finales de los caudales en la estación Huatiapa fueron calculados para periodos de retorno de 2, 5, 10, 20, 25, 50 y 100 años y son presentados en la Tabla 18. Se muestran los resúmenes de los resultados y los hidrogramas para los mismos periodos de retorno desde la Figura 19 hasta la 32. Información detallada sobre los hidrogramas de avenidas puede ser vista en el Anexo C.3.

Tabla 20. Caudales pico para diferentes periodos de retorno en Huatiapa.

T (años)	Q (m ³ /s)
2	305,8
5	637,7
10	1007
20	1415,9
25	1565,6
50	2083,6
100	2702,6

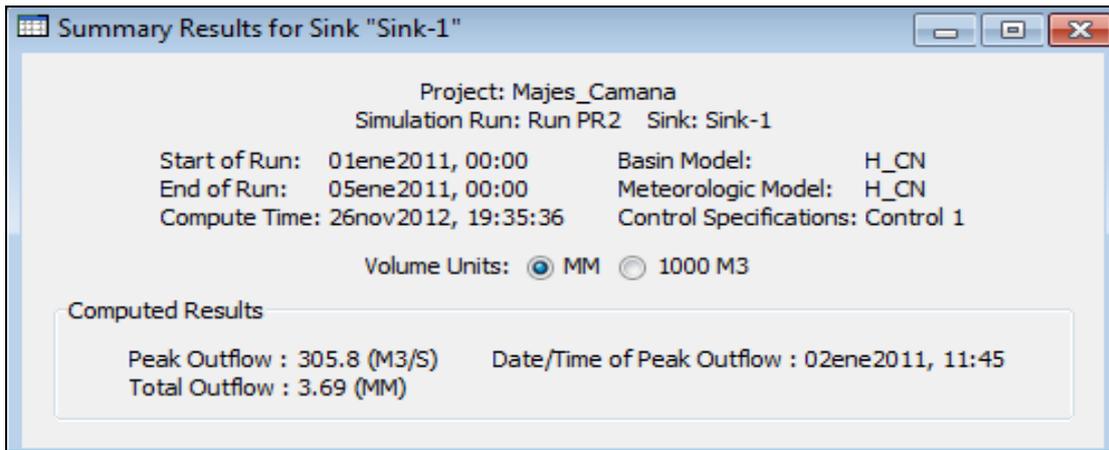


Figura 19. Resumen de resultados del programa HEC – HMS para el periodo de retorno de 2 años en la estación Huatiapa.

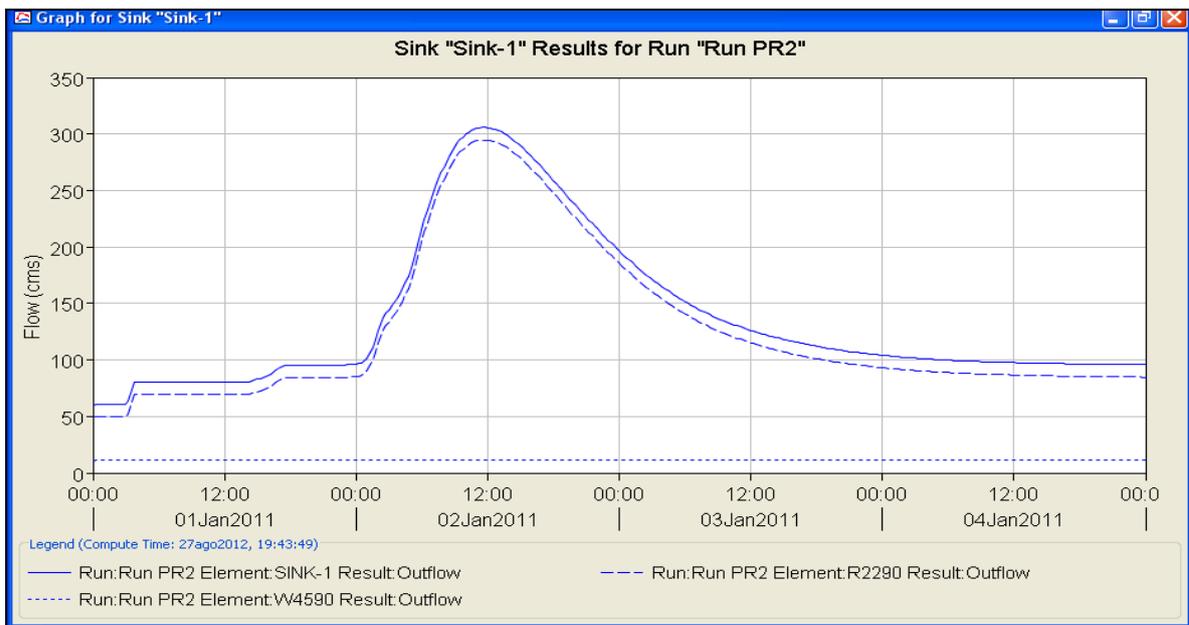


Figura 20. Hidrograma para el periodo de retorno de 2 años en la estación Huatiapa.

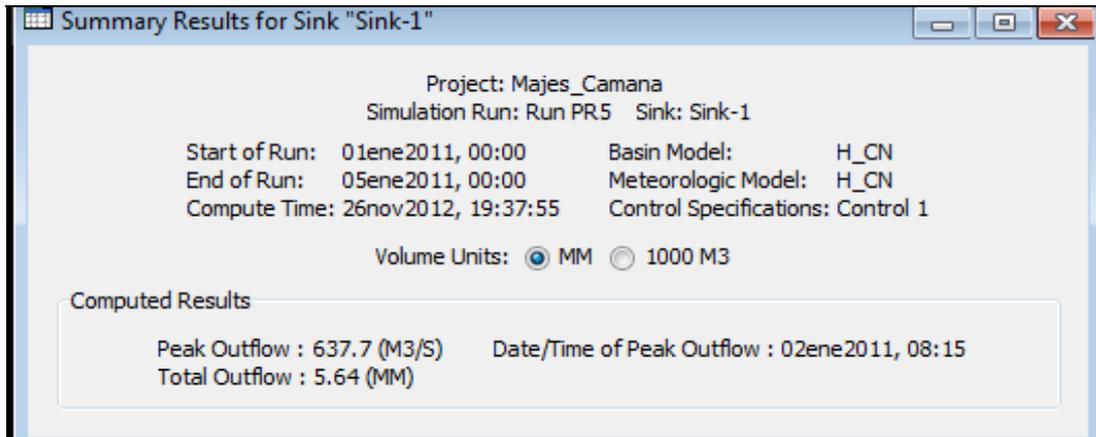


Figura 21. Resumen de resultados del programa HEC – HMS para avenidas de 5 años en la estación Huatiapa.

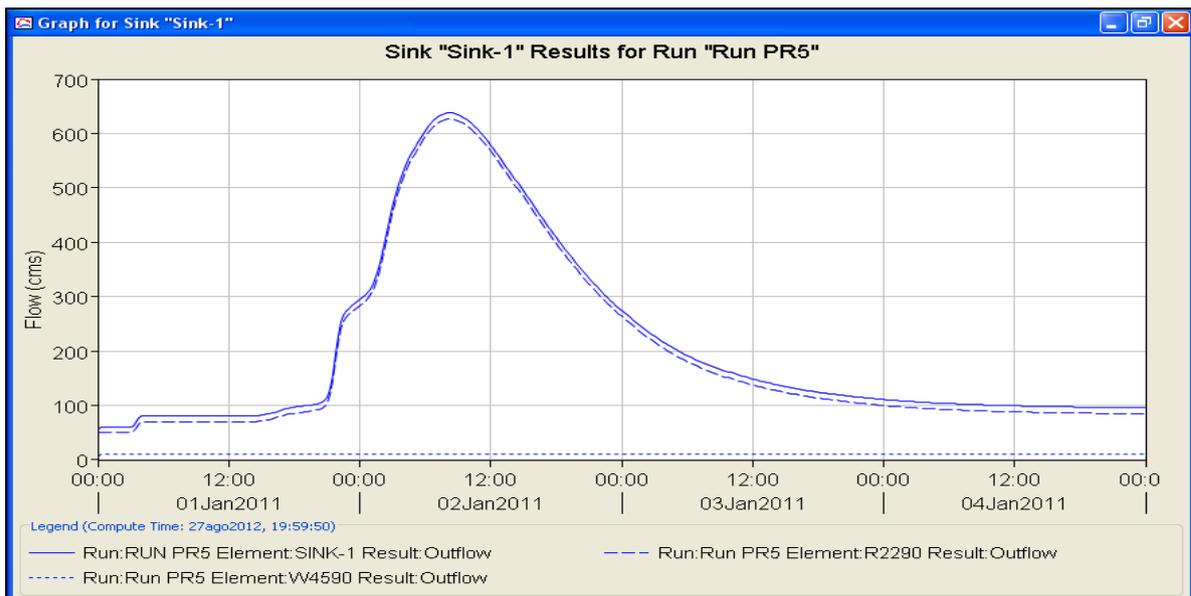


Figura 22. Hidrograma para el periodo de retorno de 5 años en la estación Huatiapa.

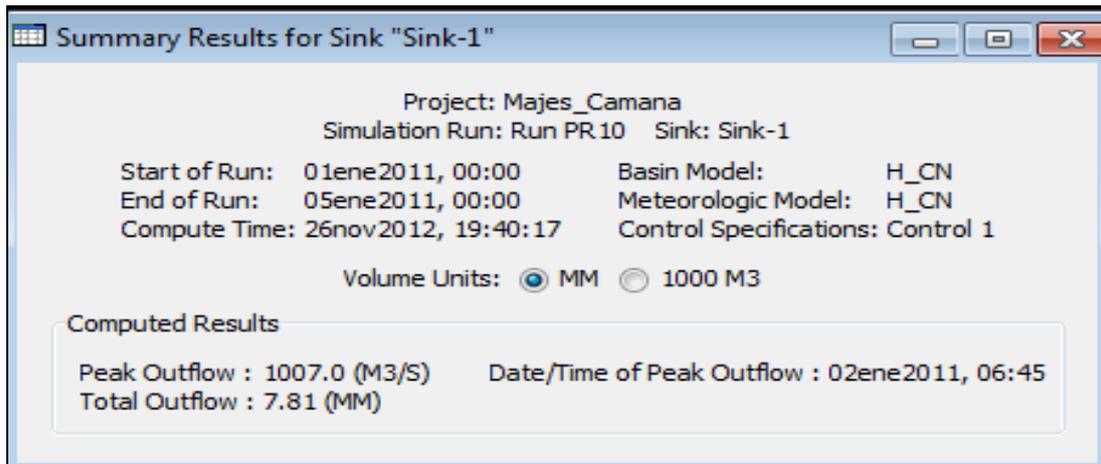


Figura 23. Resumen de resultados del programa HEC – HMS para avenidas de 10 años en la estación Huatiapa.

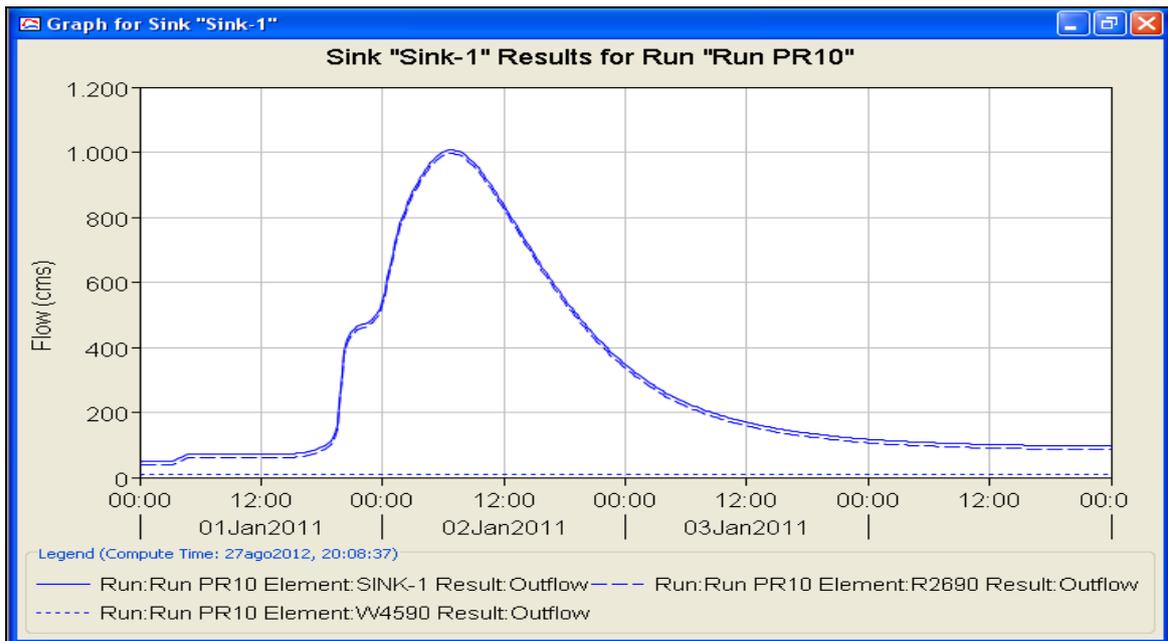


Figura 24. Hidrograma para el periodo de retorno de 10 años en la estación Huatiapa.

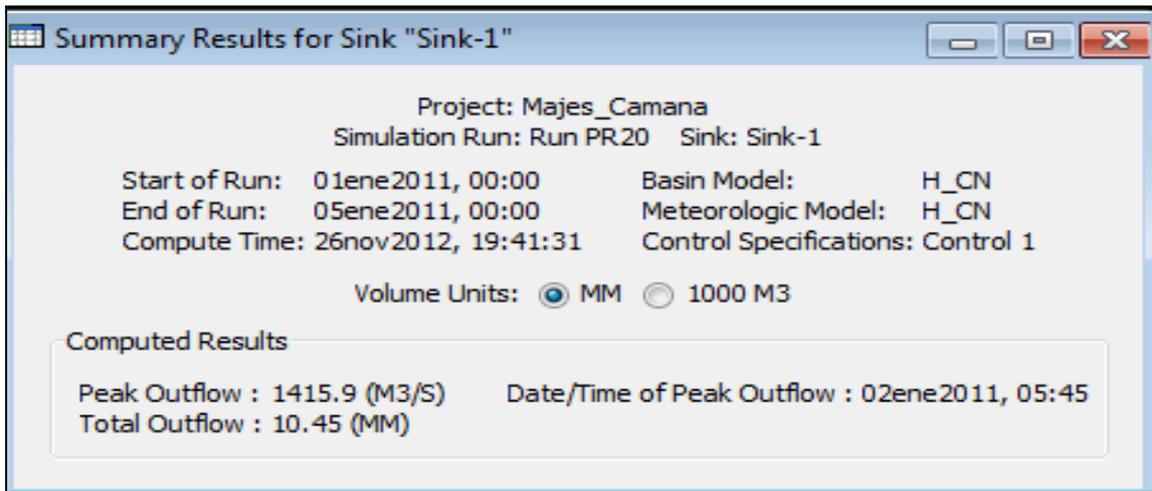


Figura 25. Resumen de resultados del programa HEC – HMS para avenidas de 20 años en la estación Huatiapa.

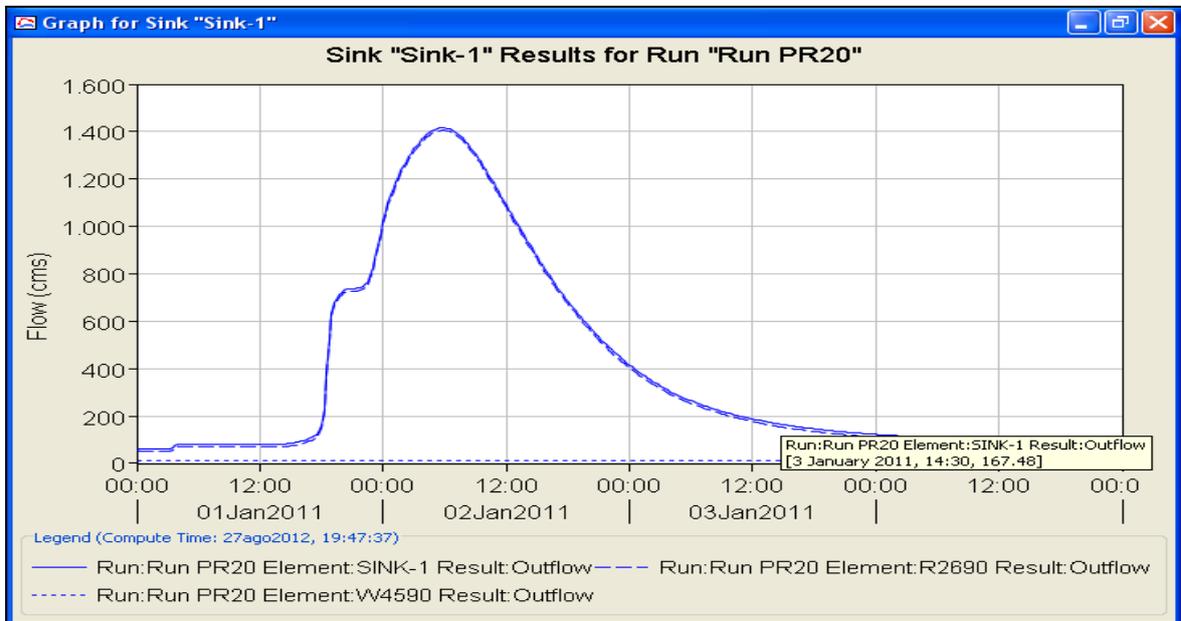


Figura 26. Hidrograma para el periodo de retorno de 20 años en la estación Huatiapa.

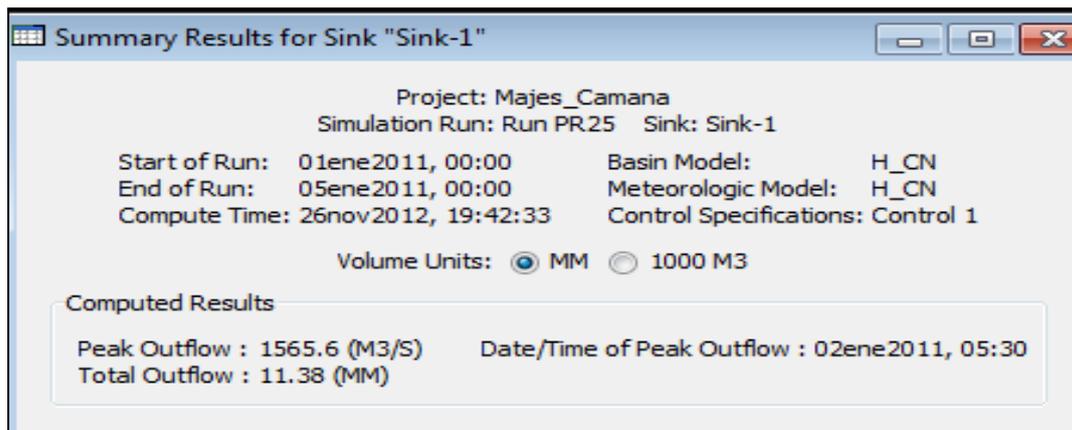


Figura 27. Resumen de resultados del programa HEC – HMS para avenidas de 25 años en la estación Huatiapa.

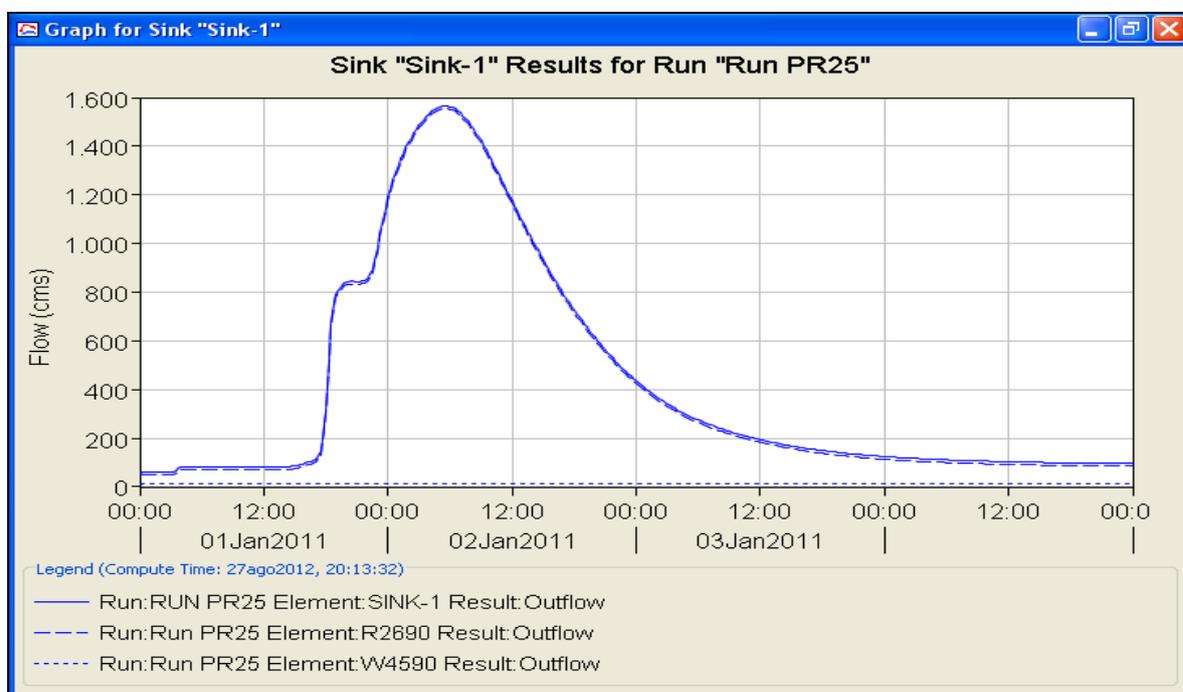


Figura 28. Hidrograma para el periodo de retorno de 25 años en la estación Huatiapa.

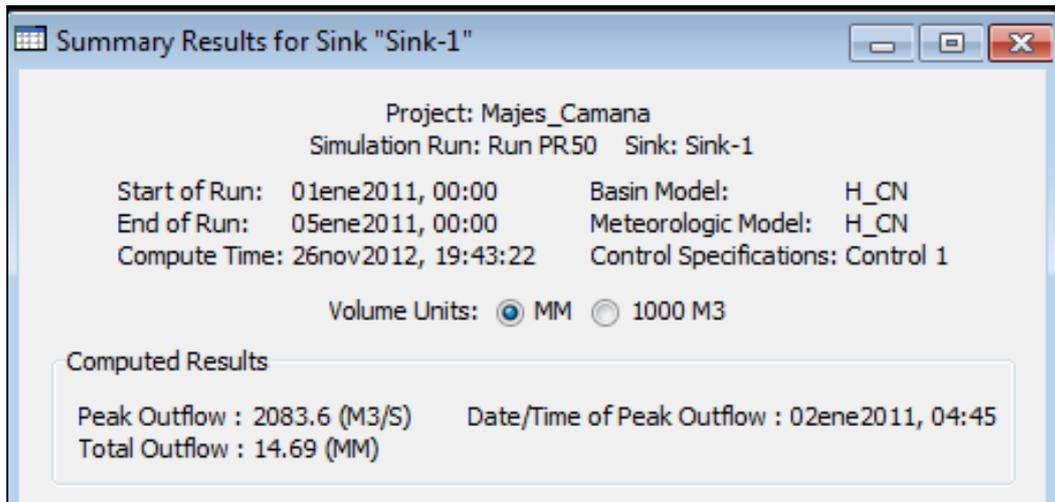


Figura 29. Resumen de resultados del programa HEC – HMS para avenidas de 50 años en la estación Huatiapa.



Figura 30. Hidrograma para el periodo de retorno de 50 años en la estación Huatiapa.

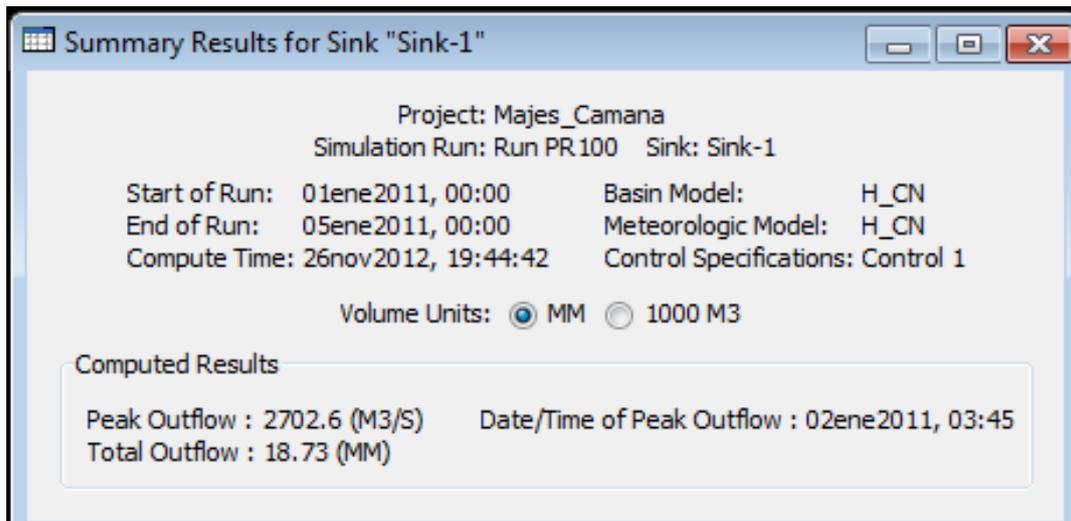


Figura 31. Resumen de resultados del programa HEC – HMS para avenidas de 100 años en la estación Huatiapa.

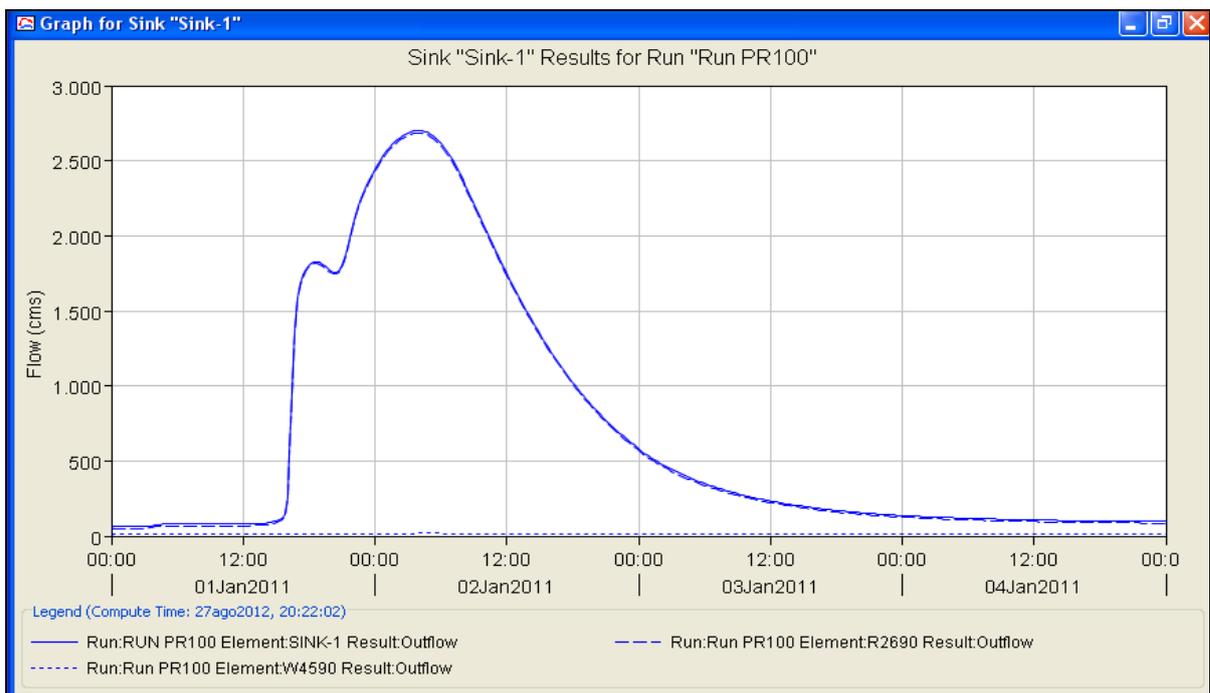


Figura 32. Hidrograma para el periodo de retorno de 100 años en la estación Huatiapa.

Las Figuras 33 a 36 muestran los caudales específicos de los caudales pico obtenidos estadísticamente en la costa del Perú y el caudal pico estimado de la cuenca Majes – Camaná en la Estación Huatiapa usando el modelo HEC-HMS. De acuerdo a estas descargas específicas y las curvas de Creager, los caudales pico estimados del Majes-Camaná en la Estación Huatiapa usando el programa HEC-HMS, se puede apreciar que caen dentro de un rango razonable de cercanía a los estimados con el método de Creager.

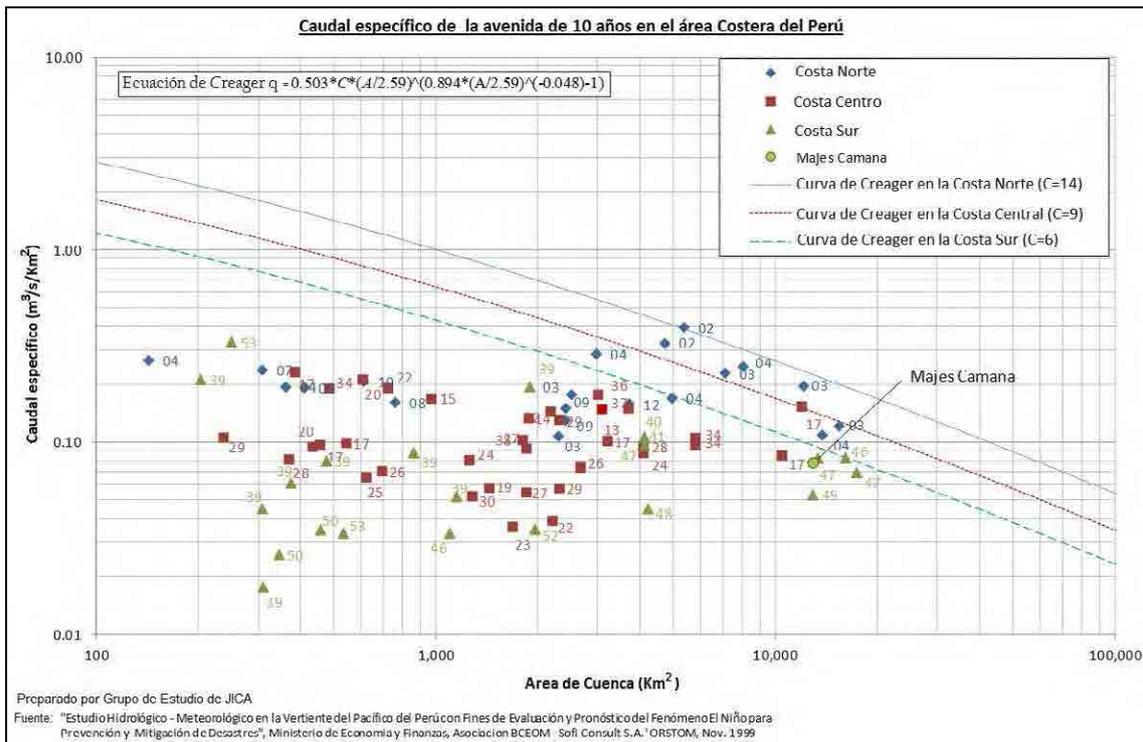


Figura 33. Descarga específica de picos de avenidas en el área costera del Perú y caudal pico estimado en la estación Majes - Camaná usando el modelo HEC-HMS (periodo de retorno de 10 años).

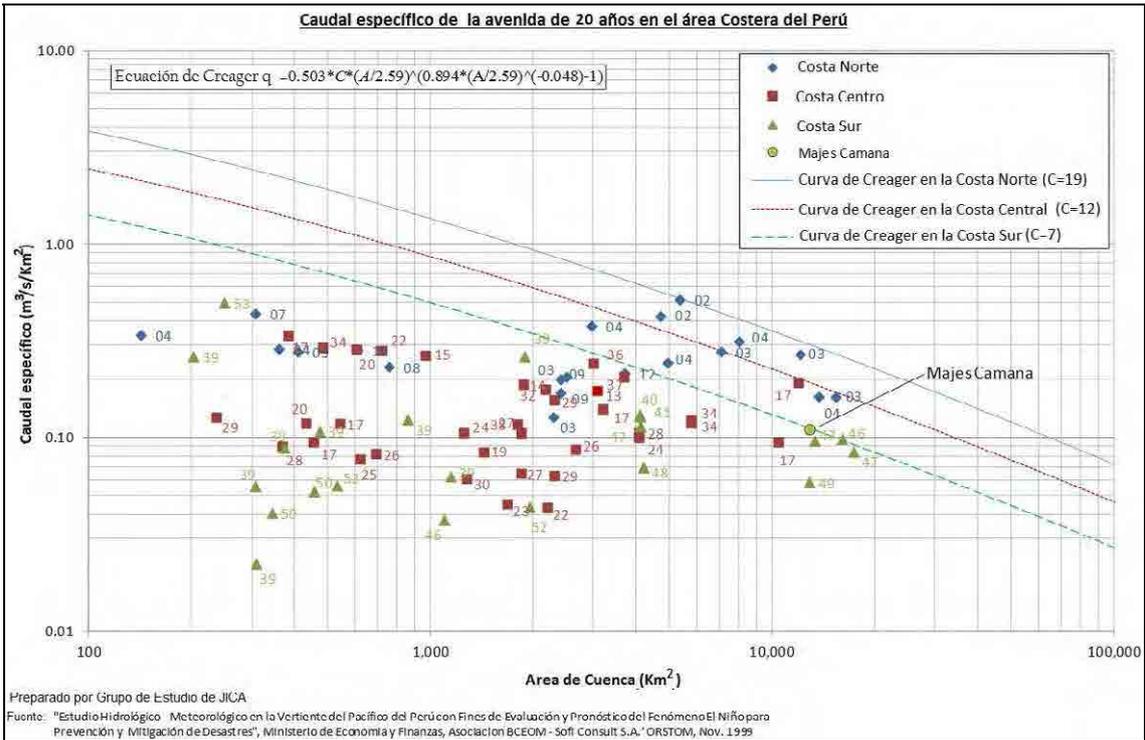


Figura 34. Descarga específica de picos de avenidas en el área costera del Perú y caudal pico estimado en la estación Majes - Camaná usando el modelo HEC-HMS (periodo de retorno de 20 años).

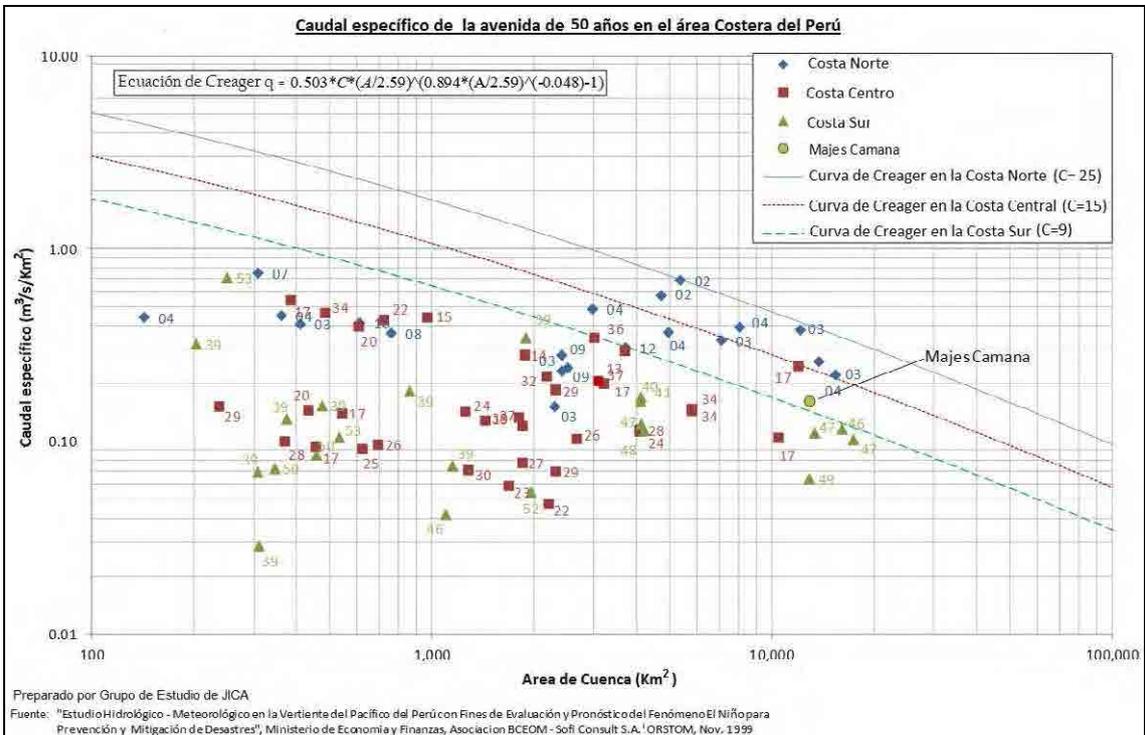


Figura 35. Descarga específica de picos de avenidas en el área costera del Perú y caudal pico estimado en la estación Majes - Camaná usando el modelo HEC-HMS (periodo de retorno de 50 años).

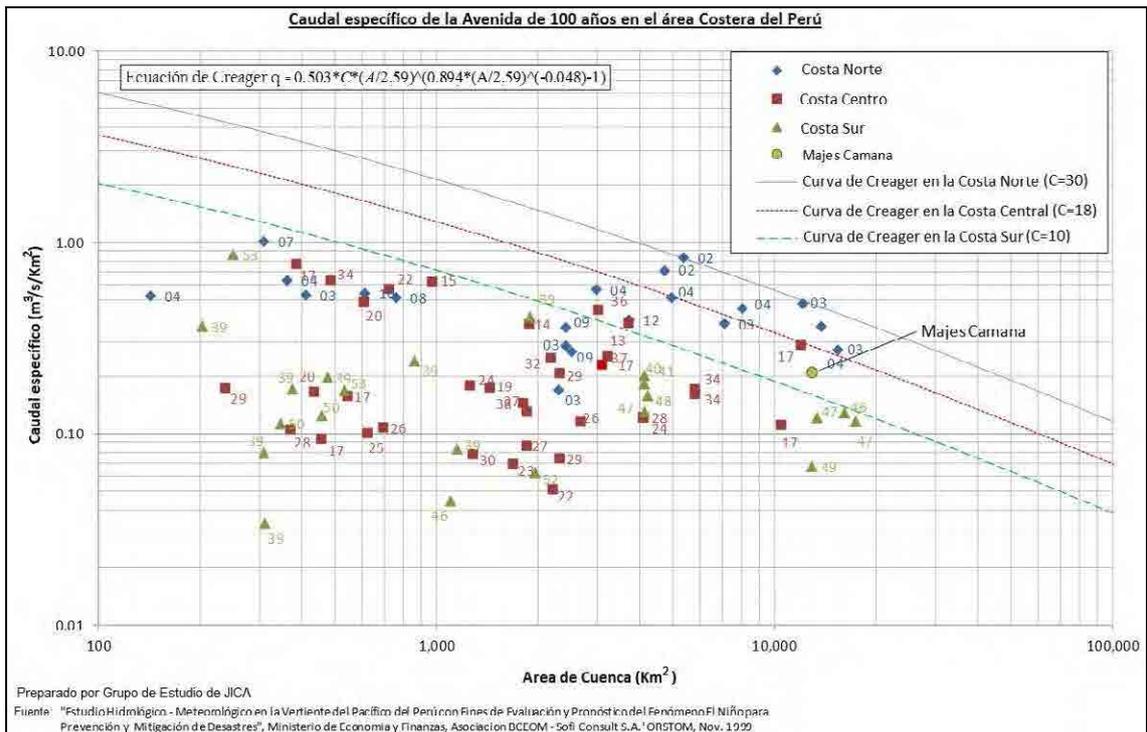


Figura 36. Descarga específica de picos de avenidas en el área costera del Perú y caudal pico estimado en la estación Majes - Camaná usando el modelo HEC-HMS (periodo de retorno de 100 años).

IV. CONCLUSIONES Y RECOMENDACIONES

El principal objetivo del presente estudio es estimar los caudales y los hidrogramas que ocurrirán para los siguientes periodos de retorno: 2, 5, 10, 25, 50 y 100 años.

La mayoría de los registros disponibles de precipitación para la zona de estudio han sido obtenidos manualmente. Solo en años recientes se han instalado estaciones meteorológicas automáticas en la zona de estudio. La precipitación usada para la simulación hidrológica es la precipitación máxima en 24 horas.

El efecto orográfico es muy pronunciado en la Cuenca Majes – Camaná. La precipitación es cercana a cero en la parte baja e incrementa según aumenta la altitud. La precipitación es 700 mm/año cerca a la línea divisoria de las aguas continental.

Las estaciones hidrométricas son muy escasas en la Cuenca Majes – Camaná. Solo la estación Huatiapa ha estado operando sin mayores interrupciones desde que empezó a funcionar. Los datos han sido obtenidos manualmente, no estando disponibles datos continuos ya que los caudales son medidos tres o cuatro veces al día. La estación automática con flotador fue instalada en Huatiapa en el año 2006. Sin embargo, la descarga digitalizada horaria no se encuentra disponible para la Estación Huatiapa.. Los caudales máximos diarios son obtenidos seleccionando el mayor medido en el día. Entonces, se ha considerado necesario llevar a cabo las simulaciones hidrológicas.

En la ausencia de caudales picos instantáneos, se decidió realizar simulaciones hidrológicas para obtener los caudales e hidrogramas picos. Los valores iniciales de CN fueron obtenidos de tablas y fueron ajustados teniendo en consideración la condición antecedente de humedad (AMC) en cada subdivisión de Cuenca.

Los caudales pico en la estación Huatiapa fueron estimados usando simulaciones hidrológicas. Los resultados se muestran a continuación:

T (años)	Q (m³/s)
2	305,8
5	637,7
10	1007
20	1415,9
25	1565,6
50	2083,6
100	2702,6



Agencia de Cooperación Internacional
Del Japón



**PROGRAMA DE PROTECCION DE VALLES Y POBLACIONES
RURALES Y VULNERABLES ANTE INUNDACIONES
EN
LA REPUBLICA DEL PERU**

**HIDROLOGIA DE MAXIMAS AVENIDAS DEL
RIO CAÑETE**

Apéndice-2

Diciembre de 2012



HIDROLOGIA DE MAXIMAS AVENIDAS DEL RIO CAÑETE

ÍNDICE

I.	INTRODUCCIÓN	8
II.	ASPECTOS GENERALES	8
2.1	Ubicación	8
2.1.1	Ubicación Política	8
2.1.2	Ubicación Geográfica	9
2.2	Antecedentes	9
2.3	Justificación del Proyecto	9
2.4	Objetivos del Estudio	10
III.	DESCRIPCION DEL PROYECTO	10
3.1	Sistema Hidrográfico del río Cañete	10
3.1.1	Descripción General de la Cuenca	10
3.1.2	Hidrografía de la Cuenca del Río Cañete	11
3.2	Climatología	12
3.2.1	Precipitación	12
3.2.2	Temperatura	31
3.3	Hidrometría	32
3.4	Comentarios sobre la red de estaciones hidrológicas e hidrométricas de la Cuenca del Río Cañete.	34
3.4.1	Sobre las Estaciones Pluviométricas	34
3.4.2	Sobre las Estaciones Hidrométricas	35
3.4.3	Recomendaciones	35
IV.	HIDROLOGIA DE MAXIMAS AVENIDAS	38
4.1	Consideraciones Previas	38
4.2	Caracterización Hidrológica, Análisis de la Información Pluviométrica e Hidrométrica	39
4.2.1	Caracterización Hidrológica	39
4.2.2	Análisis de las Precipitaciones Máximas en 24 Horas	39
4.2.2.1	<i>Funciones de Distribución</i>	42
4.2.2.2	<i>Calculo de Ajuste y Periodo de Retorno para las Precipitaciones Máximas en 24 Horas</i>	45
4.2.2.3	<i>Selección de Distribución Teórica con mejor Ajuste a la Serie de Precipitaciones Máximas en 24 Horas</i>	45

4.2.2.4	<i>Determinación de Precipitaciones Máximas para Diferentes Periodos de Retorno en el Punto Base</i>	53
4.2.2.5	<i>Determinación de Precipitaciones Máximas para Diferentes Periodos de Retorno en las Subcuencas del río Cañete</i>	53
4.2.3	Análisis de Descargas Máximas Diarias	56
4.2.4	Modelo de Simulación, Aplicación del Software HEC-HMS	59
4.2.4.1	<i>Modelo Hidrológico</i>	59
4.2.4.2	<i>Modelamiento con el Programa HEC – HMS</i>	62
4.3	Resultados de la Simulación, Caudales Máximos en el Punto Base	74
V.	REFERENCIAS	75
	ANEXOS	76

HIDROLOGIA DE MAXIMAS AVENIDAS DEL RIO CAÑETE

RELACIÓN DE CUADROS

<i>Cuadro N° 3.1. Características de las Estaciones Pluviométricas de la cuenca del río Cañete y cuencas vecinas</i>	13
<i>Cuadro N° 3.2. Características de las Estaciones Pluviométricas de la cuenca del río Cañete y cuencas vecinas</i>	15
<i>Cuadro N° 3.3. Resultados del ajuste lineal de las estaciones de Carania y Huangascar</i>	16
<i>Cuadro N° 3.4. Temperatura Media Mensual [°C] de las estaciones de la cuenca del río Cañete y cuencas vecinas</i>	32
<i>Cuadro N° 4.1. Características Geomorfológicas de la cuenca en el Punto Base (estación Socsi)</i>	39
<i>Cuadro N° 4.2. Precipitación Máxima en 24 Horas Anual de las Estaciones ubicadas en el Ámbito del Estudio</i>	40
<i>Cuadro N° 4.3. Coeficiente de Determinación para cada Función de Distribución y para cada Estación Pluviométrica</i>	45
<i>Cuadro N° 4.4. Precipitaciones Máxima en 24 Horas de cada Estación Pluviométrica y para cada Periodo de Retorno</i>	46
<i>Cuadro N° 4.5. Precipitaciones Areales Máximas en 24 Horas en el Punto Base (Estación Socsi) para cada Periodo de Retorno</i>	53
<i>Cuadro N° 4.6. Precipitaciones para Diferentes Periodos de Retorno en cada Subcuenca del río Cañete</i>	55
<i>Cuadro N° 4.7. Descargas Máximas Diarias de la estación Socsi, río Cañete (m³/s)</i>	56
<i>Cuadro N° 4.8. Descargas Máximas para cada Periodo de Retorno, en la estación Socsi, río Cañete (m³/s)</i>	58
<i>Cuadro N° 4.9. Tiempo de Concentración y de Viaje para el Punto Base (estación Socsi)</i>	59
<i>Cuadro N° 4.10. Precipitaciones Máximas para Duraciones de Tormenta de 10 horas (mm), según Dick - Peschke</i>	60

<i>Cuadro N° 4.11. Histograma para diferentes Periodos de Retorno, Duración de Tormenta de 10 horas</i>	<i>61</i>
<i>Cuadro N° 4.12. Curva Numero (CN) en Función del Uso del Suelo y del Grupo Hidrológico del Suelo</i>	<i>61</i>
<i>Cuadro N° 4.13. Hidrograma de Avenidas Generado con el Modelo HEC-HMS para un Periodo de Retorno de 2 Años</i>	<i>67</i>
<i>Cuadro N° 4.14. Hidrograma de Avenidas Generado con el Modelo HEC-HMS para un Periodo de Retorno de 5 Años</i>	<i>68</i>
<i>Cuadro N° 4.15. Hidrograma de Avenidas Generado con el Modelo HEC-HMS para un Periodo de Retorno de 10 Años</i>	<i>70</i>
<i>Cuadro N° 4.16. Hidrograma de Avenidas Generado con el Modelo HEC-HMS para un Periodo de Retorno de 25 Años</i>	<i>71</i>
<i>Cuadro N° 4.17. Hidrograma de Avenidas Generado con el Modelo HEC-HMS para un Periodo de Retorno de 50 Años</i>	<i>73</i>
<i>Cuadro N° 4.18. Hidrograma de Avenidas Generado con el Modelo HEC-HMS para un Periodo de Retorno de 100 Años</i>	<i>74</i>
<i>Cuadro N° 4.19. Resumen de los Caudales Máximos en el Punto Base para cada Periodo de Retorno</i>	<i>75</i>

HIDROLOGIA DE MAXIMAS AVENIDAS DEL RIO CAÑETE

RELACIÓN DE FIGURAS

<i>Figura N° 3.1. Mapa de Ubicación de la cuenca del río Cañete</i>	<i>11</i>
<i>Figura N° 3.2. Periodo y Longitud de la información disponible de las Estaciones Pluviométricas</i>	<i>13</i>
<i>Figura N° 3.3. Ubicación de las Estaciones Pluviométricas en la Cuenca del río Cañete y Cuencas Vecinas</i>	<i>14</i>
<i>Figura N° 3.4. Histograma Mensual de las Estaciones Pluviométricas consideradas en el Ámbito del Estudio</i>	<i>15</i>
<i>Figura N° 3.5. Tendencia de la Precipitación Anual de las Estaciones Consideradas en el Ámbito del Estudio</i>	<i>17</i>
<i>Figura N° 3.6. Isoyeta del mes de Enero de la Precipitación Media Mensual en la cuenca del río Cañete</i>	<i>18</i>
<i>Figura N° 3.7. Isoyeta del mes de Febrero de la Precipitación Media Mensual en la cuenca del río Cañete</i>	<i>19</i>
<i>Figura N° 3.8. Isoyeta del mes de Marzo de la Precipitación Media Mensual en la cuenca del río Cañete</i>	<i>20</i>
<i>Figura N° 3.9. Isoyeta del mes de Abril de la Precipitación Media Mensual en la cuenca del río Cañete</i>	<i>21</i>
<i>Figura N° 3.10. Isoyeta del mes de Mayo de la Precipitación Media Mensual en la cuenca del río Cañete</i>	<i>22</i>
<i>Figura N° 3.11. Isoyeta del mes de Junio de la Precipitación Media Mensual en la cuenca del río Cañete</i>	<i>23</i>
<i>Figura N° 3.12. Isoyeta del mes de Julio de la Precipitación Media Mensual en la cuenca del río Cañete</i>	<i>24</i>
<i>Figura N° 3.13. Isoyeta del mes de Agosto de la Precipitación Media Mensual en la cuenca del río Cañete</i>	<i>25</i>
<i>Figura N° 3.14. Isoyeta del mes de Septiembre de la Precipitación Media Mensual en la cuenca del río Cañete</i>	<i>26</i>

<i>Figura N° 3.15. Isoyeta del mes de Octubre de la Precipitación Media Mensual en la cuenca del río Cañete</i>	27
<i>Figura N° 3.16. Isoyeta del mes de Noviembre de la Precipitación Media Mensual en la cuenca del río Cañete</i>	28
<i>Figura N° 3.17. Isoyeta del mes de Diciembre de la Precipitación Media Mensual en la cuenca del río Cañete</i>	29
<i>Figura N° 3.18. Isoyeta Anual de la Precipitación Media Mensual en la cuenca del río Cañete</i>	30
<i>Figura N° 3.19. Distribución de la Temperatura Media Mensual de las Estaciones Meteorológicas Ubicadas en la Cuenca del Río Cañete</i>	32
<i>Figura N° 4.1. Estaciones Pluviométricas consideradas para la aplicación del Software HEC-HMS</i>	41
<i>Figura N° 4.2. Isoyetas para un Periodo de Retorno de 2 años en la cuenca del río Cañete</i>	47
<i>Figura N° 4.3. Isoyetas para un Periodo de Retorno de 5 años en la cuenca del río Cañete</i>	48
<i>Figura N° 4.4. Isoyetas para un Periodo de Retorno de 10 años en la cuenca del río Cañete</i>	49
<i>Figura N° 4.5. Isoyetas para un Periodo de Retorno de 25 años en la cuenca del río Cañete</i>	50
<i>Figura N° 4.6. Isoyetas para un Periodo de Retorno de 50 años en la cuenca del río Cañete</i>	51
<i>Figura N° 4.7. Isoyetas para un Periodo de Retorno de 100 años en la cuenca del río Cañete</i>	52
<i>Figura N° 4.8. Subcuenca del río Cañete</i>	54
<i>Figura N° 4.9. Modelo de Cuenca del río Cañete en el Software HEC-HMS</i>	65
<i>Figura N° 4.10. Hidrograma de Avenida del Modelo Precipitación – Escorrentía de la Cuenca del río Cañete, Periodo de Retorno de 2 años</i>	66
<i>Figura N° 4.11. Resultado de la Simulación del Modelo Precipitación – Escorrentía de la Cuenca del río Cañete, Periodo de Retorno de 5 años</i>	66

<i>Figura N° 4.12. Hidrograma de Avenida del Modelo Precipitación – Escorrentía de la Cuenca del río Cañete, Periodo de Retorno de 5 años</i>	67
<i>Figura N° 4.13. Resultado de la Simulación del Modelo Precipitación – Escorrentía de la Cuenca del río Cañete, Periodo de Retorno de 5 años</i>	68
<i>Figura N° 4.14. Hidrograma de Avenida del Modelo Precipitación – Escorrentía de la Cuenca del río Cañete, Periodo de Retorno de 10 años</i>	69
<i>Figura N° 4.15. Resultado de la Simulación del Modelo Precipitación – Escorrentía de la Cuenca del río Cañete, Periodo de Retorno de 10 años</i>	69
<i>Figura N° 4.16. Hidrograma de Avenida del Modelo Precipitación – Escorrentía de la Cuenca del río Cañete, Periodo de Retorno de 25 años</i>	70
<i>Figura N° 4.17. Resultado de la Simulación del Modelo Precipitación – Escorrentía de la Cuenca del río Cañete, Periodo de Retorno de 25 años</i>	71
<i>Figura N° 4.18. Hidrograma de Avenida del Modelo Precipitación – Escorrentía de la Cuenca del río Cañete, Periodo de Retorno de 50 años</i>	72
<i>Figura N° 4.19. Resultado de la Simulación del Modelo Precipitación – Escorrentía de la Cuenca del río Cañete, Periodo de Retorno de 50 años</i>	72
<i>Figura N° 4.20. Hidrograma de Avenida del Modelo Precipitación – Escorrentía de la Cuenca del río Cañete, Periodo de Retorno de 100 años</i>	73
<i>Figura N° 4.21. Resultado de la Simulación del Modelo Precipitación – Escorrentía de la Cuenca del río Cañete, Periodo de Retorno de 100 años</i>	74

HIDROLOGIA DE MAXIMAS AVENIDAS DEL RIO CAÑETE

I. INTRODUCCIÓN

En los dos últimos eventos extraordinarios (Fenómeno del Niño) ocurridos en los años 1983 y 1998, se presentaron lluvias de gran intensidad en la zona de estudio, que trajo como consecuencia la activación de una serie de ríos y quebradas adyacentes al río Cañete, ocasionando severos daños en centros poblados, infraestructura de riego y drenaje, predios agrícolas, así mismo, inundaciones con daños de carácter catastrófico en las zonas de San Vicente de Cañete, Nuevo Imperial, Socsi, Pacarán y Lunahuana.

El Fenómeno del Niño es definido como la presencia de aguas anormalmente más calidas en la costa occidental de Sudamérica por un periodo mayor a 4 meses consecutivos, tiene su origen en el Pacífico Central Ecuatorial. El fenómeno está asociado a las condiciones anormales de la circulación atmosférica en la región Ecuatorial del Pacífico. Considerándose como condiciones anormales cuando el esquema de circulación ecuatorial toma las siguientes tres posibilidades: puede intensificarse, debilitarse o cambiar de orientación.

El presente estudio contiene un diagnóstico del problema, con el objetivo de explicar las causas del evento y orientar las acciones que se han de ejecutar para proveer mayor seguridad a la población, infraestructura de riego, zonas agrícolas, etc. El informe contiene el análisis hidrológico que permite caracterizar en términos técnicos el acontecimiento. Con estos análisis ha sido posible delinear alternativas de soluciones estructurales y medidas no estructurales.

II. ASPECTOS GENERALES

2.1 Ubicación

2.1.1 Ubicación Política

El ámbito de estudio se localiza en la provincia de Cañete y Yauyos del departamento de Lima.

2.1.2 Ubicación Geográfica

La zona de estudio se localiza aproximadamente en las coordenadas UTM 345,250 y 444,750 en Coordenadas Este y 8'543,750 y 8'676,000 en Coordenadas Norte (Zona 18).

2.2 Antecedentes

Como parte del proyecto: “Protección de Valles y Poblaciones Rurales y Vulnerables ante Inundaciones”, se requiere contar con un documento técnico sustentatorio de máximas avenidas del río Cañete, que permita definir las propuestas del planeamiento hidrológico e hidráulico del sistema fluvial del río Cañete.

La ocurrencia de eventos extremos como el Fenómeno del Niño en la costa norte y sur del Perú trae como consecuencia la presencia de lluvias torrenciales, el incremento del caudal de los ríos y la activación de quebradas aportantes al curso principal, tal como los ocurridos en los dos últimos eventos de 1983 y 1998, en que los desbordes del río Cañete, produjeron la inundación de extensas zonas de cultivo y ciudades como San Vicente de Cañete, Nuevo Imperial, Socsi, Pacarán y Lunahuana, ocasionando daños a la agricultura, infraestructura vial, vivienda e infraestructura de riego y drenaje. En la actualidad existen zonas vulnerables en tramos del río que requieren la aplicación de medidas estructurales para mitigar los efectos de avenidas.

Se ha efectuado una evaluación de las avenidas máximas en base a los datos de la estación hidrométrica Socsi. Con los resultados obtenidos, se procederá a dimensionar la caja hidráulica del río en función al periodo de retorno escogido, en zonas específicas y el dimensionamiento de las estructuras de protección.

2.3 Justificación del Proyecto

El río Cañete permite el drenaje de las avenidas producto de las precipitaciones y aportes de los diversos cursos que conforman la cuenca.

Con la aparición de eventos hidrológicos normales, ocasionan ciertos daños en zonas agrícolas, infraestructura de riego y drenaje, caminos de servicio y centros poblados, por dicho motivo, se requiere contar con medidas estructurales que permitan la atenuación de los eventos extremos hasta cierto grado de magnitud.

2.4 Objetivos del Estudio

Determinar los caudales máximos instantáneos del río Cañete para diversos periodos de retorno; que permitan dimensionar adecuadamente la sección hidráulica de encauzamiento de río y diseño de las obras de protección, atenuando los daños por posibles eventos hidrológicos extremos.

III. DESCRIPCION DEL PROYECTO

3.1 Sistema Hidrográfico del río Cañete

3.1.1 Descripción General de la Cuenca

Políticamente, la cuenca del río Cañete forma parte de las provincias de Cañete y Yauyos, pertenecientes al departamento de Lima.

Sus límites son: por el Norte con las Cuencas del río Mantaro, por el Sur con la cuenca del río San Juan (Chincha) y el Océano Pacífico, por el Este con la Cuenca del río Mantaro y por el Oeste con la Cuenca del río Mala y el Océano Pacífico.

Posee un área total de 6,068.5 Km² y sus aguas vierten hacia el Océano Pacífico con un recorrido predominante del curso principal hacia el Suroeste.

El valle de Cañete, área afectada por las inundaciones, está situado en la parte baja de la cuenca entre las latitudes 11°58'19" – 13°18'55" Sur y Longitudes 75°30'26" – 76°30'46" Oeste. Políticamente pertenece a la provincia de Cañete, departamento de Lima.

En la Figura N° 3.1 se muestra la ubicación y el ámbito de la cuenca del río Cañete.

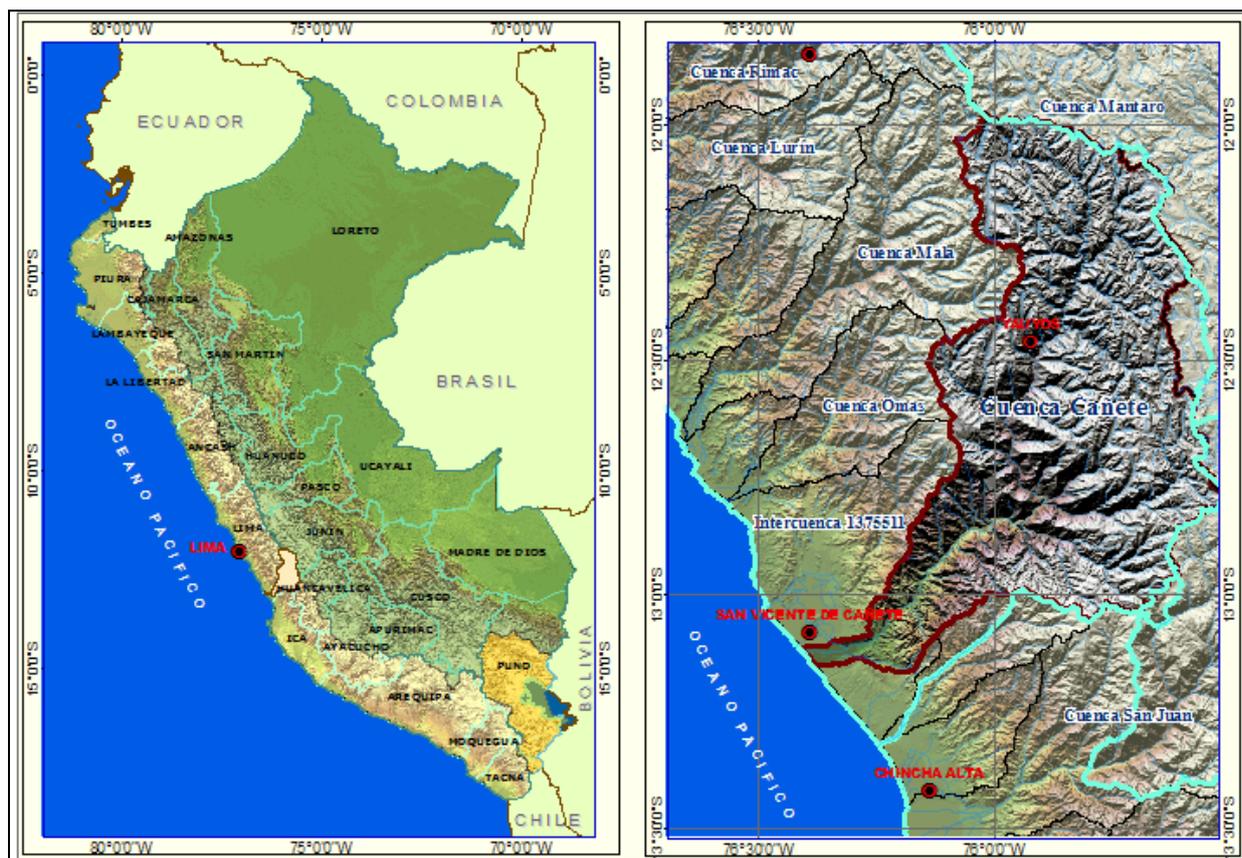


Figura N° 3.1. Mapa de Ubicación de la cuenca del río Cañete

3.1.2 Hidrografía de la Cuenca del Río Cañete

La Cordillera de los Andes divide hidrográficamente al país en dos vertientes principales que drenan sus aguas hacia los Océanos Pacífico y Atlántico, respectivamente, constituyendo así la divisoria continental de las aguas. Existe, también, una tercera vertiente en la región sur-oriental del país, constituida por una alta cuenca interandina cuyas aguas drenan al Lago Titicaca.

La vertiente del Pacífico u Occidental tiene una extensión aproximada de 290,000 Km², equivalente al 22% del área total del país y da origen, como consecuencia de las precipitaciones y del deshielo de los nevados y glaciares en su parte alta, a 52 ríos de cierta importancia que discurren al Océano Pacífico siguiendo una dirección predominante hacia el suroeste. El río Cañete es uno de ellos, encontrándose situado en la región central de esta vertiente.

El río Cañete tiene un régimen intermitente y de carácter torrentoso, sus descargas se presentan en los meses de enero – abril. La descarga máxima mensual aforada ha sido de 900.00 m³/s (Febrero-1972) y la mínima de 5.20

m³/s (Setiembre-1992), con una descarga media anual de 52.16 m³/s equivalente a un volumen medio anual de 1629.36 MMC.

La oferta de agua para el valle de Cañete es regulada, debido al régimen intermitente del río Cañete que presenta las mayores descargas entre los meses de Enero a Abril, durante el resto del año el río disminuye considerablemente. En este periodo, época de estiaje, se descargan las aguas de regulación de las lagunas entre los meses de Agosto a Diciembre.

3.2 Climatología

3.2.1 Precipitación

La precipitación, como parámetro principal de la generación de la escorrentía, es analizada en base a la información disponible de estaciones ubicadas tanto en el interior de la cuenca del río Cañete, como en las cuencas vecinas de Mala, Mantaro y San Juan (Chincha).

Se dispone de información pluviométrica de 13 estaciones hidrométricas ubicadas en la cuenca del río Cañete y en las cuencas vecinas. Estas estaciones son operadas y mantenidas por el Servicio Nacional de Meteorología e Hidrología (SENAMHI).

En el Cuadro N° 3.1, se muestra la relación de las estaciones consideradas en el presente estudio con sus respectivas características de código, nombre y ubicación. Los registros históricos de la precipitación total diaria, precipitación total mensual y sus respectivos histogramas se presentan en el Anexo. En la Figura N° 3.2, se muestra el periodo y la longitud de la información disponible de las estaciones pluviométricas y en la Figura N° 3.3, se muestra su ubicación en la cuenca del río Cañete y en las cuencas vecinas.

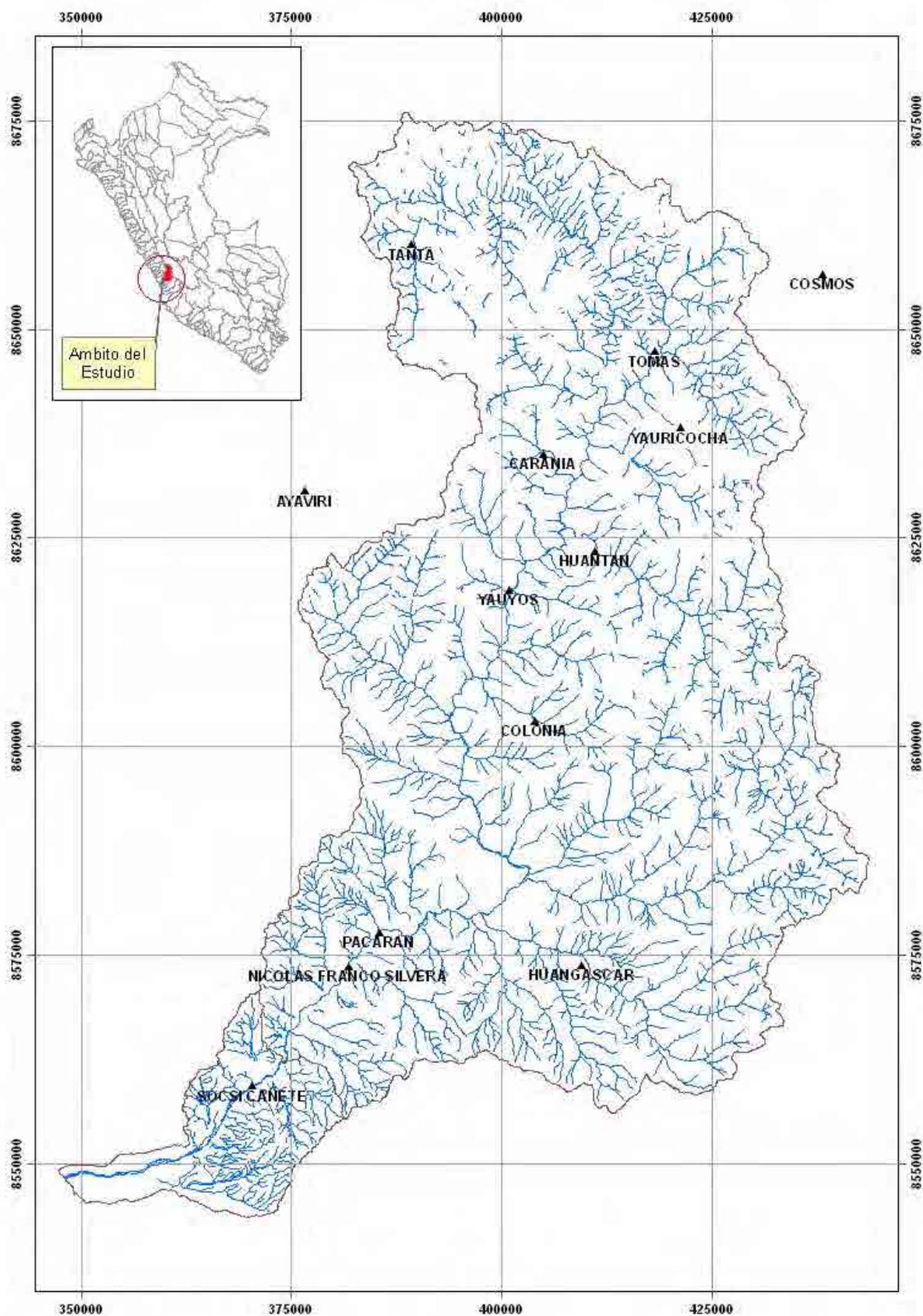


Figura N° 3.3. Ubicación de las Estaciones Pluviométricas en la Cuenca del río Cañete y Cuencas Vecinas

En el Cuadro N° 3.2 se muestra los valores medios mensuales de las estaciones consideradas en el estudio y en la Figura N° 3.4 se muestra la variación media mensual de la precipitación de cada estación; en el Anexo se muestran las series históricas de cada estación, así como también se muestra las graficas de las variaciones mensuales y anuales de cada estación.

Cuadro N° 3.2. Características de las Estaciones Pluviométricas de la cuenca del río Cañete y cuencas vecinas

ESTACION	Mes												Total
	Ene	Feb	Mar	Abr	May	Jun	Jul	Ago	Sep	Oct	Nov	Dic	
YAUYOS	71.36	83.70	83.26	20.35	3.36	0.52	0.15	0.92	3.10	12.94	19.68	44.46	343.80
YAUURICOCHA	178.17	168.19	169.94	92.76	20.76	9.40	10.52	20.85	37.28	88.02	81.24	138.64	1,015.78
TOMAS	128.45	119.02	100.86	67.50	21.93	17.36	11.13	14.36	35.34	44.19	55.36	86.90	702.39
TANTA	151.80	157.83	162.22	91.07	25.07	7.23	5.52	11.23	29.59	60.70	78.74	110.98	891.99
SOCSI CAÑETE	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	1.47	0.00	0.00	0.00	0.00	1.47
PACARAN	4.21	4.70	3.83	0.29	0.10	0.04	0.01	0.07	0.09	0.41	0.41	1.93	16.09
NICOLAS FRANCO SILVERA	1.80	4.57	2.40	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.40	2.33	11.50
HUANTAN	195.68	236.82	196.02	72.60	7.82	1.09	1.77	2.17	2.61	50.73	62.07	98.77	928.15
HUANGASCAR	59.94	72.77	85.06	9.93	0.63	0.20	0.03	0.25	0.43	2.23	6.45	24.95	262.87
COLONIA	84.62	109.69	127.22	27.47	3.15	0.35	0.79	0.56	3.81	15.23	21.41	64.96	459.25
CARANIA	118.12	118.97	126.34	43.37	12.69	3.80	3.19	4.98	11.01	27.60	32.47	79.56	582.10
AYAVIRI	119.80	137.90	151.32	46.06	5.25	0.02	0.28	0.83	1.93	10.36	17.37	56.67	547.80
COSMOS	110.38	99.85	110.09	53.48	24.93	4.10	7.03	13.01	32.87	49.44	52.59	95.53	653.29

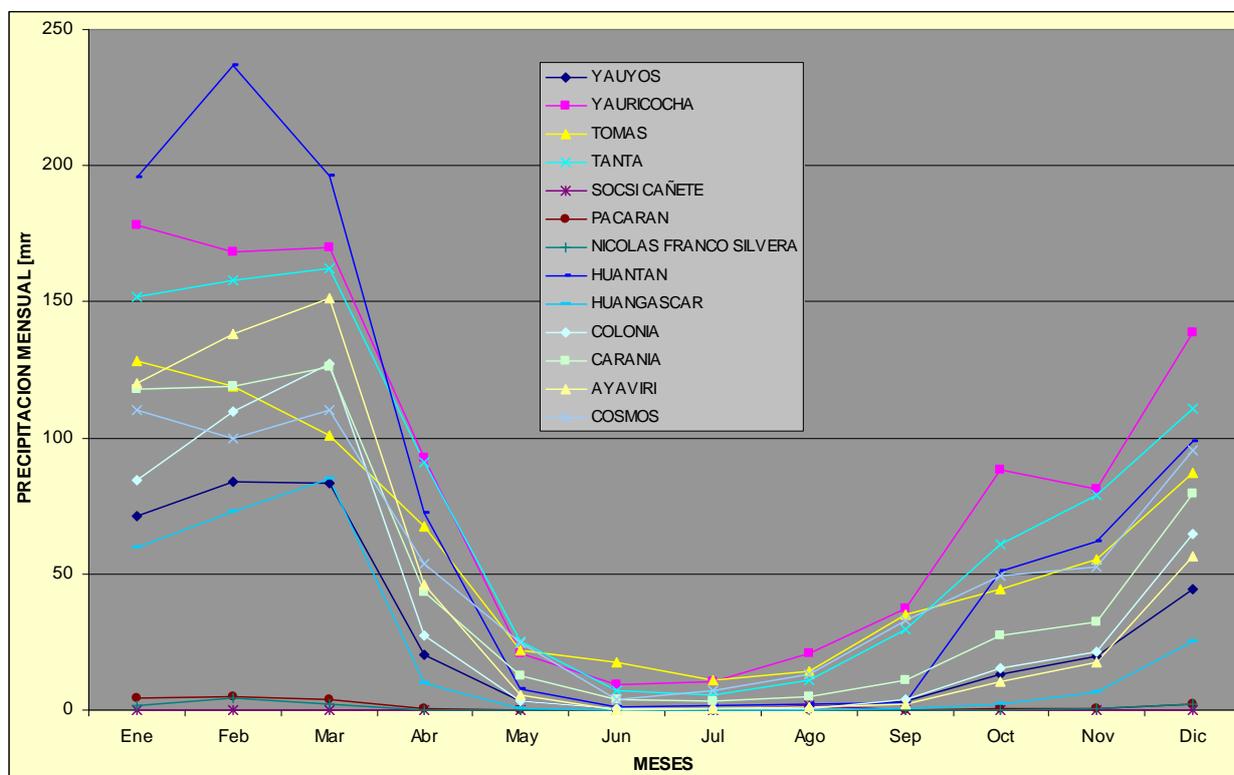


Figura N° 3.4. Histograma Mensual de las Estaciones Pluviométricas consideradas en el Ámbito del Estudio

En el Cuadro N° 3.2 y Figura N° 3.4 observamos que del mes de octubre a abril se presentan las mayores precipitaciones y en los meses de mayo a septiembre

se presentan las menores precipitaciones, así mismo observamos que la precipitación anual en la cuenca del río Cañete varía de 1,016 mm (estación de Yauricocha) a 1.47 mm (estación Socsi).

En la Figura 3.5 se presenta la variación de la precipitación total anual de las estaciones consideradas en el estudio con sus respectivas tendencias.

Tomando en consideración sólo las estaciones Carania y Huangascar que tienen 46 años de registro hasta el año 2009 se estableció una ecuación lineal de tipo $P = mt + b$ en donde P es la precipitación anual y t es el tiempo en años. Las variables m y b son las variables que proporcionan el mejor ajuste en una ecuación lineal. Los resultados se presentan en el cuadro 3.3, arrojando los siguientes valores de tendencia:

Cuadro N° 3.3. Resultados del ajuste lineal de las estaciones de Carania y Huangascar

Estación	m	b	R²
Carania	2.3017	525.70	0.0287
Huangascar	-1.6105	304.75	0.0228

El valor de los coeficientes de regresión R^2 es muy bajo. En el caso de la Estación Carania habría una muy débil tendencia creciente y en la estación Huangascar una muy débil tendencia decreciente. Los valores de R^2 indican que las tendencias no son significativas y se puede afirmar que en las estaciones que cuentan con mayor número de datos no existe una tendencia clara al aumento o disminución de la precipitación.

Con la información mostrada en el Cuadro N° 3.2 y con el apoyo del software ArcGIS se ha generado los mapas de isoyetas mensual (de enero a diciembre) y anual que se muestra en las Figuras N° 3.6 a 3.17 y 3.18 respectivamente.

De las Isoyetas mostradas, observamos que las mayores precipitaciones en la cuenca se presentan en el mes de febrero y marzo y varían de 20 mm a 160 mm; y las menores precipitaciones se presenta en el mes de Julio y varía de 10 mm en la zona alta de la cuenca a 0 mm en la parte baja de la cuenca.

La precipitación total anual en la cuenca del río Cañete varía de 1,000 mm a 200 mm, tal como se puede observar en la Figura N° 3.18.

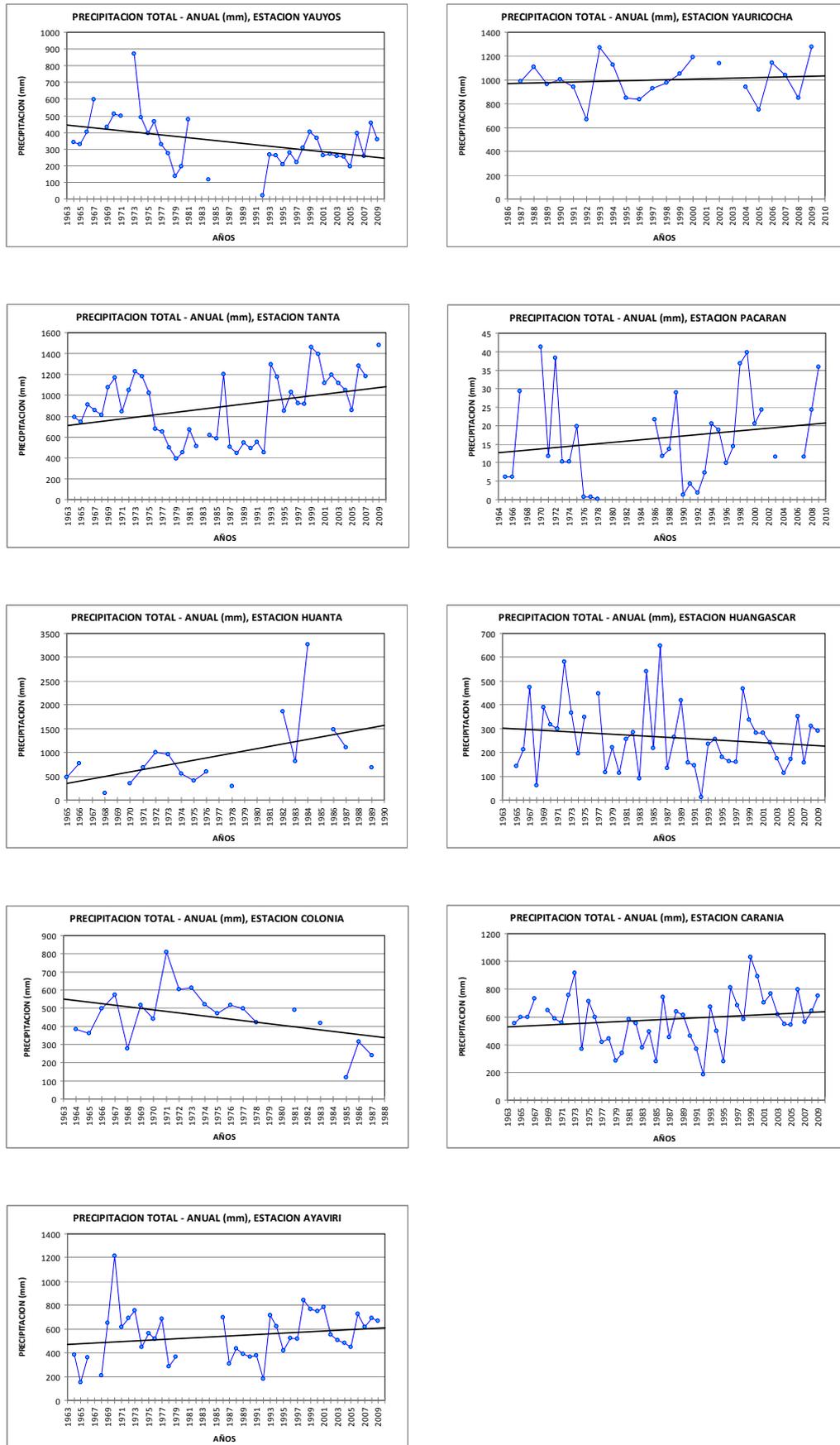


Figura N° 3.5. Tendencia de la Precipitación Anual de las Estaciones Consideradas en el Ámbito del Estudio

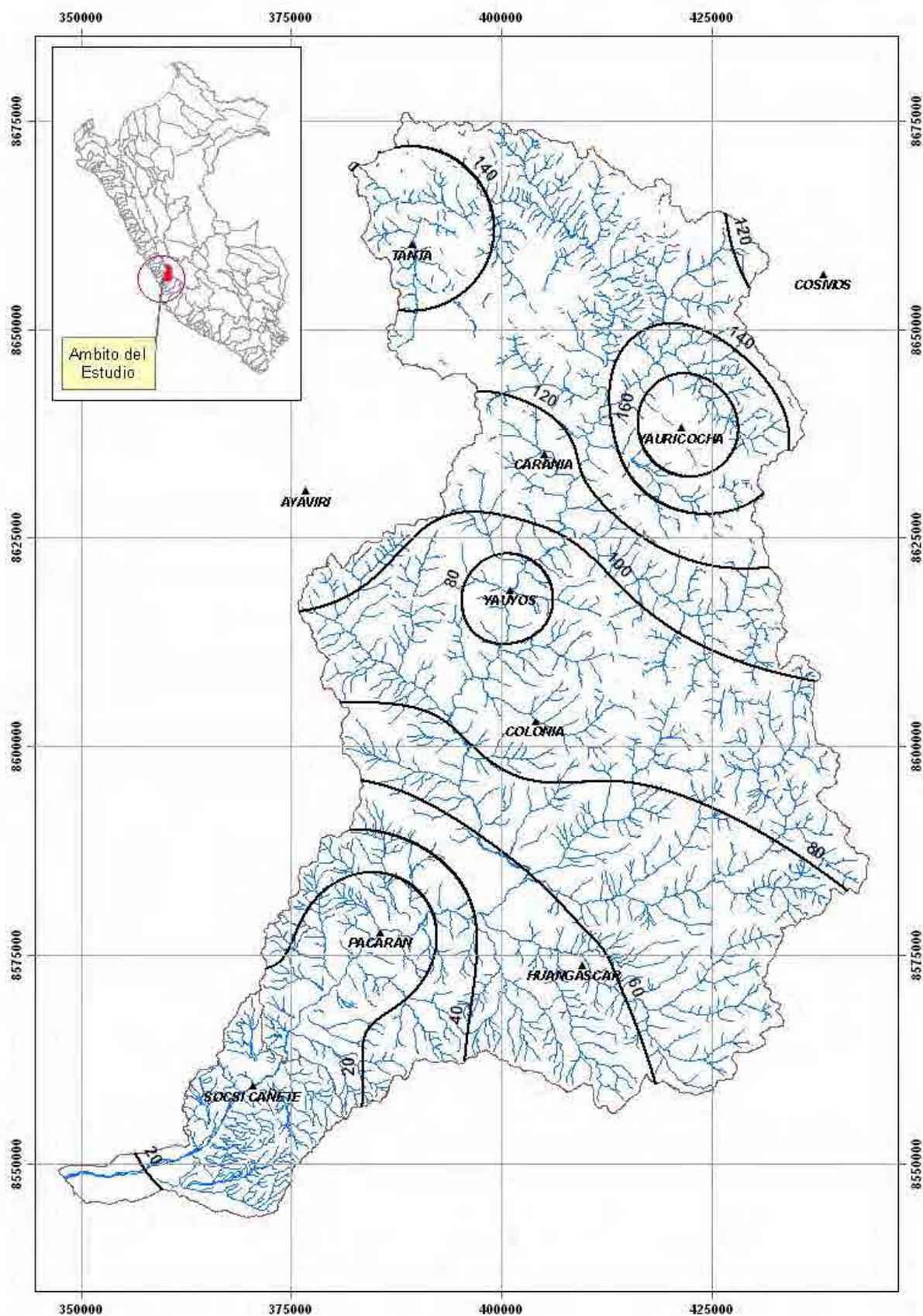


Figura N° 3.6. Isoyeta del mes de Enero de la Precipitación Media Mensual en la cuenca del río Cañete

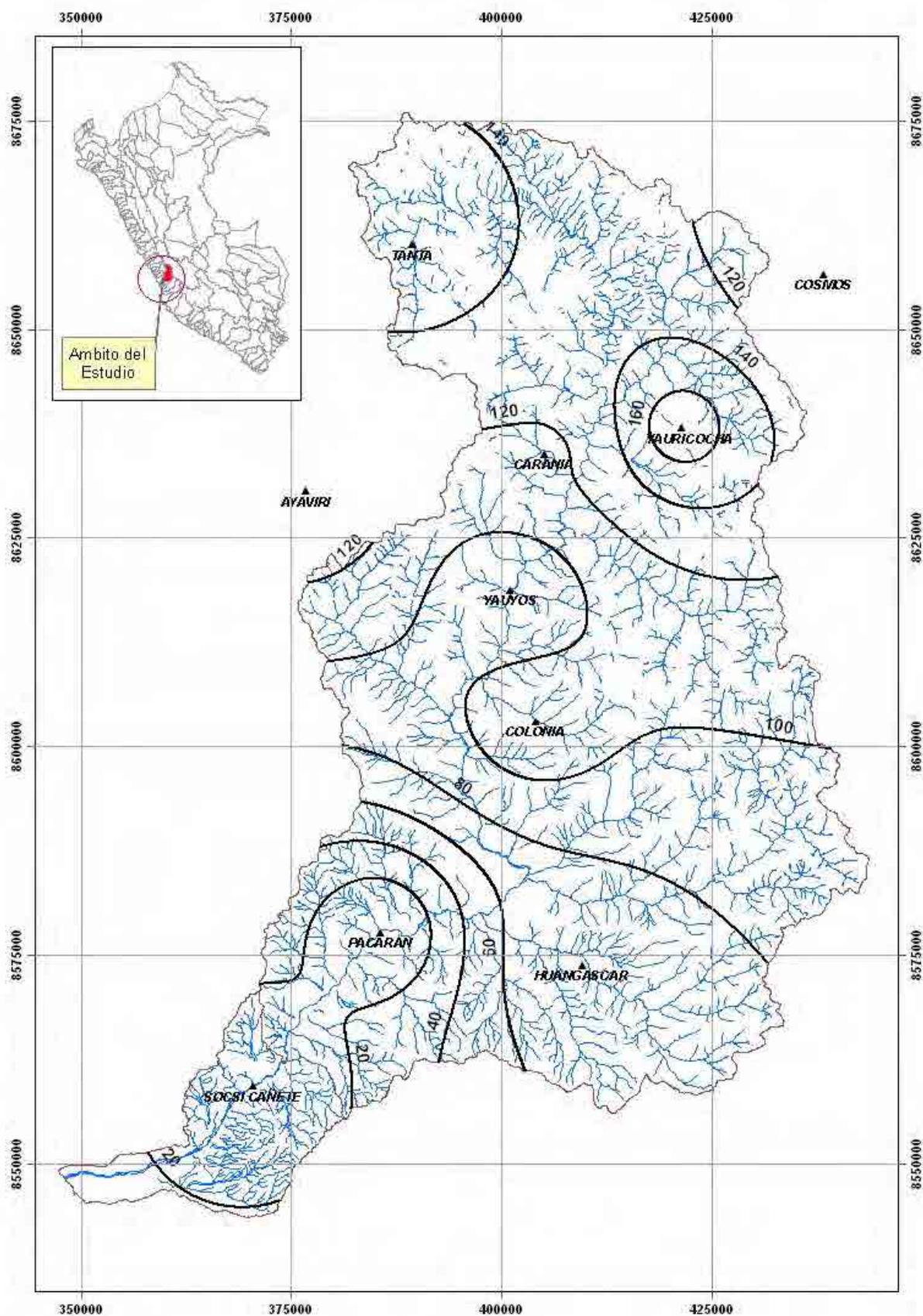


Figura N° 3.7. Isoyeta del mes de Febrero de la Precipitación Media Mensual en la cuenca del río Cañete

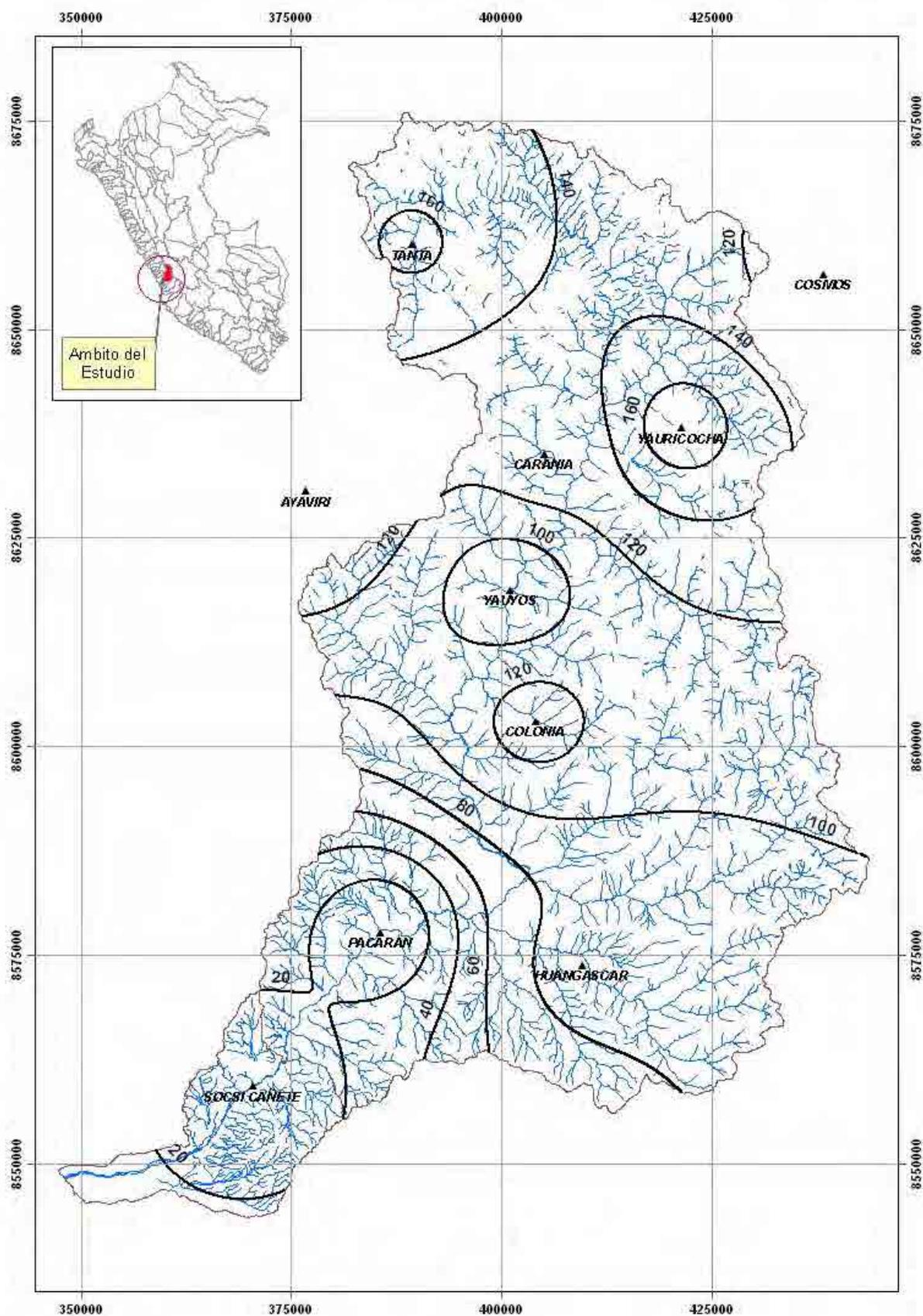


Figura N° 3.8. Isoyeta del mes de Marzo de la Precipitación Media Mensual en la cuenca del río Cañete

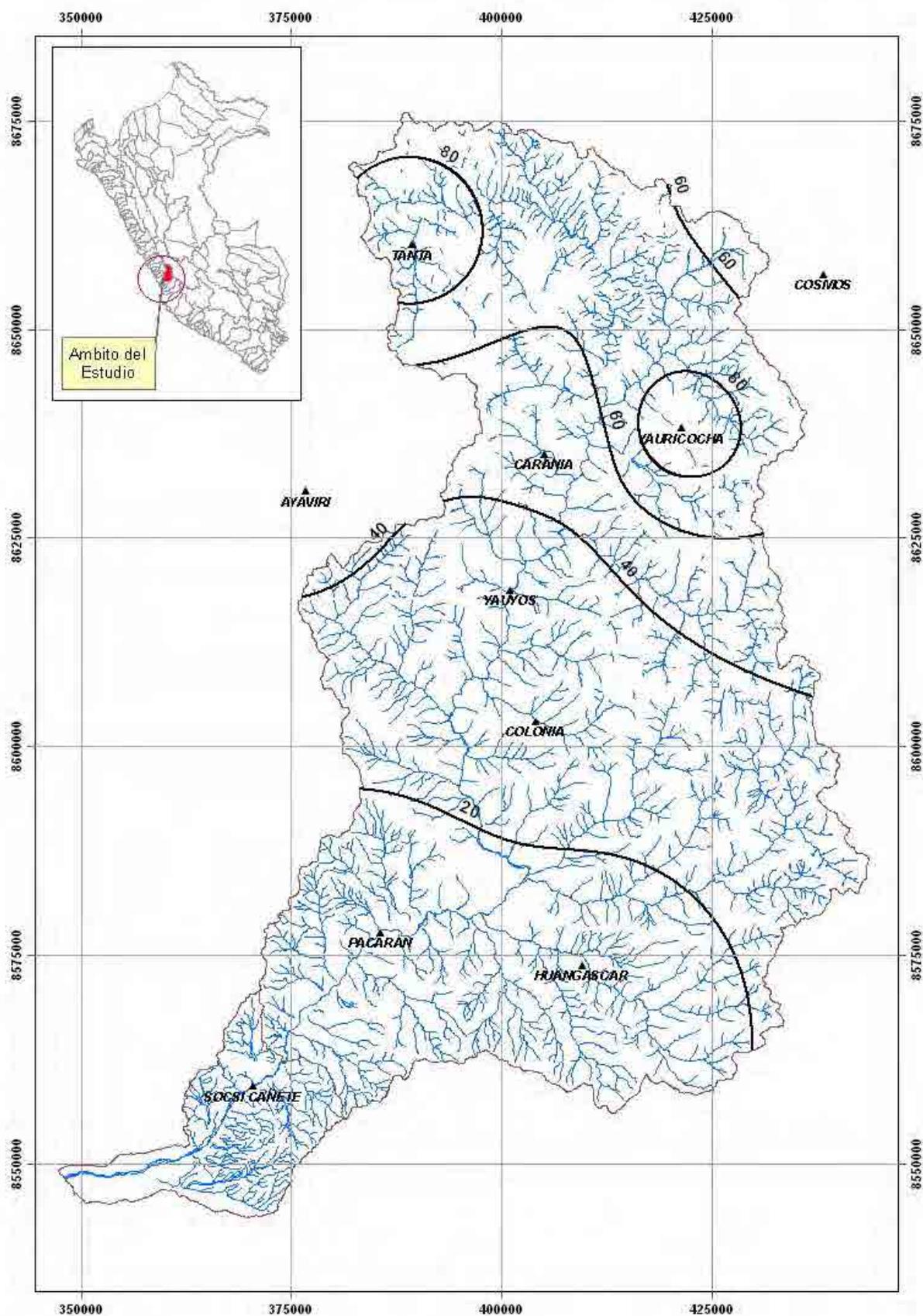


Figura N° 3.9. Isoyeta del mes de Abril de la Precipitación Media Mensual en la cuenca del río Cañete

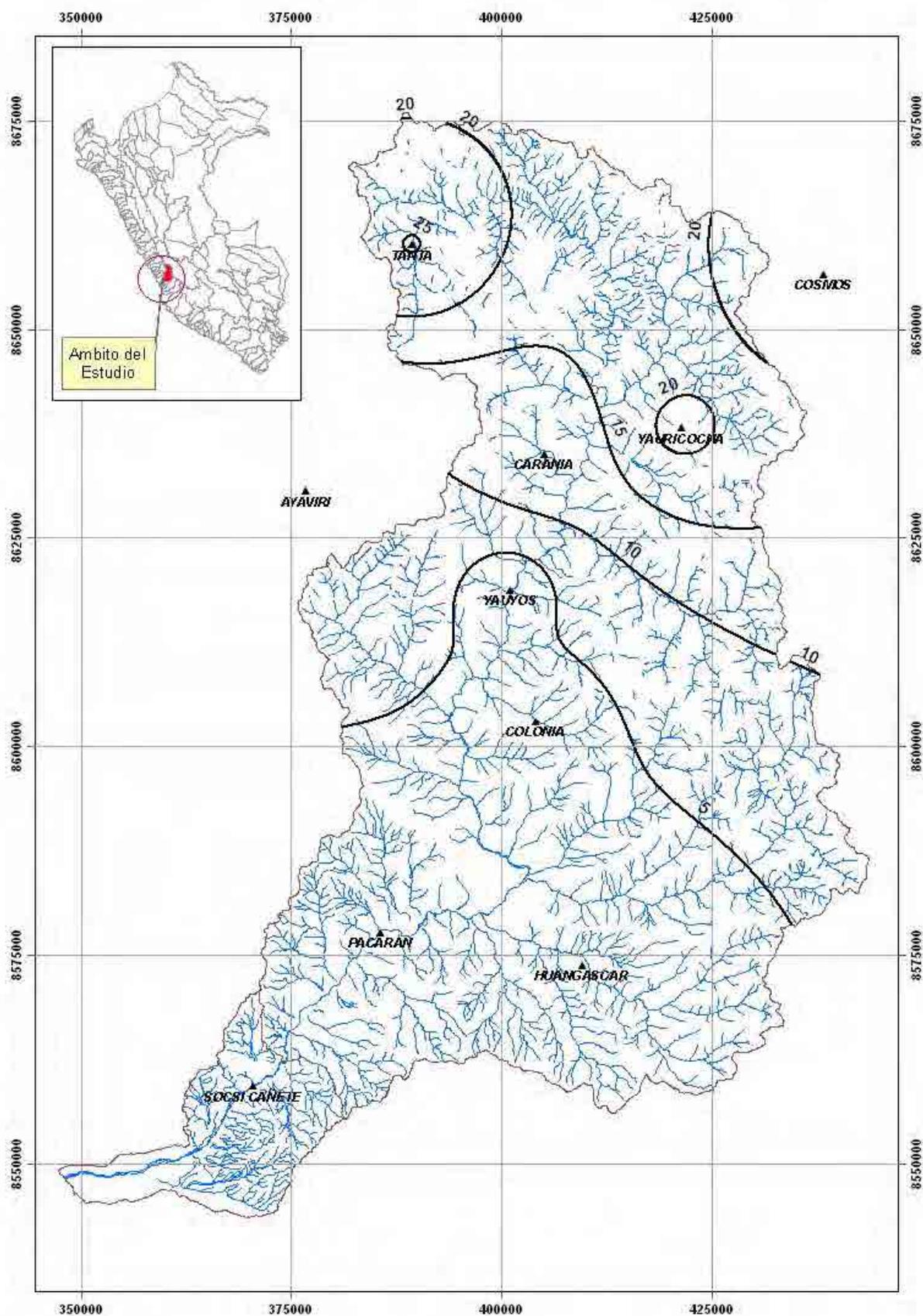


Figura N° 3.10. Isoyeta del mes de Mayo de la Precipitación Media Mensual en la cuenca del río Cañete

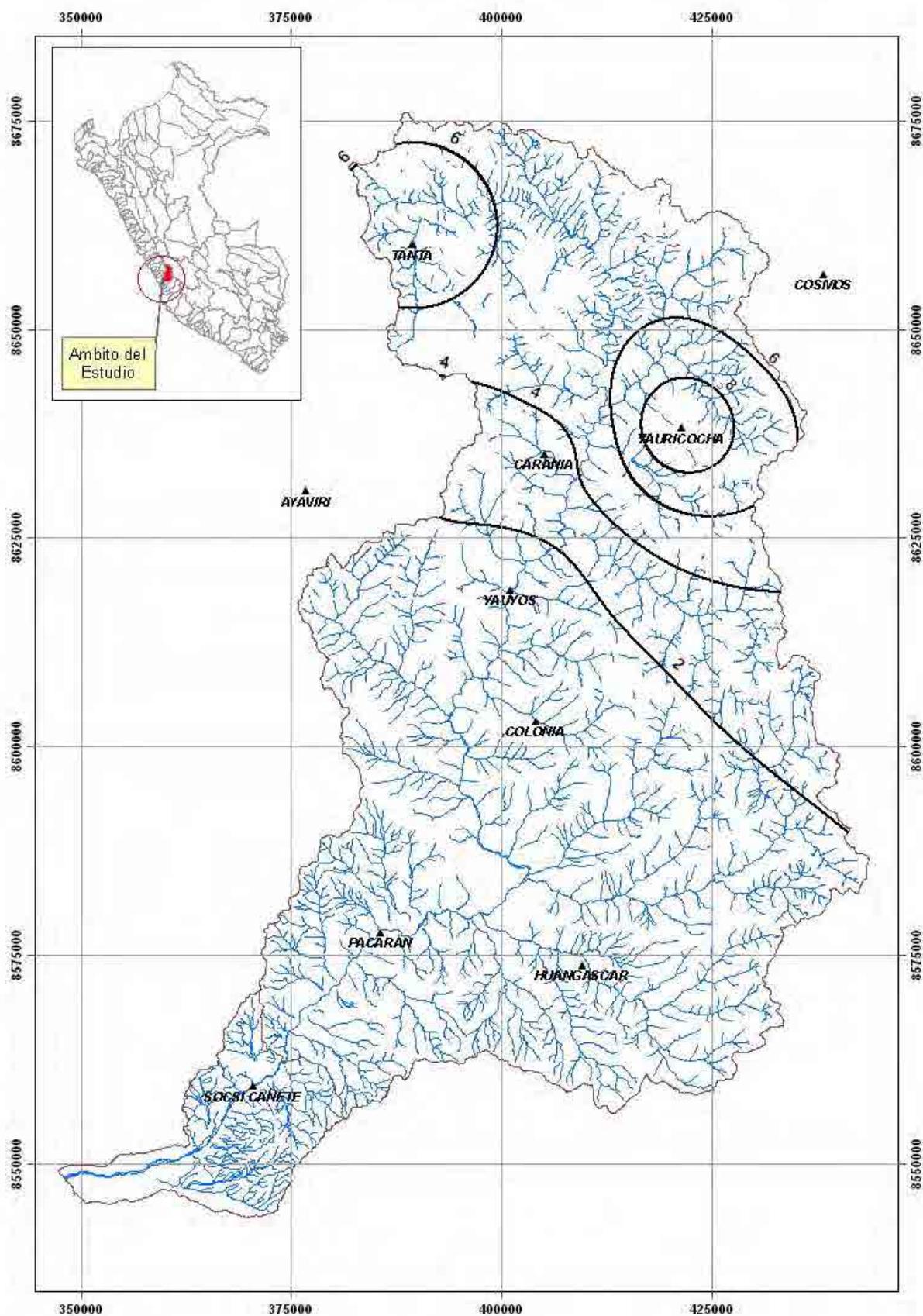


Figura N° 3.11. Isoyeta del mes de Junio de la Precipitación Media Mensual en la cuenca del río Cañete

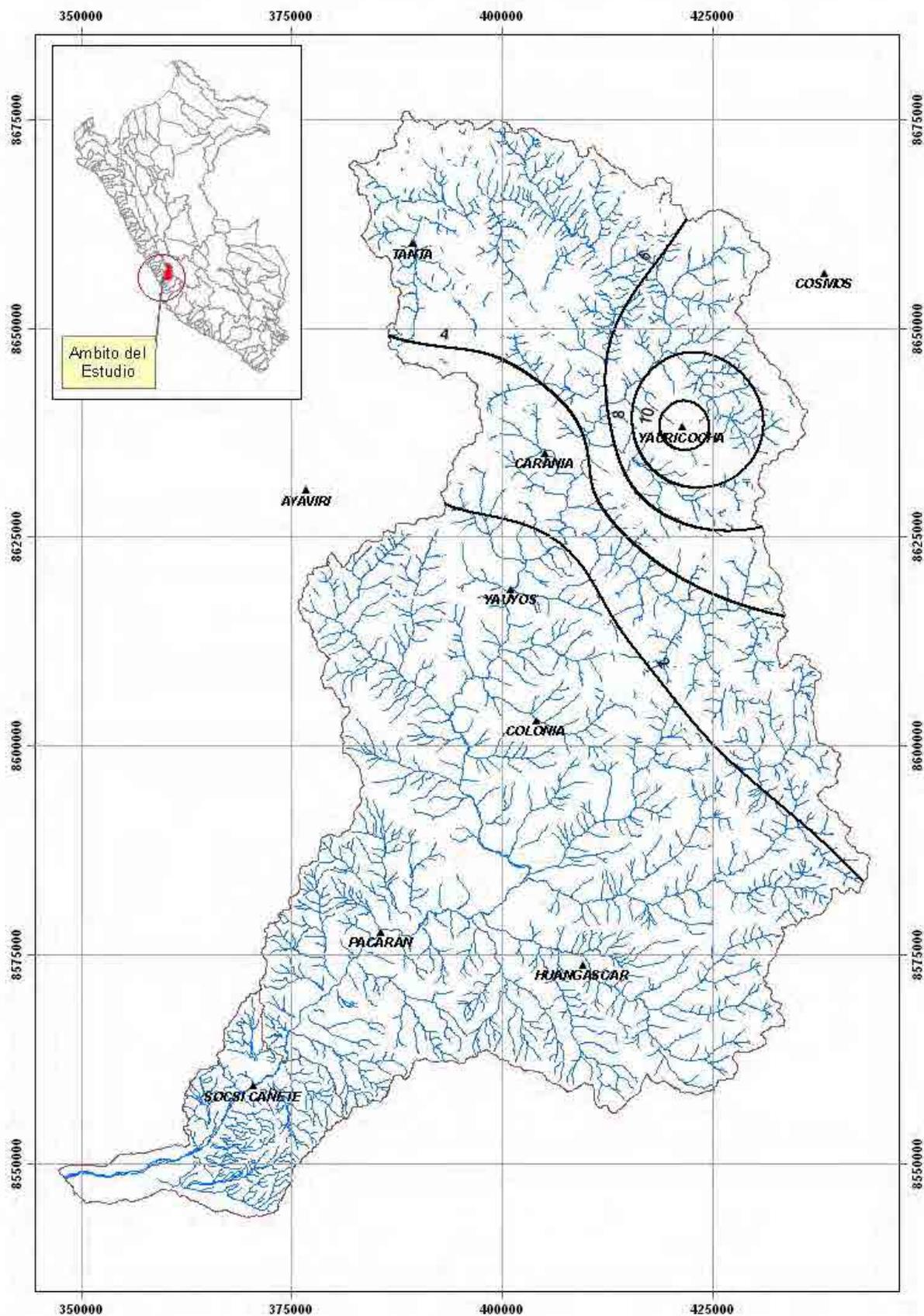


Figura N° 3.12. Isoyeta del mes de Julio de la Precipitación Media Mensual en la cuenca del río Cañete

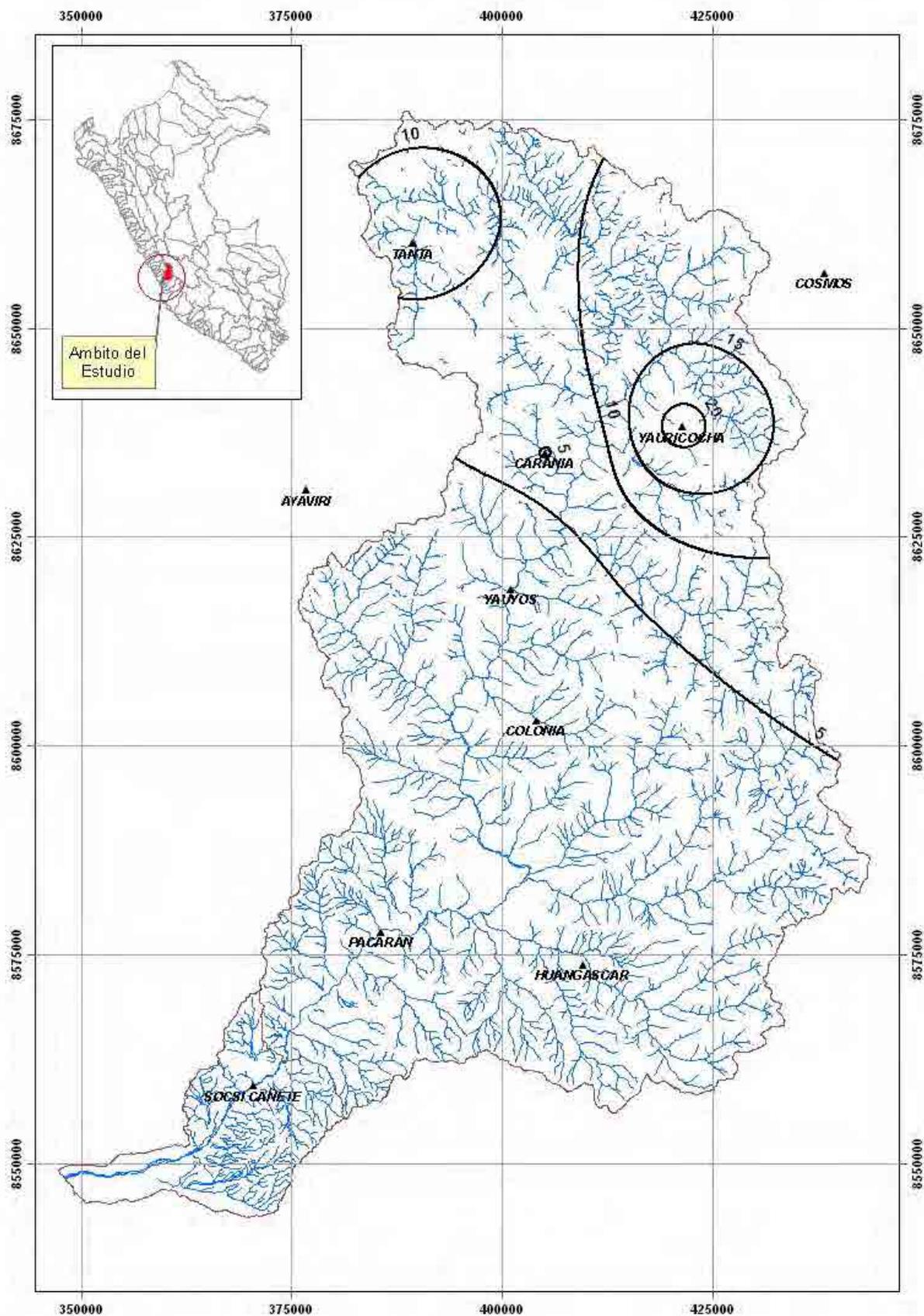


Figura N° 3.13. Isoyeta del mes de Agosto de la Precipitación Media Mensual en la cuenca del río Cañete

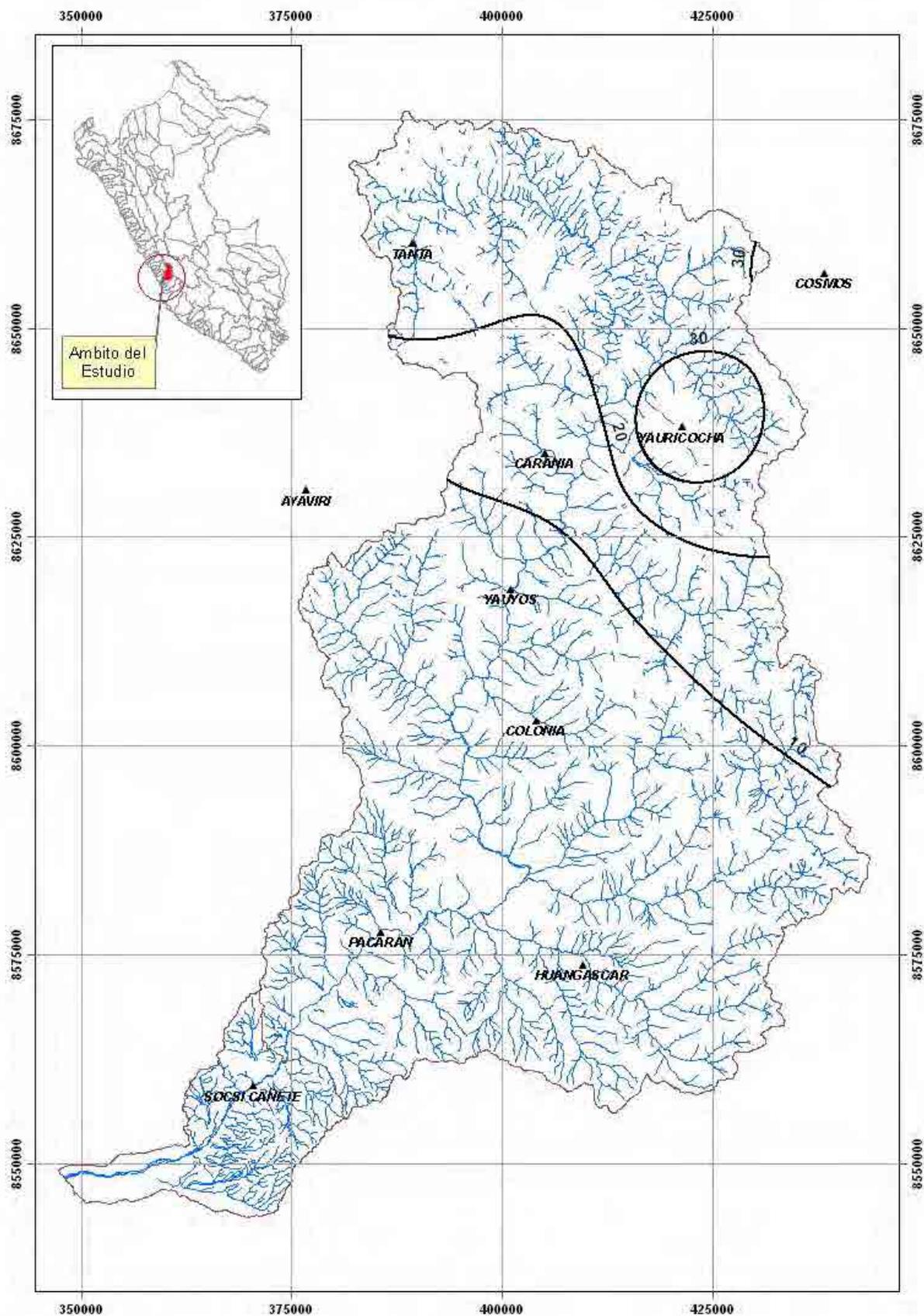


Figura N° 3.14. Isoyeta del mes de Septiembre de la Precipitación Media Mensual en la cuenca del río Cañete

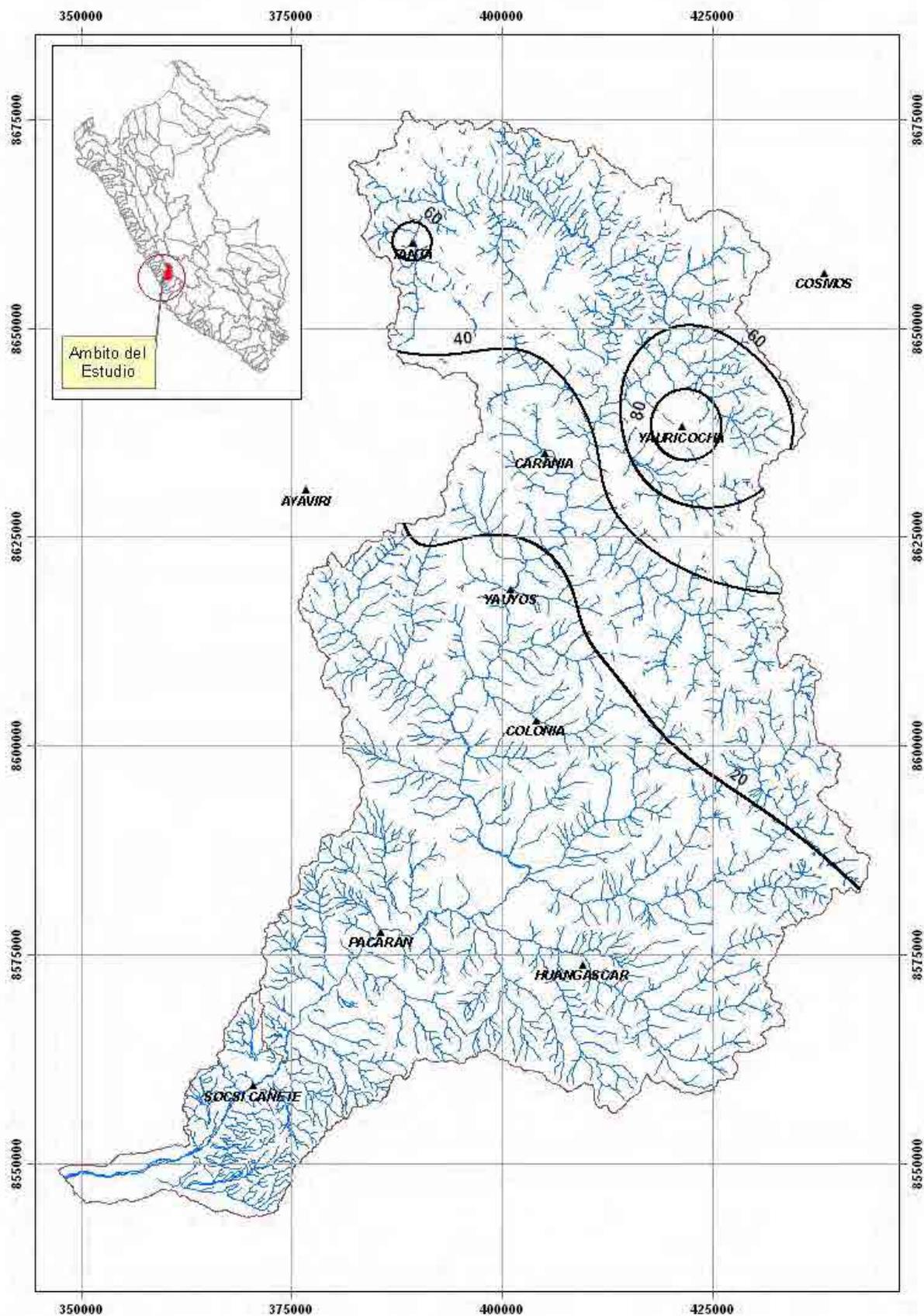


Figura N° 3.15. Isoyeta del mes de Octubre de la Precipitación Media Mensual en la cuenca del río Cañete

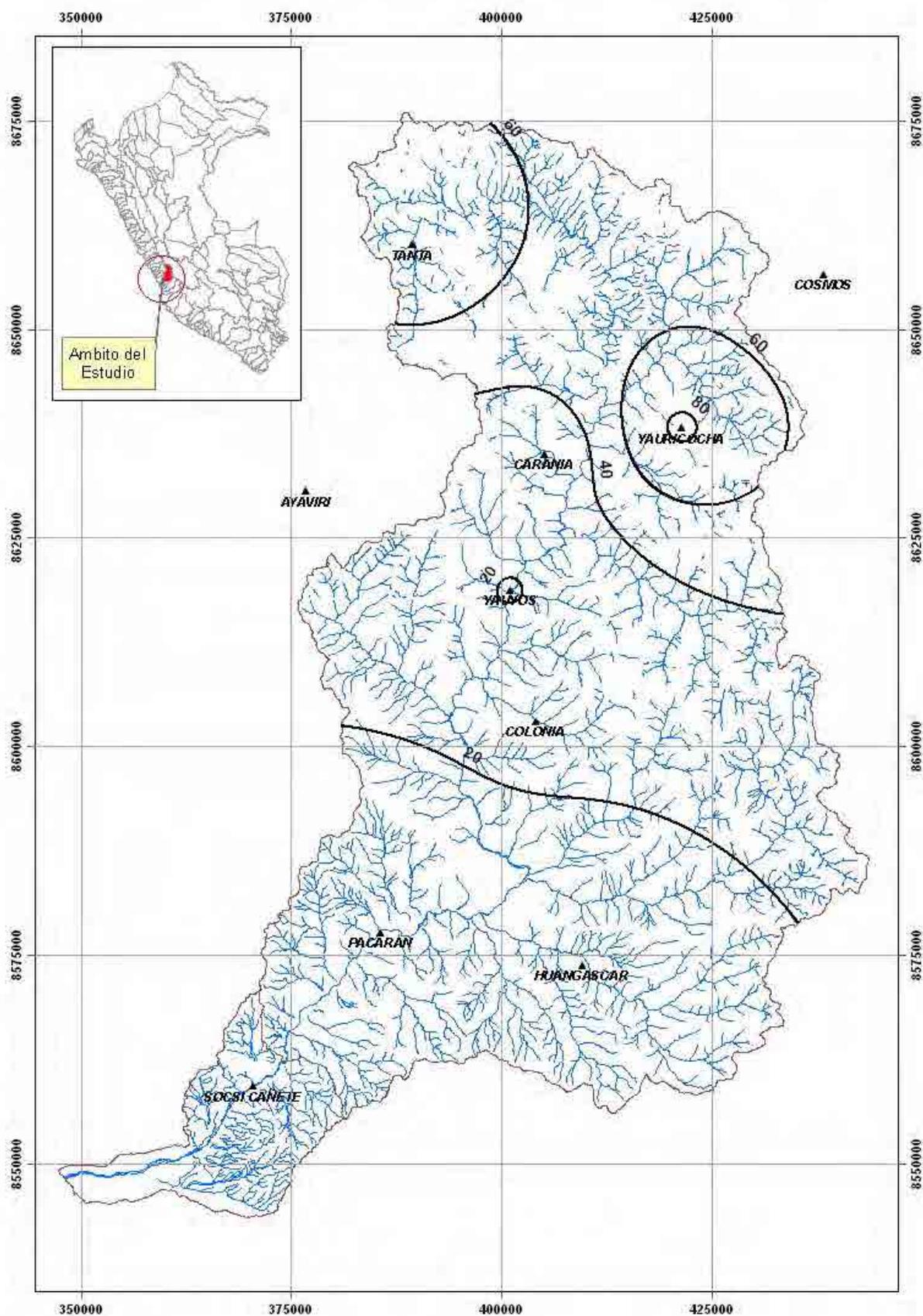


Figura N° 3.16. Isoyeta del mes de Noviembre de la Precipitación Media Mensual en la cuenca del río Cañete

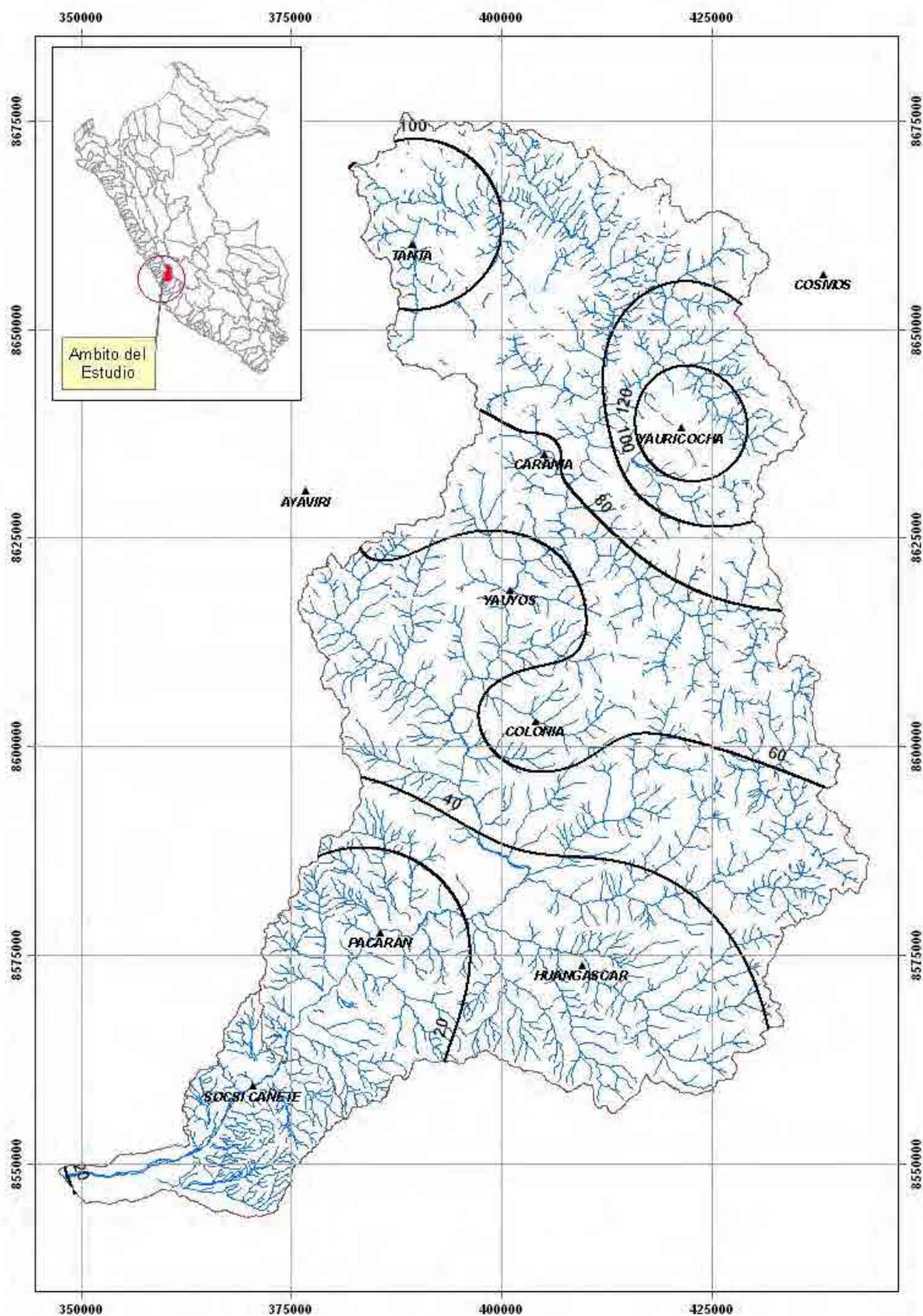


Figura N° 3.17. Isoyeta del mes de Diciembre de la Precipitación Media Mensual en la cuenca del río Cañete

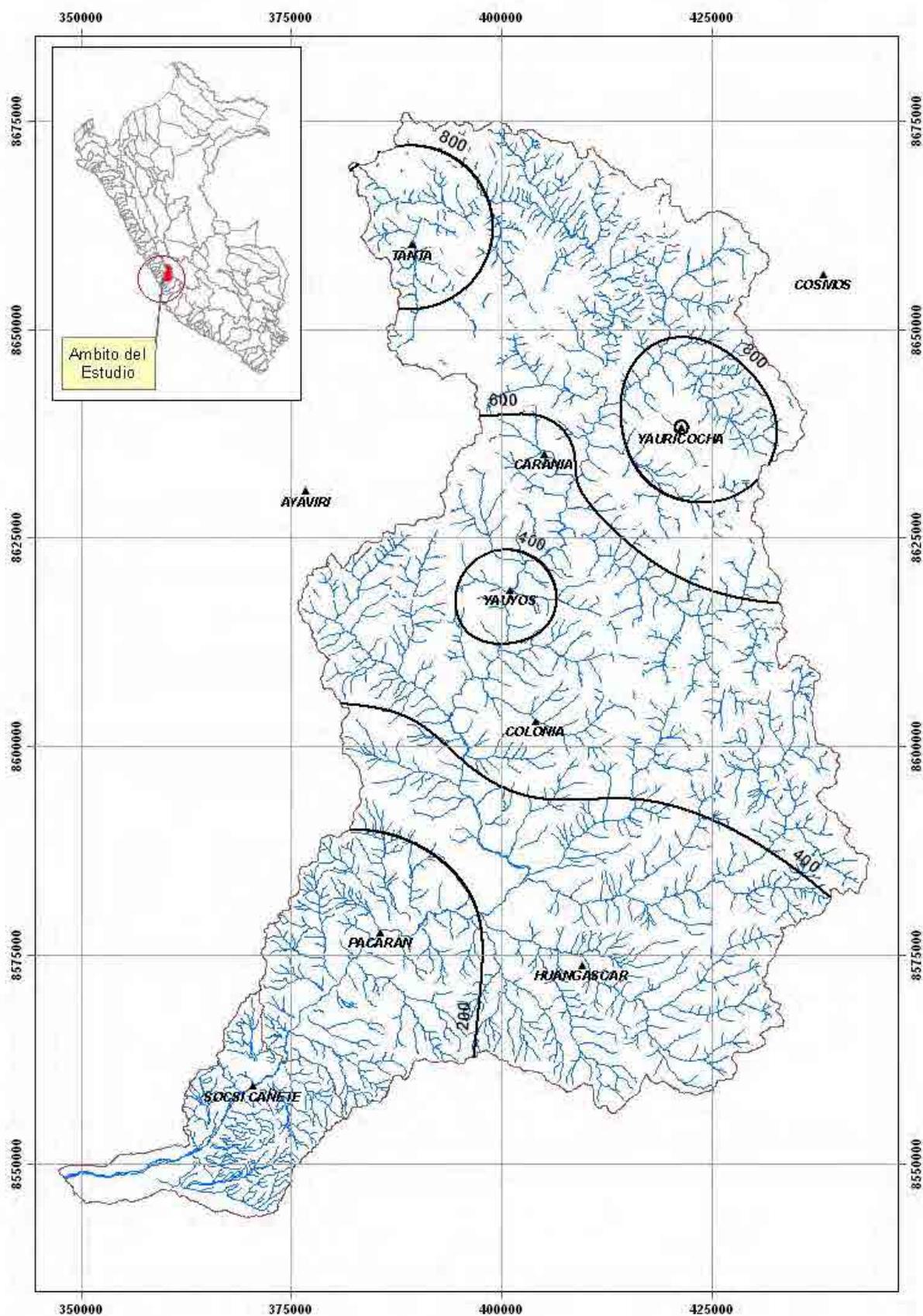


Figura N° 3.18. Isoyeta Anual de la Precipitación Media Mensual en la cuenca del río Cañete

3.2.2 Temperatura

La temperatura del aire y sus variaciones diarias y estacionales son muy importantes para el desarrollo de las plantas, constituyendo uno de los factores primordiales que influyen directamente en la velocidad de su crecimiento, longitud de su ciclo vegetativo y en las fases de desarrollo de plantas perennes.

En el ámbito de la cuenca del río Cañete, esta variable climática es registrada por tres estaciones meteorológicas, la estación Cañete, Pacarán y Yauyos, las que se resumen en el Cuadro N°3.4, en donde se muestra los valores medios históricos de la temperatura media mensual de dichas estaciones.

Como se observa en el Cuadro N° 3.4 y Figura N° 3.19, no existe gran variabilidad en los valores dados por las estaciones de Pacarán y Cañete, teniendo ambos un promedio mensual anual de 20.7 y 20.0 °C. La estación de Yauyos ubicada a una altitud de 2290 m.s.n.m., registra un menor promedio mensual anual de 17.6°C.

Como se aprecia la distribución anual de la Temperatura media mensual es análoga para las estaciones de Pacarán y Cañete, con temperaturas máximas en los meses de enero a abril, mientras que esta distribución a una mayor altitud, controlada por la estación Yauyos, muestra un comportamiento inverso, es decir mayores valores de la temperatura en los meses de septiembre a noviembre.

En el valle de Cañete la temperatura máxima promedio mensual se presenta en los meses de enero a abril, y es del orden de los 28°C. La temperatura mínima promedio mensual generalmente ocurre en los meses de julio a setiembre, con valores que promedian los 14°C. Los valores extremos históricos que se han presentado tanto para la máxima como para la mínima temperatura son de 33°C (febrero) y 11.6 °C (septiembre) respectivamente.

En la Figura N° 3.19, se muestra la distribución de la Temperatura Media Mensual de las estaciones meteorológicas ubicadas en la cuenca del río Cañete.

Cuadro N° 3.4. Temperatura Media Mensual [°C] de las estaciones de la cuenca del río Cañete y cuencas vecinas

ESTACION : YAUYOS													ALTITUD : 2,290 msnm	
Año	Ene	Feb	Mar	Abr	May	Jun	Jul	Ago	Set	Oct	Nov	Dic	MEDIA	
Máx	18.6	18.9	18.3	18.7	18.6	17.9	18.7	18.3	17.9	18.6	18.8	18.8	18.2	
Min	15.6	16.5	16.6	16.9	17.1	16.6	16.9	17.5	17.3	17.1	17.1	17.3	17.1	
Prom.Mes	17.1	17.4	17.5	17.5	17.7	17.1	17.5	17.8	17.7	18.1	17.9	17.8	17.6	

ESTACION : PACARAN													ALTITUD : 700 msnm	
Año	Ene	Feb	Mar	Abr	May	Jun	Jul	Ago	Set	Oct	Nov	Dic	MEDIA	
Máx	24.2	25.0	25.0	23.8	20.9	19.5	19.2	19.0	20.0	20.5	20.9	22.8	21.2	
Min	21.8	22.9	23.2	22.2	19.9	16.5	16.0	17.0	18.6	19.5	19.7	21.5	20.2	
Prom.Mes	22.8	23.7	23.9	22.9	20.3	17.9	17.3	17.6	19.1	20.0	20.5	22.0	20.7	

ESTACION : CAÑETE													ALTITUD : 150 msnm	
Año	Ene	Feb	Mar	Abr	May	Jun	Jul	Ago	Set	Oct	Nov	Dic	MEDIA	
Máx	23.4	24.1	24.0	22.8	21.9	22.1	21.4	21.0	21.0	20.7	22.0	24.7	22.3	
Min	22.6	23.6	23.4	21.2	18.4	15.8	15.6	16.2	16.6	17.6	18.3	21.1	19.2	
Prom.Mes	23.4	24.1	24.1	22.4	18.0	17.0	16.7	16.7	17.3	18.3	19.8	21.8	20.0	

Fuente: Evaluación y Ordenamiento de los Recursos Hídricos de la Cuenca del Río Cañete. IRH-INRENA-MINAG, 2003

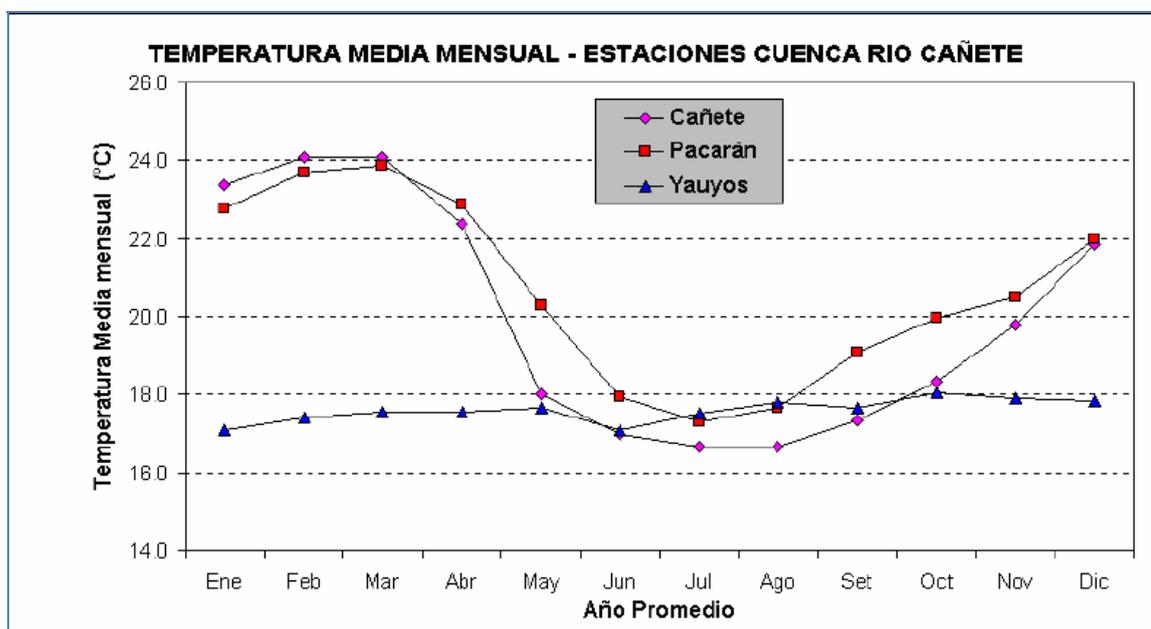


Figura N° 3.19. Distribución de la Temperatura Media Mensual de las Estaciones Meteorológicas Ubicadas en la Cuenca del Río Cañete

Fuente: Evaluación y Ordenamiento de los Recursos Hídricos de la Cuenca del Río Cañete. IRH-INRENA-MINAG, 2003

3.3 Hidrometría

Existen 04 estaciones hidrométricas ubicadas a lo largo de la cuenca del río Cañete y sus cuencas vecinas. Estas estaciones son operadas por el Servicio Nacional de Meteorología e Hidrología (SENAMHI).

En la Tabla No. 3.5 se muestra la lista de estaciones incluidas en el presente estudio indicándose sus principales características tales como código, nombre y

ubicación. En el Anexo se presentan los registros históricos de lluvia total mensual y los histogramas correspondientes.

Tabla N° 3.5. Principales Características de las Estaciones Hidrométricas en la Cuenca del río Cañete y cuencas vecinas.

CODIGO	NOMBRE DE LA ESTACION	CATEGORIA	CUENCA	DEPARTAMENTO	PROVINCIA	DISTRITO	LONGITUD	LATITUD	ALTITUD (msnm)	CONDICION	Periodo de Operación	
											INICIO	FIN
203301	TOMA IMPERIAL	HLM	CAÑETE	LIMA	CAÑETE	LUNAHUANA	76° 13'1	13° 00'1	918	Cerrada	1926-01	1971-02
203302	SOCSI	HLM	CAÑETE	LIMA	CAÑETE	LUNAHUANA	76° 11'41.3	13° 01'42.9	312	Operativa	1965-01	1994-08
203303	PACARAN	HLM	CAÑETE	LIMA	CAÑETE	PACARAN	76° 03'17	12° 51'58	694	Operativa	No Disponible	
203305	CATAPALLA	HLG	CAÑETE	LIMA	CAÑETE	LUNAHUANA	76° 06'34.7	12° 55'27.3	575	Cerrada	No Disponible	

HLM = Estación Hidrométrica con mira limnométrica. Se mide la altura de agua manualmente (06:00, 10:00, 14:00 y 1800 horas) para calcular caudales diarios.
 HLG = Estación Hidrométrica con limnómetro y limnógrafo mecánico. Se mide la altura de agua en las horas de observación (06:00, 10:00, 14:00 y 1800 horas). Se registran además de manera continua (horaria) los niveles de agua en papel.

En la Figura No 3.20 se muestra el periodo y longitud de la data disponible en las estaciones hidrométricas. En la Figura No. 3.21 se muestra su ubicación en el ámbito de la cuenca del río Cañete y cuencas vecinas.

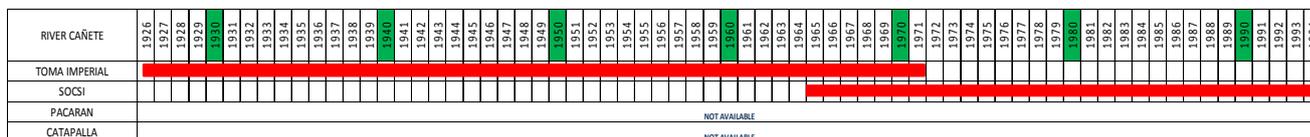


Figura N° 3.20. Periodo y longitud de información disponible en las Estaciones Hidrométricas

Se empleará la información de la estación hidrométrica Sosci para la calibración del modelo hidrológico que será descrito en el ítem 4.2.4. Esta estación se ubica aguas abajo de la “porción húmeda” de la cuenca, por lo tanto los flujos registrados por esta estación son prácticamente los mismos que descargan hacia el Océano Pacífico.

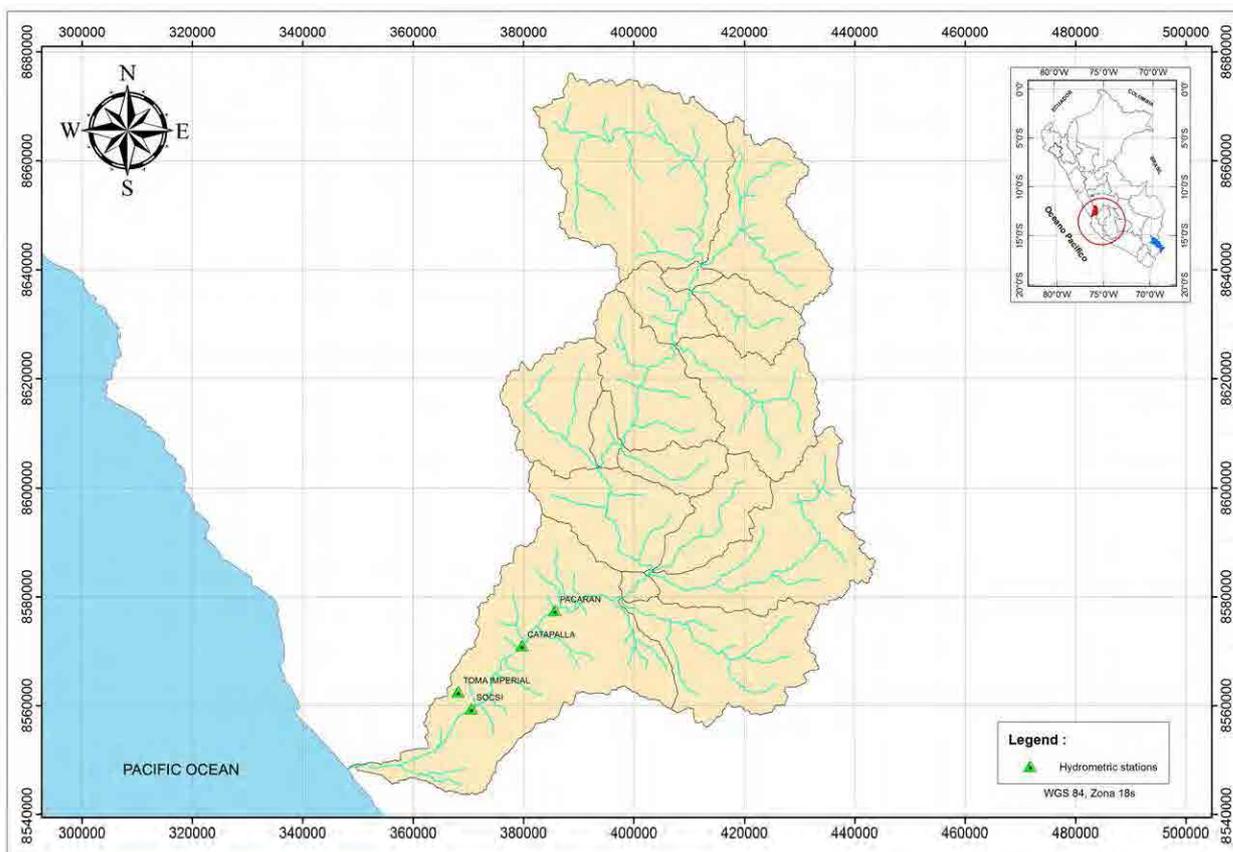


Figura Nº 3.21. Ubicación de la estación hidrométrica Sosci en la Cuenca del Río Cañete

3.4 Comentarios sobre la red de estaciones hidrológicas e hidrométricas de la Cuenca del Río Cañete.

3.4.1 Sobre las Estaciones Pluviométricas

Como se mencionó previamente la información pluviométrica empleada en el análisis fue proporcionada por el SENAMHI. De las 13 estaciones, 08 estaciones tienen información hasta el año 2010, 01 estación tiene información hasta el año 2007, 01 estación tiene información hasta el año 1990 y 03 estaciones tienen información hasta el año 1998.

Las estaciones con información anterior al año 2007 ya no están operativas, se presume que las estaciones restantes están actualmente operativas. Si bien

podría pensarse que la información correspondiente a estaciones que tienen información anterior a 1991 corresponde a información desfasada y no representativa, esta información ha sido utilizada debido a que la longitud de sus registros superan los 12 años y se ha considerado que aún pueden ser utilizadas para análisis estadísticos. De las 13 estaciones, 10 fueron utilizadas para los análisis de descargas pico, las estaciones restantes no fueron utilizadas debido a su corto periodo de información y a la baja calidad de su información.

Las mediciones de lluvia se realizan empleando pluviómetros manuales, estos dispositivos acumulan la lluvia durante cierto periodo de tiempo luego del cual la lluvia acumulada es medida manualmente. En algunos casos, las lecturas se realizan una vez al día (a las 7 am); en otros casos, dos veces al día (a las 7 am y a las 7 pm), no se conoce el intervalo exacto de tiempo de las mediciones efectuadas en las estaciones usadas en el presente estudio.

3.4.2 Sobre las Estaciones Hidrométricas

Si bien las estaciones hidrométricas fueron operadas y mantenidas por SENAMHI, la información hidrométrica empleada en los análisis fue proporcionada por la Dirección General de Infraestructura Hidráulica (DGIH) del Ministerio de Agricultura.

De las 04 estaciones hidrométricas, 01 estación tiene información hasta el año 1994 y 01 estación tiene información hasta el año 1971, la información de las dos estaciones restantes no estuvo disponible.

Para los fines del presente estudio se empleó la información de la estación Sosci. En esta estación los niveles de agua se midieron leyendo el nivel en una regla graduada, las lecturas fueron transferidas a una libreta y las descargas fueron determinadas empleando una ecuación del tipo:

$$Q = aH^b$$

Donde Q es la descarga en m³/s y H es la lectura en metros. Este tipo de estaciones no registran las descargas máximas instantáneas debido a que las lecturas no son continuas ni automáticas sino manuales. Se toma cuatro lecturas al día. Estas lecturas se realizan a las 6 am, 10 am, 14 pm y 18 pm. La mayor de estas lecturas es llamada máxima descarga diaria, sin embargo este valor no es la máxima descarga instantánea diaria.

3.4.3 Recomendaciones

Desde un punto de vista técnico se pueden dar las siguientes recomendaciones:
Sobre el Equipo:

- A fin de tomar en cuenta las variaciones climáticas a lo largo de la cuenca debido a efectos orográficos, se debe incrementar el número de estaciones climatológicas e hidrométricas.
- A fin de registrar los valores máximos instantáneos de lluvia y descargas, se debe automatizar la estaciones climatológicas e hidrométricas existentes.
- Se debe modernizar el equipo limnigráfico de las estaciones hidrométricas pasando de las bandas de papel convencional a las bandas de tipo digital.
- Sería deseable que la información recolectada este disponible en tiempo real.
- Se recomienda estudiar la posibilidad de establecer sistemas de alerta temprana basados en la mejora y el incremento de las estaciones hidrométricas y pluviométricas existentes.
- Para la realización de estudios complementarios se recomienda adquirir:
 - Equipo de muestreo de sedimentos.
 - Equipo para la medición de parámetros físicos de calidad de agua (pH, OD, turbidez y temperatura).
- Establecimiento de Bench Mark (BM) para estaciones climatológicas e hidrométricas usando GPS diferenciales. Esta información será útil para reponer la estación en caso de destrucción por vandalismo o desastres naturales.

Sobre la Operación y Mantenimiento del Equipo

- Las estaciones climatológicas e hidrométricas en el área de estudio deben ser inspeccionadas frecuentemente.
- El mantenimiento del equipo debe estar a cargo de técnicos calificados certificados por los fabricantes.
- Se deben hacer calibraciones periodicas de los equipos en función del número de horas de uso.

Sobre la Calidad de los Datos Medidos

- Los datos tomados manualmente por los operadores de SENAMHI deben ser verificados independientemente.
- A fin de garantizar la calidad de la información recolectada en años previos, el gobierno debería implementar un programa de verificación de la información recolectada.
- Se debería instalar estaciones duplicadas en determinadas ubicaciones a fin de comparar las lecturas obtenidas en ambos equipos y verificar la calidad de la información obtenida.

- Cuando se tengan disponibles estaciones automáticas, se deberá verificar la consistencia de sus lecturas instalando estaciones manuales y comparando las lecturas de ambas estaciones.

Es necesario mencionar que actualmente existe un acuerdo entre la Autoridad Nacional del Agua (ANA) y el SENAMHI a fin de proveer de equipamiento a las estaciones climatológicas operadas por SENAMHI mediante financiamiento externo. Se recomienda tomar acciones a fin de incluir a la cuenca del río Cañete en este acuerdo.

-

IV. HIDROLOGIA DE MAXIMAS AVENIDAS

4.1 Consideraciones Previas

En este capítulo se describe la metodología de trabajo desarrollada para la generación de los caudales de avenida en el denominado Punto Base (punto de interés, estación Sosci), para los periodos de retorno de 2, 5, 10, 25, 50 y 100 años.

La estimación de las descargas máximas se ha realizado a partir de la información de precipitación máxima de 24 horas mediante un modelo precipitación – escorrentía, utilizando el Software HEC-HMS. El modelo ha sido calibrado mediante los registros históricos de caudales máximos diarios anuales de la estación Sosci.

Reconocimiento de Campo:

El reconocimiento de campo ha comprendido una revisión de las características generales de la estación hidrométrica Sosci y del punto base (punto de interés, en donde se estimara las descargas máximas), de las principales características topográficas y del uso de suelo de la cuenca vertiente a la zona de estudio, lo cual ha servido de apoyo para la definición de algunos parámetros a considerar para la generación de los caudales de avenida.

Metodología y Procedimiento:

La metodología y procedimiento empleado para la estimación de las descargas máximas, se resume a continuación:

- Identificación y delimitación de la subcuenca vertiente al punto de interés (Estación Hidrométrica Sosci), que ha sido realizada en base a las Cartas a escala 1:100000 y/o 1:25000 e imágenes satélites.
- Selección de estaciones pluviométricas existentes en el área del estudio y recopilación de registros históricos de precipitación máxima en 24 horas.
- Análisis de frecuencias de las precipitaciones máximas en 24 horas para cada estación y selección de la función de distribución con mejor ajuste.
- Cálculo de la precipitación areal de la cuenca vertiente al punto de interés a partir de los mapas de isoyetas elaborados para los periodos de retorno de 2, 5, 10, 25, 50 y 100 años.

- Determinación de la precipitación máxima para una duración de tormenta no menor al tiempo de concentración; (tiempo en el cual toda la cuenca aporta a la descarga) mediante el modelo Dick y Peschke.
- Mediante el modelo precipitación escorrentía se generan los caudales de avenida para los periodos de retorno de 2, 5, 10, 25, 50 y 100 años, utilizando el software HEC – HMS, se modela la cuenca mediante los siguientes pasos:
 - A partir de la serie histórica de caudales máximos diarios anuales se calcula mediante métodos estadísticos la Ley de frecuencia de caudales.
 - Calibración del modelo precipitación escorrentía, con la ley de frecuencia de caudales.

4.2 Caracterización Hidrológica, Análisis de la Información Pluviométrica e Hidrométrica

4.2.1 Caracterización Hidrológica

Las características geomorfológicas de la cuenca al punto base (estación Sosci) se muestra en el Cuadro N° 4.1.

Cuadro N° 4.1. Características Geomorfológicas de la cuenca en el Punto Base (estación Sosci)

Característica	Valor
Area de la Cuenca (km ²)	5,676.120
Longitud Max. De Recorrido (km)	187.000
Cota Mayor (msnm)	4,760.000
Cota Menor (msnm)	405.000
Pendiente (m/m)	0.023

4.2.2 Análisis de las Precipitaciones Máximas en 24 Horas

En el Cuadro N° 3.1 y Figura N° 3.3. se muestra las estaciones ubicadas en el ámbito del estudio (cuenca del río Cañete y cuencas vecinas) las precipitaciones máximas en 24 horas anual de estas estaciones se muestra en el Cuadro N° 4.2; la información diaria y máxima en 24 horas se muestra en el Anexo.

De la información mostrada en el Cuadro N° 4.2 y observando la Figura N° 3.3 y N° 3.4, en los siguientes análisis no se va a considerar la información de las estaciones Tomas y Nicolas Franco Silvera por tener información de pocos

años y la estación Huantan por tener información inconsistente con estaciones vecinas.

Cuadro N° 4.2. Precipitación Máxima en 24 Horas Anual de las Estaciones ubicadas en el Ámbito del Estudio

Año	Estaciones												
	YAUYOS	YURICOCHA	TOMAS	TANTA	SOCSI CAÑETE	PACARAN	NICOLAS FRANCO SILVERA	HUANTAN	HUANGASCAR	COLONIA	CARANIA	AYAVIRI	COSMOS
1960													
1961													
1962													
1963													
1964	19.50			25.40						14.20	28.40	12.00	
1965	31.40			34.50		2.10		41.60	15.00	43.50	44.30	13.00	
1966	23.30			26.60		2.51		20.00	25.10	34.40	25.00	28.50	
1967	23.60			28.00		8.80			35.30	62.80	18.60		
1968				23.70				17.70	12.90	18.10		19.70	
1969	17.40			33.00					21.30	17.20	29.30	33.50	
1970	26.80			37.90		20.30		21.20	28.00	24.20	16.60	29.90	
1971	33.00			24.50		6.30		18.50	19.60	31.50	18.00	22.70	
1972				26.10		4.80		29.30	70.50	16.30	20.10	33.00	
1973	28.20			18.20		6.00		30.20	27.20	15.80	22.60	37.60	
1974	21.50			19.30		2.40		20.00	12.70	15.70	16.80	30.50	
1975	19.00			15.10		3.30		40.10	34.60	14.10	16.00	34.80	
1976	20.00			17.50		0.40		32.40		23.20	19.30	16.10	
1977	14.80			16.40		0.80			29.40	24.90	17.40	34.40	
1978	20.10			16.30		0.20		22.00	49.80	25.20	16.10	33.40	
1979	16.90			11.70					18.10		15.10	11.20	
1980	15.50			14.40					8.50		17.10		
1981	22.80			13.10					21.00	17.60	17.50		
1982			16.80	13.30				61.20	17.20		15.60		19.30
1983			9.80					33.60	9.70	21.50	16.60		15.50
1984	10.00			11.30				53.40	14.90		14.20		27.00
1985				12.40					13.80	8.00	12.90		
1986			17.50	18.00		3.51		36.20	19.00	26.50	20.00	32.70	33.70
1987		37.60	13.10	16.80		4.80		35.50	13.10	12.50	20.90	31.90	29.30
1988		28.80	13.60	13.80		3.30			20.40		33.10	23.80	
1989		26.10		13.90		6.00		27.70	20.00		24.40	39.40	
1990		30.80		15.80		1.20			20.00		26.00	25.60	
1991		24.00		11.50		1.50			19.00		12.40	27.40	
1992	6.30	21.50		16.00		1.21			5.00		15.10	29.90	
1993	17.30	40.50		41.60		3.00			20.00		16.00	29.70	
1994	31.50	21.80		26.40		9.00			24.00		14.10	30.20	
1995	12.20	20.20		27.00		6.20			30.00		13.50	30.20	
1996	24.30	16.60		31.70		2.60			23.00		16.10	24.60	
1997	18.80	28.20		27.40		3.60			25.30		14.60	46.20	
1998	14.70	27.60		41.80		5.50			33.80		14.10	32.40	
1999	19.90	24.40		24.50		11.20			24.30		15.60	23.10	
2000	12.90	58.60		28.90		3.80			30.60		27.00	35.40	
2001	13.30	20.60		22.70		5.60			12.80		14.90	24.00	
2002	11.60	25.80		28.20					24.80		17.70	28.70	
2003	14.40	60.40		28.00		4.40			15.00		18.90	18.20	
2004	14.20	41.30		32.90					17.70		21.40	29.20	
2005	13.60	30.40		22.00	0.00		6.40		13.00		20.50	21.00	
2006	20.60	26.20		29.50	0.00		3.00		25.10		30.10	26.50	
2007	19.80	29.00		33.60	0.00	2.30			14.60		23.40	34.20	
2008	19.90	15.40			0.00	2.60			24.00		21.90	30.40	
2009	15.10	26.90		69.20	8.00	6.00			14.80		20.50	27.30	
2010													

En la Figura N° 4.1 se muestra las estaciones consideradas para los siguientes análisis que van ser aplicado en el software HEC-HMS.

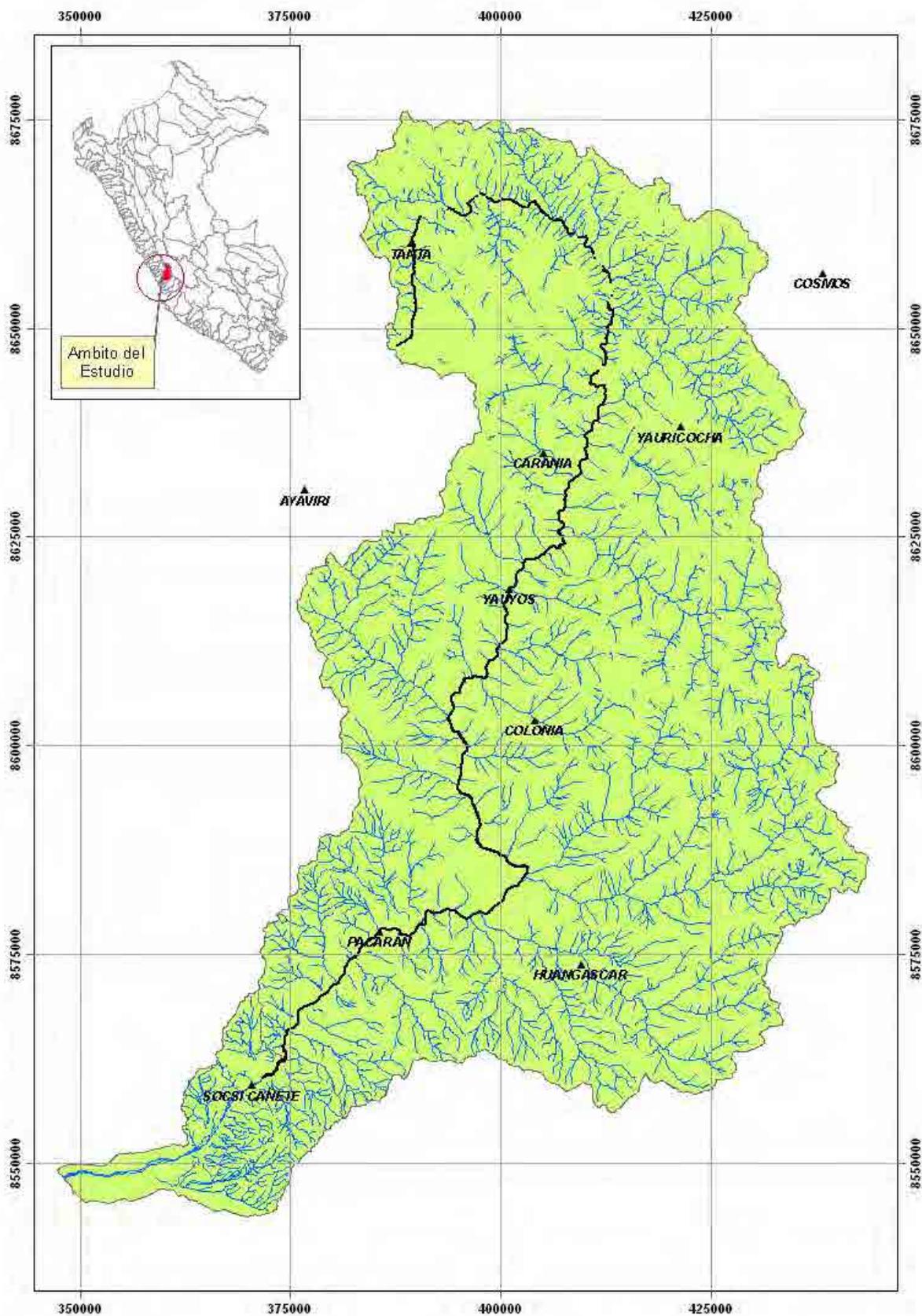


Figura N° 4.1. Estaciones Pluviométricas consideradas para la aplicación del Software HEC-HMS

Cada serie de precipitación máxima anual de las diez (10) estaciones pluviométricas seleccionadas va a ser ajustadas a un tipo de distribución, por lo que a continuación se describe las funciones de distribución más comunes que se aplica a los estudios hidrológicos de eventos extremos.

4.2.2.1 Funciones de Distribución

A continuación se describe las funciones de distribución:

1. Distribución Normal ó Gaussiana

Se dice que una variable aleatoria X, tiene una distribución normal, si su función densidad es,

$$f(x) = \frac{1}{\sqrt{2\pi S}} \text{EXP} \left[-\frac{1}{2} \left(\frac{x - X}{S} \right)^2 \right]$$

Para $-\infty < x < \infty$

Donde:

$f(x)$ = Función densidad normal de la variable x.

x = Variable independiente.

X = Parámetro de localización, igual a la media aritmética de x.

S = Parámetro de escala, igual a la desviación estándar de x.

EXP = Función exponencial con base e, de los logaritmos neperianos.

2. Distribución Log – Normal de Dos Parámetros

Cuando los logaritmos, $\ln(x)$, de una variable x están normalmente distribuidos, entonces se dice que la distribución de x sigue la distribución de probabilidad log – normal en que la función de probabilidad log – normal $f(x)$ viene representado como:

$$f(x) = \frac{1}{x\sigma_y\sqrt{2\pi S}} \text{EXP} \left\{ -\frac{1}{2} \left[\frac{\ln x - \mu_y}{\sigma_y} \right]^2 \right\}$$

Para $0 < x < \infty$, se tiene que $x \sim \text{logN}(\mu_y, \sigma_y^2)$

Donde:

μ_y, σ_y = Son la media y desviación estándar de los logaritmos naturales de x , es decir de $\ln(x)$, y representan respectivamente, el parámetro de escala y el parámetro de forma de la distribución.

3. Distribución Log – Normal de Tres Parámetros

Muchos casos el logaritmo de una variable aleatoria x , del todo no son normalmente distribuido, pero restando un parámetro de límite inferior x_0 , antes de tomar logaritmos, se puede conseguir que sea normalmente distribuida.

La función de densidad, de la distribución log – normal de tres parámetros, es:

$$f(x) = \frac{1}{(x - x_0)\sigma_y\sqrt{2\pi}} \text{EXP} \left\{ -\frac{1}{2} \left[\frac{\ln(x - x_0) - \mu_y}{\sigma_y} \right]^2 \right\}$$

Para $x_0 \leq x < \infty$

Donde:

x_0 = Parámetro de posición en el dominio x .

μ_y , = Parámetro de escala en el dominio x .

σ_y^2 = Parámetro de forma en el dominio x

4. Distribución Gamma de Dos Parámetros

Se dice que una variable aleatoria X , tiene una distribución gamma de 2 parámetros si su función densidad de probabilidad es:

$$f(x) = \frac{x^{\gamma-1} e^{-\frac{x}{\beta}}}{\beta^{\gamma} \Gamma_{\gamma}}$$

Para

$$0 \leq x < \infty$$

$$0 < y < \infty$$

$$0 < \beta < \infty$$

Siendo:

γ = Parámetro de forma (+)

β = Parámetro de escala (+)

$\Gamma(\gamma)$ = Función gamma completa, definida como:

$$\Gamma(\gamma) = \int_0^{\infty} x^{\gamma-1} e^{-x} dx, \text{ que converge si } \gamma > 0$$

5. Distribución Gamma de Tres Parámetros o Pearson Tipo III

La distribución Log Pearson tipo 3 (LP3) es un modelo muy importante dentro de la hidrología estadística, sobre todo, luego de las recomendaciones del Consejo de Recursos Hidráulicos de los Estados Unidos (Water Resources Council – WRC), para ajustar la distribución Pearson tipo 3 (LP3) a los logaritmos de las máximas avenidas. Pues, la distribución LP3, es una familia flexible de tres parámetros capaz de tomar muchas formas diferentes, por consiguiente es ampliamente utilizado en el modelamiento de series anuales de máximas avenidas de los datos no transformados.

Se dice que una variable aleatoria X, tiene una distribución gamma de 3 parámetros o distribución Pearson Tipo III, si su función densidad de probabilidad es:

$$f(x) = \frac{(x - x_0)^{\gamma-1} e^{-\frac{(x-x_0)}{\beta}}}{\beta^{\gamma} \Gamma_{\gamma}}$$

Para

$$x_0 \leq x < \infty$$

$$-\infty < x_0 < \infty$$

$$0 < \beta < \infty$$

$$0 < \gamma < \infty$$

4.2.2.2 *Calculo de Ajuste y Periodo de Retorno para las Precipitaciones Máximas en 24 Horas*

El análisis de frecuencia de la precipitación máxima en 24 horas de cada estación (ver Cuadro N° 4.2) se ha efectuado con el Software Hidrológico de Eventos Extremos “CHAC” (Software elaborado por el CEDEX – España), este software calcula la precipitación máxima en 24 horas para diferentes períodos de retorno considerando las funciones de distribución de probabilidades como: la Normal, la Log – Normal de 2 ó 3 parámetros, la Gamma de 2 ó 3 parámetros, la Log – Pearson III, la Gumbel, la Log – Gumbel y Valores Extremo Generalizados.

La información generada para cada función de distribución se elige la de que tiene mejor ajuste mediante la prueba de bondad de Kolmogórov – Smirnov y los periodos de retorno considerados para el presente estudio es de 2, 5, 10, 25, 50 y 100 años.

4.2.2.3 *Selección de Distribución Teórica con mejor Ajuste a la Serie de Precipitaciones Máximas en 24 Horas*

Según el análisis efectuado con el software CHAC observamos que los datos se ajustan a la función de distribución de Valores Extremos Generalizados (GEV), según el coeficiente de distribución, ver Cuadro N° 4.3. Los valores de cada estación pluviométrica y para cada periodo de retorno se muestran en el Cuadro N° 4.4.

Cuadro N° 4.3. Coeficiente de Determinación para cada Función de Distribución y para cada Estación Pluviométrica

Estacion	Coeficiente de Determinacion para cada Funcion de Distribucion				
	Log Pearson III	GEV	SQRT	Gumbel	Log-Normal
AYAVIRI	0.95	0.95	0.92	0.92	0.91
CARANIA	0.91	0.92	0.91	0.91	0.89
COLONIA	0.95	0.96	0.93	0.93	0.91
COSMOS	0.92	0.93	0.91	0.90	0.90
HUANGASCAR	0.93	0.95	0.92	0.93	0.91
PACARAN		0.93	0.92	0.93	0.92
SOCSI CAÑETE		0.94		0.90	0.91
TANTA	0.90	0.92	0.91	0.92	0.90
YAUICOCHA	0.92	0.94	0.93	0.92	0.89
YAUYOS	0.96	0.97	0.95	0.95	0.92

Cuadro N° 4.4. Precipitaciones Máxima en 24 Horas de cada Estación Pluviométrica y para cada Periodo de Retorno

NOMBRE DE ESTACION	PERIODO DE RETORNO T [AÑOS]						
	PT_2	PT_5	PT_10	PT_25	PT_50	PT_100	PT_200
AYAVIRI	29.0	35.0	37.0	39.0	40.0	41.0	42.0
CARANIA	18.0	23.0	27.0	33.0	39.0	45.0	52.0
COLONIA	21.0	30.0	37.0	48.0	56.0	66.0	77.0
COSMOS	23.0	31.0	35.0	40.0	43.0	45.0	47.0
HUANGASCAR	20.0	29.0	35.0	44.0	51.0	59.0	67.0
PACARAN	4.0	7.0	9.0	12.0	15.0	18.0	21.0
SOCSI CAÑETE	0.0	1.0	2.0	4.0	7.0	12.0	21.0
TANTA	23.0	32.0	38.0	46.0	52.0	58.0	65.0
YAUICOCHA	27.0	36.0	43.0	54.0	64.0	75.0	88.0
YAUYOS	18.0	23.0	27.0	31.0	34.0	37.0	40.0

Con la información mostrada en el Cuadro N° 4.4., y con la herramienta IDW (Inverse Distance Weighted) de Interpolate to Raster del modulo Spatial Analyst del software ArcGIS se ha generado la distribución espacial de la precipitación para cada periodo de retorno.

Para la generación de los mapas de isoyetas se ha empleado la herramienta Contour de Surface Analysis del modulo Spatial Analyst del software ArcGIS, cuyos resultados se muestra en las Figuras N° 4.2. al 4.7.

A partir de los mapas de isoyetas para cada periodo de retorno se ha estimado la precipitación máxima para el área de la cuenca delimitada para el Punto Base (Estacion Sosci), la metodología y los resultados se describe en el ítem 4.2.2.4.

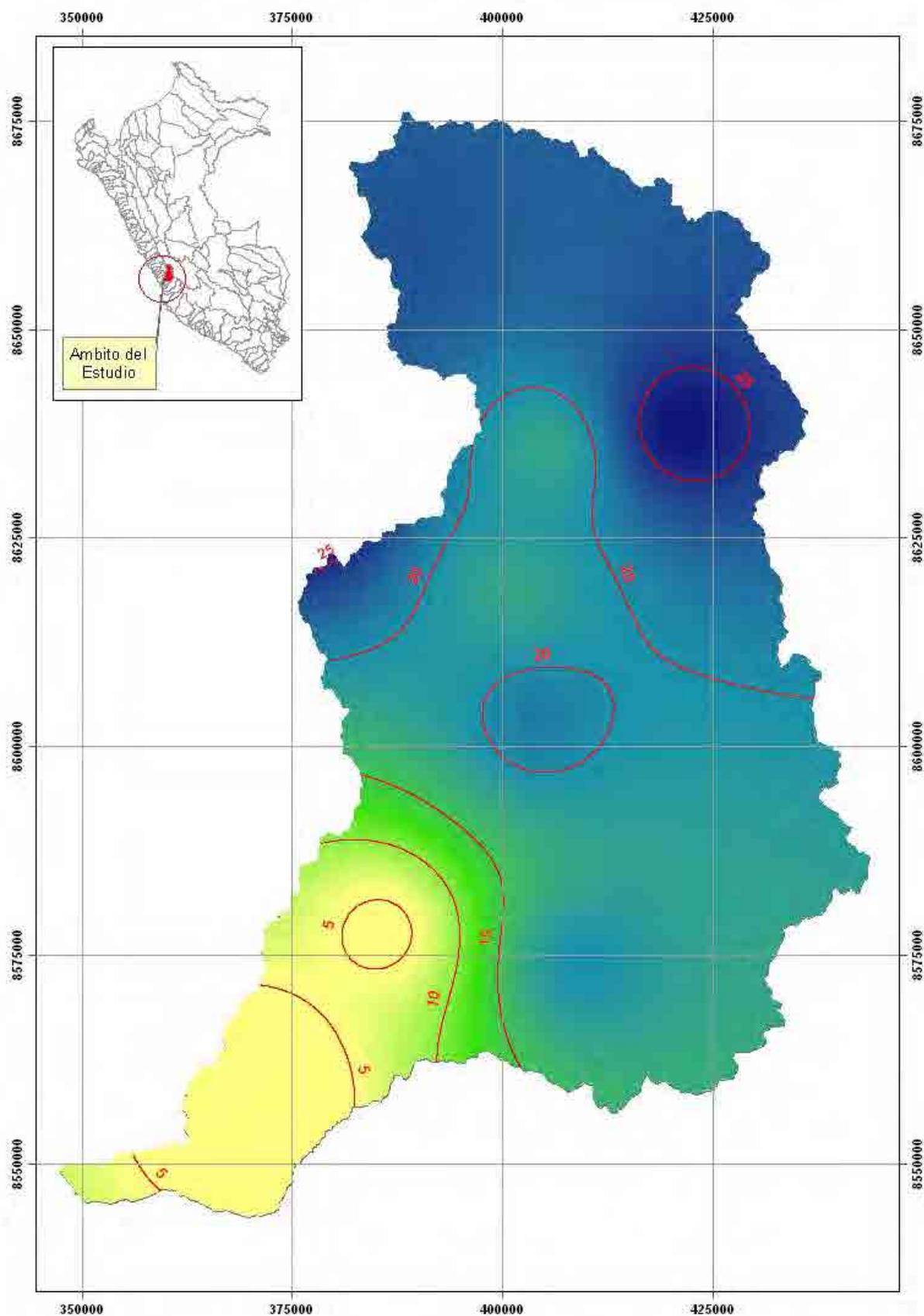


Figura N° 4.2. Isoyetas para un Periodo de Retorno de 2 años en la cuenca del río Cañete

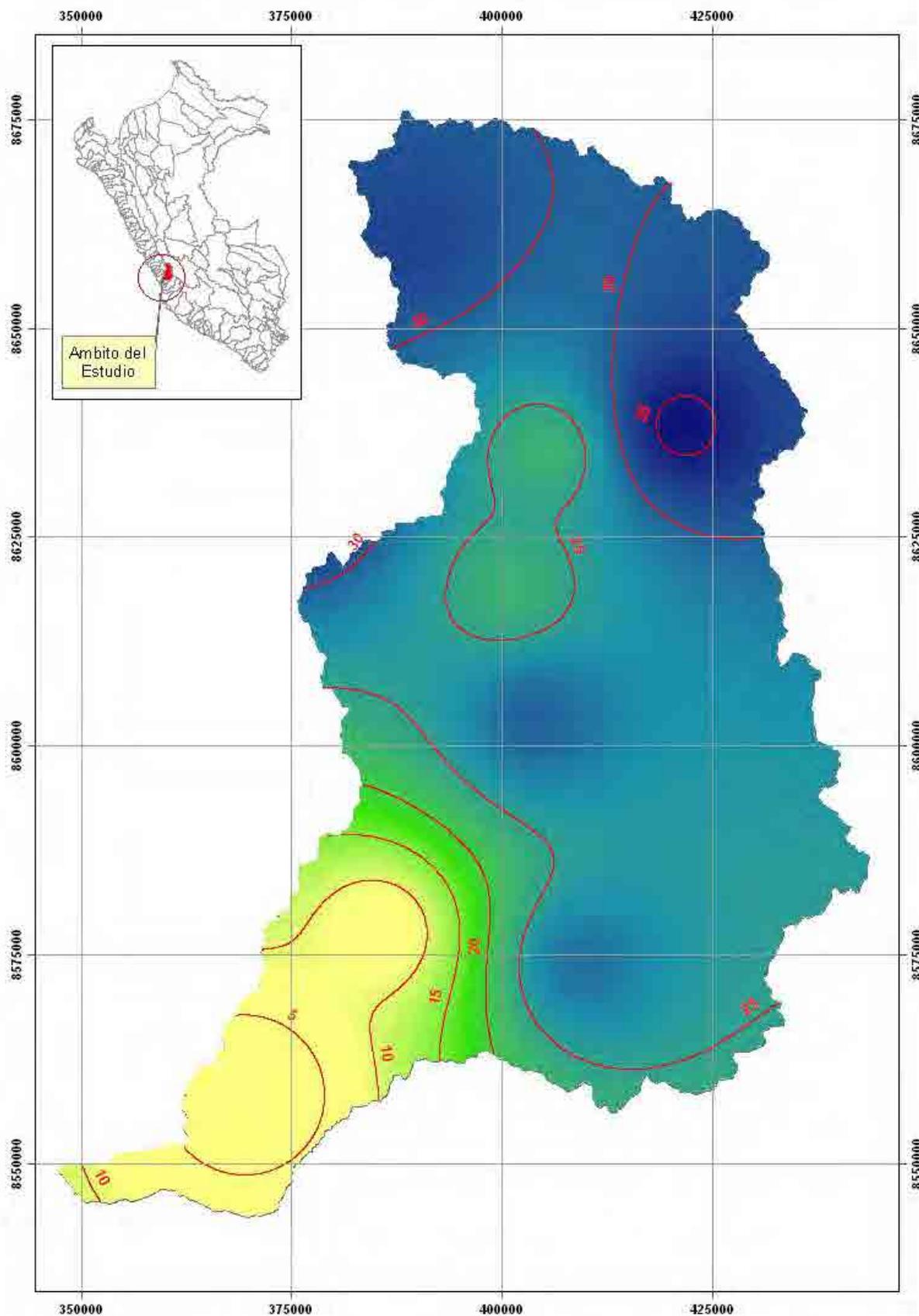


Figura N° 4.3. Isoyetas para un Periodo de Retorno de 5 años en la cuenca del río Cañete

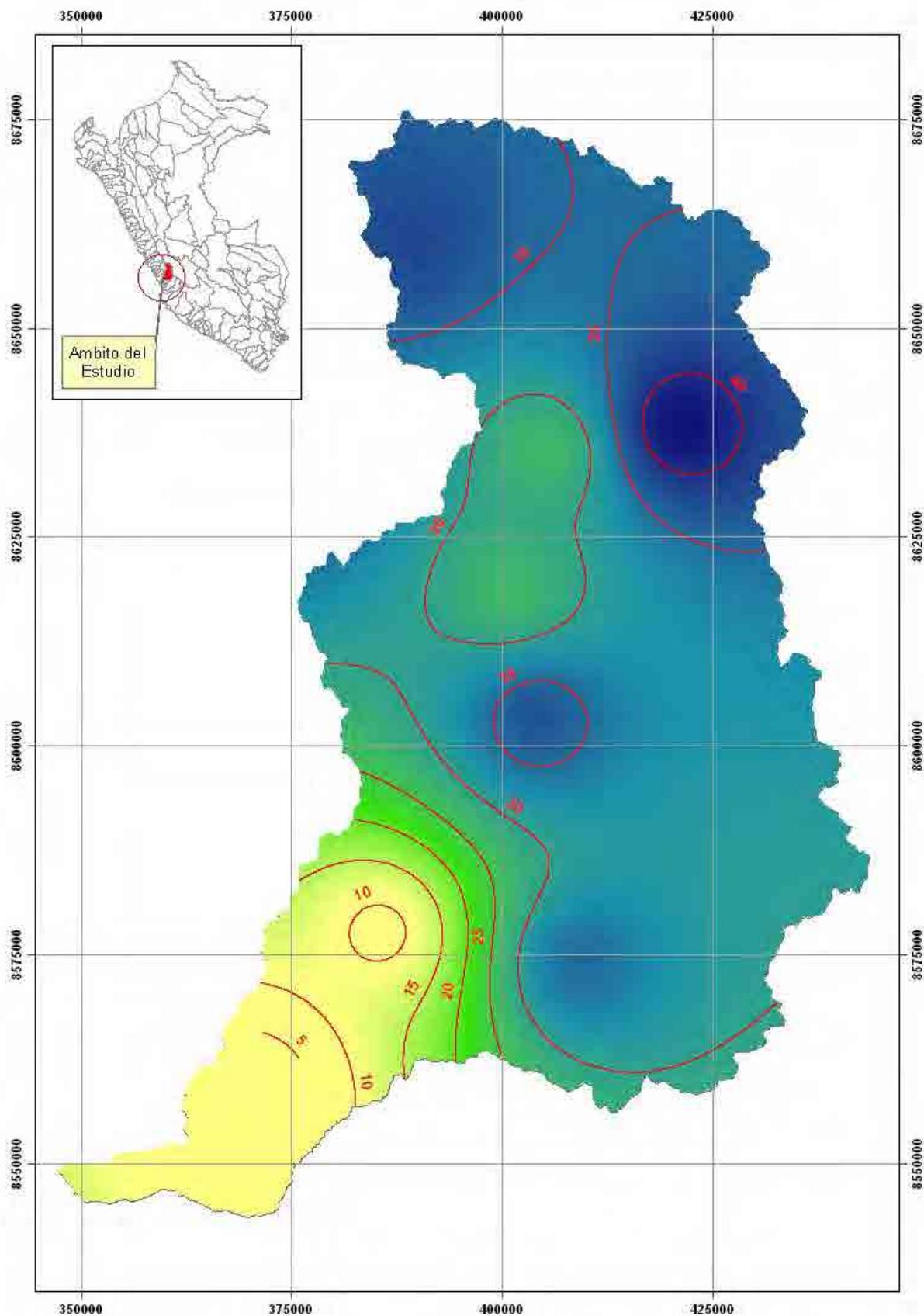


Figura N° 4.4. Isoyetas para un Periodo de Retorno de 10 años en la cuenca del río Cañete

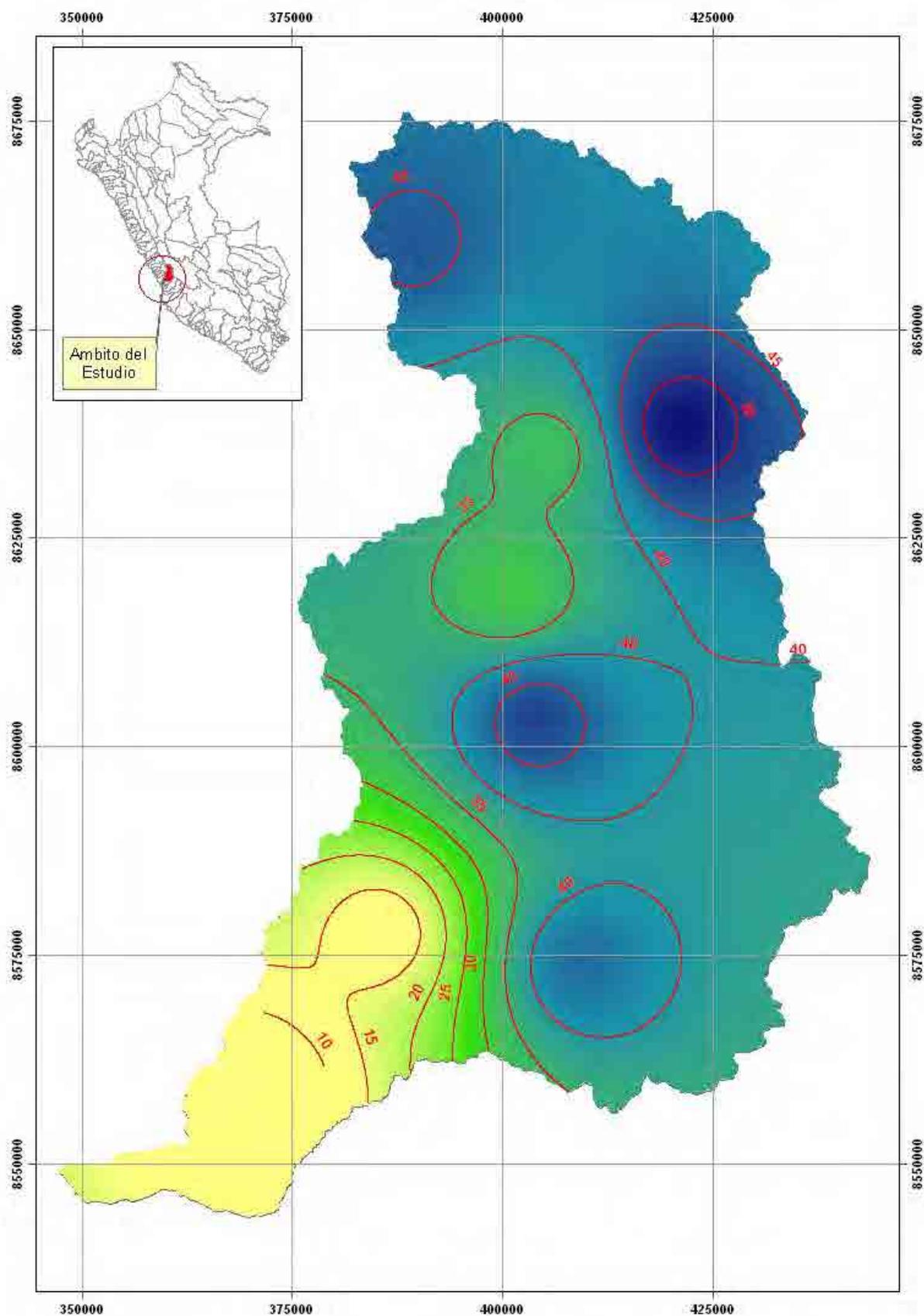


Figura N° 4.5. Isoyetas para un Periodo de Retorno de 25 años en la cuenca del río Cañete

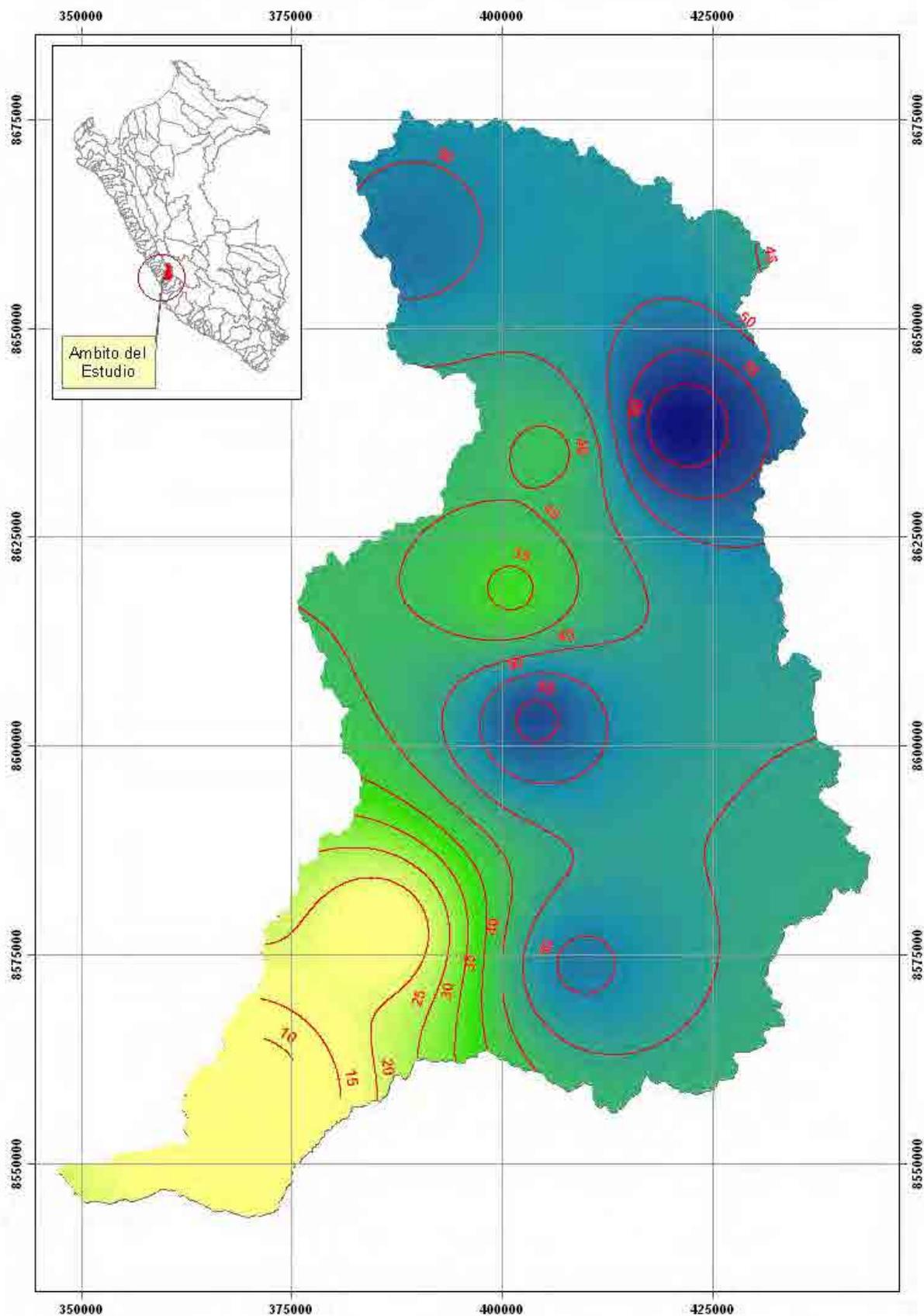


Figura N° 4.6. Isoyetas para un Periodo de Retorno de 50 años en la cuenca del río Cañete

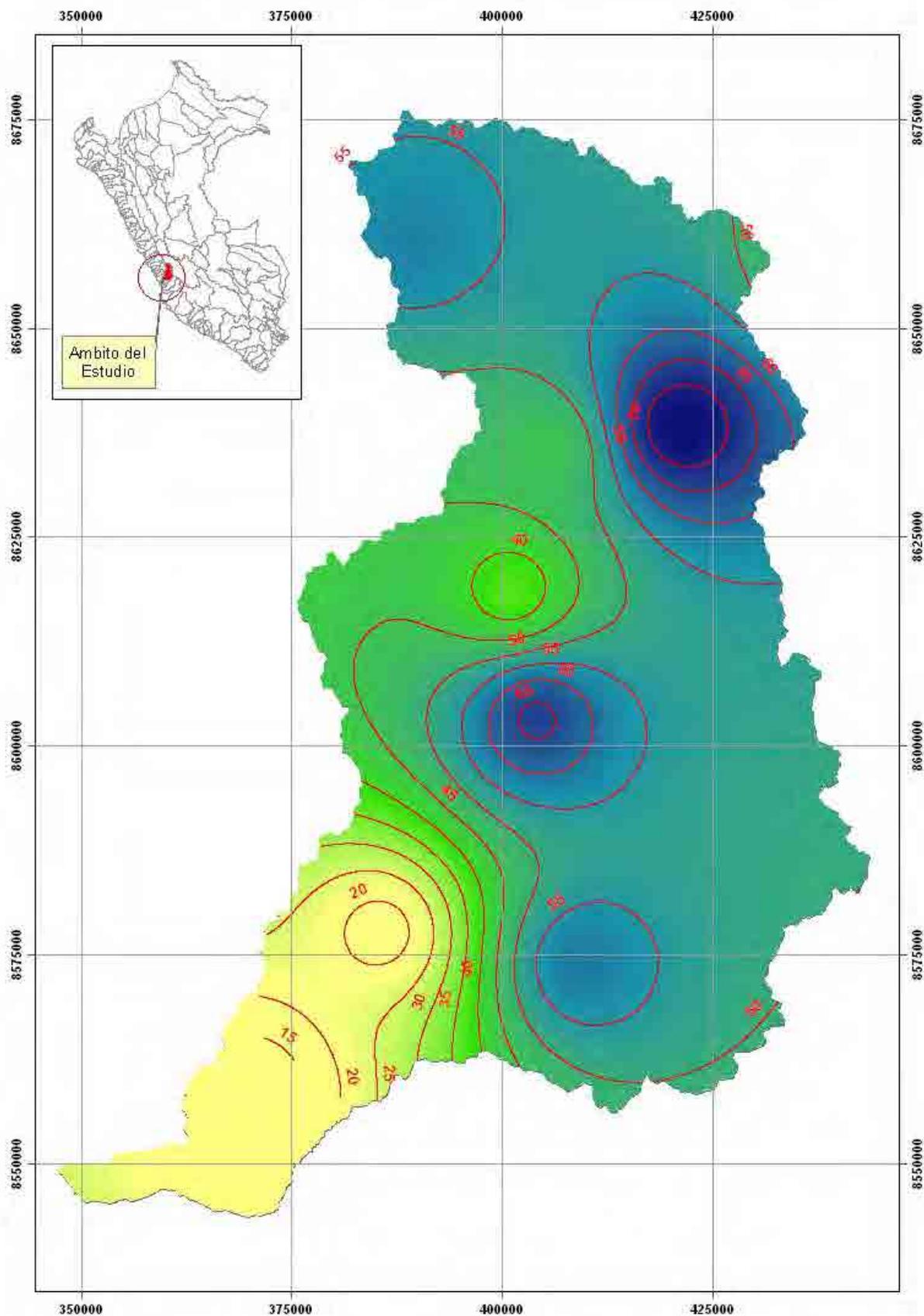


Figura N° 4.7. Isoyetas para un Periodo de Retorno de 100 años en la cuenca del río Cañete

4.2.2.4 Determinación de Precipitaciones Máximas para Diferentes Periodos de Retorno en el Punto Base

A partir de los mapas de isoyetas para cada periodo de retorno (2, 5, 10, 25, 50 y 100 años) y con la herramienta Zonal Statistics del modulo Spatial Analyst del software ArcGIS se ha calculado la precipitación areal máxima de 24 horas en el punto base (estación Sosci) para cada periodo de retorno, los resultados se muestran en el Cuadro N° 4.5.

Cuadro N° 4.5. Precipitaciones Areales Máximas en 24 Horas en el Punto Base (Estación Sosci) para cada Periodo de Retorno

T [Años]	Pp Areal Max 24 Horas [mm]
2	18.6
5	25.5
10	30.3
25	37.3
50	43.1
100	49.4

4.2.2.5 Determinación de Precipitaciones Máximas para Diferentes Periodos de Retorno en las Subcuencas del río Cañete

Adicionalmente al estudio hidrológico de los caudales máximos del río Cañete se requiere estimar las precipitaciones máximas para diferentes periodos de retorno en las subcuencas del río Cañete. Esta ha sido estimada en base a los mapas de isoyetas mostrados en las Figuras N° 4.2. a 4.7 y a la metodología descrita brevemente en el ítem 4.2.2.4.

En la Figura N° 4.8, se muestra las subcuencas del río Cañete a las que se ha estimado las precipitaciones máximas para cada periodo de retorno y para cada subcuenca cuyos resultados se muestra en el Cuadro N° 4.6.

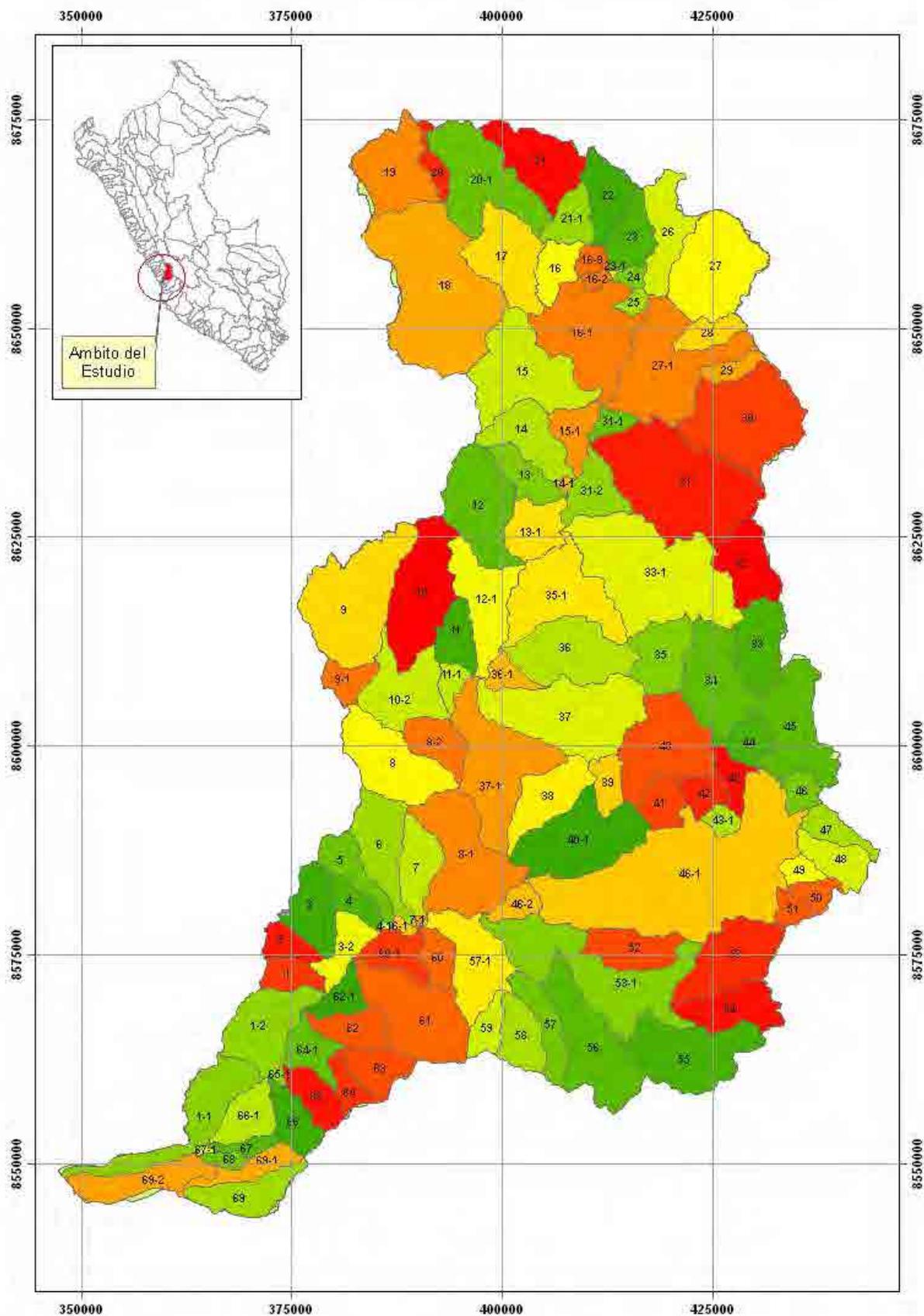


Figura N° 4.8. Subcuenca del río Cañete

Cuadro N° 4.6. Precipitaciones para Diferentes Periodos de Retorno en cada Subcuenca del río Cañete

SUBCUENCA	AREA [m²]	PERIODO DE RETORNO T [AÑOS]					
		PT_2	PT_5	PT_10	PT_25	PT_50	PT_100
1	23,147,500	5.6	8.8	11.0	14.5	18.0	22.3
10	99,153,800	20.1	26.1	30.3	35.6	39.8	44.3
10-2	70,237,800	18.9	25.4	30.1	36.6	41.7	47.5
11	31,142,000	19.2	25.4	30.0	35.9	40.5	45.6
1-1	78,972,200	2.3	4.1	5.5	8.1	11.4	16.4
11-1	13,827,500	19.4	26.3	31.5	38.8	44.4	50.9
12	89,313,800	19.5	25.2	29.3	34.8	39.4	44.2
1-2	72,163,700	2.6	4.6	6.1	8.8	12.1	16.9
12-1	70,463,200	18.7	24.3	28.6	33.6	37.4	41.5
13	31,367,400	18.7	24.1	28.3	34.3	40.1	45.9
13-1	42,137,500	19.0	24.6	28.9	34.3	39.0	43.9
14	54,650,700	18.7	24.0	28.2	34.3	40.2	46.1
14-1	2,579,850	18.8	24.3	28.5	34.7	40.6	46.7
15	110,794,000	20.6	27.0	31.7	38.3	44.2	50.3
15-1	29,864,500	19.3	25.0	29.4	35.9	42.1	48.5
16	28,933,500	22.1	29.6	34.7	41.8	47.7	53.8
16-1	115,763,000	22.1	29.2	34.4	41.8	48.3	55.1
16-2	5,852,460	22.3	29.7	34.8	42.0	48.1	54.4
16-3	11,163,600	22.3	29.7	34.8	42.0	47.9	54.1
17	76,294,400	22.3	30.2	35.6	42.9	48.7	54.6
18	211,788,000	22.5	30.7	36.1	43.5	49.2	54.9
19	64,858,300	22.7	31.2	36.9	44.4	50.2	56.0
2	21,011,000	6.5	9.9	12.3	16.0	19.5	23.7
20	14,588,700	22.6	31.1	36.7	44.2	50.0	55.8
20-1	104,300,000	22.5	30.7	36.2	43.6	49.3	55.1
21	67,786,400	22.3	30.1	35.3	42.4	48.0	53.8
21-1	30,166,600	22.2	29.9	35.0	42.1	47.8	53.7
22	43,677,300	22.3	29.8	34.9	41.9	47.5	53.2
23	35,324,400	22.4	30.0	35.0	42.1	47.9	53.8
23-1	893,202	22.4	29.9	35.0	42.3	48.4	54.6
24	7,548,340	22.6	30.1	35.2	42.6	48.7	55.1
25	8,179,220	22.8	30.3	35.5	43.2	49.7	56.4
26	47,884,700	22.6	30.2	35.2	42.2	47.8	53.5
27	104,899,000	23.0	30.8	35.6	42.3	47.5	52.6
27-1	124,017,000	24.5	32.6	38.5	47.5	55.5	64.1
28	23,403,400	23.9	31.8	37.3	45.3	52.1	59.2
29	15,008,000	24.6	32.8	38.6	47.3	54.9	62.9
3	47,658,400	6.7	10.4	12.9	16.6	20.1	24.0
30	128,021,000	25.0	33.3	39.5	48.8	56.9	65.7
31	180,056,000	23.9	31.7	37.6	46.5	54.5	63.2
31-1	13,039,600	22.3	29.3	34.6	42.7	50.0	57.9
31-2	39,773,800	20.1	26.2	30.9	37.6	43.8	50.3
32	52,009,900	21.9	29.2	34.6	42.4	49.0	56.2
3-2	31,314,700	5.0	8.2	10.4	13.7	17.0	20.4
33	52,648,100	20.5	27.7	32.8	40.3	46.4	53.2
33-1	185,838,000	20.7	27.5	32.5	39.6	45.6	52.1
34	84,179,000	20.0	27.1	32.3	39.9	45.9	52.7
35	52,094,800	20.0	27.1	32.4	40.0	46.0	52.8
35-1	99,091,900	18.9	24.7	29.2	34.7	39.0	43.6
36	88,427,000	19.7	26.8	32.1	39.7	45.5	52.2
36-1	16,706,700	20.0	27.6	33.5	42.1	48.4	56.1
37	134,150,000	20.3	28.6	34.9	44.5	51.7	60.4
37-1	118,354,000	19.0	26.8	32.6	41.5	48.2	56.2
38	55,311,100	18.9	26.7	32.5	41.3	47.9	56.0
39	21,906,100	19.3	27.1	32.8	41.5	48.1	55.9
4	21,422,100	5.4	8.8	11.0	14.4	17.7	21.1
40	97,596,400	19.5	26.9	32.4	40.5	46.7	54.0
40-1	103,460,000	18.1	25.6	31.0	39.0	45.3	52.5
41	25,810,500	18.9	26.3	31.7	39.7	45.9	53.1
4-1	960,631	4.1	7.1	9.1	12.1	15.1	18.1
42	21,371,300	19.0	26.3	31.6	39.3	45.4	52.4
43	19,427,800	19.1	26.4	31.6	39.2	45.2	52.1
43-1	11,757,600	18.8	26.1	31.3	38.9	44.9	51.9
44	25,792,000	19.5	26.6	31.8	39.3	45.3	52.1
45	87,978,100	19.7	26.8	31.9	39.3	45.2	51.9
46	17,937,900	19.1	26.2	31.3	38.7	44.6	51.2
46-1	333,392,000	18.6	26.2	31.5	39.3	45.5	52.6
46-2	17,979,500	16.0	23.1	27.9	35.2	41.0	47.6
47	18,444,100	18.9	26.0	31.0	38.3	44.1	50.7
48	33,608,200	18.7	25.7	30.7	38.0	43.8	50.4
49	12,810,600	18.5	25.7	30.7	38.1	44.0	50.7
5	34,390,600	7.6	11.5	14.2	18.1	21.8	25.7
50	15,473,600	18.4	25.6	30.5	37.9	43.7	50.4
51	13,740,700	18.3	25.5	30.5	37.9	43.8	50.6
52	45,403,700	19.2	27.7	33.4	42.0	48.7	56.4
53	77,545,100	18.2	25.7	30.9	38.6	44.7	51.7
53-1	147,352,000	18.6	26.8	32.4	40.7	47.2	54.6

54	50,099,700	17.9	25.3	30.5	38.1	44.1	51.0
55	96,938,800	17.6	25.1	30.3	37.9	43.9	50.9
56	99,022,600	17.9	25.8	31.2	39.2	45.5	52.7
57	37,032,300	17.4	25.1	30.3	38.1	44.4	51.5
57-1	72,431,600	12.1	17.8	21.7	27.5	32.4	37.9
57-2	540,355	6.2	9.9	12.3	16.0	19.5	23.2
58	38,487,100	15.9	23.0	27.8	35.0	40.8	47.5
59	21,680,700	13.7	19.9	24.2	30.5	35.8	41.8
6	63,213,200	9.8	14.4	17.5	22.2	26.2	30.7
60	23,807,900	7.9	12.1	15.0	19.3	23.1	27.4
60-1	33,284,000	5.1	8.4	10.6	14.0	17.2	20.6
61	99,516,800	8.3	12.5	15.5	19.9	23.9	28.4
6-1	4,236,010	4.6	7.8	9.9	13.1	16.3	19.5
62	34,471,000	5.9	9.1	11.4	15.0	18.6	23.1
62-1	22,790,000	5.6	8.8	11.0	14.5	18.0	22.1
63	33,513,100	6.6	10.0	12.5	16.4	20.2	25.0
64	17,449,300	4.7	7.4	9.4	12.7	16.3	21.2
64-1	30,391,000	3.1	5.2	6.9	9.7	13.0	17.9
65	30,594,300	2.4	4.3	5.8	8.5	11.8	16.8
65-1	2,586,310	0.6	1.8	2.9	5.0	8.1	13.1
66	32,456,400	1.7	3.3	4.7	7.1	10.3	15.3
66-1	36,758,000	0.7	2.0	3.1	5.3	8.4	13.4
67	11,483,200	1.8	3.4	4.8	7.2	10.4	15.5
67-1	1,476,050	2.5	4.3	5.8	8.5	11.8	16.8
68	9,270,090	2.5	4.3	5.9	8.5	11.8	16.8
69	42,492,200	4.0	6.4	8.2	11.3	14.7	19.8
69-1	26,182,700	2.9	4.9	6.5	9.2	12.6	17.6
69-2	50,858,000	5.2	7.9	9.9	13.2	16.8	21.9
7	42,214,200	9.5	14.1	17.2	21.9	26.0	30.6
7-1	1,125,050	5.8	9.3	11.7	15.2	18.6	22.2
8	85,368,700	16.4	22.6	27.0	33.4	38.4	44.3
8-1	114,221,000	13.5	19.4	23.5	29.7	34.7	40.5
8-2	35,785,400	18.3	25.3	30.5	38.1	43.9	50.8
9	132,743,000	22.0	28.1	31.8	36.6	40.2	44.2
9-1	22,038,200	19.1	25.3	29.5	35.2	39.7	44.8

4.2.3 Análisis de Descargas Máximas Diarias

Para el análisis de máximas descargas diarias del río Cañete se empleó la información de la estación hidrométrica Sosci. Esta estación tiene un área de contribución de 5676 km². En la Figura 3.21 se muestra su ubicación en el ámbito de la cuenca del río Cañete.

La Dirección General de Infraestructura Hidráulica (DGIH) del Ministerio de Agricultura ha proporcionado la información de descargas máximas diarias anuales de la estación Sosci cuyos valores se muestran en el Cuadro N° 4.7.

Cuadro N° 4.7. Descargas Máximas Diarias de la estación Sosci, río Cañete (m³/s)

AÑO	CAUDAL MAXIMO (m ³ /seg.)	
	SENAMHI	JUNTA DE USUARIOS
1926	-	455.00
1927	-	120.00
1928	-	198.00
1929	-	342.00
1930	-	263.00
1931	-	148.60
1932	-	850.00
1933	-	176.00
1934	-	305.00
1935	-	386.00

1936	-	265.00
1937	-	283.76
1938	-	401.99
1939	-	308.53
1940	-	141.28
1941	-	301.13
1942	-	319.22
1943	-	324.13
1944	-	396.65
1945	-	350.00
1946	-	354.00
1947	-	353.00
1948	-	279.00
1949	-	198.00
1950	-	244.74
1951	-	485.00
1952	-	360.00
1953	-	555.00
1954	-	657.00
1955	-	700.00
1956	-	470.00
1957	-	228.32
1958	-	270.40
1959	-	700.00
1960	-	488.75
1961	-	597.62
1962	-	566.24
1963	-	242.37
1964	-	153.06
1965	214.70	214.70
1966	207.00	201.00
1967	343.00	343.00
1968	154.00	154.00
1969	316.00	316.00
1970	408.00	408.00
1971	430.00	430.00
1972	900.00	900.00
1973	484.20	450.10
1974	-	326.00
1975	-	298.00
1976	294.92	332.00
1977	-	249.00
1978	-	216.00
1979	-	182.80
1980	-	100.10
1981	-	257.10
1982	-	120.00
1983	-	228.00
1984	-	425.50
1985	-	165.60
1986	-	370.50
1987	-	487.30
1988	206.00	420.30
1989	-	377.00

1990	-	189.00
1991	-	372.00
1992	-	164.30
1993	-	390.00
1994	-	550.00
1995	-	500.00
1996	-	310.00
1997	-	350.00
1998	-	348.00
1999	-	420.00
2000	-	350.00
2001	-	255.00
2002	-	204.00
2003	-	215.00
2004	-	196.00
2005	-	167.00
2006	-	250.00

Estos valores han sido analizados con las distintas funciones de distribución que se describe en el ítem 4.2.1.1. y mediante la prueba de Kolmogorov – Smirnov se ajusta mejor a la distribución Log – Normal de 3 parámetros cuyos resultados se muestran en el Cuadro N° 4.8.

Cuadro N° 4.8. Descargas Máximas para cada Periodo de Retorno, en la estación Sosci, río Cañete (m³/s)

Periodo de Retorno [Años]	Caudal Máximo
2	312.67
5	453.80
10	547.24
25	665.30
50	752.89
100	839.83

Es necesario mencionar que a partir de un análisis de la capacidad hidráulica de la sección del río Cañete en la ubicación de la estación hidrométrica Sosci, se concluyó que esta estación no puede medir descargas mayores a 900 m³/s. Este valor coincide con la máxima descarga registrada en el año 1972.

A partir de un análisis de la capacidad hidráulica de la sección del río Cañete en la ubicación del puente de la carretera Panamericana se obtuvo que la sección puede transportar un caudal máximo de 2800 m³/s. El nivel correspondiente a esta descarga concuerda con los niveles referidos por los pobladores locales.

4.2.4 Modelo de Simulación, Aplicación del Software HEC-HMS

4.2.4.1 Modelo Hidrológico

Tiempo de Concentración y Tiempo de Viaje

Se ha empleado el modelo del Hidrograma Unitario Sintético del USDA/SCS, se calcularon los parámetros siguientes:

Tiempo de Concentración (Tc) con la fórmula de Bransby – Williams:

$$T_c = 0,95*(L^3/H)^{0,385}$$

Donde:

L = El Mayor Recorrido de la gota de lluvia en el cauce principal
(Km)

H = Desnivel (m)

Tc = Tiempo de Concentración (Hr)

Tiempo de Viaje = 0,6*Tc

Cuadro N° 4.9. Tiempo de Concentración y de Viaje para el Punto Base (estación Sosci)

L =	187.00	Km
H =	4,355.00	Mts
Tc =	15.87	Hrs
Tv =	9.52	Hrs

Duración de la Lluvia de Diseño

Debido a que la información de precipitación proporcionada por SENAMHI se encuentra a nivel diario, no es posible saber la duración de las tormentas correspondientes. Por este motivo, basado en información de duración de tormentas en Perú mencionadas en el “Estudio de la Hidrología del Perú” (Referencia “d”), se adoptó una duración de tormenta de 10 horas.

Este valor es menor que el tiempo de concentración de 15.87 horas calculado en el ítem previo, esto indica que los valores pico de las descargas estimadas en la estación hidrométrica Sosci no corresponden a la contribución simultánea de la escorrentía de la

cuenca completa del río Cañete hasta la ubicación de la estación hidrométrica Socsi.

Magnitud de la Lluvia de Diseño

La magnitud de las lluvias de diseño para una duración de 10 horas fueron calculadas usando la ecuación de Dick y Peschke (Referencia “c”) que permite estimar la magnitud de la lluvia para una determinada duración de tormenta a partir de la magnitud de la lluvia correspondiente a una duración de 24 horas. Los cálculos de la magnitud de las lluvias de diseño utilizaron los valores de precipitaciones máximas en 24 horas mostrados en la Tabla 4.5 que corresponden a lluvias medias areales de la cuenca hasta la estación Socsi.

Ecuacion de Dick y Peschke:

$$Pd = Pd_{24} * (Tc/1440)^{0,25}$$

Donde:

Pd = Precipitacion maxima para una duracion “d”

Pd₂₄= Precipitacion maxima de 24 horas

Tc= Tiempo de Concentracion (minutos)

Cuadro N° 4.10. Precipitaciones Máximas para Duraciones de Tormenta de 10 horas (mm), según Dick - Peschke

T [Años]	Pp Areal Max 24 Horas [mm]	Pp Max [mm]
2	18.6	16.81
5	25.5	23.04
10	30.3	27.38
25	37.3	33.70
50	43.1	38.95
100	49.4	44.64

Las precipitaciones máximas diarias para los periodos de retorno de 2, 5, 10, 25, 50 y 100 años son de 19, 26, 30, 37, 43 y 49 mm respectivamente, y para una duración de tormenta de 10 horas le corresponden precipitaciones de 17, 23, 27, 34, 39 y 45 mm respectivamente.

En el estudio citado en párrafos anteriores (Estudio de la Hidrología del Perú, 1982), para una frecuencia de intervalos de 1 hora en una duración de tormenta máxima para 10 horas, se tiene la distribución de intensidades, ver Cuadro N° 4.11.

Cuadro N° 4.11. Histograma para diferentes Periodos de Retorno, Duración de Tormenta de 10 horas

T [Años]	Hora										PP total [mm]
	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	
2	1	2	2	3	2	2	2	1	1	1	16.81
5	1	2	3	4	3	3	2	2	1	1	23.04
10	1	2	4	5	4	3	3	2	2	1	27.38
25	2	3	4	6	5	4	3	3	2	1	33.70
50	2	4	5	7	5	5	4	3	2	2	38.95
100	2	4	6	8	6	5	4	4	3	2	44.64

Elección del Número de Curva

Cuando se tiene registros de hidrogramas de máximas avenidas y hietogramas de tormentas que ocurrieron en el mismo periodo de tiempo, los números de curva pueden ser estimados mediante calibración.

Típicamente, la selección del número de curva (CN) se realiza basandose en grupo hidrológico del suelo y en la descripción del uso de terreno. Los grupos hidrológicos que considera la metodología son:

Grupo A: Arena profunda, suelos profundos depositados por el viento, limos agregados.

Grupo B: Suelos poco profundos depositados por el viento, marga arenosa.

Grupo C: Margas arcillosas, margas arenosas poco profundas, suelos con alto contenido de arcilla.

Grupo D: Suelos expansivos, arcillas altamente plásticas.

En el Cuadro N° 4.12 se presentan los números de curva (CN) en función de los grupos hidrológicos del suelo y el uso de la tierra.

Cuadro N° 4.12. Curva Numero (CN) en Función del Uso del Suelo y del Grupo Hidrológico del Suelo

Uso del Suelo		Grupo hidrológico del suelo				
		A	B	C	D	
Tierras cultivadas	sin tratamiento de conservación	72	81	88	91	
	con tratamiento de conservación	62	71	78	81	
Pastizales	condiciones pobres	68	79	86	89	
	condiciones óptimas	39	61	74	80	
Praderas (Vegas de ríos: condiciones óptimas)		30	58	71	78	
Bosques	troncos delgados, cubierta pobre, sin hierbas	45	66	77	83	
	cubierta buena	25	55	70	77	
Espacios abiertos, césped, parques, campos de golf, cementerios, etc.	óptimas condiciones: cubierta de pasto en el 75% o más	39	61	74	80	
	condiciones aceptables: cubierta de pasto en el 50 al 75%	49	69	79	84	
Áreas comerciales de negocios (85% impermeables)		89	92	94	95	
Zonas industriales (72% impermeables)		81	88	91	93	
Zonas residenciales	Tamaño lote (m ²)	% impermeable				
	500	65	77	85	90	92
	1000	38	61	75	83	87
	1350	30	57	72	81	86
	2000	25	54	70	80	85
Parqueaderos pavimentados, techos, accesos, etc.	4000	20	51	68	79	84
	pavimentados con cunetas y alcantarillados		98	98	98	98
	Calles y carreteras	grava	76	85	89	91
		tierra	72	82	87	89

Fuente:

El número de curva adoptado resultó de un proceso de calibración donde el valor fue ajustado para producir descargas pico similares a las máximas descargas diarias. Siguiendo este procedimiento se obtuvo un número de curva de 79, este valor es similar a los números de curva obtenidos en cuencas vecinas.

4.2.4.2 Modelamiento con el Programa HEC – HMS

El modelo HEC-HMS fue creado por el centro de Ingeniería Hidrológica del Cuerpo de Ingenieros del Ejército de los EEUU. El modelo cuenta con una variedad de opciones para simular procesos de precipitación – escorrentía a nivel eventual, continuo, tránsito de avenidas, etc. (Referencia “e”).

El modelo HEC-HMS comprende una interfaz gráfica para el usuario (GUI), componentes de análisis hidrológicos, capacidades para manejo y almacenamiento de datos, y facilidades para expresar los resultados mediante gráficas y reportes tabulados. Cuenta asimismo con una guía que provee los medios necesarios para especificar los

componentes de la cuenca, introducir los respectivos datos de estos componentes y para visualizar los resultados .

Modelo de cuenca Sosci.- Para estimar las perdidas se utilizó el método del Número de la Curva del SCS, para la transformación de la precipitación efectiva en caudal se utilizó el método del Hidrograma Unitario del SCS. Las estimaciones de caudal se realizaron para un tamaño de cuenca de 5676 km².

Modelo Meteorológico.- De acuerdo a lo calculado en el ítem. N° 3.2 Análisis de la Información Pluviométrica y Ley de Frecuencias, el modelo meteorológico se ingresan los hietogramas para la avenida de 2, 5, 10, 25, 50 y 100 años, para una duración de tormenta de 10 horas.

Especificaciones de Control.- Para realizar la simulación de la avenida se especifica una fecha de inicio y final dentro de este rango se presentaran los resultados de la simulación y el hidrograma de avenida, para este caso la fecha de inicio es el 04 de febrero del 2010 a las 00:00 horas y la fecha de fin es el 06 de febrero del 2010 a las 12:00 pm. Según las recomendaciones del Manual de Referencias Técnicas del modelo HEC-HMS, el mínimo intervalo de tiempo computacional se calcula como 0.29 veces el tiempo de retardo de la cuenca. Aproximando el tiempo de retardo como 0.6 veces el tiempo de concentración, se obtiene un tiempo de retardo de 9.52 horas y un mínimo intervalo de tiempo computacional de 2.72 horas. Con un criterio conservador se ha empleado un intervalo de tiempo computacional de 1 hora.

Calibración del Modelo. Dado que no existían registros simultáneos de hietogramas de tormentas e hidrogramas de caudales que permitirían calibrar los parámetros del modelo para efectuar predicciones, el modelo fue calibrado basado en información de las máximas descargas diarias estimadas.

Como se mencionó anteriormente, el concepto de la calibración fue ajustar un número de curva que produzca valores de descargas pico similares a las máximas descargas diarias estimadas. Este

procedimiento fue aplicado para estimar descargas menores de 900 m³/s, que, como fue mencionado en la sección 4.2.3, es la máxima descarga que puede ser medida en la estación hidrográfica Sosci. Siguiendo este procedimiento se obtuvo un número de curva de 79 para la cuenca.

En la Figura N° 4.9 se muestra la cuenca considerada por el modelo HEC-HMS para la simulación. En las Figuras No. 4.10 a 4.21 se muestran los resultados de las simulaciones para las avenidas de 2, 5, 10, 25, 50 y 100 años de periodo de retorno.

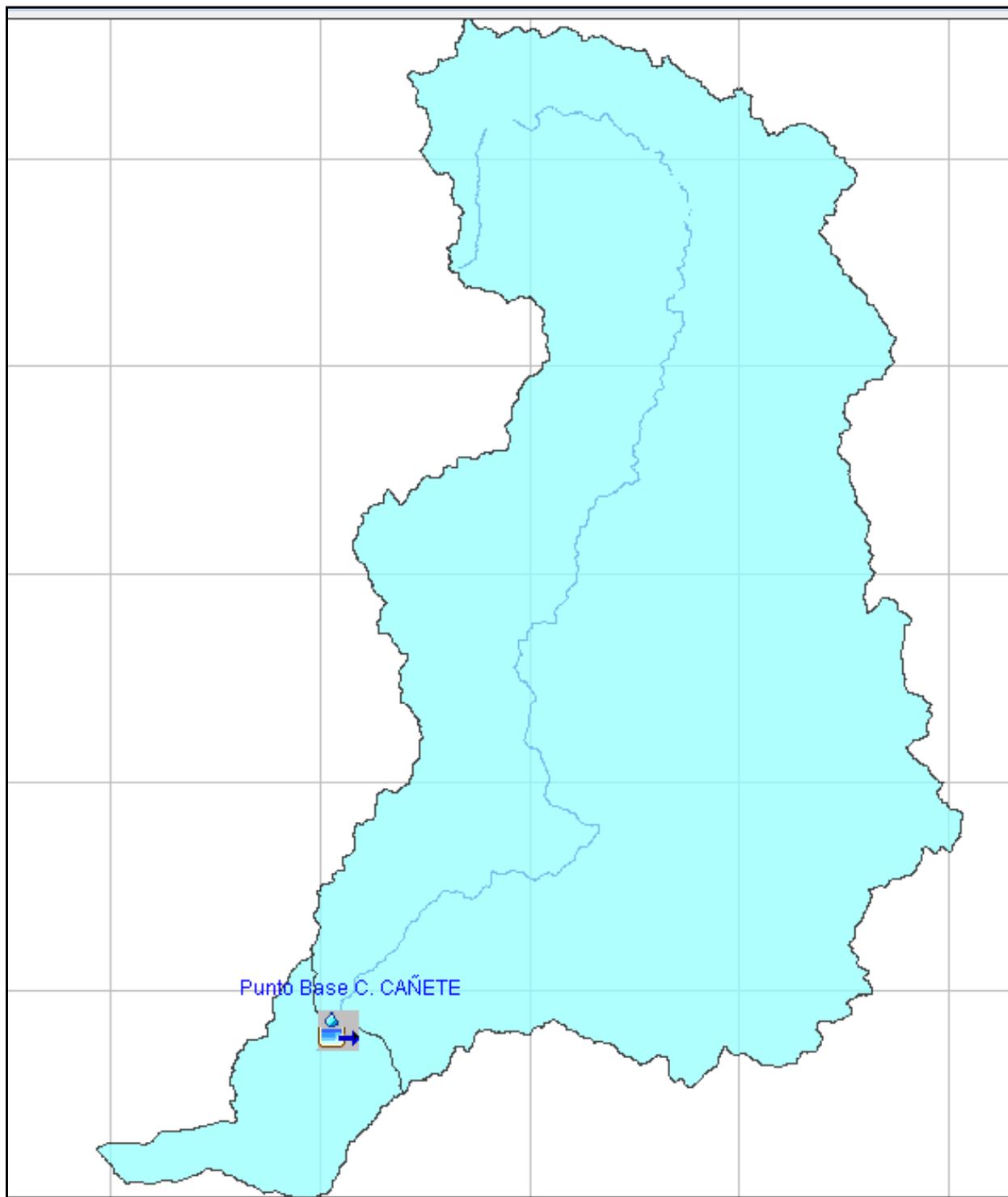


Figura N° 4.9. Modelo de Cuenca del río Cañete en el Software HEC-HMS

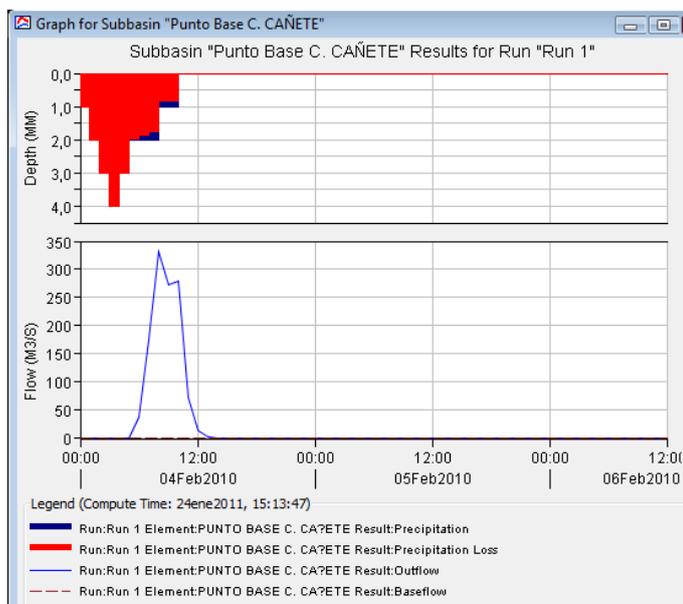


Figura N° 4.10. Hidrograma de Avenida del Modelo Precipitación – Escorrentía de la Cuenca del río Cañete, Periodo de Retorno de 2 años

En la parte superior de la Figura 4.10 se muestra el hietograma de diseño, la porción en rojo corresponde a la lluvia infiltrada, la porción en azul corresponde a la lluvia efectiva. La infiltración ha sido calculada con el programa HEC-HMS empleando el método del Número de la Curva de antiguo Servicio de Conservación de Suelos de los Estados Unidos.

La tormenta analizada como precipitación luego de un proceso de infiltración se traslada como escorrentía y termina su escurrimiento luego de casi 13 horas de su inicio.

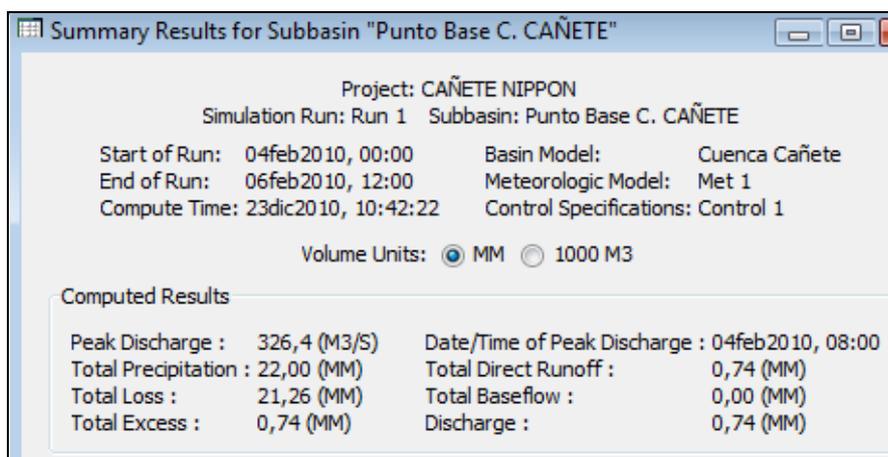


Figura N° 4.11.Resultado de la Simulación del Modelo Precipitación – Escorrentía de la Cuenca del río Cañete, Periodo de Retorno de 5 años

En la Figura N° 4.11 se tiene el caudal máximo calculado para un periodo de retorno de 2 años de 330.9 m³/s. La descarga máxima pasa aproximadamente a las 08 horas después de iniciada la tormenta en el tributario (para las condiciones extremas antes definidas).

En el Cuadro N° 4.13 se presenta los valores del hidrograma de la avenida de un periodo de retorno de 2 años

Cuadro N° 4.13. Hidrograma de Avenidas Generado con el Modelo HEC-HMS para un Periodo de Retorno de 2 Años

Fecha	hora	Precipitación (mm)	Perdida (mm)	Exceso (mm)	Escorrentía (m3/s)
04-Feb-10	00:00				0,0
04-Feb-10	01:00	1,00	1,00	0,00	0,0
04-Feb-10	02:00	2,00	2,00	0,00	0,0
04-Feb-10	03:00	3,00	3,00	0,00	0,0
04-Feb-10	04:00	4,00	4,00	0,00	0,0
04-Feb-10	05:00	3,00	3,00	0,00	0,0
04-Feb-10	06:00	2,00	1,97	0,03	38,0
04-Feb-10	07:00	2,00	1,86	0,14	174,3
04-Feb-10	08:00	2,00	1,76	0,24	330,9
04-Feb-10	09:00	1,00	0,84	0,16	271,9
04-Feb-10	10:00	1,00	0,82	0,18	278,3
04-Feb-10	11:00	0,00	0,00	0,00	71,9
04-Feb-10	12:00	0,00	0,00	0,00	13,5
04-Feb-10	13:00	0,00	0,00	0,00	2,3
04-Feb-10	14:00	0,00	0,00	0,00	0,0

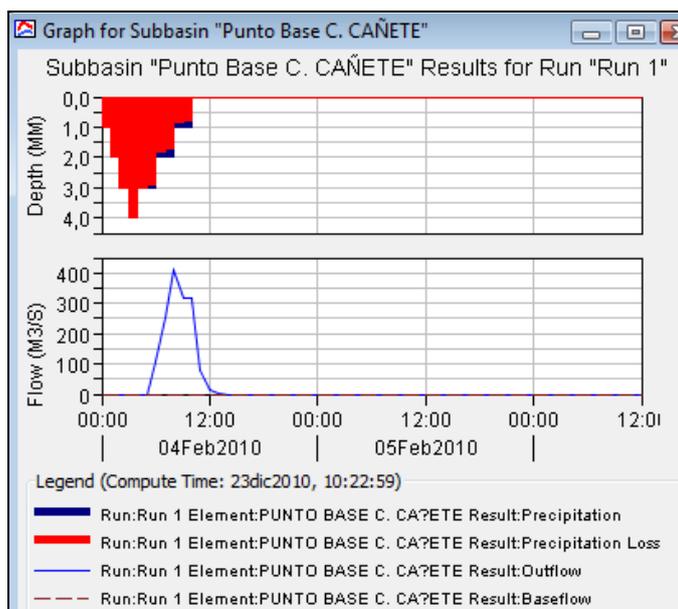


Figura N° 4.12. Hidrograma de Avenida del Modelo Precipitación – Escorrentía de la Cuenca del río Cañete, Periodo de Retorno de 5 años

La tormenta analizada como precipitación luego de un proceso de infiltración se traslada como escorrentía y termina su escurrimiento luego de casi 13 horas de su inicio.

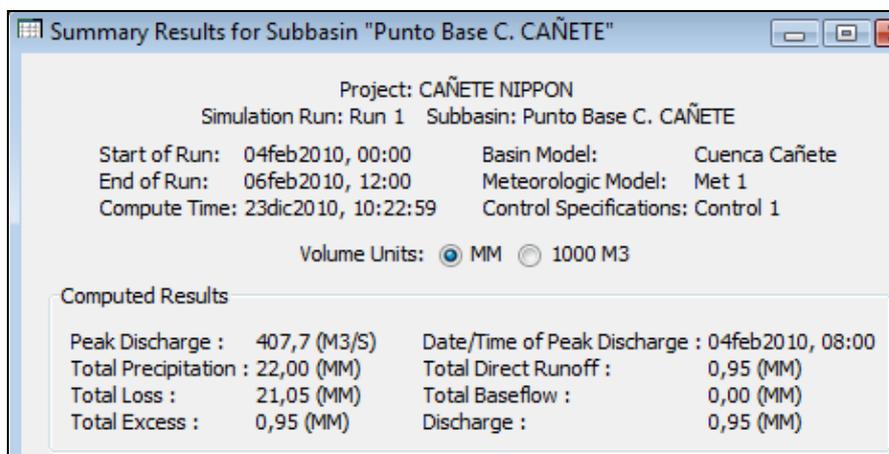


Figura N° 4.13. Resultado de la Simulación del Modelo Precipitación – Escorrentía de la Cuenca del río Cañete, Periodo de Retorno de 5 años

En la Figura N° 4.13 se tiene el caudal máximo calculado para un periodo de retorno de 5 años de 407.7 m³/s. La descarga máxima pasa aproximadamente a las 08 horas después de iniciada la tormenta en el tributario (para las condiciones extremas antes definidas).

En el Cuadro N° 4.14 se presenta los valores del hidrograma de la avenida de un periodo de retorno de 5 años.

Cuadro N° 4.14. Hidrograma de Avenidas Generado con el Modelo HEC-HMS para un Periodo de Retorno de 5 Años

Fecha	hora	Precipitacion (mm)	Perdida (mm)	Exceso (mm)	Escorrentia (m3/s)
04-Feb-10	00:00				0,0
04-Feb-10	01:00	1,00	1,00	0,00	0,0
04-Feb-10	02:00	2,00	2,00	0,00	0,0
04-Feb-10	03:00	3,00	3,00	0,00	0,0
04-Feb-10	04:00	4,00	4,00	0,00	0,0
04-Feb-10	05:00	3,00	3,00	0,00	0,0
04-Feb-10	06:00	3,00	2,91	0,09	104,2
04-Feb-10	07:00	2,00	1,81	0,19	253,8
04-Feb-10	08:00	2,00	1,71	0,29	407,7
04-Feb-10	09:00	1,00	0,82	0,18	318,0
04-Feb-10	10:00	1,00	0,80	0,20	314,7
04-Feb-10	11:00	0,00	0,00	0,00	81,0
04-Feb-10	12:00	0,00	0,00	0,00	15,2
04-Feb-10	13:00	0,00	0,00	0,00	2,6
04-Feb-10	14:00	0,00	0,00	0,00	0,0

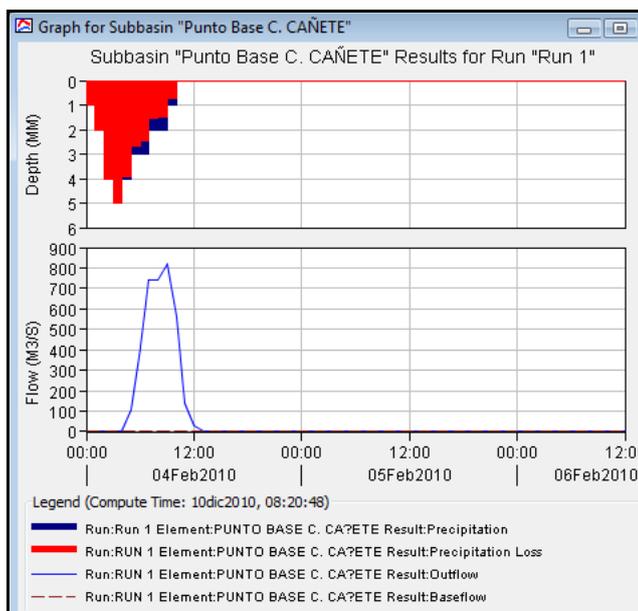


Figura N° 4.14. Hidrograma de Avenida del Modelo Precipitación – Escorrentía de la Cuenca del río Cañete, Periodo de Retorno de 10 años

La tormenta analizada como precipitación luego de un proceso de infiltración se traslada como escorrentía y termina su escurrimiento luego de casi 13 horas de su inicio.

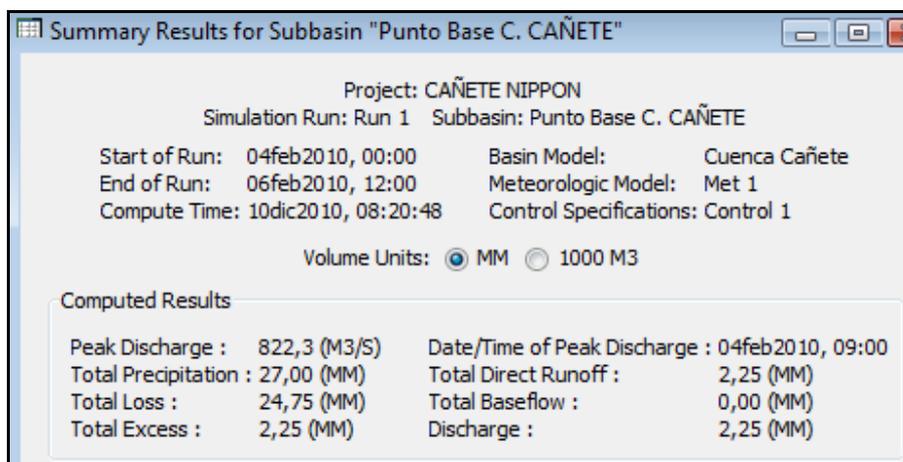


Figura N° 4.15.Resultado de la Simulación del Modelo Precipitación – Escorrentía de la Cuenca del río Cañete, Periodo de Retorno de 10 años

En la Figura N° 4.15 se tiene el caudal máximo calculado para un periodo de retorno de 10 años de 822.3 m³/s. La descarga máxima pasa aproximadamente a las 09 horas después de iniciada la tormenta en el tributario (para las condiciones extremas antes definidas.).

En el Cuadro N° 4.15 se presenta los valores del hidrograma de la avenida de un periodo de retorno de 10 años.

Cuadro N° 4.15. Hidrograma de Avenidas Generado con el Modelo HEC-HMS para un Periodo de Retorno de 10 Años

Fecha	hora	Precipitación (mm)	Perdida (mm)	Exceso (mm)	Escorrentía (m3/s)
04-Feb-10	00:00				0,0
04-Feb-10	01:00	1,00	1,00	0,00	0,0
04-Feb-10	02:00	2,00	2,00	0,00	0,0
04-Feb-10	03:00	4,00	4,00	0,00	0,0
04-Feb-10	04:00	5,00	5,00	0,00	0,0
04-Feb-10	05:00	4,00	3,91	0,09	104,2
04-Feb-10	06:00	3,00	2,68	0,32	409,6
04-Feb-10	07:00	3,00	2,46	0,54	740,0
04-Feb-10	08:00	2,00	1,54	0,46	739,6
04-Feb-10	09:00	2,00	1,46	0,54	822,3
04-Feb-10	10:00	1,00	0,70	0,30	561,2
04-Feb-10	11:00	0,00	0,00	0,00	138,0
04-Feb-10	12:00	0,00	0,00	0,00	26,1
04-Feb-10	13:00	0,00	0,00	0,00	3,8
04-Feb-10	14:00	0,00	0,00	0,00	0,0

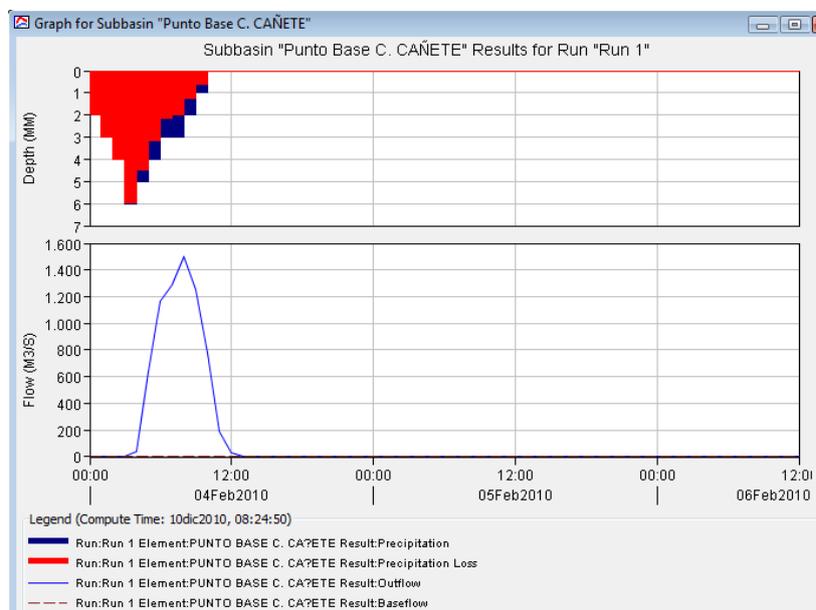


Figura N° 4.16. Hidrograma de Avenida del Modelo Precipitación – Escorrentía de la Cuenca del río Cañete, Periodo de Retorno de 25 años

La tormenta analizada como precipitación luego de un proceso de infiltración se traslada como escorrentía y termina su escurrimiento luego de casi 13 horas de su inicio.

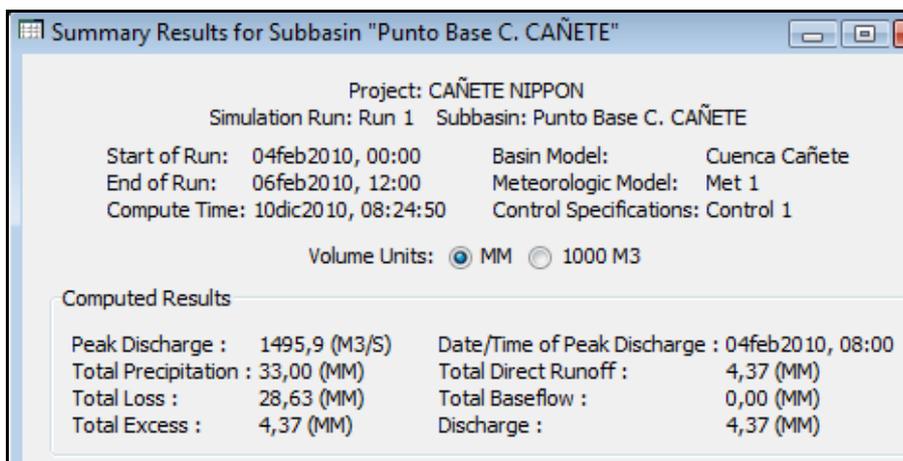


Figura N° 4.17. Resultado de la Simulación del Modelo Precipitación – Escorrentía de la Cuenca del río Cañete, Periodo de Retorno de 25 años

En la Figura N° 4.17 se tiene el caudal máximo calculado para un periodo de retorno de 25 años de 1495.9 m³/s. La descarga máxima pasa aproximadamente a las 08 horas después de iniciada la tormenta en el tributario (para las condiciones extremas antes definidas.).

En el Cuadro N° 4.16 se presenta los valores del hidrograma de la avenida de un periodo de retorno de 25 años.

Cuadro N° 4.16. Hidrograma de Avenidas Generado con el Modelo HEC-HMS para un Periodo de Retorno de 25 Años

Fecha	hora	Precipitacion (mm)	Perdida (mm)	Exceso (mm)	Escorrentia (m3/s)
04-Feb-10	00:00				0,0
04-Feb-10	01:00	2,00	2,00	0,00	0,0
04-Feb-10	02:00	3,00	3,00	0,00	0,0
04-Feb-10	03:00	4,00	4,00	0,00	0,0
04-Feb-10	04:00	6,00	5,97	0,03	38,0
04-Feb-10	05:00	5,00	4,46	0,54	640,5
04-Feb-10	06:00	4,00	3,16	0,84	1164,8
04-Feb-10	07:00	3,00	2,16	0,84	1290,7
04-Feb-10	08:00	3,00	2,01	0,99	1495,9
04-Feb-10	09:00	2,00	1,26	0,74	1254,5
04-Feb-10	10:00	1,00	0,61	0,39	774,7
04-Feb-10	11:00	0,00	0,00	0,00	188,5
04-Feb-10	12:00	0,00	0,00	0,00	34,7
04-Feb-10	13:00	0,00	0,00	0,00	5,0
04-Feb-10	14:00	0,00	0,00	0,00	0,0

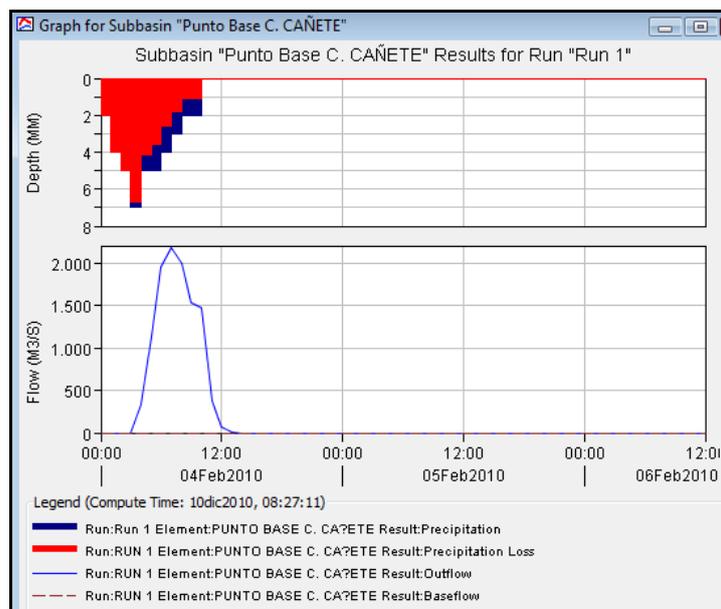


Figura N° 4.18. Hidrograma de Avenida del Modelo Precipitación – Escorrentía de la Cuenca del río Cañete, Periodo de Retorno de 50 años

La tormenta analizada como precipitación luego de un proceso de infiltración se traslada como escorrentía y termina su escurrimiento luego de casi 13 horas de su inicio.

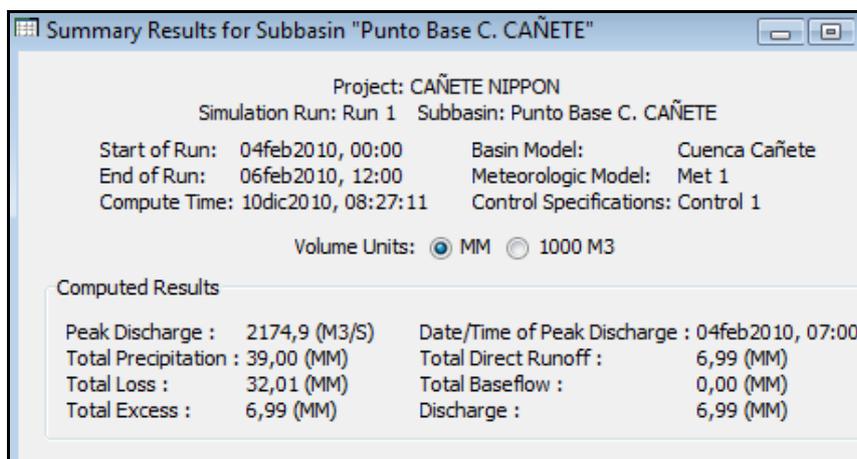


Figura N° 4.19.Resultado de la Simulación del Modelo Precipitación – Escorrentía de la Cuenca del río Cañete, Periodo de Retorno de 50 años

En la Figura N° 4.19 se tiene el caudal máximo calculado para un periodo de retorno de 50 años de 2174.9 m³/s. La descarga máxima pasa aproximadamente a las 08 horas después de iniciada la tormenta en el tributario (para las condiciones extremas antes definidas.).

En el Cuadro N° 4.17 se presenta los valores del hidrograma de la avenida de un periodo de retorno de 50 años.

Cuadro N° 4.17. Hidrograma de Avenidas Generado con el Modelo HEC-HMS para un Periodo de Retorno de 50 Años

Fecha	hora	Precipitación (mm)	Perdida (mm)	Exceso (mm)	Escorrentía (m3/s)
04-Feb-10	00:00				0,0
04-Feb-10	01:00	2,00	2,00	0,00	0,0
04-Feb-10	02:00	4,00	4,00	0,00	0,0
04-Feb-10	03:00	5,00	5,00	0,00	0,0
04-Feb-10	04:00	7,00	6,72	0,28	328,8
04-Feb-10	05:00	5,00	4,11	0,89	1134,8
04-Feb-10	06:00	5,00	3,61	1,39	1939,8
04-Feb-10	07:00	4,00	2,58	1,42	2174,9
04-Feb-10	08:00	3,00	1,79	1,21	1987,0
04-Feb-10	09:00	2,00	1,13	0,87	1531,7
04-Feb-10	10:00	2,00	1,08	0,92	1464,5
04-Feb-10	11:00	0,00	0,00	0,00	374,7
04-Feb-10	12:00	0,00	0,00	0,00	70,7
04-Feb-10	13:00	0,00	0,00	0,00	11,9
04-Feb-10	14:00	0,00	0,00	0,00	0,0
04-Feb-10	15:00	0,00	0,00	0,00	0,0

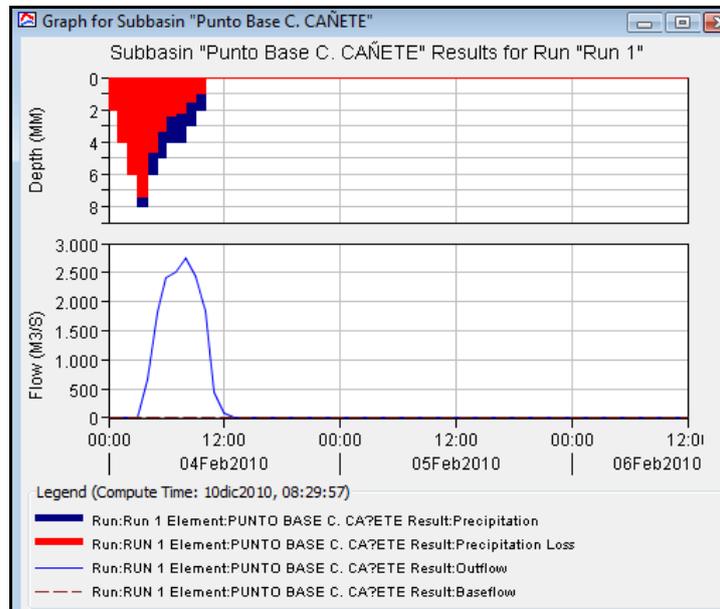


Figura N° 4.20. Hidrograma de Avenida del Modelo Precipitación – Escorrentía de la Cuenca del río Cañete, Periodo de Retorno de 100 años

La tormenta analizada como precipitación luego de un proceso de infiltración se traslada como escorrentía y termina su escurrimiento luego de casi 13 horas de su inicio.

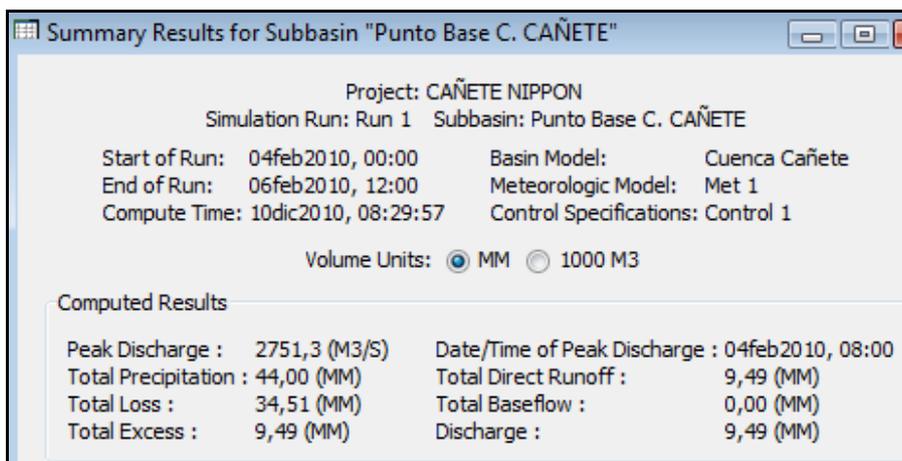


Figura N° 4.21. Resultado de la Simulación del Modelo Precipitación – Escorrentía de la Cuenca del río Cañete, Periodo de Retorno de 100 años

En la Figura N° 4.21 se tiene el caudal máximo calculado para un periodo de retorno de 100 años de 2751.3 m³/s. La descarga máxima pasa aproximadamente a las 08 horas después de iniciada la tormenta en el tributario (para las condiciones extremas antes definidas.).

En el Cuadro N° 4.18 se presenta los valores del hidrograma de la avenida de un periodo de retorno de 100 años.

Cuadro N° 4.18. Hidrograma de Avenidas Generado con el Modelo HEC-HMS para un Periodo de Retorno de 100 Años

Fecha	hora	Precipitación (mm)	Perdida (mm)	Exceso (mm)	Escorrentia (m3/s)
04-Feb-10	00:00				0,0
04-Feb-10	01:00	2,00	2,00	0,00	0,0
04-Feb-10	02:00	4,00	4,00	0,00	0,0
04-Feb-10	03:00	6,00	6,00	0,00	0,0
04-Feb-10	04:00	8,00	7,43	0,57	667,9
04-Feb-10	05:00	6,00	4,62	1,38	1805,1
04-Feb-10	06:00	5,00	3,35	1,65	2421,6
04-Feb-10	07:00	4,00	2,41	1,59	2500,2
04-Feb-10	08:00	4,00	2,20	1,80	2751,3
04-Feb-10	09:00	3,00	1,53	1,47	2433,6
04-Feb-10	10:00	2,00	0,97	1,03	1825,9
04-Feb-10	11:00	0,00	0,00	0,00	456,0
04-Feb-10	12:00	0,00	0,00	0,00	85,4
04-Feb-10	13:00	0,00	0,00	0,00	13,3
04-Feb-10	14:00	0,00	0,00	0,00	0,0

4.3 Resultados de la Simulación, Caudales Máximos en el Punto Base

La Tabla 4.20 resume los caudales pico para diferentes periodo de retorno obtenidos con la aplicación del software HEC-HMS para la cuenca del río Cañete hasta la ubicación de la estación hidrométrica Socsi.

De la aplicación del software HEC-HMS para el modelamiento de la Precipitación – escorrentía en la cuenca del río Cañete descrito en el ítem 4.2.4., se tiene como resumen los resultados de los caudales máximos para cada periodo de retorno en el punto base (estación Socsi) y se muestran en el Cuadro N° 4.19.

Cuadro N° 4.19. Resumen de los Caudales Máximos en el Punto Base para cada Periodo de Retorno

T [Años]	Q [m³/s]
2	331.0
5	407.7
10	822.3
25	1,495.9
50	2,174.9
100	2,751.3

Los caudales máximos en el punto base obtenidos con el modelo HEC-HMS para los periodos de retorno de 2, 5, 10, 25, 50 y 100 años han sido estimados a partir de las precipitaciones máximas generadas para estos periodos de retorno, un numero de curva y parámetros geomorfológicos de la cuenca. Estos caudales máximos han sido obtenidos con un mismo número de curva (igual a 79).

Tal como se consideró en el proceso de calibración, se observa que las descargas pico obtenidas con el modelo HEC-HMS para avenidas de bajo periodo de retorno son similares a las máximas descargas diarias mostradas en la Tabla 4.8.

V. REFERENCIAS

- a) Asociación BCEOM-SOFI CONSULT S.A., “Estudio Hidrológico – Meteorológico en la Vertiente del Pacífico del Perú con Fines de Evaluación y Pronóstico del Fenómeno El Niño para Prevención y Mitigación de Desastres”, 1999.
- b) Chow, Maidment and Mays, “Hidrología Aplicada”,1994.
- c) Guevara, “Hidrología Ambiental”, 1991.
- d) IILA-SENAMHI-UNI, “Estudio de la Hidrología del Perú”, 1982.
- e) U.S. Corp of Engineers, “Manual de Referencias Técnicas del Modelo HEC-HMS”, 2000.



Agencia de Cooperación Internacional
Del Japón



**PROGRAMA DE PROTECCION DE VALLES Y POBLACIONES
RURALES Y VULNERABLES ANTE INUNDACIONES
EN
LA REPUBLICA DEL PERU**

**HIDROLOGIA DE MAXIMAS AVENIDAS DEL
RIO CAÑETE**

Apéndice-2

ANEXOS

Diciembre de 2012



