

UNIVERSIDAD NACIONAL DE SAN CRISTÓBAL DE
HUAMANGA

FACULTAD DE INGENIERÍA DE MINAS GEOLOGÍA Y CIVIL

ESCUELA PROFESIONAL DE INGENIERÍA CIVIL



TESIS.

VALIDACIÓN DE CAUDALES MÁXIMOS A PARTIR DE PRECIPITACIÓN
ESTIMADA POR PERCEPCIÓN REMOTA

PARA OPTAR EL TÍTULO PROFESIONAL DE INGENIERO CIVIL

ELABORADO POR:

EDMUNDO PRADO BARZOLA

ASESOR:

ING. EDMUNDO CANCHARI GUTIÉRREZ

AYACUCHO - PERÚ

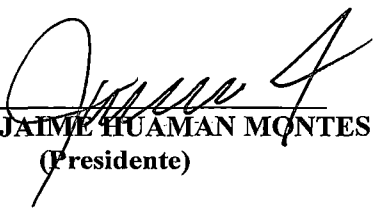
2015

CIV 444
Proa
E 1


**“VALIDACIÓN DE CAUDALES MÁXIMOS A PARTIR DE PRECIPITACIÓN
ESTIMADA POR PERCEPCIÓN REMOTA”**

RECOMENDADO : 07 DE DICIEMBRE DEL 2015


APROBADO : 23 DE DICIEMBRE DEL 2015



Dr. Ing. JAIME HUAMAN MONTES
(Presidente)



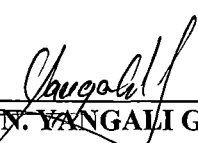
Ing. CRISTIAN CASTRO PÉREZ
(Miembro)



MSc. Ing. JAIME L. BENDEZÚ PRADO
(Miembro)

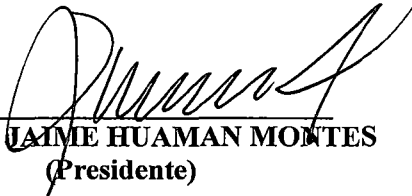


MSc. Ing. EDMUNDO CANCHARI GUTIÉRREZ
(Miembro)

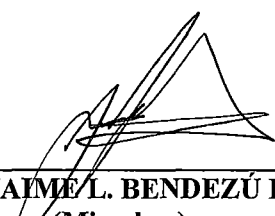


Ing. FLORON N. YANGALI GUERRA
(Secretario Docente)


Según el acuerdo constatado en el Acta, levantada el 23 de diciembre del 2015, en la Sustentación de Tesis presentado por el Bachiller Edmundo PRADO BARZOLA, con la Tesis Titulado "VALIDACIÓN DE CAUDALES MÁXIMOS A PARTIR DE PRECIPITACIÓN ESTIMADA POR PERCEPCIÓN REMOTA", fue calificado con la nota de DIECISÉIS (16) por lo que se da la respectiva APROBACIÓN.


Dr. Ing. JAIIME HUAMAN MONTES
(Presidente)


Ing. CRISTIAN CASTRO PÉREZ
(Miembro)


MSc. Ing. JAIIME L. BENDEZÚ PRADO
(Miembro)


MSc. Ing. EDMUNDO CANCHARI GUTIÉRREZ
(Miembro)


Ing. FLORO N. YANGALI GUERRA
(Secretario Docente)

Dedicatoria

*A mi madre y hermanos, una pequeña retribución
en una deuda infinita.*

Agradecimientos

En forma especial a mi querida madre, hermanos y a Karina, por su apoyo incondicional y permanente en mi formación personal y académica.

A mi alma máter Universidad Nacional de San Cristóbal de Huamanga, cuna de mi formación profesional.

A la Escuela de Formación Profesional de Ingeniería Civil, en especial a cada uno de los docentes que laboran en ella por sus invaluables aportes en mi formación académica.

Al Ingeniero Edmundo Canchari Gutierrez, por el gran apoyo y asesoramiento para realizar esta tesis bajo su dirección.

Gracias a todas y cada una de las personas que participaron en la investigación realizada, ya que invirtieron su tiempo y conocimientos para ayudarme y completar mi proyecto de tesis.

A la comunidad de usuarios para la Composición de Textos Científicos con \LaTeX y $\text{\LaTeX}2_{\epsilon}$, al grupo que mantiene la distribución “ \MiKTeX ” y a los creadores de “ \TeXStudio ” -los cuales permiten, cuando se escribe un texto, centrarse exclusivamente en el contenido(fondo) sin tener que preocuparse de los detalles del formato.

Índice general

Dedicatoria	I
Dedicatoria	I
Agradecimientos	II
Índice general	III
Índice de tablas	VIII
Índice de figuras	X
Resumen	XIV
Introducción	1
Capítulo I: Generalidades	3
1.1. Antecedentes bibliográficos	3
1.1.1. Antecedentes a nivel nacional	3
1.1.2. Estudios realizados a nivel internacional	4
1.1.3. Instituciones nacionales	5
1.2. Descripción de la realidad problemática	5
1.3. Formulación del problema	6
1.3.1. Problema principal	6
1.3.2. Problemas secundarios	6
1.4. Justificación e importancia de la investigación	7
1.5. Objetivos	7
1.5.1. Objetivos Generales	7

1.5.2. Objetivos Específicos	8
1.6. Hipótesis	8
1.6.1. Hipótesis principal	8
1.6.2. Hipótesis secundarios	8
1.7. Variables e indicadores	9
1.7.1. Variables	9
1.7.2. Indicadores	9
1.8. Unidad de análisis	10
1.9. Tipo y nivel de investigación	10
1.10. Periodo de análisis	10
1.11. Fuentes de información e instrumentos utilizados	11
1.11.1. Fuentes de información	11
1.12. Técnicas de recolección y procesamiento de datos	11
1.12.1. Recolección de datos	12
1.12.2. Procesamiento de datos	12
Capítulo II: Marco teórico	13
2.1. Principios básicos de teledetección	13
2.1.1. Definición	13
2.1.2. Elementos del proceso de teledetección	14
2.1.3. El espectro electromagnético en teledetección	15
2.1.4. Reflectancia de las superficies terrestres	16
2.1.5. Características orbitales de los satélites de teledetección	17
2.1.6. Tipos de sensores	18
2.1.7. Resolución de los sensores remotos	19
2.1.8. Tipos de imágenes de teledetección	21
2.2. TRMM y GPM	22
2.2.1. Panorama del TRMM	22
2.2.2. Panorama del GPM	26
2.3. Estadística hidrológica y análisis de frecuencia	27
2.3.1. Pruebas de bondad de ajuste	28
2.3.2. Distribuciones de probabilidad para las variables hidrológicas	28
2.3.3. Periodo de retorno	29

2.4.	Tormentas de diseño	31
2.4.1.	Relaciones Intensidad-Duración-Frecuencia	31
2.4.2.	Análisis de intensidades de la tormenta de diseño	32
2.5.	Precipitación efectiva	34
2.5.1.	Método de Green-Ampt	34
2.5.2.	Método SCS para las abstracciones	35
2.6.	Hidrograma unitario sintético	38
2.6.1.	Hidrograma unitario sintético de Snyder	39
2.6.2.	Hidrograma adimensional de SCS	40
2.6.3.	Hidrograma unitario de Clark	41
2.7.	Tránsito hidrológico de avenidas	43
2.7.1.	Método de Muskingun	43
2.7.2.	Método de Muskingun-Cunge	45
Capítulo III: Desarrollo del trabajo de la tesis		47
3.1.	Identificación de la población	47
3.1.1.	Unidad muestral	47
3.1.2.	Unidad de Análisis	47
3.1.3.	Delimitación de la población	48
3.2.	Determinación de la muestra	48
3.2.1.	Cálculo de la muestra	49
3.3.	Delimitación del área de estudio	50
3.3.1.	Ubicación	50
3.4.	Caracterización de la cuenca	53
3.4.1.	Parámetros de forma	53
3.4.2.	Parámetros de relieve	56
3.4.3.	Parámetros de la red hidrográfica	57
3.5.	Identificación de las estaciones meteorológicas	58
3.6.	Producto 3B42 V7 diario del TRMM	60
3.6.1.	Acceso a los datos	60
3.6.2.	Registro de precipitaciones en estaciones sintéticas	61
3.6.3.	Comparación gráfica de precipitación máxima anual del producto 3B42 V7 del TRMM y SENAMHI	62

3.7. Análisis de consistencia y homogeneidad	63
3.7.1. Prueba estadística de Helmert para datos de SENAHMI	67
3.7.2. Prueba estadística de Helmert para datos de 3B42 TRMM	73
3.8. Validación del producto 3B42 V7 diario del TRMM	77
3.8.1. Generación de precipitación para las Subcuencas del Río Chacco	78
3.9. Generación de precipitación de diseño	83
3.9.1. Análisis estadístico de registro de precipitaciones	83
3.10. Obtención de caudales máximos	85
Capítulo IV: Análisis, resultado de la investigación y contrastación de la hipótesis	90
4.1. Análisis	90
4.1.1. Confiabilidad	91
4.1.2. Validez	91
4.1.3. Objetividad	92
4.2. Resultados de la investigación	93
4.2.1. Método hidráulico (Verificación en la sección del Puente Chacco)	93
4.2.2. Método regional para el Perú (Wolfgang Trau)	97
4.2.3. Resumen de los caudales máximos por los diferentes métodos	97
4.3. Contrastación de hipótesis	98
4.3.1. Contrastación de hipótesis para las precipitaciones máximas estimadas	99
4.3.2. Contrastación de hipótesis para los caudales máximas estimadas: estación hidrométrica Puente Chacco	100
Conclusiones y recomendaciones	102
Conclusiones	102
Recomendaciones	105
Futuras investigaciones	105
Acrónimos	106
Bibliografía	107
Percepción remota	107

Hidrología superficial	108
Metodología de la investigación	108
Estadística	108
Anexo A. Estimación de la precipitación de diseño	109
Anexo B. Registro de precipitaciones (SENAMHI y TRMM)	110
Anexo C. Planos	111
Anexo D. Fotografías	112

Índice de tablas

2.1. Resumen de productos de precipitación del TRMM de Nivel -3	25
2.2. Resumen de Productos de Precipitación del GPM Nivel-3	27
2.3. Distribuciones de probabilidad para el ajuste de información hidrológica	30
2.4. Distribucion de lluvias de SCS	33
3.5. Cuadrantes contenidos para la cuenca del Río Chacco	51
3.6. Parámetros de forma de la Cuenca del Río Chacco	56
3.7. Parámetros de relieve de la Cuenca del Río Chacco	58
3.8. Parámetros de la red hidrográfica de la Cuenca del Río Chacco	58
3.9. Estaciones meteorológicas de la cuenca del Río Chacco	59
3.10. Estaciones sintéticas de la cuenca del Río Chacco	62
3.11. Test de Helmert para registro de precipitacion anual en al estación pluv. Huamanga	68
3.12. Test de Helmert para registro de precipitación anual en al estación pluv. Allpachaca	70
3.13. Test de Helmert para registro de precipitacion anual en al estación pluv. Chiara	70
3.14. Test de Helmert para registro de precipitacion anual en al estación pluv. Tambillo	72
3.15. Test de Helmert para registro de precipitacion anual en al estación sin- tética de: Huamanga, Quinoa, Wayllapampa y Tambillo	73
3.16. Test de Helmert para registro de precipitacion anual en al estación Sin- tética de Allpachaca	76
3.17. Test de Helmert para registro de precipitacion anual en al estación sin- tética de San Pedro de Cachi	77

3.18. Test de Helmert para registro de precipitación anual en la estación sintética de Chiara	78
3.19. combinaciones de las variables para el ajuste con regresión lineal múltiple	79
3.20. Estaciones meteorológicas y Sintéticas existentes y generadas para las subcuencas del Río Chacco	82
3.21. Precipitación máxima en 24 horas existente y generada para las subcuencas del Río Chacco	82
3.22. Precipitación máxima de 24 horas para diferentes periodos de retorno .	85
3.23. Numero de curva y tiempo de retraso	87
3.24. Resumen de caudal de máximas avenidas para todas las subcuencas y para la estación hidrométrica (Puente Chacco)	88
4.25. Niveles extremos de precipitación	92
4.26. combinación de variables y coeficiente de correlación	93
4.27. Ubicación de la estación Puente Chacco	93
4.28. Estimación de número de Manning, con datos de: aforo, batimetría y pendiente	95
4.29. Estimación de velocidad y caudal para los diferentes tirantes del Puente Chacco	96
4.30. Coeficientes de la ecuación regional de descargas en el Perú	97
4.31. Caudales obtenidos con el método regional para el Río Chacco (Puente Chacco)	99
4.32. Caudales máximos estimados por los diferentes métodos y referencia . .	99
4.33. Coeficiente de Pearson para las variables analizadas (solo los máximos de todas las estaciones)	100
4.34. Fuente: Elaboración propia	100
4.35. Coeficiente de Pearson para las variables analizadas	101

Índice de figuras

2.1. Elementos de un proceso de teledetección	15
2.2. Espectro electromagnético	16
2.3. Firma espectral	17
2.4. Ancho del barrido del satélite TMMM (Órbita no polar)	18
2.5. Órbita geoestacionaria y polar	18
2.6. Tipos de resolución de los sensores	19
2.7. Satélite TRMM	22
2.8. Precipitaciones media diaria	23
2.9. Instrumentos y plataformas de barrido del TRMM	24
2.10. Satélite principal y correlaciones de GPM	26
2.11. Curvas intensidad-duración-frecuencia para lluvia máxima en Chicago, Estados Unidos	32
2.12. Hidrogramas de lluvia de 24 horas del soil conservation service	34
2.13. Variables en el método de abstracciones de precipitaciones del SCS	36
2.14. Solución de las ecuaciones de escorentía del SCS	37
2.15. Hidrograma unitario sintético de Snyder. a) Hidrograma unitario estándar. b) Hidrograma unitario requerido	39
2.16. Hidrogramas unitarios sintéticos del Soil Conservation Service. a) Hidrograma adimensional y b) Hidrograma unitario triangular	41
2.17. Almacenamiento por prisma y por cuña en un tramo de un canal	44
3.18. Unidades de muestreo	48
3.19. Obtención del tamaño de la muestra	49
3.20. Ubicación Política de la Cuenca del Río Chacco dentro del departamento de Ayacucho	51

3.21. Cartografía - Cuadrantes Requeridos	52
3.22. Ubicación hidrográfica	53
3.23. Cuenca del Río Chacco con sus subcuencas referentes	54
3.24. Curva hipsométrica y polígono de frecuencias	57
3.25. Estaciones meteorológicas ubicadas dentro y fuera de la Cuenca del Río Chacco	60
3.26. Desacaga de los datos en la plataforma Giovanni	61
3.27. Estaciones pluviométricas y sintéticas ubicadas dentro y fuera de la Cuenca del Río Chacco	62
3.28. Registro de precipitación diaria para la estación Huamanga del producto 3B42 V7 del TRMM	63
3.29. Fuente: Tomado desde la Plataforma de GIOVANNI- TRMM	63
3.30. Series temporales de precipitación máxima anual de la estación Hua- manga (SENAMHI y 3B42 TRMM)	64
3.31. Series temporales de precipitación máxima anual de la estación Waylla- pampa (SENAMHI y 3B42 TRMM)	64
3.32. Series temporales de precipitación máxima anual de la estación Quinua (SENAMHI y 3B42 TRMM)	65
3.33. Series temporales de precipitación máxima anual de la estación San Pe- dro de Cachi (SENAMHI y 3B42 TRMM)	65
3.34. Series temporales de precipitación máxima anual de la estación Tambillo (SENAMHI y 3B42 TRMM)	66
3.35. Series temporales de precipitación máxima anual de la estación Chiara (SENAMHI y 3B42 TRMM)	66
3.36. Precipitación anual y promedio de la estación Huamanga	68
3.37. Precipitación anual y promedio de la estación Allpachaca	69
3.38. Precipitación anual y promedio de la estación Chiara	72
3.39. Precipitación anual y promedio de la estación Tambillo	74
3.41. Precipitación anual y promedio de la estación sintética de Allpachaca	74
3.40. Precipitación anual y promedio de la estación sintética de Huamanga, Wayllapampa y Tambillo	75

3.42. Precipitación anual y promedio de la estación sintética de San Pedro de Cachi	75
3.43. Precipitación anual y promedio de la estación sintética de Chiara	76
3.44. Precipitaciones máximas de todas las estaciones pluviométricas y sintéticas	79
3.45. Estaciones pluviométricas y sintéticas existentes y generadas para las sub cuencas del Rio Chacco	80
3.46. Ajuste mediante distribución Gumbel para la estación Huamanga	84
3.47. Ajuste mediante distribución LogNormal de 2 Parámetros para la estación Muyurina	84
3.48. Ajuste mediante distribución Normal para la estación Tambillo	85
3.49. Tormenta de diseño, estación Huamanga, periodo de retorno de 500 años	86
3.50. Red topológica de las Subcuencas del proyecto	88
3.51. Precipitación efectiva e hidrograma de escorrentía para la subcuenca Alameda para un Tr=500 Años	89
3.52. Hidrograma de máximas avenidas en el Puente Chacco para Tr=500 Años	89
4.53.	91
4.54. Nivel de precipitación obtenida (conjunto de validación)	92
4.55. Ubicación de la estación hidrométrica del Puente Chacco	94
4.56. Puente Chacco punto de verificación de: caudal de máxima avenida	95
4.57. Puente Chacco en las diferentes condiciones de estimación de caudal máximo	96
4.58. Mapa de Regionalización de Avenidas del Perú	98
4.59. Relación de precipitación máxima de todas las estaciones (SENAMHI) y las obtenidas	100
4.60. Registro de precipitación máxima anual estación San P. de Cachi y las obtenidas	101
D.1. Estación hidrométrica del Puente Chacco	113
D.2. Sección del puente en condiciones actuales	114
D.3. Batimetría de la sección del Puente Chacco	115
D.4. Cálculo de la velocidad del río con molinete	116
D.5. Determinando pendiente del cause	117

D.6. Al final del trabajo, una experiencia única, con los grandes maestros de
mi alma mater UNSCH 118

Resumen

El presente trabajo de investigación comprende validar los caudales máximos a partir de la precipitación estimada del satélite TRMM, para la cuenca del Río Chacco. Las precipitaciones del satélite TRMM 3B42 V7, son validados con el registro de las estaciones pluviométricas (SENAMHI), mediante Regresión Lineal Múltiple, así generando una ecuación, que esta íntimamente unidos a sus características: latitud, longitud, altitud y precipitación sintética, para las subcuencas sin estaciones pluviométricas; teniendo las precipitaciones generadas, se procede con la simulación hidrológica de caudales máximos, mediante el método hidrológico, regional para el Perú (Wolfgang Trau) y método hidráulico para la estación hidrométrica del Puente Chacco, ubicado al norte de la ciudad de Ayacucho. El comportamiento de las precipitaciones (intensidad y tiempo en que suceden), de los registros de SENAMHI y TRMM 3B42 V7, que los valores de los registros de TRMM siempre superan a los registros del SENAMHI, para todas las estaciones analizadas.

Palabras clave: TRMM, validación, percepción remota y caudales máximos

Abstract

This research includes validating the peak flows from the TRMM satellite rainfall estimate for Chacco River Basin. Rainfall satellite TRMM 3B42 V7, are validated with record rainfall stations (SENAMHI) by Multiple Linear Regression, generating an equation, which is closely linked to its characteristics: latitude, longitude, altitude and synthetic precipitation, for sub without precipitation stations; it having generated rainfall, proceed with the hydrological simulation of peak flows through the regional hydrological method for Peru (Wolfgang Trau) and hydraulic method for Chacco Bridge gauging station, located north of the city of Ayacucho. The behavior of rainfall (intensity and time they happen), registry of SENAMHI and TRMM 3B42 V7, the values of records TRMMM always outweigh SENAMHI records for all analyzed stations.

keywords: TRMM, validation, remote sensing and maximum flow

Introducción

La escasez de estaciones pluviométricas es una problemática que enfrentan los hidrólogos en estudios hidrológicos, particularmente en la modelación de caudales de una cuenca. En varias cuencas, la precipitación es insuficiente en su distribución espacial y temporal. Una alternativa para solucionar este problema es el uso de precipitación estimada por percepción remota. Hoy en día, se ha observado que esta tecnología tiene un gran potencial de realizar mejores estimaciones de la precipitación en grandes partes del mundo que son limitadas a las observaciones de pluviómetros.

Actualmente los satélites y radares meteorológicos han puesto a disposición datos de precipitación en forma de malla regular y pueden ser aplicables en modelos hidrológicos; sin embargo, la incertidumbre de la estimación de la precipitación se incrementa con la disminución de la densidad de estaciones pluviométricas, especialmente para eventos convectivos locales, resultando de importancia el poder evaluar el nivel de rendimiento de estas estimaciones como variable de entrada a un modelado hidrológico distribuido. En el presente trabajo se realiza la validación de la precipitación estimada del satélite TRMM (3B42 V7), con las precipitaciones de las estaciones pluviométricas, pertenecientes al área de estudio, para luego determinar los caudales máximos en la cuenca del Río Chacco (Ayacucho, Perú), para validar finalmente esta última.

La elección del tema para la investigación es importante debido, porque la distribución espacial y temporal de las precipitaciones a escala regional es necesaria para una variedad de usos científicos y aplicaciones sociales tales como estudios y diagnósticos climáticos, gestión del agua para la agricultura y la energía, mitigación de sequía, control de inundaciones, y pronóstico de los cultivos y eventos extremos. La baja densidad de estaciones pluviométricas, es una problemática para los estudios hidrológicos,

particularmente en la modelación de caudales, para una determinada cuenca.

Seguidamente se presenta una breve presentación de cada capítulo desarrollado en la tesis:

- *Capítulo uno - las generalidades*: se presenta las generalidades de la tesis: antecedentes bibliográficos, descripción de la realidad problemática, formulación del problema, justificación e importancia de la investigación, objetivos, hipótesis, variables e indicadores, unidad de análisis, tipo y nivel de investigación, periodo de análisis, fuentes de información e instrumentos utilizados.
- *Capítulo dos - marco teórico y marco conceptual*: correspondiente al marco teórico y marco conceptual, se desarrolla la fundamentación teórica concerniente a la tesis; inicia con la definición de principios básicos de teledetección y sus componentes, la estadística hidrológica, tormentas de diseño, precipitación efectiva, los hidrogramas unitarios sintéticos y finalmente se desarrolla la fundamentación teórica del tránsito de avenidas.
- *Capítulo tres - desarrollo del trabajo de tesis*: En este capítulo se identifica la zona de estudio, se define los puntos desde los cuales se obtendrán la fuente de los datos y finalmente se obtiene la validación de las precipitaciones máximas anuales, mediante la regresión lineal múltiple, con las precipitaciones validadas, se determina los caudales máximos para la estación hidrométrica del Puente Chacco, con el programa HEC-HMS 4.0, para los diferentes periodos de retorno.
- *Capítulo cuatro - análisis y resultado de la investigación*: en el presente capítulo, se comprueba los caudales máximos obtenidos, para los diferentes periodos de retorno, del modelo hidrológico, con el método hidráulico (verificación en la sección del Puente Chacco) y el método regional para el Perú (Wolfgang Trau), finalmente se presenta los resultados para los diferentes métodos y las referencias, pertinentes al tema de investigación.
- *Capítulo cinco - conclusiones, recomendaciones y futuras investigaciones*: se presenta las conclusiones de la investigación, en relación a los objetivos establecidos y las futuras investigaciones.

Capítulo I: Generalidades

1.1. Antecedentes bibliográficos

la precipitación estimada por el Satélite TRMM (Tropical Rainfall Measuring Mission-Misión de Medida de la Precipitación Tropical), fue ampliamente estudiada estos últimos 15 años en todos los países , se consideran:

1.1.1. Antecedentes a nivel nacional

En el Perú existen investigaciones realizadas para el aprovechamiento del registro histórico de las precipitaciones del conjunto de los satélites del proyecto TRMM, en la Investigación “Análisis Espacio Temporal de la Precipitación en las Zonas de Montaña de Perú (1998-2007)” publicado en la “Revista Peruana Geo-Atmosférica” en el año 2010, el estudio fue con el objetivo de estimar el comportamiento espacial y temporal de la precipitación sobre las zonas de montaña de los andes peruanos, se analizaron los registros mensuales de precipitación in situ(medidas en estaciones meteorológicas) y del satélite TRMM, específicamente el producto 3B43.

La Tesis de Maestría “Modelado Hidrológico Distribuido de la Cuenca Amazónica Peruana Utilizando Precipitación Obtenida Por Satélite” [10], el objetivo de la investigación es desarrollar el modelado hidrológico distribuido en la cuenca amazónica peruana y evaluar la utilidad de las estimaciones de lluvia por sensoramiento remoto como variable de entrada a partir de la modelación lluvia – escorrentía.

Otra investigación titulada “Redes Neuronales Artificiales Como Herramienta de Vali-

dación de la Precipitación Obtenida Mediante Percepción Remota” [3], es una de las investigaciones mas recientes, dentro del ámbito regional, para el aprovechamiento del registro de las precipitaciones estimadas por el satélite TRMM; uno de sus objetivos es diseñar un modelo metaheurístico basado en redes neuronales artificiales como herramienta de validación de la precipitación registrada por el radar TRMM en la cuenca del Río Cachi.

1.1.2. Estudios realizados a nivel internacional

A nivel de América del sur, el artículo titulado “Es el radar TRMM(NASA, JAXA) un buen estimador de las precipitaciones de la región central Argentina”, Publicado por la Universidad Nacional de San Luis - Argentina, el objetivo de este trabajo fue comparar los datos estimados por TRMM con los datos de campo registrados por pluviómetros del Servicio Meteorológico Nacional (Argentina), a lo largo de un gradiente de precipitaciones y a distintas escalas temporales; los resultados obtenidos fueron buenos en estimar tendencias globales y patrones regionales de distribución espacial, pero no con suficiente resolución a escalas de más detalle.

En Europa la investigación titulada “Análisis y descripción general de Plataforma GIOVANNI” [8], en esta investigación se analizan y se describen los recursos y posibilidades de la plataforma GIOVANNI(GES-DISC Interactive Online Visualization And Analysis Infrastructure); es una aplicación sobre la web que proporciona un método simple e intuitivo de visualizar, analizar y acceder a productos incluidos en distintas áreas temáticas de las ciencias de la Tierra, obtenidos mediante teledetección. En definitiva, es una plataforma online auspiciada por NASA, a través de la cual se puede acceder a estos productos de un modo gratuito.

Así existen muchos estudios a nivel de todos los países, con la misma finalidad que es validar las precipitaciones registradas por el satélite TRMM, para las aplicaciones hidrológicas.

1.1.3. Instituciones nacionales

- **La Autoridad Nacional del Agua (ANA)**, es el ente rector y la máxima autoridad técnico-normativa del Sistema Nacional de Gestión de los Recursos Hídricos, así también, un organismo especializado adscrito al Ministerio de Agricultura. La Autoridad Nacional del Agua es el organismo encargado de realizar las acciones necesarias para el aprovechamiento multisectorial y sostenible de los recursos hídricos por cuencas hidrográficas, en el marco de la gestión integrada de los recursos naturales y de la gestión de la calidad ambiental nacional estableciendo alianzas estratégicas con los gobiernos regionales.
- **El Servicio Nacional de Meteorología e Hidrología (SENAMHI)** Institución que desde 1969 brinda servicios públicos, asesoría, estudios e investigaciones científicas en las áreas de Meteorología, Hidrología, Agrometeorología y Asuntos Ambientales en beneficio del país. Actualmente SENAMHI, es un organismo público ejecutor adscrito al Ministerio del Ambiente. El SENAMHI tiene las siguientes funciones: Organizar, operar, controlar y mantener la Red Nacional de Estaciones Meteorológicas, Hidrológicas y Agrometeorológicas, de conformidad con las normas técnicas de la Organización Meteorológica Mundial (OMM) y las necesidades de desarrollo nacional, a excepción de las redes de estaciones establecidas con fines específicos. Realizar y formular los estudios e investigaciones que satisfagan las necesidades de desarrollo y defensa nacional, en lo concerniente a su aplicación en las diferentes áreas de la meteorología, hidrología, agrometeorología y otras conexas. Asesorar y brindar apoyo técnico que requieran las entidades públicas y privadas para el desarrollo de actividades en las que sea necesario el empleo de información y técnicas relacionadas con las funciones del SENAMHI.

1.2. Descripción de la realidad problemática

La simulación de caudales a partir de modelos de lluvia-escorrentía es a menudo insatisfactoria debido a que la variabilidad espacial de la precipitación está pobremente representada en regiones donde los datos son escasos, principalmente por la falta de

estaciones pluviométricas. Este es el caso de la cuenca de la cordillera de los andes [11] ,considerando que la captación de estaciones pluviométricas convencionales es representativa de solo un pequeño radio alrededor del instrumento.

En nuestro país las instituciones encargadas del registro y el mantenimiento de las estaciones hidro-meteorológicas son la “Autoridad Nacional del Agua” y el “Servicio Nacional de Meteorología e Hidrología”, las mismas que se encuentran en proceso de desarrollo llevando proyectos de establecimiento de estaciones climáticas e hidrológicas en todo el Perú; pero las estaciones existentes actualmente son escasas, con muy poco registro histórico de información y una gran parte de las existentes no se encuentra en funcionamiento adecuado.

1.3. Formulación del problema

1.3.1. Problema principal

¿Es posible validar los caudales máximos a partir de precipitación estimada por Percepción Remota para la Cuenca del Río Chacco?

1.3.2. Problemas secundarios

- ¿Son equivalentes los caudales máximos obtenidos mediante la validación de las precipitaciones del satélite (TRMM), a las obtenidas mediante mediciones directas en la cuenca del Río Chacco?
- ¿Hay necesidad de disponer con registros de caudales máximos, para la cuenca del Río Chacco, para futuras predicciones de obras hidráulicas?
- Insuficiencia de estaciones meteorológicas e hidrométricas en la cuenca del Río Chacco.

1.4. Justificación e importancia de la investigación

La investigación se justifica y es importante por las siguientes razones:

Conveniencia: La precipitación estimada por el satélite TRMM servirá para la modelación de los caudales máximos y la validación, de esta, para la cuenca del Río Chacco, que cuenta con baja densidad de estaciones pluviométricas.

Relevancia social: Los resultados de la investigación son útiles para los Gobiernos Regionales, Municipalidades, empresas privadas, etc. quienes trabajan con el recurso hídrico. La precipitación es primordial para todo aquel que su función sea diseñar, la presente investigación se justifica porque contribuye con el bienestar de la sociedad en su conjunto, ya que trata de solucionar la escasa información de los registros de las precipitaciones, para con esos resultados tener mejores predicciones en los estudios hidrológicos e hidráulicos.

Aplicaciones prácticas: Algunas aplicaciones con los resultados del modelo obtenido son: Extensión de registro de precipitación para toda la cuenca estudiada, mejores predicciones para las obras hidráulicas como puentes, protección ribereña, etc y control de inundaciones para los frentes del cause del río.

Valor teórico: El modelo obtenido tiene la capacidad de ser aplicado en toda área de la cuenca estudiada, con la finalidad de predecir mejores resultados para las diferentes aplicaciones hidrológicas e hidráulicas.

1.5. Objetivos

1.5.1. Objetivos Generales

Validar los caudales máximos para la cuenca del río Chacco, mediante un modelo determinístico, a partir de precipitación estimada por percepción remota.

1.5.2. Objetivos Específicos

- Comparar las precipitaciones estimadas por el satélite (TRMM), con los registros obtenidos directamente de las estaciones pluviométricas en la cuenca del Río Chacco.
- Demostrar que los caudales máximos obtenidos por la precipitación estimada por el satélite TRMM, permitirá realizar estudios hidráulicos de forma adecuada.
- Determinar que el registro de las precipitaciones estimadas por el satélite (TRMM) permitirá la extensión del registro histórico de las estaciones pluviométricas para la cuenca del Río Chacco.

1.6. Hipótesis

1.6.1. Hipótesis principal

La precipitación estimada por percepción remota, permitirá validar los caudales máximos para la cuenca del río Chacco.

1.6.2. Hipótesis secundarios

- Los caudales máximos obtenidas mediante datos satelitales (TRMM), son equivalentes a las obtenidas mediante mediciones directas para la cuenca hidrográfica del Río Chacco.
- El registro de las precipitaciones mediante datos satelitales (TRMM), permitirá la extensión del registro histórico de las estaciones pluviométricas en la cuenca hidrográfica del Río Chacco.
- Los caudales máximos obtenidos mediante esta metodología servirán para futuras investigaciones o proyectos hidráulicos a colocar en la cuenca estudiada.

1.7. Variables e indicadores

1.7.1. Variables

Una variable [18] es un factor, evento, situación o fenómeno que representa cierto interés dentro de la investigación y del cual se precisa conocer su intensidad o categoría. Se conoce como variable porque el factor estudiado “puede” obtener distintos valores, es decir, varía entre una observación y otra. Existen básicamente tres variables que participen de todo proceso de investigación: Independientes, dependientes e intervinientes.

- Variables directas: aquellas que se consideran las causas. Se identifica [19] siempre una variable cuya magnitud o característica se relaciona con otra a la cual afecta. La variable directa objeto de estudio en la tesis es la Cuenca del Río Chacco y la baja densidad pluviométrica.
- Variables indirectas: son aquellas que dependen de la acción (intensidad o característica) de la variable independiente. La variable indirecta es el caudal obtenida para la cuenca del estudio.
- Variables intervinientes: definido como aquellas variables que no son causas ni consecuencias [16] pero tienen importancia en el estudio ya que podrían servir de explicación parcial a determinadas características consecuentes o porque son moderadoras del efecto de la variable independiente. Entre estas variables identificadas para la presente investigación se tienen: tipos de suelo, usos de suelo, ubicación de las estaciones pluviométricas.

1.7.2. Indicadores

Al referirnos a los conceptos indicamos [17] que estos no son observables directamente. Por lo tanto, se deben buscar procedimientos que permitan la medición indirecta mediante manifestaciones externas, empíricas y observables. Tales manifestaciones o expresiones reciben el nombre de indicadores.

- Indicador asociada a la variables directas. Caudal máximo generado

los registros disponibles y de dominio público por ANA y SENAMHI, son los que determinarán finalmente el periodo de la disponibilidad de los datos.

1.11. Fuentes de información e instrumentos utilizados

1.11.1. Fuentes de información

Se disponen de distintos niveles de información utilizada:

Fuente de información bibliográfica: para los textos fundamentales y necesarias que atañen a la investigación se obtuvo desde la Biblioteca Principal de la *Universidad Nacional San Cristóbal de Huamanga* y las *Páginas Web del Internet*, generalmente la documentación bibliográfica a nivel de tesis, relacionados al tema de investigación. La bibliografía consultada es diversa -textos sobre percepción remota, hidrología superficial, sistema de información geográfica, metodología de la investigación y textos sobre estadística.

Origen del registro de las variables: Para las precipitaciones se utiliza los registros diarios del satélite TRMM, específicamente el producto 3B42 v7 y las disponibles en la cuenca de interés obtenidos desde ANA y SENAMHI.

1.12. Técnicas de recolección y procesamiento de datos

Teniendo en cuenta los métodos de muestreo, se clasifica [20] en dos grandes grupos: muestreo probabilístico y muestreo no probabilístico.

1.12.1. Recolección de datos

En la investigación desarrollada no se emplea un mecanismo aleatorio, sino se realiza con base a criterios de conveniencia. Se utiliza un muestreo no probabilístico, muestreo de juicio o de selección intencional. La ubicación de las estaciones pluviométricas a nivel del suelo determinan y condicionan la obtención del registro de las precipitaciones desde TRMM para el cuadrante asociado.

1.12.2. Procesamiento de datos

Tomando en cuenta la estadística los registros disponibles se procesa en tres niveles: análisis exploratorio de datos, a nivel de la estadística descriptiva y finalmente la estadística inferencial.

- El análisis exploratorio de datos es un análisis preliminar, se realiza con fines de presentar los registros recogidos y ordenarlos para su procesamiento, presenta una presentación general de los tipos de datos y sus dominios, además sirva para identificar anomalías y comportamientos específicos en los datos obtenidos.
- Con la estadística descriptiva se dispone de las propiedades necesarias para la representación de los registros disponibles.
- La estadística inferencial es utilizado en la contrastación de la hipótesis, y su utilidad es para demostrar que la muestra disponible y debidamente registrada es parte de la población.

En este caso, investigar a toda la población de datos existente es costoso, por esta razón los estudios se realizan sobre una muestra representativa de la población, que contenga teóricamente las mismas características de una población que se desean estudiar. Los datos recogidos son evaluados estadísticamente con la finalidad de demostrar que la muestra obtenida dispone de las propiedades de la población de datos, luego de superar esta etapa, se continua con la validación del registro de las precipitaciones y la obtención del hidrograma de máxima avenida, para determinar finalmente el caudal máximo para la cuenca de estudio (estación hidrométrica del Puente Chacco)

Capítulo II: Marco teórico

El presente capítulo trata sobre la fundamentación teórica del conocimiento establecido a utilizar en la investigación, el marco teórico y marco conceptual contienen el conocimiento definido y aceptado hasta la fecha de las variables identificadas para el desarrollo de la investigación: principios básicos de teledetección, TRMM y GPM, estadística hidrológica, hidrograma unitario sintético y tránsito hidrológico de avenidas

2.1. Principios básicos de teledetección

la teledetección es una ciencia que permite elaborar ¹ levantamientos de altos volúmenes de información de la superficie terrestre, su definición, elementos del proceso de teledetección, espectro electromagnético, reflectancia de la superficie terrestre, características orbitales, resolución de los sensores y tipos de imágenes de teledetección.

2.1.1. Definición

Teledetección es el vocablo usado por los hispanoparlantes para referirse [6] al término inglés “remote sensing”, que se traduce literalmente como percepción remota. Se refiere a la ciencia, técnica o, incluso “arte” para algunos, de obtener información (imágenes) de la superficie de nuestro planeta a distancia, sin entrar en contacto directo con él.

Las imágenes obtenidas [7] a partir de plataformas espaciales constituyen una fuente

¹Biblioteca gratuita para la comunidad geocientífica <http://meted.ucar.edu/>

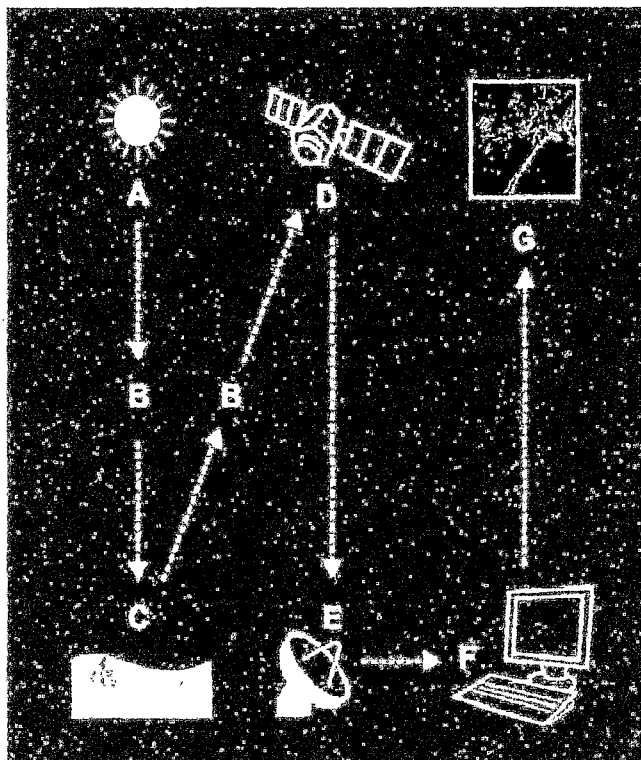
muy importante de información sobre los recursos naturales y del ambiente. En efecto, las imágenes satelitales:

- proveen una visión sinóptica de grandes áreas de la superficie terrestre, lo que permite una mejor comprensión de la organización espacial.
- permiten acceder a información que nuestra visión no capta, tal como las bandas del infrarrojo.
- son menos costosas por unidad de superficie que las fotografías aéreas o la información tomada en el terreno.

2.1.2. Elementos del proceso de teledetección

Los elementos involucrados [6] en un proceso de teledetección desde satélites se muestran en la Figura 2.1. El primer requerimiento supone disponer de una fuente de energía que ilumine o provea energía al objeto de interés (cultivo, bosque, mar, ciudad, etc.). El caso más habitual consiste en que esa fuente sea el Sol (A). La radiación solar, en su “viaje” hacia la Tierra, atraviesa e interacciona con la atmósfera (B). Una vez alcanza la superficie terrestre interactúa con los objetos que en ella se encuentran. La radiación reflejada dependerá de las características de esos objetos, permitiendo distinguir a unos de otros (C). Un sensor a bordo de un satélite recoge y graba esa radiación reflejada por la superficie terrestre y la propia atmósfera (D).

Figura 2.1: Elementos de un proceso de teledetección



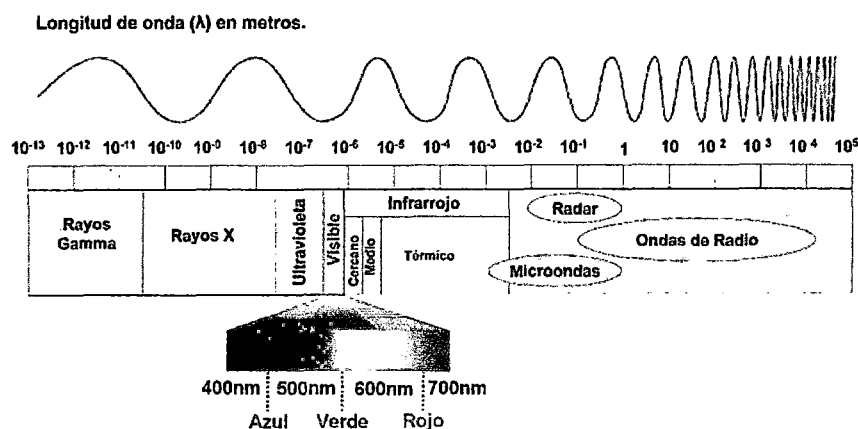
Fuente: Figura tomada desde [6]

La energía captada por el sensor se transmite a una estación de recepción y procesamiento donde los datos se convierten en imágenes digitales (E). La imagen procesada se interpreta, visualmente y/o digitalmente, para extraer información acerca de los objetos que fueron iluminados (F). El paso final del proceso de teledetección consiste en aplicar la información extraída de la imagen para conseguir un mejor conocimiento de la zona de estudio, revelando nuevas informaciones o ayudándonos a resolver un problema particular (G).

2.1.3. El espectro electromagnético en teledetección

En Teledetección, las ondas se clasifican [7] por su longitud. El agrupamiento del conjunto de ondas que se encuentran en la naturaleza con respecto a sus longitudes forman lo que se llama el "espectro electromagnético" Figura 2.2.

Figura 2.2: Espectro electromagnético



Fuente: Figura tomada desde [2]

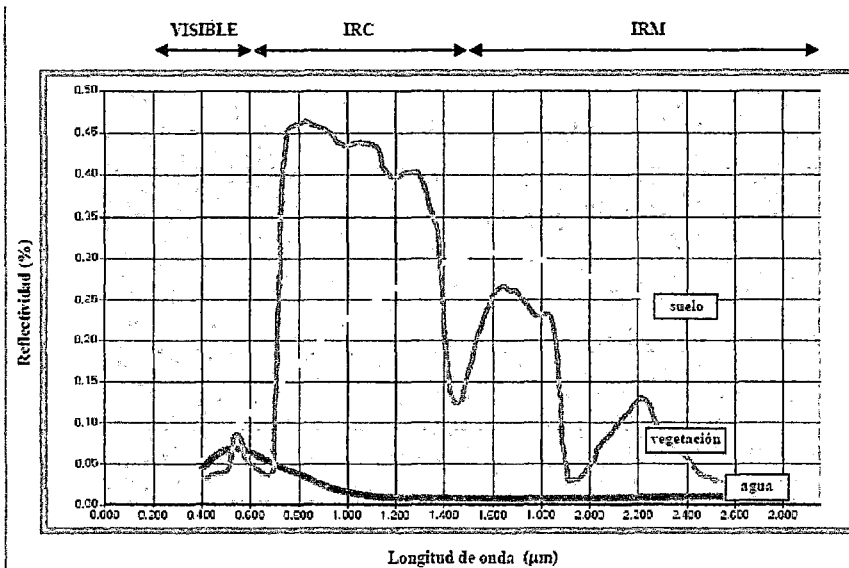
En Teledetección, las principales regiones del espectro electromagnético que se utilizan son el visible, el infrarrojo y las microondas.

2.1.4. Reflectancia de las superficies terrestres

Los satélites miden la energía reflejada o emitida por los objetos de la superficie terrestre, según el poder de reflectividad y emisividad de cada uno, y también según la longitud de onda. Así, como los objetos reaccionan en forma diferente ante la energía solar recibida, cada objeto posee una reflectividad propia llamada “firma espectral”. La figura 2.3 presenta las firmas espectrales de las tres coberturas principales de la superficie terrestre: vegetación, suelo y agua. Es el conocimiento de la reflectividad de cada objeto lo que hace posible su identificación a partir de las imágenes.

El conocimiento de las firmas espectrales [7] es fundamental en teledetección, no sólo para identificar los distintos objetos sino para elegir las bandas más apropiadas y el sensor más conveniente. Así, a partir de las firmas espectrales presentadas en la figura 2.3, se observa que las mejores bandas para discriminar las tres coberturas son, en orden de importancia, el Infrarrojo Cercano, el Infrarrojo Medio y el Rojo. Ello se debe a que existen grandes diferencias en la reflectividad de los tres elementos, lo que asegura su discriminación.

Figura 2.3: Firma espectral



Fuente: Figura tomada desde [7]

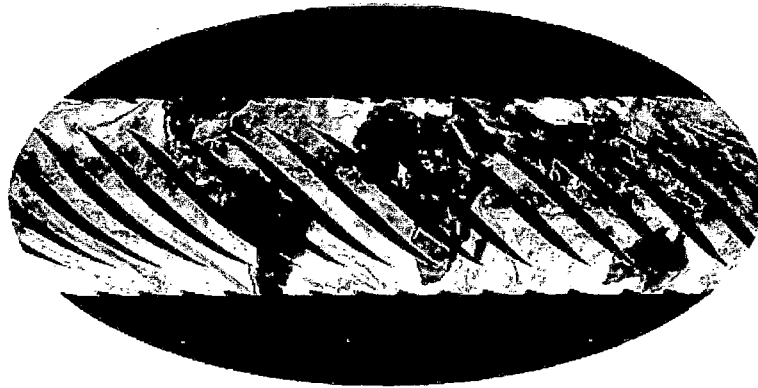
2.1.5. Características orbitales de los satélites de teledetección

Se denomina órbita [6] a la trayectoria seguida por un satélite alrededor de la Tierra. Ésta depende de las características y objetivos de los sensores que van a bordo del satélite. En general, las órbitas quedan definidas por la altitud, orientación y rotación con respecto a la Tierra.

Satélites de órbita terrestre baja: Órbita circular en movimiento constante relativo a la tierra a 160-2000 km. Puede ser polar o no polar: *Satélites de órbita polar*, cobertura global pero sólo una o dos o menos mediciones al día por sensor. Existen algunos orbitales de este tipo como por ejemplo el radar Aqua que se muestra en la figura 2.5 - derecha, mientras más grande el tamaño del barrido, más alta la resolución temporal. *Satélites de órbita no polar:* Menos de una medición al día. Cobertura no global. Existen algunas orbitales de esta orientación como el caso del satélite TRMM como se muestra en la figura 2.4. Mientras más grande el tamaño del barrido, más alta la resolución temporal.

Satélites geoestacionarios: El satélite está a 36,000 km de altura sobre la tierra en la línea ecuatorial figura 2.5 - izquierda, tiene el mismo período de rotación que la Tierra. Parece estar "fijo" en el espacio, con múltiples observaciones al día, pero

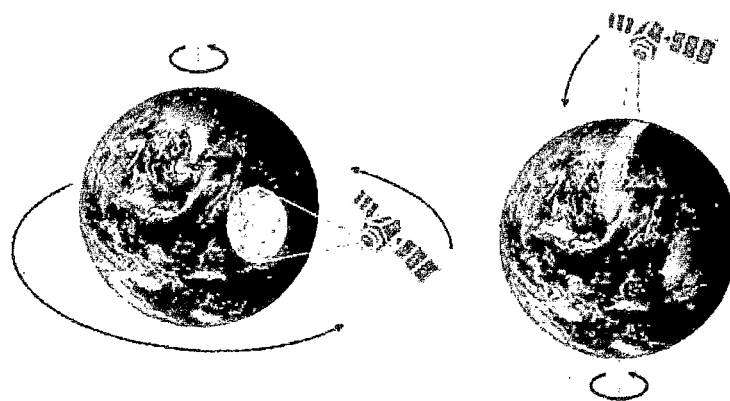
Figura 2.4: Ancho del barrido del satélite TMMM (Órbita no polar)



Fuente: página Web del TRMM

con cobertura espacial limitada, se necesita más de un satélite para una cobertura global.

Figura 2.5: Órbita geoestacionaria y polar



Fuente: Figura tomada desde [6]

2.1.6. Tipos de sensores

Existen variadas formas de clasificar los sensores remotos, una de las mas habituales considera el procedimiento para recibir la energía procedente de las distintas cubiertas; en este sentido, se habla de dos tipos de sensores [9]

Pasivos: Estos sensores miden energía radiante reflejada o emitida por el sistema tierra-atmósfera. La energía radiante se convierte en cantidades bio-geofísicas

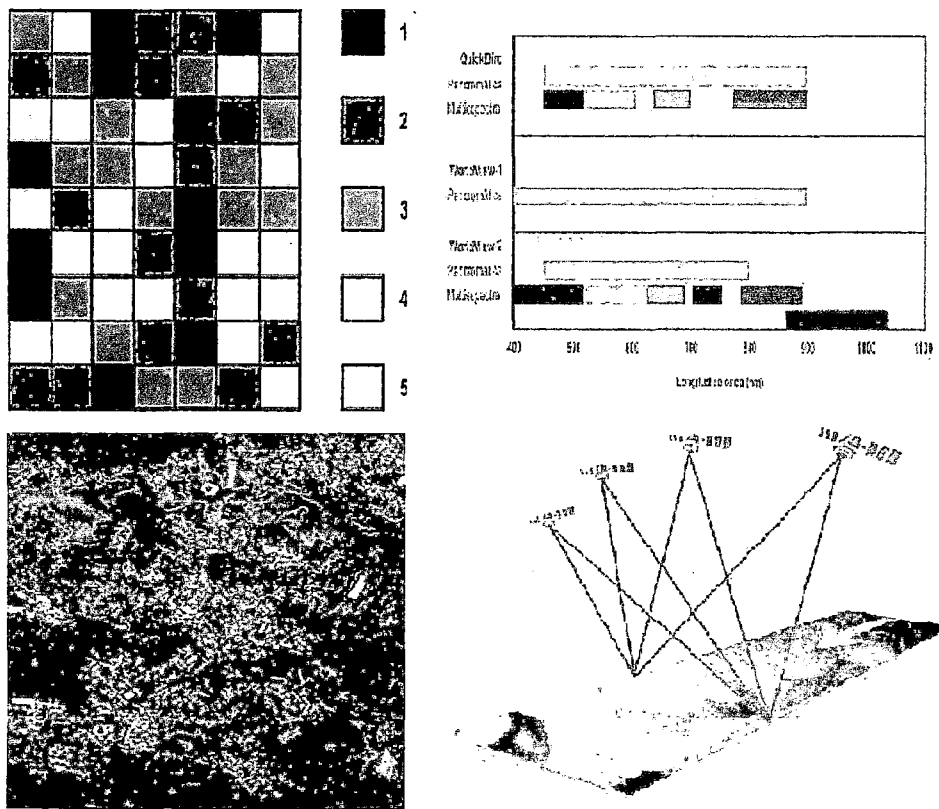
como temperatura precipitación, humedad del suelo, clorofila, etc.

Activos Estos sensores lanzan rayos de radiación sobre el sistema tierra-atmósfera y miden la radiación retrodifundida. La radiación retrodifundida se convierte en parámetros geofísicos.

2.1.7. Resolución de los sensores remotos

Los sensores instalados en los satélites de teledetección poseen una serie de particularidades que determinan las características de las imágenes que van a proporcionar. Estas características vienen definidas básicamente por diferentes tipos [9] de resolución:

Figura 2.6: Tipos de resolución de los sensores



Fuente: Tomada desde [6]

Resolución espacial: hace referencia al objeto más pequeño que puede ser detectado por el sensor, es decir, equivalente al píxel. Un píxel es la unidad mínima que

conforma una imagen digital figura 2.6 - izquierdo superior. El tamaño del píxel varía según los sensores y tiene un rol muy importante en la interpretación, pues determina el nivel de detalle.

Resolución espectral: Se define la resolución espectral de un sensor como el número y anchura de las bandas espectrales que puede discriminar. La resolución espectral permite distinguir distintas cubiertas presentes en la superficie terrestre figura 2.6 - derecha superior. Un incremento en la resolución espectral resultará en un número mayor de canales o bandas espectrales, sin embargo, esta resolución adicional supone también un costo en términos de volumen de datos e incremento del costo de procesamiento.

Resolución radiométrica: Hace mención a la sensibilidad del sensor, esto es, a su capacidad para detectar variaciones en la radiancia espectral que recibe. Para los sensores óptico-electrónicos la imagen se presenta en formato digital figura 2.6 - izquierda inferior, por lo que la resolución radiométrica suele identificarse con el rango de valores que codifica el sensor, esto es, el número de bits que precisa cada elemento de la imagen para ser almacenado (256,128,64,etc).

Resolución temporal: Este concepto corresponde a la frecuencia de cobertura que proporciona el sensor. En otras palabras, se refiere a la periodicidad con la que éste adquiere imágenes de la misma porción de la superficie terrestre figura 2.6-derecha inferior. Conviene tener en cuenta que la resolución temporal defectiva dependerá también de las condiciones atmosféricas

Resolución angular: Es un término relativamente reciente que refiere a la capacidad de un sensor para observar la misma zona desde distintos ángulos. La observación multiangular resulta de gran interés para estimar algunas variables atmosféricas, ya que al variar el ángulo de mira se está observando la superficie con distinto espesor atmosférico variando en consecuencia los procesos de absorción y dispersión. Hasta hace pocos años no había sensores disponibles que tuvieran esta capacidad de observación simultánea en varios ángulos.

2.1.8. Tipos de imágenes de teledetección

Las imágenes satélites representan [7] las formas de captura indirecta de la información espacial. Estas son almacenadas como matrices (cada matriz corresponde a una banda del sensor), donde el elemento de la imagen es llamado píxel (acrónimo del inglés picture element) y tienen un valor proporcional a la energía reflejada o emitida de la superficie terrestre para el área de la imagen:

imagen multiespectral (MS): Imagen que lleva [6] asociados varios valores numéricos a cada píxel, tantos como bandas espectrales sea capaz de detectar el sensor. A priori, es el tipo de producto más útil ya que nos proporciona, en cierto modo, la firma espectral de los distintos elementos presentes en la imagen. Así, por ejemplo, el satélite IKONOS proporciona una imagen multiespectral con 4 bandas, que cubren las regiones espectrales correspondientes al azul, verde, rojo e infrarrojo próximo. Cuanto mayor sea el número de bandas que proporciona el sensor, mayor será la capacidad de análisis de los elementos presentes en la imagen.

Imagen pancromática (PAN): Dispone [6] de una sola banda espectral que abarca comúnmente gran parte del visible y comienzo del infrarrojo, obteniendo como resultado una imagen que habitualmente se representa en una escala de grises (imagen en blanco y negro). Como contrapartida, tienen la ventaja de poseer mayor resolución espacial que las multiespectrales que proporciona el mismo satélite. Es por ello que son muy interesantes para la detección de pequeños elementos de la superficie terrestre que no son distinguibles en la imagen multiespectral

Imagen fusionadas (PS): Este tipo de imagen se obtiene mediante la fusión de una imagen multiespectral con una pancromática. El resultado final es una imagen multiespectral con la resolución espacial de la pancromática.

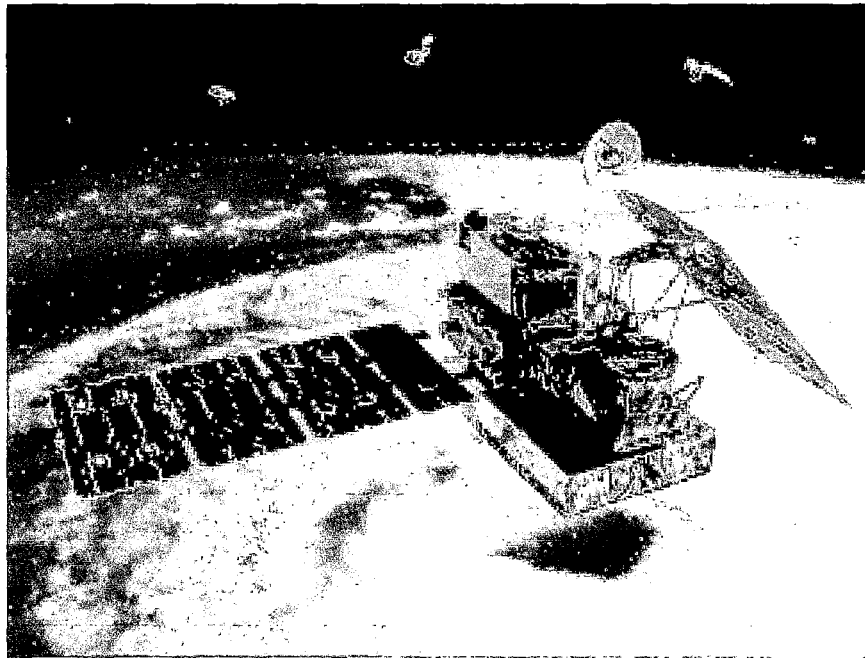
Imagen estéreo: En realidad se refiere a dos imágenes de una misma zona tomadas con ángulos de visión distintos. Muchos satélites tienen la capacidad de reorientar el sensor, lo que les permite tomar, en una o en sucesivas pasadas, este tipo de imágenes. Se suelen emplear para generar modelos de elevación del terreno.

2.2. TRMM y GPM

2.2.1. Panorama del TRMM

En 1997, la NASA y la Agencia de Exploración Aeroespacial de Japón (JAXA), pusieron [8] en marcha la Misión de Medición de Lluvias Tropicales (TRMM) para aprender más sobre el papel de las lluvias tropicales en los ciclos del agua y de la energía de la Tierra. En órbita de 50 Norte y 50 Sur, el satélite lleva el primer radar de precipitación espacial y un generador de imágenes de microondas diseñados para observar la lluvia tropical moderada-intensa. Los científicos querían observaciones para mejorar su comprensión de la circulación atmosférica, uno de los mecanismos más importantes de la tierra para la distribución de energía a partir de las zonas tropicales bañadas por el sol de los polos terrestres figura 2.7.

Figura 2.7: Satélite TRMM

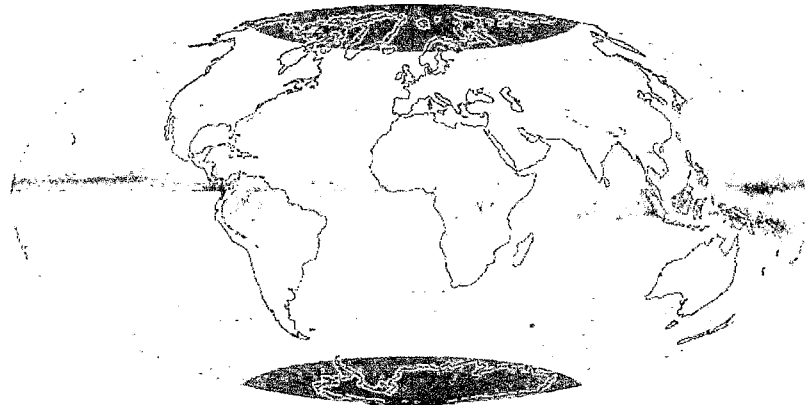


Fuente: Página Web del TRMM

Las precipitaciones y la evaporación juegan un papel importante en el movimiento de calor a través de la atmósfera. La evaporación del agua transfiere energía a la atmósfera, que se libera en forma de calor latente cuando el vapor de agua se condensa en gotas

de las nubes y la precipitación. Este calor ayuda a los vientos y las tormentas que se mueven a través del planeta. La mayor parte del calor latente en la atmósfera proviene de las lluvias tropicales, pero cuando lanzó TRMM, todavía hay gran incertidumbre acerca de la cantidad de lluvia tropical que cae realmente.

Figura 2.8: Precipitaciones media diaria



Fuente: Página Web del MetEd

En la figura 2.8 muestra una de las medidas clave del satélite: la tasa media de precipitaciones por día (que se muestra los años de 1998 a 2014). Una banda de fuertes lluvias, llamada la Zona de Convergencia Intertropical, se sitúa² alrededor del planeta cerca del ecuador.

El satélite TRMM [8] cuenta con 5 sensores (instrumentos) de a bordo:

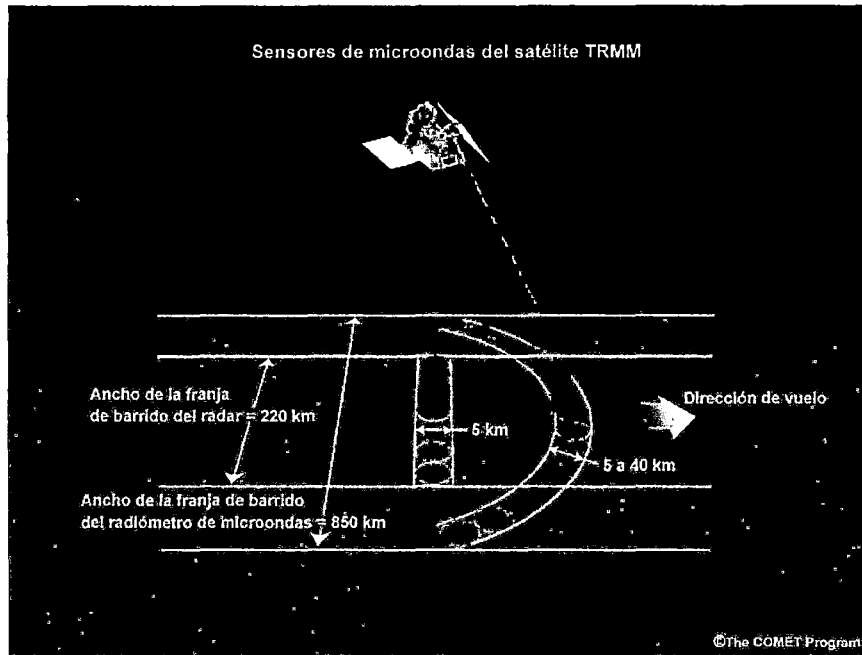
Radar de precipitación (PR): El radar de precipitación es simplemente un radar meteorológico espacial que emite un pulso de energía de microondas figura 2.9 (magenta). El pulso de retorno brinda información exacta sobre la tasa y estructura de la precipitación con una resolución espacial de 5 kilómetros y una franja de barrido de 220 kilómetros de ancho. Una de sus características más importantes es su capacidad para proporcionar los perfiles verticales de la lluvia y la nieve de la superficie hasta una altura de cerca de 20 kilómetros.

Imágenes Microwave TRMM (TMI): Misión de imágenes de microondas (TMI) es un sensor de microondas pasivo diseñado para proporcionar información cuan-

²Página web oficial que engloba a los satélites TRMM y GPM <http://pmm.nasa.gov/>

titativa sobre las lluvias de una amplia franja en el marco del satélite TRMM. Midiendo cuidadosamente las cantidades de energía de microondas emitidas por la Tierra y su atmósfera, el TMI es capaz de cuantificar el vapor de agua, el agua de las nubes y la intensidad de la lluvia en la atmósfera, realiza sus observaciones con un patrón cónico ya sea delante o detrás del satélite a lo largo de una franja de barrido de 850 km de ancho figura 2.9 (azul).

Figura 2.9: Instrumentos y plataformas de barrido del TRMM



Fuente: Página Web del MetEd

Escáner infrarrojo visible (VIRS): Como su nombre lo indica, la radiación VIRS escanea la longitud de onda emitida por radiación de la tierra (espectro), que va desde visible para micrómetros de infrarrojos.

Sistema de energía radiante y nubes (CERES): Los datos del instrumento CERES puede ser utilizado para estudiar la energía intercambiada entre el Sol; la atmósfera terrestre, la superficie, las nubes y el espacio. Sin embargo, sólo funcionó durante enero-agosto de 1998 y marzo de 2000, por lo que el registro de datos disponibles es bastante breve.

Sensor de imagen relámpagos (LIS): El Sensor de Imágenes de Relámpagos es un

instrumento pequeño y altamente sofisticado que detecta y localiza un rayo sobre la región tropical del mundo. Mirando hacia abajo desde un punto de vista a bordo de la Misión de Medición de Lluvias Tropicales (TRMM), observatorio, a 402 kilómetros por encima de la Tierra, el sensor proporciona información que podría conducir a futuros sensores avanzados geoestacionarios eléctricas capaces de mejorar significativamente el clima "predicción inmediata".

Análisis multisatélite de precipitación:

La información registrada [5] por los sensores a bordo del TRMM MULTI-SATELLITE PRECIPITATION ANALYSIS (TMPA), con mediciones pasivas de microondas, infrarrojas y visibles disponibles de satélites nacionales e internacionales, ha sido dispuesta por la NASA Earth Data en tres niveles, los cuales se distinguen por el procesamiento que se le ha hecho a las mediciones. Para los fines de este estudio se vio por conveniente utilizar productos del nivel 3, algunos de ellos utilizan una combinación de distintos sensores y de distintos satélites y nos dan las estadísticas de la precipitación diaria y mensual a una cobertura de 50°N-50°S. Uno de los productos más [4] usados es el producto 3B42(V7) tabla 2.1 que provee estimados de precipitación cada 3 horas a una resolución de 27Km x 27Km, debido a su alta resolución, nos permite caracterizar las tormentas en cuanto a su extensión y estructura espacial, ya que nos permite conocer mejor los aspectos físicos de la precipitación en los Andes. Las herramientas de acceso a los datos de forma gratuita son los siguientes: Mirador ³, Giovanni ⁴ y Pps storm ⁵.

Tabla 2.1: Resumen de productos de precipitación del TRMM de Nivel -3

Datos del TRMM disponibles de Enero 1998 al presente				
Producto	Resolución esp.	Cobertura	Resolución temp.	Formato
TMPA/3B42RT	27x27Km	50°N-50°S	cada 3 horas, diaria	netCDF y otros
TMPA/3B42(V7)	27x27Km	50°N-50°S	cada 3 horas, diaria	netCDF y otros
TMPA/3B43(V7)	27x27Km	50°N-50°S	mensual	netCDF y otros
Tasa pluvial superficial en mm/hora				

Fuente: Elaboración propia

Limitaciones de datos del TRMM:

³Página web de acceso de datos <http://mirador.gsfc.nasa.gov/>

⁴Página web de acceso de datos <http://giovanni.gsfc.nasa.gov/giovanni/>

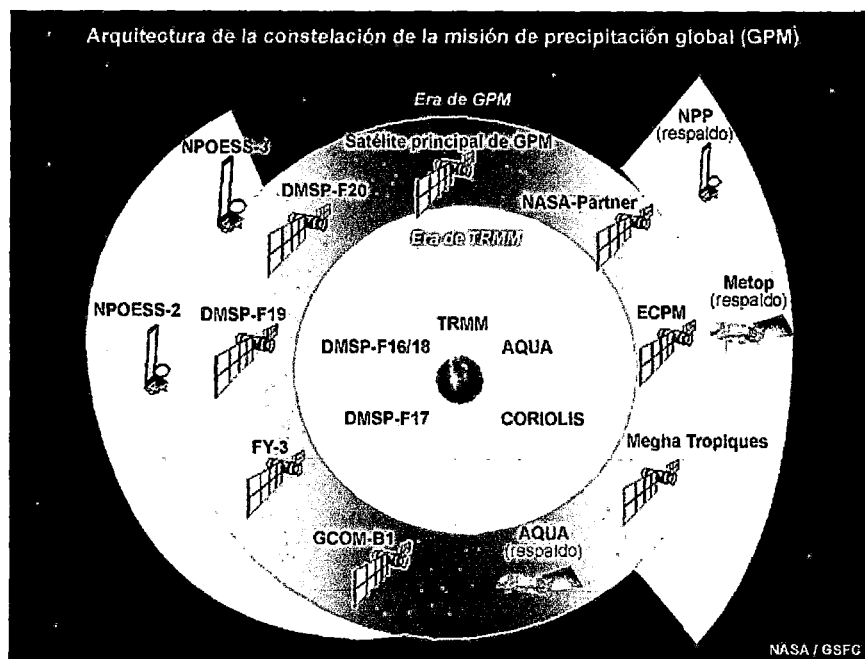
⁵Página web de acceso de datos <https://storm.pps.eosdis.nasa.gov/storm/>

No ofrece [4] mediciones más allá de 50S-50N, la frecuencia de muestras del TRMM es de 15 horas a 4 días en cualquier punto, lo cual introduce bastante incertidumbre en las estimaciones pluviales. El TRMM proporciona mediciones de lluvia pero no de precipitación congelada, tampoco puede detectar lluvia ligera (<0.5 mm/hr). Para poder mejorar estas limitaciones se ha puesto en marcha el satélite GPM para obtener mediciones sobre el trópico y las altitudes más elevadas, con el avance de poder medir lluvia ligera y nieve.

2.2.2. Panorama del GPM

La misión de precipitación global (Global Precipitation Mission, GPM) extenderá [1] la misión del TRMM ampliando la cobertura a latitudes más altas. Esta misión podrá medir tasas de lluvia entre 0,25 y 100 mm/h. Con el GPM se procurará cubrir el 100% del globo cada tres horas con el objetivo de que los datos sean accesibles dentro de un plazo de tres horas a partir del momento de la observación de las regiones globales entre 90° S y 90°N de latitud.

Figura 2.10: Satelite principal y cosntelaciones de GPM



Fuente: Página Web del MetEd

GPM comprenderá un satélite central con un radar de precipitación de frecuencia dual figura 2.10 e instrumentos de microondas y una constelación de satélites en órbita polar cuyas estimaciones de precipitación se pueden calibrar con las del satélite principal.

Acceso a los datos de GPM:

Dispuesta por la NASA Earth Data en tres niveles, los cuales se distinguen por el procesamiento que se le ha hecho a las mediciones; así como del Nivel-2, estos datos son de resolución más alta que los de Nivel-3, pero no son continuos en el espacio, pero son útiles para observar eventos de precipitación y tormentas. Los datos del Nivel-4, es derivado de múltiples satélites, disponible cada media hora aproximadamente 4 km de resolución en tiempo casi real, se hace un resumen en la tabla 2.2 de los datos del GPM Nivel-3

Tabla 2.2: Resumen de Productos de Precipitación del GPM Nivel-3

Datos de GPM disponibles de Marzo 2014 al presente				
Producto	Resolución esp.	Covertura	Resolución temp.	Formato
IMERG	4x4Km	90°N-90°S	30-minutos	netCDF y otros
3-CMB	4x4Km	90°N-90°S	mensual	netCDF y otros
3-DPR	27x27Km	70°N-70°S	diaria y mensual	netCDF y otros
3-GPROF	27x27Km	90°N-90°S	diaria y mensual	netCDF y otros
Tasa pluvial superficial en mm/hora				

Fuente: Elaboración propia

2.3. Estadística hidrológica y análisis de frecuencia

Esta sección describe información hidrológica de procesos enteramente aleatorios utilizando parámetros y funciones estadísticos. Los métodos estadísticos están basados [15] en principios matemáticos que describen la variación aleatoria de un conjunto de observaciones de un proceso, y éstos centran su atención en las observaciones mismas en lugar de los procesos físicos que las producen.

2.3.1. Pruebas de bondad de ajuste

Las pruebas estadísticas, tienen por objetivo medir la certidumbre que se obtiene al hacer una hipótesis estadística sobre una población, es decir, calificar el hecho de suponer que una variable aleatoria, se distribuya según una cierta función de probabilidades. Las pruebas de bondad de ajuste más utilizados son de tipo gráfico y de ajuste estadístico, esta última, desarrollaremos:

Prueba de Smirnov-Kolmogorov

Consiste en comparar las diferencias existentes, entre la probabilidad empírica de los datos de la muestra y la probabilidad teórica, tomando el valor máximo del valor absoluto, de la diferencia entre el valor observado y el valor de la recta teórica del modelo, es decir:

$$\Delta = \text{máx} |F(x) - P(x)| \quad (2.1)$$

Donde:

Δ = estadístico de Smirnov-Kolmogorov

$F(x)$ = probabilidad de la distribución teórica

$P(x)$ = probabilidad experimental o empírica de los datos

2.3.2. Distribuciones de probabilidad para las variables hidrológicas

El hidrólogo generalmente tendrá disponible un registro de datos hidrometeorológico (precipitación, caudales, evapotranspiración, temperaturas, etc.), a través de su conocimiento del problema físico, escogerá un modelo probabilístico a usar, que represente en forma satisfactoria el comportamiento de la variable. La tabla 2.3 resume, para cada distribución, la función de densidad de probabilidad y el rango de la variable, junto con las ecuaciones para estimar los parámetros de la distribución a partir de los momentos de la muestra.

2.3.3. Periodo de retorno

Intervalo promedio de tiempo, dentro del cuál un evento de magnitud x puede ser igualado o excedido, por lo menos una vez en promedio

$$P(X \geq x) = \frac{1}{T} \quad (2.2)$$

Donde:

$P(X \geq x)$ = probabilidad de ocurrencia de un evento $\geq x$

T = período de retorno

Riesgo(R)

La probabilidad de que el evento, ocurra al menos una vez en n años sucesivos, es conocido como riesgo o falla R , y se representa por:

$$R = 1 - \left(1 - \frac{1}{T}\right)^n \quad (2.3)$$

Donde:

R = riesgo o falla

T = período de retorno

n = vida útil del proyecto

Tabla 2.3: Distribuciones de probabilidad para el ajuste de información hidrológica

Distribución	Función de densidad de probabilidad	Rango	Ecuación de los parámetros en términos de los momentos de la muestra
Normal	$f(x) = \frac{1}{\sigma\sqrt{2\pi}} \exp\left(-\frac{(x-\mu)^2}{2\sigma^2}\right)$	$-\infty \leq x \leq \infty$	$\mu = \bar{x}, \sigma = s_x$
Lognormal	$f(x) = \frac{1}{x\sigma\sqrt{2\pi}} \exp\left(-\frac{(y-\mu_y)^2}{2\sigma_y^2}\right)$ donde $y = \log x$	$x > 0$	$\mu_y = \bar{y}, \sigma = s_y$
Pearson tipo III (gamma de tres parámetros)	$f(x) = \frac{\lambda^\beta [x-\epsilon]^{\beta-1} e^{-\lambda(x-\epsilon)}}{\Gamma(\beta)}$	$x \geq \epsilon$	$\lambda = \frac{s_x}{\sqrt{\beta}}, \beta = \left(\frac{2}{C_s}\right)^2, \epsilon = \bar{x} - s_x\sqrt{\beta}$
Log pearson tipo III	$f(x) = \frac{\lambda^\beta [y-\epsilon]^{\beta-1} e^{-\lambda(y-\epsilon)}}{x\Gamma(\beta)}$ donde $y = \log x$	$\log x \geq \epsilon$	$\lambda = \frac{s_y}{\sqrt{\beta}}, \beta = \left[\frac{2}{C_s(y)}\right]^2$ $\epsilon = \bar{y} - s_y\sqrt{\beta}$ (suponiendo que $C_s(y)$ es positivo)
Valor extremo tipo I	$f(x) = \frac{1}{\alpha} \exp\left[-\frac{x-\mu}{\alpha} - \exp\left(-\frac{x-\mu}{\alpha}\right)\right]$	$-\infty < x < \infty$	$\mu = \bar{x} - 0.5772\alpha$

Fuente: Tomado desde [15]

2.4. Tormentas de diseño

Una tormenta de diseño es un patrón de precipitación definido para utilizarse en el diseño de un sistema hidrológico. Usualmente la tormenta de diseño conforma la entrada al sistema, y los caudales resultantes a través de éste se calculan utilizando procedimientos de lluvia-escorrentía y tránsito de caudales. Una tormenta de diseño puede definirse mediante un valor de profundidad de precipitación en un punto, mediante un hietograma de diseño que especifique la distribución temporal de la precipitación durante una tormenta.

2.4.1. Relaciones Intensidad-Duración-Frecuencia

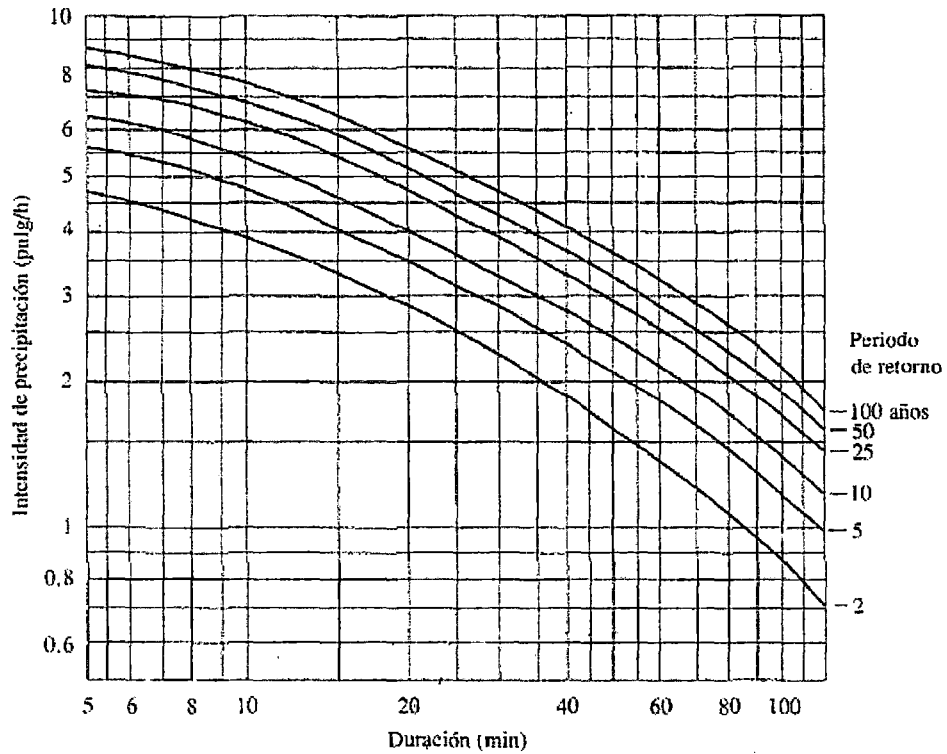
Uno de los primeros pasos que debe seguirse en muchos proyectos de diseño hidrológico, es la determinación del evento o los eventos de lluvia que deben usarse. La forma más común de hacerlo es utilizar una tormenta de diseño o un evento que involucre una relación entre la *intensidad* de lluvia (o profundidad), la *duración* y las *frecuencias* o periodos de retorno apropiados para la obra y el sitio. Usualmente los datos se presenta en forma de gráficos, tal como se muestra en la figura 2.11 para la ciudad de Chicago.

La intensidad es la tasa temporal de precipitación, es decir, la profundidad por unidad de tiempo (mm/h). Puede ser la intensidad instantánea o la intensidad promedio sobre la duración de la lluvia. Comúnmente se utiliza la intensidad promedio, que puede expresarse como:

$$i = \frac{P}{T_d} \quad (2.4)$$

Donde P es la profundidad de lluvia (mm) y T_d es la duración, dada usualmente en horas. La frecuencia se expresa en función del periodo de retorno, T , que es el intervalo de tiempo promedio entre eventos de precipitación que igualan o exceden la magnitud de diseño.

Figura 2.11: Curvas intensidad-duración-frecuencia para lluvia máxima en Chicago, Estados Unidos



Fuente: Tomada desde [15]

2.4.2. Análisis de intensidades de la tormenta de diseño

Para determinar la intensidad de lluvia el Soil Conservation Service del U.S. Department of Agriculture (1986) desarrolló Hietogramas Sintéticos de tormentas para utilizarse en los Estados Unidos, con duraciones de tormentas de 6 y 24 horas. Existen cuatro tormentas de 24 horas de duración, llamadas **Tipo I**, **IA**, **II** y **III**, respectivamente. Las tormentas **Tipo I** y **IA** se registran en el Océano Pacífico con inviernos húmedos y veranos secos. El **Tipo III** en el Atlántico, región en la que se producen huracanes con celdas de precipitación con humedad muy cargada. El **Tipo II** se producen en el resto del país. La tabla 2.4 y la figura 2.12 presentan los hietogramas acumulados. En el **Perú** sólo las tormentas que se generan en la Selva Amazónica producen lluvias intensas debido a la concentración de masas húmedas en zona tropical, pero por lo general no van acompañadas de huracanes u otros fenómenos meteorológicos como los tifones que causan precipitaciones extremadamente intensas. Debido a las carac-

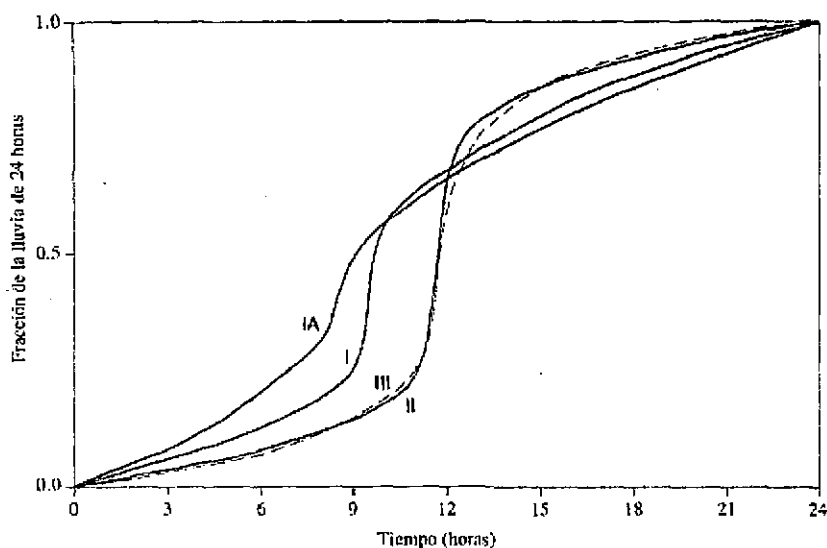
terísticas climáticas en la zona de investigación se asumirá que en la cuenca alta la distribución de precipitaciones es **Tipo II**. Por los motivos expuestos, esta estimación debe estar por el lado de la seguridad.

Tabla 2.4: Distribucion de lluvias de SCS

hora t	$P_t/24$				
	$T/24$	Tipo I	Tipo IA	Tipo II	Tipo III
0	0	0	0	0	0
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	0.459	0.624	0.624	0.235	0.250
11.50	0.479	0.654	0.645	0.283	0.298
11.75	0.489	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

Fuente: Tomada desde [15]

Figura 2.12: Hietogramas de lluvia de 24 horas del soil conservation service



Fuente: Tomada desde [15]

2.5. Precipitación efectiva

El exceso de precipitación o precipitación efectiva (Pe), es la precipitación que no se retiene en la superficie terrestre y tampoco se infiltra en el suelo. Después de fluir a través de la superficie de la cuenca, el exceso de precipitación se convierte en escorrentía directa a la salida de la cuenca bajo la suposición de flujo superficial hortoniano. La diferencia entre el hietograma de lluvia total y el hietograma de exceso de precipitación se conoce como abstracciones o pérdidas. Las pérdidas son primordialmente agua absorbida por filtración con algo de intercepción y almacenamiento superficial.

2.5.1. Método de Green-Ampt

Green y Ampt en 1911 propusieron un modelo simplificado para infiltración. Este modelo es derivado de la ecuación de Darcy a través de simplificaciones en el fenómeno de propagación del frente húmedo en el interior del suelo. Las suposiciones básicas de la Ecuación de Green y Ampt son:

- Existe un frente de humedecimiento muy bien definido para el cual el carga de presión del agua hf permanece constante en el tiempo y posición.
- Debajo de dicho frente de humedecimiento, el perfil de suelo se encuentra uniformemente húmedo con una conductividad hidráulica constante K .

En la ecuación de Green y Ampt, la tasa de infiltración f y la infiltración acumulada F están relacionadas por:

$$F(t) = Kt + \psi\Delta\theta \ln \left(1 + \frac{F(t)}{\psi\Delta\theta} \right) \quad (2.5)$$

$$f(t) = K \left(\frac{\psi\Delta\theta}{F(t)} + 1 \right) \quad (2.6)$$

Donde K es la conductividad hidráulica del suelo, ψ es la cabeza de presión capilar del frente de mojado y $\Delta\theta$ es la diferencia entre los contenidos de humedad del suelo inicial y final.

La ecuación 2.5 permite evaluar el volumen infiltrado F para diferentes tiempos t , y por consiguiente la ecuación 2.6 determina las tasas f , con lo que se puede determinar el hietograma de precipitación efectiva a partir de un hietograma de precipitación total.

2.5.2. Método SCS para las abstracciones

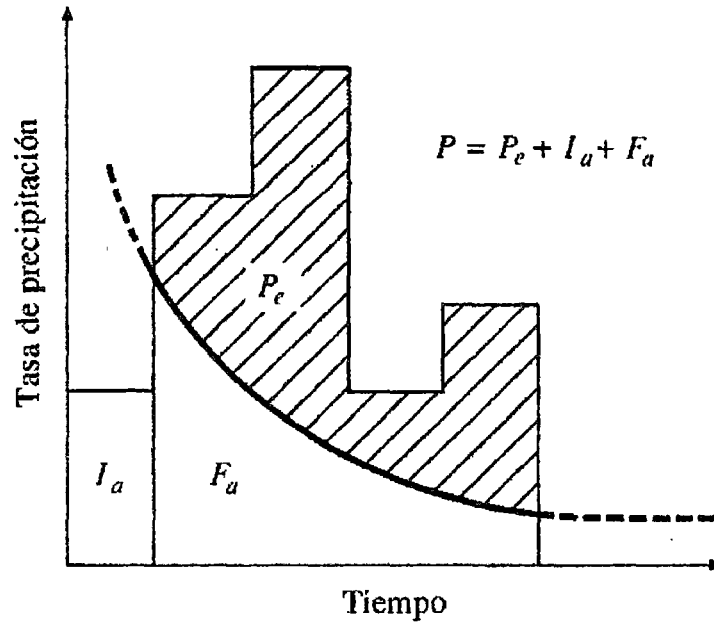
La determinación del volumen de escurrimiento (precipitación efectiva) como resultado de una precipitación caída en un área dada, es función de numerosas variables: tipo y uso del suelo, pendiente, vegetación, porcentaje de cobertura, grado de humedad, temperaturas precedentes, etc. El SCS ha elaborado [12] una metodología para la estimación de dicho escurrimiento comprobada en un gran número de cuencas de los Estados Unidos, Europa y América. La hipótesis del método del SCS consiste [15] en que las relaciones de las dos cantidades reales y las dos cantidades potenciales son iguales, es decir:

$$\frac{F_a}{S} = \frac{P_e}{P - I_a} \quad (2.7)$$

Del principio de continuidad se tiene:

$$P = P_e + I_a + F_a \quad (2.8)$$

Figura 2.13: Variables en el método de abstracciones de precipitaciones del SCS



Fuente: Tomada desde [15]

Combinando las ecuaciones 2.7 y 2.8 y resolviendo para P_e se encuentra:

$$P_e = \frac{(P - I_a)^2}{P - I_a + S} \quad (2.9)$$

La ecuación 2.9 representa el cálculo de la profundidad de exceso de precipitación o escorrentía directa de una tormenta. Donde P representa precipitación total, P_e exceso de precipitación, I_a abstracción inicial y F_a abstracción continuada. Al estudiar los resultados obtenidos para muchas cuencas experimentales pequeñas, se estableció una relación entre I_a y S :

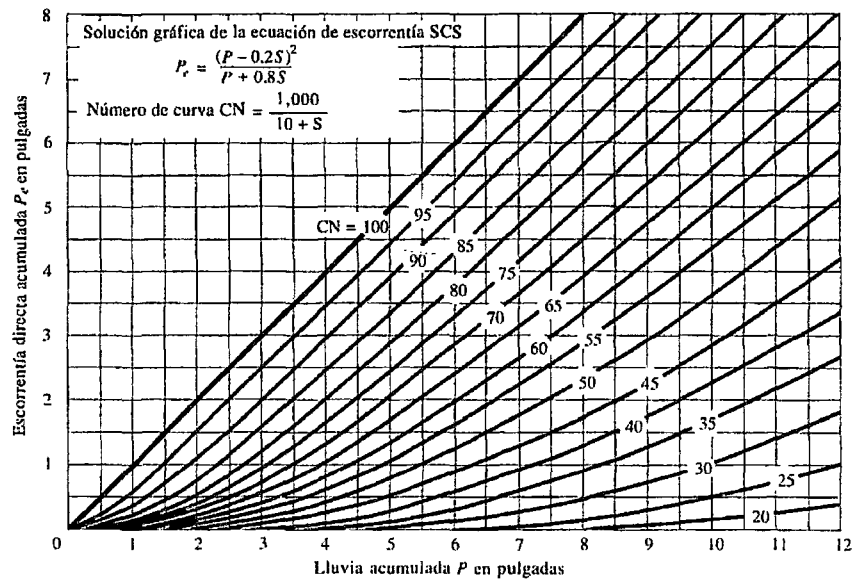
$$I_a = 0.2S \quad (2.10)$$

Sustituyendo la ecuación 2.10, la ecuación 2.9 queda:

$$P_e = \frac{(P - 0.2S)^2}{P + 0.8S} \quad (2.11)$$

Al representar en gráficas la información de P y P_e para muchas cuencas, el SCS encontró curvas como las que se muestran en la figura 2.14. Para estandarizar estas curvas, se define un número adimensional de curva CN , tal que $0 \leq CN \leq 100$. Para superficies impermeables y superficies de agua $CN = 100$; Para superficies naturales $CN < 100$. El número de curva y S se relacionan por:

Figura 2.14: Solución de las ecuaciones de escorrentía del SCS



Fuente: Tomada desde [15]

$$S = \frac{1000}{CN} - 10 \quad (2.12)$$

donde S está en pulgadas. Los números de curvas que se muestran en la figura se aplican para *condiciones antecedentes de humedad* (AMC, por sus siglas en inglés) normales (AMC II). Para condiciones secas (AMC I) o condiciones húmedas (AMC III), los números de curvas pueden calcularse por:

$$CN(I) = \frac{4.2CN(II)}{10 - 0.058CN(II)} \quad (2.13)$$

$$CN(III) = \frac{23CN(II)}{10 + 0.13CN(II)} \quad (2.14)$$

Desde el punto de vista hidrológico los suelos se clasifican [15], [12] en 4 grupos principales según las siguiente premisas:

- Grupo A: Arena profunda, potencial de escurrimiento es mínimo.
- Grupo B: Marga arenosa poco profundo, potencial de escurrimiento es medio.
- Grupo C: Suelos con alto contenido de arcilla y bajo contenido orgánico poco profundos, potencial de escurrimiento alto.
- Grupo D: Suelos expandibles cuando se mojan, arcillas altamente plásticas, potencial de escurrimiento es máxima.

Teniendo en cuenta que a medida [12] que el uso o el tratamiento del suelo aumentan, se incrementa la retención y se disminuye la producción de avenidas por el escurrimiento, se han clasificado dichos usos desde el punto de vista de los efectos hidrológicos. Para mayor detalle del uso de tablas pertinentes a este método se puede ver: [[15], páginas 153-154] y [[12], páginas 251-255].

2.6. Hidrograma unitario sintético

Los hidrogramas unitarios sintéticos suelen representar [14] una cuenca hidrográfica sin la información de aforo de caudales y se generan a partir de la información disponible de numerosas cuencas dotadas de instrumentos de medición. Existen tres tipos de hidrogramas unitarios sintéticos [15]:

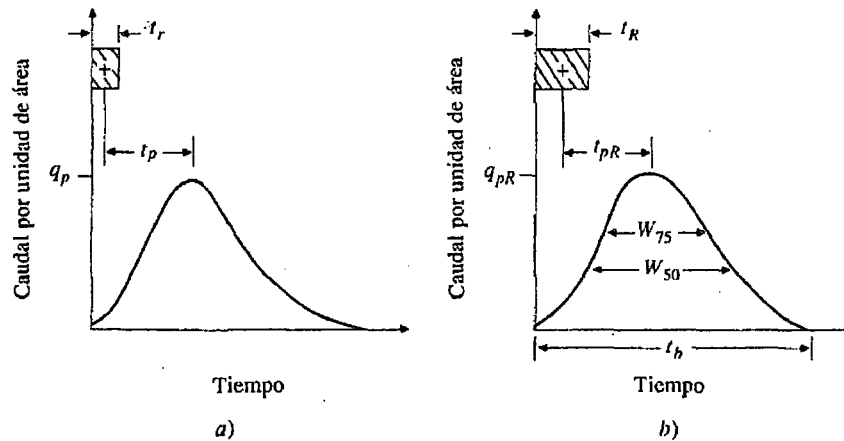
1. Aquellos que relacionan las características del hidrograma (tasa de flujo, flujo base, etc.) con las características de la cuenca (Snyder,1938; Gray, 1961).
2. Basados en hidrogramas unitarios adimensionales (Solil Conservation Service, 1972).
3. Basados en modelos de almacenamiento en la cuenca (Clark, 1943).

2.6.1. Hidrograma unitario sintético de Snyder

La aplicación del método de Snyder se realizó en cuencas localizadas principalmente en los montes Apalaches de los Estados Unidos y con tamaños que varían desde cerca de 30 a 30,000 km^2 . Las ecuaciones se han desarrollado para calcular el pico y la base del hidrograma unitario. Se definen también empíricamente el ancho del HU al 50% y al 75% del caudal pico figura 2.15.

Snyder definió el hidrograma unitario estándar como aquel cuya duración de lluvia t_r

Figura 2.15: Hidrograma unitario sintético de Snyder. a) Hidrograma unitario estándar. b) Hidrograma unitario requerido



Fuente: Tomada desde [15]

está relacionada con el retardo de la cuenca t_p por

$$t_p = 5.5t_r \quad (2.15)$$

Las principales ecuaciones para un hidrograma unitario estándar son:

1. El tiempo de retardo de la cuenca es

$$t_p = 0.75C_t (LL_c)^{0.3} \quad (2.16)$$

donde t_p está en horas, L es la longitud principal de la cuenca en kilómetros y C_t coeficiente basado en cuencas instrumentadas en la misma región.

2. El caudal pico por unidad de area de drenaje en $m^3/s.km^2$ del hidrograma unitario

estándar es

$$q_p = \frac{2.75C_p}{t_p} \quad (2.17)$$

donde C_p es el coeficiente empírico de retención y almacenamiento, varía entre 0.4 y 0.9 [ver [12], pagina 241]

3. Relaciona entre caudal pico estandar q_p y el caudal pico requerido q_{pR} por unidad de área de drenaje es

$$q_{pR} = \frac{q_p t_p}{t_{pR}} \quad (2.18)$$

4. El tiempo base t_b en horas del hidrograma unitario

$$t_b = \frac{5.56}{q_{pR}} \quad (2.19)$$

5. El ancho en horas de un hidrograma unitario a un caudal igual a cierto porcentaje del caudal pico q_{pR} está dado por

$$W = C_w q_{pR}^{-1.08} \quad (2.20)$$

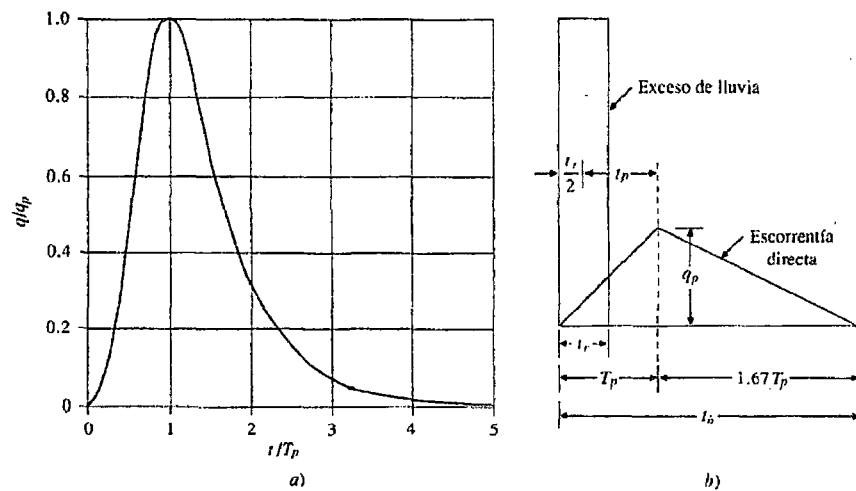
donde $C_w = 1.22$ para un ancho de 75 % y 2.14 para un ancho de 50 %.

2.6.2. Hidrograma adimensional de SCS

Este hidrograma desarrollado en base a hidrogramas sintéticos [15],[12],[14] define los caudales q y los tiempos t , en relación con el caudal pico q_p y el tiempo al pico T_p . La figura 2.16, muestra uno de estos hidrogramas adimensionales preparado, utilizando los hidrogramas unitarios para una variedad de cuencas. Los valores de q_p y T_p se estiman con el modelo del hidrograma unitario triangular tal como se muestra en la figura, el tiempo está dado en horas y el caudal en $m^3/s.cm$.

Como el área bajo el hidrograma unitario debería ser igual a una esorrentía de 1 cm, puede demostrarse que

Figura 2.16: Hidrogramas unitarios sintéticos del Soil Conservation Service. a) Hidrograma adimensional y b) Hidrograma unitario triangular



Fuente: Tomada desde [15] y [12]

$$q_p = \frac{2.08A}{T_p} \quad (2.21)$$

$$T_p = \frac{t_r}{2} + t_p \quad (2.22)$$

$$t_p = 0.6T_c \quad (2.23)$$

donde A es el área de drenaje en kilómetros cuadrados y T_c es el tiempo de concentración de la cuenca.

Las ecuaciones 2.21, 2.22 y 2.23 representan caudal pico, tiempo de ocurrencia al pico y tiempo de retardo respectivamente.

2.6.3. Hidrograma unitario de Clark

El modelo usa dos parámetros y la relación tiempo-área para definir el hidrograma unitario. Los parámetros son: el tiempo de concentración, T_c , definido como el tiempo que una partícula de agua tarda en llegar desde el punto más alejado de la cuenca al punto de descarga y un segundo parámetro, el coeficiente de almacenamiento, R , en unidades de tiempo, que tiene en cuenta el efecto de almacenamiento en la red de cauces de la cuenca. Este modelo empieza con la ecuación 2.24 de continuidad, donde

I y Q , son caudales de ingreso y de salida respectivamente y dS/dt es el cambio de volumen en el almacenamiento en el tiempo t .

$$I - Q = \frac{dS}{dt} \quad (2.24)$$

Una solución de la ecuación 2.24 mediante aproximación de diferencias finitas, se obtiene la ecuación 2.25 del flujo de salida del hidrograma unitario sintético de Clark.

$$Q_2 = CI + (1 - C)Q_1 \quad (2.25)$$

donde

$$C = \frac{2\Delta t}{2R + \Delta t} \quad (2.26)$$

El coeficiente de almacenamiento, R se puede estimar dividiendo el caudal en el punto de inflexión del hidrograma (sacando el flujo base) por la tasa de disminución de los caudales en el intervalo de tiempo tomada para el hidrograma.

La ecuación 2.27, representa la relación del tiempo-área de la distribución temporal adecuadamente para un hidrograma unitario derivada para la mayoría de líneas divisorias de aguas.

$$\frac{A_t}{A} = \begin{cases} 1.414\left(\frac{t}{t_c}\right)^{1.5} & \text{para } t < \frac{t_c}{2} \\ 1 - 1.414\left(1 - \frac{t}{t_c}\right)^{1.5} & \text{para } t \geq \frac{t_c}{2} \end{cases} \quad (2.27)$$

donde A_t es el área acumulada de la línea divisoria de aguas contribuyente en el tiempo t , A es el área total de la línea divisoria de aguas y t_c tiempo de concentración de la línea divisoria de aguas, que se define como el tiempo necesario para que una gota de lluvia caída se movilice desde el punto más alejado de la cuenca hasta su lugar de salida. En la literatura existen múltiples expresiones para el cálculo del tiempo de concentración propuestas por diferentes autores, uno de ellos es la fórmula californiana, cuya ecuación es la siguiente:

$$t_c = 0.0195\left(\frac{L^3}{H}\right)^{0.385} \quad (2.28)$$

donde T_c está en minutos, L es la longitud de cauce principal de la cuenca en m y H desnivel entre la salida y el punto más alejado de la cuenca en m .

2.7. Tránsito hidrológico de avenidas

El término tránsito de avenidas (que también se denomina propagación de la onda de avenida) describe el proceso de predecir la curva de un hidrograma en un lugar en particular de un canal fluvial, embalse o lago. Dicho hidrograma muestra el efecto de un caudal o flujo que se ha medido o estimado en algún otro lugar, normalmente aguas arriba. Existen varios métodos hidrológicos para calcular el tránsito de avenidas con el fin de determinar valores tales como el caudal, el nivel o la velocidad aguas abajo a partir del hidrograma de un lugar aguas arriba. Los métodos hidrológicos aplican ciertas relaciones entre el almacenamiento y el caudal efluente a la ecuación de continuidad. Por lo general, se trata de relaciones empíricas y se pueden utilizar relaciones nivel-caudal.

Las siguientes son algunas de las técnicas más comunes:

- Muskingum
- Muskingum-Cunge
- Retardo y K (una variante del método de Muskingum)
- Onda cinemática
- Puls modificado

La variantes del método de Muskingum son las más utilizadas. En este módulo nos centraremos en el método de Muskingum y Muskingum-Cunge.

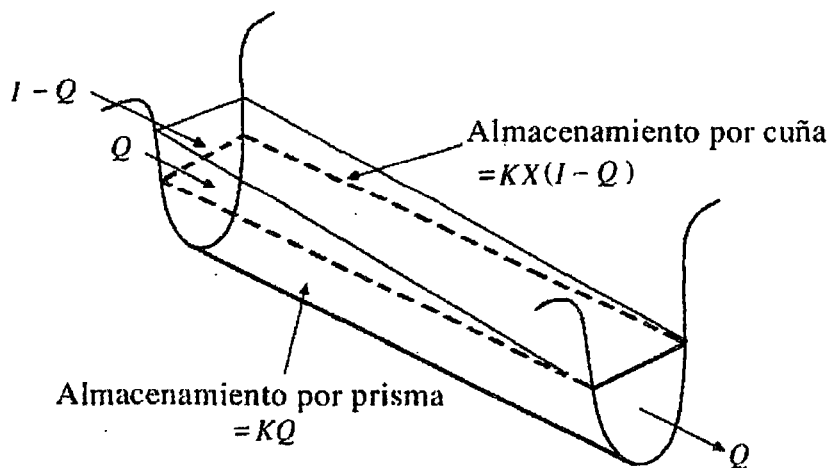
2.7.1. Método de Muskingun

Este método es el más usado en el tránsito hidrológico en canales, se ha realizado numerosas aplicaciones en los Estados Unidos y en casi todo el mundo. El método de

Muskingum se basa en la ecuación diferencial de almacenamiento, ecuación 2.29.

$$I - Q = \frac{dS}{dt} \quad (2.29)$$

Figura 2.17: Almacenamiento por prisma y por cuña en un tramo de un canal



Fuente: Tomado desde [15]

En la figura 2.17 se muestra que el volumen de almacenamiento por prisma es igual a KQ donde k es un coeficiente de proporcionalidad, y el volumen de almacenamiento por cuña es igual a $KX(I - Q)$, donde X es un factor de ponderación dentro del rango $0 \leq X \leq 0.5$. La ecuación 2.30 representa un modelo lineal para el tránsito de caudales en corriente.

$$S = K [XI + (1 - X)Q] \quad (2.30)$$

donde S es el volumen de almacenamiento en m^3/s , I es el gasto de entrada en m^3/s y Q es el gasto de salida en m^3/s .

La ecuación de tránsito en el tiempo j y $j + 1$ para el método de Muskingum está dado por:

$$Q_{j+1} = C_1 I_{j+1} + C_2 I_j + C_3 Q_j \quad (2.31)$$

donde

$$C_1 = \frac{\Delta t - 2KX}{2K(1 - X) + \Delta t} \quad (2.32)$$

$$C_2 = \frac{\Delta t + 2KX}{2K(1-X) + \Delta t} \quad (2.33)$$

$$C_3 = \frac{2K(1-X) - \Delta t}{2K(1-X) + \Delta t} \quad (2.34)$$

Nótese que $C_1 + C_2 + C_3 = 1$

Para hidrogramas disponibles de entrada y salida observados para un tramo de un río, pueden determinarse los valores de K y X con la ecuación 2.35.

$$K = \frac{0.5\Delta t[(I_{j+i} + I_j) - (Q_{j+1} + Q_j)]}{X(I_{j+1} - I_j) + (1-X)(Q_{j+1} - Q_j)} \quad (2.35)$$

Al graficar el numerador y denominador de la ecuación 2.35, esta produce una grafica en forma de bucle. El valor de X que produzca el bucle más parecido a una línea única se toma como el valor correcto para ese tramo, y K , de acuerdo a la ecuación 2.35, es igual a la pendiente de esa línea.

2.7.2. Método de Muskingun-Cunge

Cunge(1969) propuso un método basado en el método de Muskingum, un método tradicionalmente aplicado al tránsito hidrológico de almacenamiento lineal. El método de Muskingun-Cunge, toma como punto de partida la ecuación de continuidad 2.36 y también incluye la forma de difusión de la ecuación de momentum 2.37.

$$\frac{\partial Q}{\partial x} + \frac{\partial A}{\partial t} = q \quad (2.36)$$

$$S_0 = S_f \quad (2.37)$$

donde S_0 es el pendiente de lecho, S_f es la pendiente de fricción y q caudal de entrada lateral en dimensiones de caudal por unidad de longitud de canal.

Cunge demostró que cuando K y Δt se toman como constantes, la ecuación 2.38 es una solución aproximada de las ecuaciones de onda cinemática [2.36 y 2.37]

$$Q_{i+1}^{j+1} = C_1 Q_1^{j+1} + C_2 Q_i^j + C_3 Q_{i+1}^j \quad (2.38)$$

en la cual C_1 , C_2 y C_3 están definidas en las ecuaciones 2.32 a 2.34. Adicionalmente Cunge demostró que la ecuación puede considerarse como una solución aproximada de una ecuación de difusión modificada si

$$K = \frac{\Delta x}{c_k} \quad (2.39)$$

$$X = \frac{1}{2} \left(1 - \frac{Q}{Bc_k S_0 \Delta x} \right) \quad (2.40)$$

donde c_k es la celeridad correspondiente a Q y B es el ancho de la superficie de agua en metros.

Capítulo III: Desarrollo del trabajo de la tesis

En éste capítulo se presenta el desarrollo de la tesis que involucra los siguientes puntos:

3.1. Identificación de la población

La población [18] debe quedar especificado tanto espacial(geográfico) y temporalmente.

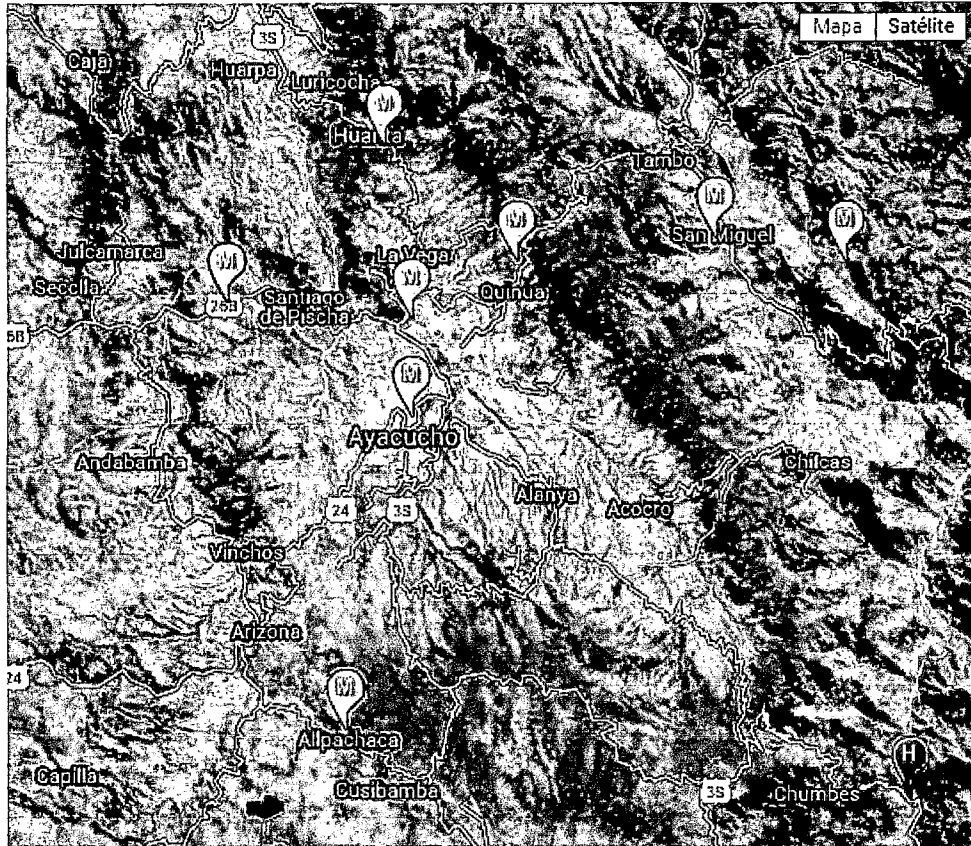
3.1.1. Unidad muestral

La unidad muestral se corresponde con los registros de las precipitaciones de las estaciones pluviométricas seleccionados sobre la la cuenca del Río Chacco y sus alrededores.

3.1.2. Unidad de Análisis

Identificado las unidades de muestreo, la unidad de análisis son las zonas o puntos desde las cuales se registran las unidades de análisis, éste se corresponde directamente con los registros de datos de la estaciones pluviométricas, figura 3.18.

Figura 3.18: Unidades de muestreo



Fuente: Adaptado desde Google Earth

3.1.3. Delimitación de la población

La población está conformado por unidades de muestreo, cantidad de estaciones pluviométricas, que están comprendidas, dentro de la cuenca del estudio y sus alrededores directos. El periodo de registro de las unidades de análisis corresponden desde el año 1998 hasta el 2014; esto debido al condicionante de los registros de las estaciones sintéticas (TRMM).

3.2. Determinación de la muestra

A partir de la población identificada que se encuentra compuesto por todas las unidades muestrales y como cada uno de sus elementos dispone de la misma posibilidad para

ser seleccionado, dicha selección se realiza aleatoriamente en una cantidad necesaria tomando en cuenta el error máximo aceptable para un nivel deseado de confianza.

3.2.1. Cálculo de la muestra

Identificado y registrado la población, se procede con la selección de la muestra, con esta finalidad se considera el Error Máximo aceptable en un 5 % para el nivel deseado de confianza de 95 %, obteniéndose 73 muestras para las consideraciones establecidas, la imagen 3.19 muestra los resultados obtenidos. El tamaño de muestra se refiere a 73 registros de precipitaciones máximas anuales, de un total de 90 registros de precipitaciones máximas anuales (población), la muestra es obtenida generando 73 números aleatorios en el rango de 1 y 90 y representan los registros de las unidades de análisis concernientes a la investigación.

Figura 3.19: Obtención del tamaño de la muestra

The screenshot shows the 'Sample Size Determination' window in the Decision Analyst STATS 2.0 software. The window is titled 'Sample Size Determination (Sample Size for Population Percentage Estimates)'. It is divided into two main sections: 'Inputs' and 'Results'.
In the 'Inputs' section, the following values are entered:
- Universe Size: 90 (with a note: 'If universe is less than 99,999, replace 99,999 with the smaller number')
- Maximum Acceptable Percentage Points of Error: 5% (selected from a dropdown menu)
- Estimated Percentage Level: 50% (selected from a dropdown menu)
- Desired Confidence Level: 95% (selected from a dropdown menu)
In the 'Results' section, the output is displayed: 'The Sample Size Should Be...' followed by a text box containing the value '73'.
At the bottom of the window, there are three buttons: 'Calculate', 'Reset', and 'Exit'. The Decision Analyst logo and tagline 'The global leader in analytical research systems' are also visible. The footer of the window displays the contact information: '817-640-6166 | www.decisionanalyst.com'.

Fuente: Adaptado desde [18] y el tamaño de muestra es obtenido con Decision Analyst STATS 2.0

3.3. Delimitación del área de estudio

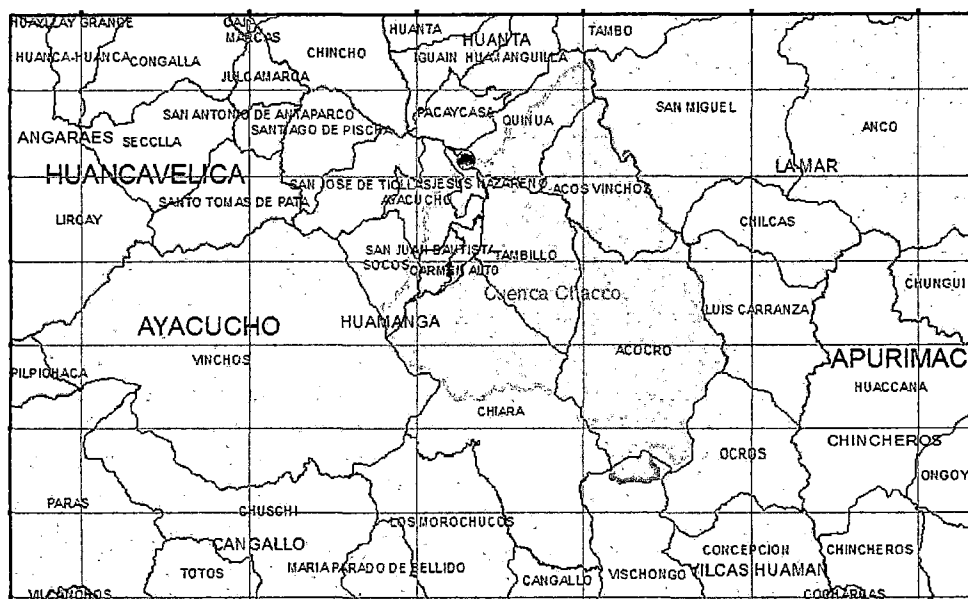
El área de estudio, se ha realizado tomando en cuenta los siguientes aspectos fundamentales: la ubicación del punto de drenaje en el tramo del Río Chacco, preferentemente en la estación hidrométrica del Puente Chacco, que dispone de registros de caudales diarios, desde el año 1996-2001, para la validación del presente investigación.

3.3.1. Ubicación

- **Geográfica:** Geográficamente se localiza en la región central de la Cordillera Occidental de los Andes, a una altitud que va desde los 2500 a 4450, metros sobre el nivel del mar
- **Política:** La cuenca del Río Chacco se encuentra ubicado políticamente en:
Región: Ayacucho
Departamento: Ayacucho
Provincia: Huamanga
Distrito: Jesús Nazareno, Ayacucho, San Juan Bautista, Carmen Alto, Socos, Quinoa, Acos Vinchos, Tambillo, Chiara y Acocro.

En la Figura 3.20 se muestra la ubicación general del proyecto y específicamente la delimitación de la cuenca de estudio, dentro de los distritos, provincias del departamento de Ayacucho.

Figura 3.20: Ubicación Política de la Cuenca del Río Chacco dentro del departamento de Ayacucho



Fuente: Elaboración propia

- **Cartográfica:** Inspeccionado la red hídrica afluente al punto de interés, se observa que la cuenca del Río Chacco se encuentra contenido en los cuadrantes establecido por el Instituto Geográfico Nacional, tabla 3.5.

En la figura 3.21, muestra la disposición de la información necesaria para deli-

Tabla 3.5: Cuadrantes contenidos para la cuenca del Río Chacco

Cuadrantes	: 26-ñ, 26-o, 27-ñ y 27-o
Projected Coordinate System	: WGS-1984-UTM-Zone-18S
Projection	: Transverse-Mercator
Geographic Coordinate System	: GCS-WGS-1984
Datum	: D-WGS-1984
Prime Meridian	: Greenwich

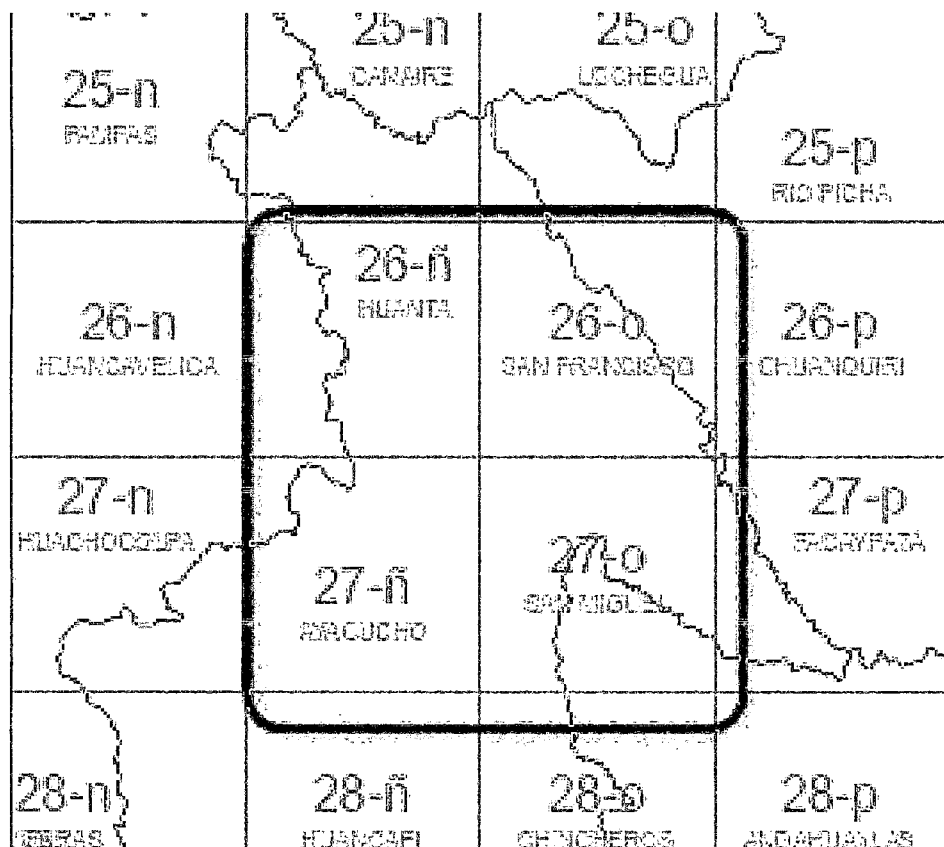
Fuente: Elaboración propia

mitar la cuenca del Río Chacco. Descargar los cuadrantes requeridos desde la página de Ministerio de Educación, específicamente desde ⁶, es posible descargar información cartográfica en distintas temáticas: red hídrica, curvas de nivel, ciu-

⁶Página web oficial que engloba a los satélites <http://escale.minedu.gob.pe/descargas/mapa.aspx>

dades, lagunas, etc. en formato shp para ArcGIS o cualquier otro programa de tratamiento de sistemas de información geográfica.

Figura 3.21: Cartografía - Cuadrantes Requeridos



Fuente: Adaptado desde Instituto Geográfico Nacional - IGN

- **Hidrográfica:** De acuerdo a la clasificación de la ANA (Autoridad Nacional del Agua), hidrográficamente la cuenca se encuentra ubicada:

Región hidrográfica : Amazonas

Número : 143

Código : 4996

Unidad hidrográfica : Cuenca Mantaro

Para mayor detalle de la ubicación hidrográfica se muestra la figura 3.22, que contempla la ubicación de la cuenca del Río Chacco dentro de la unidad hidrográfica de Mantaro.

Figura 3.22: Ubicación hidrográfica



Fuente: Elaboración propia

3.4. Caracterización de la cuenca

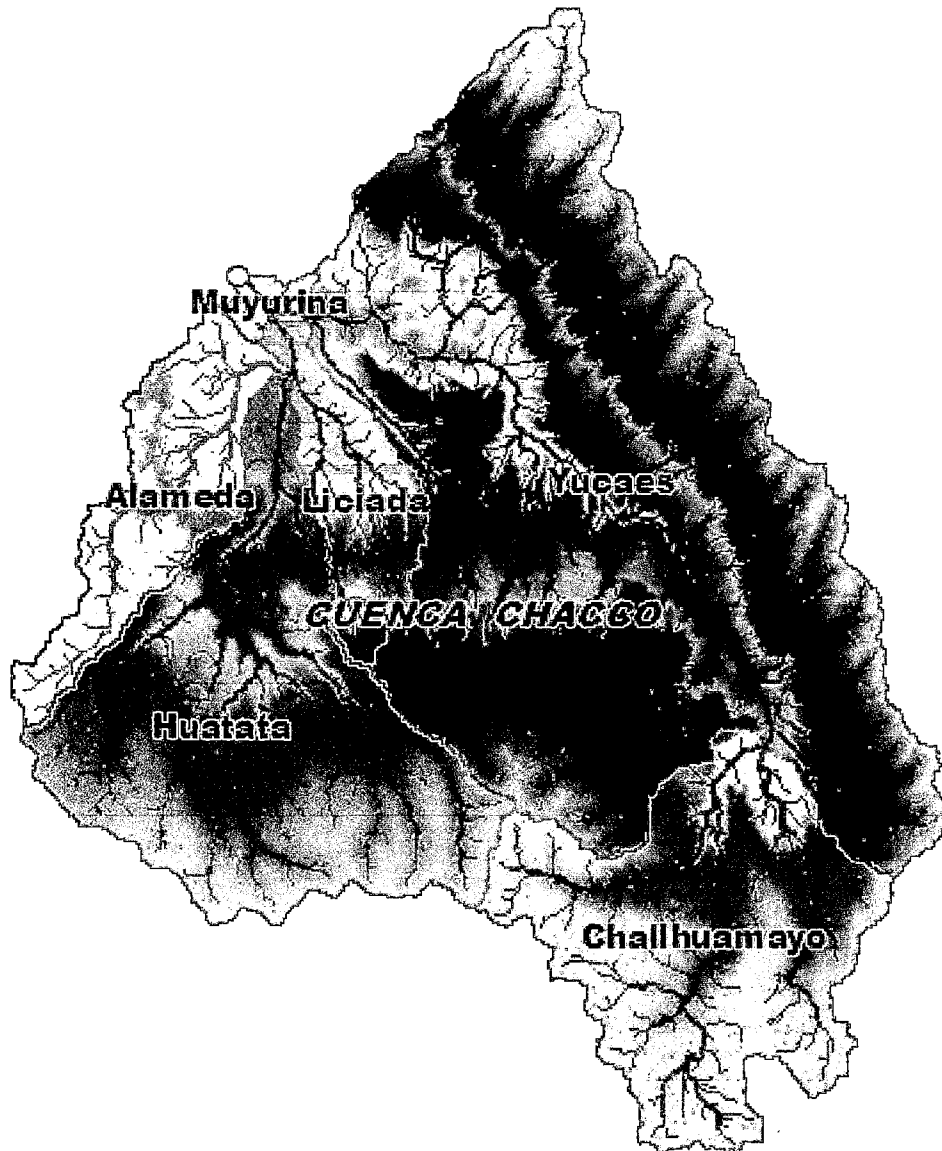
Con la finalidad de realizar un análisis exhaustivo de las características hidrológicas de la Cuenca del Río Chacco, se subdividió en las siguientes subcuencas: Muyurina, Alameda, Huatata, Liciada, Yucaes y la subcuenca Challhuamayú. Para su mejor apreciación de la Cuenca del Río Chacco y sus subcuencas referentes, se ha confeccionado en modelo raster y vectorial como se puede apreciar en la figura 3.23.

Una cuenca queda definida por su forma, relieve y drenaje, para lo cual se han establecido una serie de parámetros, que a través de ecuaciones matemáticas, sirven de referencia para la clasificación y comparación de cuencas. Para un mejor estudio de las cuencas se han establecido los siguientes parámetros:

3.4.1. Parámetros de forma

- a) **Área de la Cuenca (A):** El área A se estima a través de la sumatoria de las áreas comprendidas entre las curvas de nivel y los límites de la cuenca. Esta suma será igual al área de la cuenca en proyección horizontal.

Figura 3.23: Cuenca del Río Chacco con sus subcuencas referentes



Fuente: Elaboración propia

- b) **Coefficiente de Compacidad o de Gravelius (K_c):** Permite evaluar la uniformidad o irregularidad del contorno de la cuenca con respecto a un círculo, y se define como el cociente entre el perímetro de la cuenca y el perímetro de un círculo de igual área.

$$K_c = \frac{0.28P}{\sqrt{A}} \geq 1 \quad (3.41)$$

donde P es el perímetro de la cuenca en Km y A es el área de la cuenca en Km^2 . De la expresión se desprende que K_c siempre es mayor o igual a 1, y se incrementa

con la irregularidad de la forma de la cuenca.

- c) **Factor de Forma (F_f):** Definido como el cociente entre la superficie de la cuenca y el cuadrado de su longitud máxima, medida desde la salida hasta el límite de la cuenca, cerca de la cabecera del cauce principal, a lo largo de una línea recta.

$$F_f = \frac{A}{L^2} \quad (3.42)$$

donde L es la longitud del cauce principal en Km y A es el área de la cuenca en Km^2 .

Para un círculo, $F_f = 0.79$, para un cuadrado con la salida en el punto medio de uno de los lados, $F_f = 1$, y con la salida en una esquina, $F_f = 0.5$.

- d) **Radio de Circularidad (R_c):** Relaciona el área de la cuenca y la del círculo que posee una circunferencia de longitud igual al perímetro de la cuenca.

$$R_c = \frac{4\pi A}{P^2} \quad (3.43)$$

donde los parámetros A y P , son los mismos que de la ecuación 3.41.

Los valores oscilan entre 0 y 1, y el máximo valor equivale a la unidad, lo que correspondería a una cuenca de forma circular.

- e) **Razón de elongación (R_e):** Es de gran interés ya que se relaciona con la forma de la cuenca. Se determina como la razón entre el diámetro de un círculo que posee la misma área que la cuenca y la longitud del cauce principal que la drena (Sala y Gay, 1981). Fue elaborado por Schumm (1956) y es la fórmula más extendida para calcular la elongación debido a que es la que mejor correlación guarda con la hidrología de la cuenca.

$$R_e = \frac{1.13A^{0.5}}{L} \quad (3.44)$$

donde los parámetros A y L , son los mismos que de la ecuación 3.42.

Así valores de R_e inferiores a 1 implicarán formas alargadas, cuanto menor sea R_e más alargada será la forma de la cuenca. Los puntos antes mencionados se resumen en la tabla 3.6

Tabla 3.6: Parámetros de forma de la Cuenca del Río Chacco

Cuenca/ Subcuenca	Área km ²	Perímetro km	Coef. De comp.	Factor de forma	Radio de circular	Razón de elong.
Chacco	1096.77	174.67	1.48	0.29	0.45	0.61
Muyurina	7.97	18.7	1.85	0.45	0.29	0.76
Alameda	73.53	69.3	2.26	0.12	0.19	0.39
Huatata	231.32	105.9	1.95	0.23	0.26	0.55
Liciada	52.74	53.1	2.05	0.15	0.24	0.44
Yucaes	547.38	166.5	1.99	0.29	0.25	0.61
Challhuamayú	183.84	95.2	1.97	0.31	0.25	0.63

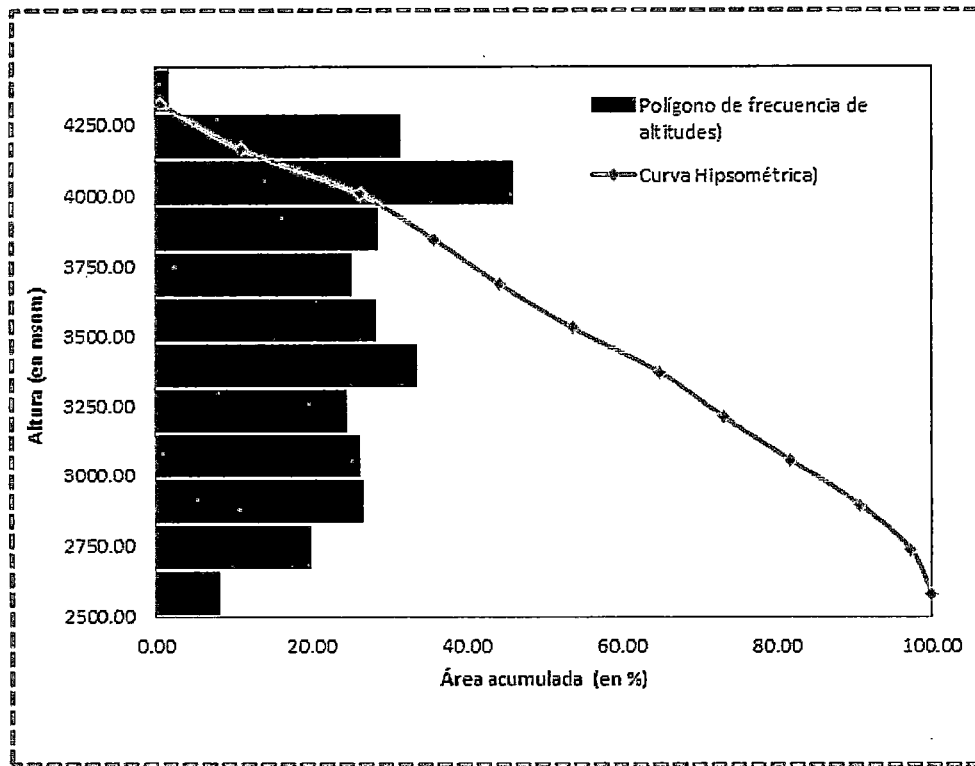
Fuente: Elaboración propia

3.4.2. Parámetros de relieve

El relieve posee una incidencia más fuerte sobre la escorrentía que la forma, dado que a una mayor pendiente corresponderá un menor tiempo de concentración de las aguas en la red de drenaje y afluentes al curso principal. Es así como a una mayor pendiente corresponderá una menor duración de concentración de las aguas de escorrentía en la red de drenaje y afluentes al curso principal.

- a) **Curva Hipsométrica:** Es utilizada para representar gráficamente cotas de terreno en función de las superficies que encierran. Para su trazado se debe tener en cuenta que sobre la sección de control (altitud mínima de la cuenca), se tiene el cien por ciento de su superficie. Si se ubica en el punto más alto de la cuenca y se calcula a partir de cada curva de nivel, las áreas acumuladas por encima de ellas, se puede construir la curva hipsométrica.
- b) **Polígono de Frecuencias:** Se denomina así a la representación gráfica de la relación existente entre altitud y la relación porcentual del área a esa altitud con respecto al área total. Tanto la curva hipsométrica como el polígono de frecuencia se muestra en la figura 3.24
- c) **Altitud Media de la Cuenca:** Corresponde a la ordenada media de la curva hipsométrica, y su cálculo obedece a un promedio ponderado: elevación – área de la cuenca (Z centroide).

Figura 3.24: Curva hipsométrica y polígono de frecuencias



Fuente: Elaboración propia

- d) **Pendiente Media de la Cuenca:** Llamamos pendiente media de la cuenca, a la media ponderada de todas las pendientes correspondientes a áreas elementales en las que pudiéramos considerar constante la máxima pendiente.

En la tabla 3.7 se muestra el resultado de los parámetros de relieve para la zona de estudio.

3.4.3. Parámetros de la red hidrográfica

La red hidrográfica corresponde al drenaje natural, permanente o temporal, por el que fluyen las aguas de los escurrimientos superficiales, hipodérmicos y subterráneos de la cuenca. La red de drenaje es, probablemente, uno de los factores más importantes a la hora de definir un territorio.

- a) **Número de Orden de los Ríos:** La clasificación (orden) de la cuenca hidrográfica es función del número de orden o medida de la ramificación del cauce principal.

Tabla 3.7: Parámetros de relieve de la Cuenca del Río Chacco

Cuenca Subcuenca	Z máx. m.s.n.m	Z mín. m.s.n.m	X centroide m	Y centroide m	Z centroide m.s.n.m	pend. prom. %
Chacco	4400.00	2500.00	596975.60	8537729.73	3713.32	25.76
Muyurina	2950.00	2500.00	587264.83	8550493.21	2713.65	27.88
Alameda	4050.00	2550.00	582226.68	8541665.65	3290.97	23.23
Huatata	4300.00	2550.00	587074.36	8533786.35	3588.11	23.22
Liciada	3900.00	2500.00	590740.71	8542151.02	3175.18	24.06
Yucaes	4400.00	2500.00	602365.24	8543364.08	3695.94	29.11
Challhuamayo	4300.00	3200.00	605921.09	8522838.69	3835.43	20.53

Fuente: Elaboración propia

b) **Pendiente Media del Río Principal:** El valor de la pendiente longitudinal se ha efectuado con el método de áreas compensadas para el cauce principal de cada subcuenca. Los parámetros de red hidrográfica antes mencionados y los parámetros generados, se muestra en la tabla 3.8.

Tabla 3.8: Parámetros de la red hidrográfica de la Cuenca del Río Chacco

Cuenca / Subcuenca	Long. Curso principal Km	Orden red hidrica Und	pend. cauce principal m/Km	tiempo de concentracion Horas
Chacco	61.13	6.00	31.08	5.99
Muyurina	4.21	6.00	106.82	0.47
Alameda	24.77	4.00	60.57	2.31
Huatata	31.46	5.00	55.63	2.87
Liciada	18.62	5.00	75.20	1.71
Yucaes	43.23	6.00	43.96	4.01
Challhuamayo	24.21	5.00	45.44	2.54

Fuente: Elaboración propia

3.5. Identificación de las estaciones meteorológicas

La identificación de las estaciones meteorológicas para la cuenca del Río Chacco, se realiza de acuerdo a lo consignado del Mapa de Ubicación de Estaciones Meteorológicas distribuido por la Autoridad Nacional del Agua (ANA) y controlados por el Servicio Nacional de Meteorología e Hidrología del Perú (Senamhi). Las estaciones tomadas cuentan con datos requeridos para el propósito fijado, en la tabla 3.9 se muestra las

estaciones requeridas. Series de precipitación máxima en 24 horas, de las estaciones meteorológicas de Wayllapampa, Quinua, Allpachaca, Huamanga, San Pedro de Cachi, San Miguel, según el detalle del Anexo A

Tabla 3.9: Estaciones meteorológicas de la cuenca del Río Chacco

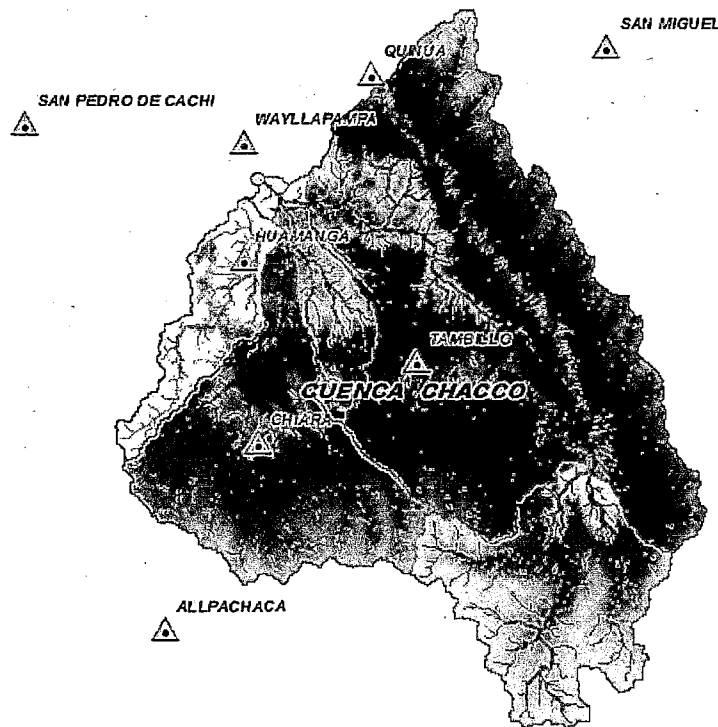
Estacion	tipo	Altitud	Latitud	Longitud
Allpachaca	Convencional	3600 msnm	13 °23'1" S	74 °16'1" W
Huamanga	Convencional	2761 msnm	13 °9'1" S	74 °13'1" W
Quinua	Convencional	3316 msnm	13 °2'2" S	74 °8'7" W
San Miguel	Convencional	2720 msnm	13 °1'1" S	73 °59'1" W
San Pedro de Cachi	Convencional	2990 msnm	13 °3'55" S	74 °21'31" W
Wayllapampa	Convencional	2470 msnm	13 °4'36" S	74 °13'1" W
Chiara	Convencional	3400 msnm	13 °16'00" S	74 °12'27" W
Tambillo	Convencional	3250 msnm	13 °12'54" S	74 °06'19" W

Fuente: Elaboración Propia

La Serie de precipitación máxima en 24 horas, de las estaciones meteorológicas de Wayllapampa, Quinua, Allpachaca, Huamanga, San Pedro de Cachi, Chiara y Tambillo, se obtienen desde el Servicio Nacional de Meteorología e Hidrología del Perú (SENAMHI), mediante Gobierno Regional de Ayacucho. Los datos de las estaciones mencionadas, se muestran en el anexo B, para sus respectivo consulta.

La figura 3.25 muestra la ubicación de cada una de las estaciones meteorológicas dentro y fuera de la cuenca limitada.

Figura 3.25: Estaciones meteorológicas ubicadas dentro y fuera de la Cuenca del Río Chacco



Fuente: Elaboración propia

3.6. Producto 3B42 V7 diario del TRMM

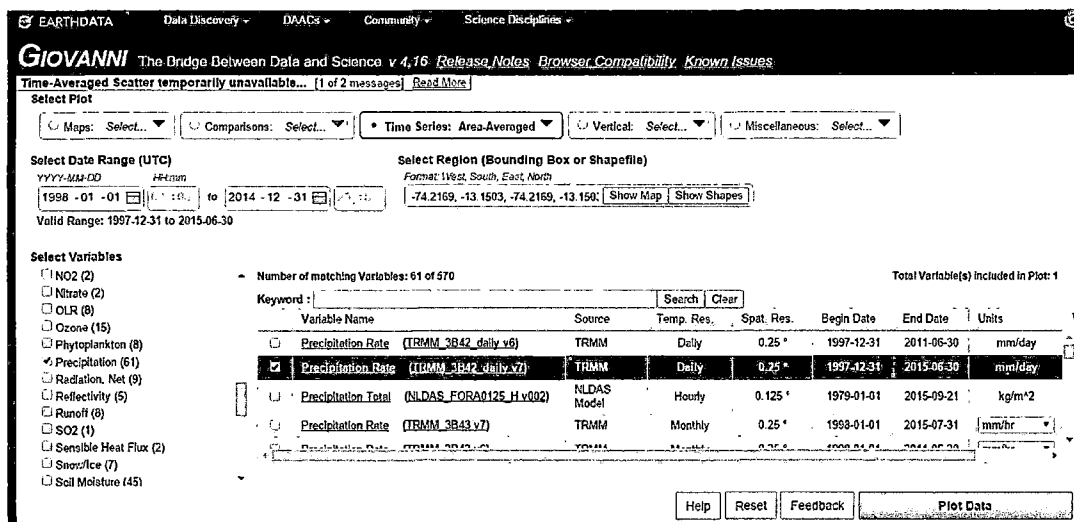
El 3B42 V7 diario, es la precipitación final en mm /día, las previsiones tienen una resolución temporal cada 3 horas, fecha de inicio el 31-12-1997 hasta el presente, resolución espacial de $0.25^\circ \times 0.25^\circ$ y cobertura espacial en la banda de latitud es de 50° S y 50° N . Este producto es el resultado de ajustes y calibraciones de los diferentes sensores que tiene el satélite TRMM, que se ha descrito en el capítulo anterior.

3.6.1. Acceso a los datos

Para la descarga de los datos, en el capítulo anterior, dentro del panorama del TRMM, se ha mencionado la dirección de las diferentes herramientas de acceso a los datos de

descarga y el formato de salida. Para el presente tema de investigación se tomarán los datos del plataforma de acceso de Giovanni, con la siguiente dirección de descarga: <http://giovanni.sci.gsfc.nasa.gov/giovanni/>, donde muestra la imagen 3.26, que se completa con los datos de la variable (precipitación, radiación, etc), las coordenadas geográficas y intervalo de datos.

Figura 3.26: Desacaga de los datos en la plataforma Giovanni



Fuente: Elaboración propia

3.6.2. Registro de precipitaciones en estaciones sintéticas

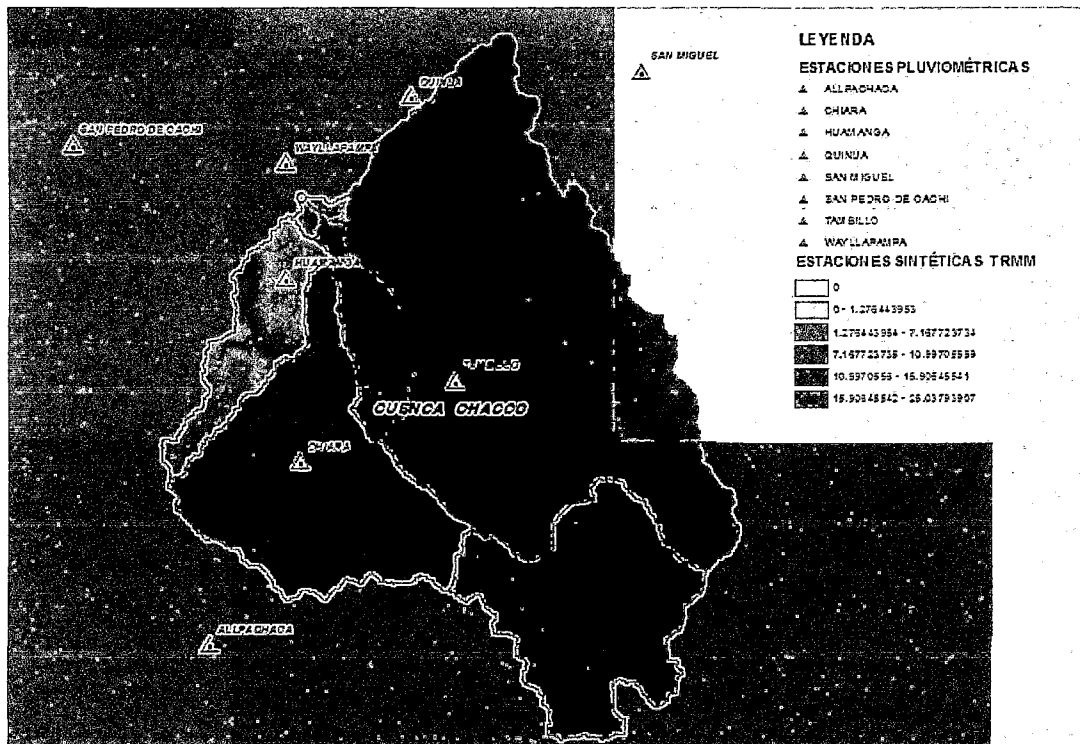
La recolección de precipitación diaria, mediante el producto 3B42 V7 diaria del TRMM en 6 ubicaciones sobre la Cuenca del Río Chacco, es utilizada en este estudio, que son presentados en la tabla 3.10. Para mayor detalle se ha confeccionado la figura 3.27, que representa la ubicación de las estaciones pluviométricas y sintéticas, como se puede apreciar, las estaciones sintéticas están representados en cuadrículas de $27 \times 27 \text{ Km}$, y que los datos contenidos son los mismos para cada cuadrícula; entonces se puede decir que las estaciones pluviométricas de: Wayllapampa, Quinua, Tambillo y Huamanga, representan una sola estación pluviométrica frente a la estación sintética TRMM.

Tabla 3.10: Estaciones sintéticas de la cuenca del Río Chacco

Estacion sintética	Altitud	Latitud	Longitud
Allpachaca	3600 msnm	13 °23'1" S	74 °16'1" W
Huamanga	2761 msnm	13 °9'1" S	74 °13'1" W
Quinua	3316 msnm	13 °2'2" S	74 °8'7" W
San Miguel	2720 msnm	13 °1'1" S	73 °59'1" W
San Pedro de Cachi	2990 msnm	13 °3'55" S	74 °21'31" W
Wayllapampa	2470 msnm	13 °4'36" S	74 °13'1" W

Fuente: Elaboración Propia

Figura 3.27: Estaciones pluviométricas y sintéticas ubicadas dentro y fuera de la Cuenca del Río Chacco



Fuente: Elaboración propia

3.6.3. Comparación gráfica de precipitación máxima anual del producto 3B42 V7 del TRMM y SENAMHI

La comparación gráfica, se realiza aquí, con el fin de observar el comportamiento de las precipitaciones (intensidad y tiempo en que suceden). Los gráficos son elaborados

con los datos de los registros de SENAMHI y 3B42 TRMM. La figura 3.29, representa parte de descarga de los datos sintéticos para la estación Huamanga, en formato gráfico (PNG); en cambio las figuras: 3.30, 3.31, 3.32, 3.33, 3.34 y 3.35 , representan la gráfica comparativa de las series temporales relacionadas a las precipitaciones diarias máximas anuales de las estaciones: Huamanga, Wayllapampa, Quinua, San pedro de cachi, Tambillo y Chiara, respectivamente. Se observa que no existe una relación única entre los registros máximos diarios obtenidos desde 3B42 V7 TRMM y la estaciones Pluviométricas SENAHMI.

Figura 3.28: Registro de precipitación diaria para la estación Huamanga del producto 3B42 V7 del TRMM

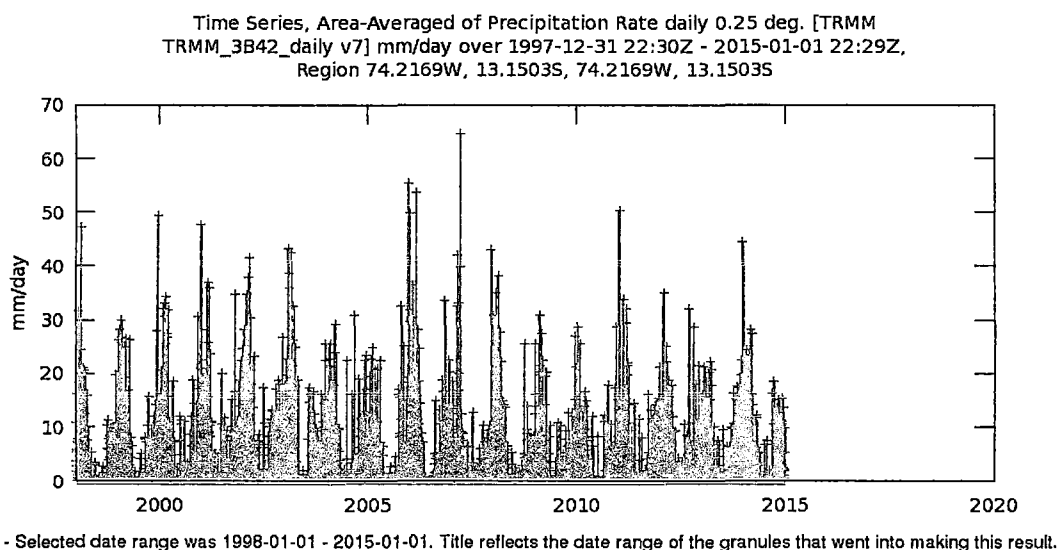
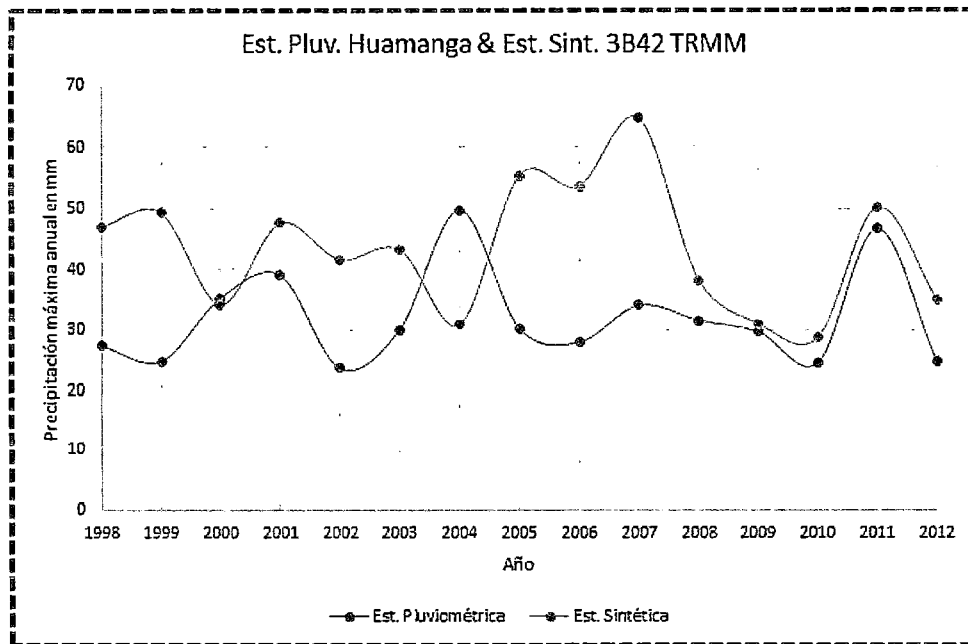


Figura 3.29: Fuente: Tomado desde la Plataforma de GIOVANNI- TRMM

3.7. Análisis de consistencia y homogeneidad

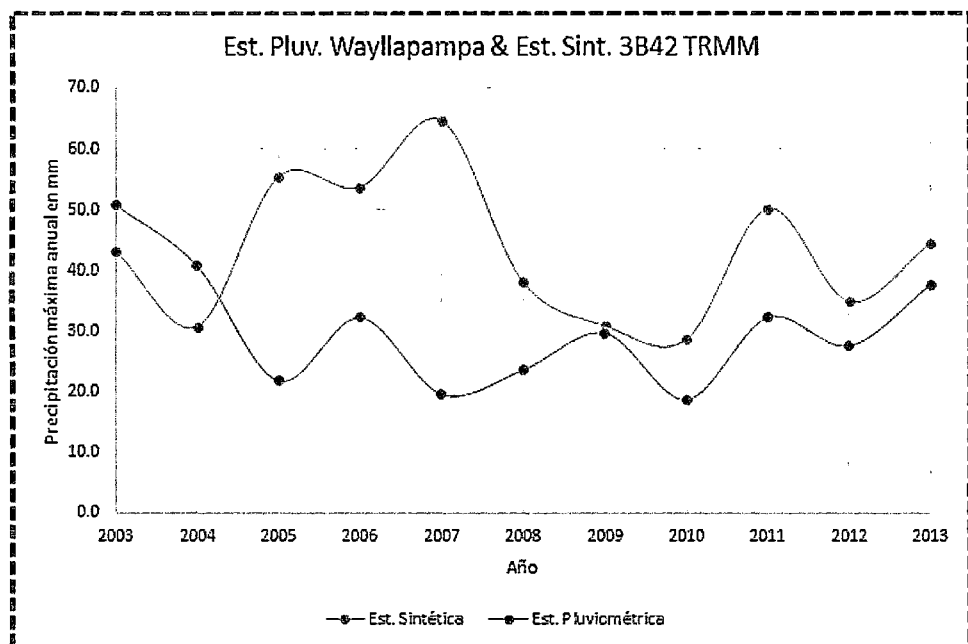
Estas pruebas sirven para determinar si las características estadísticas de las series hidrológicas, como la media o desviación estándar, han sufrido cambios abruptos en sus valores. Desde el punto de vista estadístico se dice que una serie de datos es homogénea si es una muestra de una única población, y por lo tanto será factible obtener resultados representativos de ella. En caso de no ser homogénea puede ser que los datos analizados correspondan a dos poblaciones diferentes.

Figura 3.30: Series temporales de precipitación máxima anual de la estación Huamanga (SENAMHI y 3B42 TRMM)



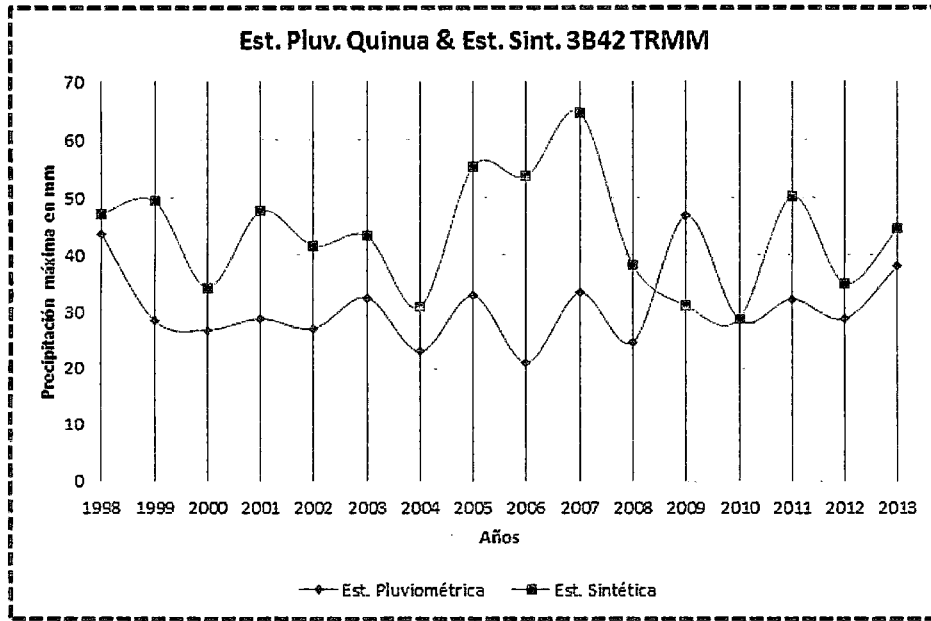
Fuente: Elaboración propia

Figura 3.31: Series temporales de precipitación máxima anual de la estación Wayllapampa (SENAMHI y 3B42 TRMM)



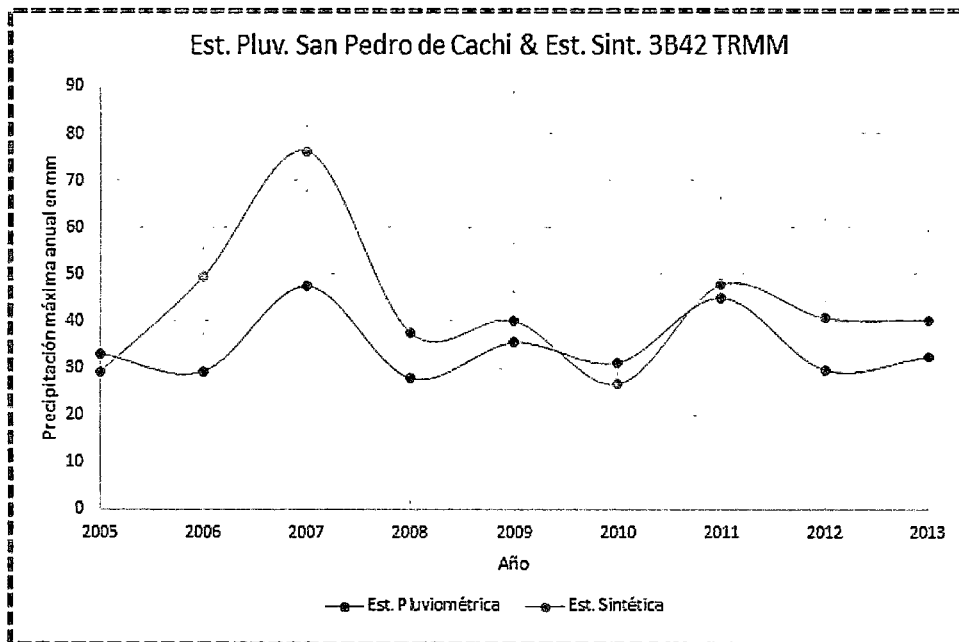
Fuente: Elaboración propia

Figura 3.32: Series temporales de precipitación máxima anual de la estación Quinua (SENAMHI y 3B42 TRMM)



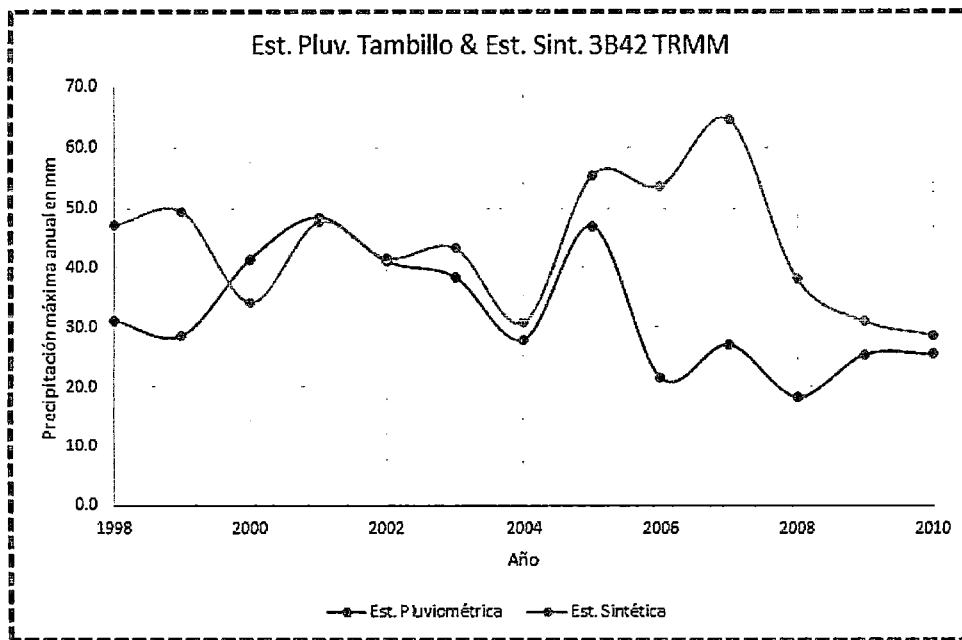
Fuente: Elaboración propia

Figura 3.33: Series temporales de precipitación máxima anual de la estación San Pedro de Cachi (SENAMHI y 3B42 TRMM)



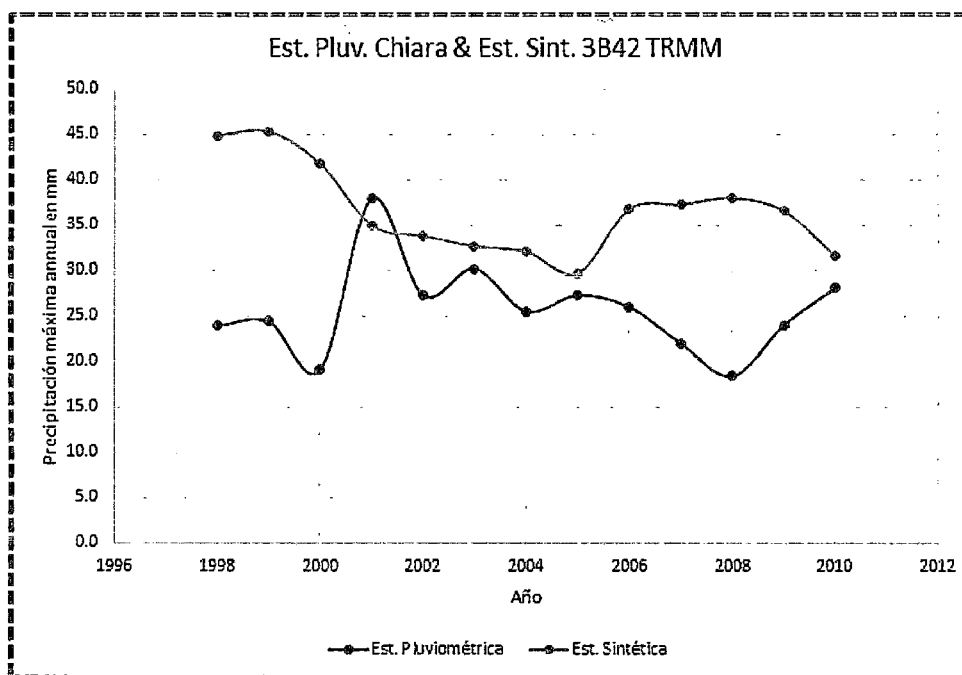
Fuente: Elaboración propia

Figura 3.34: Series temporales de precipitación máxima anual de la estación Tambillo (SENAMHI y 3B42 TRMM)



Fuente: Elaboración propia

Figura 3.35: Series temporales de precipitación máxima anual de la estación Chiara (SENAMHI y 3B42 TRMM)



Fuente: Elaboración propia

Para el análisis de la homogeneidad de registro de datos en el tiempo, las pruebas para revisar la homogeneidad de una serie de datos son: Prueba estadística de Helmer, prueba de la t de Student, test de Cramer y entre otros. Para el análisis de homogeneidad de los datos, en este trabajo, se realizará con la prueba estadística de Helmer, que a continuación desarrollamos.

3.7.1. Prueba estadística de Helmer para datos de SENAHMI

Esta prueba consiste en analizar el signo de las desviaciones de cada evento de la serie respecto a su valor medio. Si una desviación de un cierto signo es seguida por otra del mismo signo se dice que ha ocurrido una secuencia (S), en caso contrario se dice que ha ocurrido un cambio (C). Para que una serie sea homogénea, la diferencia entre el número de secuencias y cambios debe ser cero, o estar dentro de los límites de un cierto error probable (menor o igual), el cual se calcula con la ecuación 3.45

$$-\sqrt{n-1} \leq S - C \leq \sqrt{n-1} \quad (3.45)$$

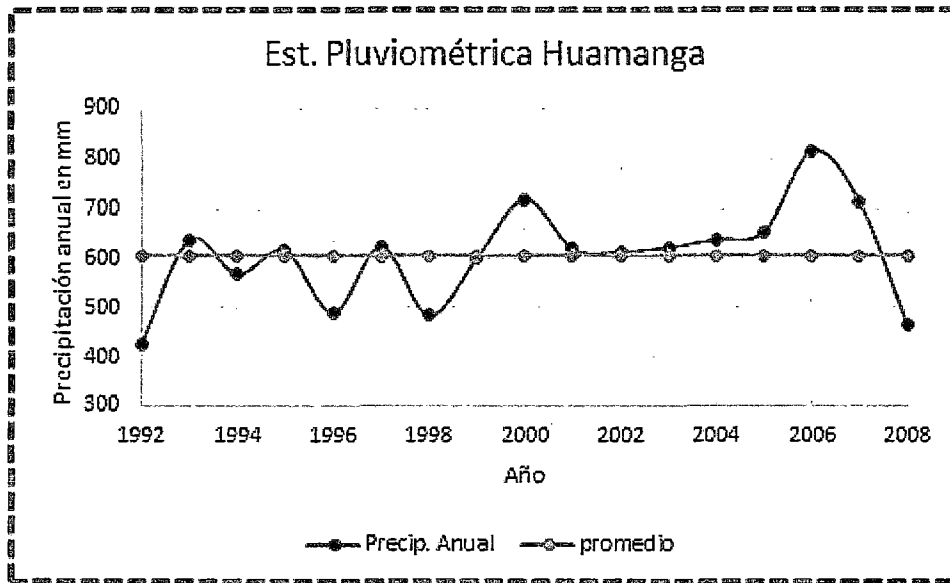
siendo n el número de eventos o registros de la muestra por analizar. Las figuras: 3.36, 3.37, 3.38 y 3.39, representan la relación de la precipitación anual y su promedio de estas; en cambio las tablas: 3.11, 3.12, 3.13 y 3.14, representan la prueba estadística de Helmer, para su verificación final con la ecuación 3.45.

Para todo los registros de precipitaciones anuales de las estaciones analizadas, se determina que todas cumplen con test de homogeneidad. Como ejemplo analicemos para el registro de datos de precipitación anual de la estación Tambillo. Teniendo ya confeccionado la figura 3.39 y la tabla 3.14, se determina con al ecuación 3.45, donde el valor de $S = 10$ y $C = 8$, reemplazando se tiene el siguiente resultado.

$$-4.2 \leq 2 \leq 4.2$$

con este resultado se confirma la homogeneidad de los datos.

Figura 3.36: Precipitación anual y promedio de la estación Huamanga



Fuente: Elaboración propia

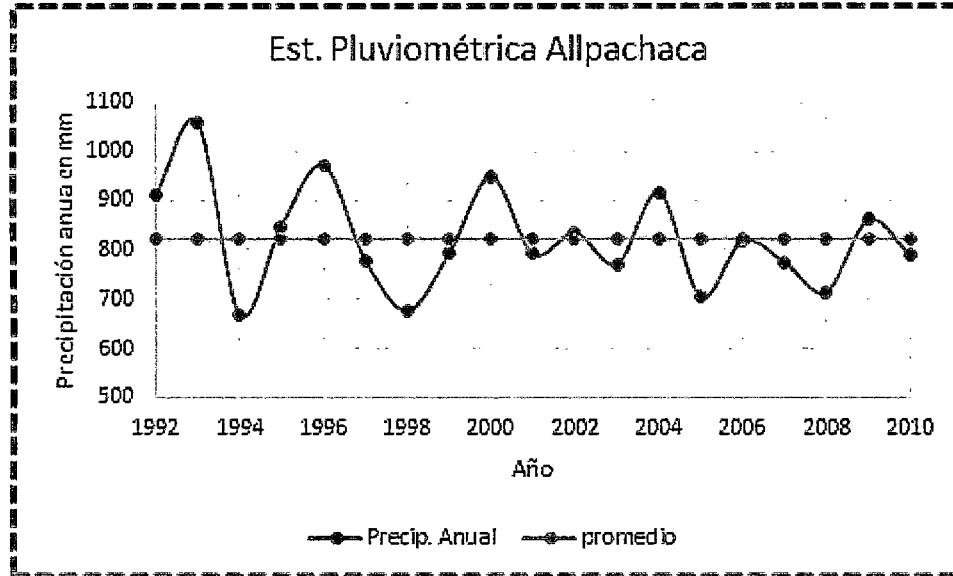
Tabla 3.11: Test de Helmert para registro de precipitación anual en la estación pluviométrica Huamanga

n	Año	precipitación anual en (mm)	tes de Helmert
1	1992	426.0	—
2	1993	639.0	+ c
3	1994	568.8	— c
4	1995	617.8	+ c
5	1996	489.1	— c
6	1997	626.1	+ c
7	1998	482.8	— c
8	1999	600.4	— s
9	2000	720.2	+ c
10	2001	620.5	+ s
11	2002	613.4	+ s
12	2003	623.4	+ s
13	2004	638.9	+ s
14	2005	655.3	+ s

15	2006	816.1	+	s
16	2007	714.5	+	s
17	2008	465.3	-	c

Fuente: Elaboración propia

Figura 3.37: Precipitación anual y promedio de la estación Allpachaca



Fuente: Elaboración propia

Tabla 3.12: Test de Helmert para registro de precipitación anual en al estación pluv. Allpachaca

n	Año	precipitación anual en (mm)	Tes de Helmert	
1	1992	909.4	+	
2	1993	1060.4	+	s
3	1994	669.2	-	c
4	1995	847.3	+	c
5	1996	970.6	+	s
6	1997	779.2	-	c
7	1998	676.7	-	s
8	1999	792.4	-	s
9	2000	946.5	+	c
10	2001	791.6	-	c
11	2002	833.9	+	c
12	2003	771.2	-	c
13	2004	915.3	+	c
14	2005	705.1	--	c
15	2006	818.6	-	s
16	2007	773.7	-	s
17	2008	714.3	-	s
18	2009	860.1	+	c
19	2010	790.3	-	c

Fuente: Elaboración propia

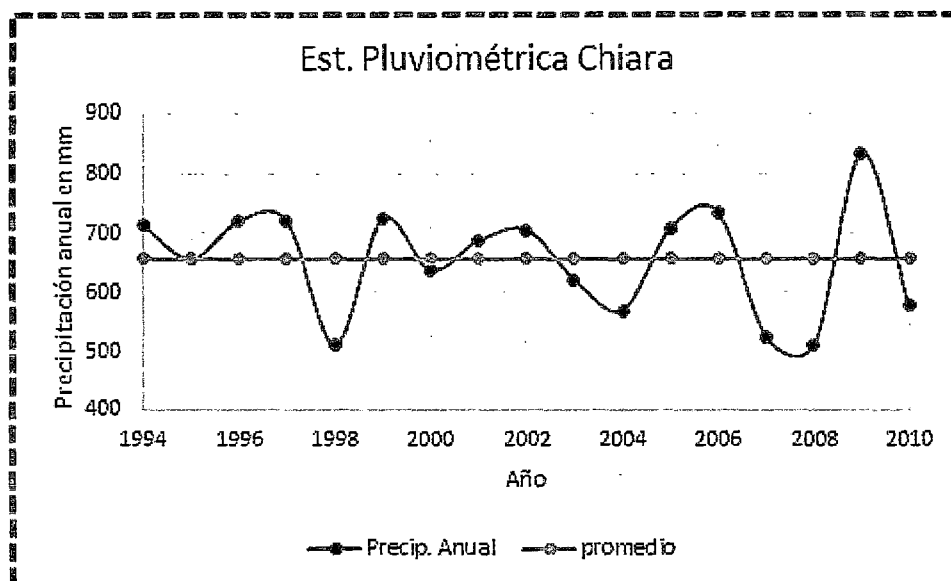
Tabla 3.13: Test de Helmert para registro de precipitacion anual en al estación pluv. Chiara

n	Año	precipitación anual en (mm)	Tes de Helmert	
1	1994	714.8	+	
2	1995	657.1	+	s
3	1996	721.3	+	s
4	1997	722.4	+	s

5	1998	510.5	-	c
6	1999	725.2	+	c
7	2000	638.2	-	c
8	2001	687.9	+	c
9	2002	706.4	+	s
10	2003	621.9	-	c
11	2004	568.8	-	s
12	2005	709.1	+	c
13	2006	734.9	+	s
14	2007	522.6	-	c
15	2008	509.2	-	s
16	2009	833.5	+	c
17	2010	576.0	-	c

Fuente: Elaboración propia

Figura 3.38: Precipitación anual y promedio de la estación Chiara



Fuente: Elaboración propia

Tabla 3.14: Test de Helmert para registro de precipitación anual en la estación pluviométrica Tambillo

n	Año	precipitación anual en (mm)	Test de Helmert
1	1992	681.1	-
2	1993	956.9	+ c
3	1994	732.1	- c
4	1995	739.8	+ c
5	1996	681.1	- c
6	1997	951.1	+ c
7	1998	716.8	+ s
8	1999	720.1	+ s
9	2000	781.4	+ s
10	2001	789.0	+ s
11	2002	827.8	+ s
12	2003	656.5	- c
13	2004	675.8	- s
14	2005	638.8	- s

15	2006	716.4	+	c
16	2007	660.3	-	c
17	2008	505.6	-	s
18	2009	709.8	-	s
19	2010	654.5	-	s

Fuente: Elaboración propia

3.7.2. Prueba estadística de Helmert para datos de 3B42 TRMM

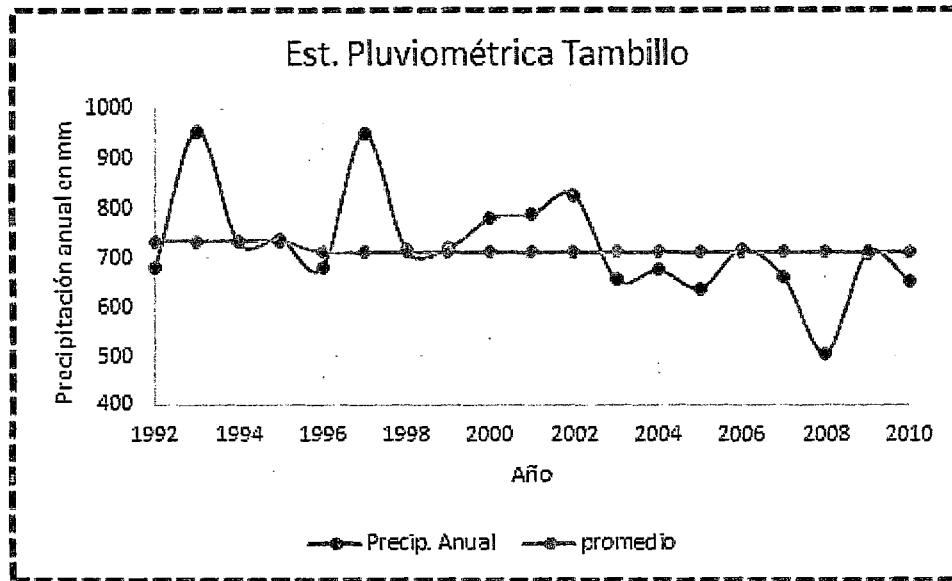
El ajuste, con la prueba de Helmert, para las estaciones sintéticas se hizo con el mismo principio, que para las estaciones pluviométricas. Las figuras: 3.40, 3.41, 3.42 y 3.43, representan la relación de la precipitación sintética anual y su promedio; en cambio las tablas: 3.15, 3.16, 3.17 y 3.18, representan el resultado de la prueba de Helmert.

Tabla 3.15: Test de Helmert para registro de precipitación anual en la estación sintética de: Huamanga, Quínuá, Wayllapampa y Tambillo

n	Año	Precipitación anual en (mm)	Test de Helmert
1	1998	856.8	-
2	1999	971.9	+ c
3	2000	985.2	+ s
4	2001	1076.9	+ s
5	2002	1130.2	+ s
6	2003	1036.0	+ s
7	2004	946.3	+ s
8	2005	887.9	- c
9	2006	997.0	+ c
10	2007	831.0	- c
11	2008	761.9	- s
12	2009	809.7	- s
13	2010	643.8	- s
14	2011	1039.0	+ c
15	2012	908.9	- c
16	2013	831.1	- s
17	2014	847.9	- s

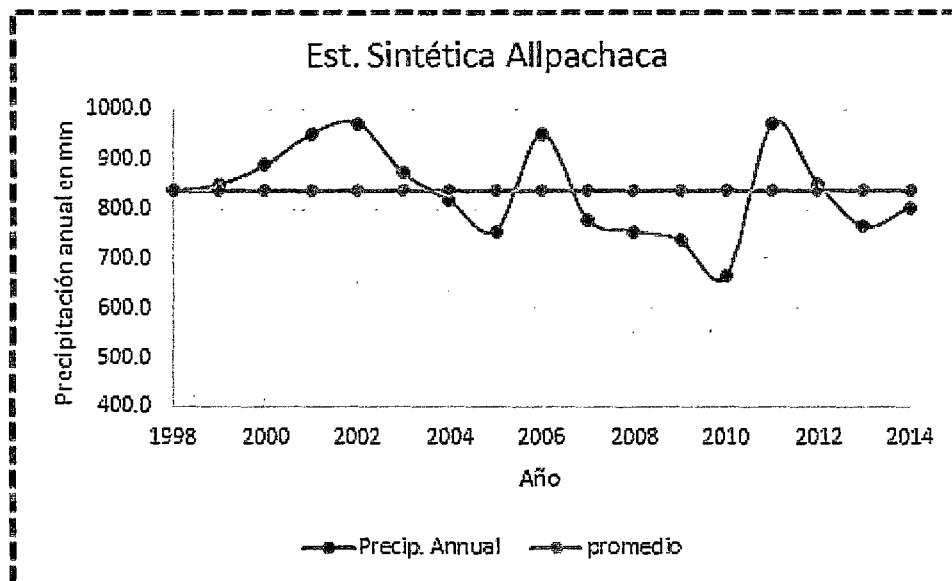
Fuente: Elaboración propia

Figura 3.39: Precipitación anual y promedio de la estación Tambillo



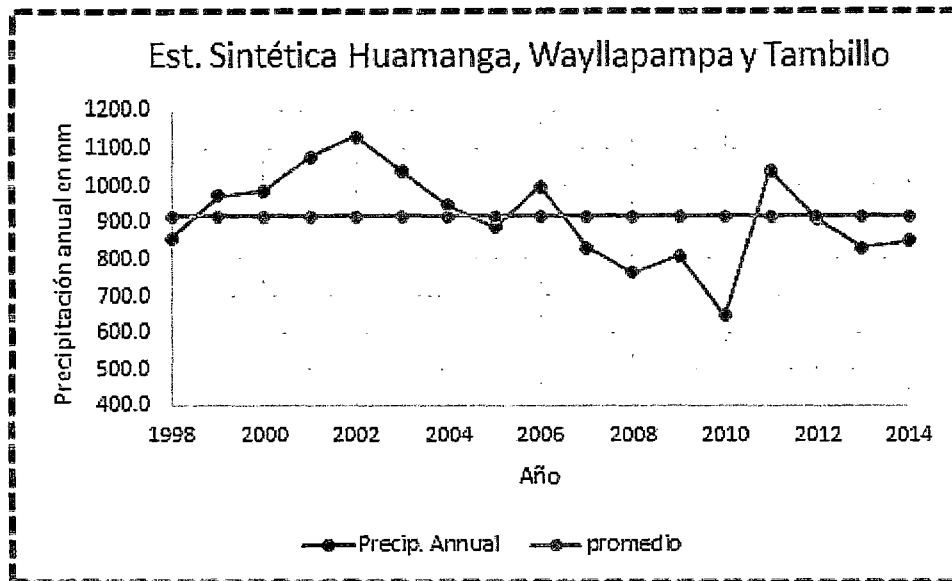
Fuente: Elaboración propia

Figura 3.41: Precipitación anual y promedio de la estación sintética de Allpachaca



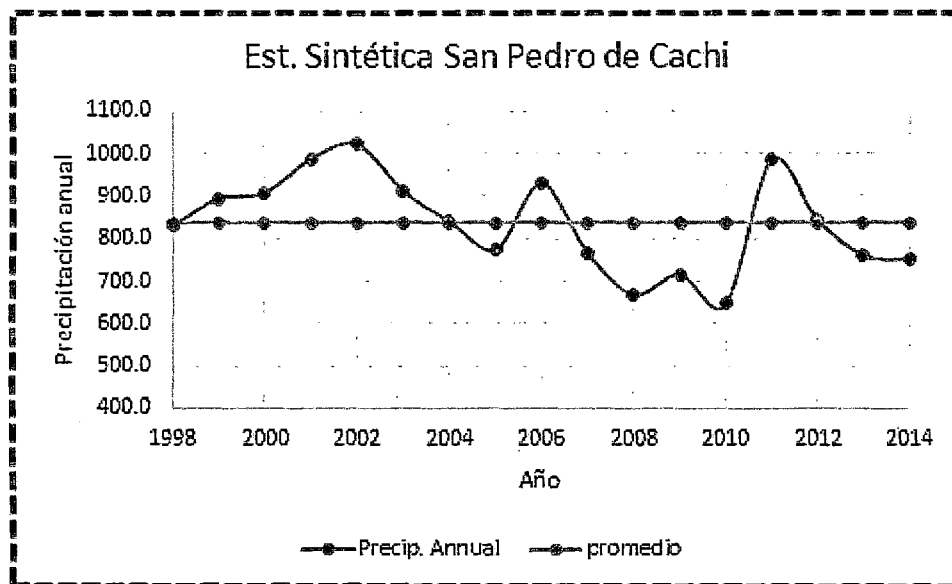
Fuente: Elaboración propia

Figura 3.40: Precipitación anual y promedio de la estación sintética de Huamanga, Wayllapampa y Tambillo



Fuente: Elaboración propia

Figura 3.42: Precipitación anual y promedio de la estación sintética de San Pedro de Cachi



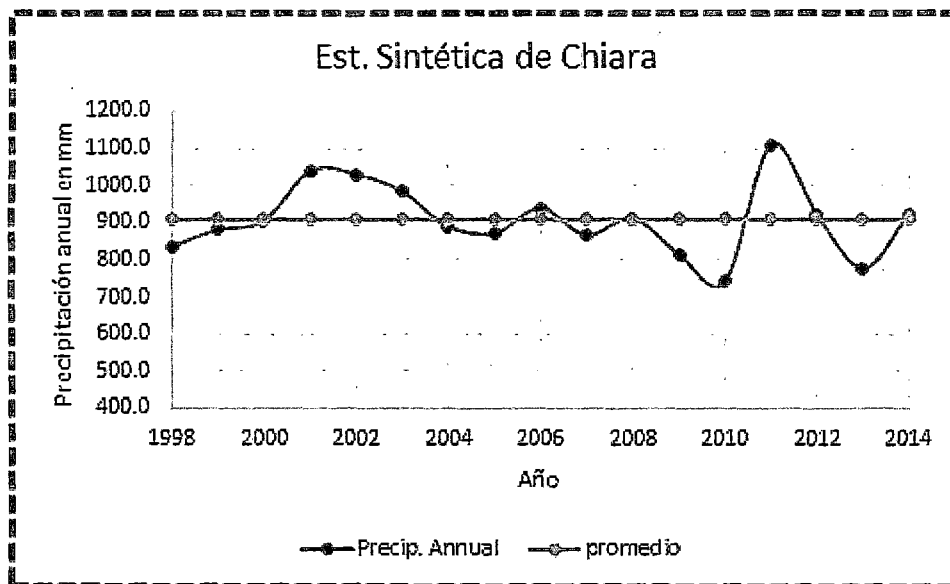
Fuente: Elaboración propia

Tabla 3.16: Test de Helmert para registro de precipitación anual en al estación Sintética de Allpachaca

n	Año	Precipitación anual en (mm)	Test de Helmert
1	1998	836.9	+
2	1999	850.7	+ s
3	2000	889.6	+ s
4	2001	952.3	+ s
5	2002	972.4	+ s
6	2003	873.8	+ s
7	2004	817.5	- c
8	2005	755.8	+ c
9	2006	952.2	- c
10	2007	778.8	+ c
11	2008	755.6	+ s
12	2009	736.8	+ s
13	2010	664.7	+ s
14	2011	970.4	- c
15	2012	852.0	- s
16	2013	765.6	+ c
17	2014	802.3	+ s

Fuente: Elaboración propia

Figura 3.43: Precipitación anual y promedio de la estación sintética de Chiara



Fuente: Elaboración propia

Tabla 3.17: Test de Helmert para registro de precipitación anual en al estación sintética de San Pedro de Cachi

n	Año	Precipitación anual en (mm)	Test de Helmert
1	1998	830.9	—
2	1999	895.2	+ c
3	2000	908.1	+ s
4	2001	988.9	+ s
5	2002	1022.2	+ s
6	2003	912.0	+ s
7	2004	841.2	+ s
8	2005	774.3	— c
9	2006	929.1	+ c
10	2007	767.1	— c
11	2008	668.1	— s
12	2009	715.0	— s
13	2010	646.0	— s
14	2011	985.4	+ c
15	2012	845.2	+ s
16	2013	760.7	— c
17	2014	750.6	— s

Fuente: Elaboración propia

3.8. Validación del producto 3B42 V7 diario del TRMM

Después de haber comprobado la homogeneidad de los datos de estaciones pluviométricas y sintéticas, el proceso continua en buscar una relación entre estas dos registros, que se puede ajustar mediante una metodología: regresión lineal múltiple [21], redes neuronales artificiales [3], etc. En esta investigación, la validación de los datos de precipitación máxima de 24 horas del producto 3B42, se hará mediante la regresión lineal múltiple.

- **Regresión lineal múltiple:** El modelo de regresión lineal múltiple con k variables explicativas y basado en p observaciones tomadas es de la forma:

$$Y_p = \beta_0 + \beta_1 X_{1p} + \beta_2 X_{2p} + \dots + \beta_k X_{kp} + \varepsilon_p \quad (3.46)$$

donde p es el tamaño muestral, Y_p es la variable dependiente, $X_{1p}, X_{2p}, \dots, X_{kp}$



Tabla 3.18: Test de Helmert para registro de precipitación anual en al estación sintética de Chiara

n	Año	Precipitación anual en (mm)	Test de Helmert	
1	1998	836.6	—	
2	1999	880.6	—	s
3	2000	905.2	—	s
4	2001	1039.5	+	c
5	2002	1030.0	+	s
6	2003	982.2	+	s
7	2004	889.0	—	c
8	2005	871.5	—	s
9	2006	938.6	+	c
10	2007	865.4	—	c
11	2008	912.0	+	c
12	2009	814.2	—	c
13	2010	741.9	—	s
14	2011	1109.8	+	c
15	2012	922.0	+	s
16	2013	777.0	—	c
17	2014	921.8	+	c

Fuente: Elaboración propia

son las variables independientes, ε_p es la perturbación aleatoria y $\beta_0, \beta_1, \dots, \beta_k$ son los parámetros.

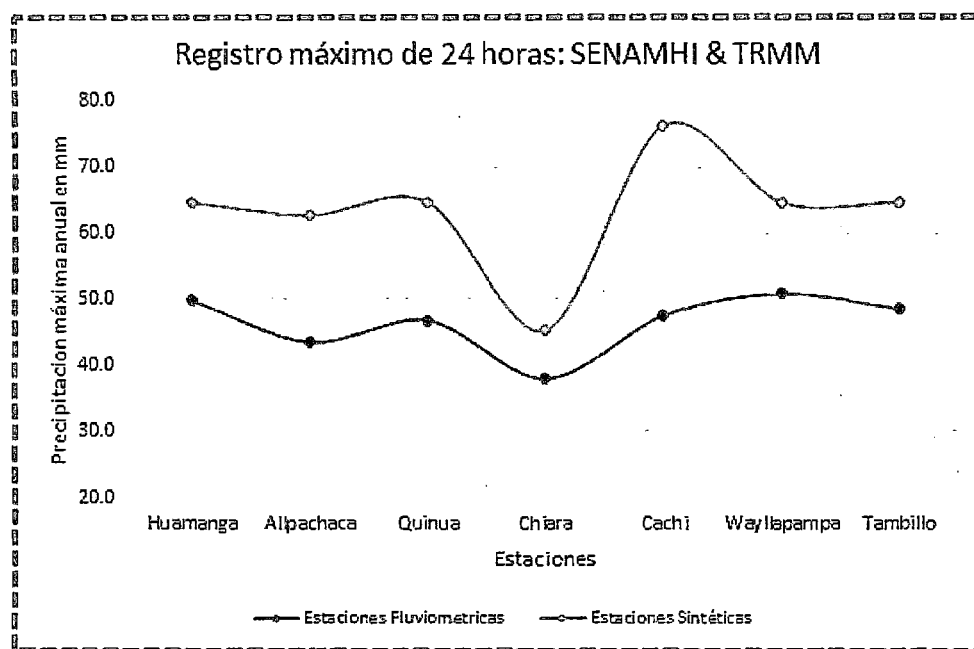
El coeficiente de determinación R^2 o coeficiente de correlación múltiple al cuadrado, es una medida descriptiva que sirve para evaluar la bondad de ajuste del modelo a los datos, ya que mide la capacidad predictiva del modelo ajustado. Se verifica que $0 \leq R^2 \leq 1$, si $R^2 = 1$ la relación lineal es exacta y si $R^2 = 0$, no existe relación lineal entre la variable respuesta y las variables regresoras.

3.8.1. Generación de precipitación para las Subcuencas del Río Chacco

Los datos para generar las precipitaciones en las Subcuencas del Río Chacco, mediante la metodología de regresión lineal simple y múltiple, se adjunta en el anexo B. Para el análisis se ha tomado las precipitaciones máximas de 24 horas anuales de cada estación pluviométrica y sintética, esto debido a que se repiten las ubicaciones y cotas de las

estaciones. Para mayor detalle se ha graficado las precipitaciones máximas de cada estación pluviométrica y sintética como se muestra en la figura 3.44. En la tabla 3.19, se resume los casos de relación, para determinar la ecuación que estima las precipitaciones para todas las cuencas del área de estudio. Como el objetivo de la investigación es validar las precipitaciones sintéticas para las subcuencas que no tienen estaciones pluviométricas, para este detalle se dispone de la figura 3.45, en la cual se muestra las estaciones existentes (pluviométricas) y las generadas (sintéticas), para las cuenca del Río Chacco.

Figura 3.44: Precipitaciones máximas de todas las estaciones pluviométricas y sintéticas



Fuente: Elaboración propia

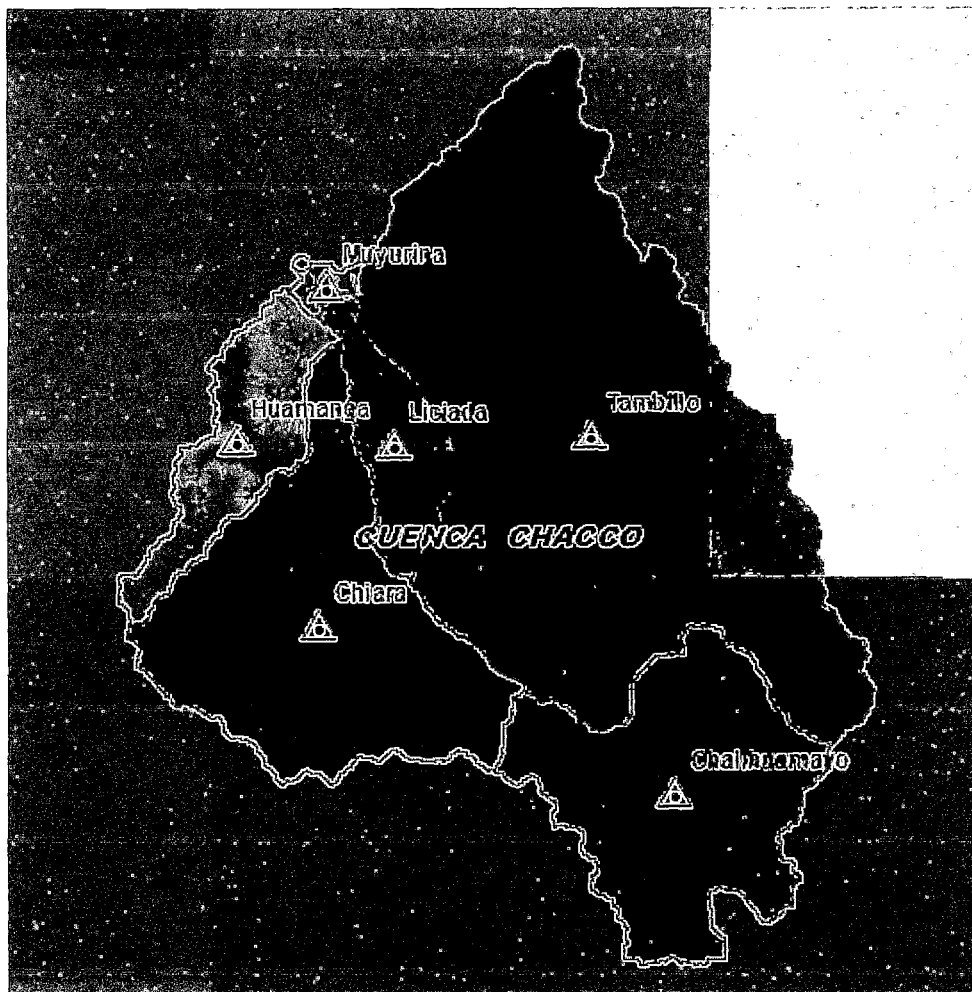
Tabla 3.19: combinaciones de las variables para el ajuste con regresión lineal múltiple

Casos	P_{trmm}	$P_{senamhi}$	Este (X)	Norte (Y)	Altura (Z)
1	✓	✓			
2	✓	✓	✓	✓	
3	✓	✓			✓
4	✓	✓	✓	✓	✓

Fuente: Elaboración propia

La ecuación de regresión múltiple que relaciona los variables para la determinación de

Figura 3.45: Estaciones pluviométricas y sintéticas existentes y generadas para las subcuencas del Rio Chacco



Fuente: Elaboración Propia

la precipitación estimada es el siguiente:

$$P_{est} = \beta_0 + \beta_1(P_{trmm}) + \beta_2(Este(X)) + \beta_3(Norte(Y)) + \beta_4(Altura(Z)) \quad (3.47)$$

donde P_{est} es la precipitación estimada, β_0 , β_1 , β_2 , β_3 y β_4 son los parámetros de la ecuación, P_{trmm} es la precipitación sintética, $Este(X)$ y $Norte(Y)$ son las ubicaciones de las estaciones pluviométricas y $Altura(Z)$ es la cota de las estaciones. La tabla 3.19, resume todas las combinaciones posibles para el mejor ajuste.

- **Caso 01:** $P_{senamhi}$ y P_{trmm}

$$P_{est} = 23.355557 + 0.364128P_{trmm} \quad (3.48)$$

Para esta primera relación, se obtiene el coeficiente de determinación ($R^2 = 0.57$) y el R^2 ajustado = 0.48

- **Caso 02:** $P_{senamhi}$, P_{trmm} , $Este(X)$ y $Norte(Y)$

$$P_{est} = -572.975166 + 0.387779P_{trmm} + 0.000184(X) + 0.000057(Y) \quad (3.49)$$

Para esta segunda relación, se obtiene el coeficiente de determinación ($R^2 = 0.75$) y el R^2 ajustado = 0.49

- **Caso 03:** $P_{senamhi}$, P_{trmm} y $Altura(Z)$

$$P_{est} = 47.565788 + 0.270625P_{trmm} - 0.005877(Z) \quad (3.50)$$

Para esta tercera relación, se obtiene el coeficiente de determinación ($R^2 = 0.81$) y el R^2 ajustado = 0.71

- **Caso 04:** $P_{senamhi}$, P_{trmm} , $Este(X)$, $Norte(Y)$ y $Altura(Z)$

$$P_{est} = 566.628980 + 0.394388P_{trmm} + 0.000234(X) - 0.000077(Y) - 0.007301(Z) \quad (3.51)$$

Para esta cuarta relación, se obtiene el coeficiente de determinación ($R^2 = 0.99$) y el R^2 ajustado = 0.97

De las relaciones, se determina que el caso cuatro, es el que tiene el mejor ajuste, porque su coeficiente de determinación ($R^2 = 0.99$) y el R^2 ajustado = 0.97, esto conlleva a un buen ajuste de dicha relación, de acuerdo a la teoría de regresión lineal múltiple. Teniendo la consideración anterior, la ecuación 3.51, es la que determina la precipitación estimada (P_{est}) para todas las subcuencas del Río Chacco. La tabla 3.20, muestra la ubicación de las estaciones existentes y las generadas para todas las subcuencas del Río Chacco. En cambio la tabla 3.21, muestra el resultado de las precipitaciones existentes

y generadas, desde el año 1998 a 2014, para las subcuencas faltantes del Río Chacco.

Tabla 3.20: Estaciones meteorológicas y Sinteticas existenetes y generadas para las subcuencas del Río Chacco

Estación	Situación	Altitud	Latitud	Longitud
Challhuamayu	Generada	3500 msnm	13 °21'33" S	74 °01'07" W
Huamanga	Existente	2761 msnm	13 °09'01" S	74 °13'1" W
Chiara	Existente	3400 msnm	13 °16'00" S	74 °12'27" W
Tambillo	Existente	3250 msnm	13 °12'54" S	74 °06'19" W
Liciada	Generada	2873 msnm	13 °11'16" S	74 °09'37" W
Muyurina	Generada	2485 msnm	13 °06'34" S	74 °11'40" W

Fuente: Elaboración Propia

Tabla 3.21: Precipitación máxima en 24 horas existente y generada para las subcuencas del Río Chacco

Año	Precipitación máxima 24 horas (mm)					
	Huamanga	Muyurina	Chiara	Liciada	Tambillo	Challhuamayu
1998	27.3	44.6	23.9	43.3	31.2	42.9
1999	24.8	45.5	24.4	44.2	28.6	43.1
2000	35.2	39.5	19.1	38.2	41.5	41.7
2001	39.0	44.8	38.0	43.5	48.5	39.0
2002	23.6	42.4	27.3	41.1	41.1	38.5
2003	30.0	43.1	30.2	41.8	38.4	38.1
2004	49.8	38.2	25.5	36.9	27.9	37.9
2005	30.2	47.9	27.3	46.6	47.0	36.9
2006	27.9	47.2	26.0	45.9	21.5	39.7
2007	34.0	51.6	22.0	50.2	27.0	39.9
2008	31.5	41.1	18.4	39.8	18.3	40.2
2009	29.6	38.3	24.0	36.9	25.4	39.6
2010	24.5	37.4	28.1	36.0	25.5	37.7
2011	46.7	45.9	36.4	44.5	43.4	41.3
2012	24.7	39.8	35.5	38.5	37.4	40.4
2013	41.4	43.6	35.7	42.3	41.2	40.5
2014	35.0	37.2	32.5	35.9	34.8	37.3

Fuente: Elaboración propia

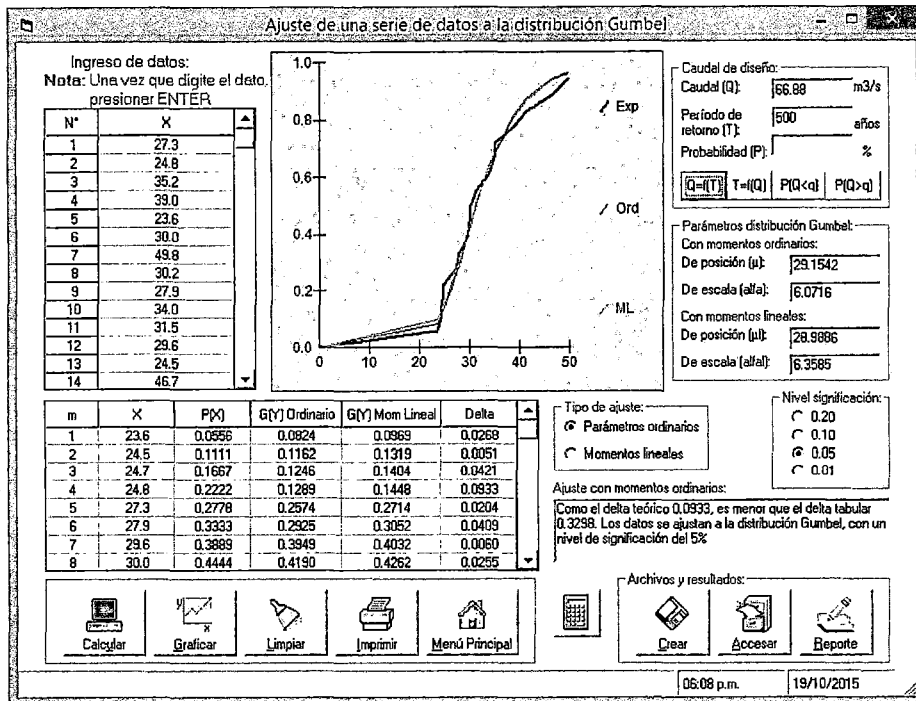
3.9. Generación de precipitación de diseño

Para generar las precipitaciones de diseño, se ha tratado en el capítulo 2.3 de la presente investigación, que está sujeto a temas de [15]: pruebas de ajuste, distribuciones de probabilidad para variables hidrológicas y periodo de retorno. Todo proyecto se plantea siempre en un futuro próximo, es necesario disponer la información de las variables requeridas para un tiempo de retorno considerado, el tiempo de retorno en la hidrología e hidráulica se asocia a la importancia de los proyectos planeados.

3.9.1. Análisis estadístico de registro de precipitaciones

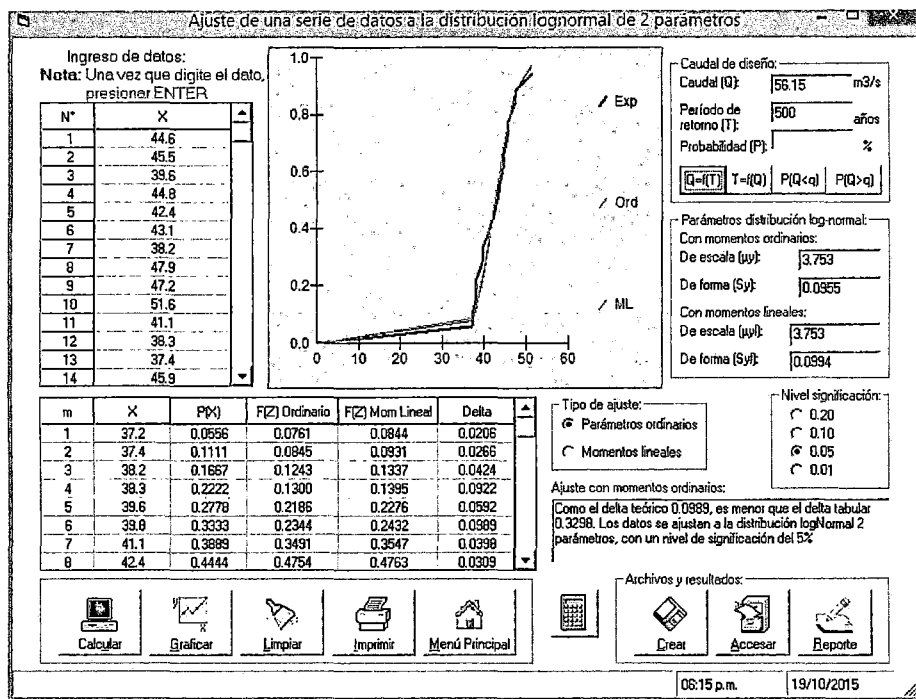
De las distribuciones teóricas, para el ajuste de datos, se ha tomado, las distribuciones que dan el mejor ajuste, mediante el comportamiento de las pruebas estadísticas de bondad del ajuste (Smirnov-Kolmogorov), para lo cual todas las estaciones analizadas, se ajustan mejor a una de estas distribuciones mencionadas en el capítulo anterior. Las estaciones: **Muyurina, Chiara y Iliciada**, tienen mejor ajuste con la **distribución LogNormal 2 parámetros**, la estación de **Huamanga** tiene mejor ajuste con la **distribución Gumbel**; en cambio las estaciones: **Tambillo y Challhuamayu**, tienen mejor ajuste con la **distribución Normal**. Las figuras: 3.46, 3.47 y 3.48 representan el ajuste mediante las distribuciones: Gumbel, LogNormal 2 parámetros y Normal, respectivamente. La tabla 3.22 muestra los resultados de la precipitación máxima de 24 horas para los diferentes tiempos de retorno, para todas las estaciones del área de estudio.

Figura 3.46: Ajuste mediante distribución Gumbel para la estación Huamanga



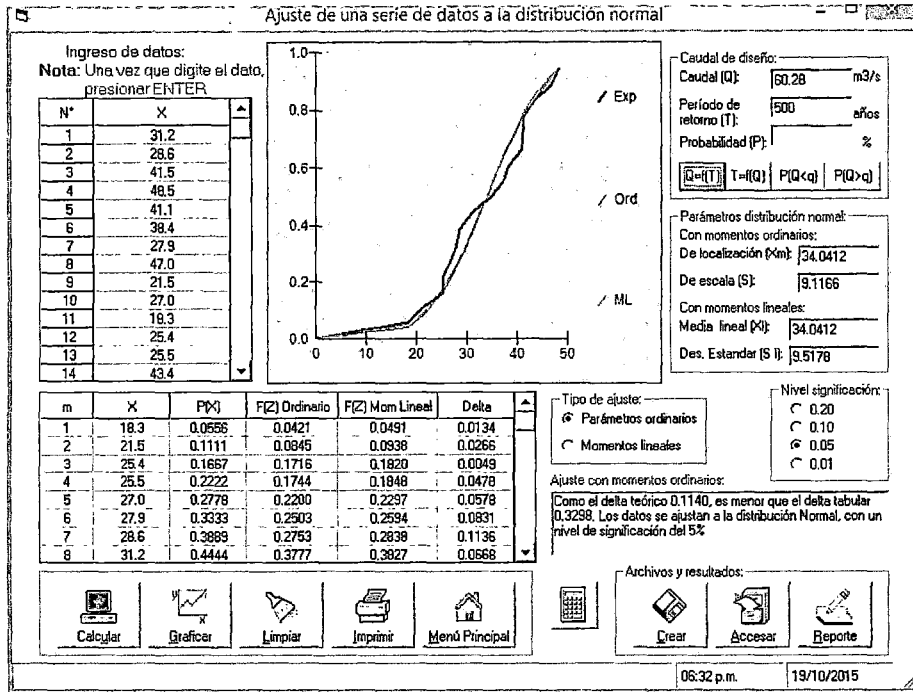
Fuente: Elaboración propia (HidroEsta)

Figura 3.47: Ajuste mediante distribución LogNormal de 2 Parámetros para la estación Muyurina



Fuente: Elaboración propia (HidroEsta)

Figura 3.48: Ajuste mediante distribución Normal para la estación Tambillo



Fuente: Elaboración propia (HidroEsta)

Tabla 3.22: Precipitación máxima de 24 horas para diferentes periodos de retorno

Estación	Tr=2 años	5	10	25	50	100	500
Huamanga	31.38	38.26	42.82	48.57	52.85	57.08	66.88
Muyurina	42.65	46.22	48.21	50.42	51.90	53.27	56.15
Chiara	27.29	32.78	36.08	39.96	42.68	45.29	51.07
Liciada	41.32	44.89	46.89	49.11	50.60	51.98	54.89
Tambillo	34.04	41.71	45.73	50.01	52.77	55.25	60.28
Challhuamayo	39.69	14.25	42.07	42.94	43.50	44.01	45.03

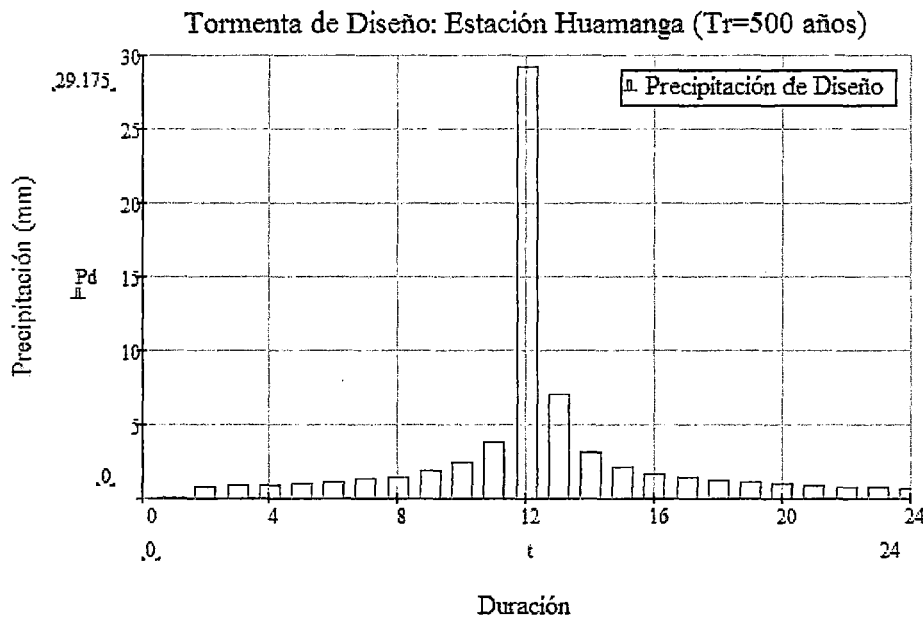
Fuente: Elaboración propia

3.10. Obtención de caudales máximos

Teniendo el resultado de las precipitaciones máximas de 24 horas para los diferentes periodos de retorno, tabla 3.22, el proceso de obtener los caudales máximos para las subcuencas seleccionadas: Muyurina, Alameda, Chiara, Huatata, Liciada, Yucaes y Challhuamayu es como sigui:

- Debido a las características climáticas en la zona de investigación, se asumirá que en la cuenca alta la distribución de precipitaciones es **Tipo II**, por los motivos expuestos, en la sección **2.4.2**.
- El Hietograma de diseño, para las subcuencas, se ha generado con las precipitaciones de la tabla 3.22, para los diferentes periodos de retorno. como ejemplo se tiene la figura 3.49, que representan la tormenta de diseño para la estación Huamanga, para un periodo de retorno de 500 años. Para mayor detalle del proceso de cálculo, se adjunta en el anexo A.

Figura 3.49: Tormenta de diseño, estación Huamanga, periodo de retorno de 500 años



Fuente: Elaboración propia

- Para la cuenca del Río Chacco, se presenta el resumen para la elección del **Número de Curva [12]** y tiempo de retraso, como se muestra en la tabla 3.23, teniendo en cuenta el tipo de suelo, donde se ha superpuesto la fisiografía de la cuenca de todos los ríos, con la mapa generada con ArcGIS.
- En el anexo B se muestra el registro de los caudales mensuales, para la estación hidrométrica del Puente Chacco, estos datos representan el **flujo base** para la obtención de los caudales máximos, mediante el programa **HEC-HMS 4.0**

Tabla 3.23: Numero de curva y tiempo de retraso

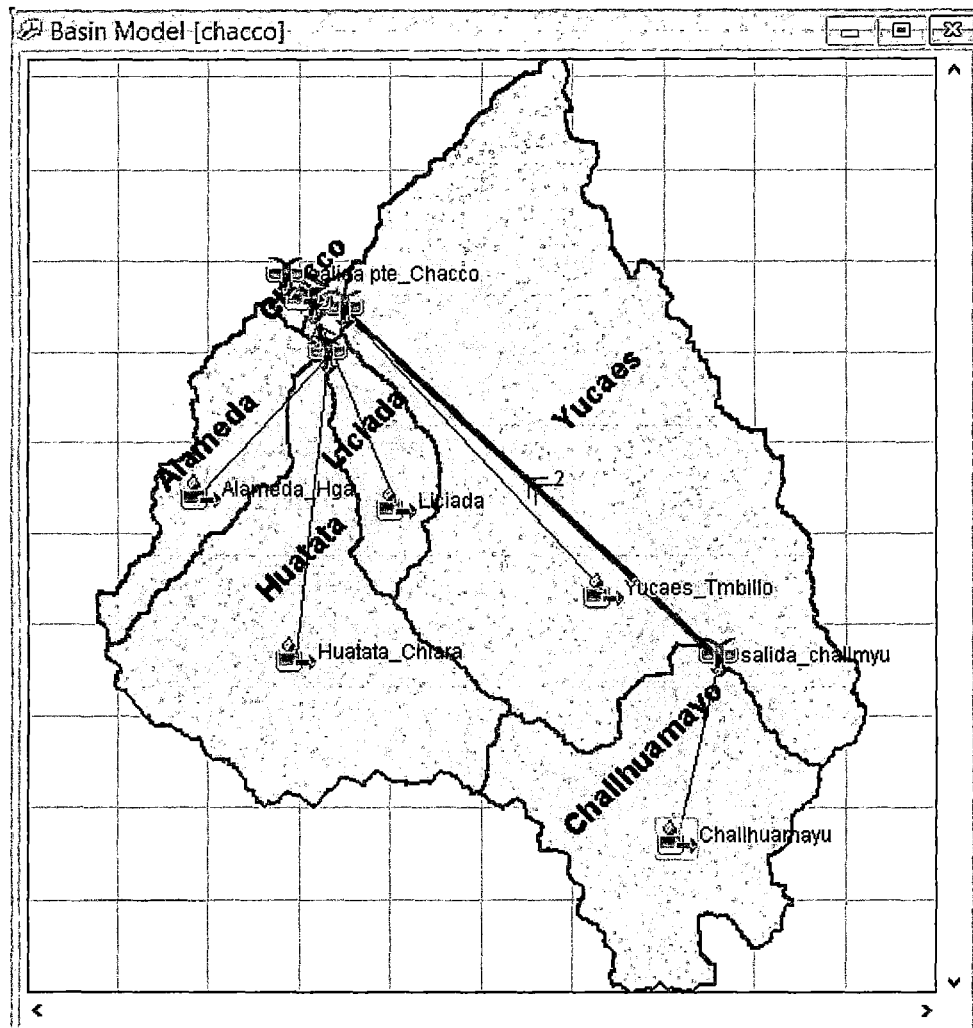
Subcuenca	Uso de la tierra	Condición Hidrológica	Condición de Humedad	número de curva	Tiempo de retraso (min)
Muyurina	pradera	pobre	tipo II	75	16.9
Alameda	pradera	pobre	tipo II	80	83.2
Huatata	pradera	pobre	tipo II	78	103.3
Liciada	pradera	pobre	tipo II	78	61.6
Yucaes	pradera	pobre	tipo II	78	144.4
Challhuamayu	pradera	pobre	tipo II	78	91.4

Fuente: Elaboración propia

- Teniendo las consideraciones de las secciones: **2.4, 2.5, 2.6 y 2.7 del capítulo II** y estas últimas consideraciones, se procesa para obtener los caudales máximos con el programa **HEC-HMS 4.0**

La figura 3.50 muestra la red topológica ingresada al programa, donde se aprecia el modelo de la cuenca, con sus respectivos componentes: herramienta subcuenca, cause y unión. Los componentes del modelo meteorológico y especificaciones de control, se han definido, con los datos de: tormenta de diseño y la máxima avenida de caudal ocurrido el 11 de Febrero del 2011, respectivamente; en cambio la precipitación efectiva, retenciones y escorrentía directa, se han obtenido para un periodo de retorno de: 2, 5, 10, 25, 50, 100 y 500 años para todas las subcuencas, uniones y los tramos para finalmente obtener el hidrograma total de máximas avenidas en el Puente Chacco. Para detalle del caso se muestra los resultados para la subcuenca Alameda (estación Huamanga) figura 3.51 y el punto de salida (Puente Chacco) figura 3.52. En la tabla 3.24, se muestra el resumen de caudal de máximas avenidas para las subcuencas y el punto de interés (Puente Chacco), para los diferentes periodos de retorno. Estos caudales deberán ser validados con otros estudios y métodos para el punto de aforo (Puente Chacco).

Figura 3.50: Red topológica de las Subcuencas del proyecto



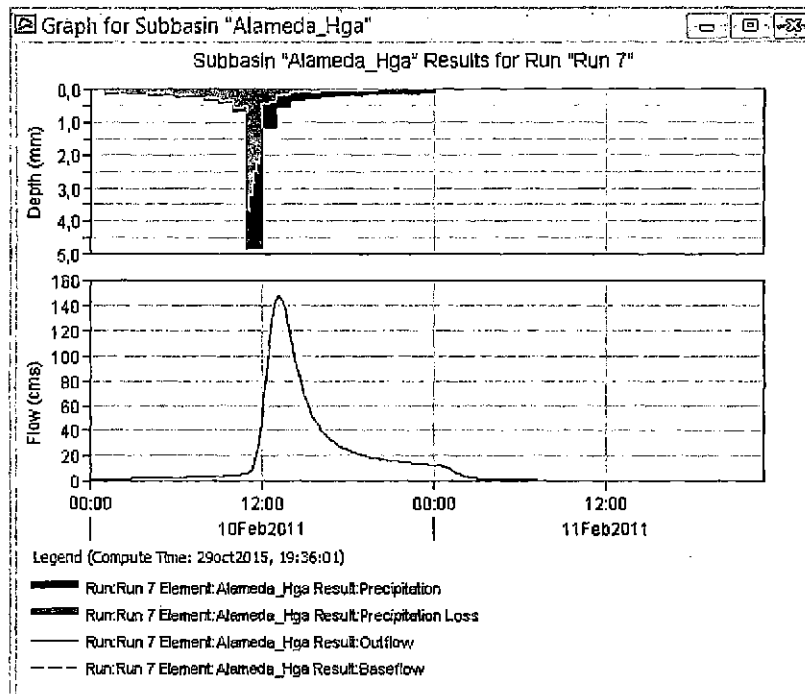
Fuente: Elaboración propia (HEC-HMS 4.0)

Tabla 3.24: Resumen de caudal de máximas avenidas para todas las subcuencas y para la estación hidrométrica (Puente Chacco)

Subcuencas	Caudal de máximas avenidas (m^3/s)						
	Tr = 2 años	5	10	25	50	100	500
Alameda	28.9	46.3	59.7	78.2	93.1	108.6	147.4
Muyurina	26.6	28.5	29.5	30.8	31.7	32.5	34.3
Huatata	32.0	56.9	75.6	100.2	119.5	138.9	185.7
Liciada	32.7	40.7	45.6	51.1	55.0	58.7	66.8
Yucaes	125.3	217.5	273.8	339.1	383.8	426.0	515.7
Challhuamayu	83.6	92.8	97.7	103.0	106.6	109.6	116.1
Pte Chacco	292.0	431.3	521.5	631.0	709.8	785.8	958.2

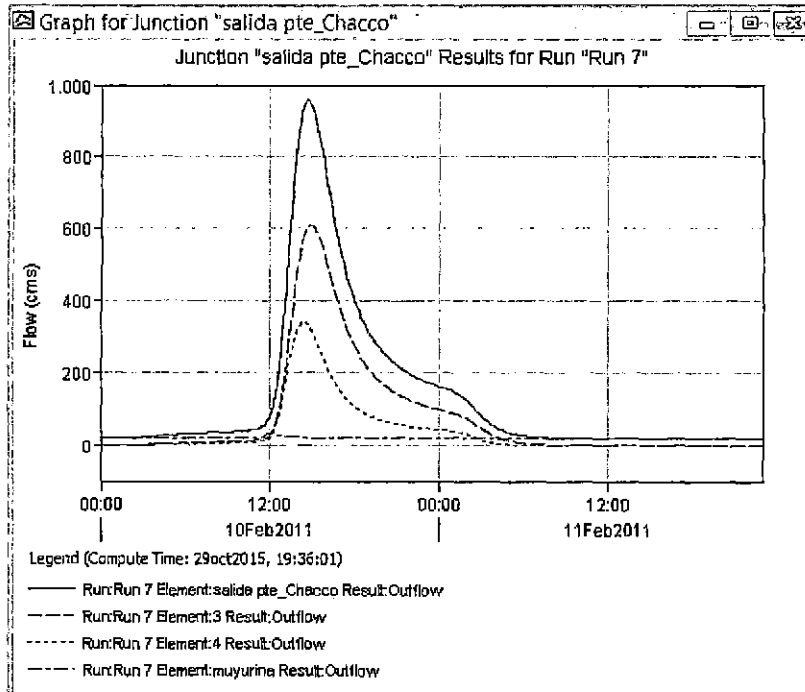
Fuente: Elaboración propia

Figura 3.51: Precipitación efectiva e hidrograma de escorrentía para la subcuenca Alameda para un $T_r=500$ Años



Fuente: Elaboración propia (HEC-HMS 4.0)

Figura 3.52: Hidrograma de máximas avenidas en el Puente Chacco para $T_r=500$ Años



Fuente: Elaboración propia (HEC-HMS 4.0)

Capítulo IV: Análisis, resultado de la investigación y contrastación de la hipótesis

En el presente capítulo se efectúa la evaluación de la precipitación estimada mediante el modelo de regresión lineal múltiple de los registros sintéticos (TRMM), para la validación de caudales máximos para la estación hidrométrica del puente Chacco; el análisis del modelo obtenido en la investigación será con fines de evaluar el cumplimiento de los siguientes requisitos: confiabilidad, validez y objetividad; luego se presentará el resultado de la investigación consistente en la determinación de los caudales máximos, con la finalidad de validar los resultados obtenidos, se contrastarán los resultados para la estación hidrométrica del **(Puente Chacco)**, para ello se dispone de los resultados del elaboración del Expediente Técnico: **“Instalación de defensa ribereña del río Huatatas y Pongora en las localidades de Yanamilla, Santo Domingo, San Miguel de Ayacucho, Yacucuica, Pucarumi y Pongora, Distrito de Jesús Nazareno y Ayacucho, Provincia Huamanga, Departamento de Ayacucho”**[13], Método hidráulico (el mas importante en esta investigación) y el Método regional para el Perú (Wolfgang Trau)

4.1. Análisis

Constantemente en la práctica de la investigación estadística, se encuentran variables que de alguna manera están relacionadas entre sí, por lo que es posible que una de las

variables puedan relacionarse matemáticamente en función de otra u otras variables.

4.1.1. Confiabilidad

La confiabilidad de un modelo [[18], página 200] se refiere al grado que su aplicación repetida al mismo patrón de muestra devolverá siempre los mismos resultados. Se evalúa los resultados obtenidos para las mismas muestras calculados en distintas etapas, la figura 4.53 muestra los resultados obtenidos en cuatro etapas para el mismo registro de datos, encontrándose estabilidad en los valores obtenidos.

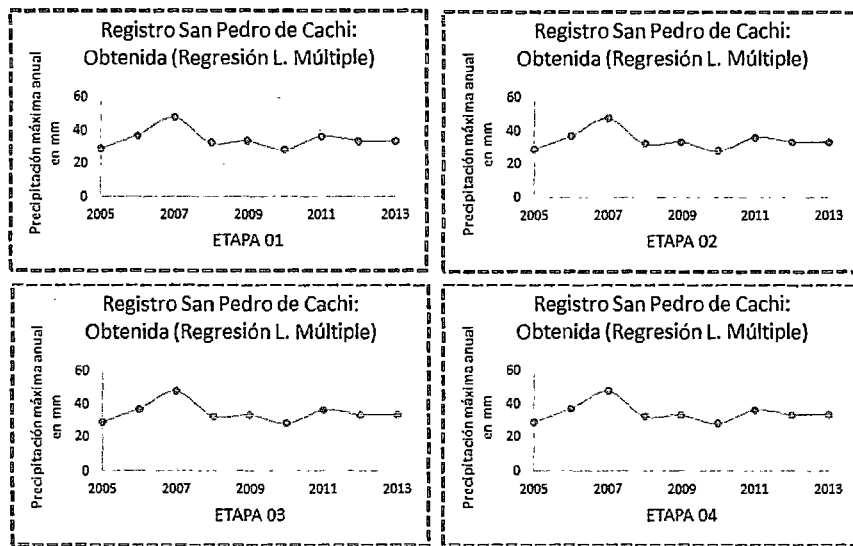


Figura 4.53

4.1.2. Validez

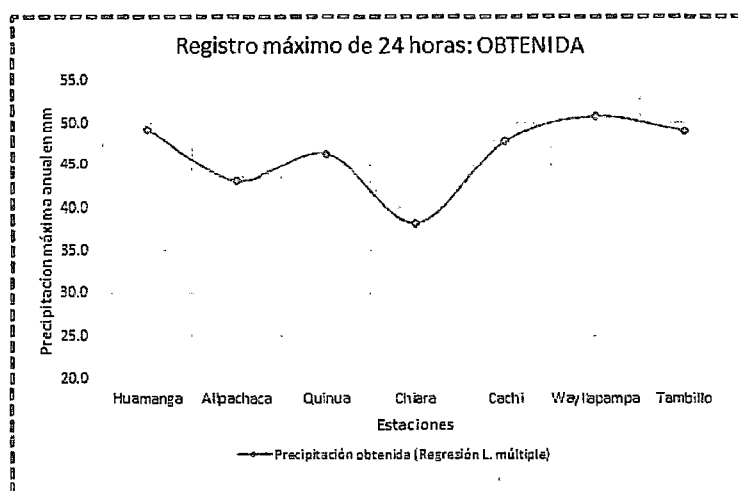
La validez, en términos generales, se refiere al grado en que un instrumento mide realmente la variable que pretende medir [[18], página 200]. Es una variable muy interesante a ser evaluado, una de la formas de verificar la validez de un modelo consiste en verificar que los resultados se encuentren siempre en el dominio definido en la identificación y recolección de las muestras. Los valores extremos mostrados en la tabla 4.25 se encuentran dentro de los límites establecidos en el registro de muestras.

Tabla 4.25: Niveles extremos de precipitación

Descripción	Precipitaciones (SENAMHI)
máximo	50.8
mínimo	18.33

Fuente: Elaboración propia

Figura 4.54: Nivel de precipitación obtenida (conjunto de validación)



Fuente: Elaboración propia

La Figura 4.54 muestra el dominio de la precipitación máxima esperado para el conjunto de muestras para la validación de la precipitación sintética, por tanto, el modelo obtenido mide adecuadamente las principales dimensiones de la variable analizada.

4.1.3. Objetividad

La objetividad se refiere al grado [[18], página 206] en que el modelo es o no permeable a la influencia de los sesgos y tendencias de los investigadores que lo administran, califican e interpretan. En la tabla 4.26, se muestra las combinaciones de las variables y sus respectivos coeficientes de correlación múltiple, que mide la relación entre las variables. Para obtener el modelo se probaron muchas alternativas, teniendo en cuenta los datos disponibles. Para el ingreso de los datos al principio disponemos de múltiples alternativas, como pueden ser: coordenadas geográficas (latitud, longitud), altitud y

Tabla 4.26: combinación de variables y coeficiente de correlación

combinación de variables	coeficiente de correlación
caso 01	0.57
caso 02	0.75
caso 03	0.81
caso 04	0.99

Fuente: Elaboración propia

las precipitaciones máximas anuales de estaciones pluviométricas y sintéticas.

4.2. Resultados de la investigación

4.2.1. Método hidráulico (Verificación en la sección del Puente Chacco)

Para este método es importante conocer a detalle la sección transversal del río donde se quiere determinar los parámetros hidráulicos representativos. Para calcular el caudal se utilizará la fórmula de Manning, que fue determinado, con la batimetría realizada en el punto de aforo de la Cuenca Chacco (Puente Chacco), bajo las siguientes consideraciones:

- a) **Ubicación del Puente Chacco:** El puente Chacco, se ubica geográficamente al norte de la ciudad de Ayacucho, a 10 Km de distancia vía carretera asfaltada, en el valle de Chacco. Dicho puente fue construido aproximadamente en el año 1965, haciendo un promedio de 50 años de servicio hasta la actualidad. La estación hidro-

Tabla 4.27: Ubicación de la estación Puente Chacco

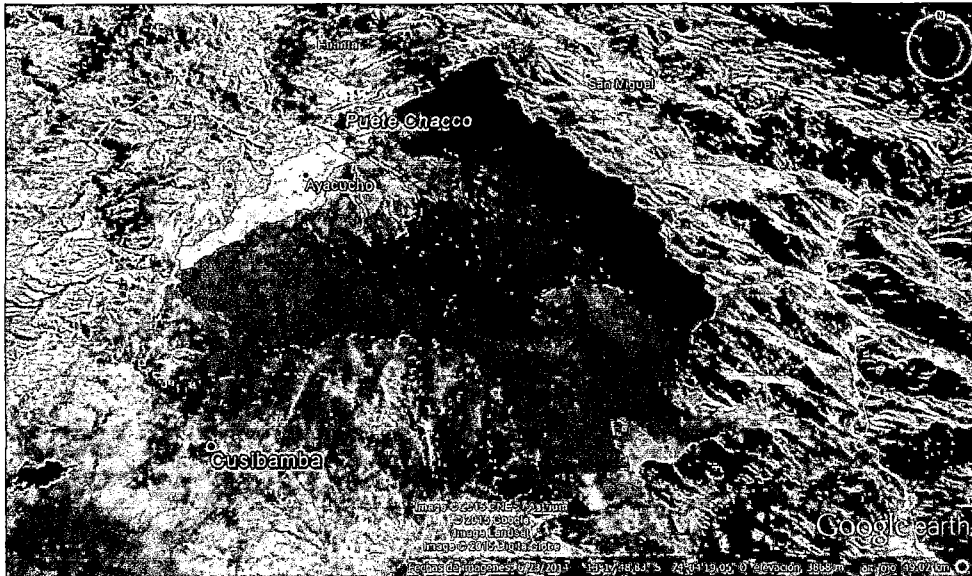
Estacion	Río	Cuenca (km^2)	Latitud	Longitud	Altitud(msnm)
Puente Chacco	Chacco	1096.77	13°05'42" S	74°12'21" W	2480

Fuente: Elaboración propia

métrica del Puente Chacco, solamente funcionó, durante 6 años (1996-2001), bajo

la dirección de: Proyecto Especial Río Cachi" Dirección de Operación Y Mantenimiento Unidad de Hidrología. La figura 4.55, representa la ubicación de la estación hidrométrica del puente Chacco; así como el área de influencia de la cuenca.

Figura 4.55: Ubicación de la estación hidrométrica del Puente Chacco



Fuente: Elaboración propia (adaptada desde Google Earth)

- b) **Trabajos de campo:** Para poder determinar los caudales en la estación hidrométrica del Puente Chacco, se han realizado los siguientes trabajos: Batimetría del río (**en el eje del Puente Chacco**), aforo con molinete y pendiente del cauce; todo estos datos resume en la tabla 4.28. Con los datos obtenidos: sección, velocidad, pendiente y caudal, se determina el número de Manning, para determinar los caudales a los diferentes niveles de cota en la sección del puente.
- c) **Determinación de caudales con la fórmula de Manning:** Si conocemos el tirante o los niveles de agua para diferentes eventos extremos, el caudal podemos calcular utilizando la ecuación de Manning.

$$Q = \frac{A^{\frac{5}{3}} S^{0.5}}{nP^{\frac{2}{3}}}$$

donde: Q es el caudal en función del tirante en $\frac{m^3}{s}$, A es el área de la secciona mojada en m^2 , S es el pendiente del cauce, P es el perímetro mojado en m y n es

Tabla 4.28: Estimación de número de Manning, con datos de: aforo, batimetría y pendiente

$V =$	molinete ($\frac{km}{hr}$)	\bar{V}	área	Q	P	S	Mannig
0.2H	0.8H	$\frac{m}{s}$	m^2	$\frac{m^3}{s}$	m		
3.40	2.60	0.56	0.47	0.26	2.45	0.01	0.06
4.80	4.60	0.87	0.71	0.62	2.72	0.01	0.04
5.40	4.80	0.94	0.82	0.77	2.82	0.01	0.04
6.40	5.80	1.13	0.88	0.99	2.86	0.01	0.04
7.20	6.60	1.28	0.94	1.20	2.92	0.01	0.03
6.00	5.40	1.06	0.91	0.96	2.92	0.01	0.04
5.00	4.40	0.87	0.99	0.86	3.55	0.01	0.05
total =			5.72	5.67	promedio =		0.04

Fuente: Elaboración propia

el número de Manning.

La figura 4.56, muestra el Puente Chacco, donde se comprueba el resultado de la presente investigación.

Figura 4.56: Puente Chacco punto de verificación de: caudal de máxima avenida



Fuente: Elaboración propia (adaptada desde Google Earth)

Con la ecuación de Manning y el valor promedio del número de Manning, se determina el caudal y la velocidad, para los diferentes tirantes del puente, que se resume en la tabla 4.29. Para poder apreciar a detalle, el resultado de los caudales obtenidos a los diferentes niveles, se ha confeccionado, la imagen 4.57, que muestra la condi-

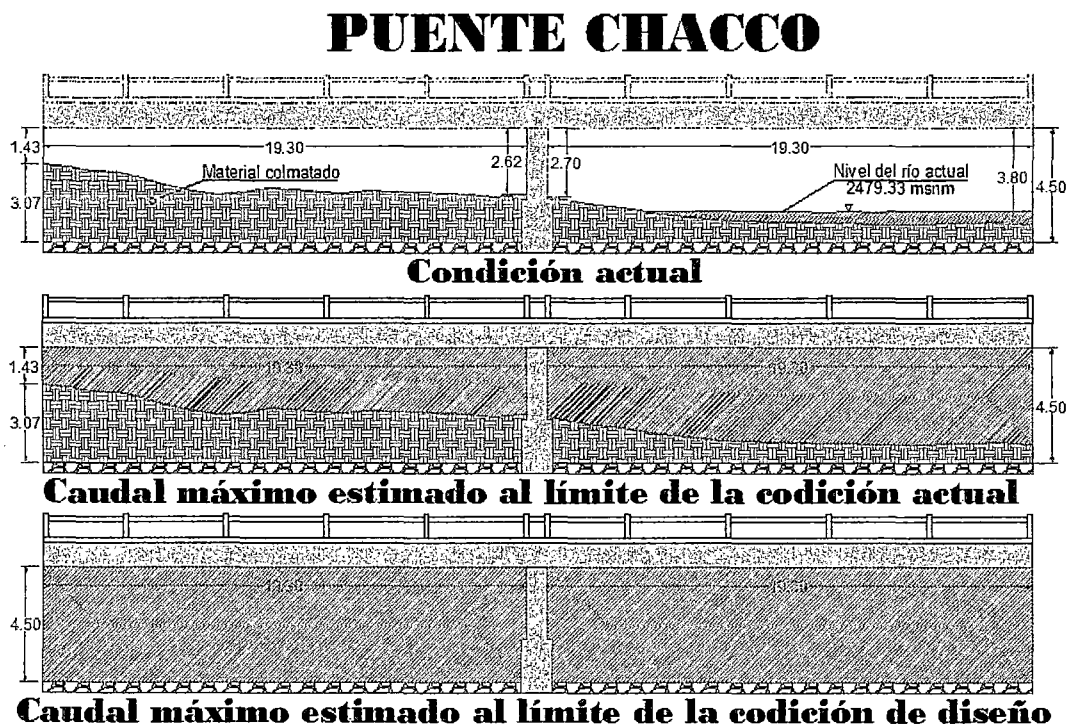
ción actual de la sección del puente, donde se hizo la batimetría y aforo; además se pones dos condiciones más, para determinar el caudal en las condiciones del límite de la sección.

Tabla 4.29: Estimación de velocidad y caudal para los diferentes tirantes del Puente Chacco

n	Cota <i>msnm</i>	Tirante <i>m</i>	<i>A</i> (<i>m</i> ²)	<i>P</i> <i>m</i>	<i>S</i>	<i>n</i>	<i>V</i> $\frac{m}{s}$	<i>Q</i> $\frac{m^3}{s}$
1	2479.33	0.51	5.83	15.94	0.01	0.04	1.28	7.45
2	2479.82	1.00	14.14	19.65	0.01	0.04	2.01	28.37
3	2480.31	1.50	26.75	35.06	0.01	0.04	2.09	55.85
4	2480.08	2.00	43.88	37.39	0.01	0.04	2.78	122.05
5	2481.29	2.50	62.51	41.48	0.01	0.04	3.29	205.42
6	2481.78	3.00	81.81	42.48	0.01	0.04	3.87	316.59
7	2482.27	3.50	102.11	43.48	0.01	0.04	4.42	451.01
8	2482.62	3.80	112.69	44.08	0.01	0.04	4.67	526.72
9	2483.31	4.50	173.02	56.60	0.01	0.04	5.27	911.08

Fuente: Elaboración propia

Figura 4.57: Puente Chacco en las diferentes condiciones de estimación de caudal máximo



Fuente: Elaboración Propia

4.2.2. Método regional para el Perú (Wolfgang Trau)

Debido a la escasez de información a nivel diario tal como caudales máximos diarios o precipitaciones máximas diarias para toda la cuenca, hemos decidido usar este método para encontrar valores de caudales máximos instantáneos, en el Puente Chacco. La ecuación que determina los caudales máximos es la siguiente:

Tabla 4.30: Coeficientes de la ecuación regional de descargas en el Perú

region	c1	c2	m	n
1	1.01	4.37	1.02	0.04
2	0.1	1.28	1.02	0.04
3	0.27	1.48	1.02	0.04
4	0.09	0.36	1.24	0.04
5	0.11	0.26	1.24	0.04
6	0.18	0.31	1.24	0.04
7	0.22	0.37	1.24	0.04

Fuente: Trau W. y Gutierrez R. 1979

$$Q = (C_1 + C_2) \log(T)^{mA^{-n}}$$

donde: Q es el caudal de avenida para un periodo de retorno de tiempo en (m^3/s), C_1 , C_2 , m y n , son coeficientes regionales (adimensional), T e el período de retorno (Años) y A área de la cuenca en (Km^2)

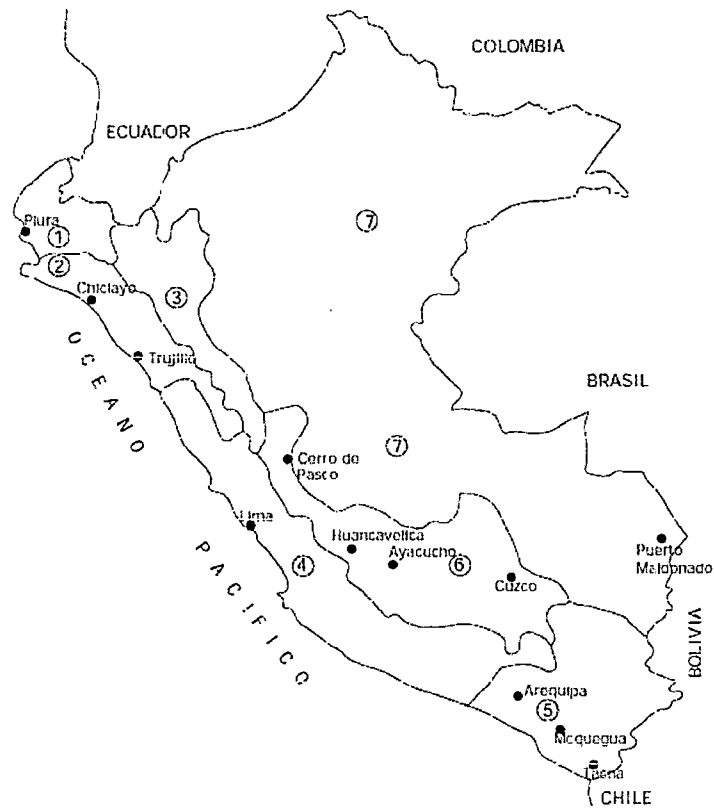
Según la Mapa de Regionalización de Avenidas del Perú, Huamanga-Ayacucho está clasificado como la Región 6, figura 4.58 y para los coeficientes se tiene la tabla 4.30, para cada región.

La tabla 4.31, resume el caudal estimado para los diferentes periodos de retorno, para la estación hidrométrica del Puente Chacco.

4.2.3. Resumen de los caudales máximos por los diferentes métodos

Aquí, se resume los resultados obtenidos por los diferentes métodos y referencias citadas al inicio de este capítulo. En la tabla 4.32 se resume los caudales máximos para 100

Figura 4.58: Mapa de Regionalización de Avenidas del Perú



Fuente: Análisis regional de las avenidas en los ríos del Perú: Trau W. y Gutierrez R. 1979

y 500 años de periodo de retorno, para los diferentes métodos citados y la referencia mencionada. Como se aprecia, los resultados son similares.

4.3. Contrastación de hipótesis

En esta sección se desarrolla las pruebas de hipótesis necesarias de las variables determinadas en la investigación, el cual se realiza mediante la estadística inferencial y cuyo propósito es demostrar que las variables registradas y disponibles pertenecen a la población o universo, de esta manera garantizar la generalización de los resultados obtenidos, tomando en consideración el nivel de confianza establecido y el error máximo aceptable (nivel de significancia o significación) determinado en la obtención del tamaño de la muestra, mostrada en la figura 3.19. Las pruebas mas utilizadas en la contrastación de hipótesis son: Coeficiente de Correlacion de Pearson, Prueba de t

Tabla 4.31: Caudales obtenidos con el método regional para el Rio Chacco (Puente Chacco)

Descripción	Área m^2	T años	c_1	c_2	m	n	Q m^3/s
Pte Chacco	1096.77	2	0.18	0.31	1.24	0.04	104.21
Pte Chacco	1096.77	5	0.18	0.31	1.24	0.04	241.96
Pte Chacco	1096.77	10	0.18	0.31	1.24	0.04	346.17
Pte Chacco	1096.77	25	0.18	0.31	1.24	0.04	483.93
Pte Chacco	1096.77	50	0.18	0.31	1.24	0.04	588.14
Pte Chacco	1096.77	100	0.18	0.31	1.24	0.04	692.34
Pte Chacco	1096.77	500	0.18	0.31	1.24	0.04	934.31

Fuente: Elaboración propia

Tabla 4.32: Caudales máximos estimados por los diferentes métodos y referencia

periodo años	Mtdo hidrológico $\frac{m^3}{s}$	Mtdo regional $\frac{m^3}{s}$	Mtdo hidráulico $\frac{m^3}{s}$	Referencia [13] $\frac{m^3}{s}$
100	785.8	692.3	526.7	735.2
500	958.2	934.3	911.1	1041.6

Fuente: Elaboración propia

Student, y la Prueba de Chi-cuadrada, para el caso de la investigación se determina la contrastación de hipótesis con la primera prueba.

4.3.1. Constrastación de hipótesis para las precipitaciones máximas estimadas

Se verificará la relación existente entre los registros a nivel de las precipitaciones máximas anuales de las estaciones pluviométricas (TRMM) y la obtenida mediante la regresión lineal múltiple para demostrar la hipótesis de la existencia de una relación directa. La tabla 4.33 muestra los coeficientes de correlación de Pearson, relacionando las variables del registro de precipitaciones (SENAMHI) y las obtenidas. La figura 4.59 muestra el resultado de la relación de la precipitación máxima de cada estación y la obtenida, mediante regresión lineal múltiple, donde existe una correlación positiva muy fuerte del registro total de precipitaciones máximas de todas las estaciones y las obtenidas; en cambio la figura 4.60 muestra el resultado de la relación de la precipita-

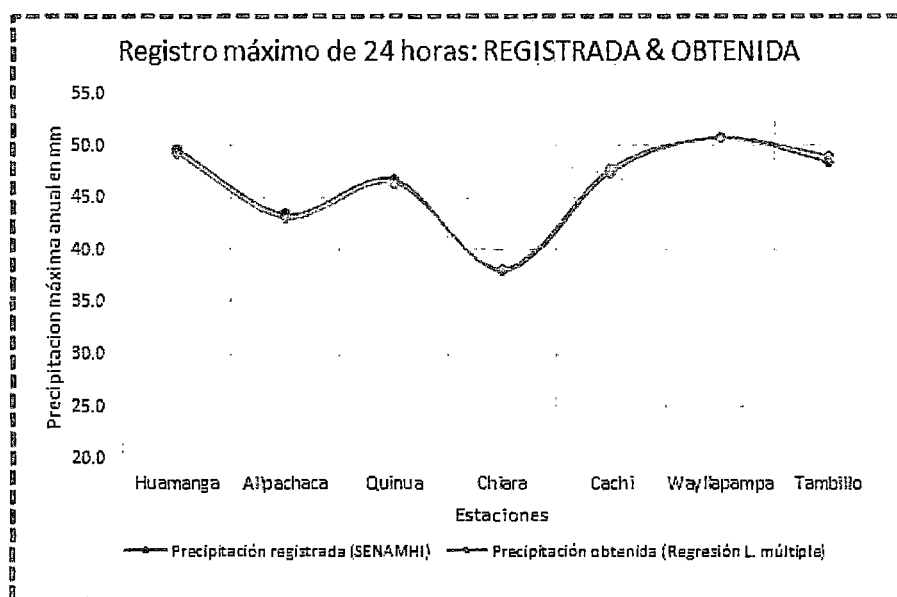
Tabla 4.33: Coeficiente de pearson para las variables analizadas (solo los máximos de todas las estaciones)

Variable 1	Variable 2	Coeficiente de Pearson
precipitación SENAMHI	precipitación obtenida	0.99

Tabla 4.34: Fuente: Elaboración propia

ción máxima anual para una de las estaciones aledañas a la cuena de estudio (estación pluviométricas de San pedro de Cachi), con coeficiente de Pearson de 0.7, dando una correlación positiva media.

Figura 4.59: Relación de precipitación máxima de todas las estaciones (SENAMHI) y las obtenidas

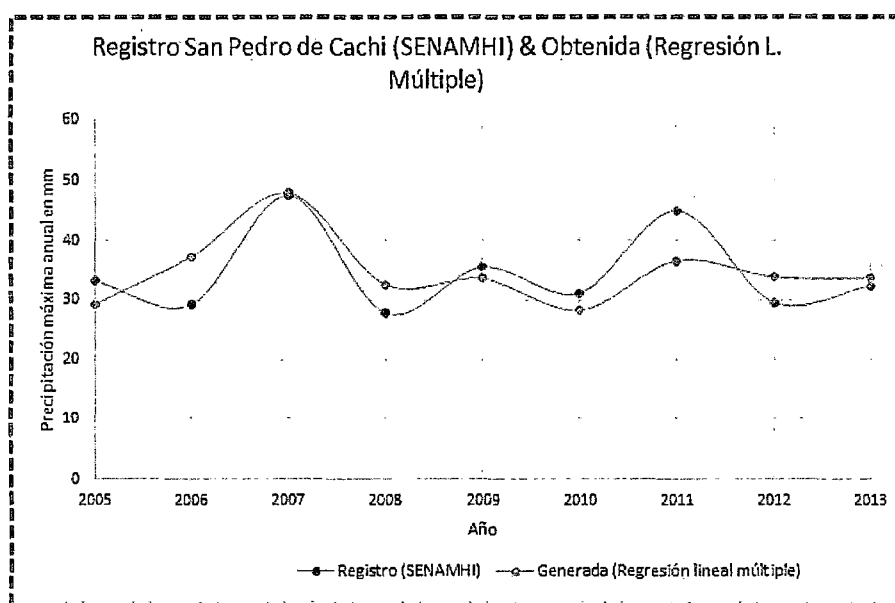


Fuente: Elaboración propia

4.3.2. Contrastación de hipótesis para los caudales máximas estimadas: estación hidrométrica Puente Chacco

Se verificará la relación existente entre los valores de los caudales máximos obtenidos mediante el método hidráulico y los demás métodos.

Figura 4.60: Registro de precipitación máxima anual estación San P. de Cachi y las obtenidas



Fuente: Elaboración propia

Tabla 4.35: Coeficiente de pearson para las variables analizadas

Variable 1	Variable 2	Coeficiente de Pearson
Mtdo Hidráulico	Mtdo Hidrológico	0.97
Mtdo Hidráulico	Mtdo Wolfgang Trau	0.99

Fuente: Elaboración propia

Como se observa en la tabla 4.35 existe una correlación positiva considerable con las variables de Método Hidráulico, Método Hidrológico y Método regional para el Perú (Wolfgang Trau).

Conclusiones y recomendaciones

Conclusiones

1. Con respecto a la Cuenca Hidrográfica:

- La caracterización de las cuencas a través del programa del **ArcGIS 10.3** y su extensión **ArcHydro**, que permitió obtener los parámetros morfométricos como: tamaño, perímetro, ancho y pendiente, longitud, jerarquización de corrientes, entre otros parámetros de relieve y forma como lo es también la curva hipsométrica y el polígono de frecuencias.
- El cálculo de parámetros morfométricos es hoy en día más preciso y eficiente, ya no se requiere de la cartografía clásica de curvas de nivel en formato papel, y aunque la experiencia de quién realiza estas tareas siempre es indispensable, con el empleo de un SIG se obtiene mayor consistencia en los resultados.
- Los resultados obtenidos en cuanto a la delimitación de la cuenca, va depender de la calidad del modelo digital de elevaciones (DEM), el cual representa la información fundamental en una delimitación automática de cuenca, en este caso el DEM ha sido generado a partir de los datos descargados de la **Página del Ministerio de Educación**, la cual consideramos una información estándar y de buena calidad para todo el Perú.

2. Con respecto a la Hidrología:

- El comportamiento de las precipitaciones (intensidad y tiempo en que su-

ceden), de los registros de SENAMHI y TRMM 3B42 V7, se aprecian notoriamente, que los valores de los registros de TRMMM siempre superan a los registros del SENAMHI, casi para todas las estaciones analizadas, ver sección 3.4.3, para su mejor apreciación.

- Como se puede apreciar, en la figura 3.27, que las estaciones pluviométricas de Wayllapampa, Quinoa, Tambillo y Huamanga, están dentro de una sola estación sintética del TRMM.
- De las distribuciones teóricas, para el ajuste de datos, se ha tomado, las distribuciones que dan el mejor ajuste. Las estaciones: **Muyurina (estación generada)**, **Chiara y liciada (estación generada)**, tienen mejor ajuste con la **distribución LogNormal 2 parámetros**, la estación de **Huamanga** tiene mejor ajuste con la **distribución Gumbel**; en cambio las estaciones: **Tambillo y Challhuamayú (estación generada)**, tienen mejor ajuste con la **distribución Normal**.
- El caudal aforado en campo para la estación hidrométrica del Puente Chacco es de $5.67 \frac{m^3}{s}$ con una velocidad media de $0.96 \frac{m}{s}$, que corresponde al día del aforo, así mismo teniendo como referencia esta velocidad, caudal y pendiente del cause, se ha determinado el coeficiente de rugosidad de Manning promedio de 0.04, para luego determinar los caudales a los diferentes niveles en la sección del puente, tabla 4.29.
- Los usos del suelo de la cuenca son determinantes en las abstracciones estimadas, porque un pequeño cambio de Número de Curva (CN), altera notoriamente los resultados. Para grandes cuencas, una alternativa es la utilización de los sistemas de información geográfica, para obtener una cierta aproximación a las superficies clasificadas de usos de suelo.

3. Con respecto a los Resultados:

- Se procuró establecer una relación entre precipitaciones máximos anuales de estaciones Pluviométricas (SENAMHI) y estaciones sintéticas (TRMM 3B42 V7), por Regresión Lineal Múltiple, mediante la aplicación de coefi-

cientes adecuados a la superficie de la cuenca en estudio, íntimamente unidos a sus características: latitud, longitud, altitud y precipitación sintética (tabla 3.19: caso 04), dando como mejor ajuste. La ecuación de validación que determina las precipitaciones para las subcuencas sin estaciones pluviométricas es:

$$P_{est} = 566.628980 + 0.394388P_{trmm} + 0.000234(X) - 0.000077(Y) - 0.007301(Z)$$

Con coeficiente de determinación ($R^2 = 0.99$) y el R^2 ajustado = 0.97.

- En el análisis de los datos disponibles mediante la estadística inferencial se obtienen los coeficientes de correlación de Pearson, encontrándose niveles de 0.99, por tanto queda establecido que la muestra es representativa de la población para un nivel de significancia de 0.05.
- La validación de las precipitaciones máximas anuales, conlleva directamente a determinar los caudales máximos, para los diferentes periodos de retorno, para su respectiva validación de los caudales en la estación hidrométrica de Puente Chacco, dando como resultado la tabla 4.32.
- En el análisis de los resultados de caudales máximos, mediante los diferentes métodos se obtienen los coeficientes de correlación de Pearson, evaluados con el Método Hidráulico (patrón de validación), encontrándose niveles de 0.97 y 0.99, para el Método Hidrológico y Wolfgang Trau, respectivamente, por tanto queda establecido que los valores obtenidos son representativos de la población para un nivel de significancia de 0.05.
- La sección longitudinal del Puente Chacco, tiene como límite de descarga de caudales máximos hasta $911.1 \frac{m^3}{s}$, calculado con el método hidráulico, esto semeja a los valores por los demás métodos, para un periodo de retorno de 500 años.
- Queda demostrado que las precipitaciones máximas anuales registradas por el satélite TRMM 3B42 V7, dan resultados satisfactorios y que además estos

datos son de uso gratuito, que se puede descargar de la siguiente dirección: <http://giovanni.sci.gsfc.nasa.gov/giovanni/> ; de igual manera los caudales máximos obtenidos para la Cuenca del Río Chacco son los correctos, porque se ha verificado con la sección hidráulica del Puente Chacco y las referencias de personas más longevas de la zona.

Recomendaciones

- Se recomienda utilizar un modelo Metaheurística para la validación de las precipitaciones máximas anuales, dado que los modelos determinísticos, no logran reproducir adecuadamente la comprobación requerida. Para los datos máximos de cada estación logra reproducir adecuadamente; en cambio para cada estación pluviométricas, no logra reproducir correctamente.
- SENAMHI y ANA como instituciones encargadas a nivel nacional del manejo de estaciones meteorológicas, debería densificar las estaciones pluviométricas para el desarrollo de las investigaciones de esta naturaleza, con resultados eficientes; así mismo el Gobierno Regional de Ayacucho, debe poner en funcionamiento a la estación hidrométrica del Puente Chacco; ya que para la validación de caudales se requiere el registro.

Futuras investigaciones

- Ahora que se tiene en funcionamiento el satélite de Medición de Precipitación Global (GPM), que fue lanzado el 27 de Febrero del 2014, con una resolución espacial de $4Km \times 4Km$, resolución temporal de 30 minutos y cobertura de $90N-90S$, con mediciones de lluvia y de precipitación congelada; incluso puede detectar lluvia ligera ($< 0.5mm/hr$), a medida que el GPM vaya recolectando valores de precipitación, es posible validar, siguiendo el mismo procedimiento planteado.

Acrónimos

TRMM Misión de medición de lluvias tropicales.

GPM Misión de precipitación global.

ANA Autoridad Nacional del Agua.

SENAMHI Servicio Nacional de Meteorología e Hidrología.

SCS Servicio de conservación de suelos USA (1964)

GIS Sistema de información geográfica

Bibliografía

Percepción remota

- [1] Castro Loayza, E. S. *Evaluación de Imágenes Satelitales de Precipitaciones (TRMM 3B43 mensual)* **2014**.
- [2] Fontal, B.; Suárez, T.; Reyes, M.; Bellandi, F.; Contreras, R. y Romero, I. *Escuela Venezolana para la Enseñanza de la Química* **2012**.
- [3] Guzmán Prado, M. *Redes Neuronales Artificiales Como Herramienta de Validación de la Precipitación Obtenida Mediante Percepción Remota.*, Universidad Nacional de San Cristóbal de Huamanga, 2014.
- [4] Huffman, G. J. y Bolvin, D. T. *NASA, Greenbelt, USA* **2013**, 1-40.
- [5] Jara, S. P. C. *Caracterización de tormentas en el Valle del Mantaro mediante sensoramiento remoto.*, Tesis doct., Pontificia Universidad Católica del Perú, Facultad de Ciencias e Ingeniería. Mención: Física, 2013.
- [6] Labrador García, M.; Évora Brondo, J. y Arbelo Pérez, M. *La Laguna, Spain: Consejería de Agricultura, Ganadería, Pesca y Aguas del Gobierno de Canarias* **2012**.
- [7] Merenson, C. y Montenegro, C. L. *Proyecto de Bosques Nativos y Áreas Protegidas. Informe Regional Bosque Andino Patagónico. 115p* **2005**.
- [8] Reyes Munoz, P. y Olmo Reyes, F. *Master en Geofísica y Meteorología* **2010**.
- [9] Salinero, E. C., *Fundamentos de teledetección espacial*, 1990.
- [10] Zubieta Barragán, R. *Modelado Hidrológico Distribuido de la Cuenca Amazónica Peruana Utilizando Precipitación Obtenida Por Satélite.*, Universidad Nacional Agraria La Molina, 2013.

Hidrología superficial

- [11] Espinoza Villar, J. C.; Ronchail, J.; Guyot, J. L.; Cochonneau, G.; Naziano, F.; Lavado, W.; De Oliveira, E.; Pombosa, R. y Vauchel, P. *International Journal of Climatology* **2009**, *29*, 1574-1594.
- [12] Fattorelli, S. y Fernández, P. C. (*Edición Digital*), *cap. I, sección 2011, 2*.
- [13] Huamanga, M. P., *Elaboración del Expediente Técnico: "Instalación de defensa ribereña del río Huatatas y Pongora*, 2014.
- [14] McCuen, R. H. y col., *Hydrologic analysis and design*; Prentice-Hall Englewood Cliffs, NJ: 1989.
- [15] Te Chow, V.; Maidment, D. R. y Mays, L. W., *Hidrología aplicada*; McGraw Hill: 1996.

Metodología de la investigación

- [16] Caballero Romero, A., *Metodología Integral Innovadora para Planes y Tesis*, Primera; Caro, I. M. A., ed., 2011, pág. 623.
- [17] García Cordoba, F., *La tesis y el trabajo de tesis / Thesis and Dissertation Work (Spanish Edition)*; Editorial Limusa S.A. De C.V.: 2002.
- [18] Hernández, R., *Metodologia De La Investigacion (5ta Edición)*; Mc Graw-Hill Interamericana: 2010.
- [19] Muñoz, C., *Cómo elaborar y asesorar una investigación de tesis (Spanish Edition)*; Pearson (México): 2012.

Estadística

- [20] Nieves, A. y Domínguez C., F., *Probabilidad y Estadística para Ingeniería, un Enfoque moderno*; Interamericana, M. G.-H., ed., 2010.
- [21] Uriel, E. *Universidad de Valencia Versión 2013*, 09-2013.

Anexo A

Estimación de la precipitación de diseño

Queda incluido el desarrollo detallado del proceso para la obtención del tormenta de diseño, que es un dato de ingreso, al programa HEC-HMS, para la obtención de caudales, para todas las subcuencas.

Universidad Nacional de San Cristóbal de Huamanga

Escuela Profesional de Ingeniería Civil

Tesis:

Validación de Caudales máximos a Partir de Precipitación Estimada por Percepción Remota

Tema:

Estimación de la Precipitación de Diseño

El método basado en las tormentas de diseño tipo NRCS - del "Servicio de Conservación de Recursos Naturales de Estados Unidos" (RNCS - Antiguo servicio de Conservación de Suelos SCS), proponen cuatro curvas adimensionales de lluvia acumulada para un periodo de 24 horas. Las gráficas propuestas son la siguientes:

- Tormenta tipo II: que corresponde a tormentas de corta duración y mayor intensidad.
- Tormenta tipo I y IA: son característicos de climas con inviernos húmedos y veranos secos, siendo las tormentas de tipo IA las de menor intensidad.
- Tormenta tipo III: corresponde a tormentas tropicales con grandes profundidades de lluvia en 2 horas

1.- Datos

1.2 Precipitación de diseño - Para un tiempo de retorno considerado

Precipitación (en mm) para un tiempo de retorno de 500 años

$P_{24pr} := 66.88$ mm

Nota:
representa precipitación total

1.3 Elección del tipo de Precipitación

Teniendo en cuenta los siguiente:

1. Tormenta tipo I
2. Tormenta tipo IA
3. Tormenta tipo II
4. Tormenta tipo III

Elección del tipo de precipitación

TipoT := 3

1.4 Precipitación Acumulada - RNCS

Para generar las tormentas acumuladas se realiza mediante:

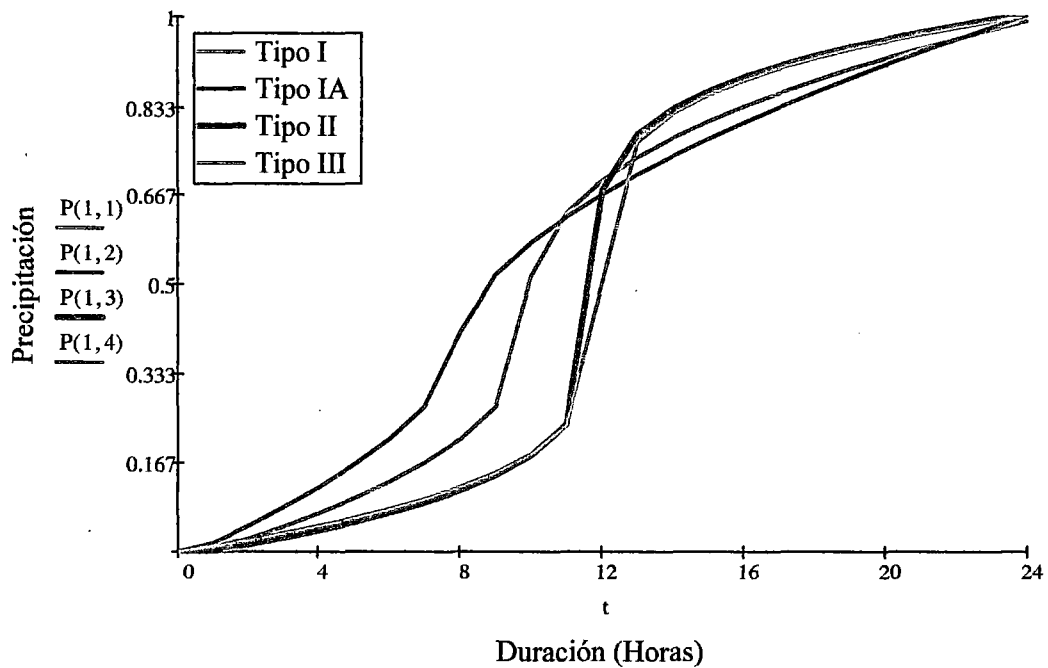
I	IA	II	III
0.4511	0.3919	0.495	0.5
9.995	7.96	11.8	12
1	1	0.56	24
-0.1617	0.843	10.6	24.04
-3.0163	120.39	130	2
0.013	0.3567	0.525	0.04
0.5853	0.4228	0.75	0.75

```

t :=
  i ← 0
  for j ∈ 0, 1.. 24
    i ← 1 + i
    tj ← j
  t

P(P24, tipo) :=
  (
    a
    b
    c
    d ← Coefi<tipo>
    e
    f
    g
  )
fo(x, y) ← 0
Po ← matrix(length(t), 1, fo)
for i ∈ 1, 2.. length(t)
  Poi ← 0 if ti = 0
  Poi ← P24 · [ a +  $\frac{t_i - b}{c} \cdot \left( \frac{d}{e \cdot |t_i - b| + f} \right)^g ]$  otherwise
Po
  
```

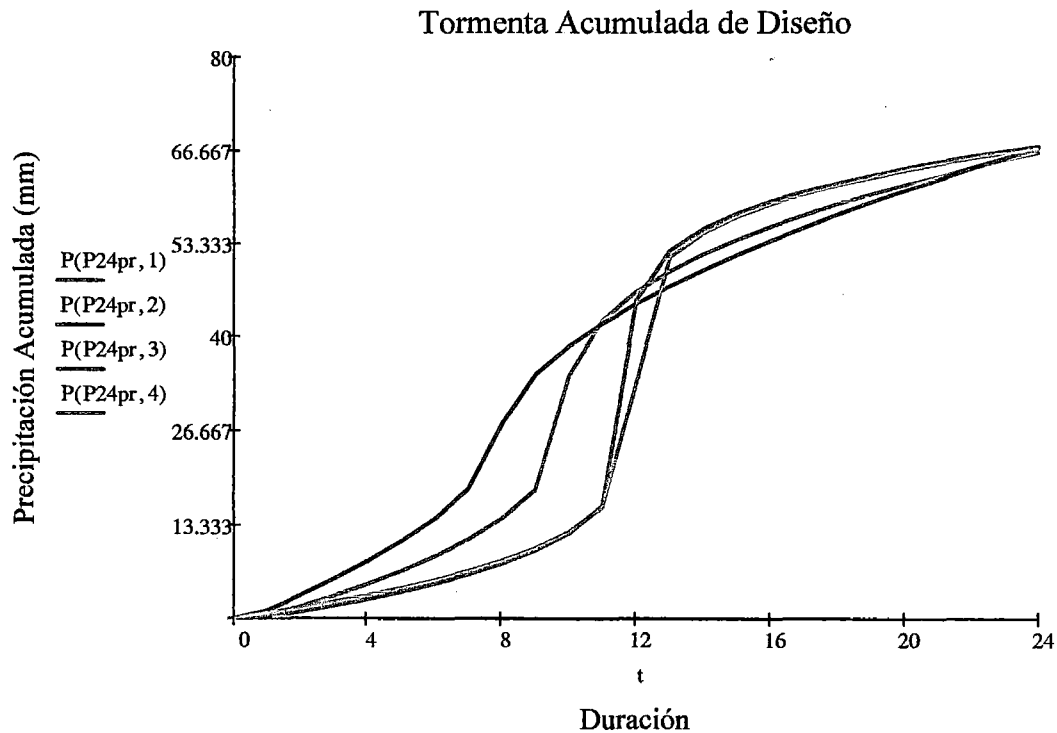
Tipos de Tormentas de Diseño - NRCS



2.- Proceso de Cálculo

2.1 Precipitación de diseño

El tipo de tormenta (I, IA, II y III) se elige teniendo en cuenta la similitud gráfica de la curva masa o precipitación acumulada de la precipitación (datos) comparado con las curvas propuestos por NRCS



El tipo de tormenta seleccionado es:

$$\text{TipoT} = 3$$

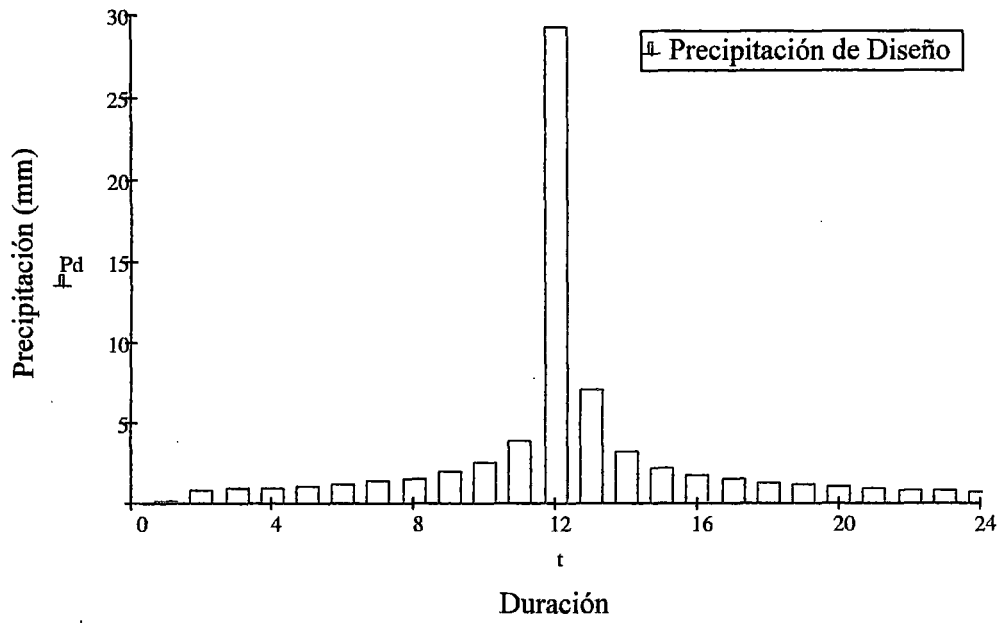
$$\text{Pac} := \text{P}(\text{P24pr}, \text{TipoT})$$

La precipitación de diseño (P_d), el hietograma de diseño

$$P_d := \text{Pac} \quad j := 2, 3 \dots \text{length}(\text{Pac})$$

$$P_{dj} := \text{Pac}_j - \text{Pac}_{j-1}$$

Tormenta de Diseño: Estación Huamanga ($T_r=500$ años)



	1
1	0
2	0.079
3	0.794
4	0.857
5	0.933
6	1.028
7	1.149
8	1.309
9	1.533
10	1.875
11	2.475
12	3.903
13	29.175
14	7.02
15	3.138
16	...

	1
1	0
2	1
3	2
4	3
5	4
6	5
7	6
8	7
9	8
10	9
11	10
12	11
13	12
14	13
15	14
16	...

Anexo B

Registro de precipitaciones (SENAMHI y TRMM)

1. Registro de precipitaciones máximas anuales, para las estaciones pluviométricas y sintéticas, ver el plano (04)
2. Consolidado de registro de precipitaciones máximas anuales de estaciones pluviométricas y sintéticas, para ingreso al modelo de regresión lineal múltiple.
3. Registro de caudales mensuales, para la estación hidométrica del puente Chacco.

ESTACIÓN : ALLPACHACA
 PARÁMETRO : PRECIPITACIÓN MÁXIMA EN 24 HORAS (mm)

LAT. : 13 ° 23 ' 19" "S"
 LONG. : 74 ° 16 ' 1" "W"
 ALT. : 3600 msnm

DPTO. : AYACUCHO
 PROV. : HUAMANGA
 DIST. : CHIARA

AÑO	ENE	FEB	MAR	ABR	MAY	JUN	JUL	AGO	SEP	OCT	NOV	DIC	MÁX. ANUAL
1992	45.7	22.2	19.6	17.0	0.0	3.9	11.7	1.3	0.0	18.3	3.9	45.7	45.7
1993	27.4	28.7	57.4	17.0	18.3	3.9	10.4	10.4	10.4	18.3	13.1	31.3	57.4
1994	14.4	35.9	18.3	18.3	14.4	1.3	0.0	3.9	9.1	5.2	13.1	14.2	35.9
1995	20.2	34.5	34.1	17.6	5.5	2.2	8.5	1.3	10.3	29.2	21.4	15.8	34.5
1996	38.1	27.7	31.5	12.0	4.7	1.8	2.3	8.0	8.5	20.4	10.4	21.0	38.1
1997	26.1	17.0	28.3	7.8	4.2	0.0	2.5	11.0	14.2	6.0	20.2	22.8	28.3
1998	35.2	12.5	20.9	10.4	1.3	4.4	0.0	9.7	7.2	8.9	9.4	20.6	35.2
1999	21.1	18.8	14.6	11.5	7.4	3.7	3.9	S/D	20.4	7.5	13.9	11.1	21.1
2000	26.8	41.9	17.3	8.0	21.5	8.3	7.4	22.5	6.8	15.4	11.5	18.5	41.9
2001	26.5	20.5	28.5	8.8	11.7	3.0	4.9	10.6	8.1	8.1	18.2	19.3	28.5
2002	20.0	20.3	28.5	9.0	3.2	2.2	10.3	4.7	10.7	12.5	19.3	27.2	28.5
2003	25.4	12.9	19.0	12.8	14.3	0.0	2.0	6.8	11.4	4.6	8.5	24.3	25.4
2004	28.2	23.0	22.0	19.0	5.0	19.0	16.0	6.0	36.0	1.8	14.1	23.2	36.0
2005	15.6	21.2	25.8	7.9	2.5	0.0	7.0	15.2	23.7	10.5	10.5	27.6	27.6
2006	25.4	24.2	28.2	12.6	0.0	2.9	0.0	7.0	4.1	22.5	18.2	16.1	28.2
2007	17.3	30.0	43.5	8.0	12.8	0.0	3.7	0.0	5.3	8.8	10.5	28.5	43.5
2008	16.6	26.0	28.9	4.8	13.4	5.4	1.4	1.5	22.5	21.2	17.0	17.5	28.9
2009	19.1	28.0	12.8	17.3	6.0	0.0	6.0	3.0	1.5	16.3	15.0	14.8	28.0
2010	37.4	28.5	20.0	8.5	7.0	0.4	5.9	6.0	11.8	13.2	4.0	25.6	37.4

ESTACIÓN : HUAMANGA
PARÁMETRO : PRECIPITACIÓN MÁXIMA EN 24 HORAS (mm)

LAT. : 13 ° 9 ' 1 " "S"
LONG. : 74 ° 13 ' 1 " "W"
ALT. : 2761 msnm

DPTO. : AYACUCHO
PROV. : HUAMANGA
DIST. : JESÚS NAZARENO

AÑO	ENE	FEB	MAR	ABR	MAY	JUN	JUL	AGO	SEP	OCT	NOV	DIC	MÁX. ANUAL
1990	28.0	30.5	19.2	13.5	0.6	5.3	0.7	9.8	9.2	8.0	16.0	16.0	30.5
1991	19.5	7.6	13.0	12.2	0.0	0.0	15.0	5.0	10.3	10.0	7.5	11.2	19.5
1992	18.6	16.5	19.6	16.0	0.0	2.2	3.8	13.0	9.8	9.5	16.8	22.0	19.6
1993	15.5	40.5	21.0	6.2	1.0	9.7	0.0	10.0	7.0	7.0	2.6	4.0	40.5
1994	22.0	15.5	15.2	7.0	6.0	2.0	0.8	2.0	7.2	13.0	15.0	12.0	22.0
1995	24.0	24.0	42.0	18.5	8.0	8.0	2.3	1.0	9.5	8.5	4.0	8.0	42.0
1996	11.5	29.0	7.2	9.8	6.0	0.0	4.5	2.5	4.2	1.5	26.0	7.5	29.0
1997	10.0	15.5	23.2	7.0	6.0	0.0	0.0	0.0	7.2	13.0	15.0	12.0	23.2
1998	11.5	20.0	7.2	27.3	3.0	0.0	7.8	11.2	5.7	8.0	6.5	6.5	27.3
1999	23.6	24.8	12.6	11.0	1.3	11.6	0.0	8.0	7.0	14.5	23.0	10.4	24.8
2000	35.2	10.2	18.7	9.9	1.4	4.4	5.2	6.4	14.2	24.4	6.4	11.7	35.2
2001	39.0	16.8	30.0	16.5	4.5	11.4	2.4	2.5	1.4	8.9	20.2	16.4	39.0
2002	18.0	8.5	8.8	10.5	0.0	1.5	1.6	0.0	6.9	3.2	7.8	25.8	23.6
2003	11.5	14.6	30.0	16.5	4.5	0.0	2.5	6.0	6.0	7.2	15.7	13.5	30.0
2004	24.2	49.8	11.1	6.7	8.2	7.6	8.7	3.0	6.0	14.1	8.4	9.8	49.8
2005	19.3	22.4	30.2	23.0	4.0	2.5	0.0	0.0	11.0	5.0	17.0	17.7	30.2
2006	27.9	15.3	18.0	1.6	11.0	1.0	0.0	1.5	26.0	11.0	9.6	19.5	27.9
2007	16.4	10.2	34.0	9.9	1.4	4.4	5.2	6.4	14.2	24.4	6.4	11.7	34.0
2008	31.5	16.8	30.0	16.5	4.5	11.4	2.4	2.5	1.4	8.9	20.2	16.4	31.5
2009	18.0	29.6	8.8	10.5	0.0	1.5	1.6	0.0	6.9	3.2	7.8	25.8	29.6
2010	11.5	14.6	30.0	16.5	4.5	0.0	2.5	6.0	6.0	7.2	15.7	13.5	24.5
2011	46.7	6.4	11.1	6.7	8.2	7.6	8.7	3.0	6.0	14.1	8.4	9.8	46.7
2012	18.0	8.5	8.8	10.5	0.0	1.5	1.6	0.0	6.9	3.2	7.8	24.7	24.7

ESTACIÓN : QUINUA
PARÁMETRO : PRECIPITACIÓN MÁXIMA EN 24 HORAS (mm)

LAT. : 13 ° 2 ' 2" "S"
LONG. : 74 ° 8 ' 7" "W"
ALT. : 3316 msnm

DPTO. : AYACUCHO
PROV. : HUAMANGA
DIST. : QUINUA

AÑO	ENE	FEB	MAR	ABR	MAY	JUN	JUL	AGO	SEP	OCT	NOV	DIC	MÁX. ANUAL
1990	26.2	12.6	10.6	23.6	4.6	20.4	1.4	16.3	10.0	14.3	18.7	13.8	26.2
1991	21.9	8.0	11.9	4.5	4.3	20.4	3.5	0.0	20.2	11.0	9.1	12.7	21.9
1992	14.9	12.0	15.8	13.7	0.0	6.6	8.2	14.6	4.9	15.5	15.1	16.2	16.2
1993	17.0	37.3	14.7	10.5	6.8	7.2	9.2	9.1	17.6	19.5	10.7	18.2	37.3
1994	13.5	16.7	20.0	27.2	2.9	5.8	0.0	12.6	8.9	9.3	12.5	36.7	36.7
1995	35.2	14.0	27.9	5.8	18.8	1.3	1.2	1.0	6.5	18.6	28.6	21.8	35.2
1996	27.4	15.9	29.7	17.0	1.6	0.0	0.5	8.7	8.2	9.0	12.6	16.1	29.7
1997	29.2	24.5	37.8	12.7	3.9	0.0	4.0	10.0	16.1	4.0	12.3	26.1	37.8
1998	22.3	38.3	43.6	5.5	6.2	2.7	0.0	2.5	4.5	41.3	15.5	9.6	43.6
1999	22.6	24.0	23.7	6.2	0.5	3.5	6.4	0.0	28.4	11.2	24.2	22.4	28.4
2000	26.7	26.5	23.5	7.4	17.0	7.0	13.4	2.5	5.5	8.3	3.6	18.7	26.7
2001	19.5	21.2	28.5	12.0	16.0	1.8	18.0	6.7	21.3	28.7	19.9	18.5	28.7
2002	18.3	20.8	22.0	7.3	13.4	1.4	21.9	8.8	20.1	17.6	14.7	27.0	27.0
2003	7.0	32.4	25.8	31.5	9.5	2.6	0.3	14.3	10.8	1.0	10.8	27.4	32.4
2004	10.8	23.0	17.9	3.6	5.9	5.2	11.7	8.7	14.3	9.0	12.8	20.3	23.0
2005	9.7	28.2	32.7	21.7	10.7	0.6	6.4	0.6	9.0	12.1	21.8	31.0	32.7
2006	20.7	17.9	21.1	14.5	1.2	2.4	0.0	5.3	3.1	20.5	14.0	12.8	21.1
2007	17.8	23.4	33.2	28.2	5.5	0.0	7.7	1.3	13.0	16.2	14.5	21.0	33.2
2008	23.0	24.6	16.8	11.0	16.4	6.4	4.8	0.7	20.0	17.8	18.1	20.0	24.6
2009	27.6	46.8	7.8	14.9	9.0	0.4	2.0	4.4	9.2	8.4	21.4	14.2	46.8
2010	18.1	25.3	18.7	8.1	3.9	0.0	6.6	7.4	7.5	21.8	10.0	28.5	28.5
2011	19.3	18.6	32.1	23.0	9.9	4.2	3.1	2.1	23.6	13.4	16.6	14.0	32.1
2012	21.2	28.7	22.0	8.7	8.9	9.6	17.1	10.6	18.7	18.5	15.5	3.1	28.7
2013	23.0	20.0	17.0	7.1	11.4	4.4	3.7	25.2	14.3	37.9	33.9	24.3	37.9

ESTACIÓN CHIARA
PARÁMETRO : PRECIPITACIÓN MÁXIMA EN 24 HORAS (mm)

LAT. : 13 ° 16 ' 00" "S"
 LONG. : 74 ° 12 ' 27" "W"
 ALT. : 3400 msnm

DPTO. : AYACUCHO
 PROV. : HUAMANGA
 DIST. : CHIARA

AÑO	ENE	FEB	MAR	ABR	MAY	JUN	JUL	AGO	SEP	OCT	NOV	DIC	MÁX. ANUAL
1993	0.0	25.0	26.4	20.4	9.2	4.0	4.0	6.6	16.5	15.2	31.0	16.5	31.0
1994	30.3	23.7	20.4	6.6	4.0	2.0	0.0	3.3	8.6	18.5	19.1	15.8	30.3
1995	22.4	15.8	18.5	7.8	3.3	2.5	2.9	5.4	11.7	12.4	20.4	8.6	22.4
1996	14.5	21.1	27.9	21.9	1.3	1.3	5.3	6.7	7.1	8.0	4.0	11.3	27.9
1997	21.1	23.7	12.0	10.3	2.6	1.3	S/D	10.3	8.6	8.6	14.6	18.1	23.7
1998	23.9	13.8	18.5	6.6	4.9	7.9	S/D	S/D	4.0	5.3	13.2	21.1	23.9
1999	18.7	23.3	24.4	11.2	4.2	4.0	6.6	S/D	12.5	10.8	17.8	17.9	24.4
2000	19.1	14.1	13.8	2.0	3.3	5.7	13.6	7.9	3.7	16.7	6.5	14.5	19.1
2001	38.0	20.3	21.5	15.8	12.4	3.0	6.2	7.9	3.4	15.0	14.5	11.9	38.0
2002	14.4	20.3	17.8	7.1	11.9	4.2	9.1	9.6	12.9	27.3	21.6	10.0	27.3
2003	8.3	30.2	28.5	23.5	6.0	0.0	0.7	10.2	6.1	3.9	23.5	15.0	30.2
2004	7.6	23.6	11.6	7.6	5.9	3.7	9.4	10.4	8.8	9.6	12.0	25.5	25.5
2005	23.3	15.9	19.4	18.6	7.3	0.0	2.9	8.4	8.2	19.6	17.8	27.3	27.3
2006	26.0	25.5	23.1	8.6	0.0	5.5	0.0	20.0	3.5	18.0	13.0	14.0	26.0
2007	17.5	22.0	20.6	3.8	3.6	0.0	1.3	0.0	2.0	11.9	6.4	15.2	22.0
2008	17.9	18.4	9.5	13.1	4.0	2.5	0.0	2.1	8.6	18.0	4.0	18.0	18.4
2009	22.4	24.0	14.3	16.8	20.6	1.8	7.2	1.0	2.4	8.8	19.2	13.8	24.0
2010	28.1	20.0	13.2	10.8	6.2	5.2	0.0	8.8	6.5	16.0	8.0	17.0	28.1

ESTACIÓN : SAN PEDRO DE CACHI
PARÁMETRO : PRECIPITACIÓN MÁXIMA EN 24 HORAS (mm)

LAT. : 13 ° 3 ' 55" "S"
 LONG. : 74 ° 21 ' 31" "W"
 ALT. : 2990 msnm

DPTO. : AYCUCHO
 PROV. : HUAMANGA
 DIST. : SANTIAGO PISCHA

AÑO	ENE	FEB	MAR	ABR	MAY	JUN	JUL	AGO	SEP	OCT	NOV	DIC	MÁX. ANUAL
2005	16.4	33.2	16.0	3.8	3.2	0.0	6.5	5.0	8.3	17.2	10.4	26.4	33.2
2006	18.5	29.2	15.6	15.6	2.5	5.4	0.0	6.0	13.2	25.4	10.2	29.3	29.3
2007	21.2	18.8	47.5	13.6	3.8	0.0	4.0	0.0	5.8	14.3	8.2	S/D	47.5
2008	15.4	17.6	13.5	3.6	11.8	4.5	0.0	0.9	9.2	6.8	5.6	27.8	27.8
2009	27.8	35.5	23.4	22.5	6.0	0.0	11.8	1.5	4.8	7.8	17.2	23.3	35.5
2010	31.2	22.4	14.8	14.5	4.9	0.5	3.2	7.3	12.4	8.6	15.0	31.1	31.2
2011	24.0	28.6	26.5	45.0	3.0	0.0	7.0	0.5	6.0	17.0	13.3	14.8	45.0
2012	15.6	29.6	23.6	8.0	15.0	13.0	9.5	3.4	20.6	18.5	12.2	23.6	29.6
2013	30.8	18.0	S/D	6.1	32.4	1.6	6.3	17.0	8.7	14.7	16.5	23.7	32.4

ESTACIÓN : WAYLLAPAMPA
PARÁMETRO : PRECIPITACIÓN MÁXIMA EN 24 HORAS (mm)

LAT. : 13 ° 4 ' 1" "S"
 LONG. : 74 ° 13 ' 1" "W"
 ALT. : 2470 msnm

DPTO. : AYACUCHO
 PROV. : HUAMANGA
 DIST. : PACAYCASA

AÑO	ENE	FEB	MAR	ABR	MAY	JUN	JUL	AGO	SEP	OCT	NOV	DIC	MÁX. ANUAL
2003	10.4	50.8	22.6	31.4	3.7	1.9	0.0	6.2	5.4	0.0	11.0	17.9	50.8
2004	40.8	14.8	9.4	3.5	3.9	3.2	8.4	5.7	6.4	13.5	7.8	17.3	40.8
2005	21.8	19.0	9.1	4.2	17.6	0.0	3.1	4.9	2.3	16.0	11.4	11.4	21.8
2006	32.3	15.8	16.8	7.6	7.4	2.3	2.3	6.5	12.8	18.5	13.7	16.0	32.3
2007	13.9	18.5	19.6	14.4	14.5	9.6	3.2	4.4	3.9	17.9	S/D	13.1	19.6
2008	15.0	23.6	13.0	6.0	13.3	2.7	0.3	3.6	7.3	5.6	10.2	17.0	23.6
2009	27.3	25.7	10.7	11.9	9.3	0.4	2.2	4.9	3.2	18.7	14.5	29.7	29.7
2010	18.7	17.1	12.7	7.3	3.3	0.0	2.1	7.8	5.9	7.4	5.7	18.0	18.7
2011	22.4	32.3	26.8	14.4	8.8	0.1	4.7	0.5	13.3	11.4	26.0	17.0	32.3
2012	15.1	19.7	15.6	20.3	27.6	7.2	9.5	1.3	16.8	13.2	19.3	24.8	27.6
2013	18.9	S/D	30.4	8.1	3.7	1.2	3.1	24.3	19.4	37.7	18.9	14.8	37.7

ESTACIÓN : TAMBILLO
PARÁMETRO : PRECIPITACIÓN MÁXIMA EN 24 HORAS (mm)

LAT. : 13 ° 12 ' 54" "S"
 LONG. : 74 ° 06 ' 19" "W"
 ALT. : 3250 msnm

DPTO. : AYACUCHO
 PROV. : HUAMANGA
 DIST. : TAMBILLO

AÑO	ENE	FEB	MAR	ABR	MAY	JUN	JUL	AGO	SEP	OCT	NOV	DIC	MÁX. ANUAL
1992	21.2	35.3	24.4	17.5	3.1	11.1	10.0	15.5	12.7	12.8	14.0	14.0	35.3
1993	30.0	37.9	15.3	16.5	5.6	7.0	5.9	9.1	21.0	10.8	19.6	25.9	37.9
1994	21.4	27.4	52.2	25.2	2.1	4.5	10.0	6.0	5.3	7.8	16.1	18.2	52.2
1995	16.2	16.5	17.4	24.5	5.3	1.0	7.8	4.5	7.3	16.1	16.0	22.4	24.5
1996	21.7	15.4	28.3	14.1	7.0	1.4	0.3	8.1	12.2	17.9	8.5	14.4	28.3
1997	21.3	41.7	19.9	14.8	2.8	0.0	3.1	12.2	15.1	23.5	27.7	27.0	41.7
1998	31.2	24.9	21.4	18.5	2.1	8.4	0.0	0.6	16.8	13.4	7.6	15.1	31.2
1999	28.6	20.9	16.5	5.3	0.3	1.6	1.8	0.0	12.1	8.5	14.4	26.9	28.6
2000	15.1	41.5	16.4	5.2	20.8	9.8	16.6	1.3	3.4	16.0	7.3	14.8	41.5
2001	22.1	13.3	28.0	11.3	16.0	5.3	11.3	7.2	5.2	11.1	48.5	9.1	48.5
2002	17.2	28.1	41.1	12.5	6.6	1.8	13.3	5.5	13.9	8.5	12.0	23.8	41.1
2003	21.5	38.4	17.0	19.5	5.4	0.0	0.0	14.3	4.0	1.9	4.6	25.5	38.4
2004	12.2	27.9	14.5	6.3	5.6	2.4	15.8	5.5	14.2	15.3	22.4	25.2	27.9
2005	29.2	18.0	47.0	8.3	0.2	0.0	3.5	1.5	8.2	12.5	14.2	26.4	47.0
2006	21.5	13.5	20.2	18.2	1.5	1.5	0.0	6.7	3.8	20.5	8.0	10.2	21.5
2007	17.2	17.7	20.4	27.0	2.5	0.0	14.7	1.0	8.2	19.5	10.1	24.4	27.0
2008	14.7	17.7	17.6	3.5	4.6	2.0	0.0	0.9	8.1	6.8	9.6	18.3	18.3
2009	25.4	21.1	15.6	19.1	12.9	0.0	4.2	0.2	6.6	8.2	17.2	17.6	25.4
2010	25.5	13.0	19.9	7.1	5.2	0.0	0.0	7.5	6.3	14.2	7.8	21.1	25.5

ESTACIÓN : SINTÉTICA ALLPACHACA [TRMM_3B42_daily v7]
 PARÁMETRO : PRECIPITACIÓN MÁXIMA EN 24 HORAS (mm)

LAT. : 13 ° 23 ' 1" "S"
 LONG. : 74 ° 16 ' 1" "W"
 ALT. : 3600 msnm

DPTO. : AYACUCHO
 PROV. : HUAMANGA
 DIST. : CHIARA

AÑO	ENE	FEB	MAR	ABR	MAY	JUN	JUL	AGO	SEP	OCT	NOV	DIC	MÁX. ANUAL
1998	27.5	36.5	19.0	6.3	6.6	6.8	7.1	7.4	7.7	13.2	11.3	13.8	36.5
1999	46.4	23.5	22.5	13.4	2.4	2.2	2.3	1.2	10.0	4.3	9.7	33.0	46.4
2000	18.7	40.1	34.9	9.3	9.8	1.7	13.0	5.1	2.3	17.9	5.6	18.3	40.1
2001	35.1	31.3	30.0	6.9	5.7	1.2	16.1	2.6	2.6	24.7	9.2	16.3	35.1
2002	30.9	23.5	17.4	7.1	6.2	0.4	13.6	7.0	15.5	9.1	10.3	17.1	30.9
2003	29.2	19.8	23.1	20.1	4.6	0.2	1.6	11.4	8.7	2.9	9.4	13.7	29.2
2004	13.9	36.2	27.7	12.0	6.1	2.1	15.4	8.6	14.5	6.7	9.1	29.0	36.2
2005	34.1	30.7	19.1	16.6	5.5	0.3	2.6	2.1	5.5	28.1	12.3	21.3	34.1
2006	30.2	33.0	62.7	11.6	2.7	0.5	0.0	8.1	6.1	8.4	22.4	24.4	62.7
2007	14.9	40.3	39.3	8.6	6.3	1.9	6.0	2.7	5.9	11.0	9.5	18.6	40.3
2008	41.4	38.5	18.3	5.0	5.6	8.3	4.2	5.4	6.8	18.8	9.9	8.5	41.4
2009	23.1	38.4	27.7	23.1	7.2	1.1	5.6	14.7	10.4	8.8	11.4	14.1	38.4
2010	28.1	42.0	29.2	21.8	6.9	1.9	1.7	6.3	9.4	8.3	5.2	27.7	42.0
2011	43.3	31.7	34.3	15.2	13.7	0.9	11.5	7.1	11.9	15.0	29.5	13.1	43.3
2012	18.3	26.1	29.2	9.4	12.3	1.1	5.3	3.9	11.3	9.1	13.2	35.5	35.5
2013	27.4	17.0	30.1	10.9	10.2	3.4	5.0	6.1	10.7	9.6	16.2	35.6	35.6
2014	30.3	28.2	30.8	11.5	6.1	0.4	4.6	1.5	18.1	7.8	8.3	9.9	30.8

ESTACIÓN : SINTÉTICA HUAMANGA [TRMM_3B42_daily v7]
 PARÁMETRO : PRECIPITACIÓN MÁXIMA EN 24 HORAS (mm)

LAT. : 13 ° 9 ' 1" "S"
 LONG. : 74 ° 13 ' 1" "W"
 ALT. : 2761 msnm

DPTO. : AYACUCHO
 PROV. : HUAMANGA
 DIST. : JESÚS NAZARENO

AÑO	ENE	FEB	MAR	ABR	MAY	JUN	JUL	AGO	SEP	OCT	NOV	DIC	MÁX. ANUAL
1998	31.7	47.1	20.9	15.8	5.3	3.5	0.7	2.7	10.2	11.1	9.6	19.6	47.1
1999	28.3	30.0	26.5	26.3	6.6	1.7	5.2	0.7	15.6	7.6	14.1	49.4	49.4
2000	20.3	34.2	31.9	10.6	18.5	2.4	11.8	10.9	3.6	18.7	14.1	30.6	34.2
2001	47.6	22.3	37.0	11.1	5.2	0.9	19.8	9.2	6.6	34.8	11.3	22.5	47.6
2002	28.3	37.9	41.6	23.2	8.6	0.6	17.2	8.4	13.0	16.9	18.8	26.9	41.6
2003	22.7	43.3	42.6	24.7	18.8	2.0	0.2	17.3	16.5	9.7	16.2	25.6	43.3
2004	21.2	25.5	29.1	9.7	9.9	2.2	22.3	16.0	30.8	18.9	11.8	23.5	30.8
2005	19.4	24.9	21.0	22.4	6.7	0.4	2.6	1.6	16.2	32.5	25.0	55.4	55.4
2006	49.9	36.4	53.8	14.4	7.5	0.3	0.3	14.9	13.1	18.7	33.7	22.5	53.8
2007	18.5	42.0	64.7	8.9	6.7	1.0	12.6	2.4	6.0	10.2	10.2	43.1	64.7
2008	35.0	38.1	22.0	14.0	6.7	5.4	2.6	1.5	3.0	25.4	7.9	8.4	38.1
2009	25.5	31.0	22.3	20.2	10.3	1.0	10.8	10.3	7.7	12.7	12.7	26.9	31.0
2010	28.6	13.0	16.6	14.9	11.9	0.4	8.4	12.1	11.0	17.7	6.7	28.7	28.7
2011	50.2	33.9	32.1	14.1	14.3	1.1	11.4	1.4	16.2	13.2	14.0	21.1	50.2
2012	34.9	25.0	18.7	17.8	9.3	4.4	10.4	8.6	32.2	28.7	18.0	21.3	34.9
2013	21.2	18.6	22.2	9.9	7.6	2.4	9.5	6.7	10.8	16.2	17.6	44.5	44.5
2014	24.3	28.3	27.6	12.2	5.5	6.9	7.6	2.1	18.4	13.5	15.2	15.4	28.3

ESTACIÓN : SINTÉTICA CHIARA [TRMM_3B42_daily v7]
 PARÁMETRO : PRECIPITACIÓN MÁXIMA EN 24 HORAS (mm)

LAT. : 13 ° 16 '00" "S"
 LONG. : 74 ° 12 '27" "W"
 ALT. : 3400 msnm

DPTO. : AYACUCHO
 PROV. : HUAMANGA
 DIST. : CHIARA

AÑO	ENE	FEB	MAR	ABR	MAY	JUN	JUL	AGO	SEP	OCT	NOV	DIC	MÁX. ANUAL
1998	26.2	23.2	27.3	15.9	0.4	3.0	7.3	3.7	7.7	15.2	14.3	44.9	44.9
1999	26.2	45.3	30.0	16.2	4.4	0.6	5.2	1.6	19.3	17.9	13.2	30.2	45.3
2000	15.3	41.8	26.0	20.8	7.3	14.1	14.4	12.9	10.6	32.9	8.8	20.3	41.8
2001	25.2	35.0	34.9	8.4	16.7	4.9	17.8	22.7	10.5	33.8	23.4	15.3	35.0
2002	26.8	22.3	33.8	17.1	12.7	0.8	22.4	10.6	19.3	19.5	22.4	28.9	33.8
2003	17.6	30.5	32.7	11.8	8.8	5.3	0.3	22.5	10.8	13.6	10.0	27.4	32.7
2004	18.8	32.1	19.3	17.3	20.5	8.8	30.0	10.8	15.9	12.5	15.5	28.9	32.1
2005	26.6	26.7	22.0	15.7	13.9	0.3	3.3	3.7	13.3	19.1	14.1	29.7	29.7
2006	36.8	28.7	27.0	9.2	4.8	5.8	0.0	9.4	19.4	15.5	31.3	30.0	36.8
2007	24.8	37.3	35.4	15.0	5.0	0.3	15.0	2.1	7.4	11.4	22.1	26.1	37.3
2008	28.1	25.8	38.0	20.4	7.8	0.6	0.6	5.2	4.6	26.5	12.3	11.0	38.0
2009	14.5	36.6	15.8	28.2	8.8	0.2	14.8	6.2	15.2	14.8	13.6	12.2	36.6
2010	31.6	17.0	25.8	8.6	11.0	3.8	0.5	14.3	5.6	5.6	8.1	25.5	31.6
2011	40.8	23.9	37.2	16.6	13.9	0.6	10.0	3.2	7.0	8.8	25.3	15.7	40.8
2012	38.5	23.7	21.4	11.6	3.8	3.8	1.6	8.6	31.6	28.7	22.2	25.7	38.5
2013	12.3	15.0	33.0	15.5	2.4	3.1	8.8	8.5	10.4	17.5	17.1	38.9	38.9
2014	28.5	30.8	19.8	14.9	11.4	0.7	11.8	1.4	14.9	14.6	24.5	17.7	30.8

ESTACIÓN : SINTÉTICA SAN PEDRO DE CACHI [TRMM_3B42_daily v7]

PARÁMETRO : PRECIPITACIÓN MÁXIMA EN 24 HORAS (mm)

LAT. : 13 ° 3 ' 55" "S"

LONG. : 74 ° 21 ' 31" "W"

ALT. : 2990 msnm

DPTO. : AYACUCHO

PROV. : HUAMANGA

DIST. : SANTIAGO PISCHA

AÑO	ENE	FEB	MAR	ABR	MAY	JUN	JUL	AGO	SEP	OCT	NOV	DIC	MÁX. ANUAL
1998	33.0	45.7	28.0	13.9	4.5	3.1	0.4	1.6	8.7	10.9	10.7	24.7	45.7
1999	39.0	36.8	17.1	15.4	4.4	1.1	2.3	0.7	12.4	12.4	14.8	36.8	39.0
2000	32.5	33.5	31.4	9.0	10.1	1.9	17.8	8.2	7.5	13.8	5.6	20.4	33.5
2001	36.0	21.6	49.7	12.2	5.2	2.3	11.7	8.2	6.4	23.8	25.4	29.2	49.7
2002	25.4	35.6	34.7	16.1	17.6	0.3	10.1	12.9	18.4	10.8	21.8	21.0	35.6
2003	20.9	41.4	31.9	23.4	15.1	0.7	3.4	16.7	17.7	3.8	13.7	18.3	41.4
2004	17.7	24.4	26.9	8.1	5.7	1.2	27.9	14.9	30.1	8.6	19.4	28.4	30.1
2005	22.6	29.2	22.6	27.2	9.2	0.0	2.1	1.2	8.7	28.4	17.0	19.8	29.2
2006	49.4	44.2	23.4	10.3	4.1	0.0	0.0	8.1	8.6	18.5	11.5	21.2	49.4
2007	14.0	25.5	76.3	6.0	5.7	0.0	9.6	0.2	6.4	8.2	9.6	26.9	76.3
2008	35.2	37.5	23.2	11.6	8.3	8.0	1.7	1.1	2.7	15.2	10.9	8.8	37.5
2009	21.5	40.1	16.5	18.0	7.3	1.9	10.8	8.4	4.7	9.7	18.1	17.6	40.1
2010	25.6	21.1	20.2	17.3	18.8	0.0	1.5	12.5	9.9	14.6	6.9	26.5	26.5
2011	47.7	30.0	32.5	16.8	9.3	0.5	8.1	5.0	11.2	9.8	23.4	30.7	47.7
2012	23.1	23.9	24.1	12.0	2.9	4.1	11.1	4.9	23.5	15.5	10.8	40.7	40.7
2013	30.9	15.7	15.7	16.0	10.4	5.1	5.1	4.9	14.6	12.0	19.4	40.2	40.2
2014	22.4	39.5	29.4	15.5	7.0	0.9	7.8	7.0	7.9	16.1	16.2	12.0	39.5

Registro de precipitaciones máximas anuales de estaciones pluviométricas y sintéticas							
Estación		Año	Precipitación máxima 24 horas		Este (X)	Norte (Y)	Altura (Z)
SENAMHI	TRMM		SENAMHI (mm)	3B42 TRMM (mm)	m	m	msnm
HUAMANGA	HUAMANGA	1998	27.3	47.1	584870.01	8546096.70	2761.0
		1999	24.8	49.4	584870.01	8546096.70	2761.0
		2000	35.2	34.2	584870.01	8546096.70	2761.0
		2001	39.0	47.6	584870.01	8546096.70	2761.0
		2002	23.6	41.6	584870.01	8546096.70	2761.0
		2003	30.0	43.3	584870.01	8546096.70	2761.0
		2004	49.8	30.8	584870.01	8546096.70	2761.0
		2005	30.2	55.4	584870.01	8546096.70	2761.0
		2006	27.9	53.8	584870.01	8546096.70	2761.0
		2007	34.0	64.7	584870.01	8546096.70	2761.0
		2008	31.5	38.1	584870.01	8546096.70	2761.0
		2009	29.6	31.0	584870.01	8546096.70	2761.0
		2010	24.5	28.7	584870.01	8546096.70	2761.0
		2011	46.7	50.2	584870.01	8546096.70	2761.0
2012	24.7	34.9	584870.01	8546096.70	2761.0		
ALLPACHACA	ALLPACHACA	1998	35.2	36.5	579374.81	8520306.79	3600.0
		1999	21.1	46.4	579374.81	8520306.79	3600.0
		2000	41.9	40.1	579374.81	8520306.79	3600.0
		2001	28.5	35.1	579374.81	8520306.79	3600.0
		2002	28.5	30.9	579374.81	8520306.79	3600.0
		2003	25.4	29.2	579374.81	8520306.79	3600.0
		2004	36.0	36.2	579374.81	8520306.79	3600.0
		2005	27.6	34.1	579374.81	8520306.79	3600.0
		2006	28.2	62.7	579374.81	8520306.79	3600.0
		2007	43.5	40.3	579374.81	8520306.79	3600.0
		2008	28.9	41.4	579374.81	8520306.79	3600.0
		2009	28.0	38.4	579374.81	8520306.79	3600.0
2010	37.4	42.0	579374.81	8520306.79	3600.0		
QUINUA	QUINUA	1998	43.6	47.1	593765.89	8558940.33	3316.0
		1999	28.4	49.4	593765.89	8558940.33	3316.0
		2000	26.7	34.2	593765.89	8558940.33	3316.0
		2001	28.7	47.6	593765.89	8558940.33	3316.0
		2002	27.0	41.6	593765.89	8558940.33	3316.0
		2003	32.4	43.3	593765.89	8558940.33	3316.0
		2004	23.0	30.8	593765.89	8558940.33	3316.0
		2005	32.7	55.4	593765.89	8558940.33	3316.0
		2006	21.1	53.8	593765.89	8558940.33	3316.0
		2007	33.2	64.7	593765.89	8558940.33	3316.0
		2008	24.6	38.1	593765.89	8558940.33	3316.0
		2009	46.8	31.0	593765.89	8558940.33	3316.0
		2010	28.5	28.7	593765.89	8558940.33	3316.0
		2011	32.1	50.2	593765.89	8558940.33	3316.0
2012	28.7	34.9	593765.89	8558940.33	3316.0		
2013	37.9	44.5	593765.89	8558940.33	3316.0		

Registro de precipitaciones máximas anuales de estaciones pluviométricas y sintéticas							
Estación		Año	Precipitación máxima 24 horas		Este (X)	Norte (Y)	Altura (Z)
SENAMHI	TRMM		SENAMHI (mm)	3B42 TRMM (mm)	m	m	msnm
CHIARA	CHIARA	1998	23.9	44.9	585853.01	8533221.01	3400.0
		1999	24.4	45.3	585853.01	8533221.01	3400.0
		2000	19.1	41.8	585853.01	8533221.01	3400.0
		2001	38.0	35.0	585853.01	8533221.01	3400.0
		2002	27.3	33.8	585853.01	8533221.01	3400.0
		2003	30.2	32.7	585853.01	8533221.01	3400.0
		2004	25.5	32.1	585853.01	8533221.01	3400.0
		2005	27.3	29.7	585853.01	8533221.01	3400.0
		2006	26.0	36.8	585853.01	8533221.01	3400.0
		2007	22.0	37.3	585853.01	8533221.01	3400.0
		2008	18.4	38.0	585853.01	8533221.01	3400.0
		2009	24.0	36.6	585853.01	8533221.01	3400.0
2010	28.1	31.6	585853.01	8533221.01	3400.0		
SAN PEDRO DE CACHI	SAN PEDRO DE CACHI	2005	33.2	29.2	569538.96	8555540.69	2990.0
		2006	29.3	49.4	569538.96	8555540.69	2990.0
		2007	47.5	76.3	569538.96	8555540.69	2990.0
		2008	27.8	37.5	569538.96	8555540.69	2990.0
		2009	35.5	40.1	569538.96	8555540.69	2990.0
		2010	31.2	26.5	569538.96	8555540.69	2990.0
		2011	45.0	47.7	569538.96	8555540.69	2990.0
		2012	29.6	40.7	569538.96	8555540.69	2990.0
2013	32.4	40.2	569538.96	8555540.69	2990.0		
WAYLLAPAMPA	WAYLLAPAMPA	2003	50.8	43.3	584895.26	8554237.94	2470.0
		2004	40.8	30.8	584895.26	8554237.94	2470.0
		2005	21.8	55.4	584895.26	8554237.94	2470.0
		2006	32.3	53.8	584895.26	8554237.94	2470.0
		2007	19.6	64.7	584895.26	8554237.94	2470.0
		2008	23.6	38.1	584895.26	8554237.94	2470.0
		2009	29.7	31.0	584895.26	8554237.94	2470.0
		2010	18.7	28.7	584895.26	8554237.94	2470.0
		2011	32.3	50.2	584895.26	8554237.94	2470.0
		2012	27.6	34.9	584895.26	8554237.94	2470.0
		2013	37.7	44.5	584895.26	8554237.94	2470.0

Registro de precipitaciones máximas anuales de estaciones pluviométricas y sintéticas							
Estación		Año	Precipitación máxima 24 horas		Este (X)	Norte (Y)	Altura (Z)
SENAMHI	TRMM		SENAMHI (mm)	3B42 TRMM (mm)	m	m	msnm
TAMBILLO	TAMBILLO	1998	31.2	47.1	596948.14	8538898.01	3250.0
		1999	28.6	49.4	596948.14	8538898.01	3250.0
		2000	41.5	34.2	596948.14	8538898.01	3250.0
		2001	48.5	47.6	596948.14	8538898.01	3250.0
		2002	41.1	41.6	596948.14	8538898.01	3250.0
		2003	38.4	43.3	596948.14	8538898.01	3250.0
		2004	27.9	30.8	596948.14	8538898.01	3250.0
		2005	47.0	55.4	596948.14	8538898.01	3250.0
		2006	21.5	53.8	596948.14	8538898.01	3250.0
		2007	27.0	64.7	596948.14	8538898.01	3250.0
		2008	18.3	38.1	596948.14	8538898.01	3250.0
		2009	25.4	31.0	596948.14	8538898.01	3250.0
2010	25.5	28.7	596948.14	8538898.01	3250.0		

ESTACIÓN HID. : CHACCO

LAT. : 13 ° 05 ' 42" "S"

DPTO. : AYACUCHO

PARÁMETRO : REGISTRO DE CAUDALES MENSUALES (m3/seg)

LONG. : 74 ° 12 ' 21" "W"

PROV. : HUAMANGA

FUENTE : PROYECTO ESPECIAL "RIO CACHI"/ UNIDAD DE HIDROLOGÍA

ALT. : 2480 msnm

DIST. : JESÚS N./ QUINUA

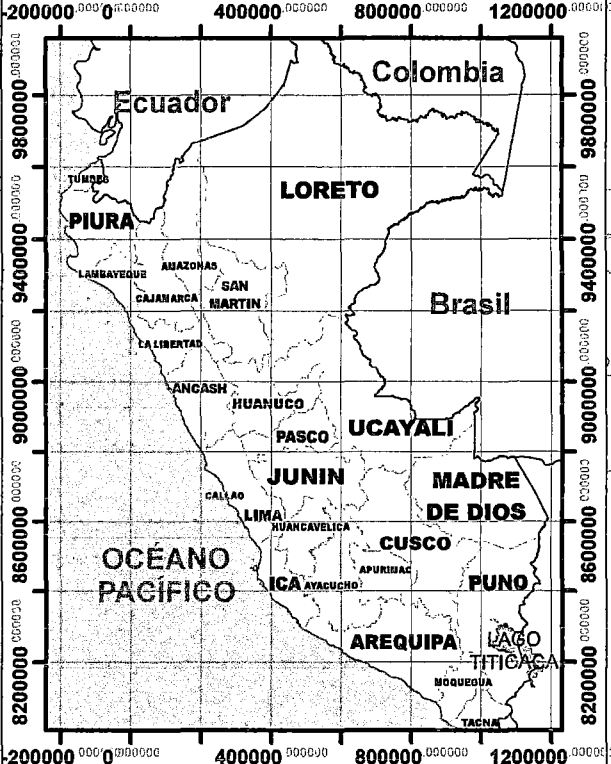
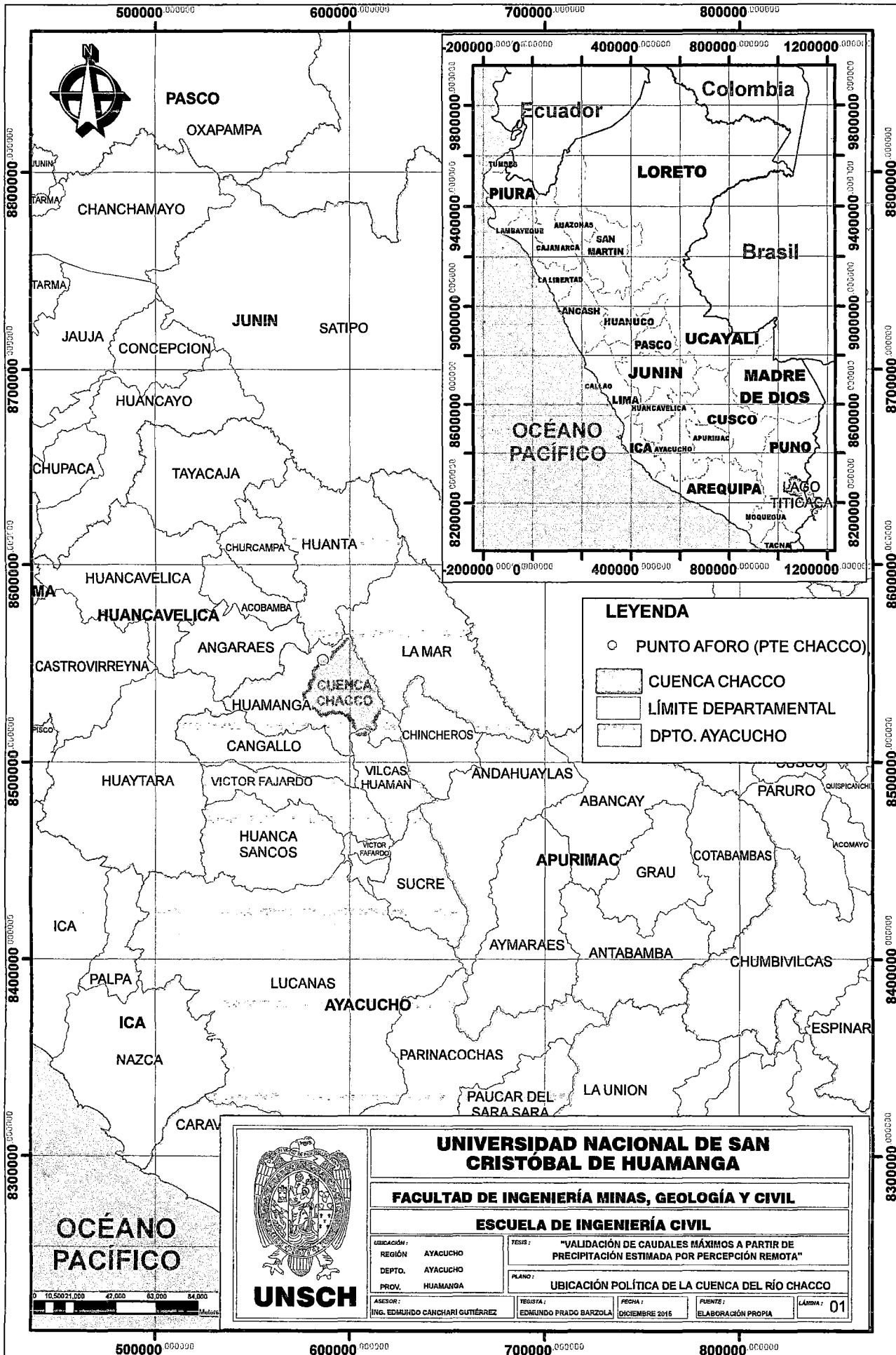
AÑO	ENE	FEB	MAR	ABR	MAY	JUN	JUL	AGO	SEP	OCT	NOV	DIC	PROM. ANUAL
1996	6.9	18.8	14.6	9.9	2.0	1.0	1.2	1.1	1.2	1.4	0.9	3.3	5.2
1997	13.8	12.5	20.4	2.6	2.0	1.8	1.9	2.4	2.9	2.5	3.9	3.9	5.9
1998	10.4	15.1	18.1	5.4	1.6	1.3	1.1	1.0	0.8	1.2	1.0	2.1	4.9
1999	6.6	22.5	26.8	7.6	2.6	1.6	1.5	1.1	1.2	1.2	1.8	2.6	6.4
2000	10.4	43.7	28.6	7.4	3.7	2.3	1.9	1.2	0.9	2.2	0.7	2.1	8.8
2001	6.0	4.8	8.7	8.3	2.4	0.9	0.9	0.5	0.4	2.5	2.3	2.5	3.4
PROMEDIO	9.0	19.6	19.5	6.9	2.4	1.5	1.4	1.2	1.2	1.8	1.8	2.8	

Anexo C

Planos

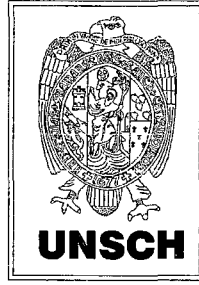
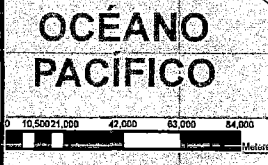
En esta sección se adjunta los siguientes planos:

1. Plano de ubicación política de la cuenca del Río Chacco
2. Plano de ubicación hidrográfica de la cuenca del Río Chacco
3. Mapa de cuenca del Río Chacco y subcuencas de esta
4. Ubicación de estaciones Pluviométricas (SENAMHI) y Sintéticas (TRMM)



LEYENDA

- PUNTO AFORO (PTE CHACCO)
- ▭ CUENCA CHACCO
- ▭ LÍMITE DEPARTAMENTAL
- ▭ DPTO. AYACUCHO

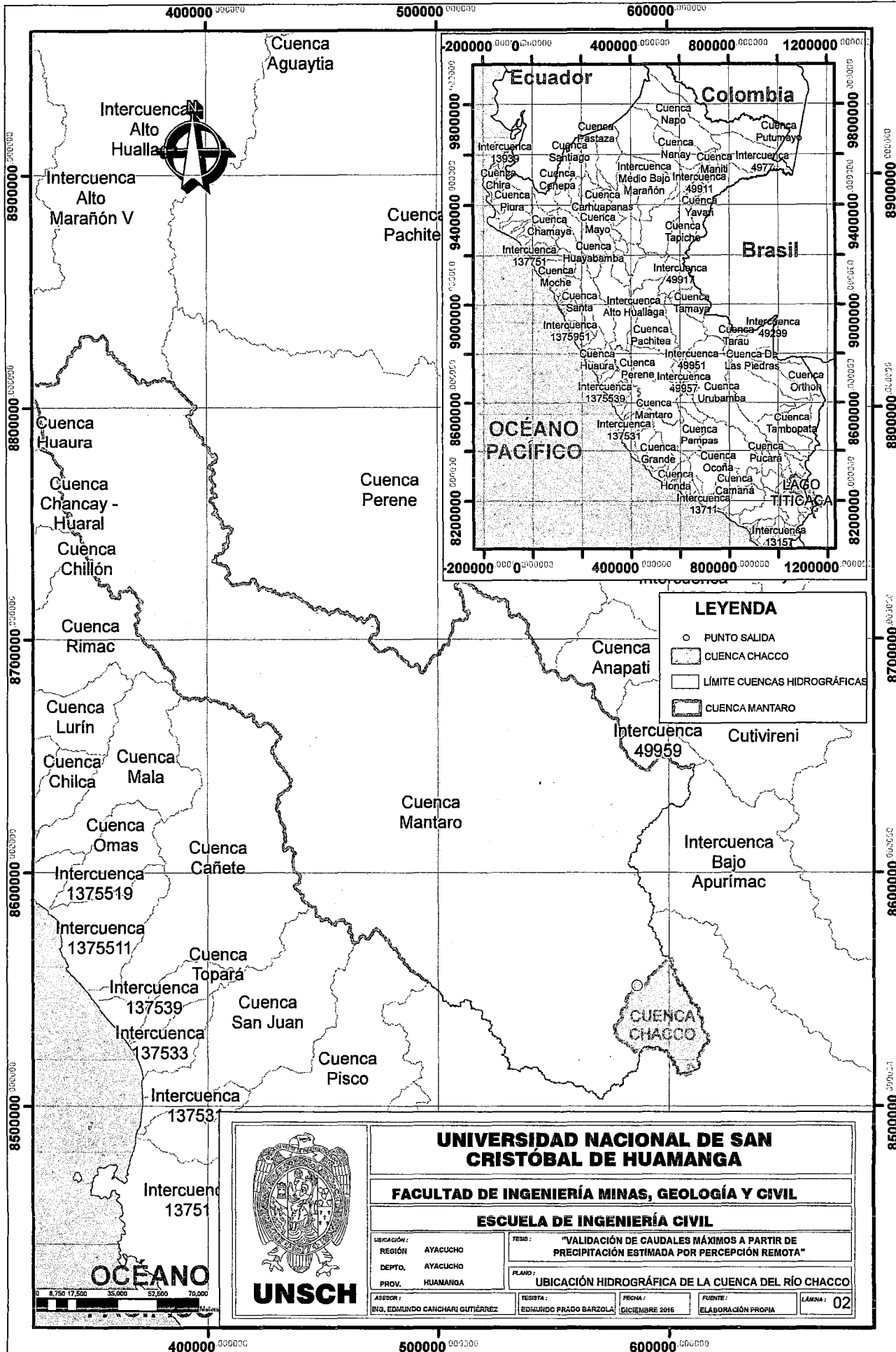


UNIVERSIDAD NACIONAL DE SAN CRISTOBAL DE HUAMANGA

FACULTAD DE INGENIERÍA MINAS, GEOLOGÍA Y CIVIL

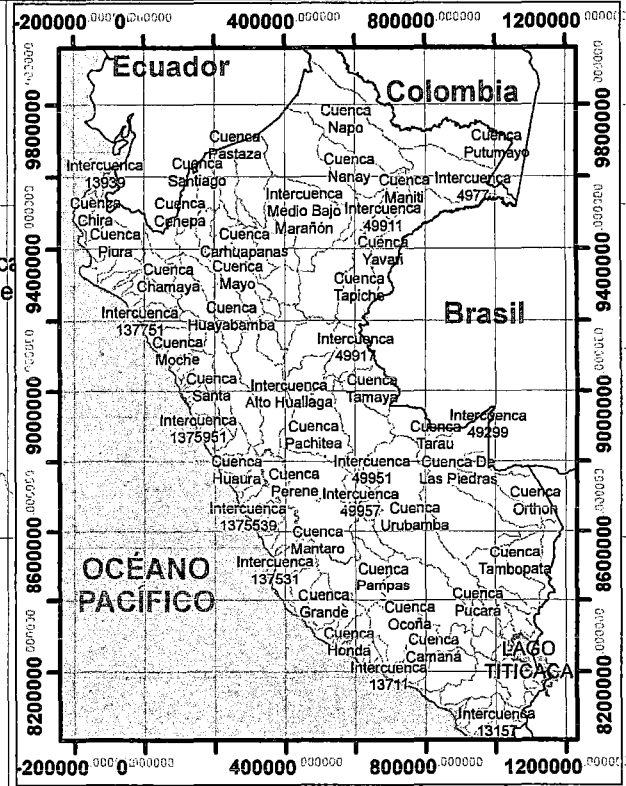
ESCUELA DE INGENIERÍA CIVIL

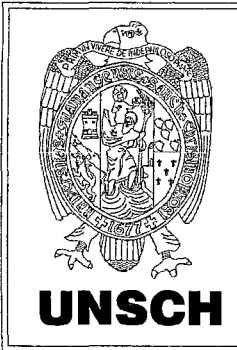
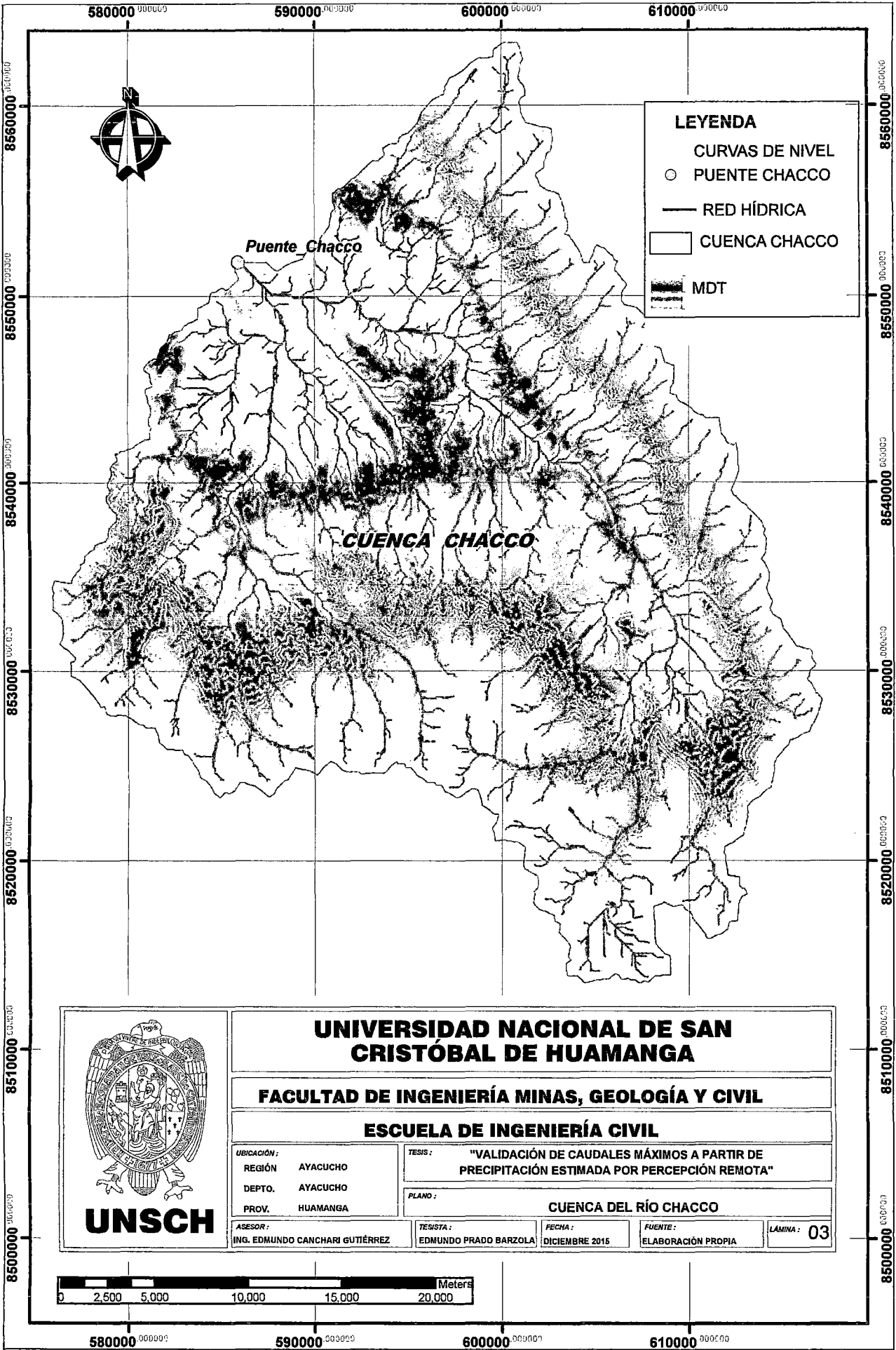
UBICACIÓN:	REGION:	TESIS:	
AYACUCHO	AYACUCHO	"VALIDACIÓN DE CAUDALES MÁXIMOS A PARTIR DE PRECIPITACIÓN ESTIMADA POR PERCEPCIÓN REMOTA"	
DEPTO. AYACUCHO	PROV. HUAMANGA	PLANO:	UBICACIÓN POLÍTICA DE LA CUENCA DEL RÍO CHACCO
ASESOR:	TESISTA:	FECHA:	FUENTE:
ING. EDUARDO CANCHARI CUTIÉREZ	EDUARDO PRADO BARZOLA	DICIEMBRE 2015	ELABORACIÓN PROPIA
			LÁMINA: 01



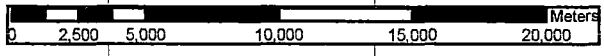
LEYENDA

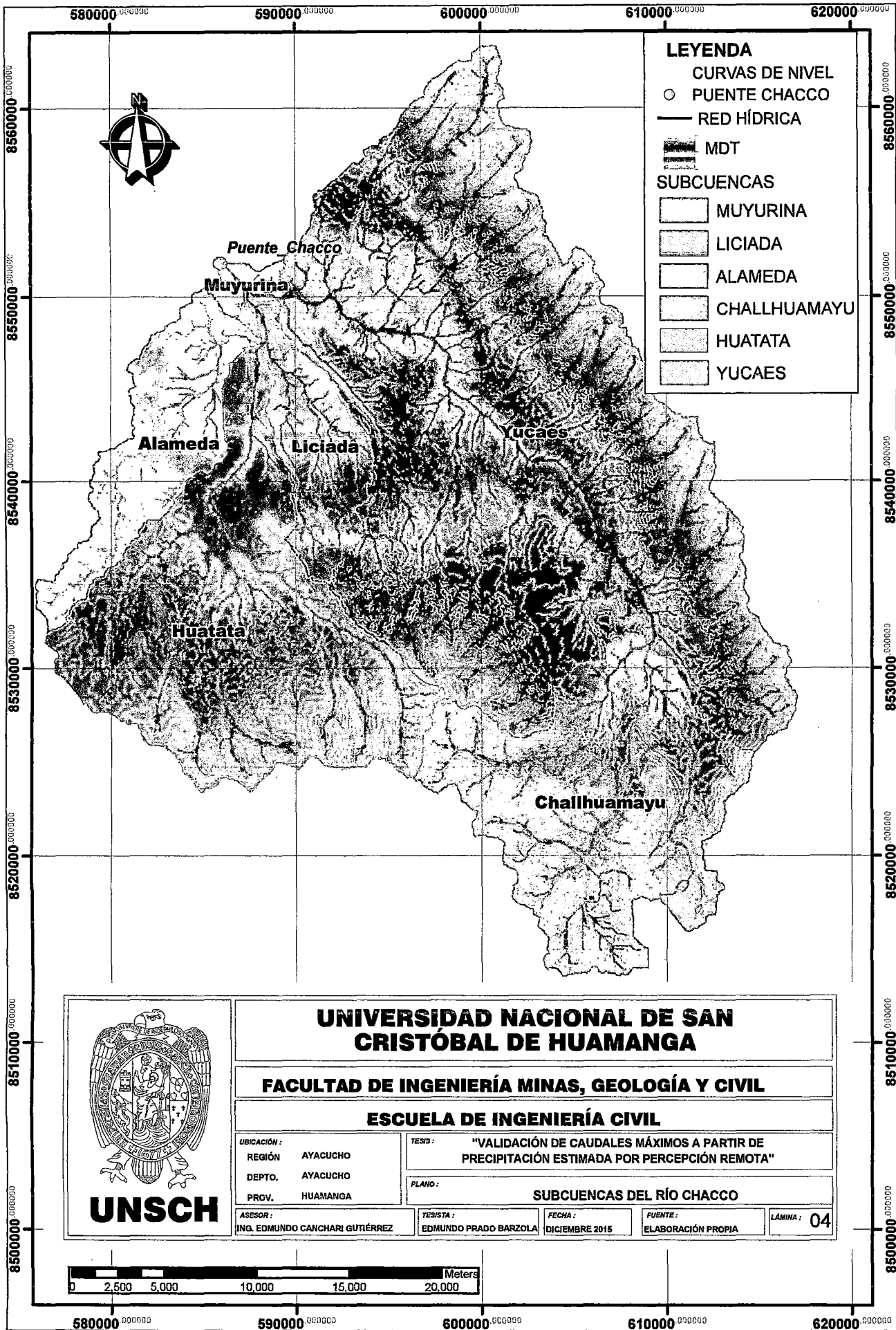
- PUNTO SALIDA
- ▭ CUENCA CHACCO
- ▭ LÍMITE CUENCAS HIDROGRÁFICAS
- ▭ CUENCA MANTARO





UNIVERSIDAD NACIONAL DE SAN CRISTÓBAL DE HUAMANGA			
FACULTAD DE INGENIERÍA MINAS, GEOLOGÍA Y CIVIL			
ESCUELA DE INGENIERÍA CIVIL			
UBICACIÓN:	REGIÓN: AYACUCHO	TESIS:	"VALIDACIÓN DE CAUDALES MÁXIMOS A PARTIR DE PRECIPITACIÓN ESTIMADA POR PERCEPCIÓN REMOTA"
DEPTO.: AYACUCHO	PROV.: HUAMANGA	PLANO:	CUENCA DEL RÍO CHACCO
ASESOR: ING. EDMUNDO CANCHARI GUTIÉRREZ	TESISTA: EDMUNDO PRADO BARZOLA	FECHA: DICIEMBRE 2015	FUENTE: ELABORACIÓN PROPIA
			LÁMINA: 03





LEYENDA

- CURVAS DE NIVEL
- PUENTE CHACCO
- RED HÍDRICA
- MDT
- SUBCUENCAS
- MUYURINA
- LICIADA
- ALAMEDA
- CHALLHUAMAYU
- HUATATA
- YUCAES

UNIVERSIDAD NACIONAL DE SAN CRISTÓBAL DE HUAMANGA

FACULTAD DE INGENIERÍA MINAS, GEOLOGÍA Y CIVIL

ESCUELA DE INGENIERÍA CIVIL

UBICACIÓN:
 REGIÓN AYACUCHO
 DEPTO. AYACUCHO
 PROV. HUAMANGA

TESIS: "VALIDACIÓN DE CAUDALES MÁXIMOS A PARTIR DE PRECIPITACIÓN ESTIMADA POR PERCEPCIÓN REMOTA"

PLANO: SUBCUENCAS DEL RÍO CHACCO

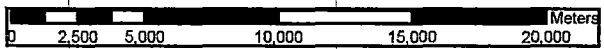
ASESOR: ING. EDMUNDO CANCHARI GUTIÉRREZ

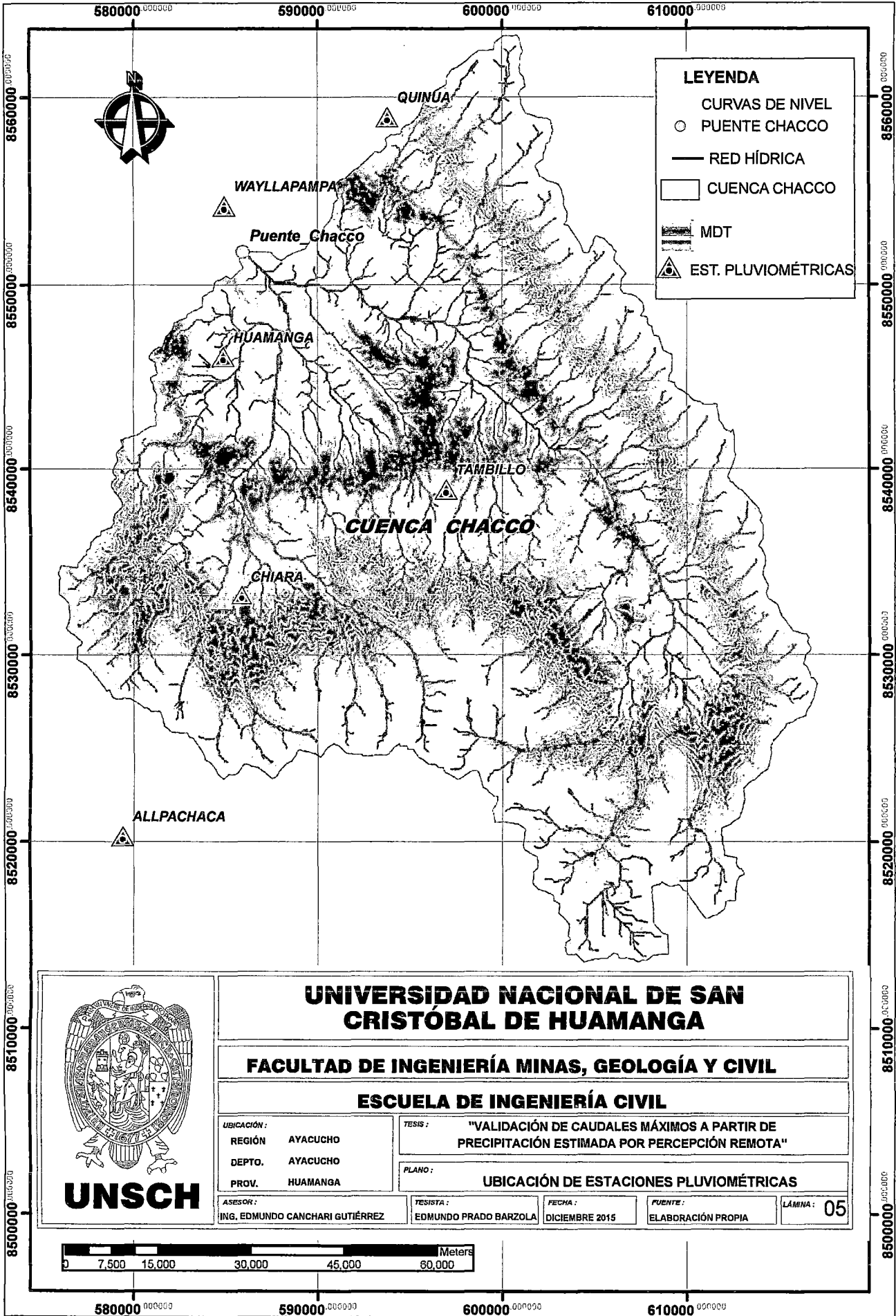
TESISTA: EDMUNDO PRADO BARZOLA

FECHA: DICIEMBRE 2015

FUENTE: ELABORACIÓN PROPIA

LÁMINA: 04





UNSCH

UNIVERSIDAD NACIONAL DE SAN CRISTÓBAL DE HUAMANGA

FACULTAD DE INGENIERÍA MINAS, GEOLOGÍA Y CIVIL

ESCUELA DE INGENIERÍA CIVIL

UBICACIÓN:
 REGIÓN AYACUCHO
 DEPTO. AYACUCHO
 PROV. HUAMANGA

TESIS: "VALIDACIÓN DE CAUDALES MÁXIMOS A PARTIR DE PRECIPITACIÓN ESTIMADA POR PERCEPCIÓN REMOTA"

PLANO: UBICACIÓN DE ESTACIONES PLUVIOMÉTRICAS

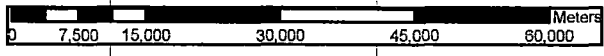
ASESOR:
 ING. EDMUNDO CANCHARI GUTIÉRREZ

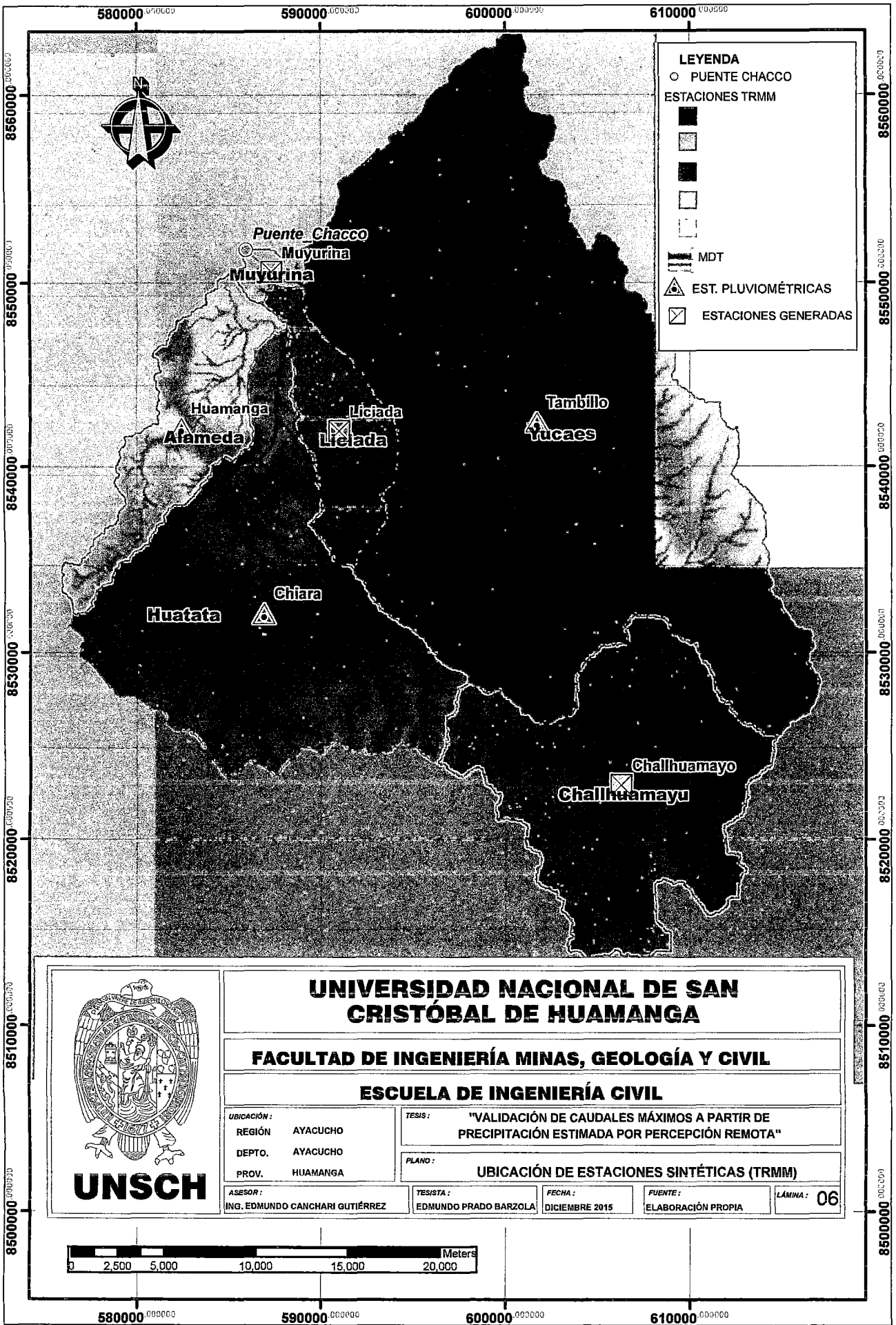
TESISTA:
 EDMUNDO PRADO BARZOLA

FECHA:
 DICIEMBRE 2015

FUENTE:
 ELABORACIÓN PROPIA

LÁMINA: 05





UNSCH

UNIVERSIDAD NACIONAL DE SAN CRISTÓBAL DE HUAMANGA

FACULTAD DE INGENIERÍA MINAS, GEOLOGÍA Y CIVIL

ESCUELA DE INGENIERÍA CIVIL

UBICACIÓN:
 REGIÓN: AYACUCHO
 DEPTO. AYACUCHO
 PROV. HUAMANGA

TESIS: "VALIDACIÓN DE CAUDALES MÁXIMOS A PARTIR DE PRECIPITACIÓN ESTIMADA POR PERCEPCIÓN REMOTA"

PLANO: UBICACIÓN DE ESTACIONES SINTÉTICAS (TRMM)

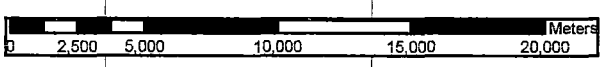
ASESOR: ING. EDMUNDO CANCHARI GUTIÉRREZ

TESISTA: EDMUNDO PRADO BARZOLA

FECHA: DICIEMBRE 2015

FUENTE: ELABORACIÓN PROPIA

LÁMINA: 06

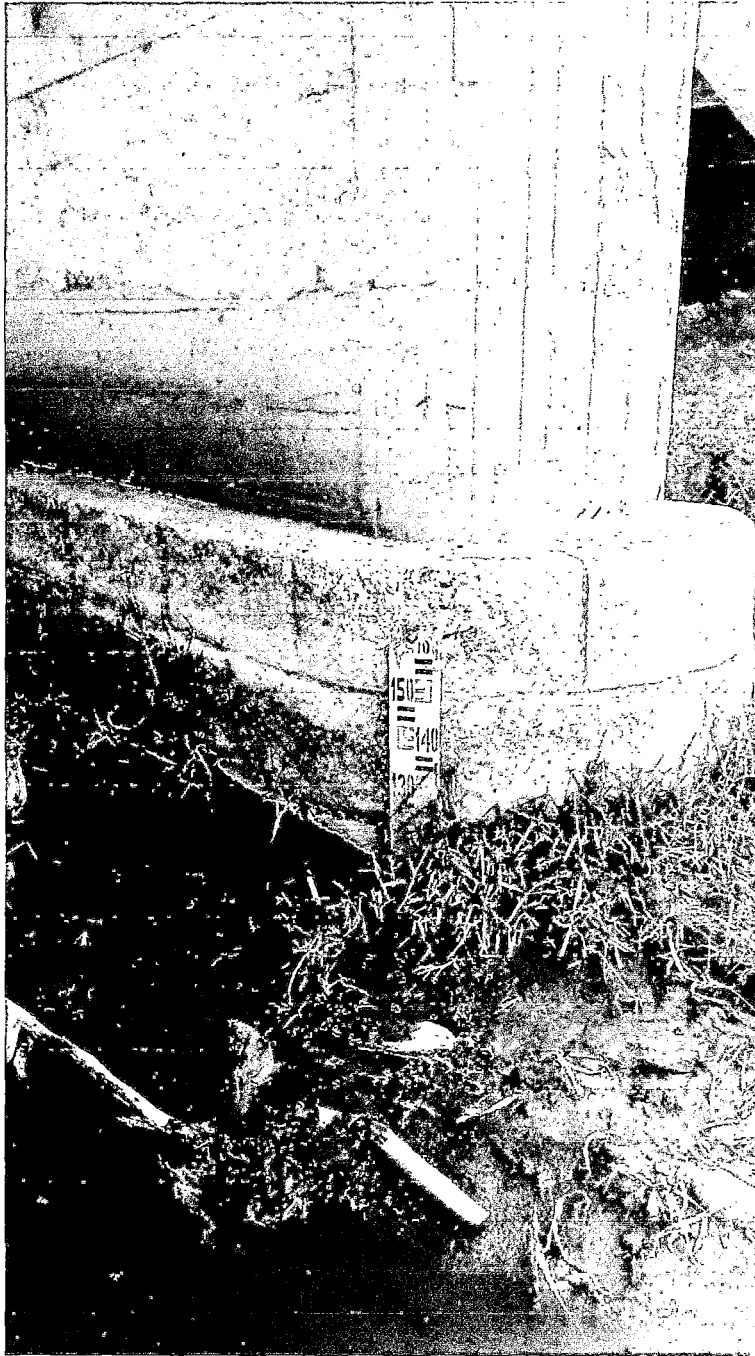


Anexo D

Fotografías

Sección de fotografías de los trabajos realizados en el campo (Puente Chacco), con fecha de 24/10/2015.

Figura D.1: Estación hidrométrica del Puente Chacco



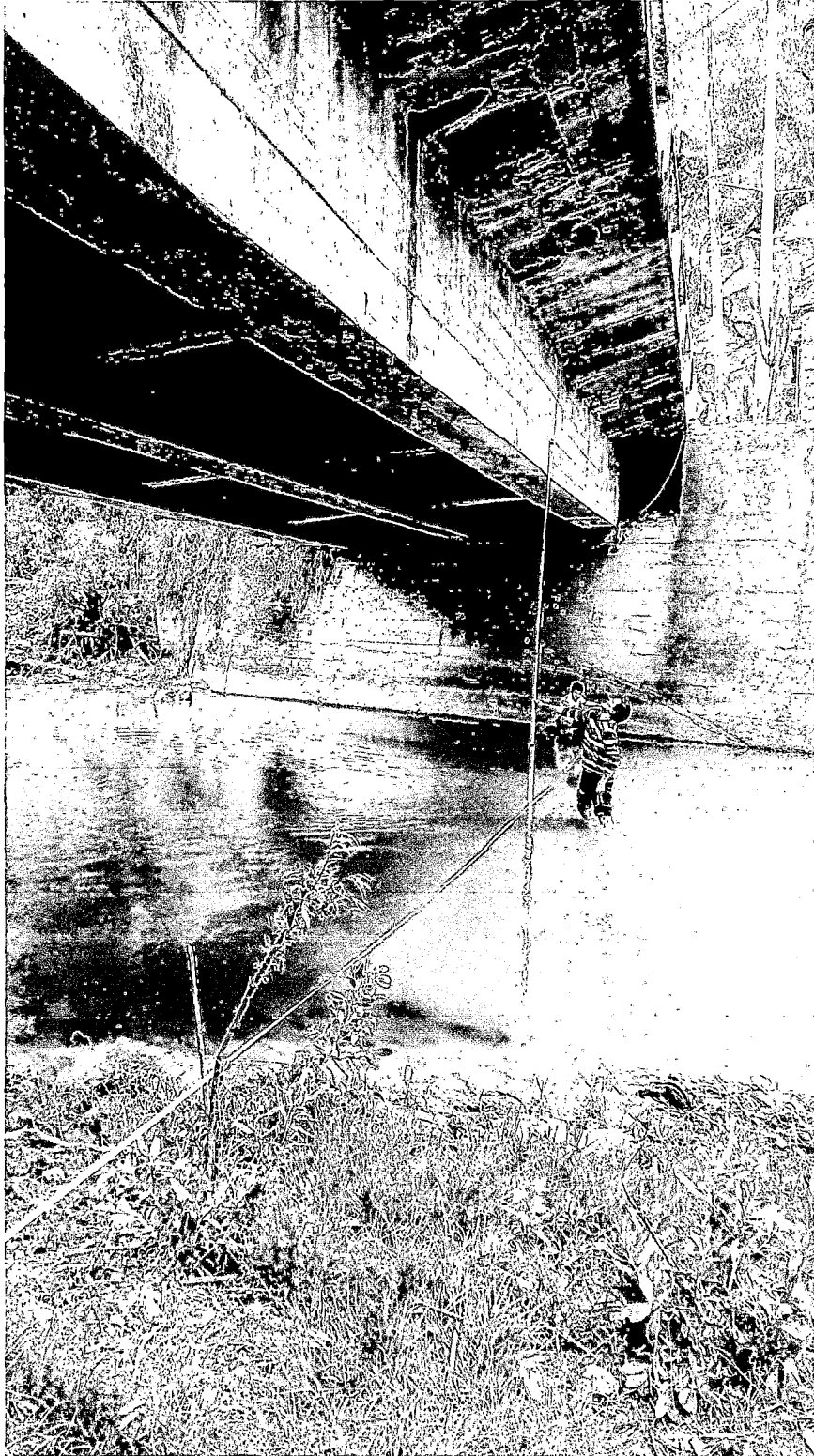
Fuente: Elaboración propia

Figura D.2: Sección del puente en condiciones actuales



Fuente: Elaboración propia

Figura D.3: Batimetría de la sección del Puente Chacco



Fuente: Elaboración propia

Figura D.4: Cálculo de la velocidad del río con molinete



Fuente: Elaboración propia

Figura D.5: Determinando pendiente del cause



Fuente: Elaboración propia

Figura D.6: Al final del trabajo, una experiencia única, con los grandes maestros de mi alma mater UNSCH



Fuente: Elaboración propia