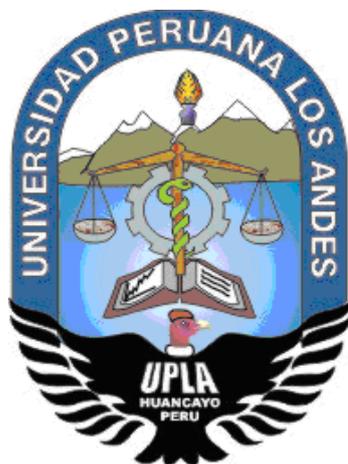


UNIVERSIDAD PERUANA LOS ANDES
FACULTAD DE INGENIERÍA
ESCUELA PROFESIONAL DE INGENIERÍA CIVIL



TESIS

APLICACIÓN DE LOS MODELOS HIDROLÓGICOS PARA ESTIMAR EL CAUDAL PROMEDIO MENSUAL EN LA SUBCUENCA DEL RÍO SHULLCAS

Línea de investigación de la Universidad:

Salud y gestión de salud

Línea de investigación de la escuela Profesional de Ingeniería Civil:

Hidráulica medio ambiente

PRESENTADO POR:

Bach. PERCY DANIEL QUINTANA YUPANQUI

PARA OPTAR EL TÍTULO PROFESIONAL DE

INGENIERO CIVIL

Huancayo – Perú

2018

Asesores

Ing. Vladimir Ordóñez Camposano

Mg. Jacqueline Jeanette Santos Julca

Dedicatoria

- A nuestro Padre Celestial por las bendiciones que tengo en mi vida, por su guía en mi camino, por tener la dicha, por su gran amor, por la felicidad y paz que encuentro en Él.
- A mis queridos padres por su gran apoyo y su inmenso amor incondicional que siempre me brindaron, siendo ellos los mejores ejemplos a seguir.
- A mis hermanos por su apoyo incondicional, por el aprecio que me tienen y por ser mi ejemplo.

Percy Daniel Quintana Yupanqui.

Agradecimiento

- A la Universidad Peruana Los Andes, por su contribución para la elaboración de la presente investigación.
- A mis asesores, por impartir conocimientos y sabios consejos para el direccionamiento de esta investigación.
- A mis amigos, que colaboraron en la recolección de información en campo.

Percy Daniel Quintana Yupanqui.

HOJA DE CONFORMIDAD DE MIEMBROS DEL JURADO

Dr. Casio Aurelio Torres López.
Presidente

Ing. Julio Fredy Porras Mayta
Jurado revisor

Ing. Juan José Bullón Rosas
Jurado revisor

Ing. María Luisa Mueras Gutiérrez
Jurado revisor

Mg. Miguel Ángel Carlos Canales.
Secretario docente

ÍNDICE

ÍNDICE DE TABLAS	x
ÍNDICE DE FIGURAS	xii
ÍNDICE DE FOTOGRAFÍAS	xiv
RESUMEN	xv
ABSTRACT	xvi
INTRODUCCIÓN	xvii
CAPÍTULO I	18
EL PROBLEMA DE INVESTIGACIÓN	18
1.1. Planteamiento del problema	18
1.2. Formulación y sistematización del problema	19
1.2.1. Problema general	19
1.2.2. Problemas específicos	19
1.3. Justificación	20
1.3.1. Práctica o social	20
1.3.2. Metodológica	20
1.4. Delimitaciones	20
1.4.1. Espacial	20
1.4.2. Temporal	20
1.4.3. Económica	20
1.5. Limitaciones	21
1.5.1. Metodológica	21
1.5.2. Económica	21
1.6. Objetivos	21
1.6.1. Objetivo general	21
1.6.2. Objetivos específicos	21
CAPÍTULO II	22
MARCO TEÓRICO	22
2.1. Antecedentes	22
2.1.1. Antecedentes nacionales	22
2.1.2. Antecedentes internacionales	24
2.2. Marco conceptual	25
	vi

2.2.1. Ciclo hidrológico	25
2.2.2. Parámetros geomorfológicos de la subcuenca	28
2.2.3. Modelos hidrológicos	32
2.2.4. Clasificación de los modelos hidrológicos	33
2.2.5. Modelo hidrológico Lutz Scholz	37
2.2.6. Modelo hidrológico Thomas	51
2.2.7. Análisis de bondad de ajuste	59
2.3. Definición de términos	61
2.4. Bases legales	62
2.5. Hipótesis	63
2.5.1. Hipótesis general	63
2.5.2. Hipótesis específicas	63
2.6. Variables	63
2.6.1. Definición conceptual de la variable	63
2.6.2. Definición operacional de la variable	64
2.6.3. Operacionalización de la variable	65
CAPITULO III	66
METODOLOGÍA	66
3.1. Método investigación	66
3.2. Tipo de investigación	66
3.3. Nivel de investigación	67
3.4. Diseño de investigación	67
3.5. Población y muestra	67
3.5.1. Población	67
3.5.2. Muestra	67
3.6. Técnicas e instrumentos de recolección de datos	68
3.6.1. Observación directa	68
3.6.2. Análisis de documentos	68
3.7. Procesamiento de la información	68
3.7.1. Pre campo	68
3.7.2. Campo	69
3.7.3. Gabinete	69

3.7.4. Elaboración de informe	70
3.8. Técnicas y análisis de datos	70
3.9. Procedimiento de la investigación	70
3.9.1. Ubicación geográfica y política de la subcuenca del río Shullcas	70
3.9.2. Punto de aforo	71
3.9.3. Obtención de registros	73
3.9.4. Parámetros geomorfológicos de la subcuenca	75
3.9.5. Caudales promedio mensuales por el modelo Lutz Scholz	75
3.9.6. Caudales promedio mensuales por el modelo Thomas	76
3.9.7. Coeficiente de Nash y Bias	76
CAPÍTULO IV	77
RESULTADOS	77
4.1. Caudal promedio mensual en la subcuenca aplicando el modelo hidrológico de Lutz Scholz en la subcuenca del río Shullcas	77
4.1.1. Parámetros geomorfológicos de la cuenca	77
4.1.2. Hidrografía	78
4.1.3. Precipitación promedio mensual de la subcuenca	79
4.1.4. Temperatura media mensual de la subcuenca	80
4.1.5. Evapotranspiración	81
4.1.6. Coeficiente de escurrimiento	81
4.1.7. Precipitación efectiva	82
4.1.8. Retención de la cuenca	84
4.1.9. Coeficiente de agotamiento	85
4.1.10. Relación de caudales	85
4.1.11. Gasto de la retención	85
4.1.12. Abastecimiento de la retención	86
4.1.13. Caudal promedio mensual por el modelo Lutz Sholz.	87
4.2. Caudal promedio mensual en la subcuenca aplicando el modelo hidrológico de Thomas en la subcuenca del río Shullcas	89
4.2.1. Característica geomorfológica de la sub cuenca	89
4.2.2. Precipitación, evapotranspiración y caudal histórico	90
4.2.3. Parámetros del modelo hidrológico Thomas	90

4.2.4. Aguas disponibles, variable (Yt) y contenido de humedad del suelo	91
4.2.5. Escorrentía directa	92
4.2.6. Caudal subterráneo	92
4.2.7. Caudal promedio mensual por el modelo Thomas.	94
4.3. Coeficiente de Nash y Bias para el modelo hidrológico Lutz Scholz y Thomas	96
4.3.1. Coeficiente de Nash y Bias para el modelo Lutz Scholz	96
4.3.2. Coeficiente de Nash y Bias para el modelo Thomas	98
4.3.3. Caudales obtenidos por el modelo Lutz Scholz y Thomas.	99
CAPÍTULO V	100
DISCUSIÓN DE RESULTADOS	100
5.1. Caudal promedio mensual en la subcuenca aplicando el modelo hidrológico de Lutz Scholz en la subcuenca del río Shullcas	100
5.2. Caudal promedio mensual en la subcuenca aplicando el modelo hidrológico de Thomas en la subcuenca del río Shullcas	102
5.3. Coeficiente de Nash y Bias para el modelo hidrológico Lutz Scholz y Thomas	103
CONCLUSIONES	105
RECOMENDACIONES	106
REFERENCIAS BIBLIOGRÁFICAS	107
ANEXOS	110
ANEXO N° 01: MATRIZ DE CONSISTENCIA	111
ANEXO N° 02: DATOS HISTÓRICOS	113
ANEXO N° 03: FICHA DE AFORO	116
ANEXO N° 04: PANEL FOTOGRÁFICO	118
ANEXO N° 05: OTROS DOCUMENTOS	122
ANEXO N° 06: PLANOS	123

ÍNDICE DE TABLAS

Tabla 1. Límite superior para la precipitación efectiva.	42
Tabla 2. Coeficiente para la estimación de la precipitación efectiva.	42
Tabla 3. Precipitación efectiva según el Bureo of Reclamation.	42
Tabla 4. Coeficiente de precipitación efectiva según el Bureo of Reclamation.	43
Tabla 5. Almacenamiento hídrico durante la época de lluvias (valores en %).	49
Tabla 6. Rangos de búsqueda y precisión para cada uno de los parámetros.	58
Tabla 7. Rangos referenciales del Criterio de Nash.	60
Tabla 8. Operacionalización de las variables: Modelos hidrológicos y caudal promedio mensual.	65
Tabla 9. Coordenadas geográficas del punto de aforo.	71
Tabla 10. Coordenadas geográficas de la estación meteorológica Shullcas.	74
Tabla 11. Parámetros geomorfológicos de la subcuenca.	77
Tabla 12. Red de drenaje de la subcuenca Shullcas.	78
Tabla 13. Lagunas de subcuenca.	78
Tabla 14. Precipitación total mensual (mm/mes) - periodo 1997-2011.	79
Tabla 15. Temperatura media mensual (°C).	80
Tabla 16. Evapotranspiración promedio mensual.	81
Tabla 17. Coeficiente de escurrimiento por el método Turc.	81
Tabla 18. Coeficiente de escurrimiento por el método Misión Alemana.	82
Tabla 19. Precipitación efectiva según el Bureo of Reclamation.	82
Tabla 20. Coeficientes de regresión para las curvas de precipitación efectiva.	83
Tabla 21. Resultados de la precipitación efectiva.	84
Tabla 22. Resultados del gasto de retención.	85

Tabla 23. Resultados del abastecimiento de la retención.	86
Tabla 24. Resultados de caudales promedios mensuales por el modelo Lutz Scholz.	87
Tabla 25. Caudales observados y generados por el modelo Lutz Scholz.	88
Tabla 26. Características geomorfológicas generales de la subcuenca.	89
Tabla 27. Datos de entrada, precipitación, evapotranspiración y caudales históricos.	90
Tabla 28. Parámetros y condiciones iniciales del modelo hidrológico Thomas.	91
Tabla 29. Resultado de aguas disponibles, variable Yt y contenido de humedad del suelo.	91
Tabla 30. Resultado de la escorrentía directa.	92
Tabla 31. Resultado del caudal subterráneo.	92
Tabla 32. Resultados de caudales promedios mensuales por el modelo Thomas.	94
Tabla 33. Caudales observados y generados por el modelo Thomas.	95
Tabla 34. Caudales aforados en el río Shullcas.	96
Tabla 35. Caudales observados, caudales generados por el modelo Lutz Scholz y aforados.	97
Tabla 36. Coeficientes de eficiencia del modelo Lutz Scholz.	97
Tabla 37. Caudales observados, caudales generados por el modelo Thomas y aforados.	98
Tabla 38. Resultados de los coeficientes de eficiencia del modelo Thomas.	98
Tabla 39. Caudales observados y generados por el modelo Lutz Scholz y Thomas.	99

ÍNDICE DE FIGURAS

Figura 1. El ciclo hidrológico pictóricamente.	27
Figura 2. El ciclo hidrológico esquemáticamente.	27
Figura 3. Clasificación de los modelos hidrológico.	34
Figura 4. Modelo hidrológico Thomas.	52
Figura 5. Componentes del modelo Thomas forma directa.	55
Figura 6. Componentes del modelo Thomas forma inverso.	56
Figura 7. Etapas para el procedimiento de la herramienta “solver”.	57
Figura 8. Ubicación política de la subcuenca del río Shullcas.	71
Figura 9. Punto de aforo de caudales del río Shullcas (imagen satelital).	72
Figura 10. Punto de aforo de caudales y red hidrográfica de la sub cuenca Shullcas.	72
Figura 11. Ubicación de la estación meteorológica e hidrológica Shullcas.	74
Figura 12. Precipitación promedio total mensual (mm/mes) - periodo 1997-2011.	80
Figura 13. Histograma de temperatura promedio mensual (°C).	80
Figura 14. Ecuación polinómica de la precipitación efectiva.	83
Figura 15. Histograma de caudales promedios mensuales por el modelo Lutz Scholz.	88
Figura 16. Histograma de caudales promedios mensuales observados y generados.	89
Figura 17. Histograma de caudales obtenidos por el modelo Thomas.	95

Figura 18. Histograma de caudales promedios mensuales observados y generados. 96

Figura 19. Histograma de caudales promedios mensuales por el modelo Lutz Scholz y Thomas. 99

ÍNDICE DE FOTOGRAFÍAS

Fotografía 1. Punto de aforo de caudales del río Shullcas.	73
Fotografía 2. Estación hidrológica Shullcas.	75
Fotografía 3. Georreferenciando el punto de aforo.	119
Fotografía 4. Nivelación y seccionamiento de río, en el punto de aforo.	119
Fotografía 5. Tomando medidas de la sección del río.	120
Fotografía 6. Realizando las mediciones cada 0.50m de la sección del río.	120
Fotografía 7. Tomando alturas de mira cada 0.50 m de la sección del río.	121
Fotografía 8. Tomando pendientes del cauce medio del río aguas arriba y aguas abajo.	121

RESUMEN

Esta investigación respondió al problema general: ¿Cuál es el resultado de la aplicación de los modelos hidrológicos para estimar el caudal promedio mensual en la subcuenca del río Shullcas?, el objetivo general fue evaluar el resultado de la aplicación de los modelos hidrológicos para estimar el caudal promedio mensual en la subcuenca del río Shullcas y la hipótesis que se contrastó fue: El resultado de la aplicación de los modelos hidrológicos permitirá estimar óptimamente el caudal promedio mensual en la subcuenca del río Shullcas.

La investigación utilizó el método científico, el tipo de investigación fue aplicada, el nivel de investigación fue descriptivo - correlacional y el diseño fue no experimental; la población correspondió a la subcuenca del río Shullcas y la muestra de acuerdo al tipo no probabilístico intencional fue un tramo de aforo del río (Toma 24 de SEDAM Hyo).

Se llegó a la conclusión, que la aplicación de los modelos hidrológicos permitió estimar el caudal promedio mensual en la subcuenca del río Shullcas; resultando de acuerdo al modelo hidrológico Lutz Scholz de 2.87 m³/s, mientras que para el modelo Thomas de 3.88 m³/s; siendo el más óptimo con coeficientes de eficiencia de Nash y Bias, el modelo hidrológico Thomas.

Palabras claves: Modelo hidrológico, caudal medio mensual y cuenca hidrográfica.

ABSTRACT

This investigation responded to the general problem: What is the result of the application of hydrological models to estimate the average monthly flow in the sub-basin of the Shullcas River? The general objective was to evaluate the result of the application of hydrological models to estimate the average monthly flow in the sub-basin of the Shullcas river and the hypothesis that was contrasted was: The result of the application of the hydrological models will allow to optimally estimate the average monthly flow in the sub-basin of the Shullcas river.

The research used the scientific method, the type of research was applied, the level of research was descriptive - correlational and the design was not experimental; the population corresponded to the sub-basin of the Shullcas River and the sample according to the intentional non-probabilistic type was a stretch of river gauging (Toma 24 de SEDAM Hyo).

It was concluded that the application of hydrological models allowed estimating the average monthly flow in the sub-basin of the Shullcas river; resulting according to the Lutz Scholz hydrological model of 2.87 m³/s, while for the Thomas model of 3.88 m³/s; being the most optimal with efficiency coefficients of Nash and Bias, the hydrological model Thomas.

Keywords: Hydrological model, average monthly flow and hydrographic basin.

INTRODUCCIÓN

La tesis titulada “Aplicación de los modelos hidrológicos para estimar el caudal promedio mensual en la subcuenca del río Shullcas”, tiene como objetivo general de evaluar el resultado de la aplicación de los modelos hidrológicos para estimar el caudal promedio mensual en la subcuenca del río Shullcas, para lo cual se desarrolló el estudio en la subcuenca del río Shullcas, aplicando los modelos hidrológicos Lutz Scholz y Thomas para determinar caudales medios mensuales, las cuales fueron validado con caudales aforados. Para esto se ha considerado los siguientes capítulos:

El Capítulo I, trata acerca del problema de investigación, el planteamiento del problema, la formulación y sistematización del problema, la delimitación de la investigación, la justificación, las limitaciones y los objetivos.

El Capítulo II, trata sobre el marco teórico, los antecedentes de la investigación, el marco conceptual, la definición de términos, las hipótesis y variables.

El Capítulo III: Muestra la metodología de la investigación, para la cual se explica el método, tipo de investigación, nivel de investigación, diseño de investigación, población y muestra, técnicas e instrumentos de recolección de información, el procesamiento de la información y las técnicas, análisis de datos y procedimiento de la investigación.

El Capítulo IV: Trata sobre los resultados obtenidos según a los objetivos.

El Capítulo V: Explica la discusión de resultados obtenidos.

Culminando esta investigación se encuentran las conclusiones, recomendaciones, referencias bibliográficas y anexos.

Bach. Percy Daniel Quintana Yupanqui.

CAPÍTULO I

EL PROBLEMA DE INVESTIGACIÓN

1.1. Planteamiento del problema

El cuarenta por ciento de las áreas de las cuencas hidrográficas del mundo señalan algún tipo de deterioro, esto conlleva al peligro de la calidad y la seguridad del agua en nuestro planeta, tal como lo refiere (The Nature Conservancy, 2017). El agua atraviesa una crisis severa en todo el mundo, la cual está lejos de ser solucionada, el problema fundamental es que la cantidad disponible se encuentra constante, mientras que la población aumenta cada año, por efecto del crecimiento poblacional, se predice que para el año 2030 muchas regiones hidrológicas de gran extensión y de mucha importancia atraviesan efectos de disponibilidad extremadamente baja (Poliopro y Martínez-Austria, 2012). Motivos suficientes para realizar el estudio referente a la disponibilidad del recurso hídrico para su respectiva gestión.

En las regiones de nuestro país, las cuencas altas andinas no presentan una apropiada caracterización acerca de la hidroclimatología de un territorio de tan

compleja diversidad microclimática. Desde el enfoque hidrológico cuando una cuenca no cuenta de estaciones de aforo de caudales se utiliza diversos métodos y modelos para estimarlas a partir de factores geográficos y meteorológicos, las cuales permiten generar los caudales a nivel mensual y anual (Quispe, 2013).

En la región Junín, se presenta la misma problemática en cuanto al desconocimiento de cuánto recurso hídrico se tiene y la escasa información hidrometeorológica, que permiten realizar proyectos de ingeniería hidráulica, tal es el caso de la subcuenca del río Shullcas; situación por la cual ante esta problemática se pretende realizar la aplicación de los modelos hidrológicos Lutz Scholz y Thomas para la estimación de caudales medios mensuales.

1.2. Formulación y sistematización del problema

1.2.1. Problema general

¿Cuál es el resultado de la aplicación de los modelos hidrológicos para estimar el caudal promedio mensual en la subcuenca del río Shullcas?

1.2.2. Problemas específicos

- a) ¿Cuánto es el caudal promedio mensual aplicando el modelo hidrológico de Lutz Scholz en la subcuenca del río Shullcas?
- b) ¿Cuál es el valor del caudal promedio mensual aplicando el modelo hidrológico de Thomas en la subcuenca del río Shullcas?
- c) ¿Cuál es el coeficiente de eficiencia de Nash y Biass para el modelo hidrológico Lutz Scholz y Thomas?

1.3. Justificación

1.3.1. Práctica o social

La investigación contribuirá a resolver un problema real, el cual es el desconocimiento de la cantidad de recurso hídrico en la subcuenca del río Shullcas.

1.3.2. Metodológica

Con esta investigación se pretende proponer estrategias para generar conocimientos, tal es la utilización de los modelos hidrológicos Lutz Scholz y Thomas.

1.4. Delimitaciones

1.4.1. Espacial

La presente investigación se desarrolló en el río Shullcas, la misma que comprende a los anexos de Acopalca, Chamisería, Vilcacoto, Cullpa Alta, Cullpa Baja, Cochas Chico, Cochas Grande e Incho Aza, del distrito de El Tambo y Huancayo, provincia de Huancayo, región Junín.

1.4.2. Temporal

La presente investigación se realizó en el año 2018, específicamente entre los meses de junio a noviembre.

1.4.3. Económica

Para el desarrollo de la presente tesis el investigador asumió todos los gastos que esto involucró.

1.5. Limitaciones

1.5.1. Metodológica

- La falta de instrumentos como hidrómetro que miden los caudales en el río Shullcas con mayor precisión.
- Restringido acceso para aforar en distintos puntos de la subcuenca.
- Falta de información hidrométrica como caudales históricos de la subcuenca del río Shullcas.
- Escasa información meteorológica como temperaturas mínimas, medias y máximas históricas de la estación Shullcas.

1.5.2. Económica

- Por falta de recursos económicos no se realizaron los levantamientos topográficos de los tributarios de río Shullcas.

1.6. Objetivos

1.6.1. Objetivo general

Evaluar el resultado de la aplicación de los modelos hidrológicos para estimar el caudal promedio mensual en la subcuenca del río Shullcas

1.6.2. Objetivos específicos

- a) Calcular el caudal promedio mensual aplicando el modelo hidrológico de Lutz Scholz en la subcuenca del río Shullcas
- b) Estimar el valor del caudal promedio mensual aplicando el modelo hidrológico de Thomas en la subcuenca del río Shullcas
- c) Determinar el coeficiente de eficiencia de Nash y Biass para el modelo hidrológico Lutz Scholz y Thomas

CAPÍTULO II

MARCO TEÓRICO

2.1. Antecedentes

2.1.1. Antecedentes nacionales

Cruz y Romero (2017) en la investigación titulada : “Análisis comparativo de los modelos lluvia-escorrentía: Gr2m, Temez y Lutz-scholz aplicados en la subcuenca del río Callazas”, para obtener el grado de título profesional de ingeniero civil en la Universidad Peruana de Ciencias Aplicadas; estableció como objetivo determinar cuál de estos tres modelos: Gr2m, Temez y Lutz-Scholz tiene mejor comportamiento del proceso lluvia-escorrentía en la cuenca del río Callazas; y llegaron a las siguientes conclusiones: Que calibraron el modelo Gr2m con los parámetros óptimos, alcanzando un coeficiente de eficiencia de Nash de 0.851; además en la etapa de comprobación obtuvieron un valor de 0.723. Según los rangos recomendados en los criterios de evaluación, resultaron que este modelo tiene un ajuste “Muy Bueno”. Los coeficientes de eficiencia de Nash del modelo Lutz Scholz en cuanto a la

calibración y validación obtuvieron el valor de 0.776 y 0.563 respectivamente. Según los rangos recomendados en los criterios de evaluación, resultaron que este modelo tiene un ajuste “Muy Bueno”. Los coeficientes de eficiencia de Nash del modelo Témez en cuanto a la calibración y validación adquirieron los datos de 0.565 y 0.470 respectivamente. Según los rangos recomendados en los criterios de evaluación, resultaron que este modelo tiene un ajuste “Bueno”.

Mamani (2015) en la investigación: “Generación de descargas medias mensuales de la cuenca del río Coata mediante el método determinístico - estocástico Lutz Scholz”; para lograr el grado de título de ingeniero agrícola de la Universidad Nacional del Altiplano; consideró como objetivo el evaluar caudales medios mensuales mediante la precipitación total mensual para la cuenca del río Coata, con el modelo matemático escorrentía Lutz Scholz con propósito de planeamiento hídrico; por lo tanto llegó a la siguiente conclusión: Que con la presente investigación se puede comprobar que es factible determinar los caudales medios mensuales mediante la precipitación medio mensual aplicando modelos determinísticos estocásticos.

Saucedo (2014) en la investigación titulada: “Modelación hidrológica precipitación - escorrentía usando el modelo de Thomas y algoritmos genéticos en la subcuenca del río Quilvire - Tacna”; para obtener el grado de título profesional de ingeniero Geólogo - Geotécnico de la Universidad Nacional Jorge Basadre Grohmann - Tacna; consideró como objetivo emplear los algoritmos genéticos para calibrar el modelo hidrológico precipitación – escorrentía de Thomas por lo que, llegó a la siguiente conclusión: Que los algoritmos genéticos tienen características que los hacen eficazmente robustos

para resolver problemas de optimización, toma de decisiones, diseño y otros usos en la ingeniería, menciona también que al aplicar los algoritmos genéticos y calibrar la ecuación se obtiene como resultados datos muy semejantes a la realidad.

2.1.2. Antecedentes internacionales

Ruiz (2016) en la investigación titulada: “Evaluación de metodologías indirectas para la estimación de caudales medios mensuales en el lugar del piedemonte del departamento del Casanare”; para optar el título de Magister en Ingeniería – Recursos Hidráulicos de la Universidad Nacional de Colombia; estableció el siguiente objetivo determinar el grado de error en la aplicación de metodologías indirectas para la evaluación de caudales en el Piedemonte del Casanare; siendo así que llegó a la siguiente conclusión, que realizaron el diagnóstico de las estaciones hidroclimatológicas disponibles, seleccionaron 15 cuencas, en ellas se emplearon las metodologías indirectas para estimar caudales, resultando la metodología de trasposición de caudales sin ajuste y la ecuación de Johnson & Cross, con el alto dato de resultados favorables.

Lamprea (2011) en la investigación titulada: “Estudio Comparativo de modelos multiparamétricos de balance hídrico a nivel mensual en cuencas hidrográficas” de la Pontificia Universidad Javeriana; estableciéndose como objetivo: Determinar el ajuste y la sensibilidad de los parámetros, de seis modelos multiparamétricos de balance hídrico a grado mensual en cuencas seleccionadas de las regiones de Cundinamarca y el Valle del Cauca y llegó a la siguiente conclusión que en base en los resultados obtenidos comprobó que

el estudio de la interdependencia paramétrica juega un papel de mucha importancia en la modelación hidrológica.

Barría (2010) en la investigación: “Pronóstico de caudales medios mensuales en las cuencas de los ríos Baker y Pascua”, para optar el título de ingeniero civil de la universidad de Chile; estableció como objetivo: Proponer y comprobar una metodología óptima para la distribución del volumen mensuales totales de deshielo y obtener mediante esta forma caudales medios mensuales. En esta parte pretende desarrollar la metodología que conlleva a la distribución de volúmenes que minimicen la dispersión en los valores mensuales que se predicen; y llegó a la siguiente conclusión, que los modelos mejor evaluados y recomendados para la cuenca, son los basados en las expresiones de la red neuronal, con ello se logra mejorar el desempeño alcanzando un valor del coeficiente de correlación de 0.97.

2.2. Marco conceptual

2.2.1. Ciclo hidrológico

Se define al ciclo hidrológico como la secuencia de fenómenos por las cuales el agua pasa de la superficie terrestre, en la fase de vapor, a la atmósfera y retorna en sus fases líquida y sólida. La evapotranspiración directa es el traslado de agua desde la superficie terrestre hacia la atmósfera, en forma de vapor de agua, y la transpiración es causada por los animales y plantas y por sublimación (paso directo del agua sólida a vapor de agua). En el ciclo hidrológico, la mayor cantidad de agua que son movidas por el fenómeno de sublimación es poco, comparado con la cantidad de agua movidas por el

proceso de evaporación y transpiración las cuales conjuntamente se denomina evapotranspiración. El vapor de agua se condensa cuando es trasladado por la circulación atmosférica después de haber recorrido distancias que pueden sobrepasar los 1000 km. El agua condensada causa la formación de nubes y niebla y después, a precipitación. La precipitación puede ocurrir en la fase sólida (nieve o granizo) o en la fase líquida (lluvia). El agua que se precipita en la tierra puede tener varios destinos. Una porción regresa directamente a la atmósfera por evaporación; otra porción escurre por la superficie terrestre, escorrentía superficial, que se reúnen en surcos y que origina las líneas de agua. El agua restante se infiltra introduciéndose en el interior del suelo; esta agua infiltrada puede retornar a la atmósfera por evapotranspiración o profundizarse hasta alcanzar las capas freáticas. El escurrimiento superficial y subterráneo alimentan los cauces de agua que desembocan en lagos y océanos. La escorrentía superficial se da siempre que hay precipitación y culmina poco después de haber terminado la precipitación. Por otra parte, el escurrimiento subterráneo, fundamentalmente cuando sucede mediante medios porosos, se produce con mayor lentitud y continua alimentando los cursos de agua mucho después de haber culminado la precipitación que le dio origen (Fattorelli y Fernández, 2011).

En la Figura 1 y la Figura 2, se muestra una representación simplificada de los procesos del sistema hidrológico en forma general.

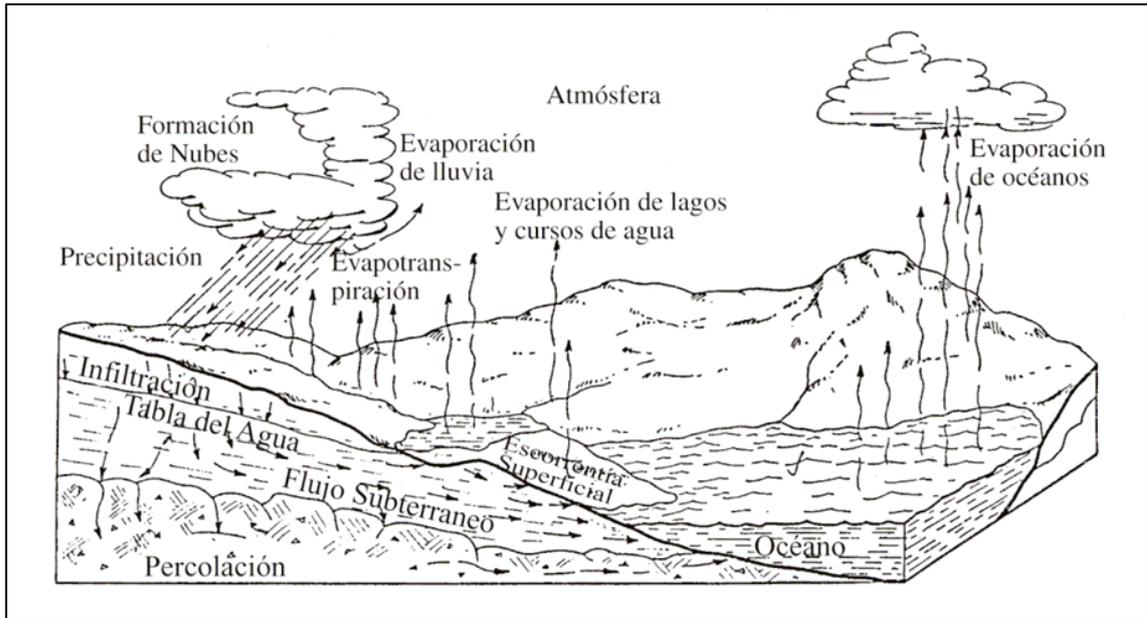


Figura 1. El ciclo hidrológico pictóricamente.

Fuente: Fattorelli y Fernández (2011).

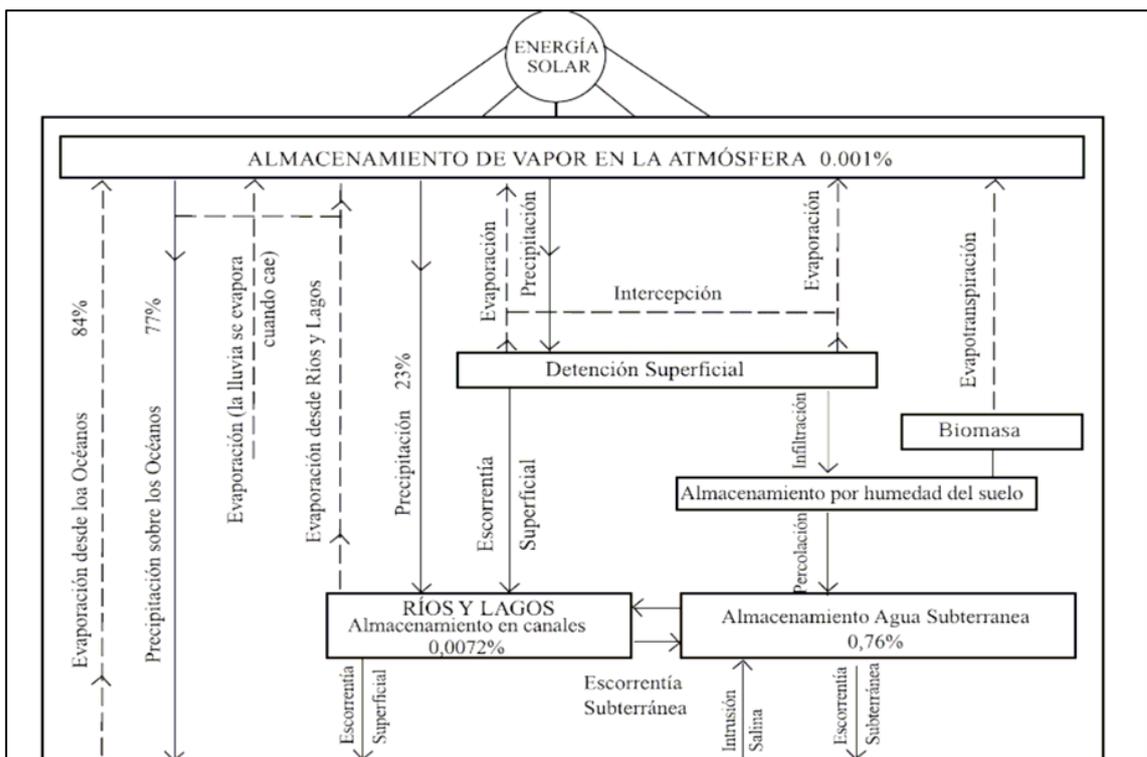


Figura 2. El ciclo hidrológico esquemáticamente.

Fuente: Fattorelli y Fernández (2011).

2.2.2. Parámetros geomorfológicos de la subcuenca

Las características físicas de las áreas de drenaje de una subcuenca están relacionadas, directa o indirectamente con la mayoría de los elementos de un régimen fluvial. Estos factores físicos o geomorfológicos se expresan en forma numérica y son mencionados generalmente de manera separada, sin considerar la factible interdependencia entre ellos. La representación sistemática de la geometría de una subcuenca y de su red hidrográfica necesitan mediciones de aspectos lineales de la red de drenaje, del área de la subcuenca y del relieve, teniendo mucha incidencia la distribución de pendientes en el primero de los aspectos mencionados (ZEE, 2015).

A continuación, se describen algunos factores físicos de las cuencas:

Delimitación

Se describe como delimitación a la línea que divide las precipitaciones que caen en las cuencas o subcuencas inmediatamente vecinas (*divortium aquarum*), y que orienta la esorrentía que resulta para uno u otro sistema fluvial. La divisoria sigue una línea estricta, pasando el curso de agua solamente en el punto de salida, esta divisoria une los puntos de máxima cota entre subcuencas, lo que no dificulta que en el interior de una cuenca se encuentren picos aislados con una cota superior a cualquier punto de la divisoria (ZEE, 2015).

a) Área (A)

El cálculo del área de la subcuenca de los ríos y quebradas se realiza a partir del punto de cruce de la línea de los ductos con el cauce del río o

quebrada, y que fue objeto de una delimitación digitalizada de las subcuencas, el cual es la proyección en un plano horizontal.

b) Perímetro (P)

De la misma forma el perímetro de las cuencas y subcuencas se calculan mediante la delimitación digitalizada.

c) Pendiente de la subcuenca

Este parámetro físico es de mucha importancia en la etapa del estudio de una subcuenca, debido a que predomina en el tiempo de concentración de las aguas en un determinado punto del cauce, por ende, su determinación no es de una sencillez manifiesta, encontrando para ello una serie de criterios debido a que dentro de una subcuenca existen innumerables pendientes (ZEE, 2015).

d) Longitud del cauce principal (Lcp)

Se define como la distancia entre los extremos inicial y final del cauce principal de mayor longitud, por la cual, las aguas en la cuenca tendrán un determinado tiempo de paso a través de la misma.

e) Longitud total de los cauces (Lt)

La longitud total de los cauces es la distancia entre todos los cursos del tipo perenne e intermitente.

f) Coeficiente de compacidad (Kc)

Es un parámetro de forma, que se es la relación entre el perímetro y el área de la cuenca. El coeficiente de compacidad es un coeficiente constante adimensional la cual nos proporciona una idea de la forma de la cuenca, pues si K_c es igual a 1, la cuenca será de forma circular. En general K_c es mayor que 1 y este coeficiente nos dará luces sobre la escorrentía y la forma del

hidrograma que resulta de una determinada lluvia caída sobre la cuenca. Básicamente en cuencas muy alargadas el valor de K_c , es mayor que 2. Además, valores de K_c cercanos a la unidad nos menciona que en la cuenca habrá mayores posibilidades de crecidas esto se debe a que los T_c : Tiempos de concentración (duración necesaria para que una gota de agua que cae en el punto más alejado de aquella, llegue a la salida o desembocadura) de los diferentes puntos de la cuenca serían iguales. De igual manera, cuanto mayor sea el valor de K_c , también será mayor el tiempo de concentración de las aguas y por lo tanto, estará menos propensa a una inundación. Se determina con la siguiente relación:

Se expresa por la relación entre el perímetro de la cuenca y el círculo, cuya área es igual a la superficie de la cuenca.

$$K_c = \frac{P}{2\sqrt{\pi A}} \quad (\text{Ec. 1})$$

Donde:

P = Perímetro de la Subcuenca (Km)

A = Área de la Subcuenca (Km²)

g) Factor de Forma (Ff)

Manifiestan la mayor o menor tendencia a crecientes que tienen las subcuencas; y un valor bajo, será representativo de que ella está menos sujeta a crecientes que otras del mismo tamaño, pero con mayor factor de forma. Su valor expresa la relación entre el ancho medio y la longitud del curso de agua más largo:

$$Ff = \frac{a}{L} \quad (\text{Ec. 2})$$

$$a = \frac{A}{L} \quad (\text{Ec. 3})$$

Donde:

a = Ancho medio (Km)

A = Área de la Subcuenca (Km²)

L = Longitud mayor del río principal (Km)

Cualquiera de estos dos últimos parámetros permite estimar la respuesta hidrológica de una cuenca ante un evento de precipitación pluvial extrema, en el sentido de determinar la magnitud de la escorrentía superficial.

h) Densidad de Drenaje (D_d)

La densidad total de los cauces dentro de una cuenca separada por el área total de drenaje, define la densidad de drenaje o longitud de los ríos por unidad de área.

Se dice que una cuenca es muy bien drenada cuando presenta una densidad alta, esto debería responder relativamente de manera rápido al influjo de la precipitación; una cuenca con baja densidad revela un área pobremente drenada con respuesta hidrológica muy lenta:

$$Dd = \frac{Lt}{A} \quad (\text{Ec. 4})$$

Donde:

Lt = Longitud total de cauces (Km)

A = Área de la cuenca (Km²)

i) Ancho Medio de la Subcuenca (a)

El ancho medio de las subcuencas, nos demuestran la forma que adquiere y el cual comparado con la longitud de subcuenca se puede reconocer la drenabilidad superficial, por lo cual, si el ancho medio es mayor a la mitad de la longitud de la subcuenca, entonces este tendrá la aptitud de producir un alto drenaje superficial (ZEE, 2015).

2.2.3. Modelos hidrológicos

Según Chavarri (2005) menciona que los modelos hidrológicos son contemplaciones simplificadas de los sistemas hidrológicos reales, a partir del cual podemos verificar la relación causa efecto de una cuenca a través de los datos de entrada y salida, con los cuales se logra mayor entendimiento de los procesos físicos hidrológicos que tienen lugar dentro de la cuenca. También nos permite simular y pronosticar el comportamiento hidrológico de los procesos físicos en la cuenca. Comúnmente los modelos hidrológicos se apoyan sobre los sistemas existentes y se diferencia en las expresiones de su manejo y la magnitud de los elementos que integran el proceso hidrológico.

Un modelo hidrológico, según Chow (1994) es una representación matemática que simula un fenómeno hidrológico, el cual es mencionado como un proceso o como un sistema; sus entradas y salidas son variables hidrológicas mensurables y su sistema es un conjunto de ecuaciones que relacionan las entradas y las salidas.

2.2.4. Clasificación de los modelos hidrológicos

Los modelos hidrológicos según Chow (1994) pueden clasificarse en dos fases, modelos físicas o material las cuales representan un sistema de maneras matemáticas y modelos abstracta o formal, las cuales incluyen modelos a escala que representan el sistema en una escala reducida.

Se llama modelo de tipo material a una conceptualización de manera física del prototipo siendo este más simple en la estructura, pero sin dejar de lado las propiedades que lo reúne. Los ejemplos de modelos de cuencas materiales son simuladores de lluvia y cuencas experimentales a escala. Un modelo de tipo formal es una representación matemática de una circunstancia que se idealiza que esto mantiene las propiedades importantes de la estructura de un prototipo también se le suele llamar modelos matemáticos puesto que estos modelos son invariablemente matemáticos en naturaleza.

Los modelos físicos o materiales presentan un costo alto y en cuanto a su aplicación presenta muchas restricciones. En cambio, los modelos abstractas o formales son más económicos, por tal motivo en esta investigación se enfoca más en estos, siendo que se relaciona la más adecuada para su solución la cuenca en estudio.

En la Figura 3 según Chow (1994) referente a los modelos abstractos da a conocer una clasificación bastante completa, según con la forma, la aleatoriedad, variación espacial y temporal de los fenómenos hidrológicos.

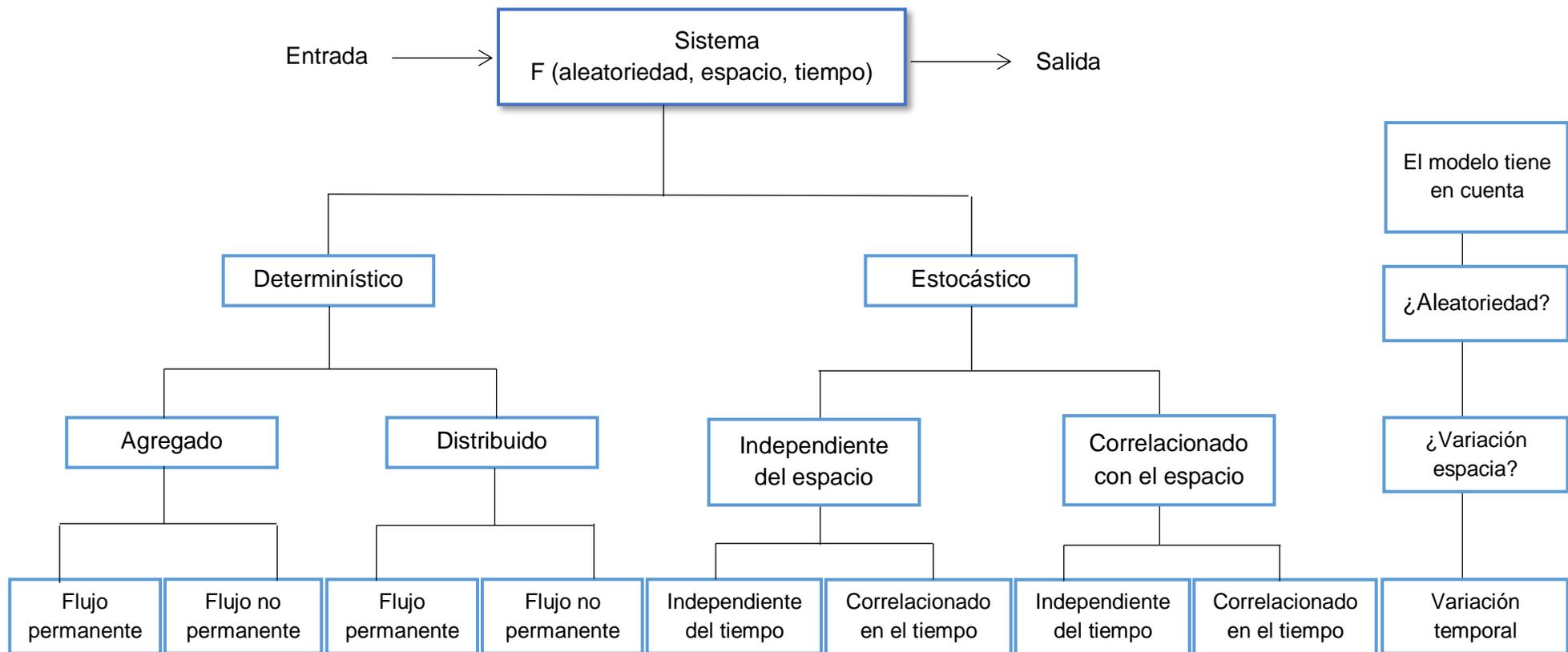


Figura 3. Clasificación de los modelos hidrológico.

Fuente: Tomado de Chow (1994).

Modelos determinísticos

Es la que tiende a constituir relaciones cuantitativas de causa - efecto, empleado una correspondencia directa para obtener un resultado mediante a un requerimiento, esto puede ser según una ecuación empírica o mediante de un operador construido a partir de criterios e hipótesis que se realizan experimentalmente. Un modelo determinístico se emplea en la circunstancia en la que se disponga de poca información, como son casos comunes de las obras de ingeniería hidráulica, en base de los datos y conocimientos de acontecimientos de lluvia diaria que se dispone usualmente de series temporales, siendo así uno tiende a reconstruir de una forma indirecta las evoluciones de los procesos de escurrimiento y flujos (Chavarri, 2005).

Modelos estocásticos

Según Chavarri (2005) refiere que la información que se emplea se trata como valores históricos a manera de secuencia cronológica. Este tipo de modelos se emplea frecuentemente para la pronosticación a corto plazo y a largo plazo de series hidrológicas, pero es necesaria la comparación de las series observadas y simuladas.

Modelos agregados

El término modelo agregado o también conocido como modelo de parámetro global o concentrado "lumped" es utilizado para referirse a un modelo que realiza un balance de agua simplificado, empleando parámetros únicos que representan en promedio la variabilidad espacial y temporal de las características de una zona relativamente extensa, es decir la variación de los parámetros físicos de la cuenca y de las variables de entrada (lluvia,

evapotranspiración), ignoran la distribución espacial y se toman como valores promedios en unidades de respuesta hidrológica (en este caso toda la cuenca), de allí el resultado de la cuenca es evaluada solamente a la salida, sin tener en consideración claramente el resultado de las subcuencas individuales. Hasta la actualidad y en función de la disponibilidad de datos son los modelos más usados en diseño. Un ejemplo típico de un modelo de parámetro global es el hidrograma unitario (Fattorelli y Fernández, 2011).

Modelos distribuidos y semidistribuidos.

El término modelo de parámetro distribuido o modelo distribuido es empleado para enunciar a un modelo en el cual se permite que los parámetros varíen espacialmente dentro de la cuenca, es decir, se considera que los procesos hidrológicos ocurren en diferentes puntos del espacio. Esto conlleva el cálculo no sólo de la solución de toda la cuenca sino también la solución de las subcuencas individuales. El mayor detalle con el que pueden hacerse las simulaciones en un modelo distribuido rinde mejor computacionalmente que un modelo global ya que las subdivisiones agilizan los cálculos.

Esto permite el modelado de características especiales como son las abstracciones de lluvia e hidrológicas que varían espacialmente. Sin embargo, para que los resultados del modelado distribuido sean significativos, la calidad y la cantidad de datos disponibles deben ser óptimas y de un gran nivel de detalle (Cruz y Romero, 2017).

2.2.5. Modelo hidrológico Lutz Scholz

El modelo hidrológico Lutz Scholz es principalmente utilizado para poder determinar caudales medios mensuales y se origina por la falta de datos o registros históricos en estaciones hidrológicas en ríos de la sierra peruana, fue desarrollado por el experto en hidrología, Lutz Scholz para cuencas de la sierra peruana en el escenario de Cooperación de la Republica Alemana a través del Plan de Meris II, entre los años de 1979 -1980.

Scholz (1980) da a conocer: Que este modelo hidrológico, es combinado ya que presenta una estructura determinístico para el cálculo de los caudales mensuales para el año promedio (Balance Hídrico - Modelo determinístico); y una estructura estocástica para la generación de series extendidas de caudal (Proceso Markoviano - Modelo Estocástico). Evaluando el hecho de la escasez de los registros de caudal en la sierra peruana, el modelo se desarrolló teniendo en consideración los parámetros tanto físicos y como meteorológicos de las cuencas, las cuales puedan ser obtenidos mediante mediciones cartográficas y de campo. El modelo cuenta con parámetros más importantes como son los coeficientes para los cálculos de la precipitación efectiva, déficit de escurrimiento, retención y agotamiento de las cuencas.

El modelo hidrológico Lutz Scholtz, ha sido estudiado y calibrado en 19 cuencas de la sierra peruana, en las regiones de Cuzco, Huancavelica, Junín y Cajamarca, y se emplea comúnmente para pequeñas y medianas cuencas con insuficiente información hidrométrica, el modelo se basa específicamente en el balance hídrico y en parámetros parciales de tipo determinístico.

Los procedimientos necesarios que se deben de seguir en el establecimiento del modelo son:

- Evaluación de los parámetros requeridos para la caracterización de los procesos de la escorrentía promedio.
- Determinar un conjunto de modelos parciales de los parámetros para la estimación de caudales en cuencas en las cuales no presentan información hidrométrica.
- Comprobación del modelo y la estimación de caudales extendidos mediante un proceso markoviano combinado de precipitación efectiva del mes con el caudal del mes anterior.

Ecuación del balance hídrico

La ecuación general que describe el balance hídrico mensual en unidades de mm/mes es la siguiente:

$$CM_i = P_i - D_i + G_i - A_i \quad (\text{Ec. 5})$$

Donde:

CM_i = Caudal mensual (mm/mes)

P_i = Precipitación mensual sobre la cuenca (mm/mes)

D_i = Déficit de escurrimiento (mm/mes)

G_i = Gasto de la retención de la cuenca (mm/mes)

A_i = Abastecimiento de la retención (mm/mes)

Asumiendo que para las épocas largas (1 año) el gasto y abastecimiento de la retención poseen el mismo valor quiere decir que $G_i = A_i$, y para un año promediado una cantidad de la precipitación regresa a la atmósfera por el proceso de evaporación. Reemplazando los valores (P-D) por (C*P) y teniendo

en consideración la transformación de unidades (de mm/mes a m³/seg) la ecuación mencionado anteriormente queda de la siguiente forma:

$$Q = c' * C * P * AR \quad (\text{Ec. 6})$$

Donde:

Q = Caudal (m³/s)

c' = Coeficiente de conversión del tiempo (mes/seg)

C = Coeficiente de escurrimiento

P = Precipitación total mensual (mm/mes)

AR = Área de la cuenca (m²)

Coeficiente de escurrimiento

Se denomina coeficiente de escurrimiento al cociente entre el caudal de agua que circula por una sección de una cuenca o microcuenca a causa de un acontecimiento lluvioso y la masa de agua que ha precipitado sobre la misma (lluvia total). Las características del terreno como su naturaleza permeabilidad, vegetación, inclinación y humedad del suelo inicialmente y la zona de temperatura, intensidad y duración de la precipitación, humedad relativa, velocidad del viento, horas de sol y dimensiones de la cuenca o microcuenca, influyen en el coeficiente de escurrimiento la cual varía a lo largo del tiempo (Mamani, 2015).

Para el desarrollo del coeficiente de escurrimiento existen varios métodos entre ellos la fórmula establecida por L. Turc:

$$C = \frac{P - D}{P} \quad (\text{Ec. 7})$$

Para el desarrollo del parámetro D se efectúa mediante la siguiente ecuación

$$D = \frac{P}{(0.9(\frac{P}{L})^2)^{0.5}} \quad (\text{Ec. 8})$$

Para el desarrollo de L se efectúa mediante la siguiente ecuación

$$L = 300 + 25T + 0.05T^3 \quad (\text{Ec. 9})$$

Donde:

C = Coeficiente de Escurrimiento

P = Precipitación total anual (mm/año)

D = Déficit de Escurrimiento (mm/año)

L = Coeficiente de Temperatura

T = Temperatura media anual (°C)

Evapotranspiración

La evapotranspiración es la medida de agua que se pierde en una cuenca, teniendo en consideración la evaporación del suelo y la transpiración de las plantas (Najarro, 2015). Para obtener la evapotranspiración potencial, se ha utilizado el modelo empírico establecido por Hargreaves, mediante la ecuación numero 10:

$$EP = 0.0075 * (RMS) * (TF) * (FA) \quad (\text{Ec. 10})$$

$$RMS = 0.0075 * (RA) \sqrt{\frac{n}{N}} \quad (\text{Ec. 11})$$

$$FA = 1 + 0.06(AL) \quad (\text{Ec. 12})$$

Donde:

EP = Evapotranspiración potencial anual (mm/año)

RSM = Radiación solar media

FA = Coeficiente de corrección por elevación

TF = Temperatura media anual (°F)

RA = Radiación extraterrestre (mm agua / año)

(n/N) = Relación entre insolación actual y posible (%)

(n/N) = 50 % (estimación en base a los registros)

AL = Elevación media de la cuenca (Km)

Finalmente, la evapotranspiración se puede estimar por diferentes métodos disponibles.

Precipitación efectiva

Para el desarrollo de la precipitación efectiva se hace la suposición que los caudales promedios que han sido observados en la cuenca concuerdan a un proceso de equilibrio entre gasto y abastecimiento de la retención. La precipitación efectiva se estimó para el coeficiente de escurrimiento promedio, de esta manera que la relación entre precipitación efectiva y precipitación total da como resultado al coeficiente de escorrentía (Najarro, 2015).

Para su cálculo se determina mediante la siguiente ecuación:

$$PE = \alpha_0 + \alpha_1 P + \alpha_2 P^2 + \alpha_3 P^3 + \alpha_4 P^4 + \alpha_5 P^5 \quad (\text{Ec. 13})$$

Donde:

PE = Precipitación efectiva (mm/mes)

P = Precipitación total mensual (mm/mes)

α_i = Coeficiente del polinomio

Se debe tener presente que los límites superiores para la precipitación efectiva son los siguientes:

Tabla 1. Límite superior para la precipitación efectiva.

Curva N°	Ecuación	Rango
Curva I	PE=P - 120.6	P>177.8 mm/mes
Curva II	PE=P - 86.4	P>152.4 mm/mes
Curva III	PE=P - 59.7	P>127.0 mm/mes

Fuente: Scholz (1980).

Los valores de ai se detallan en la siguiente Tabla 2:

Tabla 2. Coeficiente para la estimación de la precipitación efectiva.

Coeficientes para el cálculo de la precipitación efectiva			
Coef.	Curva I	Curva II	Curva III
a0	-0.018	-0.021	-0.028
a1	-0.0185	0.1358	0.2756
a2	-0.001105	-0.002296	-0.004103
a3	-1.20E-05	4.35E-05	5.53E-05
a4	1.44E-07	-8.90E-08	1.24E-07
a5	-2.85E-10	-8.79E-11	-1.42E-09

Fuente: Scholz (1980).

Según el método de la United States Bureau of Reclamation (USBR) la precipitación efectiva está determinada por la Tabla 3 y los coeficientes para el desarrollo de la precipitación efectiva esta dada por Tabla 4. El rango de aplicación de los coeficientes de la ecuación polinómica de la PE está comprendido para $0 < P < 250$ mm.

Tabla 3. Precipitación efectiva según el Bureo of Reclamation.

P (mm)	P. Efectiva: PE (mm)		
	Curva I	Curva II	Curva III
0.0	0.0	0.0	0.0
10.0	0.0	1.0	2.0
20.0	0.0	2.0	4.0
30.0	0.0	3.0	6.0
40.0	0.5	4.0	8.0
50.0	1.0	6.0	11.0
60.0	1.5	8.0	14.0

70.0	3.0	10.0	18.0
80.0	4.0	14.0	24.0
90.0	5.5	18.0	30.0
100.0	8.0	23.0	39.0
110.0	11.0	29.0	48.0
120.0	15.0	36.0	58.0
130.0	19.0	43.0	68.0
140.0	24.0	52.0	78.0
150.0	30.0	60.0	88.0
160.0	37.0	69.0	98.0
170.0	45.0	79.0	108.0
180.0	55.0	89.0	118.0

Fuente: Scholz (1980).

Tabla 4. Coeficiente de precipitación efectiva según el Bureo of Reclamation.

Coeficientes para el cálculo de la precipitación efectiva			
Coef.	Curva I	Curva II	Curva III
a0	-0.047000	-0.106500	-0.417700
a1	0.009400	0.147700	0.379500
a2	-0.000500	-0.002900	-0.010100
a3	0.000020	0.000050	0.000200
a4	-5.00E-08	-2.00E-07	-9.00E-07
a5	2.00E-10	2.00E-10	1.00E-09

Fuente: Scholz (1980).

Finalmente, la relación entre la precipitación efectiva y la precipitación total se establece mediante la ecuación numero 14:

$$C = \frac{Q}{P} = \sum_{i=1}^{12} \frac{PE_i}{P} \quad (\text{Ec. 14})$$

Donde:

C = Coeficiente de escurrimiento

Q = Caudal anual

P = Precipitación total anual

$\sum_{i=1}^{12} \frac{PE_i}{P}$ = Suma de precipitación efectiva mensual.

Retención de la cuenca

En base a la suposición que para el año promedio existe el equilibrio entre el gasto y el abastecimiento de conservación de la cuenca y también que el caudal total es igual a la precipitación efectiva en el nivel anual (Najarro, 2015). El aporte de la conservación hídrica al caudal se puede determinar mediante la siguiente ecuación:

$$R_i = CM_i - P_i \quad (\text{Ec. 15})$$

$$CM_i = PE_i + G_i - A_i \quad (\text{Ec. 16})$$

Donde:

CM_i = Caudal mensual (mm/mes)

PE_i = Precipitación efectiva mensual (mm/mes)

R_t = Retención de la cuenca (mm/mes)

G_i = Gasto de la retención (mm/mes)

A = Abastecimiento de la retención (mm/mes)

$R_i = G_i$, para valores mayores que cero (mm/mes)

$R_i = A$, para valores menores que cero (mm/mes)

Para hallar la retención total de la cuenca o subcuenca para el año promedio se suman los valores de G o A respectivamente, estos varían de 43 a 188 (mm/año) para para las circunstancias de las cuencas de la sierra.

Relación entre descargas y retenciones

Durante la época seca, el gasto de la retención alimenta los ríos, conformando el caudal o descarga básica. La reserva o retención de la cuenca

se agota al final de la estación seca; durante esta estación la descarga se obtiene según la ecuación:

$$Q_t = Q_0 e^{-a(t)} \quad (\text{Ec. 17})$$

Donde:

Q_t = Descarga en el tiempo t

Q_0 = Descarga inicial

a = Coeficiente de agotamiento

t = Tiempo

Al comienzo de la época lluviosa, como lo menciona Najarro (2015) el proceso de agotamiento de la reserva termina, y a su vez inicia el abastecimiento de los almacenes hídricos. Este proceso se establece por un déficit entre la precipitación efectiva y el caudal real. En fundamento a los hidrogramas se ha establecido que el abastecimiento es más fuerte al inicio de la época lluviosa siguiendo de forma progresiva pero menos pronunciada, hasta el final de dicha época.

Coeficiente de agotamiento

Según lo refiere Mamani (2015) el coeficiente de agotamiento no es constante durante toda la estación seca, ya que va disminuyendo gradualmente. Con propósitos prácticos se puede despreciar la variación del coeficiente "a" durante la época seca utilizando un valor promedio, se ha demostrado que el coeficiente de agotamiento de la cuenca tiene una dependencia logarítmica del área en relación al área de la cuenca está dada por la siguiente ecuación:

$$a = f(\ln(AR)) \quad (\text{Ec. 18})$$

El análisis de las observaciones que se disponen muestran, además, cierta influencia del clima, de la geología y de la cobertura vegetal. Se desarrolló una ecuación empírica para la “sierra peruana” mediante la siguiente ecuación:

$$a = 3.1249(AR)^{-0.1144}(EP)^{-19.336}(T)^{-3.369}(R)^{1.429}, r = 0.86 \quad (\text{Ec. 19})$$

Es posible determinar el coeficiente de agotamiento real mediante aforos sucesivos en el río durante la estación seca; sin embargo, cuando no sea posible ello, el modelo plantea fórmulas empíricas para cuatro cuencas distintas para estimar este coeficiente:

Agotamiento muy rápido por temperatura elevada mayor de 10°C y retención reducida (50 mm/año) hasta retención mediana (80 mm/año):

$$a = -0.00250 \ln Ac + 0.034 \quad (\text{Ec. 20})$$

Agotamiento rápido por retención entre 50 y 80 mm/año y vegetación poco desarrollada:

$$a = -0.00252 \ln Ac + 0.030 \quad (\text{Ec. 21})$$

Agotamiento mediano por retención mediana (alrededor de 80 mm/año) y vegetación mezclada (pastos, bosques y terrenos cultivados).

$$a = -0.00252 \ln Ac + 0.026 \quad (\text{Ec. 22})$$

Agotamiento reducido por alta retención (más de 100 mm/año) y vegetación mezclada (pastos, bosques y terrenos cultivados).

$$a = -0.00252 \ln Ac + 0.023 \quad (\text{Ec. 23})$$

Dónde:

a = Coeficiente de agotamiento por día

AR = Área de la cuenca o microcuenca (km²)

EP = Evapotranspiración potencial anual (mm/año)

T = Duración de la temporada seca (días)

R = Retención total de la cuenca (mm/año)

Almacenamiento hídrico

Tal como lo menciona Najarro (2015) son considerados tres tipos de almacenamiento hídrico que influyen en la retención de la cuenca estos son: acuíferos, lagunas y pantanos, y nevados. A continuación, se mencionan para la determinación de la lámina (L) que almacena cada tipo de estos almacenes:

- Acuíferos:

$$L_A = -750(I) + 315 \quad (\text{Ec. 24})$$

Donde:

L_A = Lámina específica de acuíferos (mm/año)

I = Pendiente de desagüe: $I \leq 15 \%$

- Lagunas y pantanos:

La lámina de almacenamiento de lagunas y pantanos está dada por la siguiente ecuación:

$$L_L = 500 \quad (\text{Ec. 25})$$

Donde:

L_L = Lámina específica de lagunas y pantanos (mm/año)

- Nevados:

La lámina de almacenamiento de los nevados está dada por la siguiente ecuación:

$$L_L = 500 \quad (\text{Ec. 26})$$

Donde:

L_L = Lámina específica de nevados (mm/año)

Las correspondientes áreas o superficies son determinados de los mapas o aerofotografías. No son considerados para este caso los almacenamientos que son de corto plazo, las cuales están incluidas en las ecuaciones de la precipitación efectiva (Najarro, 2015).

Gasto de la retención

Según Lutz Scholz, el Gasto de la retención considera que los caudales durante la época seca están relacionados a los del mes anterior por la relación siguiente:

$$b_0 = e^{-a(t)} \quad (\text{Ec. 27})$$

Donde:

b_0 = Relación entre la descarga del mes actual y del mes anterior

a = Coeficiente de agotamiento

t = Tiempo

La suma de los factores mensuales b_0^i durante la estación seca de m meses:

$$b_m = \sum_{i=1}^m b_0^i \quad (\text{Ec. 28})$$

Corresponde al gasto total durante el periodo de m meses secos. En consecuencia, la contribución mensual de la retención durante la época seca se puede indicar por siguiente ecuación:

$$G_i = \left(\frac{b_0^i}{\sum_{i=1}^m b_0^i} \right) * R \quad (\text{Ec. 29})$$

Donde:

b_0^i = Relación entre el caudal del mes i y el caudal inicial

G_i = Gasto mensual de la retención (mm/mes)

R = Retención de la cuenca

Teniendo en cuenta que para para la estimación de b_0^i para el mes de abril (i=1), mayo (i=2), junio (i=3) y así sucesivamente hasta octubre (i=7).

$$b_i = b_0^i \quad (\text{Ec. 30})$$

Entonces:

$$b_i = (e^{-at})^i \quad (\text{Ec. 31})$$

Abastecimiento de la retención

Según lo refiere Najarro (2015) el abastecimiento durante la época lluviosa es uniforme para cuencas situadas en la misma región climática. Los coeficientes mensuales expresados en porcentaje del almacenamiento total anual están establecidos en siguiente tabla:

Tabla 5. Almacenamiento hídrico durante la época de lluvias (valores en %).

Región	Oct	Nov	Dic	Ene	Feb	Mar	Total
Cusco	0	5	35	40	20	0	100
Huancavelica	10	0	35	30	20	5	100
Junín	10	0	25	30	30	5	100
Cajamarca	25	-5	0	20	25	35	100

Fuente: Scholz (1980).

La lámina de agua "Ai" que entra en la reserva de la cuenca se presenta en forma de déficit a escala mensual de la precipitación efectiva PEi, la cual se calcula mediante la siguiente ecuación:

$$A_i = \frac{a_i * R}{100} \quad (\text{Ec. 32})$$

Donde:

Ai = Abastecimiento mensual déficit de la precipitación efectiva (mm/mes)

ai = Coeficiente de abastecimiento (%)

R = Retención de la cuenca (mm/año)

Estimación del caudal mensual para el año promedio

Se basa en la ecuación fundamental que menciona el balance hídrico mensual y está definida por la siguiente ecuación:

$$CM_i = PE_i + G_i - A_i \quad (\text{Ec. 33})$$

Donde:

CM_i = Caudal del mes i , (mm/mes)

PE_i = Precipitación efectiva del mes i , en (mm/mes)

G_i = Gasto de la retención del mes, en (mm/mes)

A = Abastecimiento del mes i , en (mm/mes)

Generación de caudales medios mensuales para periodos extendidos

El modelo hidrológico propuesto permite la determinación de caudales mensuales del año promedio con una exactitud satisfactoria. El método toma como prototipo el año promedio para la generación de caudales mediante la combinación de un procedimiento markoviano de primer orden, con una variable de empuje (Cruz & Romero, 2017).

La ecuación generalizada que permite la obtención de descargas es:

$$Q = B_1 + B_2 Q_{t-1} + B_3 * PE_t + \sigma \epsilon_t \sqrt{1 - r^2} \quad (\text{Ec. 34})$$

Donde:

Q_t = Caudal en el mes t

Q_{t-1} = Caudal en el mes anterior

PE_t = Precipitación efectiva en el mes t

ϵ_t = Variable aleatoria de distribución normal (-1,1)

R = Coeficiente de correlación.

σ = Desviación estándar

B1, B2, B3= Coeficientes

Se calcula los parámetros B1, B2, B3, r y S sobre el fundamento de los resultados del modelo para el año promedio mediante un cálculo de regresión lineal con Q_t siendo el valor dependiente y Q_{t-1} y PE_i siendo los valores independientes. Los cálculos se realizan en base aplicaciones comerciales de estadística (Najarro, 2015).

Para el realizar el cálculo del procedimiento de regresión se sigue las siguientes etapas:

- Disponer de un aforo en el mes para iniciar los cálculos.
- Escoger como dato inicial el caudal promedio de cualquier mes.
- Comenzar con un caudal cero, calcular un año y luego tomar el último valor la cual será Q_0 , sin tener en cuenta estos valores en el cálculo de los criterios estadísticos del período que se ha generado.

2.2.6. Modelo hidrológico Thomas

El modelo Thomas fue desarrollado en 1981 conocido también como el modelo hidrológico ABCD por poseer sus cuatro parámetros (Lamprea, 2011).

El modelo Thomas es de tipo agregado, asumiendo que, en toda la superficie de la subcuenca, se distribuye de manera equitativa la recarga calculada en cada subcuenca. No obstante, se da la posibilidad que en cada subcuenca la recarga sea heterogénea, con las superficies de recarga preferencialmente que coinciden con las cabeceras de las subcuencas (Obregón y Fragala, 2011).

El modelo Thomas un modelo no lineal de cuenca que accede la precipitación y la evapotranspiración como entradas, que trabaja con una

escala de tiempo mensual. En su estructura interna el modelo posee el almacenamiento de humedad del suelo, el almacenamiento subterráneo, la escorrentía, el flujo subterráneo y la evapotranspiración real como se muestra en la Figura 4.

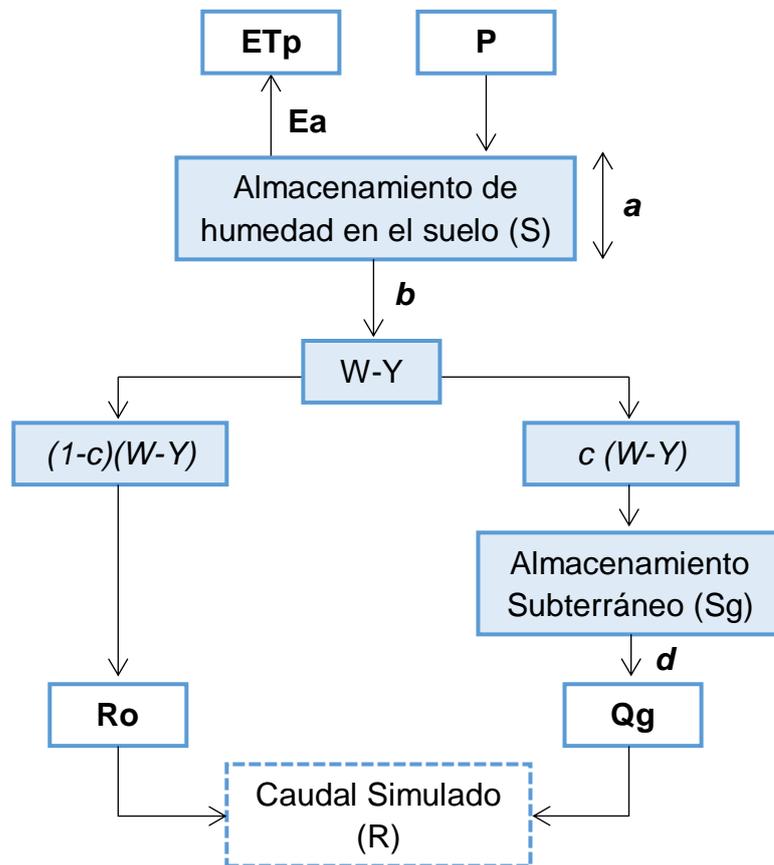


Figura 4. Modelo hidrológico Thomas.

Fuente: Lamprea (2011).

El modelo define una variable de estado llamada “agua disponible” las variables de estado son definidas como posibles aproximaciones, es decir variables matemáticas auxiliares que permiten representar las pautas de sistemas mediante ecuaciones.

$$W_t = P_t + Sw_{t-1} \quad (\text{Ec. 35})$$

Ahora se denota una segunda variable de estado Y_t como la sumatoria de la evapotranspiración actual, E_t y el contenido de humedad almacenado en el suelo al final del mes, esto es:

$$Y_t = E a_t + S w_t \quad (\text{Ec. 36})$$

Esta variable es calculada como una función no lineal del agua disponible, W_t usando:

$$Y_t = \frac{W_t + b}{2a} - \left\{ \left[\frac{W_t + b}{2a} \right]^2 - \frac{W_t \cdot b}{a} \right\}^{0.5} \quad (\text{Ec. 37})$$

Asumiendo que el almacenamiento de humedad en el suelo comienza en el mes Y_t , se tiene:

$$S_t = Y_t \cdot e^{\left(-\frac{E T p t}{b}\right)} \quad (\text{Ec. 38})$$

La recarga de agua subterránea se define como:

$$Q_{gt} = C(W_t - Y_t) \quad (\text{Ec. 39})$$

La diferencia $W-Y$ es la suma de la escorrentía disponible:

$$R_{0t} = (1 - C)(W_t - Y_t) \quad (\text{Ec. 40})$$

Finalmente, la descarga de agua subterránea se define como:

$$S_g = \frac{Q_{gt} S_{gt-1}}{1 + d} \quad (\text{Ec. 41})$$

El caudal total al final de mes será definido por medio de la siguiente ecuación:

$$R_t = R_{0t} + Q_{gt} \quad (\text{Ec. 42})$$

El modelo tiene cuatro parámetros a, b, c, d y dos valores de condiciones iniciales S_{g_0}, S_{w_0} .

Los parámetros del modelo de Thomas reflejan las siguientes características de la cuenca o subcuenca:

- Parámetro a: Tendencia de que ocurra escorrentía antes de que el suelo se encuentre completamente saturado.
- Parámetro b: Es el límite superior de la adición de la evapotranspiración y el contenido de humedad del suelo.
- Parámetro c: Fracción de escorrentía proveniente del agua subterránea.
- Parámetros d: Valor recíproco del tiempo de residencia del agua subterránea.

Las condiciones iniciales del modelo Thomas refiere a:

- Sw_0 : Contenido inicial de humedad en el suelo.
- Sg_0 : Almacenamiento inicial de agua subterránea.

En resumen, para entender mejor al modelo hidrológico Thomas para poder ser calculado mediante ecuaciones planteadas anteriormente, se sigue la siguiente secuencia hasta calcular finalmente el caudal de la cuenca o subcuenca:

- Cálculo del agua disponible.
- Cálculo de la variable Y.
- Cálculo del contenido de humedad del suelo.
- Cálculo de la escorrentía directa.
- Cálculo de la recarga de agua subterránea.
- Cálculo del almacenamiento de agua subterránea.
- Cálculo del caudal subterráneo.
- Cálculo del caudal a la salida de la cuenca o subcuenca.

Modelos hidrológico Thomas aplicados directamente

Cuando el modelo hidrológico de carácter agregado Thomas es desarrollado por la forma directa para realizar el análisis es por que inicialmente se conocen los parámetros que presenta el modelo a, b, c, d ; las condiciones iniciales S_{g_0}, S_{w_0} para así luego calcular los elementos del balance hídrico directamente como W_t, Y_t, S_{w_t} y los demás las cuales fueron mencionados anteriormente. Se considera que el método es válido cuando existe una mínima diferencia entre los caudales simulados por los procesos de cálculos y el caudal real que es observado o medido.

La Figura 5, muestra como los componentes del modelo de manera directa cuando los valores de los parámetros y condiciones iniciales son conocidos.

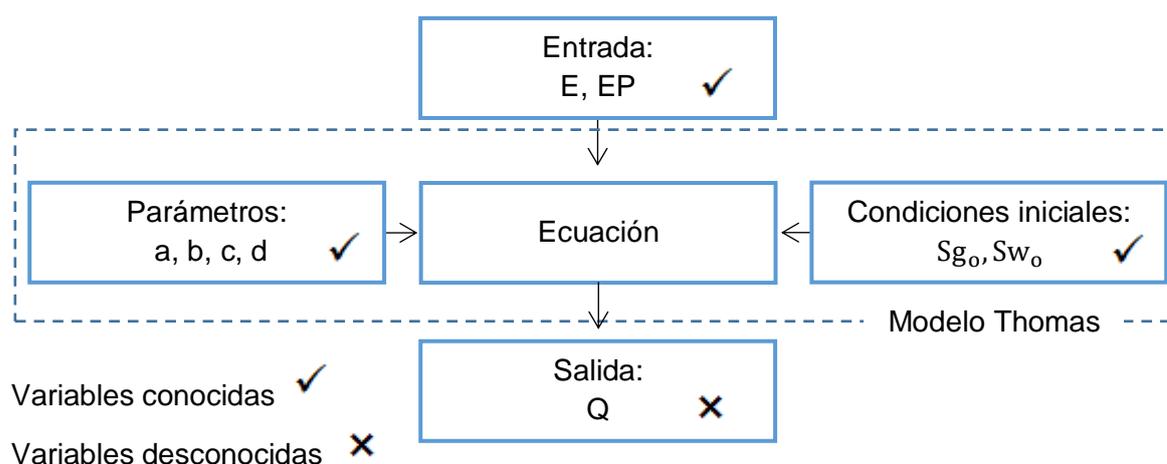


Figura 5. Componentes del modelo Thomas forma directa.

Modelos hidrológico Thomas aplicados inversamente

Generalmente en los estudios de balance hídrico en las cuencas hidrográficas que se realizan, los valores de los parámetros y condiciones que el modelo Thomas relaciona se desconocen, por esta razón se realiza los cálculos de manera inversa que consiste en tener el caudal observado y a partir

de ahí encontrar los valores de los parámetros las cuales van a generar un caudal simulado que más se ajustan al caudal observado. En el proceso inverso, el caudal simulado está en función con los valores de los parámetros y las condiciones iniciales que comprende el modelo hidrológico, de la forma $Q_s = f(a, b, c, d, Sg_o, Sw_o)$.

La Figura 6 muestra como los componentes del modelo de manera inverso cuando los valores de los parámetros y condiciones iniciales son desconocidos.

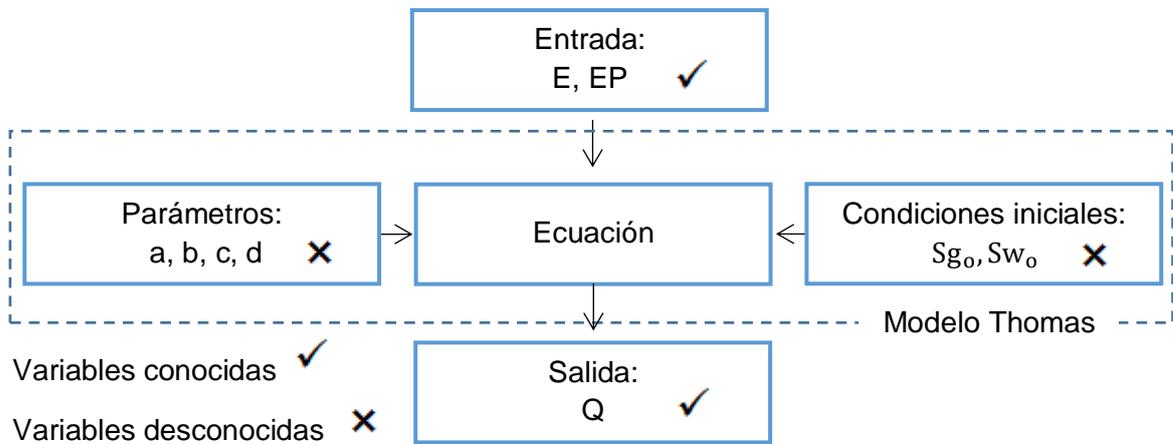


Figura 6. Componentes del modelo Thomas forma inverso.

Al hacer el proceso de cálculo del modelo se debe de realizar la calibración del procedimiento a ser utilizado mediante la elección de funciones objetivo ya sea a través de una minimización o maximización de estas funciones objetivo y a partir de un procedimiento automático basados en búsqueda exhaustiva, en ensayo y error, en algoritmos genéticos, redes neuronales, entre otros las cuales permiten realizar una optimización matemática, asimismo se puede usar herramientas computacionales para facilitar los cálculos como por ejemplo Matlab, hojas electrónicas en Microsoft Excel, etc.

Este tipo de búsqueda exhaustiva requiere de una velocidad de procesamiento y de una capacidad lo más suficiente posible para un

desempeño óptimo, siendo este el caso, el desarrollo de esta investigación se utilizó hojas electrónicas en el programa de Microsoft Excel, utilizando el complemento de la herramienta de análisis “solver” la cual sirvió para la optimización numérica de los valores de los parámetros y condiciones iniciales del modelo hidrológico.

El complemento de Microsoft Excel “solver” tiene tres etapas principales para su desarrollo como se describe continuación y se observa en la Figura 7:

- Celda objetivo. - es la celda en la cual se inserta el objetivo del problema (función objetivo).
- Celdas variables. - son aquellas celdas que son modificables para alcanzar el resultado que se desea.
- Restricciones. - son las limitaciones o las restricciones las cuales se configuran para que “solver” resuelva el problema.

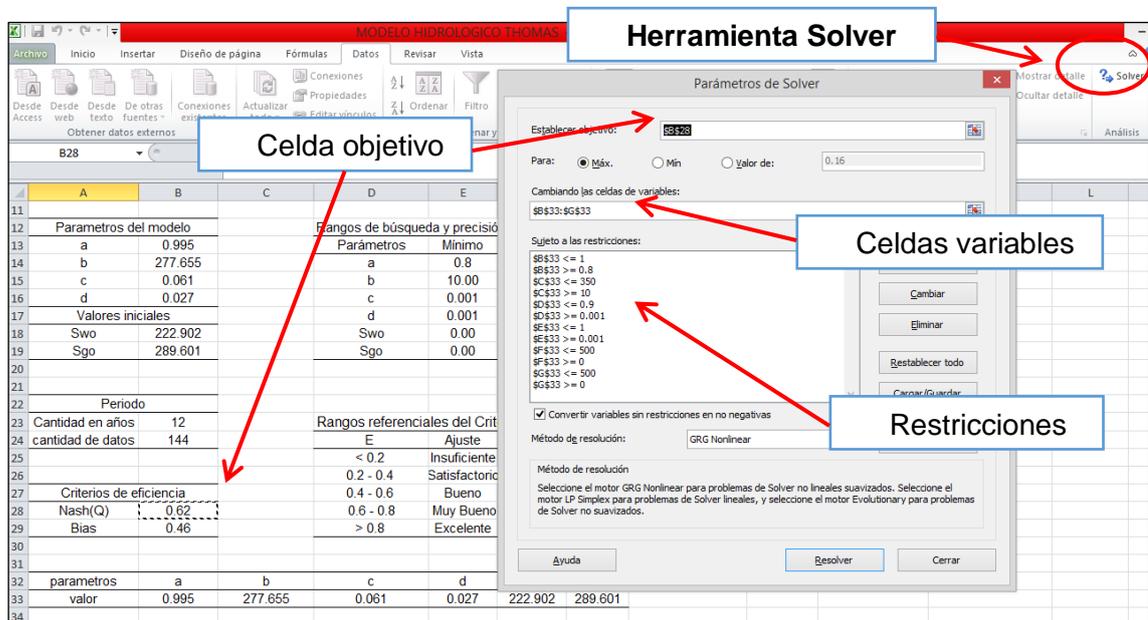


Figura 7. Etapas para el procedimiento de la herramienta “solver”.

Fuente: Elaboración propia.

Para ser utilizado la herramienta “solver” en el programa de Microsoft Excel, se tiene que habilitar, realizando los siguientes pasos: ir a la barra de menús del programa escoger la sección “archivo” y dentro de ella la sección de “opciones” la cual mostrara una ventada en ella buscar la sección “complementos” dentro del cuadro de texto en la parte inferior “administrar”, esté la opción “complementos de Excel” después presionar el botón de “ir” finalmente activar la sección “solver” y presionar aceptar, para poder ubicar dicha herramienta ir a la barra de menús, seleccionar la sección “datos” y en la barra de herramientas en la parte superior derecha se encontrara habilitado “solver”.

Investigaciones realizadas anteriormente como el de Saucedo (2014), sugiere para la calibración del modelo hidrológico Thomas, rangos para los parámetros del modelo las cuales pueden variar. Determinó rangos mínimos y máximos para cada espacio de búsqueda para cada variable y las precisiones requeridas, las cuales se detallan en la Tabla 6.

Tabla 6. Rangos de búsqueda y precisión para cada uno de los parámetros.

Rangos de búsqueda y precisión para cada uno de los parámetros			
Parámetros	Mínimo	Máximo	Precisión
A	0.8	1.00	0.001
B	10.00	350.00	1.00
C	0.001	0.90	0.001
D	0.001	1.00	0.001
Swo	0.00	500.00	1.00
Sgo	0.00	500.00	1.00

Fuente: Saucedo (2014).

2.2.7. Análisis de bondad de ajuste

La calibración de los modelos hidrológicos es un proceso de ajustar sistemáticamente de los valores de los parámetros para los modelos para luego obtener un conjunto de parámetros los cuales proporciona el mejor ajuste de estimación del caudal observado, este proceso significa correr el modelo el mayor número de veces; mientras que la validación de los modelos se emplea para evaluar el grado de confianza de los resultados, es decir el rendimiento del mismo, cuando se utiliza el modelo calibrado para simular el caudal, por lo general el modelo se valida dentro de un periodo diferente al utilizado en calibración (Albuja y Tenelanda, 2014).

Para realizar el proceso de calibración es necesario definir previamente la “función objetivo”, esto permitirá estimar la incertidumbre de las series de caudales simulados respecto a los observados.

La función que es llamada objetivo generalmente es una medida de bondad de ajuste (error de balance de masas, coeficiente de correlación, eficiencia de Nash- Sutcliffe, Sesgo Relativo Bias, etc), pero también puede ser una combinación de estas (dependiendo de la importancia que el investigador asigne a las diferentes medidas de bondad de ajuste) recibiendo entonces el nombre de función multiobjetivo.

Para la presente tesis se escogieron el método de eficiencia de Nash – Sutcliffe y el método de Sesgo Relativo Bias.

Coeficiente de Nash-Sutcliffe

Este criterio permite evaluar el nivel de proximidad en términos de variabilidad de la serie observada respecto a la serie calculada. Para una

perfecta aproximación el criterio es igual a 1, es decir que la varianza calculada es igual a cero; valores positivos cercanos a cero se consideran insuficientes debido a que las estimaciones realizadas se aproximan al promedio de la serie o en otras palabras que la varianza de los errores calculados es igual a la varianza observada; cuando el coeficiente de Nash es negativo, representa un error significativo en donde la metodología que se ha empleado no ha logrado representar la varianza de la serie observada (Ruiz, 2016).

$$NAHS = 1 - \frac{\sum_{i=1}^n (Q_{oi} - Q_{si})^2}{\sum_{i=1}^n (Q_{si} - \hat{Q})^2} \quad (\text{Ec. 43})$$

Donde:

Q_{oi} = Caudal observado

Q_{si} = Caudal simulado

\hat{Q} = Promedio del caudal observado sobre el período de datos

En la Tabla 7, se muestran los valores del coeficiente de Nash para poder evaluar de acuerdo al siguiente rango de valores.

Tabla 7. Rangos referenciales del Criterio de Nash.

E	Ajuste
< 0.2	Insuficiente
0.2 - 0.4	Satisfactorio
0.4 - 0.6	Bueno
0.6 - 0.8	Muy Bueno
> 0.8	Excelente

Fuente: Adaptado de “calibration” watershed modelling, (Cruz y Romero, 2017).

Para reducir el problema de las diferencias cuadráticas y la sensibilidad resultante en valores extremos y cuando los valores de la variable simulada son demasiado grandes, se suele emplear la “eficiencia logarítmica de Nash-Sutcliffe” la cual está determinada por la siguiente ecuación:

$$\text{NAHS log} = 1 - \frac{\sum_{i=1}^n (\log(Q_{oi}) - \log(Q_i))^2}{\sum_{i=1}^n (\log(Q_i) - \log(Q))^2} \quad (\text{Ec. 44})$$

Sesgo Relativo Bias

Es una medida que indica la tendencia promedio de los datos simulados a ser mayores o menores que los datos observados, es decir para reflejar la sistemática del modelo para la sub o sobre-producción de caudales como hacen referencia Albuja y Tenelanda (2014), un valor de 0 indica un ajuste perfecto. Por tanto, valores obtenidos con este indicador se verán contrastados con la curva de duración que será construida para las mejores simulaciones en cada estructura. Esta dada por la siguiente ecuación:

$$\text{BIAS} = \frac{\sum_{i=1}^n (Q_{si} - Q_{oi})}{n} \quad (\text{Ec. 45})$$

Donde:

Q_{oi} = Caudal observado

Q_{si} = Caudal simulado

n = Número de datos

2.3. Definición de términos

Cuenca hidrográfica.- Consiste en una porción de territorio que logra aislar el escurrimiento drenando hacia un mismo punto; existen dos tipos de cuencas: endorreicas, aquellas que terminan en un lago central o en un embalse y exorreicas, las que drenan fuera de la unidad hidrológica (Bateman, 2007).

Se define cuenca hidrográfica a una parte del territorio que es drenada por un solo sistema de drenaje natural, y esta se establece por la sección del río al cual se hace referencia y es demarcada por línea de las cumbres, llamadas

también divisor de aguas o parteaguas. Desde el punto de su salida, existen fundamentalmente dos tipos de cuencas: endorreicas y exorreicas; las primeras su punto de salida está dentro de los linderos de la cuenca y comúnmente es un lago; y las segundas, su punto de salida se localiza en los linderos de la cuenca y se encuentra en otra corriente o en el mar (Gámez, 2009).

Río.- Es un medio dinámico de flujo de agua y sedimentos que verifica la ocupación biológica de la tierra, son los corredores activos más significativos que posee la naturaleza, la cual influye en la dependencia para el equilibrio de la vida (Bateman, 2007).

Caudal.- Según Ordoñez (2011) define caudal, al volumen de agua que fluye a través de una sección transversal de un río o de un canal en un determinado unidad de tiempo, cabe indicar que los términos caudal, gasto y descarga son sinónimos.

Precipitación. - Consiste en cualquier forma de humedad que llega hacia la superficie terrestre ya sean lluvia, rocío, niebla, nieve, granizo, etc. Existen tres tipos de precipitación estos son: precipitación convectivas, precipitación orográficas y precipitación por convergencia (Bateman, 2007).

Evapotranspiración.- Es la sumatoria de la evaporación desde la superficie del suelo y la transpiración de la vegetación (Chow, 2004).

Escurrimiento.- Es un proceso superficial mediante el cual el agua fluye por la superficie terrestre hacia los cauces y el mar (Bateman, 2007).

2.4. Bases legales

La investigación presente se regula en base a los siguientes:

- Ley de recursos hídricos N° 29338.

2.5. Hipótesis

2.5.1. Hipótesis general

El resultado de la aplicación de los modelos hidrológicos permitirá estimar óptimamente el caudal promedio mensual en la subcuenca del río Shullcas.

2.5.2. Hipótesis específicas

- a) El cálculo del caudal promedio mensual aplicando el modelo hidrológico de Lutz Scholz en la subcuenca del río Shullcas, ofrece resultados aceptables con un ajuste de bueno.
- b) La estimación del valor del caudal promedio mensual aplicando el modelo hidrológico de Thomas en la subcuenca del río Shullcas, ofrece resultados aceptables con un ajuste de muy bueno.
- c) El coeficiente de eficiencia de Nash y Biass para el modelo hidrológico Lutz Scholz y Thomas varía de 0 a 1.

2.6. Variables

2.6.1. Definición conceptual de la variable

Variable independiente

Modelos hidrológicos: se caracteriza como la representación de una forma más simple de un sistema real complejo estos son llamados prototipos, pueden ser físicas o matemáticas. En la ingeniería hidrológica existen cuatro tipos de modelos matemáticos estos son: Determinísticos, probabilísticos, conceptual y paramétrico (Mamani, 2015).

Variable dependiente

Caudal medio mensual: se considera al volumen de agua que circula por el cauce de un río en un lugar y tiempo determinados. Se refiere específicamente al volumen hidráulico de la escorrentía de una cuenca hidrográfica concentrada en el río principal de la misma. El promedio del caudal mensual de un río a lo largo de una serie de años constituye lo que se denomina régimen fluvial de ese río. El caudal total se divide, por casos prácticos en dos: “escorrentía directa”, es aquella porción de la escorrentía que llega rápidamente al sistema de canales de drenaje luego de una lluvia, originando la creciente y “flujo base”, es aquella componente procedente del afloramiento de aguas subterráneas y el flujo subsuperficial (Fattorelli y Fernández, 2011).

2.6.2. Definición operacional de la variable

Variable independiente

Modelo hidrológico: se comparó los modelos hidrológicos: Lutz Scholz, para el cálculo comprende la ecuación del balance hídrico, coeficiente de escurrimiento, evapotranspiración potencial, precipitación efectiva, retención de la cuenca, relación entre descarga y retención, coeficiente de agotamiento, almacenamiento hídrico, gasto y abastecimiento de la retención, mientras que, Thomas comprende la precipitación, evapotranspiración, caudales históricos, infiltración, escorrentía directa, caudal subterráneo, almacenamiento y humedad del suelo; todo esto para estimar caudales medios mensuales. Estos concuerdan en la utilización del parámetro geomorfológico de la subcuenca.

Variable dependiente

Caudal medio mensual: se obtuvo mediante la aplicación de los modelos hidrológicos Lutz Scholz y Thomas, calculando los parámetros de cada uno.

2.6.3. Operacionalización de la variable

Tabla 8. Operacionalización de las variables: Modelos hidrológicos y caudal promedio mensual.

Variable	Dimensiones	Indicadores
Modelos hidrológicos	Modelo Lutz Scholz	Precipitación promedio mensual. Temperatura promedio anual. Balance hídrico Escorrentía. Evapotranspiración Precipitación efectiva. Retención de la subcuenca Agotamiento. Abastecimiento. Parámetros geomorfológicos de la subcuenca
	Modelo Thomas	Precipitación promedio mensual. Evapotranspiración Caudales históricos Infiltración Escorrentía directa Caudal subterráneo Recarga del acuífero Variación en el almacenamiento del suelo Humedad del suelo Parámetros geomorfológicos de la subcuenca
Caudal promedio mensual	Caudal promedio mensual	Caudal Área Pendiente

Fuente: Elaboración propia.

CAPITULO III

METODOLOGÍA

3.1. Método investigación

Bernal (2006) menciona que el método científico considera de manera ordenada tanto el planteamiento del problema, construcción del modelo teórico, deducciones de consecuencias particulares, aplicación de la prueba y la introducción de conclusiones; situación por la cual en la presente investigación se considerará este método.

3.2. Tipo de investigación

La investigación corresponde a una investigación aplicada puesto que se pretende resolver problemas prácticos del cálculo de caudales medio mensuales para un año promedio; los cuales servirán para cálculos posteriores de obras de ingeniería hidráulicas que se planifiquen en la subcuenca del río Shullcas.

3.3. Nivel de investigación

El nivel de la investigación es descriptivo - correlacional puesto que, en primera instancia se describe los modelos hidrológicos aplicados para el cálculo del caudal de agua de una cuenca, y en segunda instancia para establecer la correlación del caudal calculado con la metodología aplicada y el caudal determinado en campo, se determinó los coeficientes de eficiencia de Nash y Bias.

3.4. Diseño de investigación

El diseño de la investigación por el que se guio esta tesis es no experimental de corte longitudinal, puesto que se recolectará la información en varios momentos y no se realizó la manipulación de la variable independiente (Hernández, Fernández y Baptista, 2010).

3.5. Población y muestra

3.5.1. Población

La población para la investigación corresponde a la subcuenca del río Shullcas, ubicado en el distrito de El Tambo y Huancayo, provincia de Huancayo y región Junín.

3.5.2. Muestra

La muestra es de acuerdo al método no probabilístico intencional, en este caso correspondió a un tramo de aforo en la subcuenca del río Shullcas (Toma 24 de SEDAM Hyo).

3.6. Técnicas e instrumentos de recolección de datos

3.6.1. Observación directa

Mediante un procedimiento sistematizado y controlado, con el propósito de obtener los valores de los caudales medios mensuales en el río Shullcas.

3.6.2. Análisis de documentos

Basada en información bibliográfica e Internet, para la elaboración del marco teórico y demás componentes de la investigación.

Asimismo, lo que concierne al instrumento de recolección de datos, este será:

- Ficha para el levantamiento topográfico.
- Ficha para la información concerniente al aforo del río Shullcas.

3.7. Procesamiento de la información

El procesamiento de los datos se realizará mediante matrices de tabulación y gráficos esto en base a los datos obtenidos en campo tales como caudal, características topográficas, información del río Shullcas. Del mismo modo esta información será procesada en base a los paquetes computacionales ArcGIS, Hcanales, AutoCAD, Civil 3D y Office.

3.7.1. Pre campo

- Recopilación de información respecto la subcuenca en estudio
- Elaboración de fichas para la recolección de datos de campo.
- Elaboración de fichas topográficas.

3.7.2. Campo

Los trabajos de campo que se realizaron durante el periodo de estudio son los siguientes:

- Aforo del cauce del río Shullcas para los cálculos de caudales.
- Recopilación de información de entidades estatales como el Servicio Nacional de Meteorología e Hidrología del Perú (SENAMHI) y la Autoridad Nacional del agua (ANA).
- Obtención de información de estación meteorológica Shullcas de entidades estatales como el Servicio Nacional de Meteorología e Hidrología del Perú (SENAMHI).

3.7.3. Gabinete

- Revisión de los estudios hidrológicos que se realizaron en la subcuenca del río Shullcas.
- Ubicación de los puntos de aforo en río Shullcas.
- Descripción de las características geomorfológica de la subcuenca, como son: área, perímetro, longitud de cauce, pendiente del cauce, ancho promedio, los parámetros de forma y densidad de drenaje, de la subcuenca.
- Descripción de los registros históricos hidrológicos y meteorológicos que se disponen para el estudio.
- Procesamiento de los datos obtenidos, de la estimación de caudales.
- Análisis de los parámetros de los modelos hidrológicos empleados.
- Calibración de los modelos hidrológicos empleados para el estudio.

3.7.4. Elaboración de informe

- Elaboración del marco teórico.
- Elaboración del marco metodológico.
- Redacción de los resultados, discusiones, conclusiones, recomendaciones y anexos.

3.8. Técnicas y análisis de datos

Las técnicas y análisis de datos para el presente estudio fueron de acuerdo a lo considerado al análisis cuantitativo, para lo cual se usó la estadística descriptiva tal como la distribución de frecuencias, medida de tendencia central (media, mediana y moda), medidas de variabilidad (rango, desviación estándar y varianza) y gráficas.

3.9. Procedimiento de la investigación

3.9.1. Ubicación geográfica y política de la subcuenca del río

Shullcas

Ubicada en la región de Junín, en los distritos de Huancayo, Chilca, Huancan y El Tambo. El río Shullcas es afluente del río Mantaro en su margen izquierda y constituye uno de sus principales subcuencas, cuyo volumen hídrico abastece a la población de la ciudad de Huancayo. La subcuenca del río Shullcas está limitada por las coordenadas geográficas 11° 52' 13" a 12° 07' 00" de latitud sur y entre los meridianos 75° 01' 57" a 75° 14' 37" de longitud oeste.

La subcuenca del río Shullcas se asocia con el nevado del Huaytapallana, ubicada en la margen izquierda del río Mantaro, que comprende los distritos de

Huancayo, y El Tambo, y los anexos de Acopalca, Chamiseria, Vilcacoto, Cullpa Alta, Cullpa Baja, Cochas Chico, Cochas Grande e Incho Aza.

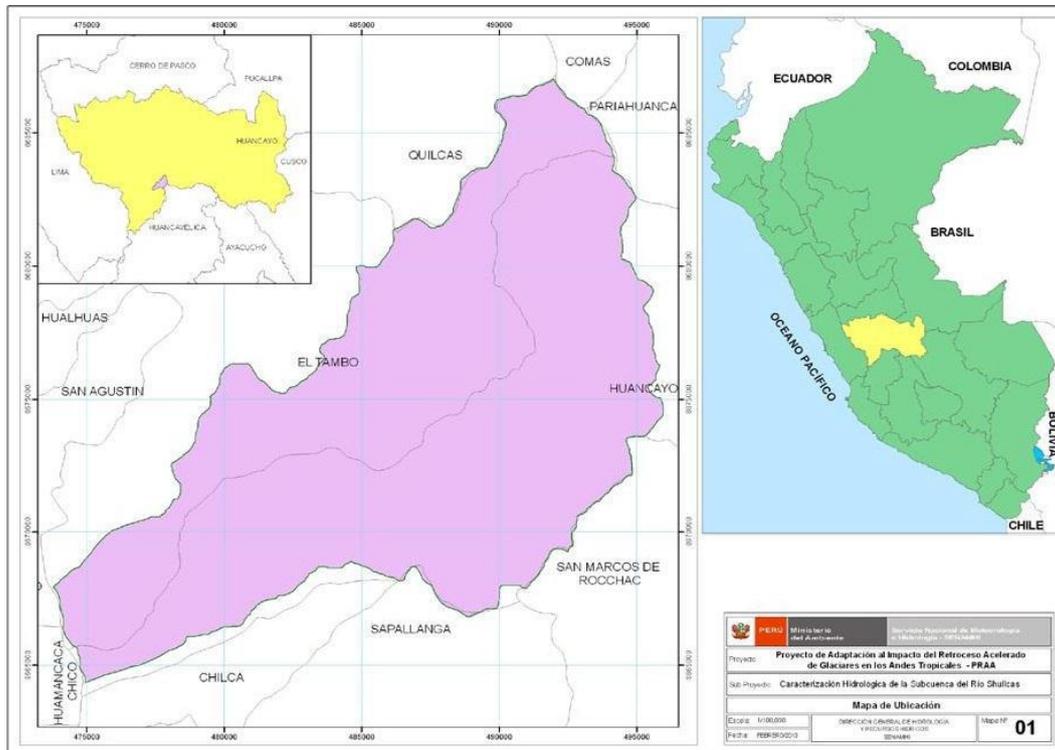


Figura 8. Ubicación política de la subcuenca del río Shullcas.

Fuente: SENAMHI (2013).

3.9.2. Punto de aforo

El punto de aforo de caudales del río Shullcas para el presente de estudio está determinado por las siguientes coordenadas geográficas UTM WGS84, tal como muestra la Tabla 9:

Tabla 9. Coordenadas geográficas del punto de aforo.

Punto	Descripción	Valor	Unidad
1	Este	484158	m
	Norte	8673068	m
	Elevación	3615	m.s.n.m.
	Huso	18	
	Zona	L	
	Datum	WGS84	

Fuente: Elaboración propia.



Figura 9. Punto de aforo de caudales del río Shullcas (imagen satelital).

Fuente: Elaboración propia.

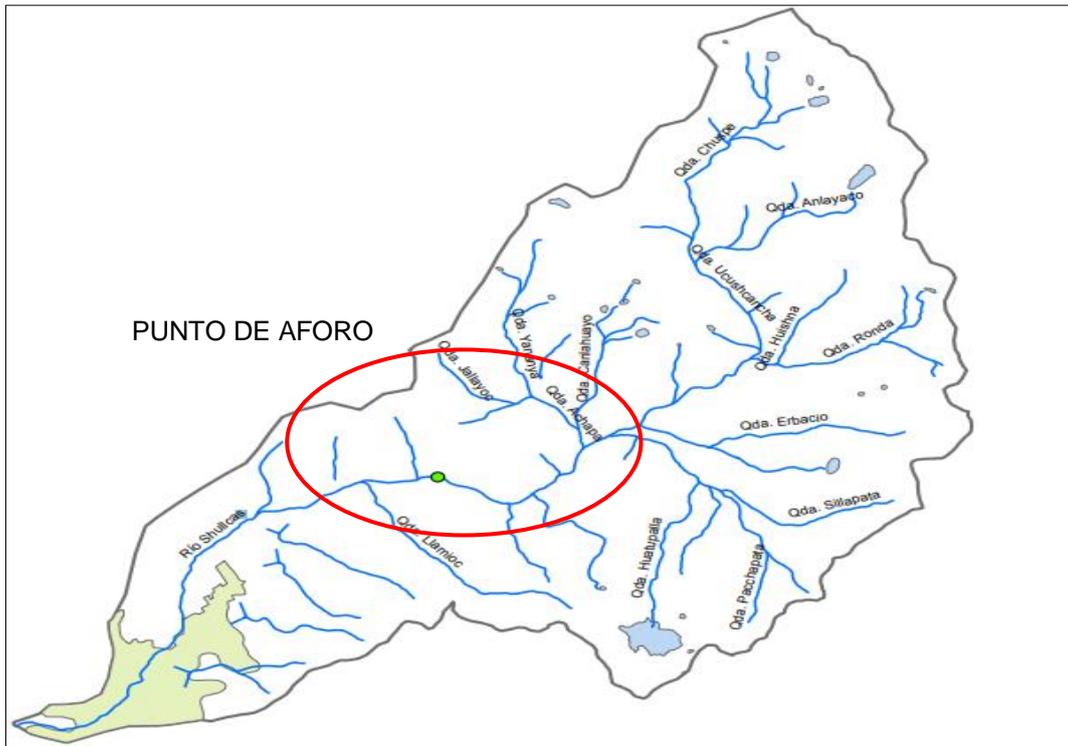


Figura 10. Punto de aforo de caudales y red hidrográfica de la sub cuenca Shullcas.

Fuente: Elaboración propia.



Fotografía 1. Punto de aforo de caudales del río Shullcas.

3.9.3. Obtención de registros

Estaciones meteorológicas e hidrológica

La información históricos que se requirieron para los modelos hidrológicos empleados en la presente tesis como la precipitación y otros variables climáticos de interés se obtuvieron de la estación meteorológica Shullcas, identificadas en la subcuenca del río Shullcas con coordenadas geográficas UTM WGS84 como muestra la Tabla 10 y su ubicación como se muestra en la Figura 11, la cual están siendo operadas y mantenidas por el Servicio Nacional de Meteorología e Hidrología del Perú (SENAMHI) a partir de estos registros se obtienen los datos generados a una escala mensual y anual. También la subcuenca del río Shullcas cuenta con la estación hidrológica como se aprecia en la Fotografía 2.

Los registros históricos como caudales, se obtuvieron desde la base de datos de la Autoridad Nacional del Agua (ANA).

Tabla 10. Coordenadas geográficas de la estación meteorológica Shullcas.

Punto	Descripción	Valor	Unidad
Estación Shullcas	Este	481856	m
	Norte	8673440	m
	Elevación	3750	m.s.n.m.
	Huso	18	
	Zona	L	
	Datum	WGS84	

Fuente: Elaboración propia.

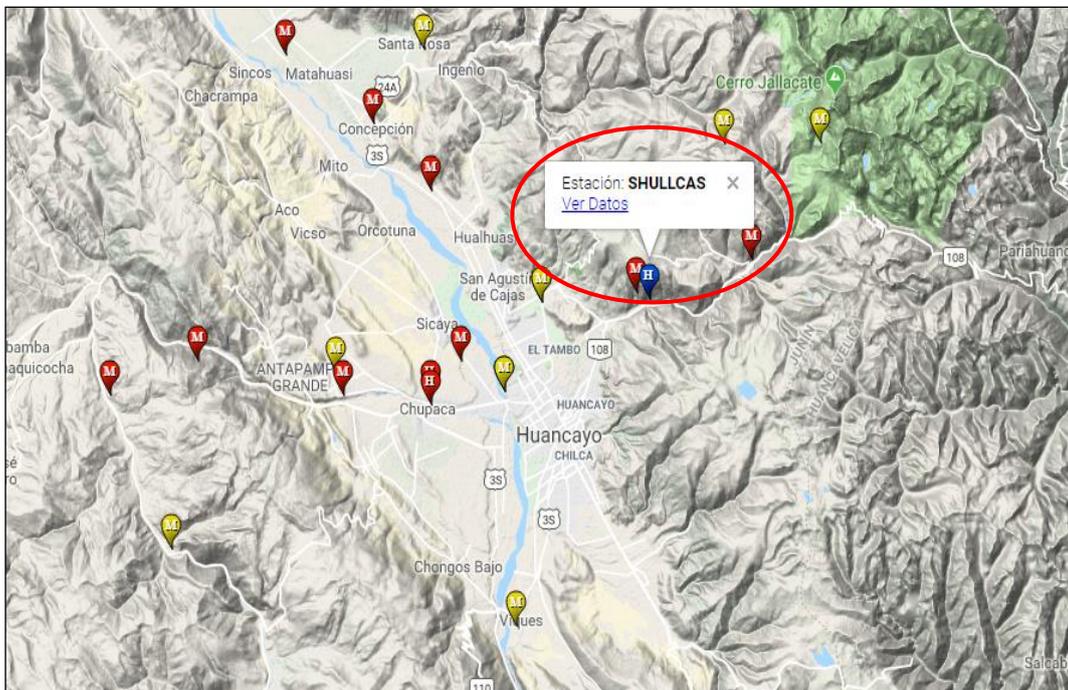


Figura 11. Ubicación de la estación meteorológica e hidrológica Shullcas.

Fuente: Elaboración propia.



Fotografía 2. Estación hidrológica Shullcas.

3.9.4. Parámetros geomorfológicos de la subcuenca

Para determinar los factores físicos de la subcuenca del río Shullcas se inició con la delimitación de la subcuenca, luego se realizó los cálculos del área de la subcuenca, el perímetro, pendiente, longitud del cauce principal, longitud total de los cauces, coeficiente de compacidad, factor de forma, densidad de drenaje y ancho medio de cuenca. También se determinaron los valores de hidrografía de la subcuenca.

3.9.5. Caudales promedio mensuales por el modelo Lutz Scholz

Para calcular los caudales promedio mensuales por el modelo hidrológico Lutz Scholz se realizó lo siguiente: cálculo de la evapotranspiración, coeficiente de escurrimiento, precipitación efectiva, retención de la cuenca, coeficiente de agotamiento, relación de caudales, gasto de la retención, abastecimiento de la retención y el caudal medio mensual de la subcuenca.

3.9.6. Caudales promedio mensuales por el modelo Thomas

Para calcular los caudales promedio mensuales por el modelo hidrológico Thomas se realizó lo siguiente: el cálculo del agua disponible, variable (Y), contenido de humedad del suelo, escorrentía directa, recarga de agua subterránea, almacenamiento de agua subterránea, caudal subterráneo y el caudal a la salida de la subcuenca.

3.9.7. Coeficiente de Nash y Bias

Para poder realizar la calibración de los modelos hidrológicos Lutz Scholz y Thomas se usaron los coeficientes de eficiencia de Nash y Bias dando validez con los caudales observados, caudales generados por los modelos y con los caudales aforados.

CAPÍTULO IV

RESULTADOS

En este capítulo se presenta los resultados obtenidos por el modelo hidrológico Lutz Scholz y Thomas, las cuales se utilizaron para los cálculos de caudales promedios mensuales del río Shullcas y las comparaciones respectivas de los modelos hidrológicos, calibrado con los caudales aforados y con los coeficientes de eficiencia de Nash y Bias, dando validez a los mismos.

4.1. Caudal promedio mensual en la subcuenca aplicando el modelo hidrológico de Lutz Scholz en la subcuenca del río Shullcas

4.1.1. Parámetros geomorfológicos de la cuenca

Tabla 11. Parámetros geomorfológicos de la subcuenca.

Parámetros	Subcuenca
Área (km ²)	213.78
Perímetro (km)	77.67
Longitud del cauce (km)	34.51
Ancho promedio (km)	6.19
K (adimensional)	1.49
Factor de forma (Ff)	0.18
Cota mínima (msnm)	3192.00
Cota máxima (msnm)	5288.00
Densidad de drenaje (Dd)	0.16
Pendiente del cauce (m/m)	0.06
Altitud media (msnm)	4240.00
Orden de corrientes	4.00

Fuente: Elaboración propia.

En la Tabla 11, se presenta los resultados de los parámetros geomorfológica la subcuenca del río Shullcas la cual presenta un área de 213.78 km² y un perímetro de 77.67 km².

4.1.2. Hidrografía

Tabla 12. Red de drenaje de la subcuenca Shullcas.

Subcuenca Shullcas		
Orden	Nº de ríos	longitud (km)
1er	48	103.75
2do	9	25.59
3er	4	10.05
4to	1	23.53
Total	62	162.92

Fuente: SENAMHI (2013).

El río Shullcas es el afluente del río Mantaro, siendo la principal fuente hídrica de esta subcuenca; es alimentado por los desagües de las lagunas Chuspicocha y Lazuntay, este segundo por la combinación del hielo glaciar del Nevado Huaytapallana, siendo el caudal permanente, en la Tabla 12 se observa el orden, la cantidad y la longitud de los ríos de la subcuenca del río Shullcas; resultando el río principal de cuarto orden con una longitud promedio de 23.53 km.

Tabla 13. Lagunas de subcuenca.

Laguna	Área	Caudal (lt/s)	Altitud (m.s.n.m.)	Coordenada	
	(Has)			E	N
Huacracocha	102	52.16	4430	489162	8686968
Lazo Huntay	23	5.31	4648	493543	8681908
Chuspicocha	38	47.04	4650	492968	8684488

Fuente: ANA (2010).

En la Tabla 13, se detalla las áreas, caudales y ubicación de las lagunas de la subcuenca del río Shullcas haciendo un total de áreas de lagunas de 1.63 km², la cual influye para el gasto de la retención de la subcuenca.

4.1.3. Precipitación promedio mensual de la subcuenca

Tabla 14. Precipitación total mensual (mm/mes) - periodo 1997-2011.

Año	Ene	Feb	Mar	Abr	May	Jun	Jul	Ago	Set	Oct	Nov	Dic	Anual
1997	139.6	180.2	122.0	45.0	12.6	1.5	1.0	20.3	43.0	79.9	116.6	204.1	965.8
1998	203.3	231.0	73.5	85.7	7.8	6.1	0.0	10.3	14.4	116.8	107.2	129.1	985.2
1999	125.6	212.9	144.8	31.1	21.0	23.3	13.8	0.3	59.3	80.9	84.5	106.9	904.4
2000	197.7	177.8	154.5	62.8	10.3	4.1	3.9	39.1	28.8	70.0	18.0	102.9	869.9
2001	249.4	107.8	127.7	36.5	33.3	2.9	11.8	4.3	35.3	51.5	67.3	107.7	835.5
2002	114.9	160.2	209.6	35.9	16.4	6.1	33.6	14.1	55.9	76.4	81.0	155.8	959.9
2003	175.5	181.9	169.1	77.1	27.5	0.9	1.4	53.6	53.3	45.0	73.5	165.5	1024.3
2004	51.6	165.4	102.9	26.1	22.9	14.1	17.9	20.0	50.9	93.0	104.1	168.3	837.2
2005	85.8	108.9	105.2	11.4	14.0	0.0	0.0	8.3	17.4	127.8	65.3	124.7	668.8
2006	224.7	110.1	116.4	43.1	2.8	11.4	0.0	25.7	36.4	92.4	108.5	132.7	904.2
2007	94.5	112.7	120.3	58.9	26.4	0.0	25.6	15.2	37.5	91.7	93.6	129.4	805.8
2008	217.0	123.3	56.6	45.2	15.5	8.2	0.0	8.0	33.9	116.4	68.7	122.9	815.7
2009	96.5	169.2	40.2	45.7	26.3	23.0	9.1	34.7	47.8	62.7	98.8	145.6	799.6
2010	328.0	278.7	54.0	54.9	0.9	5.1	11.2	10.9	25.5	67.8	54.7	118.2	1009.9
2011	159.5	210.5	55.6	89.6	15.2	0.0	10.6	11.4	80.8	67.7	84.8	129.5	915.2
Prom.	164.24	168.71	110.16	49.93	16.86	7.11	9.33	18.42	41.35	82.67	81.77	136.22	886.8
Desv.	73.74	50.76	48.13	21.97	9.36	7.74	10.24	14.46	17.33	24.00	25.41	27.44	95.93
Máx.	327.99	278.72	209.60	89.60	33.30	23.30	33.60	53.60	80.76	127.80	116.60	204.10	327.99
Mín.	51.60	107.80	40.19	11.40	0.88	0.00	0.00	0.30	14.40	45.00	18.00	102.90	0.00

Fuente: SENAMHI (2018).

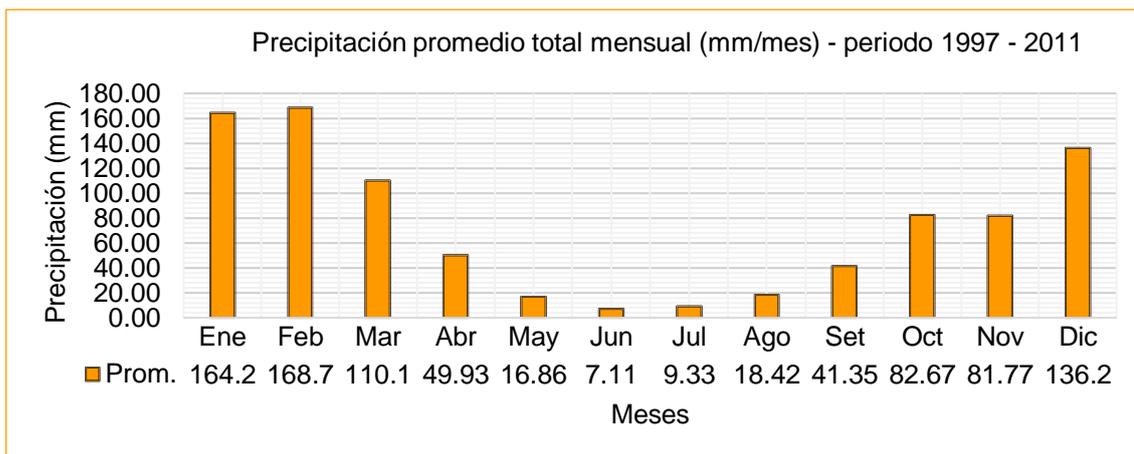


Figura 12. Precipitación promedio total mensual (mm/mes) - periodo 1997-2011.

Fuente: SENAMHI (2018).

La tabla y figura da a conocer la precipitación total mensual (periodo 1997-2011) correspondiente a la estación Shullcas, de acuerdo a SENAMHI, los cuales son datos de entrada para el modelo hidrológico Lutz Scholz.

4.1.4. Temperatura media mensual de la subcuenca

Tabla 15. Temperatura media mensual (°C).

Temperatura media mensual (°C) de la subcuenca del río Shullcas													
Zona	Ene	Feb	Mar	Abr	May	Jun	Jul	Ago	Set	Oct	Nov	Dic	Anual
Baja	13.1	13.0	12.9	12.5	11.8	11.0	10.5	11.5	12.4	13.2	13.6	13.3	12.4
Media	9.9	9.8	9.6	9.3	8.8	7.9	7.3	8.1	9.0	9.6	10.0	10.0	9.1
Alta	5.2	4.9	4.7	4.5	4.1	3.2	2.5	2.9	3.8	4.3	4.7	5.1	4.2
Promedio	9.4	9.2	9.1	8.8	8.2	7.4	6.8	7.5	8.4	9.0	9.4	9.5	8.6

Fuente: SENAMHI (2018).

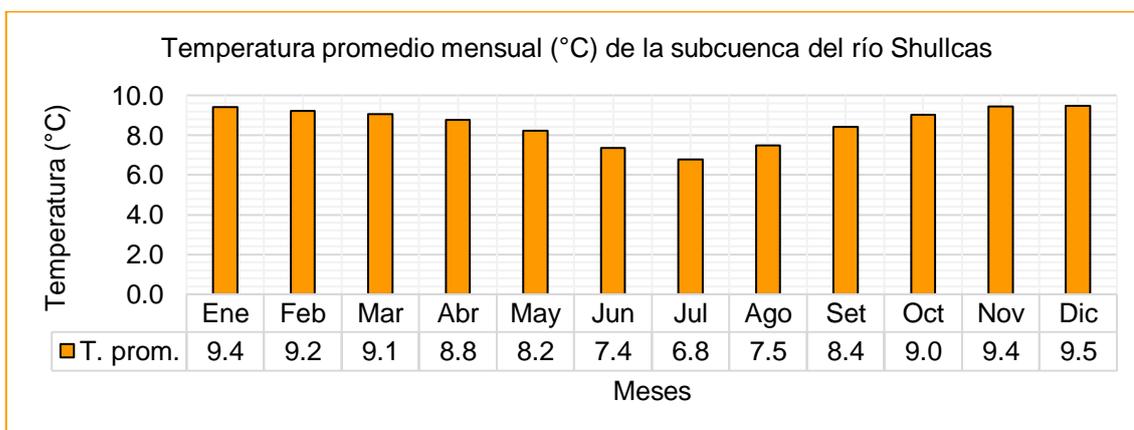


Figura 13. Histograma de temperatura promedio mensual (°C).

Fuente: SENAMHI (2018).

En la tabla y figura da a conocer la temperatura promedio mensual de la estación Shullcas, se observa en el mes de julio la temperatura mínima de 6.8 (°C), en el mes de diciembre la temperatura máxima de 9.5 (°C) y obteniéndose la temperatura promedio a nivel anual de 8.6 (°C).

4.1.5. Evapotranspiración

Tabla 16. Evapotranspiración promedio mensual.

Evapotranspiración			
Mes	días/mes	mm/día	mm/mes
Ene	30	3.66	109.9
Feb	28	3.41	95.5
Mar	31	3.32	102.8
Abr	30	3.20	96
May	31	2.98	92.3
Jun	30	2.89	86.6
Jul	31	2.91	90.1
Ago	31	3.25	100.7
Set	30	3.51	105.2
Oct	31	3.75	116.3
Nov	30	3.94	118.2
Dic	31	3.83	118.6
Anual			1232.2

Fuente: SENAMHI (2013).

En la tabla se da a conocer los datos de la evapotranspiración calculada generados para la subcuenca del río Shullcas.

4.1.6. Coeficiente de escurrimiento

Tabla 17. Coeficiente de escurrimiento por el método Turc.

Método de L - Turc		
Temperatura promedio anual: T	8.6	°C
Coeficiente de temperatura: L	546.8	
Déficit de escurrimiento: D	472.0	mm/año
Coeficiente de escurrimiento: C	0.47	

Fuente: Elaboración propia.

Los resultados que se obtuvieron del cálculo del coeficiente de escurrimiento generado por el método de Turc se detallan en la Tabla 17.

Tabla 18. Coeficiente de escurrimiento por el método Misión Alemana.

Método de la Misión Alemana		
Precipitación promedio anual: P	886.8	mm
Evaporación total Anual: ETP	1232.2	mm
Coeficiente de escorrentía: C	0.27	

Fuente: Elaboración propia.

Los resultados del cálculo del coeficiente de escurrimiento generado por el método de Misión Alemana, se muestran en la Tabla 18.

Los resultados del coeficiente de escurrimiento (C) obtenidos mediante el método de Turc y el método empírico comprenden valores de 0.47 y 0.27 respectivamente, estos valores nos dan referencia para la calibración del modelo.

4.1.7. Precipitación efectiva

Tabla 19. Precipitación efectiva según el Bureo of Reclamation.

P (mm)	P. Efectiva: PE (mm)		
	Curva I	Curva II	Curva III
0.0	0.0	0.0	0.0
10.0	0.0	1.0	2.0
20.0	0.0	2.0	4.0
30.0	0.0	3.0	6.0
40.0	0.5	4.0	8.0
50.0	1.0	6.0	11.0
60.0	1.5	8.0	14.0
70.0	3.0	10.0	18.0
80.0	4.0	14.0	24.0
90.0	5.5	18.0	30.0
100.0	8.0	23.0	39.0
110.0	11.0	29.0	48.0
120.0	15.0	36.0	58.0
130.0	19.0	43.0	68.0
140.0	24.0	52.0	78.0
150.0	30.0	60.0	88.0

160.0	37.0	69.0	98.0
170.0	45.0	79.0	108.0
180.0	55.0	89.0	118.0

Fuente: Scholz (1980).

Para realizar los cálculos de la precipitación efectiva el USBR (US Bureau of Reclamation) se cuenta con las tres clases de curvas de precipitación efectiva la cual está en función a la precipitación efectiva total, tal como se muestra en la Tabla 19.

Tabla 20. Coeficientes de regresión para las curvas de precipitación efectiva.

Coeficientes para el cálculo de la precipitación efectiva			
Coef.	Curva I	Curva II	Curva III
a0	-0.047000	-0.106500	-0.417700
a1	0.009400	0.147700	0.379500
a2	-0.000500	-0.002900	-0.010100
a3	0.000020	0.000050	0.000200
a4	-5.00E-08	-2.00E-07	-9.00E-07
a5	2.00E-10	2.00E-10	1.00E-09

Fuente: Scholz (1980).

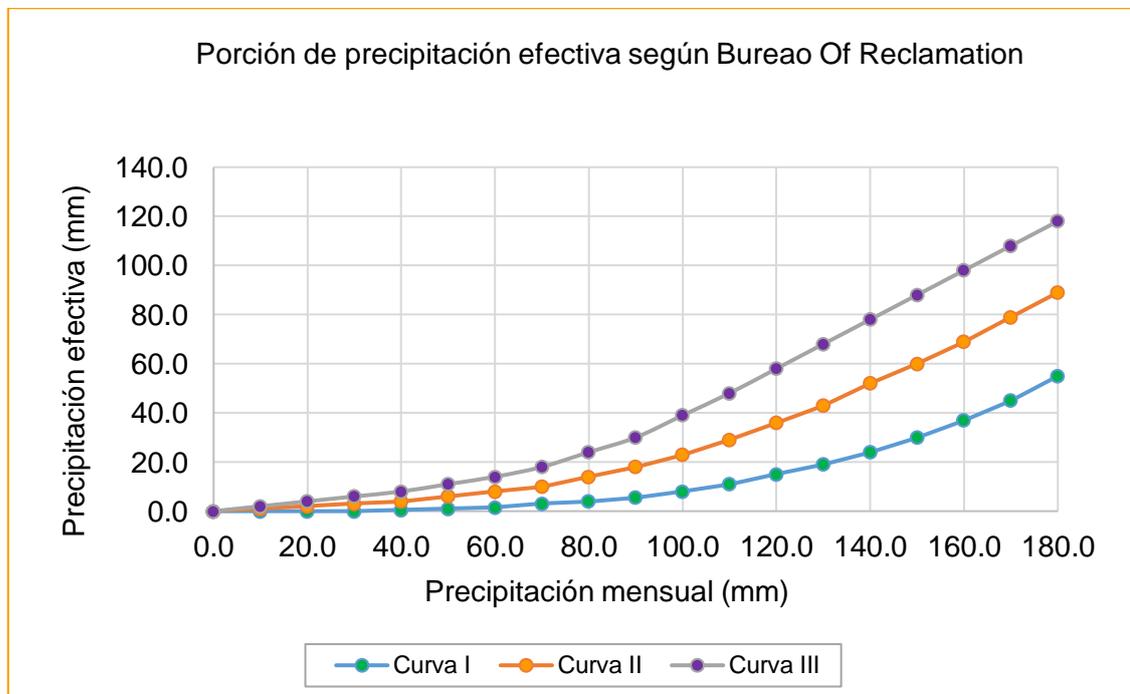


Figura 14. Ecuación polinómica de la precipitación efectiva.

Fuente: Scholz (1980).

Para poder calcular la precipitación efectiva de la subcuenca del río Shullcas es de mucha importancia determinar los coeficientes de la ecuación polinómica, la cuales se realizó la interpolación de estos valores con una regresión polinómica, en Tabla 20, se mencionan los valores de los coeficientes de la ecuación polinómica, estas fueron obtenidas mediante la correlación entre la precipitación y la precipitación efectiva correspondiente a cada curva, en la Figura 14, se muestra el grafico de las curvas mencionadas.

Tabla 21. Resultados de la precipitación efectiva.

Mes	N° días del mes	Precipitación mensual			
		P		Efectiva	
		Total (mm/mes)	PE II (mm/mes)	PE III (mm/mes)	PE (mm/mes)
Ene	30	164.2	45.8	140.2	102.2
Feb	28	168.7	47.7	144.1	105.3
Mar	31	110.2	21.6	69.9	50.5
Abr	30	49.9	5.1	13.0	9.8
May	31	16.9	1.8	4.0	3.1
Jun	30	7.1	0.8	1.8	1.4
Jul	31	9.3	1.1	2.4	1.9
Ago	31	18.4	1.9	4.3	3.3
Set	30	41.3	4.0	9.6	7.4
Oct	31	82.7	12.0	36.7	26.8
Nov	30	81.8	11.7	35.8	26.1
Dic	31	136.2	33.1	106.4	76.9
Año		886.8	186.5	568.3	414.8
Coeficientes		0.47	0.402	0.598	1.000

Fuente: Elaboración propia.

En Tabla 21, se presenta los resultados de la precipitación efectiva generados de la subcuenca de río Shullcas.

4.1.8. Retención de la cuenca

Para la retención de la cuenca (R) se realizó previamente el cálculo del área de la subcuenca del río Shullcas de 213.78 km², la cual también presenta áreas

de laguna como son: La laguna de Huacracoha, Lazo Huntay y Chuspicocha obteniéndose un área total de 1.63 km², por lo tanto, el gasto anual de la retención es de 2.3 mm/año.

4.1.9. Coeficiente de agotamiento

La zona de estudio es una subcuenca de vegetación mezclada (pastos, bosques y terrenos cultivados). Por lo tanto, es una cuenca de agotamiento mediano por retención mediana, utilizando las formulas empíricas mencionas en el marco conceptual, se obtiene el coeficiente de agotamiento (a) de 0.0125.

4.1.10. Relación de caudales

Para el cálculo de relación de caudales (Bo) se utilizó el coeficiente de agotamiento y el número de días del mes obteniendo el valor de 0.688.

4.1.11. Gasto de la retención

Tabla 22. Resultados del gasto de retención.

Mes	N° días del mes	Gasto	
		bi	Gi (mm/mes)
Ene	30	0.00	0.0
Feb	28	0.00	0.0
Mar	31	0.00	0.0
Abr	30	0.69	0.8
May	31	0.46	0.5
Jun	30	0.33	0.4
Jul	31	0.21	0.2
Ago	31	0.14	0.2
Set	30	0.11	0.1
Oct	31	0.07	0.1
Nov	30	0.00	0.0
Dic	31	0.00	0.0
Año		2.004	2.3

Fuente: Elaboración propia.

En la tabla se presenta los resultados del aporte de la retención mensual para los meses secos, no se consideran para los meses húmedos de enero, febrero, marzo, noviembre y diciembre.

4.1.12. Abastecimiento de la retención

Tabla 23. Resultados del abastecimiento de la retención.

Mes	N° días del mes	Abastecimiento	
		ai	Ai (mm/mes)
Ene	30	0.25	0.6
Feb	28	0.25	0.6
Mar	31	0.12	0.3
Abr	30	0.02	0.1
May	31	0.01	0.0
Jun	30	0.00	0.0
Jul	31	0.00	0.0
Ago	31	0.01	0.0
Set	30	0.02	0.0
Oct	31	0.06	0.1
Nov	30	0.06	0.1
Dic	31	0.19	0.4
Año		1.000	2.3

Fuente: Elaboración propia.

En la tabla, se presenta los resultados generados del abastecimiento de la retención generados de la subcuenca de río Shullcas.

4.1.13. Caudal promedio mensual por el modelo Lutz Sholz.

Tabla 24. Resultados de caudales promedios mensuales por el modelo Lutz Scholz.

Generación de caudales medios mensuales											
Mes	N° días del mes	Precipitación mensual				Contribución de la retención				Caudales generados	
		P	Efectiva			Gasto		Abastecimiento			
		Total (mm/mes)	PE II (mm/mes)	PE III (mm/mes)	PE (mm/mes)	bi	Gi (mm/mes)	ai	Ai (mm/mes)	mm/mes	m ³ /s
Ene	30	164.2	45.8	140.2	102.2	0.00	0.0	0.25	0.6	101.7	8.38
Feb	28	168.7	47.7	144.1	105.3	0.00	0.0	0.25	0.6	104.7	9.26
Mar	31	110.2	21.6	69.9	50.5	0.00	0.0	0.12	0.3	50.2	4.01
Abr	30	49.9	5.1	13.0	9.8	0.69	0.8	0.02	0.1	10.5	0.87
May	31	16.9	1.8	4.0	3.1	0.46	0.5	0.01	0.0	3.6	0.29
Jun	30	7.1	0.8	1.8	1.4	0.33	0.4	0.00	0.0	1.8	0.15
Jul	31	9.3	1.1	2.4	1.9	0.21	0.2	0.00	0.0	2.1	0.17
Ago	31	18.4	1.9	4.3	3.3	0.14	0.2	0.01	0.0	3.5	0.28
Set	30	41.3	4.0	9.6	7.4	0.11	0.1	0.02	0.0	7.5	0.61
Oct	31	82.7	12.0	36.7	26.8	0.07	0.1	0.06	0.1	26.7	2.13
Nov	30	81.8	11.7	35.8	26.1	0.00	0.0	0.06	0.1	26.0	2.14
Dic	31	136.2	33.1	106.4	76.9	0.00	0.0	0.19	0.4	76.5	6.11
Año		886.8	186.5	568.3	414.8	2.004	2.3	1.000	2.3	414.8	2.87
Coeficientes		0.47	0.402	0.598	1.000						

Fuente: Elaboración propia.

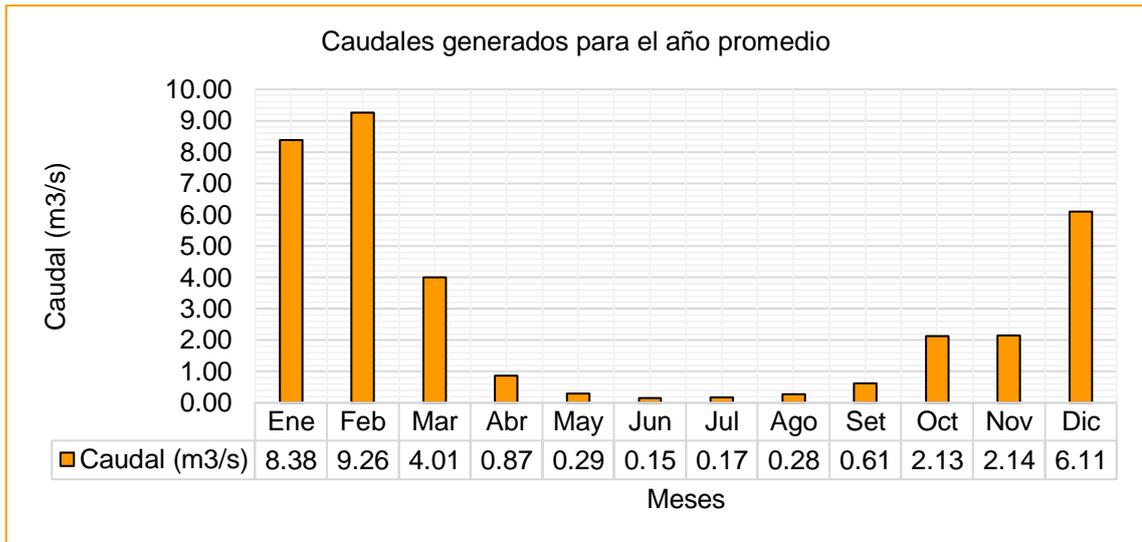


Figura 15. Histograma de caudales promedios mensuales por el modelo Lutz Scholz.

Fuente: Elaboración propia.

En Tabla 24, se muestran la estimación de caudales medios mensuales por el modelo hidrológico Lutz Scholz para el año promedio de la subcuenca de río Shullcas y en la Figura 15, se muestra el histograma de los caudales medios mensuales para el año promedio.

Tabla 25. Caudales observados y generados por el modelo Lutz Scholz.

Mes	Caudales	
	Observados m³/s	Generados m³/s
Ene	6.16	8.38
Feb	9.38	9.26
Mar	7.92	4.01
Abr	4.64	0.87
May	1.85	0.29
Jun	1.35	0.15
Jul	1.23	0.17
Ago	1.15	0.28
Set	1.19	0.61
Oct	1.34	2.13
Nov	1.67	2.14
Dic	3.21	6.11
Media anual	3.42	2.87

Fuente: Elaboración propia.

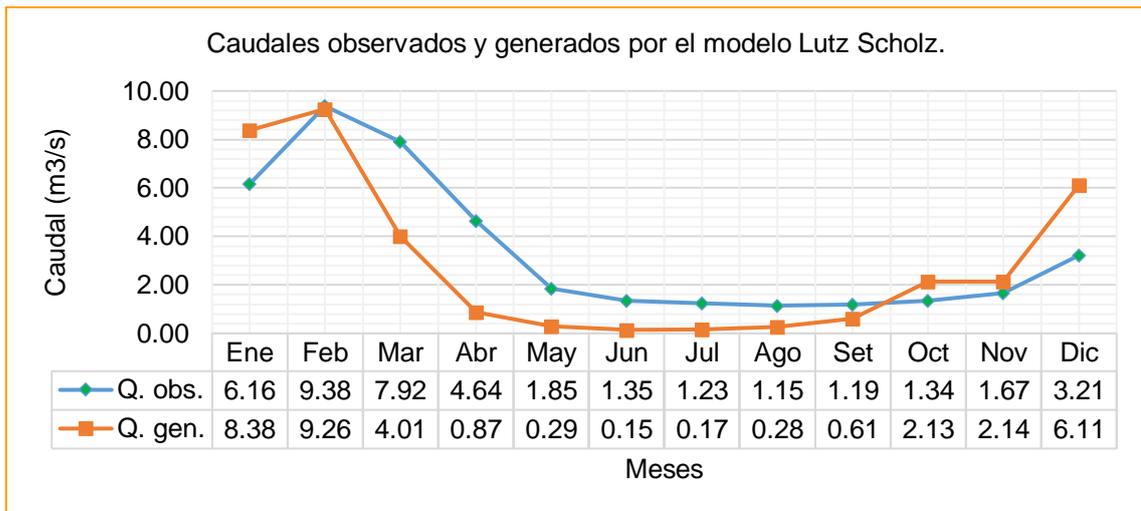


Figura 16. Histograma de caudales promedios mensuales observados y generados.

Fuente: Elaboración propia.

En Tabla 25, se presenta los valores de los caudales promedios mensuales observados y caudales promedios mensuales generados y en la Figura 16, se presenta el histograma de caudales observados y simulados para el año promedio de la subcuenca del de río Shullcas.

4.2. Caudal promedio mensual en la subcuenca aplicando el modelo hidrológico de Thomas en la subcuenca del río Shullcas

A continuación, se presenta los caudales promedio mensuales para el año promedio generados con el modelo hidrológico Thomas.

4.2.1. Característica geomorfológica de la sub cuenca

Tabla 26. Características geomorfológicas generales de la subcuenca.

Características generales de la subcuenca		
Nombre de subcuenca:	Shullcas	
Área de la subcuenca A:	213.78	km ²
Perímetro de la subcuenca: P	77.67	km
Cota mínima:	3192.00	msnm
Cota máxima:	5288.00	msnm
Altitud media de la subcuenca: H	4240.00	msnm

Fuente: Elaboración propia.

En la tabla se muestra las características geomorfológicas generales de la subcuenca, de las cuales, el modelo Thomas para estimar el caudal promedio mensual requiere del área de la cuenca.

4.2.2. Precipitación, evapotranspiración y caudal histórico

Tabla 27. Datos de entrada, precipitación, evapotranspiración y caudales históricos.

Mes	N° días del mes	Precipitación	Evapotranspiración	Caudal observado
		(mm/mes)	(mm/mes)	(m ³ /s)
Ene	30	164.24	109.90	6.16
Feb	28	168.71	95.50	9.38
Mar	31	110.16	102.80	7.92
Abr	30	49.93	96.00	4.64
May	31	16.86	92.30	1.85
Jun	30	7.11	86.60	1.35
Jul	31	9.33	90.10	1.23
Ago	31	18.42	100.70	1.15
Set	30	41.35	105.20	1.19
Oct	31	82.67	116.30	1.34
Nov	30	81.77	118.20	1.67
Dic	31	136.22	118.60	3.21
Año		886.75	1232.20	3.42

Fuente: Elaboración propia, en base a SENAMHI y ANA.

En la tabla se da a conocer los datos históricos de entrada que requiere el modelo hidrológico Thomas para el cálculo de caudales promedios mensuales.

4.2.3. Parámetros del modelo hidrológico Thomas

Para realizar los cálculos de los parámetros (a, b, c, d) y variables iniciales (S_{wo}, S_{go}) que tiene el modelo hidrológico Thomas, se utilizó la herramienta complemento de análisis “Solver” que tiene el programa de Microsoft Excel, mediante una búsqueda de una función objetiva.

Tabla 28. Parámetros y condiciones iniciales del modelo hidrológico Thomas.

Parámetros del modelo	
a	0.995
b	277.655
c	0.061
d	0.027
Valores iniciales	
Swo	222.902
Sgo	289.601

Fuente: Elaboración propia.

En la tabla, se presenta los resultados de los parámetros y condiciones iniciales del modelo hidrológico para la subcuenca del río Shullcas.

4.2.4. Aguas disponibles, variable (Yt) y contenido de humedad del suelo

Tabla 29. Resultado de aguas disponibles, variable Yt y contenido de humedad del suelo.

Mes	N° días del mes	Aguas disponibles	Variable	Contenido de humedad del suelo
		Wt	Yt	Sw(mm)
Ene	30	387.137	274.320	184.653
Feb	28	391.611	274.441	194.568
Mar	31	333.065	271.648	187.591
Abr	30	272.835	256.919	181.818
May	31	239.761	233.573	167.514
Jun	30	230.012	225.181	164.845
Jul	31	232.227	227.123	164.184
Ago	31	241.323	234.875	163.428
Set	30	264.247	251.918	172.469
Oct	31	305.569	268.072	176.336
Nov	30	304.670	267.897	175.019
Dic	31	359.121	273.303	178.294
Año				175.89

Fuente: Elaboración propia.

La tabla menciona los resultados del cálculo de aguas disponibles, la variable (Yt) y el contenido de humedad que presenta la subcuenca del río Shullcas.

4.2.5. Escorrentía directa

Tabla 30. Resultado de la escorrentía directa.

Mes	N° días del mes	Escorrentía directa
		Ro(mm)
Ene	30	105.935
Feb	28	110.023
Mar	31	57.671
Abr	30	14.945
May	31	5.811
Jun	30	4.537
Jul	31	4.793
Ago	31	6.054
Set	30	11.577
Oct	31	35.209
Nov	30	34.530
Dic	31	80.583
Año		39.31

Fuente: Elaboración propia.

Los resultados del cálculo de la escorrentía directa para la subcuenca del río Shullcas, se dan a conocer en la Tabla 30.

4.2.6. Caudal subterráneo

Tabla 31. Resultado del caudal subterráneo.

Mes	N° días del mes	Recarga de agua subterránea	Almacenamiento de agua subterránea	Caudal Subterráneo
		Rg(mm)	Sg(mm)	Qg(mm)
Ene	30	6.882	288.688	7.795
Feb	28	7.147	288.947	7.802
Mar	31	3.746	285.635	7.712
Abr	30	0.971	282.933	7.639
May	31	0.377	282.355	7.624
Jun	30	0.295	282.274	7.621
Jul	31	0.311	282.291	7.622
Ago	31	0.393	282.370	7.624
Set	30	0.752	282.720	7.633
Oct	31	2.287	284.215	7.674
Nov	30	2.243	284.172	7.673
Dic	31	5.235	287.085	7.751
Año				7.68

Fuente: Elaboración propia.

En la Tabla 31, se dan a conocer los resultados de los cálculos del caudal subterráneo, previamente se realizó los cálculos de la recarga de agua subterránea, luego el cálculo del almacenamiento de agua subterránea.

4.2.7. Caudal promedio mensual por el modelo Thomas.

Tabla 32. Resultados de caudales promedios mensuales por el modelo Thomas.

Mes	N° días del mes	Precipitación	Evapotranspiración	Caudal observado	Aguas disponibles	Variable Y	Contenido de humedad del suelo	Escorrentía directa	Recarga de agua subterránea	Almacenamiento de agua subterránea	Caudal Subterráneo	Caudales generados	
		(mm/mes)	(mm/mes)	(m3/s)	Wt	Yt	Sw(mm)	Ro(mm)	Rg(mm)	Sg(mm)	Qg (mm)	Q (mm)	Q (m ³ /s)
Ene	30	164.24	109.90	6.16	387.137	274.320	184.653	105.935	6.882	288.688	7.795	113.73	9.38
Feb	28	168.71	95.50	9.38	391.611	274.441	194.568	110.023	7.147	288.947	7.802	117.82	10.41
Mar	31	110.16	102.80	7.92	333.065	271.648	187.591	57.671	3.746	285.635	7.712	65.38	5.22
Abr	30	49.93	96.00	4.64	272.835	256.919	181.818	14.945	0.971	282.933	7.639	22.58	1.86
May	31	16.86	92.30	1.85	239.761	233.573	167.514	5.811	0.377	282.355	7.624	13.43	1.07
Jun	30	7.11	86.60	1.35	230.012	225.181	164.845	4.537	0.295	282.274	7.621	12.16	1.00
Jul	31	9.33	90.10	1.23	232.227	227.123	164.184	4.793	0.311	282.291	7.622	12.41	0.99
Ago	31	18.42	100.70	1.15	241.323	234.875	163.428	6.054	0.393	282.370	7.624	13.68	1.09
Set	30	41.35	105.20	1.19	264.247	251.918	172.469	11.577	0.752	282.720	7.633	19.21	1.58
Oct	31	82.67	116.30	1.34	305.569	268.072	176.336	35.209	2.287	284.215	7.674	42.88	3.42
Nov	30	81.77	118.20	1.67	304.670	267.897	175.019	34.530	2.243	284.172	7.673	42.20	3.48
Dic	31	136.22	118.60	3.21	359.121	273.303	178.294	80.583	5.235	287.085	7.751	88.33	7.05
Año		886.75	1232.20	3.42			175.89	39.31			7.68	46.99	3.88

parámetros	a	b	c	d	Swo(mm)	Sgo(mm)
valor	0.995	277.655	0.061	0.027	222.902	289.601

Fuente: Elaboración propia.

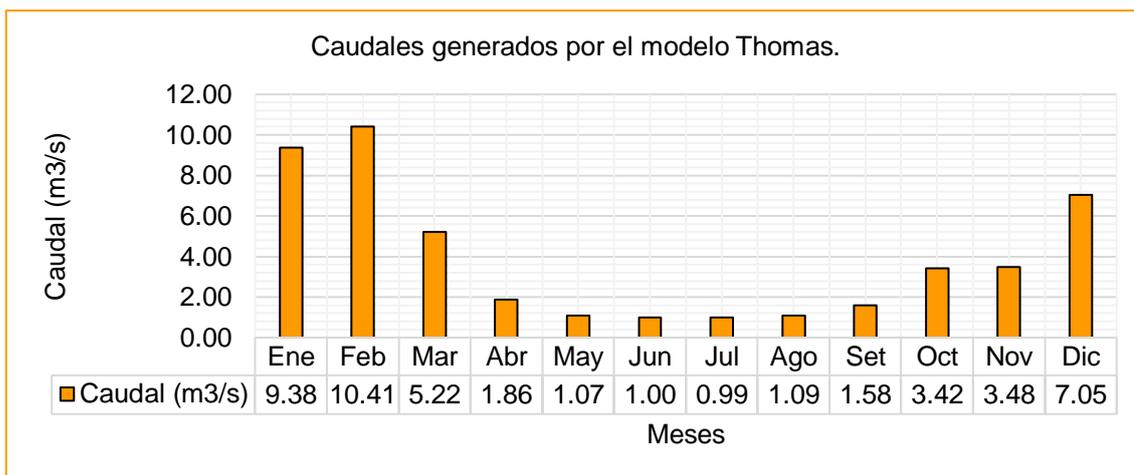


Figura 17. Histograma de caudales obtenidos por el modelo Thomas.

Fuente: Elaboración propia.

La Tabla 32 y la Figura 17, menciona los resultados de caudales promedios mensuales por el modelo hidrológico Thomas para el año promedio generados, de la subcuenca de río Shullcas.

Tabla 33. Caudales observados y generados por el modelo Thomas.

Mes	Caudales	
	Observados m3/s	Generados m3/s
Ene	6.16	9.38
Feb	9.38	10.41
Mar	7.92	5.22
Abr	4.64	1.86
May	1.85	1.07
Jun	1.35	1.00
Jul	1.23	0.99
Ago	1.15	1.09
Set	1.19	1.58
Oct	1.34	3.42
Nov	1.67	3.48
Dic	3.21	7.05
Media anual	3.42	3.88

Fuente: Elaboración propia.

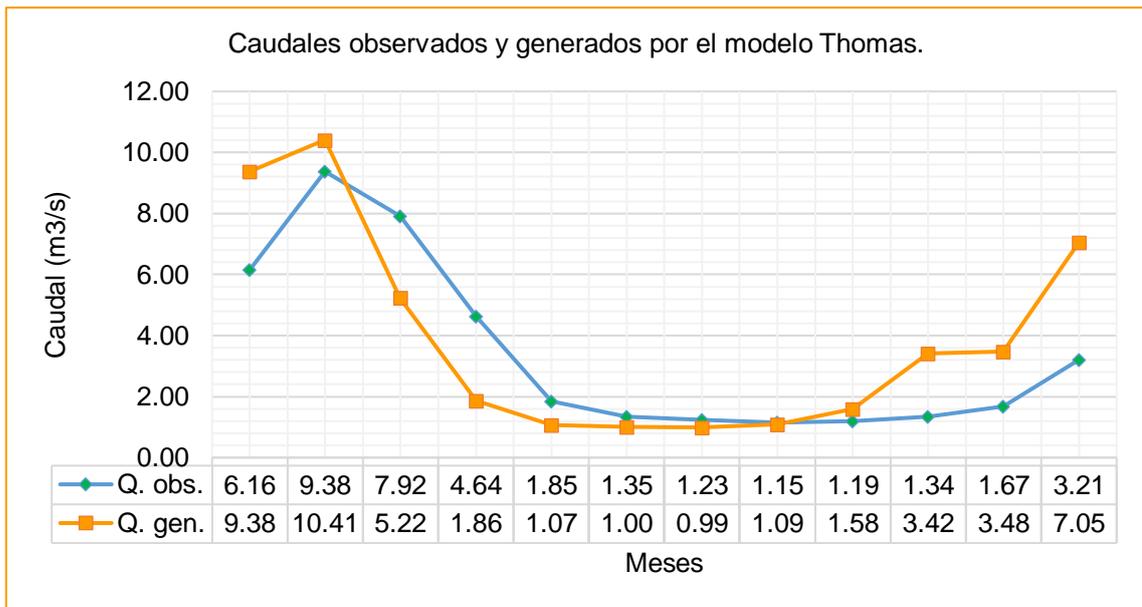


Figura 18. Histograma de caudales promedios mensuales observados y generados.

Fuente: Elaboración propia.

En Tabla 33, se menciona los resultados de los caudales promedios mensuales observados y caudales medios mensuales generados por el modelo hidrológico Thomas para el año promedio y en la Figura 18, se muestra el histograma de caudales observados y simulados para el año promedio de la subcuenca del de río Shullcas.

4.3. Coeficiente de Nash y Bias para el modelo hidrológico Lutz Scholz y Thomas

4.3.1. Coeficiente de Nash y Bias para el modelo Lutz Scholz

Caudales aforados

Tabla 34. Caudales aforados en el río Shullcas.

Punto	Día	Mes	Año	Caudal (m³/s)
1	22	Jul	2018	1.53
1	15	Ago	2018	1.61
1	14	Set	2018	1.89

Fuente: Elaboración propia.

En la tabla se menciona los caudales aforados en los meses de julio, agosto y setiembre del río Shullcas, para calcular los caudales se utilizó el método de Manning y para facilitar los cálculos, se modeló en el programa Hcanales.

Tabla 35. Caudales observados, caudales generados por el modelo Lutz Scholz y aforados.

Mes	Caudales		
	Observados m ³ /s	Generados m ³ /s	Aforados m ³ /s
Ene	6.16	8.38	
Feb	9.38	9.26	
Mar	7.92	4.01	
Abr	4.64	0.87	
May	1.85	0.29	
Jun	1.35	0.15	
Jul	1.23	0.17	1.53
Ago	1.15	0.28	1.61
Set	1.19	0.61	1.89
Oct	1.34	2.13	
Nov	1.67	2.14	
Dic	3.21	6.11	
Media anual	3.42	2.87	

Fuente: Elaboración propia.

En la tabla se da a conocer los resultados de caudales promedios mensuales, observados, caudales generados por el modelo hidrológico Lutz Scholz para el año promedio y aforados.

Tabla 36. Coeficientes de eficiencia del modelo Lutz Scholz.

Coeficiente de eficiencia	Criterios de eficiencia	
	Generado y observado	Generado y aforado
Nash(Q)	0.60	0.02
Bias	-0.56	-1.32

Fuente: Elaboración propia.

En la tabla se detallan los resultados de los coeficientes de eficiencia de Nash y Bias tanto del caudal generado y el caudal observado, como el caudal generado y el caudal aforado para el modelo hidrológico Lutz Scholz.

4.3.2. Coeficiente de Nash y Bias para el modelo Thomas

Tabla 37. Caudales observados, caudales generados por el modelo Thomas y aforados

Mes	Caudales		
	Observados m ³ /s	Generados m ³ /s	Aforados m ³ /s
Ene	6.16	9.38	
Feb	9.38	10.41	
Mar	7.92	5.22	
Abr	4.64	1.86	
May	1.85	1.07	
Jun	1.35	1.00	
Jul	1.23	0.99	1.53
Ago	1.15	1.09	1.61
Set	1.19	1.58	1.89
Oct	1.34	3.42	
Nov	1.67	3.48	
Dic	3.21	7.05	
Media anual	3.42	3.88	

Fuente: Elaboración propia.

En la tabla se da a conocer los resultados de caudales promedios mensuales, observados, caudales generados por el modelo hidrológico Thomas y caudales aforados.

Tabla 38. Resultados de los coeficientes de eficiencia del modelo Thomas.

Coeficiente de eficiencia	Criterios de eficiencia	
	Generado y observado	Generado y aforado
Nash(Q)	0.62	0.21
Bias	0.46	-0.45

Fuente: Elaboración propia.

En la tabla se dan a conocer los coeficientes de eficiencia de Nash y Bias tanto del caudal generado y el caudal observado, como el caudal generado y el caudal aforado para el modelo hidrológico Thomas.

4.3.3. Caudales obtenidos por el modelo Lutz Scholz y Thomas.

Tabla 39. Caudales observados y generados por el modelo Lutz Scholz y Thomas.

Mes	Caudales observados Q (m ³ /s)	Caudales generados	
		Modelo Lutz Scholz Q (m ³ /s)	Modelo Thomas Q (m ³ /s)
Ene	6.16	8.38	9.38
Feb	9.38	9.26	10.41
Mar	7.92	4.01	5.22
Abr	4.64	0.87	1.86
May	1.85	0.29	1.07
Jun	1.35	0.15	1.00
Jul	1.23	0.17	0.99
Ago	1.15	0.28	1.09
Set	1.19	0.61	1.58
Oct	1.34	2.13	3.42
Nov	1.67	2.14	3.48
Dic	3.21	6.11	7.05
Media anual	3.42	2.87	3.88

Fuente: Elaboración propia.

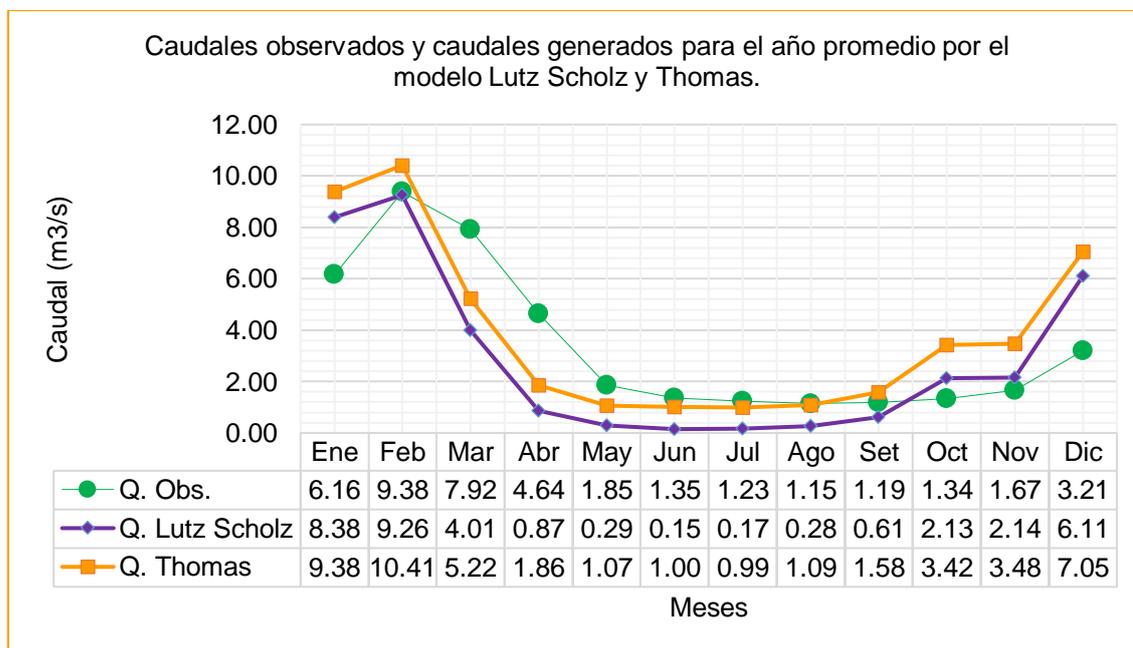


Figura 19. Histograma de caudales promedios mensuales por el modelo Lutz Scholz y Thomas.

Fuente: Elaboración propia.

En la Tabla 39 y en la Figura 19, se muestra los resultados de los caudales promedios para el año promedio, obtenidos por dos modelos hidrológicos.

CAPÍTULO V

DISCUSIÓN DE RESULTADOS

Para el presente capítulo se presenta la discusión de los resultados obtenidos de caudales promedios mensuales por los modelos hidrológicos Lutz Scholz y Thomas en la subcuenca del río Shullcas y sus respectivos coeficientes de eficiencia.

5.1. Caudal promedio mensual en la subcuenca aplicando el modelo hidrológico de Lutz Scholz en la subcuenca del río Shullcas

Se determinó los parámetros morfométricos de la subcuenca del río Shullcas, como se detalla en la Tabla 11, tal como recomienda la ZEE (2015) esto a fin de ser utilizado en el modelo hidrológico Lutz Scholz. Para obtener los datos de precipitación promedio mensual de la subcuenca se recurrió al SENAMHI; en la Tabla 14 se muestra la precipitación total mensual del periodo desde el año de 1997 hasta el año de 2011 del cual se estimó los datos de precipitación promedio mensual para el año promedio, se observa que en los meses de enero y febrero se presentan mayor precipitación, mientras que en los meses de junio y julio se presentan mínima precipitación ; al igual que en la

Tabla 15, se muestra la temperatura promedio mensual de la subcuenca del río Shullcas de las cuales se estimó la temperatura promedio anual de 8.6 (°C) requeridos por el modelo Lutz Scholz. Se realizó el cálculo de la evapotranspiración mensual para el año promedio como se muestra en la Tabla 16, obtenido de la base de datos de la entidad SENAMHI.

Para el cálculo del coeficiente de escurrimiento generado por el método de Turc obteniéndose 0.47 como se muestra en la tabla Tabla 17, como lo recomienda Scholz (1980) y por el método Misión Alemana el cálculo del coeficiente de escurrimiento obteniéndose 0.27 como se muestra en la Tabla 18, como lo menciona en su investigación Mamani (2015), se escogió el coeficiente de escurrimiento generados por el modelo Turc, ya que se ajusta mejor para la calibración del modelo Lutz Scholz. Se estimó la precipitación efectiva como muestra la Tabla 21, de acuerdo a las curvas de precipitación efectiva y los coeficientes de regresión de precipitación efectiva para las curvas como menciona el USBR (US Bureau of Reclamation); se realizó los cálculos para el gasto de la retención anual de la subcuenca obteniéndose el valor de 2.3 mm/año, los cálculos de coeficiente de agotamiento y la relación de caudales resultaron el valor de 0.0125 y 0.688 respectivamente; se determinó el gasto de la retención de la subcuenca del río Shullcas tal como muestra la Tabla 22, y el abastecimiento de la retención se muestra en la Tabla 23; todo esto según a las investigaciones similares realizadas por Mamani (2015) y Najarro (2015).

Finalmente se obtuvieron los resultados de los caudales medios mensuales para el año promedio por el modelo Lutz Scholz generados de la subcuenca del

río Shullcas, como se muestra en la Tabla 24, siendo que en el mes de febrero se obtuvo el mayor caudal de 9.26 m³/s., mientras que en el mes de junio el menor caudal de 0.15 m³/s.; la Tabla 25 muestra la comparación de los caudales observados con los caudales generados por el modelo Lutz Scholz y la Figura 16 muestra el comportamiento de los dos caudales para año promedio gráficamente.

5.2. Caudal promedio mensual en la subcuenca aplicando el modelo hidrológico de Thomas en la subcuenca del río Shullcas

Se determinó los parámetros geomorfológica generales de subcuenca del río Shullcas, tal como se muestra la Tabla 26, se utilizó el área de la subcuenca resultando de 213.78 km², requeridos por el modelo hidrológico Thomas, se determinó los datos de entrada del modelo como son la precipitación, evapotranspiración y caudales históricos, las cuales se obtuvieron de las entidades SHENAMI y ANA, como muestra la Tabla 27, según lo recomendado por la investigación de Saucedo (2014). Se procedió con la estimación de los parámetros (a, b, c, d) y las condiciones iniciales (Swo, Sgo), que presenta el modelo hidrológico Thomas, como se muestra en la Tabla 28, mediante una búsqueda de una función objetiva por la herramienta de complemento de análisis "Solver" que tiene el programa de Microsoft Excel.

Se realizó los cálculos de aguas disponibles, variables (Y) y contenido de humedad del suelo como se muestra en la Tabla 29, para el cálculo de la escorrentía directa los resultados obtenidos para el año promedio se detallan en la Tabla 30, la cual presenta una mayor recarga directa en el mes de febrero de 110.023 mm y la recarga directa mínima en el mes de junio de 4.537 mm,

en la Tabla 31, se estimaron los caudales subterráneos de la subcuenca previo a ello se calcularon la recarga de aguas subterráneas y el almacenamiento de agua subterránea, en base a la investigaciones realizadas por Lamprea (2011) y Saucedo (2014).

Finalmente se calcularon el caudal medio mensual para el año promedio de la subcuenca del río Shullcas mediante el modelo hidrológico Thomas, tal como se muestra en la Tabla 32, según los resultados generados para el año promedio, que en el mes de febrero se obtuvo el mayor caudal de 10.41 m³/s. mientras que en el mes de julio el menor caudal de 0.99 m³/s.; la Tabla 33 muestra la comparación de los caudales observados con los caudales generados por el modelo Thomas y la Figura 18 muestra el comportamiento de los dos caudales para año promedió gráficamente.

5.3. Coeficiente de Nash y Biass para el modelo hidrológico Lutz Scholz y Thomas

En la Tabla 34 se muestran los resultados de los caudales aforados en los meses de julio, agosto y setiembre en la tabla 35 se muestran la comparación de caudales observados, caudales generados y caudales aforados.

En la tabla 36 se muestran los coeficientes de eficiencia de Nash y Bias del modelo hidrológico Lutz Scholz, se obtuvieron los coeficientes de eficiencia de Nash y Bias de los caudales generados con los caudales observados de 0.60 y -0,56 respectivamente y de los caudales generados con los caudales aforados se obtuvieron los coeficientes de eficiencia de Nash y Bias de 0.02 y -1.32 respectivamente; de igual manera en la tabla 37 se muestran los coeficientes de eficiencia de Nash y Bias del modelo hidrológico Thomas, se obtuvieron los

coeficientes de eficiencia de Nash y Bias de los caudales generados con los caudales observados de 0.62 y 0.46 respectivamente y de los caudales generados con los caudales aforados se obtuvieron los coeficientes de eficiencia de Nash y Bias de 0.21 y -0.45 respectivamente, tal como lo recomiendan en sus investigaciones (Albuja y Tenelanda, 2014) y (Cruz y Romero, 2017).

Dando respuesta a la hipótesis planteada, los modelos hidrológicos permitieron estimar los caudales medios mensuales de manera óptima, resultando el modelo hidrológico de Thomas mejor que el de Lutz Scholz según los ajustes de bondad de Nash y Bias.

CONCLUSIONES

1. La aplicación de los modelos hidrológicos permitió estimar el caudal promedio mensual en la subcuenca del río Shullcas; resultando de acuerdo al modelo hidrológico Lutz Scholz de $2.87 \text{ m}^3/\text{s}$, mientras que para el modelo Thomas de $3.88 \text{ m}^3/\text{s}$; siendo el más óptimo con coeficientes de eficiencia de Nash y Bias, el modelo hidrológico Thomas.
2. El caudal promedio mensual en la subcuenca del río Shullcas aplicando el modelo hidrológico Lutz Scholz resultó como mínimo en el mes de junio con $0.15 \text{ m}^3/\text{s}$, el máximo en el mes de febrero con $9.26 \text{ m}^3/\text{s}$; asimismo, el caudal promedio anual resultó de $2.87 \text{ m}^3/\text{s}$.
3. El caudal promedio mensual en la subcuenca del río Shullcas aplicando el modelo hidrológico Thomas resultó como mínimo en el mes de julio con $0.99 \text{ m}^3/\text{s}$, el máximo en el mes de febrero con $10.41 \text{ m}^3/\text{s}$; asimismo, el caudal promedio anual resultó de $3.88 \text{ m}^3/\text{s}$.
4. Los coeficientes de eficiencia de Nash y Bias para el modelo hidrológico Lutz Scholz fueron de 0.60 y -0.56 lo cual representa que se tiene un ajuste “bueno”; mientras que para el modelo hidrológico Thomas, se obtuvieron los coeficientes de eficiencia de 0.62 y 0.46 representando así un ajuste “muy bueno”; por lo tanto, el modelo hidrológico que mejor se ajusta para la estimación de caudales medios mensuales en la subcuenca del río Shullcas es el modelo hidrológico Thomas.

RECOMENDACIONES

1. Se sugiere la utilización de modelos hidrológicos para la estimación de caudales promedio en subcuencas; no obstante, estos deben ser corroborados según los ajustes de bondad.
2. Para el uso del modelo hidrológico Lutz Scholz se recomienda calibrarlo con datos obtenidos en campo.
3. Mientras que, para el modelo Thomas se sugiere contar con datos históricos de caudales a fin de obtener los parámetros: a, b, c y d; para así realizar un correcto desarrollo del modelo; y de carecer de ellos se sugiere aforar por lo menos durante un año hidrológico.
4. Para la estimación de los coeficientes de eficiencia se recomienda contar por lo menos con datos históricos de 10 años.

REFERENCIAS BIBLIOGRÁFICAS

1. Albuja, E., y Tenelanda, D. (2014). *Desarrollo de un modelo conceptual de lluvia- escorrentía para interpretación de procesos hidrológicos en la cuenca altoandina del río Zhuracay*. Universidad de Cuenca.
2. ANA. (2010). *Evaluación de recursos hídricos superficiales en la cuenca del río Mantaro*. (Tomo I). Lima - Perú: Ministerio de Agricultura, Autoridad Nacional del Agua.
3. Barría, P. (2010). *Pronóstico de caudales medios mensuales en las cuencas de los ríos Baker y Pascua*. Universidad de Chile.
4. Bateman, A. (2007). *Hidrología básica y aplicada* (Primera). Venezuela: Grupo de Investigación en Transporte de Sedimentos.
5. Bernal, C. (2006). *Metodología de la investigación. Para administración, economía, humanidades y ciencias sociales*. (L. Gaona, Ed.) (Segunda). México: Pearson Educación.
6. Chavarri, E. (2005). *Apuntes del curso de modelos matemáticos en hidrología*. Lima - Perú.
7. Chow, V. Te. (1994). *Hidrología aplicada*. (M. E. Suarez, Ed.) (Primera). Santa Fé de Bogotá - Colombia: McGraw-Hill Latinoamericana, S.A.
8. Chow, V. Te. (2004). *Hidráulica de canales abiertos*. (M. E. Suarez, Ed.). Santa Fé de Bogotá - Colombia: McGraw-Hill Latinoamericana, S.A.
9. Cruz, E., y Romero, J. (2017). *Análisis comparativo de los modelos lluvia-escorrentía: Gr2m, Temez y Lutz-Scholz aplicados en la subcuenca del río Callazas*. Universidad Peruana de Ciencia Aplicadas.
10. Fattorelli, S., y Fernández, P. (2011). *Diseño Hidrológico* (Segunda Ed).

Mendoza - Argentina, Padova - Italia: WASA - GN.

11. Gámez, W. (2009). *Texto básico de hidrología* (Primera). Managua - Nicaragua: Editronic, S.A.
12. Hernández, R., Fernández, C., y Baptista, M. del P. (2010). *Metodología de la investigación*. (J. Mares, Ed.) (Quinta). México: McGRAW-HILL.
13. Lamprea, Y. (2011). *Estudio Comparativo de modelos multiparamétricos de balance hídrico a nivel mensual en cuencas hidrográficas*. Pontificia Universidad Javeriana.
14. Mamani, W. (2015). *Generación de descargas medias mensuales de la cuenca del río Coata mediante el método determinístico - estocástico Lutz Scholz*. Universidad Nacional del Altiplano.
15. Najarro, D. (2015). *Calibración del modelo Lutz Scholtz y generación de caudales extendidos aplicado a la cuenca del río Chacco*. Universidad Nacional de San Cristóbal de Huamanga.
16. Obregón, N., y Fragala, F. (2011). Estimación de la recarga media anual en los acuíferos de la sabana de Bogotá, *primera*, 26.
17. Ordoñez, J. (2011). Contribuyendo al desarrollo de una Cultura del Agua y la Gestión Integral de Recurso Hídrico. *Cartilla Técnica, Primera*, 44.
18. Polioptro, F., y Martínez-Austria, C. (2012). Efectos del cambio climático en la disponibilidad de agua en México.
19. Quispe, J. (2013). *Generación de caudales medios por modelos determinísticos Temez y Lutz Scholz en la cuenca del río zapatilla - llave*. Universidad Nacional del Altiplano.
20. Ruiz, J. (2016). *Evaluación de metodologías indirectas para la estimación*

de caudales medios mensuales en la zona del Piedemonte del departamento del Casanare. Universidad Nacional de Colombia.

21. Saucedo, M. (2014). *Modelación hidrológica precipitación - escorrentía usando el modelo de Thomas y algoritmos genéticos en la subcuenca del río Quilvire - Tacna.* Universidad Nacional Jorge Basadre Grohmann - Tacna.
22. Scholz, L. (1980). *Generación de caudales mensuales en la sierra peruana.* Plan Meris II. Cusco.
23. SENAMHI. (2013). *Disponibilidad hídrica actual y futura en la subcuenca del río Shullcas* (Primera ed). Lima - Perú: Ministerio del Ambiente - MINAM.
24. The Nature Conservancy. (2017). *Más allá de la fuente.*
25. ZEE. (2015). *Memoria descriptiva del estudio hidrológico y de cuencas del departamento de Junín a escala 1:10000.* (Primera, Ed.). Junín - Peru: Zoonificación ecológica y económica de la región Junín.

ANEXOS

ANEXO N° 01: MATRIZ DE CONSISTENCIA

Problema	Objetivos	Justificación	Marco teórico	Hipótesis	Variables	Metodología
<p>Problema general: ¿Cuál es el resultado de la aplicación de los modelos hidrológicos para estimar el caudal promedio mensual en la subcuenca del río Shullcas?</p> <p>Problemas específicos: a) ¿Cuánto es el caudal promedio mensual aplicando el modelo hidrológico de Lutz Scholz en la subcuenca del río Shullcas? b) ¿Cuál es el valor del caudal promedio mensual aplicando el modelo hidrológico de Thomas en la subcuenca del río Shullcas? c) ¿Cuál es el coeficiente de eficiencia de Nash y Biass para el modelo hidrológico Lutz Scholz y Thomas?</p>	<p>Objetivo general: Evaluar el resultado de la aplicación de los modelos hidrológicos para estimar el caudal promedio mensual en la subcuenca del río Shullcas</p> <p>Objetivos específicos: a) Calcular el caudal promedio mensual aplicando el modelo hidrológico de Lutz Scholz en la subcuenca del río Shullcas b) Estimar el valor del caudal promedio mensual aplicando el modelo hidrológico de Thomas en la subcuenca del río Shullcas. c) Determinar el coeficiente eficiencia de Nash y Biass para el modelo hidrológico Lutz Scholz y Thomas.</p>	<p>Social o práctica: La investigación contribuirá a resolver un problema real, el cual es el desconocimiento de la cantidad de recurso hídrico en la subcuenca del río Shullcas.</p> <p>Metodológica: Con esta investigación se pretende proponer estrategias para generar conocimientos, tal es la utilización de los modelos hidrológicos Lutz Scholz y Thomas.</p>	<p>Antecedentes nacionales Cruz, E. y Romero, J. (2017) en la investigación titulada: "Análisis comparativo de los modelos Lluvia-escorrentía: Gr2m, Temez y Lutz-scholz aplicados en la subcuenca del río Callazas". Mamani, W. (2015) en la investigación: "Generación de descargas medias mensuales de la cuenca del río Coata mediante el método determinístico - estocástico Lutz Scholz". Saucedo M. (2014) en la investigación titulada: "Modelación hidrológica precipitación - escorrentía usando el modelo de Thomas y algoritmos genéticos en la subcuenca del río Quilvire - Tacna".</p> <p>Antecedentes internacionales Ruiz, J. (2016) en la investigación titulada: "Evaluación de metodologías indirectas para la estimación de caudales medios mensuales en la zona del piedemonte del departamento del Casanare". Lamprea, Y. (2011) en la investigación titulada: "Estudio Comparativo de modelos multiparamétricos de balance hídrico a nivel mensual en cuencas hidrográficas de la Pontificia Universidad Javeriana". Barría, P. (2010) en la investigación: "Pronóstico de caudales medios mensuales en las cuencas de los ríos Baker y Pascua".</p>	<p>Hipótesis general: El resultado de la aplicación de los modelos hidrológicos permitirá estimar óptimamente el caudal promedio mensual en la subcuenca del río Shullcas.</p> <p>Hipótesis específicas: a) El cálculo del caudal promedio mensual aplicando el modelo hidrológico de Lutz Scholz en la subcuenca del río Shullcas, ofrece resultados aceptables con un ajuste de bueno . b) La estimación del valor del caudal promedio mensual aplicando el modelo hidrológico de Thomas en la subcuenca del río Shullcas, ofrece resultados aceptables con un ajuste de muy bueno c) El coeficiente de eficiencia de Nash y Biass para el modelo hidrológico Lutz Scholz y Thomas varía de 0 a 1.</p>	<p>Variable independiente: Modelos hidrológicos</p> <p>Dimensiones: -Modelo Lutz Scholz. -Modelo Thomas.</p> <p>Variable dependiente: Caudal medio mensual</p> <p>Dimensiones: - Caudal medio mensual. - Área - Volumen - Tiempo</p>	<p>Método: Método científico.</p> <p>Tipo: Aplicada.</p> <p>Nivel: descriptivo - correlacional</p> <p>Diseño: no experimental, de corte longitudinal</p> <p>Cuando: 2018</p> <p>Población: La población corresponde a la subcuenca del río Shullcas, ubicado en el distrito de El Tambo y Huancayo, provincia de Huancayo y región Junín.</p> <p>Muestra: La muestra es de acuerdo al método no probabilístico intencional, en este caso corresponde a un tramo de aforo en la subcuenca del río Shullcas (Toma 24 de SEDAM Hyo).</p>

ANEXO N° 02: DATOS HISTÓRICOS

Estación: Shullcas			
Latitud:	481856 m.	Región:	Junín
Longitud:	8673440 m.	Provincia:	Huancayo
Altitud:	3750 m.s.n.m.	Distrito:	Huancayo

Precipitación total mensual (mm/mes) - periodo 1997 - 2015													
Año	Ene	Feb	Mar	Abr	May	Jun	Jul	Ago	Set	Oct	Nov	Dic	Anual
1997	139.6	180.2	122.0	45.0	12.6	1.5	1.0	20.3	43.0	79.9	116.6	204.1	965.8
1998	203.3	231.0	73.5	85.7	7.8	6.1	0.0	10.3	14.4	116.8	107.2	129.1	985.2
1999	125.6	212.9	144.8	31.1	21.0	23.3	13.8	0.3	59.3	80.9	84.5	106.9	904.4
2000	197.7	177.8	154.5	62.8	10.3	4.1	3.9	39.1	28.8	70.0	18.0	102.9	869.9
2001	249.4	107.8	127.7	36.5	33.3	2.9	11.8	4.3	35.3	51.5	67.3	107.7	835.5
2002	114.9	160.2	209.6	35.9	16.4	6.1	33.6	14.1	55.9	76.4	81.0	155.8	959.9
2003	175.5	181.9	169.1	77.1	27.5	0.9	1.4	53.6	53.3	45.0	73.5	165.5	1024.3
2004	51.6	165.4	102.9	26.1	22.9	14.1	17.9	20.0	50.9	93.0	104.1	168.3	837.2
2005	85.8	108.9	105.2	11.4	14.0	0.0	0.0	8.3	17.4	127.8	65.3	124.7	668.8
2006	224.7	110.1	116.4	43.1	2.8	11.4	0.0	25.7	36.4	92.4	108.5	132.7	904.2
2007	94.5	112.7	120.3	58.9	26.4	0.0	25.6	15.2	37.5	91.7	93.6	129.4	805.8
2008	217.0	123.3	56.6	45.2	15.5	8.2	0.0	8.0	33.9	116.4	68.7	122.9	815.7
2009	96.5	169.2	40.2	45.7	26.3	23.0	9.1	34.7	47.8	62.7	98.8	145.6	799.6
2010	328.0	278.7	54.0	54.9	0.9	5.1	11.2	10.9	25.5	67.8	54.7	118.2	1009.9
2011	159.5	210.5	55.6	89.6	15.2	0.0	10.6	11.4	80.8	67.7	84.8	129.5	915.2
2012	100.7	136.1	56.4	105.9	15.2	12.5	8.9	10.4	48.1	56.8	85.7	133.2	769.7
2013	153.6	135.9	54.2	59.5	6.7	7.5	9.6	27.2	68.1	58.1	65.5	108.7	754.7
2014	164.0	79.0	54.0	55.9	56.8	9.9	15.3	11.2	73.8	59.4	81.7	125.3	786.4
2015	132.3	96.3	53.9	53.9	13.9	3.8	13.6	16.7	54.6	68.6	79.1	118.5	705.2
Prom.	158.6	156.7	98.5	53.9	18.2	7.4	9.9	18.0	45.5	78.0	81.0	133.1	858.8
Máx.	328.0	278.7	209.6	105.9	56.8	23.3	33.6	53.6	80.8	127.8	116.6	204.1	328.0
Min.	51.6	79.0	40.2	11.4	0.9	0.0	0.0	0.3	14.4	45.0	18.0	102.9	0.0

Estación: hidrométrica Chamisería (p.a.toma 24) río Shullcas

Latitud:	484449 m.	Región:	Junín
Longitud:	8673402 m.	Provincia:	Huancayo
Altitud:	3602 m.s.n.m.	Distrito:	Huancayo

Descargas mensuales del río Shullcas (m³/s) - periodo 1997 - 2011

Año	Ene	Feb	Mar	Abr	May	Jun	Jul	Ago	Set	Oct	Nov	Dic	Media anual
1997	5.75	6.62	6.80	2.63	1.42	1.16	1.59	1.52	1.42	1.30	2.26	6.39	3.24
1998	7.34	12.34	7.77	4.43	1.69	1.11	1.06	0.96	1.21	1.39	2.97	4.04	3.86
1999	5.12	11.45	9.56	4.41	1.90	1.96	1.84	1.58	1.54	2.12	1.29	2.77	3.80
2000	6.78	17.83	13.43	5.25	1.50	1.20	0.89	0.81	1.10	1.26	1.19	1.85	4.42
2001	13.59	16.97	11.12	5.97	1.80	1.35	1.33	1.22	1.28	1.42	1.81	4.07	5.16
2002	1.75	8.30	9.87	6.11	1.90	1.36	1.12	1.10	1.33	1.63	2.34	4.14	3.41
2003	3.97	8.55	10.19	6.74	2.70	1.42	1.28	1.15	1.03	1.04	1.20	2.42	3.47
2004	3.14	6.92	4.53	2.54	1.97	1.76	1.40	1.08	1.23	1.23	1.89	5.14	2.74
2005	2.96	3.19	4.77	2.00	1.43	1.13	0.96	1.05	0.97	1.66	1.55	2.73	2.03
2006	6.39	6.77	3.46	3.60	1.65	1.50	1.25	1.20	1.17	1.26	1.76	3.21	2.77
2007	5.29	3.67	5.08	2.99	1.71	1.24	1.34	1.20	1.15	1.19	1.75	2.41	2.42
2008	6.93	5.03	4.06	1.67	1.07	0.97	1.04	1.04	1.03	1.13	1.17	1.36	2.21
2009	1.43	4.90	3.69	2.43	1.26	1.16	1.12	1.10	1.15	1.21	1.93	2.64	2.00
2010	16.72	16.56	15.35	10.95	3.06	1.35	1.12	1.12	1.15	1.13	1.16	3.54	6.10
2011	5.28	11.53	9.09	7.82	2.66	1.60	1.14	1.09	1.14	1.14	0.75	1.38	3.72
Prom.	6.16	9.38	7.92	4.64	1.85	1.35	1.23	1.15	1.19	1.34	1.67	3.21	3.42

ANEXO N° 03: FICHA DE AFORO



FICHA DE AFORO

TESIS: APLICACIÓN DE LOS MODELOS HIDROLÓGICOS PARA ESTIMAR EL CAUDAL PROMEDIO MENSUAL EN LA SUBCUENCA DEL RÍO SHULLCAS

1. Datos

1.1. Fecha:

1.2. Ubicación:

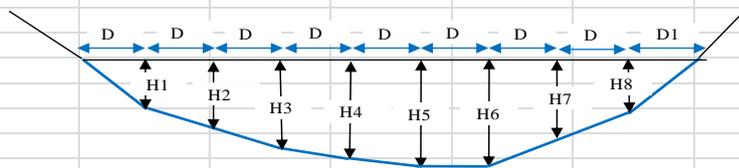
Región	Huancayo
Provincia	Huancayo
Distrito	El Tambo
Lugar	toma 24

1.3. Coordenadas:

Punto	Descripción	Valor	Unidad
1	Este	484158	m
	Norte	8673068	m
	Elevación	3615	
	Huso	18	
	Zona	L	
	Datum	WGS84	

2. Formato de aforamiento del río Shullcas

2.1. Medidas de la sección inicial del río

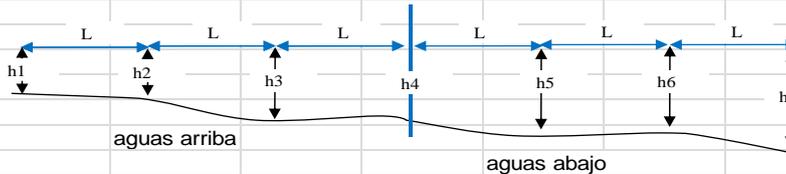


	Al. Ins.	V.atras	V.adelante	Unidad
H1:				m.
H2:				m.
H3:				m.
H4:				m.
H5:				m.
H6:				m.
H7:				m.
H8:				m.

	Valor	Unidad
D:		m.
D1:		m.

	Valor	Unidad
Área:		m ² .

2.1. Medidas de la pendiente del cauce medio del río



	Al. Ins.	V.atras	V.adelante	Unidad
h1:				m.
h2:				m.
h3:				m.
h4:				m.
h5:				m.
h6:				m.
h7:				m.

	Valor	Unidad
L:		m.

	Valor	Unidad
Pendiente:		m/m.

2.3. Cálculo del caudal

Ecuación de Manning

$$Q = \frac{1}{n} A R^{\frac{2}{3}} S^{\frac{1}{2}}$$

	Valor	Unidad
n:		
A:		m ² .
S:		m/m.
R:		
Q:		m ³ /s.

ANEXO N° 04: PANEL FOTOGRÁFICO



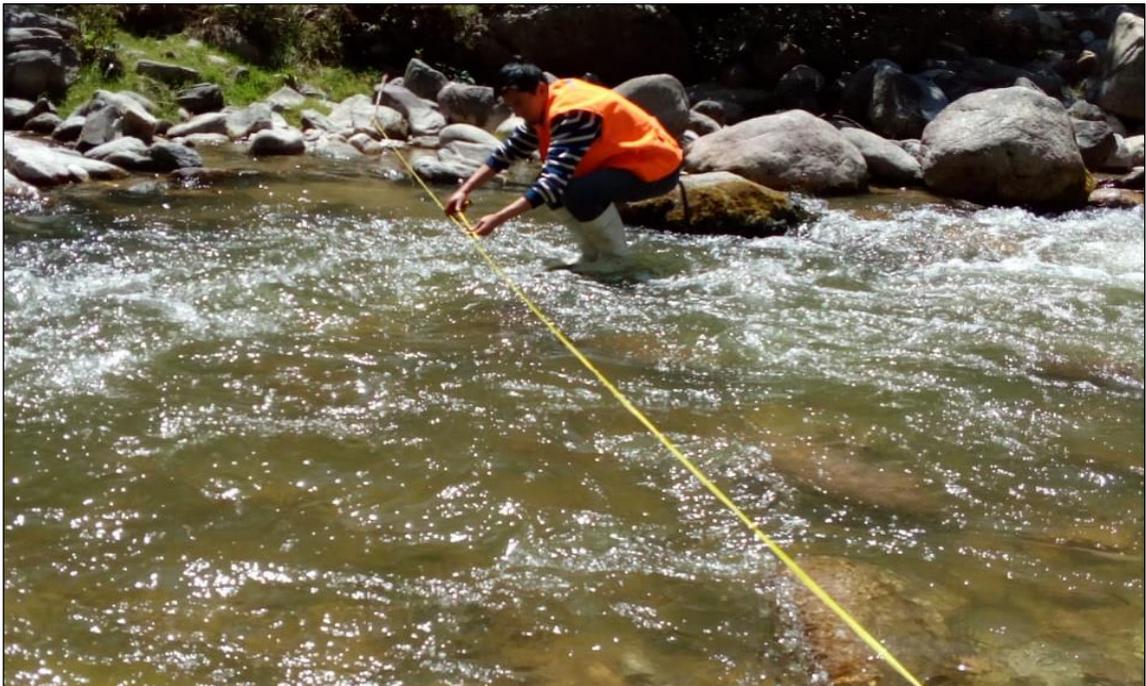
Fotografía 3. Georreferenciando el punto de aforo.



Fotografía 4. Nivelación y seccionamiento de río, en el punto de aforo.



Fotografía 5. Tomando medidas de la sección del río.



Fotografía 6. Realizando las mediciones cada 0.50m de la sección del río.



Fotografía 7. Tomando alturas de mira cada 0.50 m de la sección del río.



Fotografía 8. Tomando pendientes del cauce medio del río aguas arriba y aguas abajo.

ANEXO N° 05: OTROS DOCUMENTOS

ANEXO N° 06: PLANOS